



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

---

Roteiro para  
a Neutralidade  
Carbônica da  
Indústria Cerâmica  
até 2050

#### **Ficha Técnica**

##### **Propriedade**

Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e Cristalaria (APICER)

Rua Coronel Veiga Simão

Lufapo Hub, Edifício A, n.º 40 - 1.º Piso

3025-307 COIMBRA

[www.apicer.pt](http://www.apicer.pt)

e-mail: [info@apicer.pt](mailto:info@apicer.pt)

Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV)

iParque - Lote 6

3040-540 ANTANHOL

[www.ctcv.pt](http://www.ctcv.pt)

e-mail: [centro@ctcv.pt](mailto:centro@ctcv.pt)

**Autoria e coordenação editorial:** António Baio Dias, Marisa Almeida,  
Inês Rondão, Isabel Antunes, Pedro Frade, Milene Lopes, Victor Francisco,  
Sandra Carvalho, Carlos Monteiro, Andreia Tiago, Albertina Sequeira, Cristiana Claro.

**Design Gráfico:** Slideshow - Creative Agency


Edição: 2025



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

---

Roteiro para  
a Neutralidade  
Carbônica da  
Indústria Cerâmica  
até 2050

The image shows a close-up, top-down view of dry, reddish-brown soil. The soil is cracked and has a granular texture. A white rectangular text box is centered in the lower half of the image. In the top right and bottom left corners, there is a faint, light-colored geometric pattern consisting of interconnected lines forming a mesh-like structure.

A redação do Roteiro para a Neutralidade Carbónica da Indústria Cerâmica até 2050 é da responsabilidade da Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e de Cristalaria (APICER) e do Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), no âmbito do projeto CeramicLowCO<sub>2</sub>, financiado pelo PRR, liderado pela APICER.

# Índice

<b>Preâmbulo</b> .....	<b>06</b>	Hidrogénio verde.....	109
<b>Prefácio</b> .....	<b>07</b>	O hidrogénio como gás renovável na descarbonização da indústria cerâmica.....	110
<b>Abordagem metodológica e organização</b> .....	<b>08</b>	O hidrogénio como combustível hipocarbónico, características e propriedades: utilização na indústria cerâmica.....	118
<b>Enquadramento setorial da indústria cerâmica</b> .....	<b>09</b>	O contributo das redes de gás natural na descarbonização da indústria .....	125
Caracterização da indústria cerâmica europeia e nacional.....	11	Sistemas de armazenamento de energia para a descarbonização da indústria cerâmica .....	127
Processo de fabrico cerâmico.....	17	Novos processos de fabrico .....	134
<b>Caminhos para a descarbonização do setor</b> .....	<b>21</b>	Granulação de pó para pavimento e revestimento cerâmico e louça de mesa ("via seca") .....	134
Alterações climáticas e a necessidade de descarbonização .....	22	Radiação de micro-ondas: uma contribuição para a indústria cerâmica.....	140
Enquadramento regulamentar de descarbonização no contexto europeu e português.....	28	Sinterização flash .....	145
Principais fontes de GEE no fabrico cerâmico .....	33	Economia circular .....	146
Vetores de descarbonização e principais tecnologias e medidas disponíveis para o setor .....	35	Matérias-primas alternativas para a descarbonização da indústria cerâmica.....	150
<b>Indicadores atuais e necessidades de descarbonização até 2050</b> .....	<b>41</b>	Captura, utilização e armazenamento de carbono como opção de descarbonização para a indústria cerâmica .....	156
Diagnóstico do setor (contexto europeu e nacional) .....	42	Contributo da digitalização para a transição energética na indústria cerâmica.....	164
Evolução do consumo de energia por subsetor da cerâmica.....	44	<b>Evolução prevista para o setor até 2050: produção, consumos e emissões de gases com efeito de estufa</b> .....	<b>169</b>
Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> por subsetor da cerâmica.....	45	Projeções de produção .....	170
Necessidades de descarbonização no contexto nacional .....	46	Consumo global de energia térmica e eletricidade – business as usual .....	172
<b>Principais tecnologias e medidas de descarbonização</b> .....	<b>49</b>	Emissões globais de gases com efeito de estufa – business as usual..	
Otimização da eficiência energética .....	50	<b>Trajetórias custo-eficazes de redução de emissões de gases com efeito de estufa</b> .....	<b>175</b>
Contributo energético das bombas de calor para a descarbonização da indústria cerâmica .....	52	Análise de custos e benefícios resultante da implementação das medidas, técnicas e tecnologias.....	176
Ciclo orgânico de rankine: contributos de eficiência energética para a descarbonização da indústria cerâmica.....	54	Propostas de trajetórias de redução de emissões de gases com efeito de estufa.....	179
Eletrificação dos processos térmicos .....	60	Indústria cerâmica.....	180
Moagem a seco com classificação dinâmica e granulação avançada.	61	Cerâmica estrutural .....	181
Eletrificação do processo de atomização.....	62	Pavimento e revestimento cerâmico .....	182
Bombas de calor de alta temperatura no setor cerâmico .....	63	Louça sanitária .....	183
Secagem de pavimento e revestimento cerâmico através de aquecimento por micro-ondas.....	66	Cerâmica utilitária e decorativa .....	184
Secagem de cerâmica de pavimento/revestimento através de aquecimento por infravermelhos .....	68	Cerâmica técnica, refratários e outros.....	185
Fornos elétricos .....	70	<b>Capacitar para a descarbonização</b> .....	<b>187</b>
Produção de energia elétrica verde.....	75	Competências para a descarbonização.....	188
Contributo do solar fotovoltaico na descarbonização da indústria cerâmica.....	75	Desafios vs oportunidades.....	189
Energia descentralizada: as comunidades de energia como fator de competitividade.....	82	Caminhos para a capacitação da força laboral.....	190
Descarbonizar até 2050: desafios atuais e futuros do mercado elétrico na transição energética .....	85	Re-skilling e up-skilling da força laboral .....	191
O potencial papel da energia nuclear no futuro descarbonizado da indústria cerâmica .....	90	Acelerar a capacitação para a descarbonização através da ação coletiva .....	193
Biocombustíveis .....	97	Sustentabilidade – dimensão social e dimensão ambiental .....	194
Biomassa sólida .....	97	Responsabilidade ambiental .....	195
Os biocombustíveis avançados na indústria cerâmica.....	98	Responsabilidade social.....	199
O biometano e a descarbonização do setor da cerâmica .....	101	Perspetivas futuras da responsabilidade ambiental e social na indústria cerâmica: alinhamento legal e sustentabilidade.....	200
Produção de biometano através da gaseificação da biomassa: contribuições para a descarbonização da indústria cerâmica .....	105	<b>Considerações finais</b> .....	<b>203</b>

# PREÂMBULO

A indústria cerâmica portuguesa, adquiriu e mantém um papel relevante na economia nacional assumindo-se com uma indústria fortemente exportadora em que a maioria das empresas usam as melhores tecnologias disponíveis. Pelas suas características intrínsecas é uma indústria caracterizada pelo elevado consumo de gás natural e por emissões de gases de efeito estufa.

Num cenário de urgência climática e compromissos com as políticas europeias como seja o Acordo de Paris e o Pacto Ecológico Europeu, a indústria cerâmica enfrenta um duplo desafio: reduzir a pegada de carbono sem sacrificar a sua competitividade e crescimento sustentável.

Por isso, a transição para a neutralidade carbónica tornou-se um objetivo estratégico inadiável. Nesse contexto, a inovação, a eficiência energética e a adoção de novas fontes de energia serão essenciais para alinhar a indústria cerâmica com as metas de descarbonização da economia.

Este cenário traz tanto de desafios quanto de oportunidades.

Diante da crise climática, é crucial que haja uma ação urgente e coordenada de todos, e a indústria cerâmica, com a sua longa tradição e importância no tecido económico nacional, não é exceção.

Implementar medidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) é vital para garantir não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a competitividade e a resiliência do setor a longo prazo. A neutralidade carbónica na indústria cerâmica requer um esforço conjunto ao longo de toda a cadeia de valor, desde a extração das matérias-primas até o produto final. Para isso, a ino-

vação tecnológica, a eficiência energética, a eletrificação dos processos, a adoção de novos vetores energéticos e a implementação de práticas de economia circular são pilares fundamentais para alcançar os objetivos estabelecidos.

Este Roteiro visa indicar um caminho para a descarbonização do setor cerâmico, em alinhamento com as metas nacionais e europeias de redução de emissões até 2050. Por um lado, apresenta uma visão para a descarbonização do setor, definindo princípios, metas e ações concretas para equilibrar as emissões e a sua compensação. Por outro, procura mobilizar todas as partes interessadas — empresas, instituições de investigação, governo, administração central e sociedade civil — para a construção de um futuro mais sustentável.

Mais do que um compromisso, este Roteiro é um convite à ação.

O futuro da indústria cerâmica portuguesa assenta na sua capacidade de converter desafios em oportunidades, promovendo a inovação, a sustentabilidade e a adaptação às novas exigências do mercado global. A neutralidade carbónica é um objetivo ambicioso, mas alcançável, desde que se adote uma atuação colaborativa e inovadora.

# PREFÁCIO

Por amável convite da APICER tive a oportunidade de participar, ainda que à distância por coincidir com uma sessão plenária do Parlamento Europeu em Estrasburgo, no lançamento do Ceramic Low CO<sub>2</sub> ocorrido no dia 7 de fevereiro de 2024. Sublinhei na altura que a elaboração de um roteiro de descarbonização marcava uma etapa fundamental de compromisso da indústria portuguesa da cerâmica com a descarbonização e em simultâneo com a modernização de processos e de modelos criação de valor fundamentais para assegurar a sua competitividade e sustentabilidade.

Os momentos de transição são sempre desafiantes e marcados pela incerteza. Vivemos tempos de incerteza geopolítica, de incerteza tecnológica, de incerteza regulatória face às pressões que um novo ciclo político colocará ao quadro legislativo europeu e nacional, e de incerteza no comportamento dos mercados.

Este roteiro é um antídoto dinâmico contra a incerteza, por aquilo que contém, mas também pelo processo colaborativo de consolidação estratégica a que dá origem. Indica um caminho, fixa objetivos que são decisivos para o futuro da indústria e para a sociedade em geral e articula esforços em toda a cadeia de valor, criando uma comunidade de mudança para minimizar os choques e potenciar as sinergias.

A inércia não é uma opção e não tem sido uma prática da indústria cerâmica portuguesa. Chegou agora o momento de aumentar a ambição usando este *Roadmap* como integrador de experiência e de conhecimento interno e externo, caracterizador de contextos, monitorizador das dinâmicas de transformação e promotor do entrosamento ativo entre os vários atores.

A partir dele, estou certo, emergirão necessidades de capacitação e requalificação das pessoas, de soluções de financiamento por medida, de parcerias de desenvolvimento científico, inovação e maturação tecnológica e de estratégias fortes de acesso e consolidação dos mercados.

Ter uma indústria da cerâmica mais preparada para enfrentar os desafios do presente e do futuro faz parte de um roteiro de sucesso.

## **Carlos Zorrinho**

*Ex-Eurodeputado - Membro Efetivo da Comissão de Indústria, Investigação e Energia*

# ABORDAGEM METODOLÓGICA E ORGANIZAÇÃO

O Roteiro para a Neutralidade Carbónica da Indústria Cerâmica até 2050 pretende ser um documento orientador que procura identificar e apresentar abordagens tecnicamente exequíveis, economicamente viáveis, socialmente aceites, para a descarbonização do setor, alinhadas com as políticas e metas nacionais e europeias de descarbonização a curto, médio e longo prazo.

Para o seu desenvolvimento, procedeu-se à caracterização detalhada do setor, através do levantamento exaustivo de dados, em colaboração com os fabricantes dos diferentes subsectores da cerâmica. Foram analisados dados de produção, consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>; e identificadas as principais fontes de emissão de GEE e o seu potencial de descarbonização. A partir dos dados recolhidos e com recurso a indicadores económicos, ambientais e sociais foram traçados cenários de evolução temporal da produção, consumos e emissões de GEE até 2050.

Paralelamente foi realizado o levantamento de tecnologias e medidas de descarbonização disponíveis para o setor, incluindo tecnologias emergentes que se encontram em estágios de maturidade tecnológica relativamente baixos, identificando o seu potencial de descarbonização e as principais oportunidades e/ou obstáculos à sua adoção no curto, médio e longo prazo, assim como o seu custo, e a viabilidade técnica e/ou económica da sua adoção.

Com base na caracterização do setor e das tecnologias e medidas de descarbonização identificadas são propostas diferentes trajetórias custo-eficazes de redução de emissões de GEE, alinhadas com os objetivos de redução de GEE nacionais e europeus, tendo em consideração os mix energéticos e a adoção de tecnologias de descarbonização disponíveis e previstas, no curto, médio e longo prazo, para cada subsector.

Para além da equipa técnica composta por elementos do consórcio, APICER e CTCV, a elaboração do Roteiro contou com a participação de especialistas convidados, provenientes de diferentes áreas, instituições e empresas, que contribuíram com o seu conhecimento e experiência no desenvolvimento de conteúdos que integram diversas secções do Roteiro.

A estrutura do Roteiro seguiu a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento dos trabalhos, organizando-se nos seguintes capítulos:

**Capítulo 1.** Enquadramento setorial da Indústria Cerâmica

**Capítulo 2.** Caminhos para a descarbonização do setor

**Capítulo 3.** Indicadores atuais e necessidades de descarbonização até 2050

**Capítulo 4.** Principais tecnologias e medidas de descarbonização

**Capítulo 5.** Evolução prevista para o setor até 2050: produção, consumo e emissões de GEE

**Capítulo 6.** Trajetórias custo e eficazes de redução de emissões de GEE

**Capítulo 7.** Necessidades e expectativas atuais e futuras

**Capítulo 8.** Considerações finais





# Enquadramento setorial da Indústria Cerâmica



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>



# CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA EUROPEIA E NACIONAL

A produção cerâmica remonta à Pré-História, quando o Homem aprendeu a dominar o fogo e moldar a argila, sendo uma das mais práticas mais antigas da humanidade. Desde então tem acompanhado o desenvolvimento de civilizações, evoluindo de simples utensílios para produtos sofisticados com diversas aplicações. Atualmente, a cerâmica mantém um papel importante na atividade económica, valor artístico e no património cultural em todo o Mundo, estando presente nas nossas casas, cidades e infraestruturas. O leque de aplicações dos produtos cerâmicos é vasto e em constante expansão, abrangendo materiais para a construção civil, objetos utilitários, peças decorativas, componentes industriais e produtos que incorporam tecnologia avançada em setores de ponta como a eletrónica, a medicina, a energia e a indústria aeroespacial. O desenvolvimento tecnológico do setor contribui para o aumento da qualidade e desempenho dos produtos, promovendo a melhoria da qualidade de vida das pessoas e impulsionando avanços tecnológicos em várias indústrias.

Dependendo da função dos produtos fabricados, a indústria cerâmica é tradicionalmente dividida em cinco sub-setores: cerâmica estrutural (telha, tijolo e abobadilha), pavimento e revestimento cerâmico (azulejos, ladrilhos, mosaicos), louça sanitária (lavatórios, sanitas, bases de chuveiro em porcelana ou grés fino), cerâmica utilitária e decorativa (louça de mesa e de decoração em porcelana, faiança, grés e terracota) e cerâmica técnica, refratários e outros. Apesar de cada sub-setor ter processos de fabrico

específicos, a maioria das operações processuais são comuns nos diferentes sub-setores.

De acordo com a Classificação Portuguesa das Atividades Económicas, Revisão 4 (CAE rev. 4) em vigor, a indústria cerâmica corresponde aos grupos 232, 233 e 234. A correspondência de cada sub-setor à notação comunitária de atividade económica, NACE<sup>1</sup>, rev. 2, e à notação extracomunitária de tipo de produto, HS<sup>2</sup>, é apresentada na Tabela 1.1.

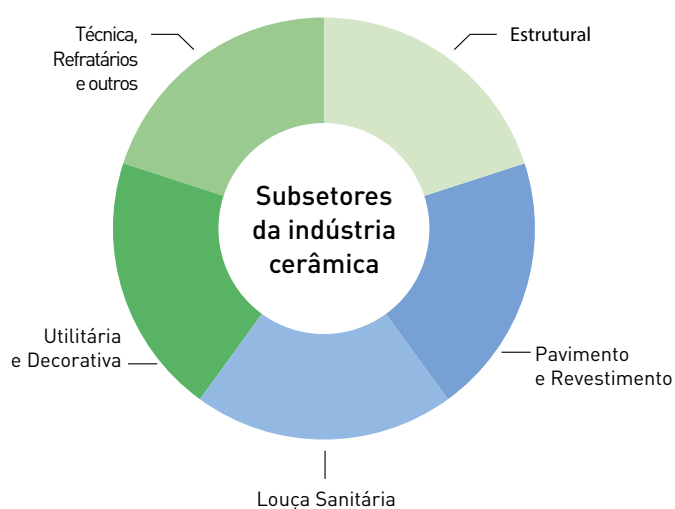


Figura 1.1. Classificação da indústria cerâmica nos respetivos sub-setores.

Tabela 1.1. Subsetores da indústria cerâmica e respetiva notação NACE e HS.

Subsetor	Divisão NACE HS	Tipo de Produtos
<b>Cerâmica estrutural</b>	NACE: 2332 HS: [6901;6906]	Tijolos, telhas e outros produtos de barro para construção
<b>Pavimento e revestimento cerâmico</b>	NACE: 2331 HS: [6907-6908]	Azulejos, ladrilhos, mosaicos e placas cerâmicas
<b>Louça sanitária</b>	NACE: 2342 HS: 6910	Artigos cerâmicos para uso sanitário
<b>Cerâmica utilitária e decorativa</b>	NACE: 2341 HS: [6911-6914]	Artigos cerâmicos para uso doméstico e ornamental
<b>Cerâmica técnica, refratários e outros</b>	NACE: [2320; 2343, 2344, 2349] HS: 6909	Isoladores e peças isolantes em cerâmica, produtos cerâmicos refratários, outros produtos em cerâmica para usos técnicos

<sup>1</sup>NACE é a designação dada à classificação estatística das atividades económicas na CE e resulta de legislação de UE que determina a existência e a utilização obrigatória uniforme entre todos os estados-membros.

<sup>2</sup>Harmonized Commodity Description and Coding Systems, nomenclatura internacional para a classificação dos produtos, permitindo aos países classificar os produtos transacionados através de uma base e classificação comuns.

## Setor cerâmico europeu

O valor global do mercado da indústria cerâmica foi estimado em 239 mil milhões de dólares em 2022. As projeções indicam uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 8,6% de 2019 a 2025 alcançando o valor de 359 mil milhões de dólares em 2030 [1].

A indústria cerâmica europeia apresenta um volume de negócios de cerca de 29 mil milhões de euros [2], sendo mais de um terço do volume de produção exportado para fora da União Europeia. A indústria cerâmica emprega mais de 200 mil trabalhadores diretos (400 mil empregos indiretos) em toda a Europa, sendo 80% das empresas do setor pequenas e médias empresas (PME) [3].

Nos últimos anos a produção cerâmica europeia tem apresentado uma tendência crescente, depois de uma queda acentuada durante a crise financeira 2008-2009, a que se seguiu um período de estagnação e recuperação gradual, interrompido por uma nova retração em 2020, em consequência da pandemia de COVID-19 (Figura 1.2).

A representatividade dos diferentes subsectores no valor da produção cerâmica na UE, varia de acordo com diversos fatores como o volume de produção, a procura do mercado, as tecnologias de produção ou o valor acrescentado

dos produtos, sendo o pavimento e revestimento cerâmico dominante relativamente aos restantes subsectores (Figura 1.3).

A produção cerâmica distribui-se por toda a Europa (Figura 1.4) sendo a Itália, Espanha, Alemanha, França, Portugal e Polónia os países com maior valor de produção cerâmica.

Produtos cerâmicos como tijolos, que são relativamente baratos, mas com elevados custos de transporte devido ao seu peso, são, geralmente, produzidos e usados localmente em todos os Estados-Membros. Produtos cerâmicos mais especializados e de maior valor, que requerem matérias-primas específicas e processos de produção mais diferenciados, têm a sua produção concentrada em alguns dos países da UE. Como exemplo, a cerâmica de pavimento e revestimento é produzida maioritariamente em Itália e Espanha, a cerâmica sanitária na Itália, a cerâmica utilitária e decorativa em Portugal e Alemanha e a cerâmica técnica na Alemanha e França.

### Produção da Indústria Cerâmica na UE27

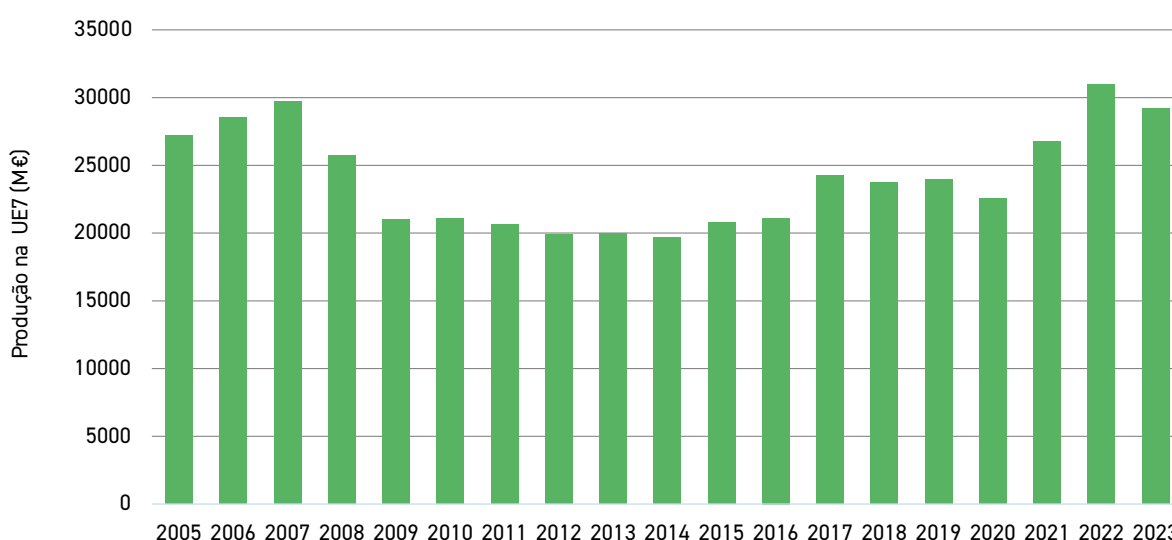


Figura 1.2. Produção da indústria cerâmica na UE27, de 2005 a 2023 [2]. Fonte: Eurostat



### Valor total de produção cerâmica na UE27 por subsetor

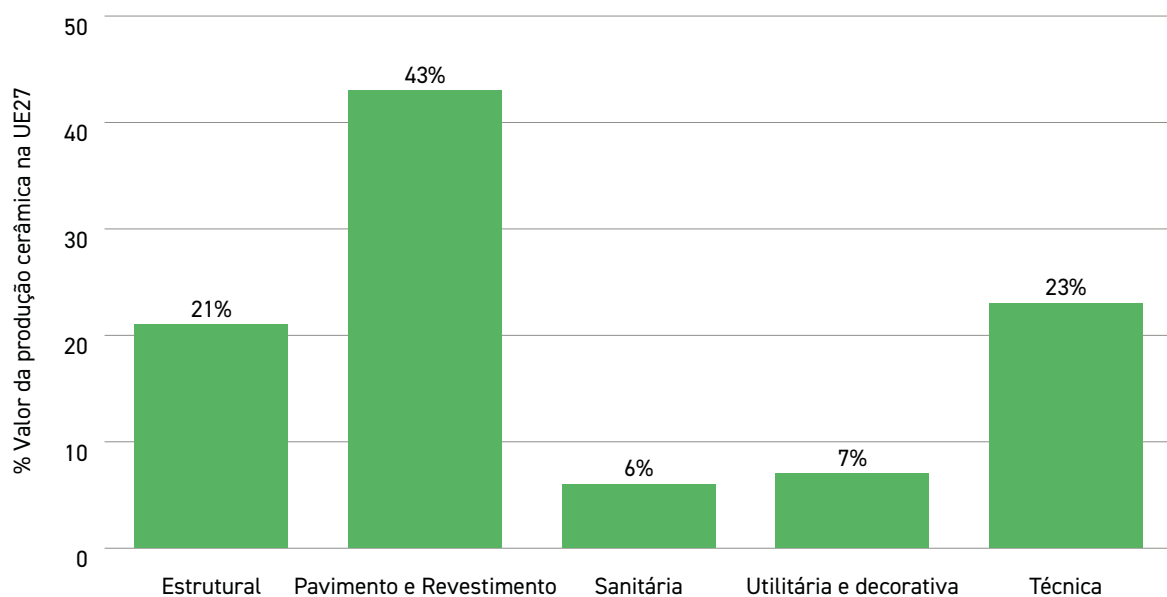


Figura 1.3. Valor da produção cerâmica na UE27 por subsetor (em %), em 2023 [2]. Fonte: Eurostat, 2023

### % do valor total de produção cerâmica na UE27

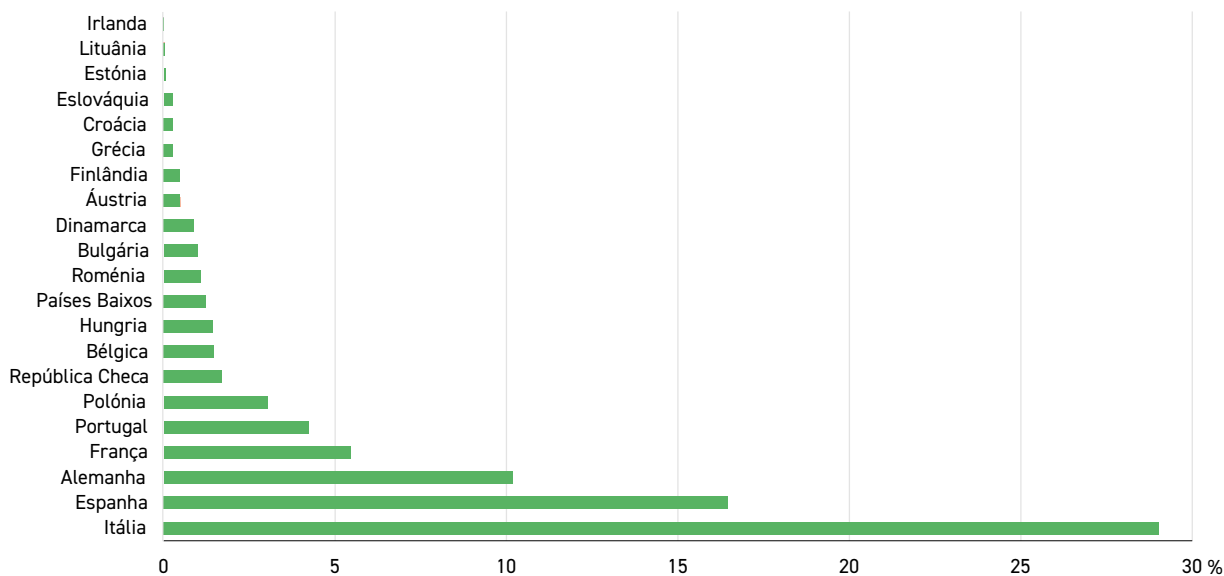


Figura 1.4. Valor da produção cerâmica (em %) na UE27, em 2023 [2]. Fonte: Eurostat, 2023



### Setor cerâmico português

Em Portugal, o setor cerâmico, e tendo como referência o ano de 2023, é composto por 1258 empresas, maioritariamente de pequena e média dimensão (514 são sociedades e 744 são empresas em nome individual [4]).

Distribuídas por várias regiões do país, as indústrias cerâmicas localizam-se predominantemente nas regiões Norte, Centro e Oeste e Vale do Tejo (Figura 1.6).

O setor cerâmico emprega 18724 trabalhadores, a maioria dos quais no subsetor da cerâmica utilitária e decorativa [4].

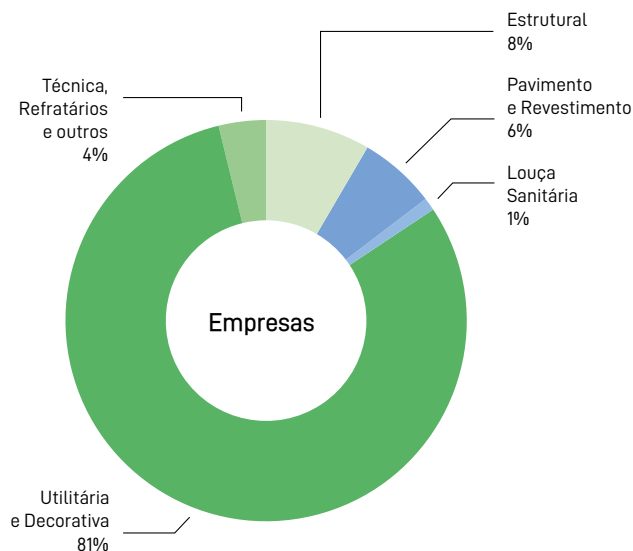


Figura 1.5. Distribuição do número de empresas portuguesas da indústria cerâmica em Portugal, por subsetor, em 2023 [4]. Fonte: INE, 2023

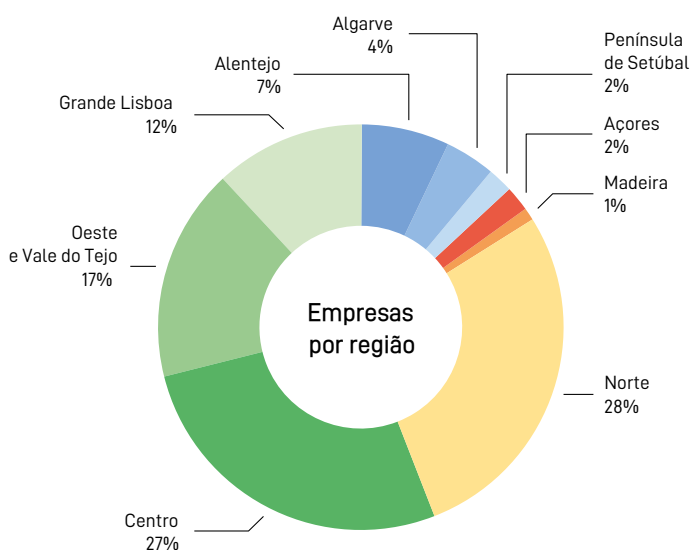


Figura 1.6. Distribuição das empresas portuguesas da indústria cerâmica em Portugal, por localização geográfica 2023 [4]. Fonte: INE, 2023

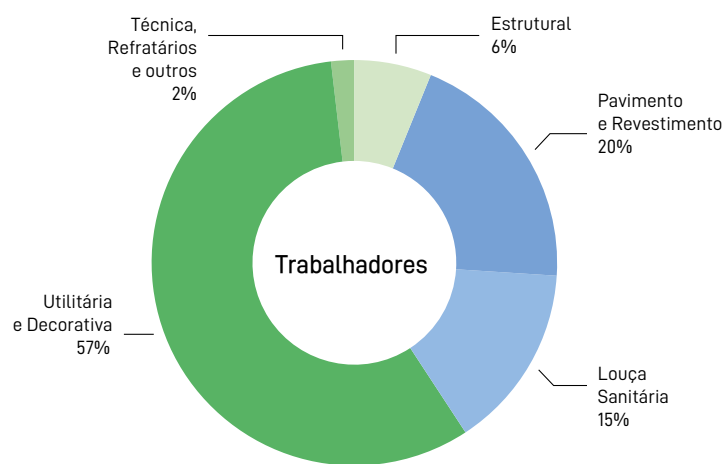


Figura 1.7. Distribuição das empresas portuguesas da indústria cerâmica em Portugal, por localização geográfica 2023 [4]. [4]. Fonte: INE, 2023



O volume de negócios total do setor cerâmico ascende a 1.465 milhões de euros, e tem registado, nos últimos anos, uma evolução tendencialmente crescente nos diferentes subsetores (Figura 1.8). No contexto da Indústria Transformadora Nacional (usando 2023 como ano de referência) o número de trabalhadores ao serviço e o volume de negócios (VN) representam respetivamente 2,5% e 1,2% [4].

As exportações têm vindo a crescer de forma consistente após a quebra registada durante a crise financeira de 2008-2009, com exceção de 2020, ano em que se verificou uma retração devido ao impacto da pandemia de COVID-19, acompanhando a tendência da indústria cerâmica europeia.

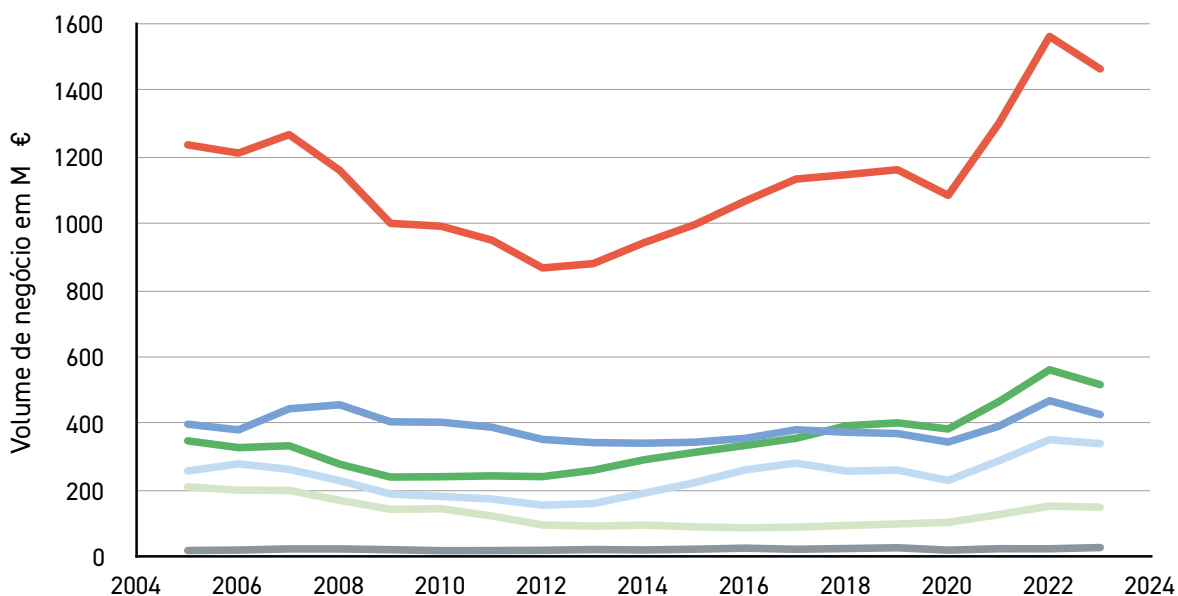


Figura 1.8. Evolução do volume de negócios da indústria cerâmica em Portugal, e nos respetivos subsectores entre 2005 e 2023 [4]. Fonte: INE

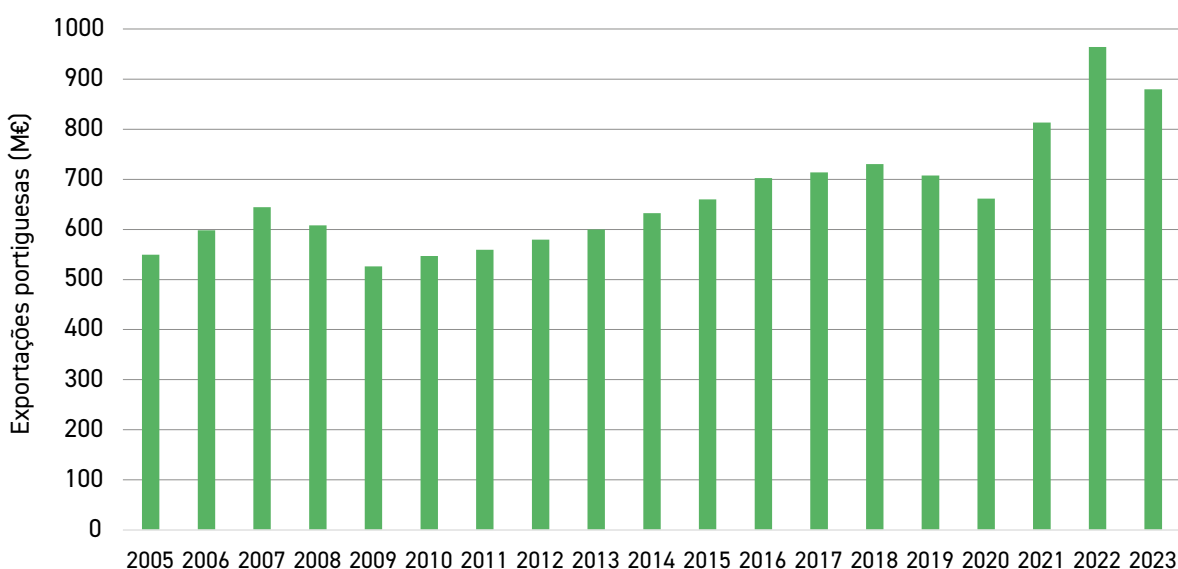


Figura 1.9. Exportações de produtos cerâmicos em Portugal, entre 2005 e 2023 [5]. Fonte: INE



Em 2023, os produtos cerâmicos portugueses foram exportados para 162 mercados, com destaque para França (20%) e Espanha (15%) como principais destinos, seguidos pelos Estados Unidos (10%), Alemanha (9%), Reino Unido (8%) e Países Baixos (7%)(Figura 1.10).

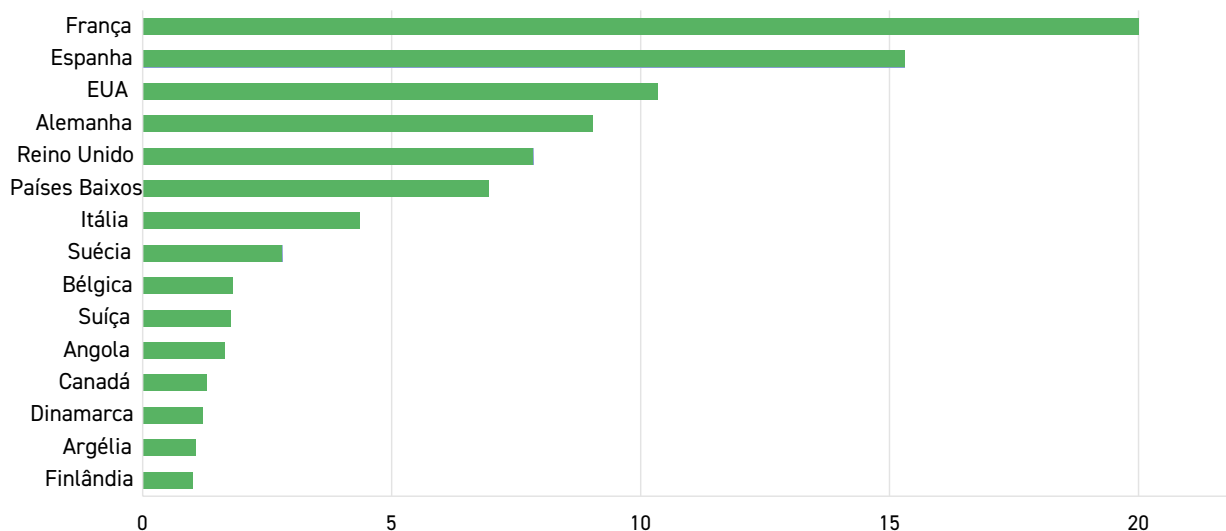


Figura 1.10. Principais mercados de exportação de Portugal, em 2023, em % do valor total exportado [5]. Fonte: INE, 2023

No ano de 2023, o valor das exportações portuguesas de produtos cerâmicos ascendeu a mais de 879 milhões de Euros [5]. A cerâmica utilitária e decorativa foi o tipo de produto que mais contribuiu para as exportações (43%), seguindo-se a cerâmica de pavimento e revestimento (32%) e a cerâmica sanitária (17%), a cerâmica técnica (5%) e a cerâmica estrutural (2%)(Figura 1.11).

As regiões de Portugal onde existe uma maior concentração da produção cerâmica, foram igualmente as que mais contribuíram para as exportações nacionais em 2023: a Região Centro com 69%, e a Região Norte e do Oeste de vale do Tejo com 12% [5].

A cerâmica é um setor tradicional em Portugal, beneficiando de condições essenciais para o fabrico de cerâmica, nomeadamente a disponibilidade local de matérias-primas de elevada qualidade.

Os processos de fabrico dos materiais cerâmicos são caracterizados por serem consumidores intensivos de energia (representam cerca de 25 a 30% dos custos) e outros recursos (os recursos minerais podem representar até 20% dos custos), além de gerarem emissões gasosas, efluentes líquidos, resíduos e ruído. Compreender o seu impacto ambiental é fundamental para a tomada de decisões visando a sua redução, e promovendo, consequentemente, uma economia mais sustentável e voltada para a circularidade. Neste sentido, o setor tem empreendido esforços para reduzir as emissões de GEE.

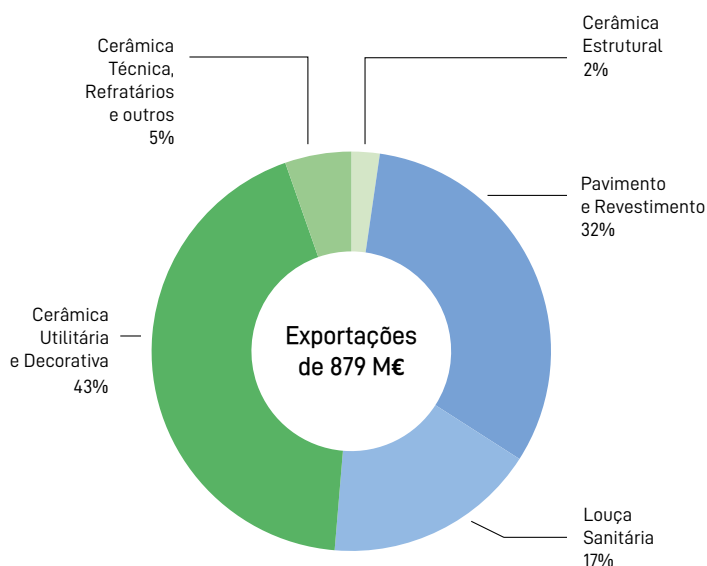


Figura 1.11. Exportações portuguesas de produtos cerâmicos, em 2023, por subsetor de atividade [5]. Fonte: INE, 2023



# PROCESSO DE FABRICO CERÂMICO

Apesar da diversidade de processos de fabrico cerâmico entre os diferentes subsetores, determinada pelas características e funções específicas de cada produto, a maior parte dos processos apresenta operações transversais comuns, nomeadamente: a preparação das matérias-primas, conformação, secagem, vidragem, tratamento térmico de alta temperatura (cozedura), e acabamento e declaração (Figura 1.12).

## Preparação das matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na fabricação de cerâmica vão desde minerais naturalmente existentes (p. ex., argilas, sílica e feldspato), até pós quimicamente sintetizados com composições e distribuições granulométricas controladas de forma rigorosa (p. ex., alumina nanoestruturada). O primeiro passo no processo de produção cerâmico, consiste na preparação destas matérias-primas, assegurando que cumprem os requisitos necessários para o seu processamento. Os processos de preparação de matérias-primas são diversos e podem incluir operações como a mistura e homogeneização dos diferentes componentes (a seco ou por via húmida), desaglomeração e/ou redução do tamanho de partículas por moagem, mais ou menos energética consoante a matéria-prima e o tipo de produto a fabricar. Em alguns casos, após a moagem por via húmida, a percentagem de água na pasta é reduzida por filtro-prensagem ou atomização. Consoante a percentagem de água contida na pasta, esta é classificada como: barbotina ou suspensão de base aquosa cerâmica (teor de humidade de cerca de 40%), pasta plástica (teor de humidade tipicamente entre os 30 a 40%), granulado ou pó atomizado (teor de humidade a rondar os 3-5%). O teor de humidade determina o processo de conformação que podem ser utilizados subsequentemente, e terá implicações na secagem e cozedura.

## Conformação

A tecnologia de conformação usada depende da complexidade geométrica, das propriedades do produto final pretendido e da consistência da matéria-prima. Sendo os processos de conformação mais comuns: o enchimen-

to por barbotina ou à lambujem, a conformação plástica (onde se inclui a extrusão e plástica contramoldagem), a prensagem uniaxial, a prensagem isostática e a injeção cerâmica (mais comum nos cerâmicos técnicos).

## Secagem

A operação de secagem, visa a eliminação de água contida nas peças após conformação e tem como principal objetivo aumentar a resistência mecânica dos produtos em cru, para que possam ser manipulados nos processos subsequentes e posteriormente sujeitos ao ciclo térmico de cozedura sem gerar defeitos associados à retração gerada pela saída de água.

Este é um processo térmico que, dependendo do produto e tecnologia, pode envolver temperaturas que vão desde 40 °C, como no caso de secadores intermitentes para louça sanitária, até aos 250 °C, em secadores rápidos para pavimento e revestimento [6]. Estes sistemas são tradicionalmente alimentados por energia térmica proveniente de combustíveis fósseis, direta ou indiretamente — quer através de queimadores dedicados, quer por integração com circuitos de recuperação de calor dos fornos — embora se observe uma preocupação crescente com a adoção de soluções elétricas e de baixo carbono.

Os secadores podem ser contínuos, em que o produto passa por um perfil térmico variável ao longo do comprimento da câmara, ou intermitentes, em que o produto permanece estacionário enquanto a temperatura interna no secador segue um perfil de tempo variável. Transversalmente a esta classificação, a tecnologia de secagem mais comum tem por base a convecção de ar quente insuflado no secador. Atualmente, é já uma prática comum a recuperação do calor da zona de arrefecimento do forno para o secador, no sentido de aumentar a eficiência energética do processo.



Figura 1.12. Principais etapas do processo de fabrico cerâmico.





No caso dos produtos cuja pasta se encontra sob a forma de pó atomizado (p. ex., no pavimento e revestimento), para além destes processos de secagem após conformação, existe um outro processo de secagem para preparação da pasta, a atomização. Este processo permite a remoção de mais de 95% da água utilizada para mistura e homogeneização da pasta. Através da pulverização da suspensão, numa câmara fechada, em contracorrente com ar quente, gera-se um granulado ou pó atomizado, que irá alimentar processos como a prensagem uniaxial (pavimento e revestimento) e a prensagem isostática (louça).

Sendo este um processo térmico com consumos energéticos elevados, as tecnologias de secagem são alvo de atenção quando falamos de descarbonização desta indústria. Atualmente a maioria dos secadores funciona a gás natural e em alguns casos a eletricidade. Devido ao volume de ar ventilado, à dificuldade de otimização de carga dos secadores e a outras variáveis, este processo é caracterizado por uma baixa eficiência energética, cerca de 30%, podendo variar consoante a tecnologia em causa. No caso específico do pavimento e revestimento, a secagem pode representar cerca de 40% do consumo energético do processo, o que demonstra a importância do investimento em tecnologias mais eficientes e descarbonizadas.

### Vidragem

A vidragem consiste na aplicação de uma camada de vidro sobre a superfície da cerâmica, conferindo um aspeto final à peça. Esta camada resulta da fusão, durante a cozedura, de uma suspensão composta, entre outros materiais, por fundentes, sílica e argila. Sobre a superfície vidrada pode ainda ser aplicada decoração. O vidrado pode ser aplicado na peça em verde (após secagem) ou na peça chacoçada (1ª cozedura da porcelana e faiança), sendo posteriormente cozido (2ª cozedura).

### Cozedura

A cozedura é o processo de alta temperatura no qual as peças cerâmicas sofrem transformações químicas e físicas, como a sinterização e densificação das peças. Esta etapa é a que mais contribui (70 a 85%) para os elevados consumos energéticos e emissões de GEE na Indústria Cerâmica, sendo, a par da secagem, um dos processos sob os quais existe maior interesse quando se fala na descarbonização do setor.

Normalmente a cozedura é realizada aquecendo o material até aproximadamente dois terços do ponto de fusão,



e mantendo essa temperatura por tempo suficiente para que ocorram as mudanças físico-químicas que conferem as características técnicas finais ao produto. Na prática a temperatura de cozedura irá depender do tipo de produto e da fase do processo em que se encontra, havendo produtos, como o pavimento e revestimento, e tendencialmente a louça em grés, nos quais se aplica apenas uma cozedura (monocozedura) e outros, como a porcelana, em que tipicamente se utilizam duas cozeduras (bicozedura, cozedura de chacota e cozedura de branco ou vidrado), podendo em alguns casos ainda realizar-se um terceiro ciclo térmico para alguma decoração mais específica ou retoque. A tendência global é para a adoção da monocozedura, pelos gastos energéticos envolvidos e pela simplificação do processo, mas em produtos cujos requisitos operacionais assim o exijam, a bicozedura ainda não encontra alternativas.

Os fornos cerâmicos podem ser classificados essencialmente em duas tipologias: fornos contínuos ou intermitentes. Em ambos os casos, o gás natural é o combustível mais utilizado, havendo algumas exceções em que se utiliza eletricidade ou biomassa para seu funcionamento. Nos fornos contínuos, o produto cru percorre o comprimento do forno a baixa velocidade, passando por zonas de aumento de temperatura até atingir a temperatura máxima, seguindo-se um perfil controlado de arrefecimento até à saída do forno. As peças a cozer podem ser empilhadas em vagonas, que as transportam pelo forno ou podem ser movidas através de sistema de rolos. A duração da passagem do produto por um forno contínuo varia de 30 minutos a vários dias, de acordo com o tamanho, espessura e tipo de produto.

Como o nome sugere, os fornos intermitentes processam cargas de cerâmica ao longo do ciclo de cozedura num espaço fechado. O ciclo operacional dos fornos intermiten-

tes pode ser de algumas horas ou exceder uma semana, dependendo do produto e das suas dimensões.

As temperaturas de cozedura e perfil térmico podem variar muito consoante o tipo de produto e até mesmo o tipo de forno. Contudo, podem ser definidas gamas típicas de temperaturas para as diferentes tipologias de produto: estrutural 900-1050 °C, faiança 1000-1100 °C (1ª cozedura) 950-1080 °C (2ª cozedura), pavimento e revestimento 1050-1250 °C, louça sanitária 1200-1300 °C e porcelana 900-1050 °C na chacota e 1350-1400 °C na cozedura de branco [6].

### Acabamento e decoração

Operações de acabamento e decoração podem ocorrer em diversas etapas do processo, como por exemplo o esponjamento para remoção de rebarbas e arestas. Após a cozedura, alguns produtos cerâmicos são submetidos a processos adicionais para realçar as suas propriedades ou atender a tolerâncias dimensionais. Podem ser trabalhados por retificação abrasiva, polimento químico, ou aplicados revestimentos de superfície e decoração para efeitos funcionais (p. ex., autolimpante) e estéticos. O processo de aplicação desta decoração pode ser manual, para artigos específicos de qualidade elevada, como a porcelana. Contudo, o mais comum é o recurso a técnicas mecanizadas como a serigrafia, o decalque, ou a impressão a jato de tinta. Após a etapa final de acabamento, os produtos são inspecionados e embalados, manualmente ou por técnicas automatizadas.

Durante o processo de fabrico, as emissões diretas de CO<sub>2</sub> são originadas da combustão de combustíveis fósseis nos fornos, da decomposição química de minerais carbonatados (quando utilizados) e da combustão de material orgânico nas matérias-primas.

### Referências

- [1]. Statista. *Global ceramics industry market size worldwide*. 2025. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1248928/ceramics-industry-market-size-worldwide>. [Acedido em 05 dez. 2025].
- [2]. Eurostat. *Sold production, exports and imports – detailed data (DS-056120)*. 2023. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [3]. Cerame-Unie. *Ceramic roadmap to 2050*. Jan. 2024. Disponível em: <https://www.ceramicroadmap2050.eu/wp-content/uploads/2024/01/ceramic-roadmap-to-2050.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].

- [4]. INE. *Sistema de contas integradas das empresas*. 2023. Disponível em: <https://www.ine.pt> [Acedido em 05 dez. 2025].

- [5]. INE. *Estatísticas do comércio internacional de bens*. 2023. Disponível em: <https://www.ine.pt> [Acedido em 05 dez. 2025].

- [6]. European Commission, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ceramic Manufacturing Industry (BREF CER). Sevilla: European Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Bureau, Joint Research Centre, 2007.







# Caminhos para a descarbonização do setor



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A NECESSIDADE DE DESCARBONIZAÇÃO

Magdalena Vallebona; Alessia Palleschi  
 Cerame-Unie – Confederação Europeia da Indústria Cerâmica

## Enquadramento jurídico da UE para a descarbonização da indústria cerâmica

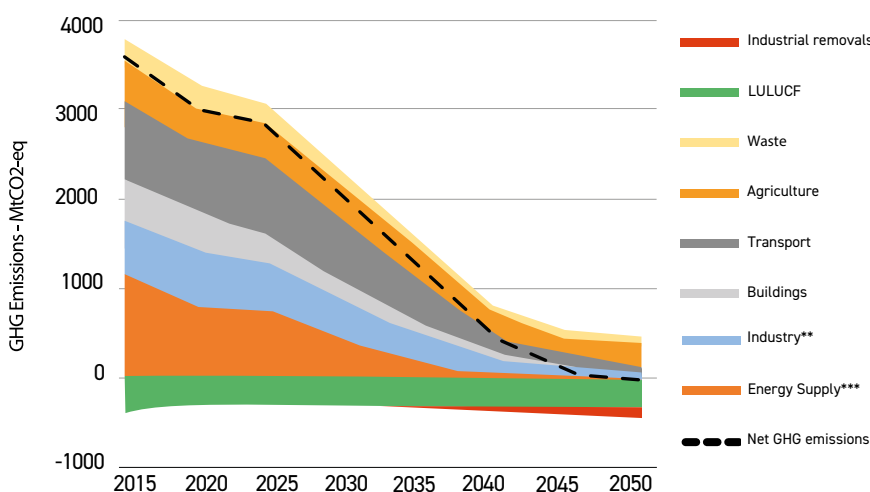
Uma meta ambiciosa exige um programa ambicioso: a Lei Europeia do Clima é um regulamento que a União Europeia adotou para alcançar os objetivos definidos pelo Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), que propõe atingir a meta da neutralidade climática até 2050.

A Lei Europeia do Clima entrou em vigor a 29 de julho de 2021 e pretende ser implementada de uma maneira socialmente justa e economicamente eficiente. O seu objetivo a longo prazo é alcançar emissões líquidas zero de gases com efeito de estufa em toda a UE, principalmente através da redução das emissões de GEE, do investimento em tecnologias verdes e da proteção do meio ambiente. A meta a

médio prazo da lei consiste em reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação aos níveis de 1990. Para atingir este objetivo, a União Europeia propôs o pacote de medidas *Fit for 55*, que põe em prática novas iniciativas com vista a assegurar um enquadramento coerente para atingir os objetivos climáticos da UE. O pacote de medidas inclui, nomeadamente, a reforma do Regime de Comércio Europeu de Licenças de Emissão da UE (CELE)<sup>3</sup> com criação do CELE2<sup>4</sup>, sobre combustíveis para edifícios e transportes rodoviários, e a adoção do Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM<sup>5</sup>).

Em fevereiro de 2024, a Comissão Europeia apresentou a sua primeira avaliação da meta climática para 2040, recomendando uma redução de 90% das emissões líquidas de

**Greenhouse gas emissions in the period 2015-2050\***



\*Source: PRIMES, GAINS, GLOBIOM  
 \*\*Excluding non-BECCS industrial removals  
 \*\*\*Including Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)

Figura 2.1. Emissões de gases de efeito de estufa no período 2015-2025 (Fonte: Comissão Europeia, "Meta Climática para 2040"[1], disponível aqui).

<sup>3</sup>Sigla inglesa EU ETS  
<sup>4</sup>Sigla inglesa EU ETS2  
<sup>5</sup>Sigla inglesa de Carbon Border Adjustment Mechanism



gases com efeito de estufa da UE até 2040, em comparação com os níveis de 1990. Esta avaliação da CE visa colocar a Europa no caminho certo para atingir a meta de 2050, enquanto assegura previsibilidade para os cidadãos, empresas e investidores, impulsionando a competitividade das empresas europeias, criando emprego, e reforçando a resiliência e a autonomia estratégica da Europa.

O documento baseia-se na avaliação de impacto da Comissão e no parecer do Conselho Consultivo Europeu sobre as Alterações Climáticas, após uma consulta pública onde os cidadãos e partes interessadas partilharam as suas posições sobre a meta climática da UE para 2040. No entanto, antes de incluir a meta climática para 2040 na Lei Europeia do Clima, a Comissão terá de lançar uma proposta legislativa formal e assegurar que o quadro político adequado pós-2030 esteja em vigor para alcançar o objetivo de 2040 de forma justa e económica.

A indústria cerâmica europeia expressou a sua posição de que “sem uma maior capacidade de investimento, qualquer aceleração para atingir o objetivo de emissões líquidas zero não é realista”. A indústria cerâmica sofre de falta de previsibilidade, uma vez que muitos requisitos não dependem do setor e não estão atualmente em funcionamento, tais como a disponibilidade de energia verde, infraestrutura

energética e tecnologias de descarbonização específicas (como CCUS). O comunicado de imprensa da Cerame-Unie [2] sobre este tema pode ser consultado aqui.

### Situação atual da descarbonização da indústria cerâmica europeia

A indústria cerâmica europeia encontra-se no caminho certo para reduzir as suas emissões totais de GEE e a redução alcançada até agora ascende a mais de 45% desde o pico de emissões e produção na década de 2000, e a cerca de 33% desde 1990, graças aos processos otimizados, sistemas de produção mais eficientes e substituição de combustíveis.

A produção cerâmica é um processo intensivo de energia e a indústria utiliza principalmente gás natural como combustível (constitui cerca de 80% do seu cabaz energético). Atualmente, a indústria emite cerca de 19 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, o que representa aproximadamente 1% do total das emissões industriais abrangidas pelo CELE. Outra especificidade da indústria cerâmica europeia é a sua composição: a maioria dos produtores de cerâmica são pequenas e médias empresas (PME) - 80% - e as instalações cerâmicas pertencem a pequenos emissores, representando ca. 10% de todas as instalações industriais abrangidas

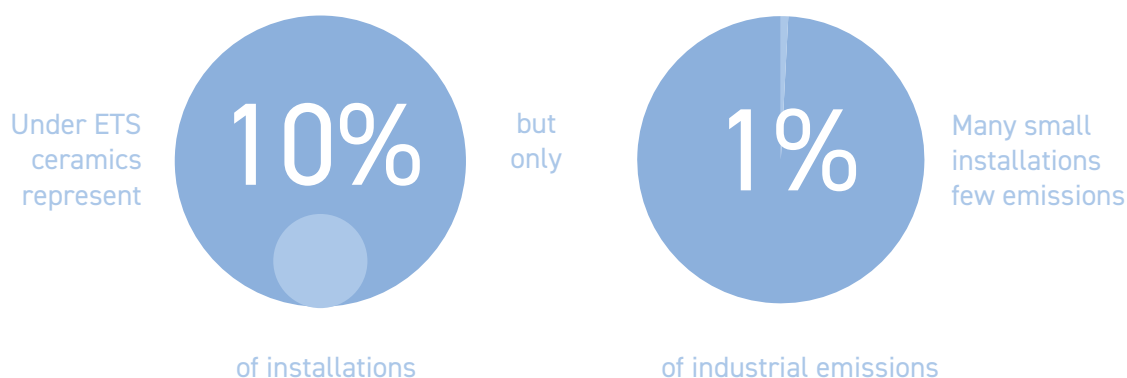


Figura 2.2. Instalações cerâmicas abrangidas pelo CELE (ETS), à esquerda, e emissões totais da indústria cerâmica, à direita, na União Europeia, em % (Fonte: Cerame-Unie, “Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality”, p.30 [3]).

pelo CELE, que é o instrumento fundamental da UE para a redução das emissões industriais de GEE.

Existem três categorias principais de emissões associadas à produção cerâmica: queima de combustível para processos de secagem e aquecimento, emissões de processo geradas pela transformação mineralógica da argila e emissões indiretas, principalmente da produção de eletricidade. A categoria principal corresponde, sem dúvida, às emissões provenientes da queima de combustível (em 2020, representou 64% das emissões de GEE do setor), enquanto as emissões de processo e as emissões indiretas são aproximadamente iguais (em 2020, representaram, respectivamente, 17% e 19% das emissões do setor). No entanto, estas estimativas, são apenas uma indicação geral, porque as proporções variam significativamente quando se analisam diferentes processos, instalações, produtos e matérias-primas.

### Caminhos da indústria cerâmica para a descarbonização a nível da UE

O modelo de redução proposto pela Cerame-Unie no seu Roteiro intitulado: "Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality"[3], que foi publicado no outono de 2021 (disponível aqui), combina uma série de medidas para alcançar uma redução gradual das emissões de GEE para atingir a neutralidade carbônica até 2050. Baseia-se nos pressupostos de que haverá um nível de produção constante e uma gama semelhante de produtos entre 2020 e 2050, e que as tecnologias transformadoras estarão disponíveis num prazo relativamente curto, que todas as barreiras relativas à disponibilidade de combustíveis alternativos são ultrapassadas e que os obstáculos à sua aplicação técnica são eliminados, assim como o fornecimento de energia em toda a Europa será gradualmente descarbonizado e que a CCUS será gradualmente disponibilizada.

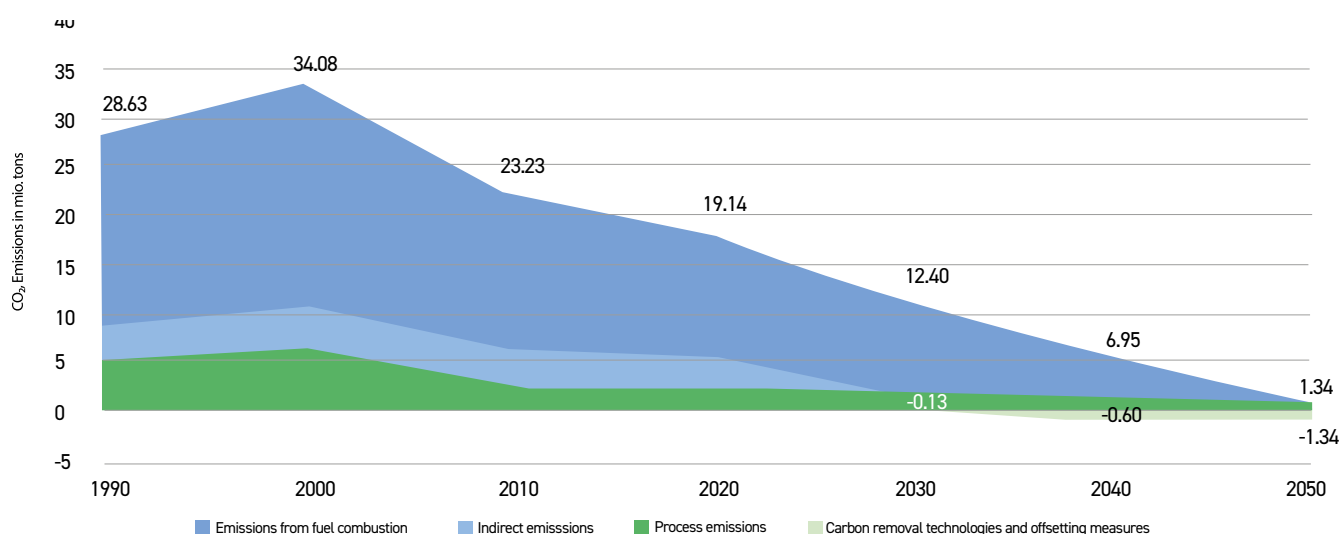


Figura 2.3. O caminho para a redução de CO<sub>2</sub> (Fonte: Cerame-Unie, "Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality", p.31 [3]).

### Energias renováveis & Eficiência energética

Uma vez que a maior parte das emissões no setor da cerâmica provêm diretamente da utilização de energia, a forma mais rápida e simples de reduzir as emissões é mudar para energias renováveis, seja eletricidade renovável, hidrogénio verde, gás sintético verde ou biocombustível, dependendo do tipo de instalação e das opções de disponibilidade local. No entanto, como a mudança de combustíveis representa um investimento de capital significativo, os produtores precisam de ter garantias quanto à disponibilidade de um fornecimento de combustível regular e acessível. A indústria está igualmente comprometida com melhorias contínuas na eficiência energética, incluindo o aumento da utilização de materiais reciclados e a adoção de novas tecnologias. As tecnologias disponíveis podem-se tornar mais eficientes do ponto de vista energético através da instalação de fornos, secadores, termóstatos e

vedantes melhorados, assim como da implementação de controlos automatizados e da melhoria dos sistemas de isolamento térmico. Por fim, a captura dos gases de combustão para pré-aquecer o forno ou o secador e a redução da distância física entre os diferentes processos podem resultar em economia de energia. De acordo com esta visão de uma indústria neutra para o clima, em 2050 a indústria cerâmica europeia terá uma necessidade energética projetada de cerca de 140 000 terajoules. Este valor é inferior a um terço ao registado em 2020, devido a melhorias na eficiência energética. Por outro lado, a disponibilidade de hidrogénio verde, que muito provavelmente permanecerá inicialmente inacessível devido à procura por parte de outros setores de utilização intensiva de energia, assim como a questões relacionadas com os preços e a falta de infraestruturas, espera-se que aumente apenas depois de 2035 - tornando-o, juntamente com a eletrificação direta, uma das principais medidas para reduzir as emissões.

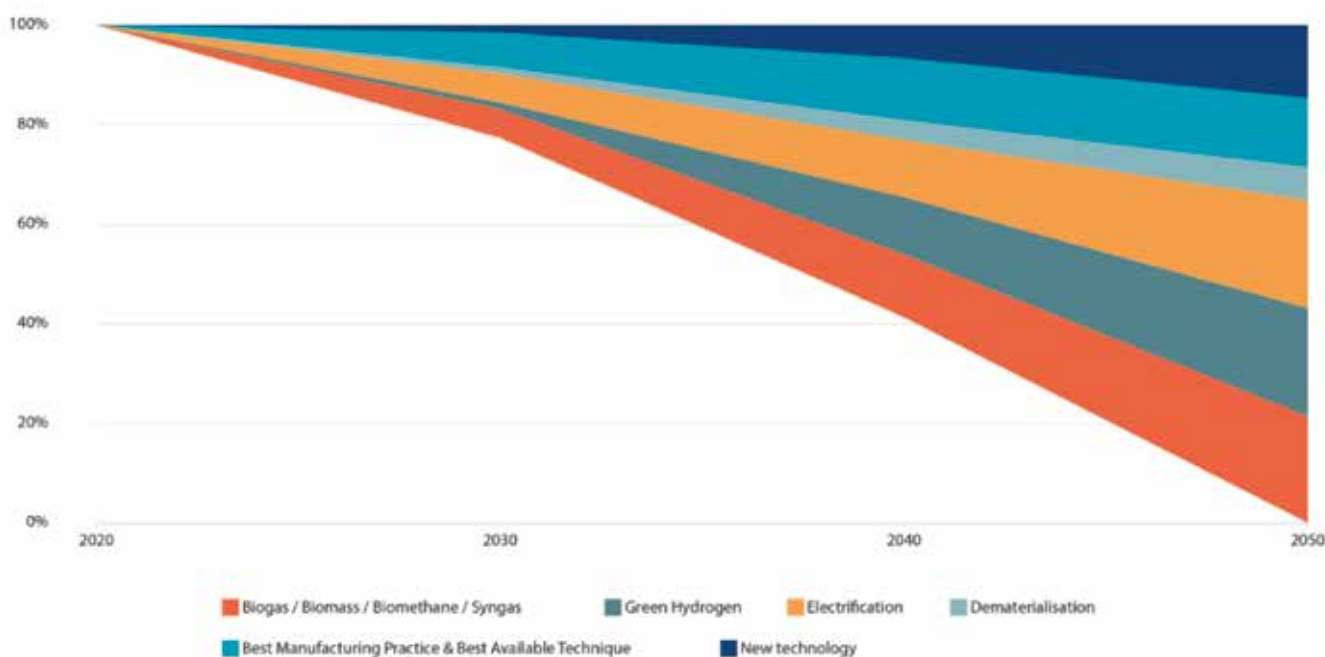


Figura 2.4. Medidas para redução das emissões provenientes da combustão dos combustíveis fósseis (Fonte: Cerame-Unie, “Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality”, p.33 [3]).



## Emissões de processo

A descarbonização química de carbonatos nas matérias-primas, como o calcário ou a dolomite, durante a síntese dá origem às chamadas “emissões de processo”. Estas emissões não podem ser evitadas totalmente, e a um custo competitivo, uma vez que dependem da composição dos minerais e da geologia local. No entanto, elas podem ser reduzidas diminuindo a uso de aditivos contendo carbono, minimizando, e otimizando o teor de carbono das misturas de argila, utilizando menores quantidades de matérias-primas, introduzindo novas tecnologias e adotando tecnologias de remoção de carbono. No entanto, esta última opção é atualmente extremamente cara.

A tabela abaixo mostra as estimativas das necessidades anuais de energia alternativa exigidas pela indústria cerâmica para atingir o objetivo de neutralidade carbónica (incluindo para a eletricidade verde, o hidrogénio verde e os biocombustíveis): estas quantidades não estão atualmente disponíveis e o seu fornecimento depende de muitos fatores, como as infraestruturas e a existência de um enquadramento jurídico e político adequado.

### O que é necessário para apoiar a descarbonização da indústria cerâmica a nível da UE?

Tendo em conta os pressupostos do modelo do Roteiro da Cerame-Unie, a indústria cerâmica europeia ver-se-á confrontada com custos anuais de descarbonização superiores a 500 milhões de euros/ano até 2030, aumentando para quase mil milhões de euros por ano em 2040 e mais de 1,2 mil milhões de euros por ano em 2050. Os custos de mitigação acumulados totais até 2050 são estimados em cerca de 27 mil milhões de euros. Para garantir que este

setor com consumo intensivo de energia atinja a meta de 2050, a indústria cerâmica não deve ser deixada sozinha: fatores externos, como um quadro regulamentar adequado, o acesso ao financiamento, novas tecnologias e fontes de energia descarbonizadas, devem ser disponibilizados ao setor.

A indústria cerâmica está exposta a um risco significativo de fuga de carbono: devido à legislação climática rigorosa na Europa, a indústria corre o risco de relocação de atividade, empregos e investimentos para países onde a legislação é menos restritiva. Para se empenhar com êxito na via da neutralidade climática, a indústria cerâmica europeia necessitará de uma proteção contínua contra os riscos de fuga de carbono, assegurando regras justas no âmbito do CELE: incluindo parâmetros de referência de CELE realistas, não penalizando setores heterogéneos, como a cerâmica, e as PME. Além disso, o preço do CO<sub>2</sub> não deve estar sujeito a especulações externas e não deve limitar a capacidade da indústria para investir na transição tecnológica.

A maioria das novas tecnologias e da infraestrutura energética necessária ainda não está disponível: isso pode prejudicar as perspetivas de descarbonização da indústria cerâmica, especialmente porque, com mais de 1.200 instalações em toda a UE, a segurança do fornecimento energético é uma prioridade. Além disso, quando se trata de fontes alternativas, estas podem ser desafiantes do ponto de vista económico, como é o caso da eletrificação direta e indireta, que enfrenta custos mais elevados (CAPEX e OPEX) em comparação com o gás natural, e uma ausência geral de incentivos (por exemplo: a falta de compensações dos custos indiretos). Além disso, o quadro jurídico precisa de ser estável e fiável, para garantir investimentos a longo prazo, como os de novos fornos e maquinarias.

**Tabela 2.1. Necessidades de energia alternativa para redução das emissões**

Year	Total energy need (TJ)	Biogas (TJ)	Green Hydrogen (TJ <sub>9</sub> )	Green electricity (TJ)	Green electricity (Gwh)
2030	196,350.76	12,836.07	2,852.46	12,836.07	3,565.86
2040	166,911.25	27,811.48	25,315.58	25,315.58	7,032.67
2050	140,087.35	47,065.59	47,778.70	47,778.70	13,272.92

(Fonte: Cerame-Unie, “Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality”, p.35 [3]).



Para fazer face a estes desafios, deve ser fornecido apoio financeiro, tanto para a investigação & inovação, quanto para investimentos (CAPEX), assim como para mitigar os custos operacionais mais elevados (OPEX). A indústria precisa de ter acesso a Contratos de Carbono por Diferença ao nível da UE para garantir os seus investimentos em descarbonização. A UE deve também estabelecer e aplicar com firmeza um princípio de neutralidade setorial para todas as fontes de energia descarbonizadas, a fim de garantir igualdade de acesso ao hidrogénio verde, à eletricidade verde e a outras fontes de energia verde para todos os utilizadores finais. Além disso, é necessário garantir preços de energia acessíveis, prevenindo e investigando eventuais comportamentos anticoncorrenciais no mercado da energia e um estudo mais aprofundado do funcionamento dos mercados de gás e eletricidade, a fim de melhorar o mercado interno da energia a médio e longo prazo. Com base nas lições aprendidas pela indústria cerâmica da UE

desde a crise energética de 2022, a resposta de emergência da UE também deve ser firmemente garantida.

A indústria cerâmica é um setor específico e heterogéneo, sendo, simultaneamente, uma indústria intensiva em energia, e uma fabricante de produtos que permitem poupanças de energia e de carbono noutros setores. O que a indústria cerâmica precisa atualmente, são das ferramentas concretas, mencionadas acima para continuar o seu caminho rumo ao objetivo de atingir a neutralidade climática até 2050.

## Referências

[1]. Comissão Europeia. *Meta Climática para 2040*. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target\\_en?prefLang=pt&etrans=pt](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en?prefLang=pt&etrans=pt) [Acedido em 05 dez. 2025].

[2]. Cerame-Unie. *Comunicado de Imprensa*. Disponível em: <https://cerameunie.eu/media/stpdayhi/24-02-12-cu-press-release-2040-target.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].

[3]. Cerame-Unie. *Ceramic Roadmap to 2050: Continuing our path towards climate neutrality*. Jan. 2024. Disponível em: <https://www.ceramicroadmap2050.eu/wp-content/uploads/2024/01/ceramic-roadmap-to-2050.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].



# ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR DE DESCARBONIZAÇÃO NO CONTEXTO EUROPEU E PORTUGUÊS

Atualmente, as alterações climáticas representam uma das maiores ameaças globais enfrentadas pela humanidade. São principalmente causadas pela emissão excessiva de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano e óxido nitroso, com origem antropogénica, como a queima de combustíveis fósseis para mobilidade, produção de energia elétrica e em processos industriais. O enquadramento regulamentar para a descarbonização, tanto no contexto europeu quanto no português, é crucial para implementar estratégias orientadas para a redução das emissões de carbono e para a transição para uma economia hipocarbónica.

## Contexto europeu

Em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP21<sup>6</sup>) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCC<sup>7</sup>), foi assinado o Acordo de Paris [1] por 195 países signatários que assumiram o compromisso de manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2°C e de reunir esforços para limitar o aumento a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para alcançar essas metas, os países signatários comprometeram-se a contribuir com reduções significativas de emissões. Desde então, houve um crescente compromisso global em responder à irrefutável ameaça das alterações climáticas e suas consequências.

Em 2018, o Relatório Especial do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change)[2] reportava que:

- as atividades humanas são consideradas como sendo responsáveis pelo aumento de aproximadamente 1°C na temperatura média global, em relação aos valores pré-industriais, numa gama provável de temperaturas entre 0,8°C e 1,2°C, e que é provável que o aquecimento global atinja 1,5°C, entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar à mesma taxa;
- O impacto das alterações climáticas para os ecossistemas e para a saúde humana varia com a intensidade e a velocidade do aquecimento, a localização geográfica, os

níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade das regiões, e a implementação de medidas de adaptação e mitigação climática. Alguns impactos podem ser duradouros ou irreversíveis, como a perda de alguns ecossistemas.

Neste contexto, é lançado pela União Europeia em 2019, o **Pacto Ecológico Europeu** (*European Green Deal*)[3], como a estratégia da União Europeia (UE) para tornar a sua economia sustentável e resiliente, em resposta à crise climática. O pacto visa alinhar o crescimento económico com a preservação ambiental, a promoção de um futuro de baixo carbono, a economia circular e a justiça social, com o principal objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050, tornando a União Europeia como o primeiro bloco de países do mundo a atingir emissões líquidas zero de gases com efeito de estufa. Em 2021, sob o Pacto Ecológico Europeu é lançada a **Lei Europeia do Clima** [4], que transpõe para a legislação o objetivo estabelecido pelo Pacto Ecológico Europeu para que a economia e a sociedade europeias atinjam a neutralidade carbónica até 2050. Para a concretização dos objetivos propostos na Lei Europeia do Clima é lançado, ainda em 2021 o pacote legislativo **Fit for 55** [5], com o objetivo de garantir que a UE consiga reduzir as suas emissões líquidas de gases com efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990. Este pacote prevê esforços distintos para as empresas abrangidas pelo CELE (Comércio Europeu de Licenças de Emissão, EU-ETS na sigla inglesa) e empresas não-CELE, o alargamento do CELE a mais setores da economia, como a criação do CELE 2 sobre combustíveis para edifícios e transportes rodoviários, e a adoção do Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM - *Carbon Border Adjustment Mechanism*) que impõe um custo de carbono sobre determinados bens importados de países cujas normas ambientais são menos exigentes do que as da UE. Paralelamente, o pacote inclui metas ambiciosas para o aumento da eficiência energética e a promoção de energias renováveis. Para apoiar a transição, a UE disponibiliza fundos e apoios financeiros para ajudar as regiões e os trabalhadores mais afetados pela mudança, promovendo a requalificação e a criação de novos empregos nos setores verdes.

<sup>6</sup>Conference of Parties

<sup>7</sup>United Nations Framework Convention on Climate Change



Na **Diretiva de Reporte de Sustentabilidade Corporativo (CSRD<sup>8</sup>)** [6], a UE estabelece regras mais rigorosas para a divulgação de informações de sustentabilidade pelas empresas, nomeadamente a obrigatoriedade de reporte das emissões de gases com efeito de estufa e dos seus planos de transição climática, para atingirem a neutralidade carbónica até 2050. O objetivo da diretiva é aumentar a transparência e a consistência na comunicação sobre impactos ambientais, sociais e de governança corporativa (ESG<sup>9</sup>), alinhando-se às metas estabelecidas no Pacto Ecológico Europeu.

Em 2023, é lançado o **Plano Industrial do Pacto Ecológico** [7], que procura complementar os esforços propostos no Pacto Ecológico Europeu, aumentar a competitividade e apoiar a transição rápida da indústria para a neutralidade carbónica, baseando-se em quatro pilares:

- Simplificação do quadro regulatório;
- Aceleração do investimento e financiamento para a produção de tecnologias mais limpas, com foco, a curto prazo nos programas REPowerEU [8], InvestEU [9] e Fundo de Inovação [10];
- Capacitação dos trabalhadores, para assegurar que a transição para a neutralidade carbónica seja acompanhada pela criação de empregos de qualidade e bem remunerados nas tecnologias limpas;
- Cooperação mundial e abertura do comércio para cadeias de abastecimento resilientes.

No âmbito do Plano Industrial do Pacto Ecológico, salientam-se as seguintes iniciativas regulatórias:

- **Lei da Indústria de Impacto Zero (NZIA-Net Zero Industry Act)** [11] que visa aumentar a capacidade de produção de tecnologias que contribuam para a descarbonização. Estabelece como meta para a UE, até 2030, do fabrico de, pelo menos 40% das necessidades anuais de tecnologias de baixo carbono;

- **Regulamento Europeu das Matérias-primas Críticas** [12] destinada a reforçar o fornecimento de matérias-primas estratégicas da UE, através do aumento do acesso às cadeias de abastecimento, da exploração sustentável e da reciclagem de matérias-primas, com vista à redução da importação de matérias-primas, garantindo menor dependência a fornecedores externo;
- **Reforma do Mercado da Eletricidade**, concebida para modernizar e integrar o sistema elétrico europeu, com o objetivo de apoiar a descarbonização do setor energético, promovendo uma maior integração das energias renováveis no mercado e a melhoria da interligação entre os Estados-Membros. Além disso, estabelece mecanismos (por exemplo, contratos de longa duração, contratos por diferença, CfD) para garantir a previsibilidade e a estabilidade dos preços da energia, fundamentais para a competitividade industrial

Em fevereiro de 2025, é lançado pela União Europeia o Pacto da Energia Limpa (Clean Industrial Deal) [13], com o objetivo de reforçar a competitividade e a descarbonização da indústria europeia, especialmente nos setores intensivos em energia, alinhando a política industrial com os objetivos climáticos da EU, promovendo a inovação verde, a economia circular e a segurança energética.

### Contexto nacional

Como signatário do Acordo de Paris, Portugal comprometeu-se internacionalmente a reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) para atingir a neutralidade carbónica até 2050. Enquanto Estado-Membro da UE, Portugal aplica os princípios e as metas do Acordo de Paris através das políticas definidas no Pacto Ecológico Europeu, que estabelece metas mais ambiciosas e disponibiliza mecanismos financeiros para apoiar os Estados-Membros na Transição Climática.

Neste contexto, é lançado em 2019, o **Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)** [14] o plano estratégico nacional, que identifica os principais vetores da

<sup>8</sup>Corporate Sustainability Reporting Directive

<sup>9</sup>Environmental, Social and Governance



descarbonização, as opções de políticas e medidas, e a trajetória de redução de emissões para atingir esse fim, em diferentes cenários de desenvolvimento socioeconómico, nos diferentes setores da economia. O RNC2050 estabelece que a neutralidade carbónica até 2050 é económica e tecnologicamente viável, e assenta numa redução de emissões entre 85% e 90% até 2050, face a 2005, e compensação das restantes emissões através do sumidouro proporcionado pelo uso do solo e florestas. A trajetória para a neutralidade permite antecipar reduções de emissões de gases com efeitos de estufa entre -45% e -55% em 2030 e entre -65% e -75% em 2040, em relação a 2005. Alcançar a neutralidade carbónica até 2050 implica, a par do reforço da capacidade de sequestro de carbono pelas florestas e por outros usos do solo, a descarbonização total do sistema electroprodutor e da mobilidade urbana. Implica igualmente mudanças profundas na forma como utilizamos a energia e os recursos, apostando numa economia que se sustenta em recursos renováveis, utiliza os recursos de forma eficiente e assenta em modelos de economia circular, valorizando o território e promovendo a coesão territorial. Este roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) encontra-se atualmente em fase de revisão, no âmbito da atualização do quadro nacional de política climática, prevendo-se o reforço do nível de ambição, quer em termos de metas de redução de emissões, quer dos respetivos horizontes temporais, em consonância com os objetivos climáticos europeus.

Alinhado com o RNC2050, é aprovado em 2020, o **Plano Nacional para a Energia e Clima (PNEC2030)** [15], que constitui o principal instrumento de política energética e climática para a década de 2021-2030. Estabelece metas relativamente à redução de emissões de gases com efeito de estufa, incorporação de energias renováveis, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno de energia e investigação, inovação e competitividade, assim como as principais linhas de atuação para o cumprimento das metas propostas. É um instrumento obrigatório para os Estados-Membros da UE, no âmbito das obrigações estabelecidas pelo Regulamento da Governação da União da Energia e da Ação Climática, sendo revisto periodicamente para garantir que as políticas energéticas e climáticas estejam com os compromissos nacionais e internacionais, e que reflitam os avanços tecnológicos, as mudanças nos contextos socioeconómicos e ambientais, e/ou novas metas estabelecidas pela União Europeia. Na sua primeira versão, o PNEC2030 estabeleceu como metas até 2030:

- redução das emissões de CO<sub>2</sub> entre 45-55% em relação aos níveis de 2005;
- 47% no consumo final bruto de energia renovável;
- 20% de consumo de energias renováveis nos transportes;

- 80% de produção de energia elétrica renovável;
- redução em 35% no consumo em energia primária;
- garantia de 15% de interligações elétricas com os outros Estados-Membros da UE.

Ainda em 2020, com o objetivo de diversificar a matriz energética e acelerar a transição energética em Portugal é aprovada a **Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)** [16], que visa impulsionar a introdução gradual do hidrogénio verde como um pilar sustentável, integrado numa estratégia mais abrangente de transição para uma economia de baixo carbono. Nesse sentido, promove a produção, utilização e exportação de hidrogénio verde, com vista à criação das condições necessárias para a existência de uma verdadeira economia de baixo carbono em Portugal [17]. O objetivo é garantir, a longo prazo, a descarbonização de toda a rede de gás e das centrais térmicas, e contribuir significativamente para a descarbonização da indústria e dos transportes. Para 2030, a EN-H2 estabelece como metas a instalação de 2 a 2,5 GW de capacidade em eletrolisadores, a criação de 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogénio e a incorporação de hidrogénio verde em diversos setores, incluindo a indústria e os transportes.

Em 2021, é promulgada a **Lei de Bases do Clima** [18], marco legislativo que estabelece os princípios, metas e instrumentos para o combate às alterações climáticas e a promoção da transição energética do país, e introduz a possibilidade de antecipação da meta de neutralidade climática para 2045.

Em 2024, é aprovada a atualização do PNEC2030 [19], com vista a estabelecer metas mais ambiciosas para a redução de emissões de GEE, através do aumento da quota de energias renováveis, eletrificação da economia, implementação de medidas de promoção da eficiência energética e incorporação de gases renováveis, nomeadamente:

- a redução mínima das emissões de CO<sub>2</sub> de 55% em relação aos níveis de 2005, até 2030;
- o aumento para 51% na quota de energias renováveis no consumo final bruto de energia até 2030;
- aumento para 29% no consumo de energias renováveis nos transportes;
- redução em 16.711 ktep e 14.371 ktep no consumo em energia primária e final, respetivamente.

Esta revisão do PNEC2030 confirma o posicionamento de Portugal em acelerar a transição climática e energética, traçando uma trajetória clara para alcançar a neutralidade climática em 2045 para atingir a neutralidade climática até 2045.



Também em 2024 é aprovado o **Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB)** [20], que visa estabelecer uma estratégia nacional para desenvolver o mercado de biometano em Portugal, promovendo a descarbonização, a redução das importações de gás natural e o aproveitamento sustentável dos recursos endógenos [21].

Ainda no final de 2024, é criada a **Agência para o Clima (ApC)** [22], dedicada exclusivamente às questões climáticas, e com a missão de liderar a transição de Portugal para atingir a neutralidade carbónica até 2045

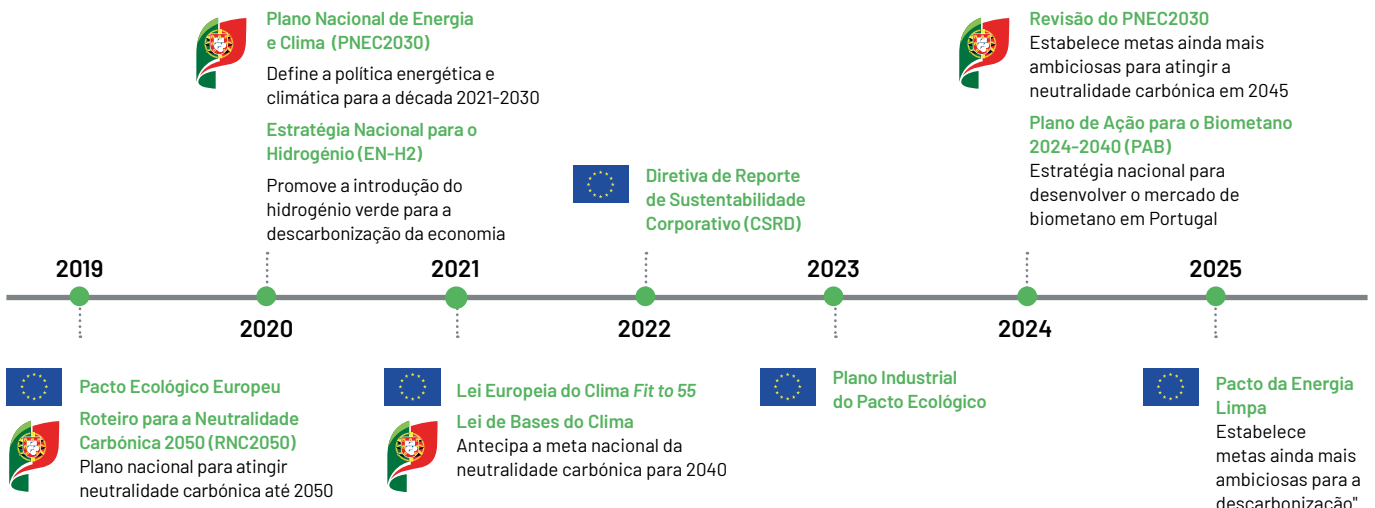
A nível europeu, e também nacional, o regime do Comércio Europeu de Licenças de Emissões da União Europeia (UE ETS - CELE) é um importante instrumento da política da União Europeia (UE) para combater as alterações climáticas e uma ferramenta-chave para reduzir as emissões de GEE de forma técnica e economicamente viável [23]. Desde a sua introdução em 2005 as emissões da UE diminuiram 41% nas cerca de 10 mil empresas abrangidas.

O CELE é um mecanismo distinto de outros existentes em matéria de ambiente, pois transforma as emissões de GEE em ativo financeiro das empresas, passíveis de serem transacionadas num mercado europeu. Procurando deste modo reduzir as emissões com o menor custo associado.

Neste contexto, o CELE (ETS) exerce um impact sões e promovendo a adoção de tecnologias mais eficientes e de baixo carbono.

Este mecanismo abrange vários sectores relevantes em termos de emissões, como seja a combustão, a refinação de óleos minerais, a metalurgia, a produção de clínquer, a cal e dolomite, vidro, a pasta e papel, alguns sectores da indústria química, a aviação e transporte marítimo e ainda a indústria cerâmica com uma capacidade produtiva instalada superior a 75 t/dia [23, 24]. Em 2027 deverão ficar abrangidos os edifícios, o transporte rodoviário e ainda outros sectores industriais ainda não abrangidos pelo CELE, mas que passarão a estar abrangidos pelo designado CELE 2 (mecanismo que se espera menos complexo que o CELE, mas mais abrangente). De mencionar que no caso da indústria cerâmica, os subsectores abrangidos pelo CELE incluem os pavimentos e revestimentos, cerâmica estrutural (fabrico de telha e tijolo, estando o fabrico de abobadilha maioritariamente excluído), sanitário (embora muitas empresas nacionais estejam excluídas por não atingirem os 75t/dia), louça utilitária e decorativa (apenas 1 empresa abrangida). A abrangência nacional será melhor detalhada nos capítulos seguintes.

Figura 2.5. Cronologia das políticas de descarbonização a nível europeu e nacional



## Referências

- [1]. UNFCCC. Paris Agreement. 2015. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [2]. IPCC. Global Warming of 1.5 °C – Full Report. 2018. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15\\_Full\\_Report\\_HR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [3]. European Commission. *European Green Deal*. 2019. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pt](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [4]. EUR-Lex. *Regulation (EU) 2021/1119*. 2021. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [5]. European Commission. *Fit for 55 – delivering proposals*. 2021. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [6]. EUR-Lex. *Directive (EU) 2022/2464*. 2022. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [7]. European Commission. Press release: Clean energy for all Europeans. 2023. Disponível em: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_510](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510). [Acedido em 05 dez. 2025].
- [8]. European Commission. RepowerEU – *Affordable, secure and sustainable energy in Europe*. 2022. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [9]. InvestEU. *InvestEU Programme*. 2021. Disponível em: [https://investeu.europa.eu/index\\_en](https://investeu.europa.eu/index_en) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [10]. European Commission. *Innovation Fund – EU action on climate*. 2021. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [11]. European Commission. *Net-Zero Industry Act*. 2023. Disponível em: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [12]. EUR-Lex. *Official Journal L 0125, 2024*. 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L:202401252> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [13]. European Commission. *Clean Industrial Deal*. 2023. Disponível em: [https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal\\_pt](https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_pt) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [14]. Governo de Portugal. *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)*. 2019. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050\\_PT-22-09-2019.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf) [Acedido em 05 dez. 2025].
- [15]. Diário da República. *Decreto-Lei n.º 158/2020*. 2020. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2020/07/13300/0000200158.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [16]. Diário da República. *Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020*. 2020. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/63-2020-140346286> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [17]. DGEG. *Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)*. 2023. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-institucionais-e-de-mercado/politica-energetica/estrategia-nacional-para-o-hidrogenio-en-h2/> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [18]. Diário da República. *Lei n.º 98/2021*. 2021. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/98-2021-176907481> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [19]. Diário da República. *Resolução do Conselho de Ministros n.º 149/2024*. 2024. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/149-2024-893982647> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [20]. Diário da República. *Documento Oficial n.º 54/2024*. 2024. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2024/03/05400/0003000080.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [21]. DGEG. *Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB)*. 2024. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-institucionais-e-de-mercado/politica-energetica/plano-de-acao-para-o-biometano-2024-2040-pab> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [22]. Diário da República. *Documento Oficial n.º 350/2024*. 2024. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2024/12/25300/0003500076.pdf> [Acedido em 05 dez. 2025].
- [23]. M. Almeida, A. Baio Dias, P. Frade e V. Francisco, “Caminhos para descarbonizar a indústria cerâmica e o CELE 2021-2025,” *Revista TÉCNICA*, no. 12, pp. 14-18, Nov./Dec. 2021.
- [24]. Diário da República. *Decreto-Lei n.º 12/2020, de 6 de abril. Diário da República, 1.ª série – N.º 68/2020. Estabelece o regime jurídico aplicável ao comércio de licenças e emissão de gases com efeito de estufa, transpondo a Diretiva (UE) 2018/410*. Disponível em: <https://data.dre.pt/eli/decreto-lei/2020/04/06/p/dre>



# PRINCIPAIS FONTES DE GEE NO FABRICO CERÂMICO

No processo de produção de produtos cerâmicos, as principais fontes de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) estão associadas à queima de combustíveis fósseis, utilizados principalmente nos fornos para atingir as altas temperaturas necessárias à sinterização dos materiais. Adicionalmente, a eletricidade proveniente de fontes não renováveis contribui significativamente para as emissões indiretas. A decomposição térmica das matérias-primas, como as argilas e carbonatos, também gera emissões diretas de CO<sub>2</sub>, resultantes da libertação de carbono pre-

sente na sua composição química durante o processo de calcinação.

Embora os processos de cozedura sejam as principais fontes de emissões no setor cerâmico, e por isso, exijam especial atenção, a descarbonização completa deste setor deve ser encarada de forma integrada, considerando todas as etapas do processo produtivo numa perspetiva global.

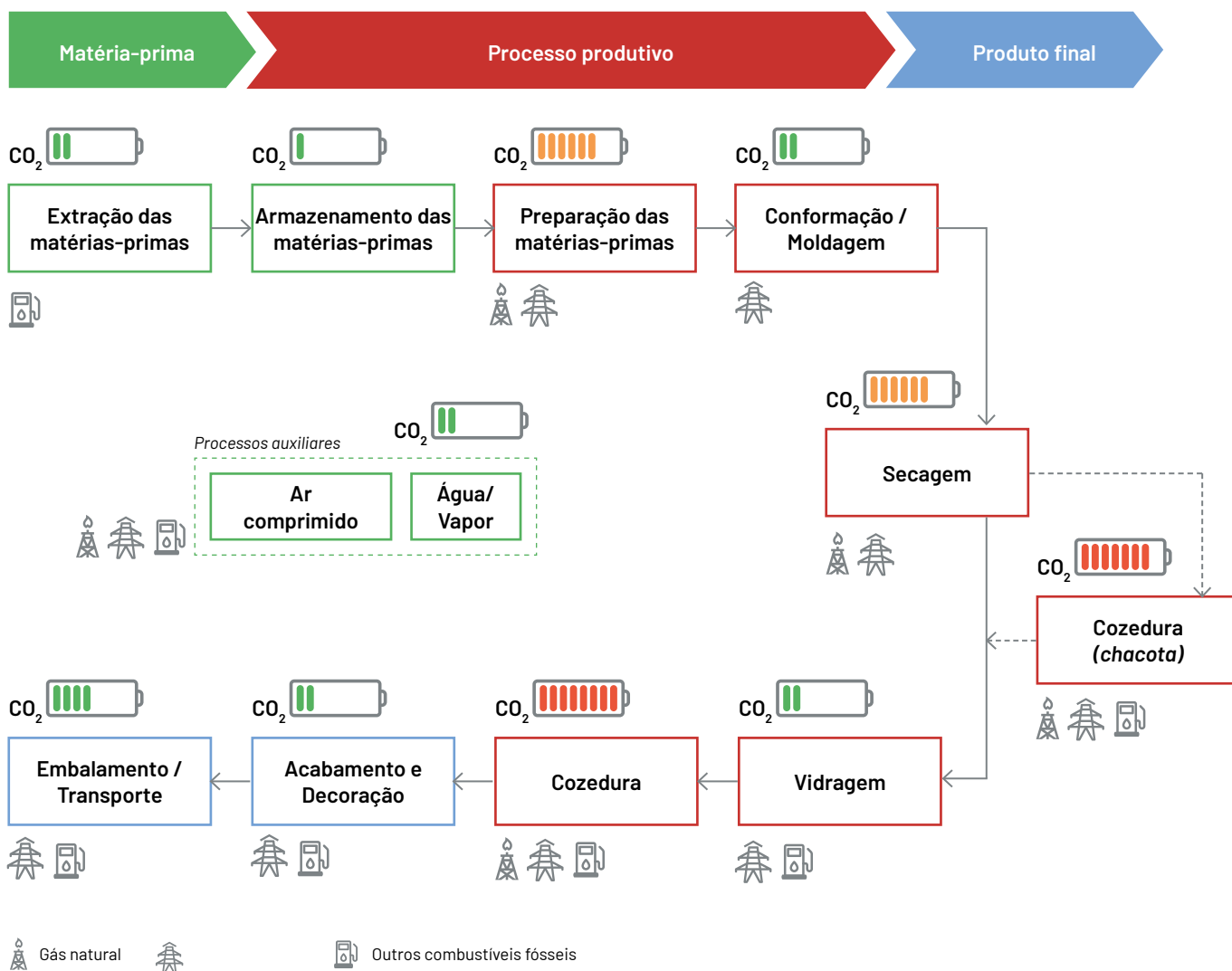


Figura 2.6. Processo produtivo cerâmico, com identificação das principais fontes de emissão de CO<sub>2</sub>, e das correspondentes fontes de energia utilizadas.



A distribuição dos diferentes tipos de emissões de CO<sub>2</sub> ao longo da cadeia de valor varia conforme o processo de fabrico, matérias-primas utilizadas e combustíveis consumidos. De uma forma geral, as principais fontes de emissão podem ser agrupadas da seguinte forma:

a) **Emissões diretas (âmbito 1):** originadas e controladas pela atividade da empresa

- **Combustíveis fósseis:** fornos (maioritário), atomizadores, secadores e outros (p. ex., caldeiras, ...) – 70 a 90%;
- **Processo:** calcinação de matérias-primas (calcário, dolomite, aditivos com carbono, argilas, ...) – 3 a 30%;

• **Sistemas de tratamento de efluentes gasosos** (neutralização de HF; HCl e SO<sub>2</sub>) com calcário ou materiais contendo carbonatos ou carbono: vestigial < 1%.

b) **Emissões indiretas (âmbito 2):** originadas na produção de energia adquirida pela empresa

• **Eletricidade:** 10 a 20% do total em função do processo.

c) **Emissões de outras fontes indiretas (âmbito 3):** associadas aos fornecedores e ao longo do ciclo de vida (ACV) dos produtos, incluem, entre outros, a extração e transporte de matérias-primas, etc.



# VETORES DE DESCARBONIZAÇÃO E PRINCIPAIS TECNOLOGIAS E MEDIDAS DISPONÍVEIS PARA O SETOR

A industrialização permitiu a produção de bens em grande escala, com qualidade uniforme, custos reduzidos e menor consumo de energia. A indústria cerâmica é considerada uma consumidora intensiva de energia, devido à combinação de fatores inerentes ao seu processo produtivo e à natureza dos materiais envolvidos, nomeadamente, ser um sistema produtivo caracterizado por ciclos longos e contínuos, com processamento a temperaturas elevadas e processos de secagem e tratamento de matérias-primas (p.ex., moagem, secagem, cozedura) com consumos energéticos elevados. Além disso, as perdas térmicas significativas e baixa eficiência energética, especialmente nos processos de queima e secagem contribuem igualmente para o elevado consumo energético do setor. Associado ao consumo intensivo de energia encontram-se as emissões significativas de gases com efeito de estufa (GEE),

principalmente dióxido de carbono, resultantes tanto da queima de combustíveis fósseis (p.ex., gás natural, gás propano, GPL), geralmente usados como fonte energética quanto das emissões inerentes ao processo produtivo, como as resultantes das reações químicas e transformações das matérias-primas no processo de fabrico, como a decomposição de carbonatos e decomposição de materiais orgânicos presentes na argila, com libertação de CO<sub>2</sub>.

Neste contexto, destacam-se como principais vetores de descarbonização para o setor: a **otimização da eficiência energética**, a **substituição de combustíveis fósseis por renováveis**, a **eletrificação dos processos térmicos**, **medidas de economia circular e captura, utilização e armazenamento de carbono** (CCUS – *Carbon Capture, Utilization and Storage*).

## Vetores de descarbonização



Figura 2.7. Principais vetores de descarbonização da indústria cerâmica.

Para alcançar reduções significativas de emissões de carbono na Indústria Cerâmica, é necessário considerar as Melhores Técnicas Disponíveis, MTD (*Best Available Techniques* - BAT, em inglês), assim como o desenvolvimento e implementação de tecnologias emergentes. As tecnologias podem ser aplicadas tanto a montante quanto a jusante dos processos emissores de gases com efeito de estufa (GEE). Nas tecnologias a implementar a montante do processo estão incluídas as que reduzem as emissões de GEE diretamente no processo produtivo, como as associadas à substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis, ou substituição de matérias-primas. Nas tecnologias a adotar a jusante dos processos, incluem-se as soluções implementadas após a geração de emissões de carbono, como as tecnologias para captura, armazenamento e reutilização do CO<sub>2</sub> emitido.

Para acelerar a descarbonização da indústria cerâmica com vista a atingir a neutralidade carbónica em 2050, torna-se imperativo a redução de emissões de carbono, no curto e médio prazo, através de soluções tecnológicas já disponíveis no mercado, incluindo as melhores tecnologias disponíveis (MTD), assim como tecnologias com elevado nível de maturidade tecnológica (TRL 7-9). Além disso, tecnologias emergentes, especialmente aquelas que atingem níveis intermediários de maturidade tecnológica (TRL ≥4), devem ser direcionadas ao mercado de forma célere, otimizando seu potencial para contribuir na descarbonização do setor.

Em seguida, são elencadas as abordagens consideradas atualmente mais eficazes para a descarbonização da indústria cerâmica.

### Otimização da eficiência energética

As medidas de eficiência energética desempenham um papel essencial na descarbonização do setor cerâmico, contribuindo para a redução do consumo de energia e das emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos processos produtivos. Entre as principais ações destacam-se:

- **Recuperação de calor residual:** aproveitamento do calor gerado nos processos para reutilização noutras fases da produção, reduzindo o consumo energético global;
- **Melhoria do isolamento térmico de fornos e equipamentos:** redução das perdas de energia térmica, aumentando a eficiência dos processos térmicos;
- **Modernização dos sistemas de queima:** substituição ou otimização dos queimadores para melhorar a eficiência na combustão e reduzir o consumo de combustível;
- **Implementação de sistemas de monitorização e gestão energética:** controlo rigoroso dos consumos, identificação de ineficiências e definição de ações de melhoria contínua (p.ex., norma ISO 50001).

### Eletrificação dos processos térmicos e utilização de energia renovável

A eletrificação de processos térmicos é fundamental na redução das emissões de carbono, na modernização dos processos de produção e na melhoria da eficiência energética, envolvendo a substituição total ou parcial de fontes de energia fóssil por energia elétrica em fornos, secadores e em processos auxiliares na produção cerâmica com necessidades térmicas. A eletrificação está frequentemente associada a sistemas de controle mais avançados, que permite uma gestão mais precisa e eficiente dos processos de produção cerâmica. Os equipamentos elétricos são tipicamente mais eficientes, reduzindo o consumo de energia no processo produtivo, e consequentemente a redução indireta das emissões de CO<sub>2</sub>. A eletrificação permite a integração mais direta de **energias renováveis**, como solar ou eólica, na produção cerâmica. A eletricidade proveniente de fontes renováveis pode ser usada para alimentar os processos, reduzindo a pegada de carbono associada à eletricidade consumida.

A descarbonização da indústria cerâmica pode ser significativamente impulsionada pela integração de soluções baseadas na eletrificação, tais como a **substituição parcial de combustíveis fósseis por energia elétrica** nos fornos e secadores, através da utilização de fornos totalmente elétricos, de alta frequência, de indução elétrica, fornos de arco elétrico ou a utilização de processos de secagem alternativos, como a secagem por micro-ondas, a secagem por infravermelhos ou a secagem a vácuo.

### Utilização de gases renováveis

Os gases renováveis representam uma alternativa promissora para a descarbonização do setor da cerâmica que, tradicionalmente, depende de combustíveis fósseis como o gás natural para alimentar os seus fornos e secadores. As imposições da transição energética estão a acelerar a adoção de soluções mais sustentáveis e os gases renováveis desempenham aqui um papel crucial.

#### • Hidrogénio (H<sub>2</sub>) verde

A utilização de hidrogénio verde, sem emissões de GEE, produzido a partir da eletrólise da água utilizando energia renovável, como a energia solar, hídrica ou eólica, é uma opção viável e promissora para redução das emissões de carbono associadas ao setor cerâmico. Em alternativa, a substituição parcial de combustíveis fósseis, como o gás natural, por hidrogénio verde, em processos cerâmicos como a cozedura e secagem oferece uma solução intermédia para a transição energética gradual, permitindo a redução das emissões de carbono, sem necessidade de grandes adaptações dos sistemas existentes. Adicionalmente, a utilização de hidrogénio verde na produção de energia elétrica também pode contribuir para a descarbonização do setor, uma vez que muitos dos processos cerâmicos



micos são eletrificados, no entanto, ainda é um processo caro em comparação com o gás natural ou outras fontes renováveis, como a solar.

#### • Amoníaco (NH<sub>3</sub>) verde

O amoníaco verde é um combustível alternativo e sustentável, produzido a partir de hidrogénio verde e azoto atmosférico, através do processo de Haber-Bosch, sem emissões de dióxido de carbono no seu processo de fabrico. Na indústria cerâmica, o amoníaco verde pode ser usado como combustível em diversos equipamentos, como em fornos e caldeiras, substituindo os combustíveis fósseis. No entanto, a sua queima resulta na formação de óxidos de nitrogénio (NO<sub>x</sub>), principalmente óxido de azoto (NO) e dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), que são poluentes atmosféricos com efeitos nefastos no meio ambiente e saúde humana. A maturidade tecnológica do amoníaco verde, encontra-se ainda numa fase inicial, estando diretamente dependente do desenvolvimento de tecnologias para a sua produção de forma sustentável, nomeadamente, processos de eletrólise e produção de energia renovável mais eficientes e económicos.

#### • Combustíveis sintéticos

Os combustíveis sintéticos, como o e-metano, e diesel ou e-gasolina, são produzidos a partir de fontes não fósseis, oferecem uma alternativa mais limpa aos combustíveis fósseis tradicionais. A sua produção envolve a utilização de hidrogénio verde, produzido através da eletrólise da água e usando eletricidade renovável, e dióxido de carbono capturado diretamente da atmosfera ou de fontes industriais. Uma das principais vantagens dos combustíveis sintéticos é o seu potencial para a neutralidade carbónica. Embora a sua combustão liberte CO<sub>2</sub>, a quantidade emitida é compensada pelo carbono capturado na sua produção. Os combustíveis sintéticos apresentam uma elevada densidade energética e podendo ser transportados e armazenados convenientemente em grandes volumes durante longos períodos, permitindo-lhes compensar mesmo flutuações sazonais no fornecimento e, assim, contribuir para a estabilização de entrega de energia. Além disso, a infraestrutura usada para distribuição e armazenamento de combustíveis fósseis (gasodutos, postos de gasolina/diesel) podem ser usadas para os combustíveis sintéticos. Apesar das vantagens referidas, os combustíveis sintéticos possuem ainda em baixa maturidade tecnológica, encontrando-se atualmente em fase de demonstração e de penetração no mercado.

#### Biocombustíveis

Os biocombustíveis, combustíveis obtidos a partir da biomassa como o biogás, o biometano ou os biocombustíveis sólidos derivados do processamento da madeira (p. ex., pellets de madeira, estilha de madeira, bagaço de azeitona, resíduos de serrarias ou farinhas de biomassa), são

uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, tradicionalmente utilizados na indústria cerâmica, promovendo a economia circular e a redução das emissões de carbono, uma vez que o dióxido de carbono emitido na combustão é compensado pelo CO<sub>2</sub> absorvido durante o ciclo de vida das plantas. Os biocombustíveis, quando de origem exclusivamente vegetal, podem ser considerados fontes de emissões líquidas de carbono nula, uma vez que o dióxido de carbono emitido durante a combustão é compensado pelo CO<sub>2</sub> absorvido durante o ciclo de vida das plantas. Em muitos casos, os equipamentos existentes, como caldeiras e fornos, podem ser adaptados para utilização de biocombustíveis, sem necessidade de substituição, como, por exemplo, a substituição de gás natural por biometano, cuja composição química é semelhante.

A combustão direta da biomassa para geração de energia elétrica ou térmica apresenta um TRL elevado, refletindo uma maturidade tecnológica avançada. O nível de maturidade tecnológica da produção de biometano depende das tecnologias adotadas para a sua produção, sendo, atualmente, a produção de biometano por digestão anaeróbica a tecnologia mais madura (TRL 9). Outras tecnologias para produção de biometano como a gaseificação da biomassa ou as tecnologias de upgrading de biogás para remoção de CO<sub>2</sub> e obtenção de metano concentrado, apresentam menores níveis de maturidade tecnologia mais baixos.

#### Economia circular

A economia desempenha um papel essencial na descarbonização da indústria cerâmica, ao promover a utilização mais eficiente dos recursos e a diminuição das emissões em todas as fases do ciclo de vida dos produtos, destacando-se as seguintes estratégias:

- **Utilização de matérias-primas alternativas:** substituição de matérias-primas por carbonatadas tradicionalmente usadas no fabrico cerâmico por resíduos ou subprodutos industriais isentos de carbono ou com menor teor. Esta abordagem inclui a incorporação de resíduos da indústria cerâmica ou de outras indústrias (simbioses industriais). Para além da redução direta das emissões de CO<sub>2</sub> diretas associadas ao processo produtivo, reduz indiretamente as emissões resultantes da extração das matérias-primas.
- **Ecodesign, reciclagem e reutilização:** o desenho otimizado do produto cerâmico permite otimizar o desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida. Por exemplo, o design de produtos com menor massa, como telhas mais finas, tijolos multiperfurados, blocos ou tubos mais finos, quando tecnicamente viável, permite a redução dos tempos de secagem e cozedura, e consequentemente as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da redução do consumo de energia e de matérias-primas. A incorporação de resíduos e subprodutos no processo produtivo (como caco cru, caco cozido, lama, poeiras),



permite reduzir a dependência de combustíveis fósseis, que são a principal fonte de emissões diretas nesta indústria, e evitam a emissão de GEE associados à decomposição de resíduos em aterro.

### Novos processos de fabrico

Abordagens disruptivas no fabrico cerâmico visam substituir os processos convencionais por tecnologias inovadoras que eliminam ou reduzem significativamente as emissões de carbono, onde se destaca a **microgranulação a seco ou via seca**, a utilização de tecnologias avançadas para a secagem e cozedura usando **radiação de micro-ondas e radiação de infravermelhos**, processos de **sinterização flash**.

### Captura, utilização e armazenamento de CO<sub>2</sub>

A captura, armazenamento e utilização de CO<sub>2</sub> (conhecida como CCUS – *Carbon Capture, Utilization and Storage*) ganha importância como solução complementar à descarbonização em processos onde a eletrificação ou a substituição integral da energia de origem fóssil por energia renovável não é viável ou não permite eliminar todas as emissões, nomeadamente as relacionadas com a decomposição de matérias-primas (ex.: carbonatos e compostos orgânicos).

A captura de CO<sub>2</sub> pode ser efetuado por 3 mecanismos diferentes:

- **pós-combustão:** o CO<sub>2</sub> é capturado dos gases de escape após a combustão, normalmente através de solventes químicos (ex. aminas). É a tecnologia mais madura e mais facilmente adaptável a unidades industriais existentes. No entanto, requer espaço adicional e consumo energético (penalização energética).
- **oxi-combustão:** a queima é feita com oxigénio puro em vez de ar, produzindo um gás de escape altamente concentrado em CO<sub>2</sub> e vapor de água, facilitando a separação. É mais em termos de captura, mas requer reformulação significativa dos fornos.
- **pré-combustão** (menos comum neste setor): combustível (geralmente metano ou carvão) é reformado em hidrogénio e CO<sub>2</sub>, sendo o CO<sub>2</sub> seja armazenado e o hidrogénio usado como combustível. Esse processo fornece um fluxo de CO<sub>2</sub> com quase 100% de concentração. Abordagem com maior implantação em indústrias como o aço e o cimento.

A **Tabela 2.2** apresenta uma síntese das principais tecnologias/técnicas e medidas-chave aplicáveis ao setor, indicando o respetivo nível de maturidade tecnológica.

TECNOLOGIAS /MEDIDAS DE DESCARBONIZAÇÃO	NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA				
	TRL 5	TRL6	TRL 7	TRL8	TRL 9
<b>OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA</b>				Instalação de variadores de velocidade Permutadores de calor de gases de combustão Recuperação de ar quente para préformo e secagem Otimização da mistura combustível/ comburente Controlo automático dos ciclos de secagem e humidade/temperatura Queimadores de alta eficiência	Isolamento térmico em condutas
<b>ELETRIFICAÇÃO DE PROCESSOS TÉRMICOS</b>		Bombas de calor de alta temperatura Secagem por micro-ondas	Fornos totalmente elétricos Secagem por infravermelhos		
<b>SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR RENOVÁVEIS</b>	Amoníaco verde	Metanação de CO <sub>2</sub> Combustíveis sintéticos	Gaseificação da biomassa H <sub>2</sub> produzido com energia verde	Mix H <sub>2</sub> verde / GN	Biometano Biomassa Solar fotovoltaico
<b>SUBSTITUIÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS E NOVOS PROCESSOS DE FABRICO</b>		Aditivos de sinterização Matérias-primas alternativas com baixo teor de carbonatos			
<b>NOVOS PROCESSOS DE FABRICO</b>	Flash Sintering, Cold Sintering (CSO), Spark Plasma Sintering (SPS), Photonic Sintering				
<b>ECONOMIA CIRCULAR</b>	Reincorporação de resíduos cerâmicos de demolição	Otimização do design e composição das peças para reduzir tempos de secagem e cozedura	Reutilização de lamas e água tratada de ETAR	Reutilização de caco	
<b>CAPTURA, UTILIZAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CCUS)</b>	Captura e armazenamento de carbono	Captura e utilização de carbono			

Tabela 2.2. Nível de maturidade tecnológica das principais tecnologias/técnicas e medidas-chave para a descarbonização da indústria cerâmica.







# Indicadores atuais e necessidades de descarbonização até 2050



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# DIAGNÓSTICO DO SETOR (CONTEXTO EUROPEU E NACIONAL)

Caracterizada por um elevado consumo energético, a produção de cerâmica recorre principalmente ao gás natural como fonte de energia, responsável por cerca de 80% da energia consumida pelo setor.

Com base nas informações disponíveis, as emissões totais de gases com efeito de estufa (GEE) na UE, abrangendo tanto os setores incluídos no CELE (EU ETS) e os não incluídos, foram as seguintes:

- 2022: As emissões totais de GEE na UE foram estimadas em aproximadamente 3,58 mil milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, estando 1,286 mil milhões de toneladas no CELE;
- 2023: As emissões totais de GEE na UE diminuíram para cerca de 3,4 mil milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, representando uma redução de 5,1% em relação ao ano anterior.

Já as emissões não abrangidas pelo CELE (setores como transporte rodoviário, edifícios, agricultura e pequenos setores industriais) foram de aproximadamente 2,31 mil

milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente em 2022 e cerca de 2,28 mil milhões em 2023.

No âmbito do Comércio de Emissões da UE, que abrange cerca de 45% das emissões totais da UE (cerca de 10 mil instalações), as emissões verificadas foram de aproximadamente 1286 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente em 2022. Em 2023, estima-se que essas emissões diminuíram para cerca de 1 071 milhões de toneladas, representando uma redução de 16,7% face ao ano anterior.

Em relação à indústria cerâmica europeia, as emissões registadas no âmbito do mercado CELE foram de aproximadamente 12 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2022 e 9 milhões em 2023, correspondendo a cerca de 0,9% e 0,8% das emissões totais do CELE nesses anos, respetivamente. Estes números demonstram que, embora a contribuição da indústria cerâmica para as emissões totais da UE seja relativamente modesta, o setor está sujeito a metas de descarbonização exigentes no âmbito do CELE. Em Portugal as emissões da indústria cerâmica abrangida pelo CELE em 2023 foram de 324 mil toneladas.

## Emissões de GEE na UE

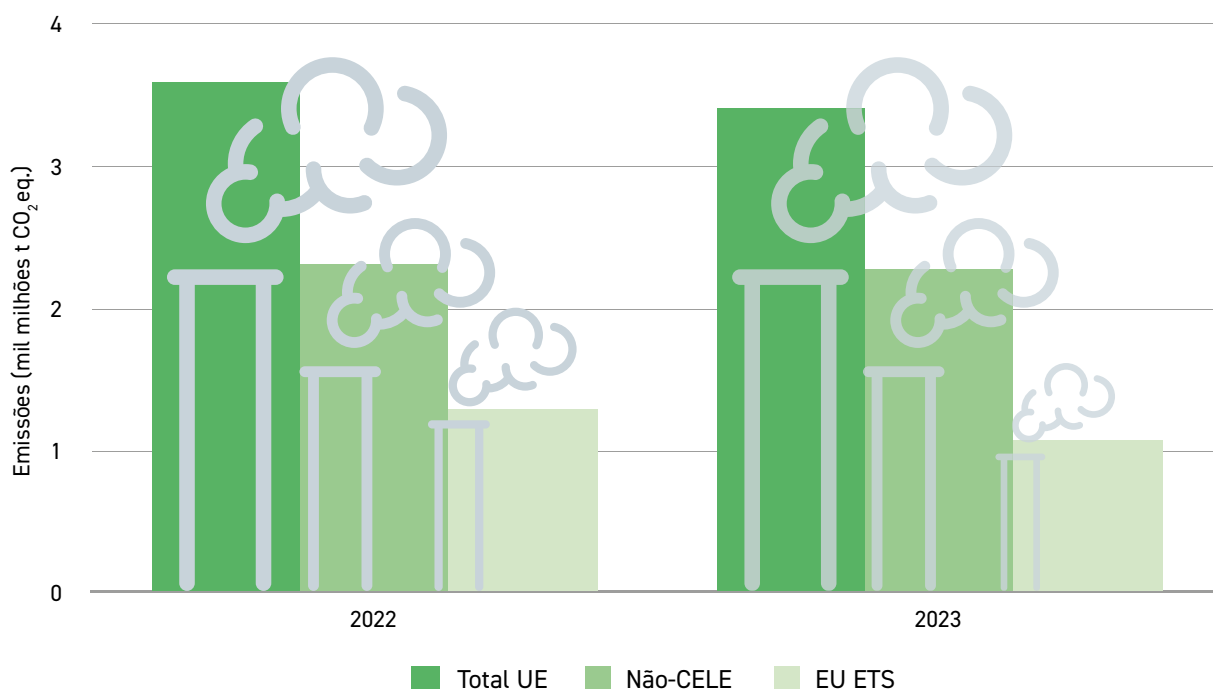


Figura 3.1. Emissões de GEE da Indústria Cerâmica, das empresas CELE e não-CELE, em 2022 e 2023. (Fonte: CTCV com base nos dados do UE-ETS).

### Contexto geral Europeu em termos do mecanismo CELE (tendo por base 2023)

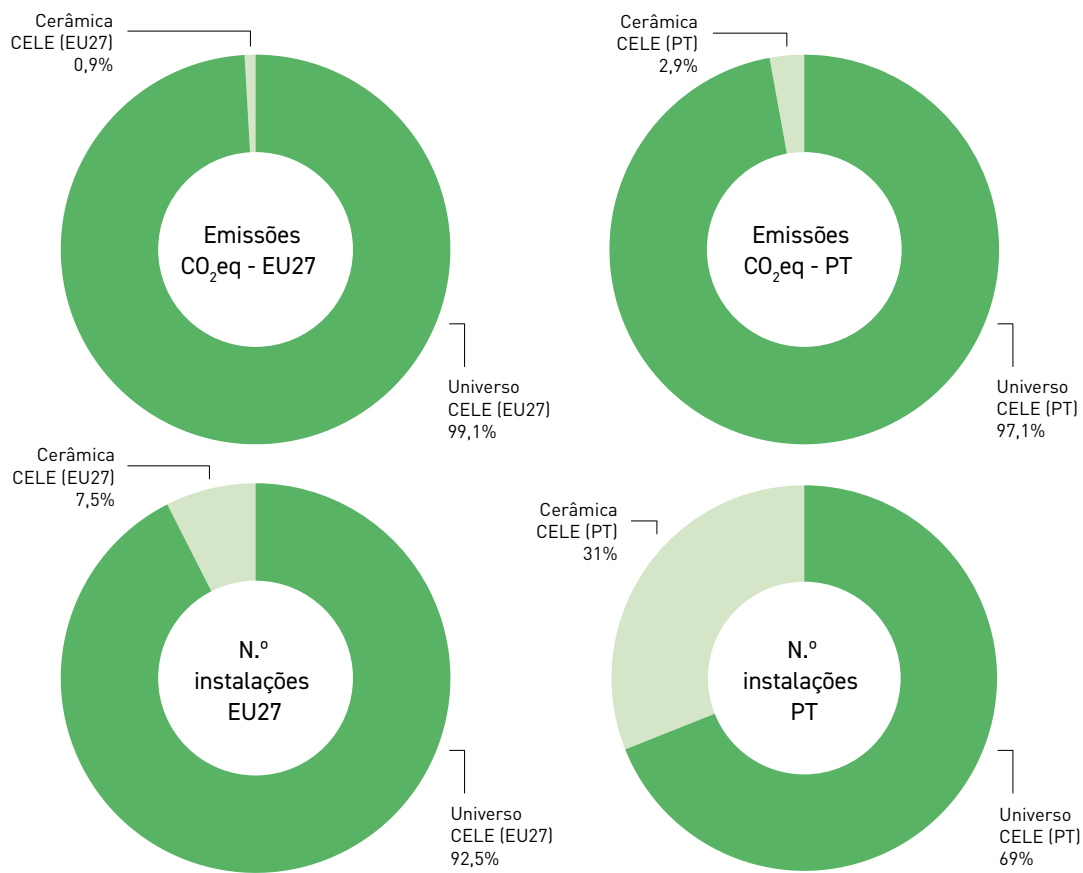


Figura 3.2. Instalações cerâmicas abrangidas pelo CELE (ETS) em Portugal e sua representatividade (Fonte: CTCV com base nos dados do CITL).



# EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR SUBSETOR DA CERÂMICA

A evolução histórica do consumo de energia no setor cerâmico em Portugal entre 2005 e 2023 evidencia mudanças significativas resultantes de transformações tecnológicas, ajustes económicos de mercado e transições energéticas.

De forma geral, observa-se uma tendência clara de redução dos consumos energéticos, particularmente marcada no subsector da cerâmica estrutural, especialmente através da substituição de combustíveis mais poluentes por alternativas mais limpas, por exemplo, a transição do coque para fontes de energia menos emissoras e com maior eficiência em termos de sustentabilidade (ambiental e económica) e ainda a conjuntura de recessão do mercado.

Já nos restantes subsectores, pavimento e revestimento, e louça sanitária, a tendência é mais estável nos últimos anos, onde os consumos e emissões registaram variações associadas a dinâmicas de mercado e alterações na procura.

Importa destacar que esta evolução é fortemente influenciada por fatores económicos, como períodos de recessão, enquanto os aumentos observados em determinados momentos refletem fases de crescimento económico e o aumento da produção. As oscilações registadas evidenciam igualmente o impacto de eventos externos, como a crise financeira de 2008-2010 ou a pandemia de COVID-19 em 2020, que afetaram diretamente a produção e o consumo de energia.

## Energia na Indústria Cerâmica

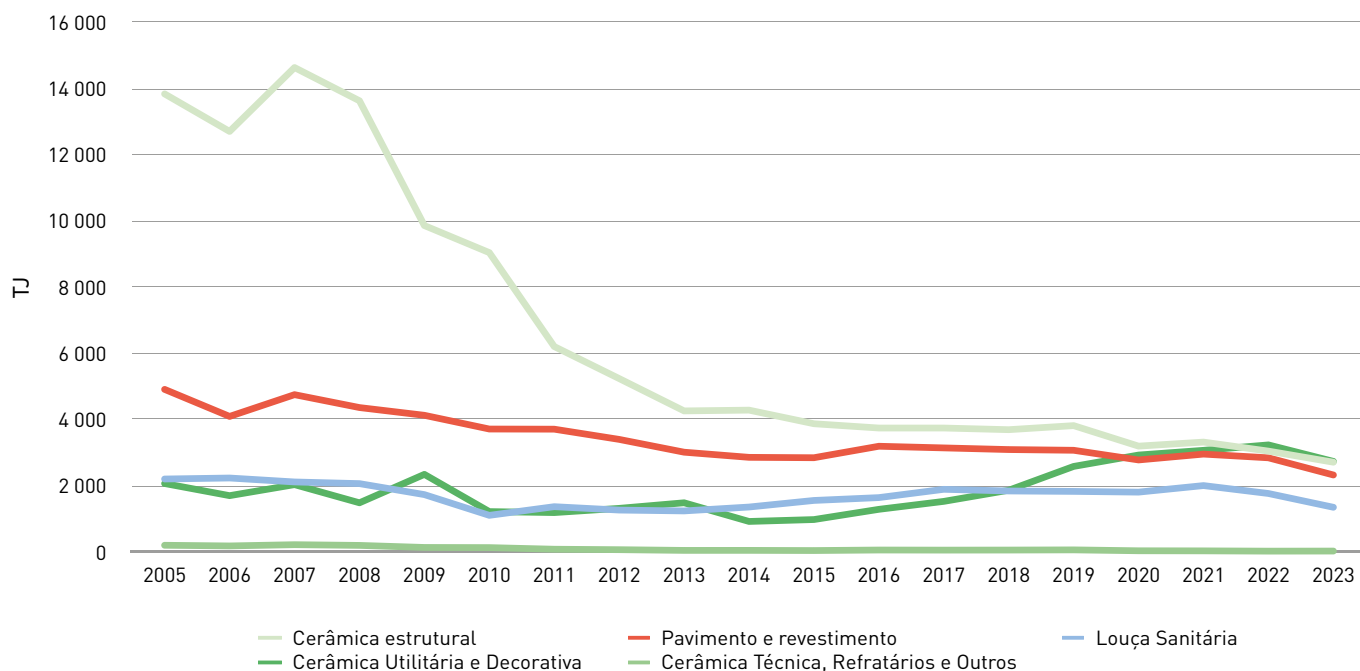


Figura 3.3. Evolução do consumo energético na indústria cerâmica (2005-2023). (Diagnósticos e auditorias ambientais, dados do CELE, auditorias de energia realizadas pelo CTCV. Dados estimados e compilados pelo CTCV incluindo balanços energéticos nacionais).



# EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> POR SUBSETOR DA CERÂMICA

A Figura 3.4 ilustra a evolução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nos diferentes subsectores da indústria cerâmica em Portugal, entre 2005 e 2023.

Observa-se uma tendência geral de redução nas emissões, especialmente marcada na cerâmica estrutural, que reflete a modernização dos processos, a melhoria da eficiência energética e a substituição de combustíveis fósseis intensivos em carbono, como o coque, por fontes energéticas menos emissoras, bem como a recessão económica.

Pavimento e revestimento, bem como a louça sanitária diminuem também a emissão CO<sub>2</sub>, mas de modo menos expressivo, tal como seria de esperar pois a fonte energética

é maioritariamente o gás natural no período em análise, refletindo eficiência e crises económicas.

Assim, a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> nos diversos subsectores da cerâmica tem seguido uma trajetória condicionada por fatores tecnológicos, energéticos, económicos e regulatórios. A emissão específica de CO<sub>2</sub> varia significativamente entre os subsectores, refletindo as suas especificidades produtivas, o tipo de matérias-primas utilizadas e as fontes de energia empregues, com menores emissões na estrutural e maiores no sanitário e cerâmica utilitária e decorativa.

**Emissões de CO<sub>2</sub> na Indústria Cerâmica (Acumulado)**

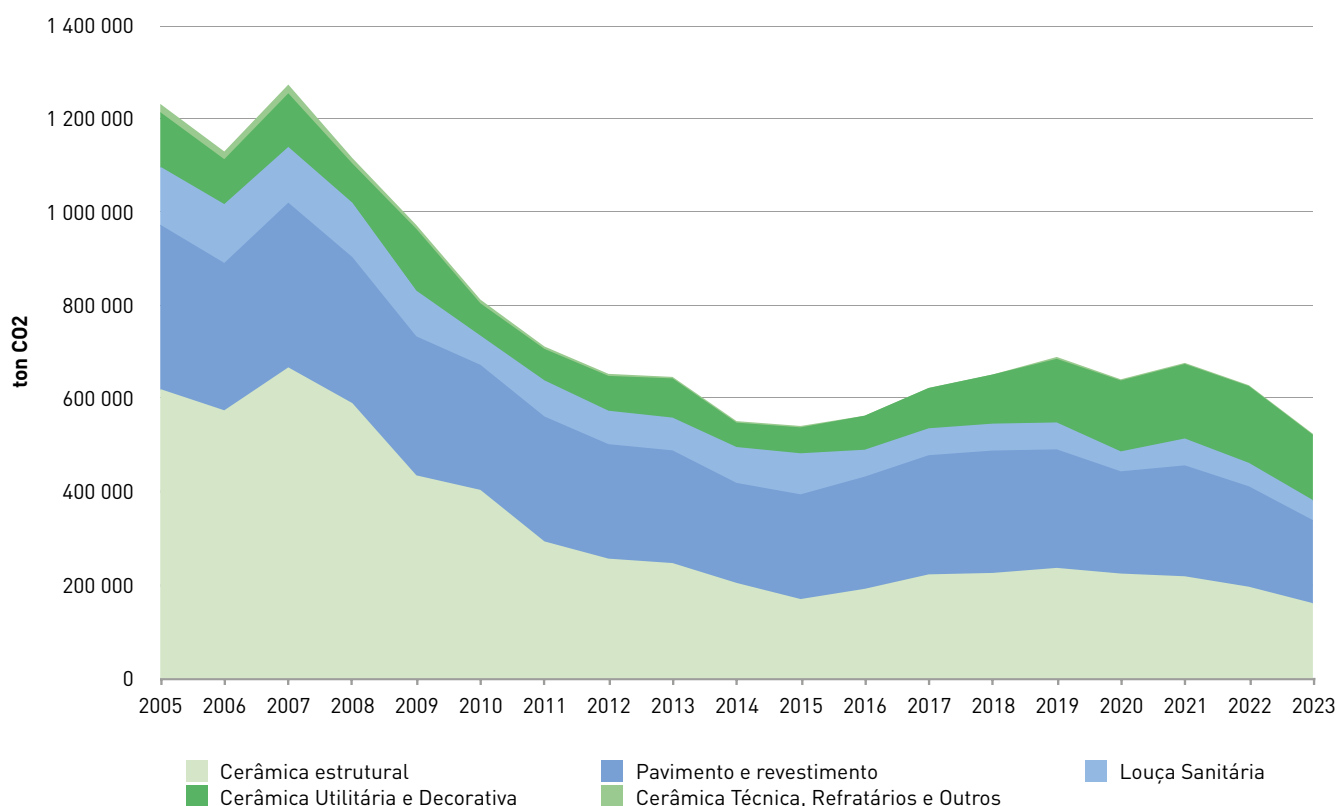


Figura 3.4. Evolução da emissão de CO<sub>2</sub> na indústria cerâmica entre 2005 e 2023 (Fonte: diagnósticos e auditorias ambientais, dados do CELE, auditorias de energia realizadas pelo CTCV. Dados estimados e compilados pelo CTCV incluindo balanços energéticos nacionais).

# NECESSIDADES DE DESCARBONIZAÇÃO NO CONTEXTO NACIONAL

Em Portugal, tomando como referência o ano de 2023, as emissões de CO<sub>2</sub> das empresas abrangidas pelo CELE totalizaram cerca de 12,8 Mt CO<sub>2</sub> eq., o que representa uma redução de aproximadamente 48% em comparação com 2013. No que respeita à indústria cerâmica, esta tem contribuído com cerca de 2,5% a 3,5% das emissões totais do CELE desde o início do mecanismo em 2005. Em termos de número de instalações, o setor tem representado entre 25% e 40% das instalações nacionais abrangidas pelo CELE no período entre 2005 e 2023. De mencionar que esta percentagem nacional é superior à da Europa (apresentada na secção 2.1).

Alcançar a neutralidade carbónica do setor até 2050 representa um enorme desafio de descarbonização. As metas previstas para os setores CELE exigem a redução de emissões de 62% até 2030, de 62-75% até 2040, e de 90% até 2050, face aos valores de 2005.

CO<sub>2</sub> - Cerâmica CELE e Cerâmica Não-CELE

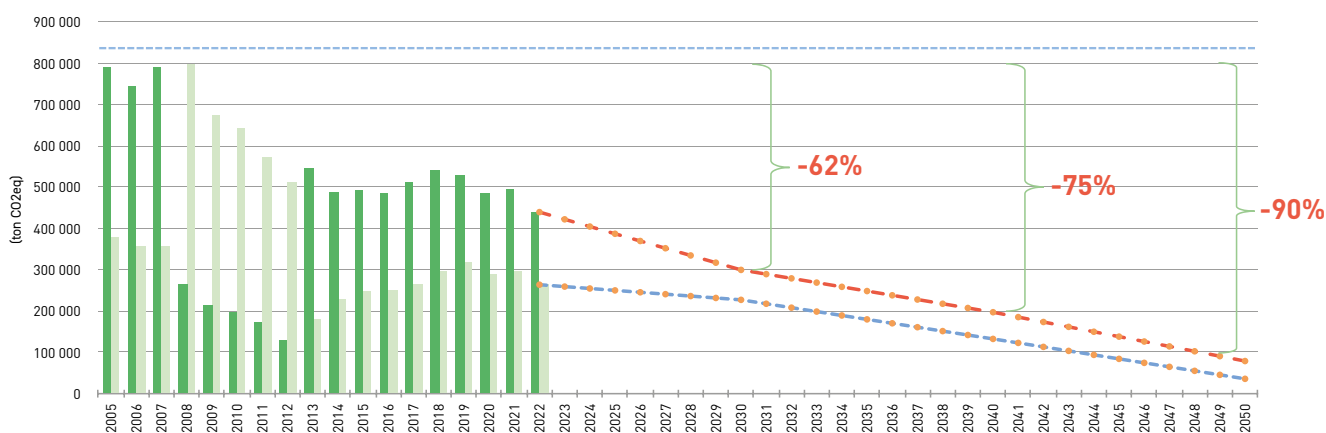


Figura 3.5. Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> na indústria cerâmica entre 2005 e 2023, com indicação das necessidades de descarbonização face às exigências europeias para 2050 (Fonte: M. Almeida, P. Frade, 2024).



A descarbonização do setor cerâmico implica uma transformação profunda no seu modelo energético, exigindo a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por eletricidade verde, gases renováveis, como o hidrogénio verde e o biometano, e a biomassa. Este setor, altamente intensivo em energia térmica, enfrenta o desafio de manter a eficiência e qualidade dos processos industriais, enquanto reduz drasticamente as suas emissões de CO<sub>2</sub>.

Para suprimir as necessidades energéticas da indústria cerâmica estima-se que serão necessárias em 2050 (em função também do mix disponibilizado)(Tabela 3.1):

- 7500-9500 TJ de biometano
- 2500-5000 TJ de hidrogénio verde

A transição energética da indústria cerâmica exigirá um aumento substancial da oferta e disponibilidade de energia verde, tanto elétrica como de gases renováveis. Estima-se que, para cumprir metas de neutralidade carbónica até 2050, o setor terá de triplicar ou quadruplicar o consumo atual de eletricidade renovável e substituir quase a totalidade do gás natural por biometano ou hidrogénio verde. Este caminho requer investimento público e privado, infraestruturas energéticas adaptadas e um forte compromisso com a inovação e digitalização industrial.

**Tabela 3.1. Necessidades energéticas previstas para o setor cerâmico em 2030, 2040 e 2050.**

TJ	2030	2040	2050
Biometano	5000-6500	6000-8500	7500-9500
Hidrogénio	500-1000	1000-3500	2500-5000





# Principais tecnologias e medidas de descarbonização



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O consumo crescente e contínuo de energia na indústria cerâmica exige a implementação de medidas para promover a poupança e a racionalização dos consumos, incluindo a criação de incentivos para a eficiência energética. Embora muitas das principais medidas já estejam a ser adotadas pela indústria cerâmica, há ainda margem para melhorias significativas. Estas medidas incluem: a **sistemas de recuperação de calor residual, otimização dos sistemas de queima, uso de motores elétricos de alto rendimento, uso de bombas de calor, isolamento térmico** de tubagens, secadores, fornos e outros equipamentos, **otimização de sistemas de ar comprimido** ou a implementação de **sistemas de gestão e monitorização de energia**.

O investimento na formação e sensibilização dos recursos humanos é fundamental para o sucesso dessas medidas. Nos últimos anos, foram adotadas ações para otimizar o consumo de energia, visando a redução dos custos associados à fatura energética. Estas medidas estão abrangidas pelo Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), Comércio Europeu de Licenças de Emissões (CELE) e decreto-Lei 68-A.

A eficiência energética desempenha um papel crucial para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis na indústria. Com a Indústria 4.0 os avanços nos sistemas de monitorização e controlo de processos, a energia pode ser utilizada de forma mais eficiente, reduzindo emissões de gases de efeito estufa, encargos energéticos e melhorando a competitividade das empresas. As tecnologias digitais, como parte desta transição, facilitam várias inovações, como a simbiose industrial e urbana, integração de energia renovável, melhoria na flexibilidade e diversidade de fontes de energia, e novos modelos de negócios.

## Sistemas de recuperação de calor residual

No contexto da otimização a eficiência energética, a recuperação de calor residual assume um papel fundamental. Entre as medidas de recuperação do calor residual de fornos que podem ser implementadas para diminuir os consumos energéticos na indústria, destacam-se:

- Pré-aquecimento do ar de combustão dos queimadores dos fornos, o ar de secagem dos secadores, utilizando o calor residual proveniente dos fornos. Este processo pode fazer-se aproveitando diretamente o ar de arrefecimento rápido do forno, recuperando-o como ar de combustão para a zona de queima ou aproveitando o calor dos gases de combustão mediante permutadores na conduta de exaustão dos gases de fornos.
- Produção de água quente ou vapor através da utilização de caldeiras de recuperação aquecidas a partir do calor

dos gases de combustão de alta e média temperatura de fornos ou de caldeiras;

- Produção de água quente, utilizando o calor recuperado dos gases de exaustão, através de permutadores ar-água;
- Aquecimento de água através da instalação de condensadores de vapor residual;
- Ciclo Orgânico de Rankine (ORC- Organic Rankine Cycle): a potência contida nos gases de exaustão pode constituir a fonte de calor de um ciclo orgânico de Rankine. Através do funcionamento deste ciclo, é gerada energia elétrica que pode ser utilizada internamente no processo produtivo.

## Otimização de sistemas de queima

A otimização dos processos térmicos a combustão por otimização da mistura combustível/comburente e utilização de queimadores de tecnologia avançada, como sejam os queimadores pulsados, os queimadores recirculadores de gases, ou os queimadores regenerativos, são essenciais para diminuir o consumo de combustível, minimizar as emissões poluentes e aumentar a eficiência energética. Como exemplo, os queimadores de GN pulsados, oferecem maior eficiência e controle no fornecimento de calor, uma vez que funcionam alternando entre ciclos de combustão ativa e pausa, em vez de combustão contínua, melhorando a mistura do combustível com o ar e permitindo maior uniformidade na transferência de calor.

## Motores elétricos de alto rendimento

Os motores elétricos estão presentes em diversas fases do processo produtivo, e são, atualmente, os maiores consumidores de energia elétrica na indústria cerâmica. A utilização de motores de alto rendimento, com valores de rendimento na ordem de 97%, caracteriza-se por menores perdas e consumos de energia, fiabilidade superior, amortizações mais curtas, fator de potência sensivelmente superior e operação mais silenciosa.

## Otimização de sistemas de ar comprimido

O ar comprimido representa a segunda forma de energia mais utilizada na indústria transformadora. Algumas medidas a adotar para otimizar o seu funcionamento incluem:

- Reconfiguração do circuito: estudar se o atual sistema de produção de ar comprimido é o mais adequado às necessidades, e se está ajustado ao layout de equipamentos existentes. A alteração da localização do com-



pressor, e respetivos acessórios, pode significar uma melhoria na disponibilidade de ar comprimido.

- Redução da pressão nominal: verificar se a atual pressão nominal de ar comprimido está adequada ao regime de consumos e/ou necessidades. Quanto menor for a pressão de serviço, menor serão os consumos energéticos do compressor. Podem ser estudadas numa fase inicial reduções de 0.5 bar a 1 bar no sentido de apurar a manutenção do ar comprimido no circuito. Por cada 1 bar de redução, o consumo do compressor decresce 7%.
- Temperatura de entrada do ar de admissão: assegurar de que o ar admitido no compressor vem do exterior ou é proveniente da fonte mais fria possível. Por cada 3°C de redução da temperatura do ar admitido no compressor, o seu consumo elétrico reduz-se em 1%.
- Verificação de fugas: deverá ser feita, preferencialmente, com as instalações paradas e sem que haja consumo de ar comprimido. No entanto, também pode ser feita durante o funcionamento normal da fábrica, com recurso a equipamentos de deteção de fugas através de sensores acústicos. Geralmente, as perdas podem ser da ordem dos 30% a 40% do ar produzido.
- Recuperação do ar quente: estudar a possibilidade de recuperação do calor residual do compressor, oriundo dos seus processos de refrigeração. Este pode ser canalizado para um permutador para aquecimento de água, ar ou apenas para aquecimento de naves industriais. A recuperação desta energia pode chegar a representar uma poupança anual de até 20% do consumo elétrico do equipamento.
- Limpeza e manutenção: assegurar que os equipamentos constituintes do sistema de produção de ar comprimido estão devidamente limpos. Apesar do compressor ser o componente principal, também devem ser tidos em consideração os reservatórios, os secadores e os filtros.

### Sistemas de gestão e monitorização de energia

Os sistemas de gestão e monitorização de energia permitem ter uma visão global e centralizada do estado de funcionamento de toda a instalação, possibilitando a atuação sobre diversos pontos em tempo real ou num tempo programado. Através da monitorização constante dos valores de produção e dos consumos de energia, conseguem-se definir valores de referência em relação aos quais é possível detetar eventuais desvios e estabelecer, posteriormente, metas de redução dos consumos energéticos. A

sua implementação melhora a eficiência energética, o que conduz a períodos de retorno do investimento relativamente curtos, com economias que podem atingir valores até 2% do consumo total da energia monitorizada. Entre as vantagens da adoção de um sistema de gestão de energia destaca-se:

- Monitorização e controlo total da instalação e dos principais equipamentos;
- Otimização de custos associados à instalação dos equipamentos;
- Rigor no controlo dos indicadores e na contabilidade energética.

### Isolamento térmico

O isolamento térmico de tubagens, secadores, fornos e outros equipamentos minimiza as perdas de energia para o exterior, o que se traduz na redução do consumo energético. Também a utilização de mobília do forno mais refratária reduz o consumo de energia necessário para operação.

### Bombas de calor

As bombas de calor constituem uma das tecnologias mais relevantes no domínio da eficiência energética. O seu princípio de funcionamento baseia-se na transferência de calor de um meio a baixa temperatura para outro a temperatura mais elevada, com recurso a energia elétrica, mas com um rendimento energético superior ao dos sistemas convencionais de aquecimento ou arrefecimento (ver secção 4.1.1).

### Ciclo orgânico de Rankine (ORC)

Na indústria cerâmica, o Ciclo Orgânico de Rankine (ORC – Organic Rankine Cycle) apresenta-se como uma solução eficiente para recuperação do calor residual proveniente de fornos, secadores e outros equipamentos térmicos. Este calor, muitas vezes desperdiçado, pode ser convertido em eletricidade, contribuindo para a redução do consumo energético e das emissões de carbono (ver secção 4.1.2).



# CONTRIBUTO ENERGÉTICO DAS BOMBAS DE CALOR PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Paulo Gomes e Paulo Palhau  
Daikin Portugal

As bombas de calor são uma tecnologia-chave para atingir o objetivo de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na indústria. A implementação de bombas de calor em processos industriais faz parte do processo de eletrificação da indústria, no âmbito do seu processo global de descarbonização. As bombas de calor podem ser combinadas com outras fontes de energia renovável, como, por exemplo painéis fotovoltaicos, o que permite reduzir o consumo de eletricidade da rede, e consequentemente, diminuir o seu impacto ambiental. Na implementação de sistemas com bombas de calor, é necessário ter em consideração alguns aspetos, tais como o clima, o tipo de aplicação, terminais, e o perfil de carga.

As bombas de calor ar-água são sistemas que captam energia térmica do ar exterior e a transferem para a água de um circuito interno, servindo para **aquecimento, arrefecimento e/ou produção de água quente**. As bombas de calor ar-água apresentam temperaturas máximas de saída de água quente na ordem dos 60-70 °C. Por esta razão, a sua aplicação em processos industriais pode ser limitada.

Combinando uma bomba de calor ar-água (AWHP - *Air-to-Water Heat Pump*) com uma bomba de calor água-água (WWHP - *Water-to-Water Heat Pump*), **sistema em casca-**

**ta**, é possível estender o limite de aplicação das bombas de calor até 75-95 °C.

Nesta configuração, a primeira bomba de calor (ar-água) capta a energia térmica do ar exterior e eleva a temperatura da água até um primeiro patamar. A segunda bomba (ar-água) recebe essa água já aquecida e efetua uma nova etapa de compressão térmica, atingindo temperaturas mais elevadas. Os sistemas em cascata apresentam uma eficiência energética mais elevada, COP (do inglês *Coefficient of Performance* ou Coeficiente de Desempenho) superior a 2, em comparação com equipamentos de combustão ou resistências elétricas. A combinação das duas bombas de calor aumenta significativamente o envelope de funcionamento (Figura 4.1).

Para a configuração de sistemas em cascata devem ser efetuadas simulações de eficiência em função da capacidade necessária, temperatura do processo e climatologia local. O setpoint da bomba de calor ar-água pode ser ajustado caso a caso, enquanto a bomba de calor água-água garante do setpoint desejado. No caso de existir uma fonte de temperatura até 45 °C proveniente do processo industrial, esta pode substituir a bomba de calor ar-água no sistema em cascata.

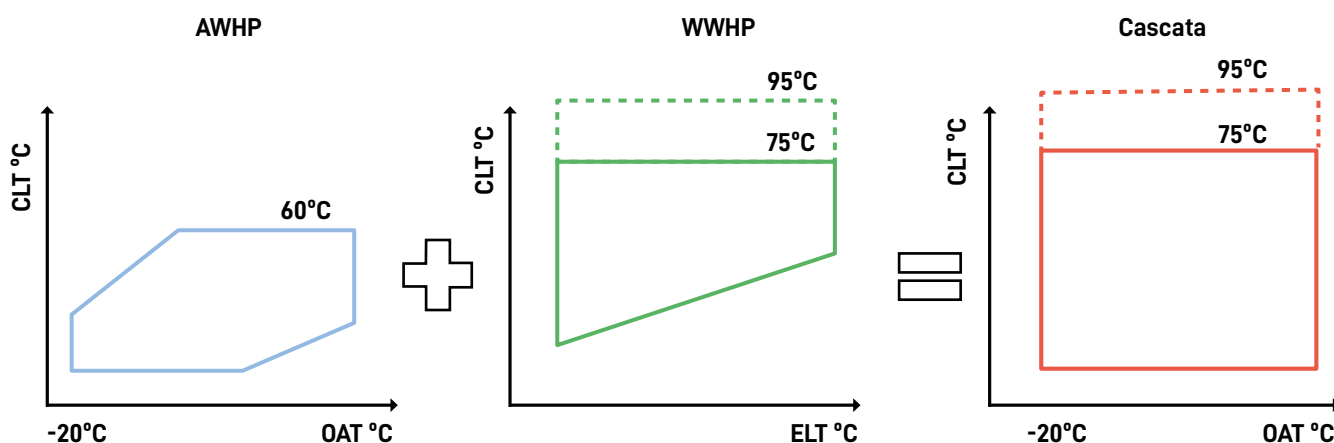


Figura 4.1. Envelope de funcionamento de bombas da calor ar-água (AWHP), água-água (WWHP) e configuração em cascata. OAT = temperatura do ar exterior; ELT = temperatura de entrada do fluido; CLT = temperatura do fluido de refrigeração.

Em locais com climas mais rigorosos no Inverno, pode ser viável a combinação de várias fontes térmicas. A lógica de funcionamento estará associada à temperatura exterior num dado momento. Um sistema bivalente típico poderá incluir uma bomba de calor e uma caldeira ou resistência elétrica.

Na indústria cerâmica, a secagem é o processo térmico em que as bombas de calor apresentam melhor adequa-

ção e maior viabilidade de aplicação. As soluções em cascata são aquelas que melhor se adaptam a casos em que é necessária uma temperatura da água elevada, permitindo alcançar temperaturas até 95°C. A capacidade disponível para estes equipamentos vai de 200 kW até 1200 kW, podendo ser estendida até à capacidade necessária por combinação de várias unidades. Além do processo em si, as bombas de calor têm grande aplicabilidade em escritórios e edifícios de apoio associadas à indústria.

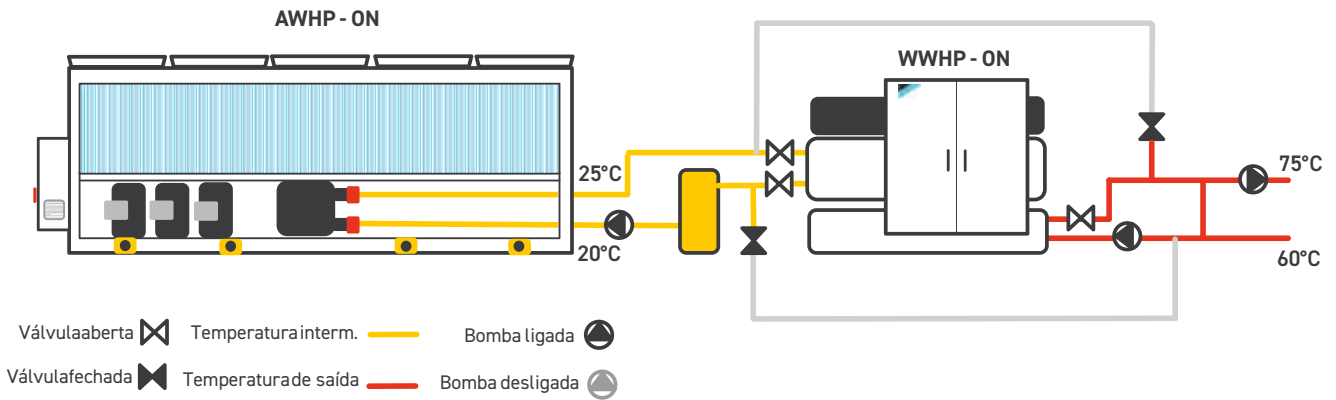


Figura 4.2. Funcionamento de um sistema de bombas de calor em cascata com LWT = 75 °C (Fonte: DAIKIN).

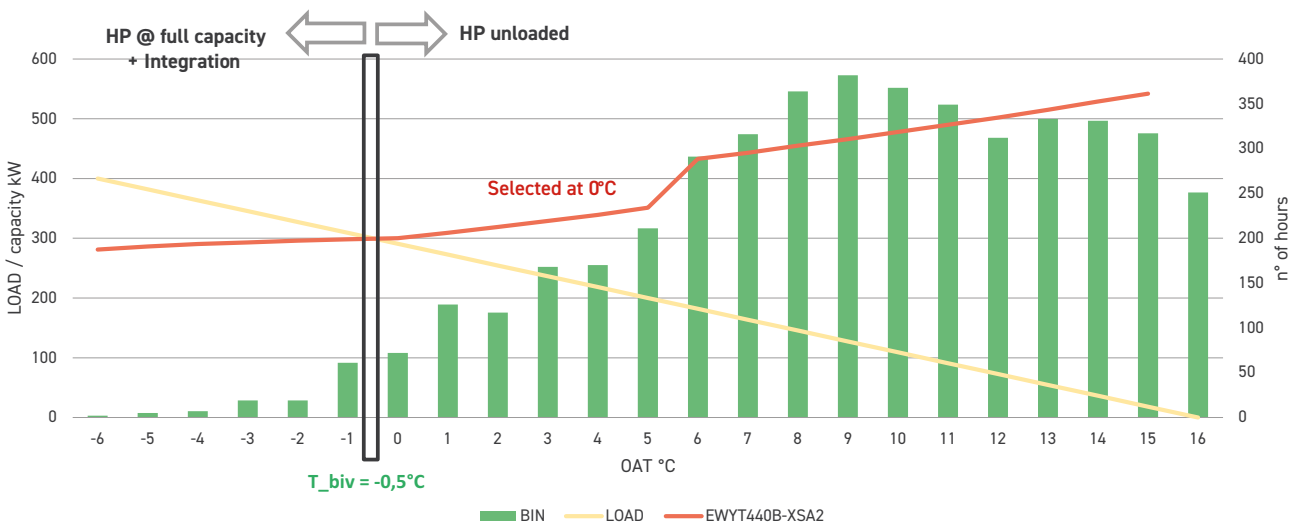


Figura 4.3. Curva de desempenho de um sistema bivalente (Fonte: Daikin).



# CICLO ORGÂNICO DE RANKINE: CONTRIBUTOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Márcio Santos<sup>1</sup>, Eduardo Costa<sup>2</sup>, Jorge André<sup>1</sup>, Ricardo Mendes<sup>1</sup>, José B. Ribeiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ Coimbra, ADAI, Department of Mechanical Engineering, Universidade de Coimbra, Portugal; <sup>2</sup>Sciven

## Recuperação de calor industrial

O contexto socioeconómico global caracteriza-se por uma necessidade crescente de energia, resultado do crescimento da população e do desenvolvimento da economia e dos padrões de vida em geral, à qual se junta uma cada vez mais premente necessidade de redução das emissões de gases com efeito de estufa, para mitigar o efeito que estes podem provocar na atmosfera e que acabam refletidos nas cada vez mais inegáveis alterações climáticas. Recentemente, surgiu um novo desafio, relacionado com a segurança do acesso às fontes de energia e a previsibilidade da sua disponibilidade e dos seus custos. O setor da energia depara-se, portanto, com o desafio de corresponder ao aumento da procura de energia, enquanto se tenta mitigar as consequências ambientais do seu uso fazendo uma transição clara para um sistema descarbonizado, seguro e acessível, isto é, mais sustentável.

Para que a neutralidade carbónica possa ser atingida até 2050, é necessário abandonar progressivamente um modelo económico linear. Isto traduz-se no abandono de uma economia baseada em combustíveis fósseis, permitindo uma transição para uma economia baseada em energias renováveis que utiliza os recursos de forma eficiente, ou seja, numa economia circular. Para que a penetração das energias renováveis no “mix energético” de cada país seja cada vez mais significativa é absolutamente necessário que a “produção” e o uso de todas as formas de energia se façam na forma mais eficiente possível.

Na verdade, uma das linhas de ação definida no PNEC 2030 [1] e no RNC 2050 [2] para alcançar a meta da neutralidade carbónica em 2050 é a que se refere à melhoria da eficiência energética nos processos industriais, onde a recuperação e reciclagem de calor residual já provou ser uma boa opção.

Portugal possui características geográficas que permitem o desenvolvimento de um setor electroprodutor totalmente descarbonizado (água, vento, sol, biomassa, geotermia), fiável e seguro, capaz de lidar com a variabilidade que a aposta nas energias renováveis acarreta. Esta transição energética aplicar-se-á a todos os setores da sociedade: habitação, serviços, indústria e agricultura e pecuária. No

entanto, esta transição não será repentina e, em muitos casos, está tecnologicamente distante. Isto é sobretudo visível no setor da indústria, um dos responsáveis pelas maiores necessidades energéticas na UE, e que devido à natureza de alguns processos envolvidos torna, financeira e/ou tecnologicamente, impossível uma mudança para uma base eletrificada. Nesses casos, a tónica deve ser colocada principalmente na melhoria da eficiência energética dos processos industriais.

O calor desperdiçado que pode aparecer na forma sensível e/ou latente refere-se à energia não utilizada pelo produto, processo ou instalação. De facto, a existência desta energia desperdiçada está muitas vezes associada à falta de valor económico, ou à inexistência de restrições ambientais, aquando do projeto de uma determinada instalação. A pressão para a descarbonização, aliada ao aumento da eficiência e ao desenvolvimento tecnológico, fez com que as correntes de calor desperdiçado, ainda com uma energia considerável, passassem a ter interesse económico, tanto para a produção de potência elétrica ou mecânica.

De acordo com os dados Eurostat de 2015 [3], o consumo de energia para produzir calor em todas as indústrias da UE é de 1820,73 TWh/ano. O restante consumo de energia, cerca de 1400 TWh/ano, corresponde ao aquecimento e arrefecimento de espaços e à eletricidade para bombas, motores, arrefecimento/refrigeração, equipamento de escritório e iluminação. Como é visível na Figura 4.4, uma grande parte deste potencial situa-se na gama 100-200°C, cerca de 100 TWh/ano, com o calor residual abaixo dos 100°C a apresentar um potencial quase negligenciável (1,25 TWh/ano). A gama de 200-500°C apresenta um potencial de cerca de 78 TWh/ano, enquanto para temperaturas superiores a 500°C é apresentado um potencial de cerca de 124 TWh/ano. De acordo com a mesma fonte, o total do potencial de calor residual na UE é de 304,13TWh/ano, o que corresponde a 16,7% do consumo industrial de calor de processo e representa 9,5% do consumo total de energia industrial.

A Figura 4.5 apresenta os resultados apenas da indústria de minerais não metálicos, onde se situa a indústria cerâmica, separadamente para cada país da UE e por gama de temperatura de calor residual. É de salientar que a maior parte do calor desperdiçado se encontra na gama dos 100



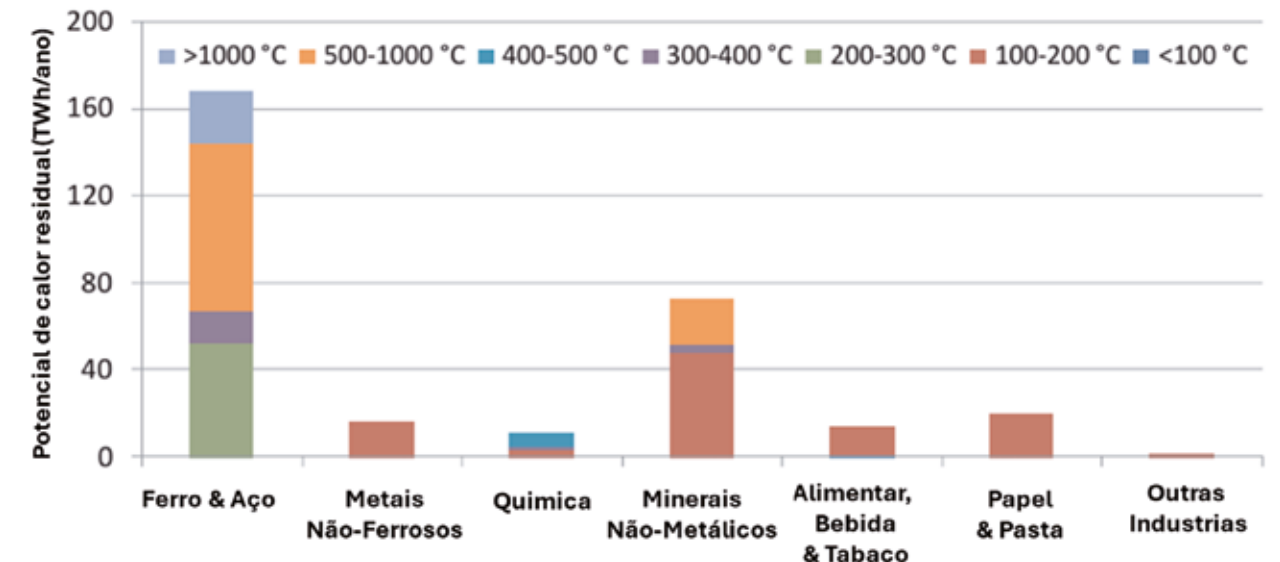


Figura 4.4. Potencial técnico teórico por setor industrial e nível de temperatura na UE (adaptado de [4]).

### Indústria de Minerais Não-Metálicos

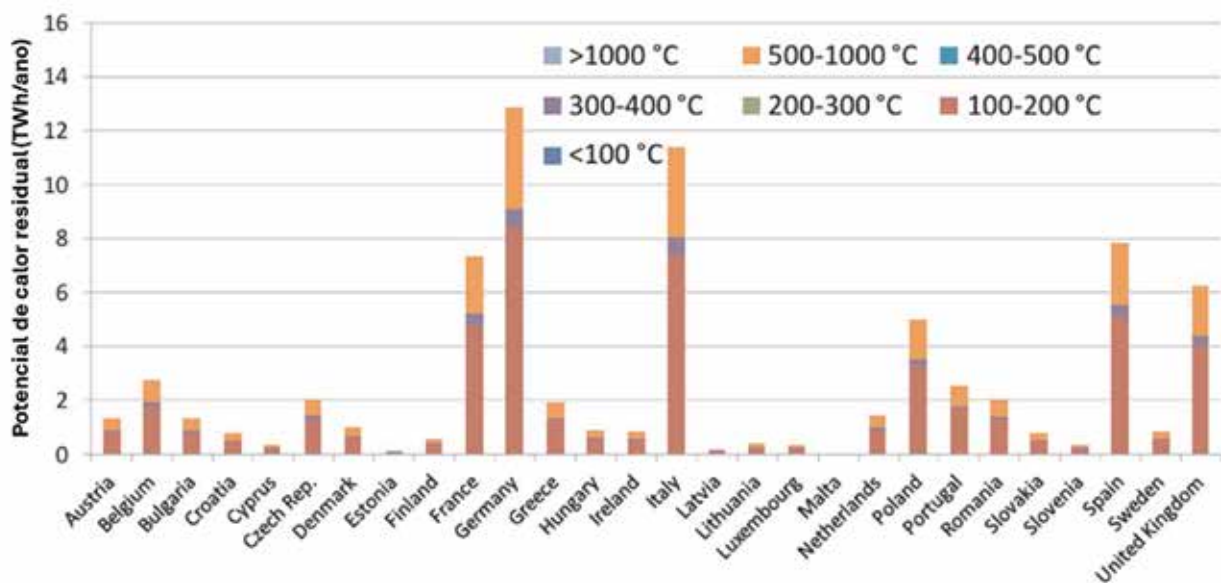


Figura 4.5. Potencial de calor residual na indústria de minerais não metálicos por país (adaptado de [4]).



- 200°C, seguido de calor a alta temperatura, entre os 500 - 1000°C.

As tecnologias que podem ser usadas na transformação deste calor residual em energia útil dependem do uso final. Esse pode envolver a satisfação de novas necessidades térmicas (recuperação para o mesmo fim) ou a conversão dessa energia em trabalho ou energia elétrica. Quando as necessidades térmicas a satisfazer se encontram a uma temperatura inferior à da corrente a partir da qual é realizado o aproveitamento do calor, as tecnologias de recuperação designam-se por passivas. Quando as necessidades térmicas a satisfazer implicam um aumento da temperatura do calor residual, a sua utilização em ciclos frigoríficos, ou a sua transformação desse calor em trabalho e/ou eletricidade, as técnicas de recuperação dizem-se ativas.

As tecnologias ativas estão subdivididas em três categorias distintas [5]:

- Produção de energia térmica a uma temperatura elevada (mais elevada que a temperatura da fonte de energia térmica). O exemplo paradigmático desta tecnologia envolve o recurso a bombas de calor para aumentar a temperatura de uma determinada fonte de energia térmica (residual) até ao ponto em que esta possa ser usada para processos de aquecimento a uma temperatura mais elevada do que a da fonte original. Deste modo evita-se o consumo de energia associado à elevação da temperatura da corrente de aquecimento até, aproximadamente, à temperatura da fonte de energia térmica residual.
- Produção de energia térmica com capacidade de refrigeração a partir de calor residual. O exemplo típico desta tecnologia envolve o recurso a ciclos de refrigeração por absorção alimentados com a energia térmica residual.
- Produção de potência (mecânica ou elétrica) a partir de calor residual. Na esmagadora maioria dos casos esta tecnologia envolve a utilização de um motor térmico de Rankine funcionando com fluidos orgânicos (em vez de água).

No caso das tecnologias passivas, os permutadores de calor e as unidades de armazenamento de energia térmica são os sistemas dominantes.

## Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)

Os motores térmicos de combustão externa, funcionando segundo o ciclo simples, ou regenerativo, de Rankine, em que o fluido de trabalho é uma substância orgânica idêntica às usadas nos ciclos de refrigeração, são a tecnologia-paradigma da recuperação de energia térmica para produção de eletricidade e da produção combinada de eletricidade e energia térmica. Os, nesse caso, designados Ciclos Orgânicos de Rankine funcionam segundo o princípio do ciclo de Rankine tradicional. No entanto, enquanto o ciclo de Rankine tradicional utiliza água ou vapor como fluido de trabalho, os ORC utilizam substâncias orgânicas (que incluem compostos de carbono) que apresentam baixas temperaturas de ebulição a pressões relativamente elevadas. Esta característica torna os ORC adequados para funcionar com diferentes fontes de calor, como a energia solar térmica, a energia geotérmica, a biomassa/biogás e o calor residual. Para pequenas potências (até 10 MW), os ORC apresentam melhores eficiências e desempenho do que os ciclos de Rankine tradicionais [6].

O fluido de trabalho das centrais elétricas que funcionam segundo o ORC é formado por compostos orgânicos como os hidrocarbonetos, os hidrofluorcarbonos, os organossilícios ou o dióxido de carbono. Estas substâncias podem ser utilizadas como fluidos de trabalho na forma pura ou em misturas.

Os componentes básicos de um motor térmico funcionando segundo o ciclo orgânico de Rankine são, conforme está ilustrado na Figura 4.6, **1) bomba**: responsável pela pressurização e circulação do fluido de trabalho no circuito, recebe este fluido no estado líquido a baixa pressão e sai a uma pressão superior; **2) evaporador**: permutador de calor onde o fluido de trabalho, recebendo energia sob a forma de calor a partir de uma fonte externa, passa ao estado de vapor; **3) turbina**: onde o vapor é expandido, reduzindo a pressão e temperatura, produzindo trabalho e/ou, eventualmente, se esta se encontrar ligada a um gerador, eletricidade e, **4) condensador**: permutador de calor onde, por cedência de energia ao ar atmosférico ou à água (por exemplo), o fluido volta novamente ao estado líquido.

A escolha do fluido de trabalho que maximiza a produção de energia elétrica a partir de uma determinada fonte de calor residual está relacionada, sobretudo, com o nível de temperatura da fonte de energia térmica. Enquanto a água é o fluido de trabalho ideal para instalações de Rankine de

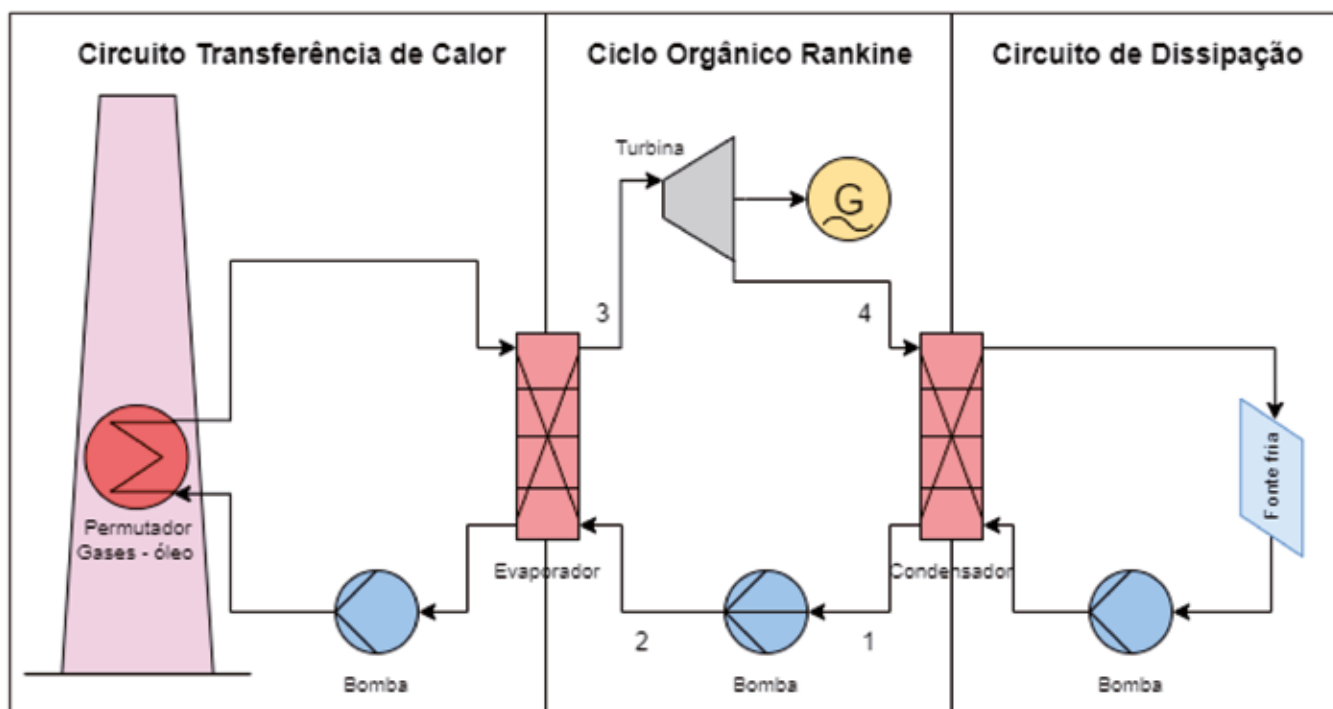


Figura 4.6. Esquema genérico de uma instalação de recuperação de calor residual com ciclo orgânico de Rankine.

grandes dimensões e alimentadas por fontes de energia térmica residual de elevada entalpia, outros fluidos, como os referidos anteriormente, tornam possível a realização de centrais elétricas com capacidade de poucos kW a dezenas de MW, e a conversão em eletricidade de uma não desprezável parte da energia de efluentes térmicos com temperaturas tão baixas como os 100 °C.

Quando utilizam expansores volumétricos, os motores térmicos baseados em ORC são pouco sensíveis a variações de carga, o que é uma característica muito conveniente porque grande parte dos efluentes térmicos apresenta variações mais ou menos significativas de caudal e temperatura. Os motores térmicos baseados em ORC, tanto no que diz respeito à capacidade como no que diz respei-

to às condições de operação, são modulares e requerem pequenas áreas de implantação, apresentam uma gama alargada de condições de operação, podem ser totalmente automatizados e requerem uma manutenção muito reduzida. Para além disso, a dissipação do calor residual libertado pelo próprio sistema de conversão de energia térmica em energia elétrica, não necessita de ser realizada para a água, podendo, por exemplo, ser realizada para o ar. Outra considerável vantagem dos sistemas de recuperação de energia é que a decorre de estes estarem, normalmente, instalados junto das fontes emissoras (unidades industriais) de energia térmica residual, por não ser possível transportar a energia térmica a longa distância, contribuindo deste modo para a produção distribuída de energia elétrica e a redução das perdas na distribuição.

## ORC na indústria cerâmica

Na indústria cerâmica, a aplicação mais direta desta tecnologia faz-se recuperando parte da energia contida nos diferentes tipos de efluentes que saem dos fornos. Especialmente, interessante é a recuperação do calor residual disponível no ar de arrefecimento, que são gases limpos e com temperatura elevada. A recuperação da energia térmica dos gases de exaustão que saem do forno através da chaminé principal pode também ser realizada com recurso a esta tecnologia, mas, nomeadamente no que diz respeito aos permutadores de calor em contacto com esses gases, devido à composição destes, envolve a utilização de materiais resistentes à corrosão. Os componentes principais da instalação de recuperação são: o permutador de calor recuperador, localizado no bypass da chaminé, e um circuito de transferência de calor, com óleo térmico, que transporta a energia dos efluentes quentes, para o ciclo de potência ORC.

Os fornos túnel, representado na Figura 4.7 e muito característicos da indústria cerâmica, apresentam na chaminé principal, temperaturas dos gases que, em função do tipo de material a tratar (barro vermelho, porcelana, faiança ou grés), variam entre 200 e 300°C [7]. Para esta gama de temperaturas, o ciclo orgânico de Rankine é o mais adequado permitindo taxas de conversão de energia térmica em energia elétrica, entre os 10 e os 20%. Se, para além da produção de energia elétrica, ainda existir a possibilidade de dar um fim útil ao calor rejeitado no condensador do ORC, então estaremos na presença de um sistema cogenerativo que permitirá atingir uma eficiência global acima dos 90%.

Em suma, tendo em conta a quantidade de energia térmica com potencial para ser transformada em energia elétrica que todos os anos é desperdiçada pela indústria europeia, pode parecer estranho que as soluções de recuperação de energia para produção de potência (WHR) não estejam mais difundidas. A razão, obviamente, é a desfavorável relação custo/benefício das soluções tecnológicas atualmente oferecidas dentro de um portfolio de produtos pré-fabricados, que não têm na devida conta a especificidade das oportunidades de recuperação de energia para produção de potência de cada potencial cliente.

A Europa é, de longe, o continente que acolhe o maior número de fornecedores de centrais elétricas ORC e de inovadores industriais neste domínio. Atlas Copco (Suécia) [8], Dürr Cyplan (Alemanha) [9], Enertime (França) [10], Enogia (França) [11], Exergy (Itália) [12], GMK (Alemanha) [13], Turboden-Mitsubishi Heavy Industries (Itália) [14], Orcan (Alemanha) [15], Ormat (EUA/fabricação na Europa) [16], Rank (Espanha) [17], Siemens Energy (Alemanha) [18], Triogen (Países Baixos) [19] e Zuccato (Itália) [20] representam a quase totalidade dos fornecedores mundiais estabelecidos. Em Portugal a empresa Sciven [21] dedica-se ao desenvolvimento e instalação deste tipo de sistemas para pequena e média escala.

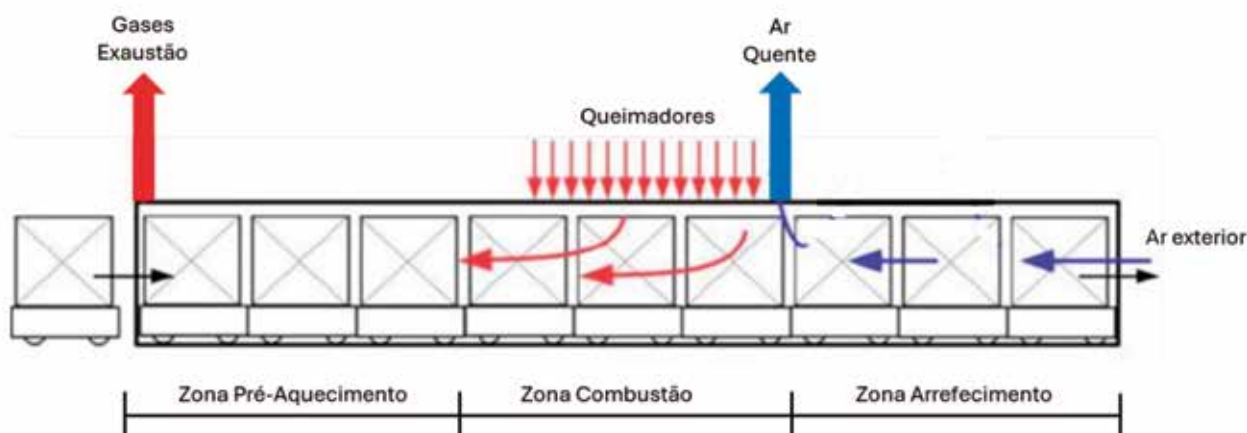


Figura 4.7. Representação esquemática do fluxo de ar e gases num forno túnel.

## Referências

- [1]. Direção Geral de Energia e Geologia, Agência Portuguesa do Ambiente, ADENE e LNEG, *Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030* (PNEC 2030), 2019.
- [2]. Agência Portuguesa do Ambiente, *Roteiro para a Neutralidade Carbônica 2050 (RNC2050)*, 2019.
- [3]. Eurostat, *Final energy consumption by sector*. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [4]. Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., la Commare, U. e Micale, G., "Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country," *Applied Thermal Engineering*, vol. 138, pp. 207-216, 2018. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.
- [5]. Benedetti, M., Dadi, D., Giordano, L., Introna, V., Lapenna, P. E. e Santolamazza, A., "Design of a database of case studies and technologies to increase the diffusion of low-temperature waste heat recovery in the industrial sector," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n.º 9, maio 2021. doi: 10.3390/su13095223.
- [6]. Loni, R., Najafi, G., Bellos, E., Rajaei, F., Said, Z. e Mazlan, M., "A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125070.
- [7]. Castro Oliveira, M., Iten, M., Cruz, P. L. e Monteiro, H., "Review on Energy Efficiency Progresses, Technologies and Strategies in the Ceramic Sector Focusing on Waste Heat Recovery," *Energies*, vol. 13, 6096, 2020. DOI: 10.3390/en13226096.
- [8]. Atlas Copco AB, *Atlas Copco*, 2024. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-pt> [Acedido em 09 set. 2024].
- [9]. Dürr Cyplan, *Cyplan ORC*, 2024. Disponível em: <https://www.durr.com/pt/producao/tecnologia-ambiental/geracao-de-energia-descentralizada/cyplan-orc> [Acedido em 09 set. 2024].
- [10]. Enertime, *Enertime*, 2024. Disponível em: <https://www.enertime.com/en> [Acedido em 09 set. 2024].
- [11]. Enogia, *Enogia*, 2024. Disponível em: <https://enogia.com/en/home/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [12]. Exergy, *Exergy ORC*, 2024. Disponível em: <https://www.exergy-orc.com/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [13]. GMK, *GMK*, 2024. Disponível em: <https://www.gmk.info/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [14]. Turboden-Mitsubishi Heavy Industries, *Turboden*, 2024. Disponível em: <https://www.turboden.com/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [15]. Orcan, *Orcan Energy*, 2024. Disponível em: <https://www.orcan-energy.com/en/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [16]. Ormat, *Ormat*, 2024. Disponível em: <https://www.ormat.com/en/home/a/main/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [17]. Rank, *Rank ORC*, 2024. Disponível em: <https://www.rank-orc.com/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [18]. Siemens Energy, *Heat Recycle Solutions*, 2024. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/products-services/product/heat-recycle-solutions.html> [Acedido em 09 set. 2024].
- [19]. Triogen, *Triogen*, 2024. Disponível em: <https://triogen.nl/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [20]. Zuccato, *Zuccato Energia*, 2024. Disponível em: <https://zuccatoenergia.it/en/> [Acedido em 09 set. 2024].
- [21]. Sciven, *Sciven*, 2024. Disponível em: <https://sciven.com/> [Acedido em 09 set. 2024].



# ELETRIFICAÇÃO DOS PROCESSOS TÉRMICOS

Sara Ferrer<sup>1</sup>, María Aguilera<sup>1</sup>, María Jesus Sánchez<sup>1</sup>, Ana Mezquita<sup>1</sup>, Eliseo Monfort<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Tecnologia Cerâmica (ITC-AICE), Espanha; <sup>2</sup>Grupo GAIA, Instituto Universitario de Tecnologia Cerâmica "Agustín Escardino", Universidade Jaime I, Espanha

Este capítulo apresenta uma atualização do estado da arte das opções de eletrificação das etapas que requerem calor no processo de fabrico de produtos cerâmicos, que são basicamente: a secagem (de suspensões, pós húmidos ou produtos conformados) e a cozedura de produtos conformados (vidrados ou não vidrados).

Dentro da indústria cerâmica europeia, o subsetor mais importante em termos de volume de negócios é o do fabrico de pavimento e revestimento cerâmico, sendo por isso o setor mais dinâmico do ponto de vista do desenvolvimento de projetos de I & D + i, razão pela qual grande parte dos projetos e exemplos apresentados foram desenvolvidos especificamente para este subsetor. No entanto, neste documento procurou-se incluir a informação disponível sobre experiências de eletrificação de outros subsectores cerâmicos na Europa. Por outro lado, algumas das soluções propostas para alguns setores podem extrapolar-se em maior ou menor grau para outros subsectores.

Na Europa, o processo por via húmida é o mais utilizado atualmente no fabrico de pavimento/revestimento cerâmico, sendo também utilizado em outros subsectores como na porcelana de mesa e algumas cerâmicas técnicas, entre outras. O processo por via húmida consiste na preparação da mistura das matérias-primas por moagem húmida em moinhos de bolas, secando a suspensão resultante por **atomização** até se obter um produto granulado com um teor de humidade de cerca de 5-6 %, adequado à posterior

conformação das peças por prensagem uniaxial. Existem outros métodos de conformação, como extrusão, prensagem plástica, colagem, etc., que não exigem secagem por atomização das matérias-primas.

Os produtos conformados húmidos são sujeitos, em seguida, a um processo de **secagem** e, no caso dos processos de monocozedura, o vidrado e as decorações são aplicados sobre as peças secas, para depois realizar a **cozedura** simultânea da peça e da decoração aplicada sobre esta em cru (monocozedura). O processo de monocozedura é o mais utilizado no fabrico de pavimento/revestimento cerâmico e em todos os produtos não vidrados, enquanto nos restantes produtos vidrados a cozedura é efetuada em duas cozeduras separadas (da peça em cru e do produto vidrado), e entre as duas cozeduras realiza-se a fase de vidragem e/ou decoração.

Do ponto de vista do consumo energético e das emissões de CO<sub>2</sub>, as etapas mais relevantes nos processos de fabrico de produtos cerâmicos por monocozedura são a atomização da suspensão de matérias-primas, a secagem das peças em cru e a cozedura [1]. Em seguida, apresenta-se o estado atual de cada uma das **vias de eletrificação** referidas.



# MOAGEM A SECO COM CLASSIFICAÇÃO DINÂMICA E GRANULAÇÃO AVANÇADA

A preparação das matérias-primas no processo de fabrico de produtos conformados por prensagem pode realizar-se por moagem a seco ou por moagem húmida.

Como referido anteriormente, o processo de fabrico de pavimento/revestimento cerâmico mais difundido na Europa, e de um modo geral no mundo, consiste na preparação por moagem húmida e posterior secagem por atomização. Com este método, obtém-se um sólido granulado com características ideais para posterior conformação por prensagem uniaxial. Os grânulos obtidos têm características morfológicas (forma esférica com interior oco) e distribuição de tamanhos que conferem ao material uma elevada fluidez e facilidade de prensagem. Desta forma, consegue-se uma conformação homogénea em toda a peça, mesmo em peças de grandes dimensões. O principal inconveniente do processo reside no consumo de recursos. A moagem por via húmida consome uma grande quantidade de água, que depois se evapora no processo de secagem por atomização da suspensão, consumindo uma grande quantidade de energia.

Por isso, uma alternativa a este processo é a preparação do grânulo por moagem a seco e posterior granulação. Este processo tem sofrido um grande desenvolvimento nos últimos anos, obtendo-se, com as últimas tecnologias disponíveis, um produto semelhante ao obtido por atomização [2], graças a melhorias introduzidas nos sistemas de classificação dinâmicos e no desenvolvimento de novos sistemas de granulação. A sua principal vantagem em relação ao processo por via húmida reside no menor consumo de recursos hídricos e energéticos, embora, por outro lado, exija um maior desenvolvimento industrial para obter grânulos com características (sobretudo de dureza) que permitam superar algumas limitações, especialmente

em produtos com porosidade muito baixa (como os produtos de grés porcelânico).

Na Tabela 4.1 comparam-se os consumos médios entre os dois processos durante o processamento de uma composição de grés porcelânico [3].

De um modo geral, verifica-se uma redução significativa no consumo de água e no consumo de energia térmica, uma vez que o processamento por via seca com granulação avançada requer uma etapa de secagem após a granulação, mas a exigência térmica dessa secagem é muito menor que a do processo de secagem por atomização, uma vez que a quantidade de água a remover é consideravelmente inferior.

Relativamente ao consumo de energia elétrica, observam-se grandes diferenças, devido a diversos fatores, entre os quais se destacam a granulometria inicial das matérias-primas (especialmente as não plásticas) e se a moagem de materiais argilosos e não plásticos é realizada em conjunto ou separadamente. Em qualquer dos casos, a redução do consumo de gás natural e das emissões de CO<sub>2</sub> é muito significativa e de grande interesse num futuro processo de baixas emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, pode concluir-se que o processamento avançado a seco de composições cerâmicas apresenta vantagens ambientais significativas.

No entanto, e apesar dos avanços técnicos alcançados, para produtos cozidos de muito baixa porosidade, a preparação de composições por processos de via seca apresenta maiores dificuldades técnicas [3]. Assim, será o tipo de produto a fabricar e os níveis de qualidade exigidos que irão determinar qual o processo de preparação da matéria-prima mais adequado em cada caso.

**Tabela 4.1. Comparação de consumos entre os processos por via seca e por via húmida em tonelada de sólido seco (tss).**

Parâmetro	Processo via húmida (H)	Processo via seca (S)	Processo (H-S)/H (%)
Consumo de água (m <sup>3</sup> /tss)	0,47-0,59	0,12-0,16	74
Consumo de energia elétrica (kWh/tss)	50-54	31-35	36
Consumo de energia térmica (kWh/tss)	442-462	88-108	78
Emissões diretas CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /tss)	80-84	16-20	



# ELETRIFICAÇÃO DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO

No congresso Qualicer 2024, foi apresentada uma comunicação [4] em que se propunha a instalação de um sistema de aquecimento de ar, a ser integrado na entrada dos gases quentes do atomizador, com a possibilidade de funcionar em modo híbrido (fóssil + elétrico) com uma contribuição elétrica variável de 0% a 100% e, consequentemente, com emissões de CO<sub>2</sub> variáveis (Figura 4.8).

As opções apresentadas neste trabalho foram:

- **Gerador 100% fóssil:** é a condição equivalente às instalações atuais, que consomem gás natural para fornecer calor, pelo que, nesta configuração, as emissões de CO<sub>2</sub> serão máximas.
- **Gerador híbrido:** quando uma parte da eletricidade verde está disponível, mas não é suficiente para a potência total do sistema, o gerador integra uma fração de combustível fóssil até alcançar a potência térmica necessária. As emissões de CO<sub>2</sub> são intermédias e estão relacionadas com a quantidade de combustível fóssil utilizada.

- **Gerador 100% elétrico:** quando a energia elétrica renovável é suficiente, o sistema funciona apenas com o gerador elétrico. Nestas condições, as emissões de CO<sub>2</sub> serão nulas.

Este sistema híbrido, segundo os autores da publicação, pode instalar-se tanto em atomizadores novos como em atomizadores já existentes, permitindo assim uma descarbonização significativa do processo, sem alterar a produtividade ou a qualidade do produto obtido.

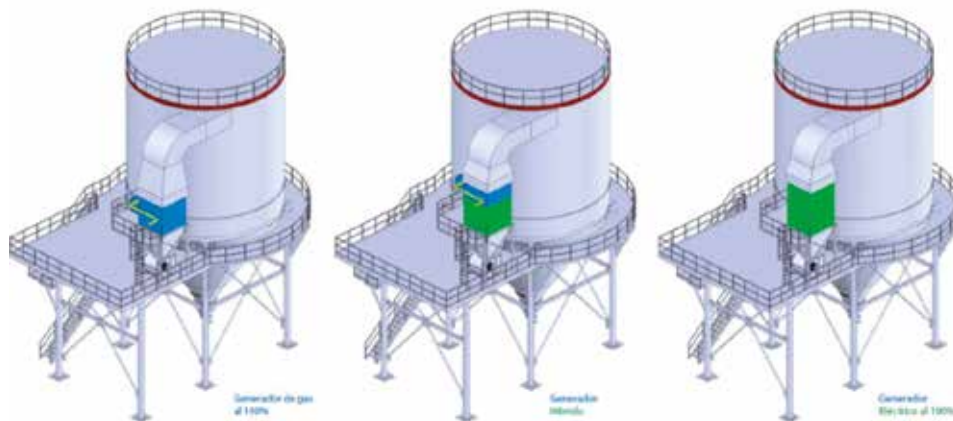


Figura 4.8. Esquema das possíveis configurações do sistema instalado no atomizador (Fonte: SACMI).

# BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA NO SETOR CERÂMICO

Uma tecnologia interessante que pode ser implementada na indústria cerâmica é a tecnologia de bombas de calor [1]. Esta tecnologia permite recuperar o calor residual industrial e revalorizá-lo, produzindo calor útil a uma temperatura superior relativamente à fonte de calor inicial, através do fornecimento de energia elétrica (“power-to-heat”). As bombas de calor produzem cerca de três unidades de energia térmica útil por cada unidade de eletricidade fornecida, utilizando como entrada no sistema, o calor residual disponível. Assim, a sua aplicação aumenta significativamente a eficiência energética dos processos. Devido ao facto de a energia elétrica de entrada poder ser de origem renovável e à elevada eficiência energética deste tipo de equipamentos, consideram-se geradores de calor renovável.

Considera-se que as bombas de calor poderão ter uma aplicabilidade adequada no processo de fabrico de cerâmica de pavimento/revestimento, na etapa de secagem após conformação. Com a implementação de um sistema com estas características, será possível reduzir o consumo de gás natural nos queimadores e, conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub>. Trata-se, portanto, de deslocar o consumo e a dependência do gás natural para o consumo de eletricidade. Deste modo, será possível avançar para a eletrificação do sector e facilitar a descarbonização do calor de baixa temperatura.

Considerando os processos industriais que operam a baixa temperatura (<200°C) como o principal mercado para as bombas de calor industriais, existem dois segmentos distintos, consoante o nível de temperatura:

- Aplicações até 100°C, que podem ser asseguradas por tecnologias maduras de bombas de calor.
- Aplicações entre 100°C e 200°C, onde ainda existem desafios tecnológicos para satisfazer as necessidades do mercado.

O princípio de funcionamento das bombas de calor de alta temperatura (BCAT, em inglês “High Temperature Heat Pump” ou HTHP) baseia-se na utilização do calor residual de um processo industrial, que se situa na gama de temperaturas de 60-120°C. As bombas de calor utilizam um gás refrigerante num ciclo termodinâmico fechado, que é capaz de transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente com elevada eficiência. Isto é possível graças ao trabalho adicional realizado por um compressor, que consome normalmente energia elétrica. O fluido de trabalho ou refrigerante é um dos principais componentes, uma vez que, através das suas propriedades termodinâmicas, transfere energia térmica da fonte fria para a fonte quente.

Na Figura 4.9 é apresentado um esquema de funcionamento da tecnologia. Em primeiro lugar, o refrigerante é evaporado e reaquecido no **evaporador**, que opera a baixa pressão. Uma vez capturado o calor, o refrigerante no estado gasoso é comprimido num **compressor**, normalmente acionado por um motor elétrico, aumentando assim a sua pressão. Em seguida, o refrigerante a pressão e temperatura elevada entra no **condensador**, onde cede o seu calor útil à corrente de entrada a valorizar, sendo possível atingir temperaturas até 140-150°C ou superiores. Uma vez cedido este calor, o refrigerante condensa-se e volta ao seu estado líquido. O líquido chega à válvula de expansão, onde a sua pressão é reduzida, para iniciar novamente o ciclo. As bombas de calor também incorporam geralmente um permutador de calor intermédio (permutador de sobreaquecimento-subarrefecimento) para aumentar a eficiência energética do sistema.

Como as bombas de calor fornecem sob a forma de calor um múltiplo da quantidade de eletricidade consumida, a sua utilização aumenta significativamente a eficiência energética dos processos, transferindo o consumo térmico para o consumo elétrico.

O calor gerado pode posteriormente ser aproveitado noutra parte do processo, permitindo a redução do consumo de combustíveis fósseis nos sistemas convencionais de

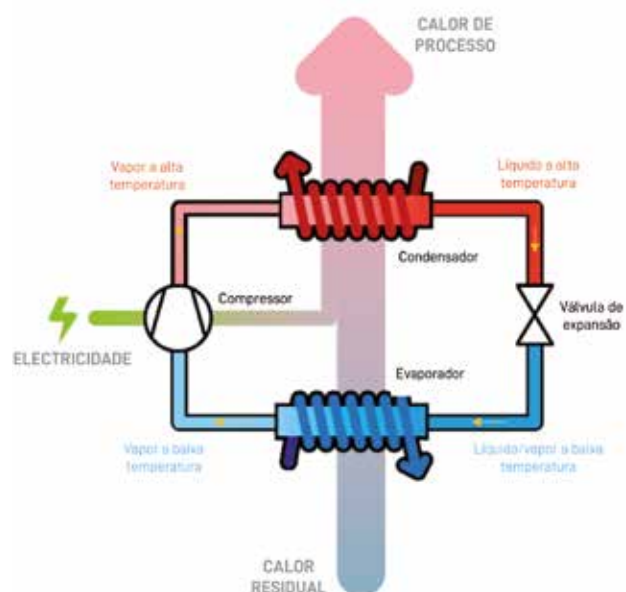


Figura 4.9. Esquema de funcionamento de uma bomba de calor [5].

produção de calor e, conseqüentemente, as emissões de gases com efeito de estufa.

A relação entre o calor fornecido pela bomba de calor e o consumo de eletricidade do compressor é conhecida como coeficiente de desempenho (COP pelas suas siglas em inglês, "coefficient of performance") e é um parâmetro adimensional que caracteriza a eficiência da bomba de calor. Este valor situa-se normalmente no intervalo de 2 a 6, dependendo do calor residual e da temperatura do processo.

$$COP = \frac{\dot{Q}_D}{\dot{W}}$$

Por exemplo, uma bomba de calor capaz de fornecer 3 kW de energia térmica ao processo com apenas 1 kW de energia elétrica fornecida ao compressor tem um COP=3.

• **Uso no pavimento e revestimento cerâmico**

O seu uso na indústria de pavimentos e revestimentos cerâmicos pode ser considerado na recuperação do calor residual do processo e geração de calor útil, a temperaturas de trabalho semelhantes às utilizadas nos secadores. Neste sentido, podem considerar-se diferentes opções:

o **Opção 1:** Valorizar o **calor residual proveniente da chaminé do secador**, que se encontra geralmente a uma temperatura de cerca de 100°C, encaminhá-lo para uma bomba de calor, aumentar o seu valor energético e utilizá-lo para pré-aquecer o ar fornecido aos queimadores do secador, reduzindo assim o consumo de gás natural nestes, ou se possível, através de um permutador de calor, pré-aquecer o ar de renovação no secador.

o **Opção 2:** Analisar a possibilidade de substituir os queimadores atuais nas recirculações do secador, de modo que o gradiente térmico necessário para aquecer os gases recirculados seja gerado pela bomba de calor. Para esse efeito, deve avaliar-se se alguma **fonte de calor residual no processo** de fabrico, como, por exemplo, o calor residual do forno, pode ser utilizada para fornecimento da bomba de calor.

Em ambas as opções, considera-se a instalação de permutadores de calor fluido térmico/gases recirculados nas recirculações do secador, para transferir o calor do fluido térmico proveniente da bomba de calor para os gases do secador.

Como exemplo, a Figura 4.10 mostra como uma bomba de calor de alta temperatura pode ser integrada, na opção 2 acima mencionada, num secador vertical para cerâmica de pavimento/revestimento.

Nos secadores verticais, estima-se que o caudal de recirculação de gases quente se situe entre 15 000-20 000 Nm<sub>3</sub>/h, dependendo da dimensão do secador. Estes gases saem do secador a cerca de 90-100°C, e com a utilização de queimadores de gás natural, a sua temperatura aumenta para 140-160°C. Este gradiente térmico pode ser obtido com o calor cedido pelo permutador de calor através do qual circula o fluido térmico, aquecido pela bomba de calor. Desta forma, o consumo de gás natural pode ser reduzido ou mesmo eliminado.

Esta opção é adequada para secadores que operam a temperaturas próximas de 140°C, onde podem ser integradas bombas de calor comerciais [6]. Para secadores com temperaturas de operação superiores a 140°C, e de acordo

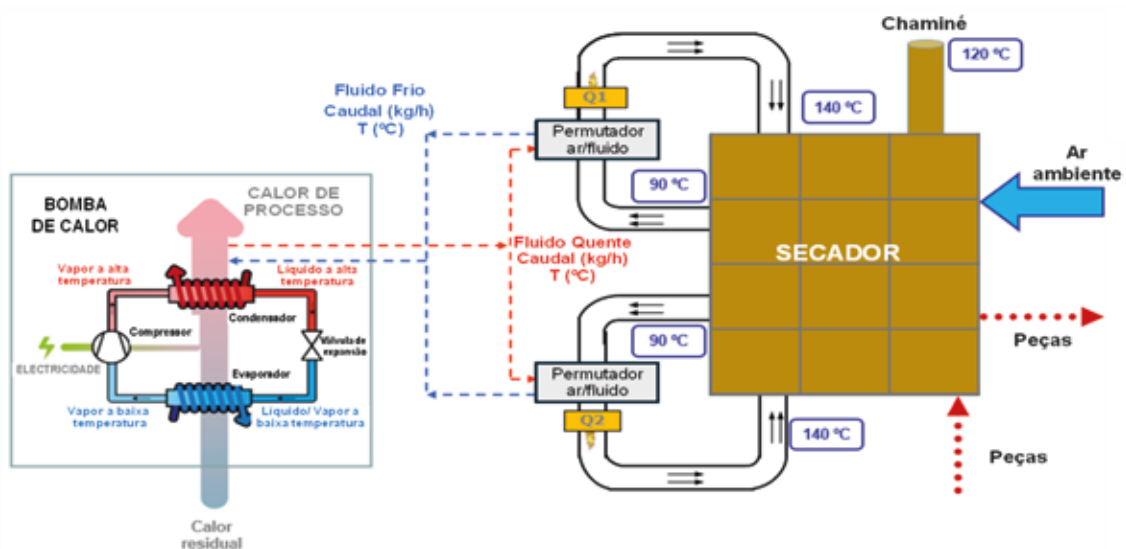


Figura 4.10. Integração de uma bomba de calor, segundo a opção 2, num secador industrial para cerâmica de pavimento/revestimento através de permuta de calor entre de gases de recirculação/fluido térmico.



Figura 4.11. Bomba de calor de alta temperatura e detalhe do motocompressor incorporado (Cortesia da Rank®).

com a bibliografia consultada, são poucos os fabricantes que têm uma solução para funcionar a temperaturas mais elevadas. É de esperar que, a curto prazo, estejam disponíveis mais equipamentos comerciais que possam operar a temperaturas superiores. Estão atualmente em curso projetos de I&D para desenvolver equipamentos que possam atingir temperaturas entre 160°C-200°C, embora a implementação efetiva no mercado em grande escala ainda demore alguns anos. Na Figura 4.11 é apresentada uma unidade de bomba de calor de alta temperatura e um pormenor do motocompressor.

**• Uso no fabrico de tijolo**

Entre 2017 e 2021, foi realizado o projeto LIFE DryFiciency [7], cujo objetivo foi desenvolver bombas de calor industriais de alta temperatura. Foram propostas soluções técnicas para recuperar fluxos de calor residual e elevá-

-los a temperaturas até 160°C em várias indústrias, entre as quais a da produção de tijolos. Neste processo, os tijolos são secos em contínuo num secador tipo túnel, utilizando ar quente, que flui em contracorrente em relação aos tijolos. O teor de humidade dos tijolos é reduzido de 28% para 2%. O equipamento demonstrador está instalado num contentor e tem uma potência térmica de cerca de 400 kW, substituindo um queimador de gás natural e, de acordo com dados publicados, é capaz de poupar até 84% de energia e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 80% [8].

A Figura 4.12 apresenta o processo de secagem de tijolos da empresa austríaca Wienerberger que incorpora uma bomba de calor. Neste caso, o ar de secagem é aquecido através de um permutador de calor e o evaporador da bomba de calor é instalado antes dos permutadores de calor, funcionando assim como reforçador do ciclo de recuperação do calor.

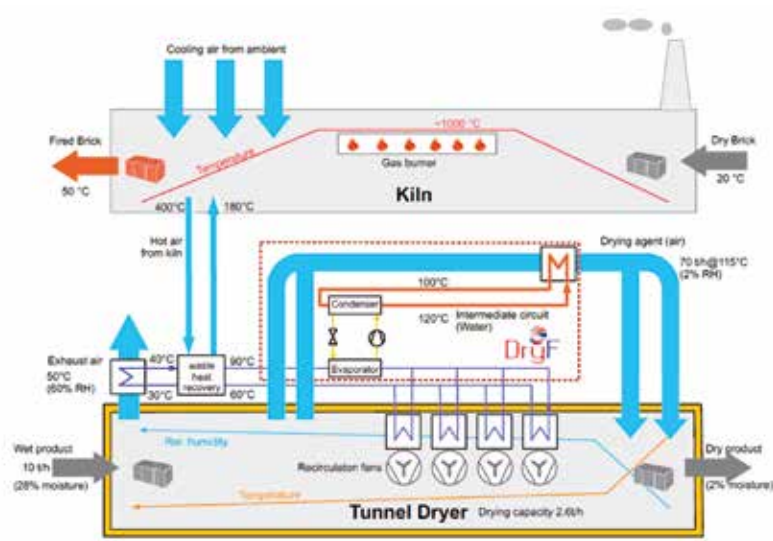


Figura 4.12. Esquema do processo de secagem de tijolos em Wienerberger com a bomba de calor.

# SECAGEM DE PAVIMENTO E REVESTIMENTO CERÂMICO ATRAVÉS DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

Apesar da tecnologia de micro-ondas ser considerada, há mais de 30 anos, como uma das mais promissoras para a secagem de produtos cerâmicos [9–11], ainda não foi desenvolvida para aplicações industriais. Isto deve-se ao facto da tecnologia convencional de micro-ondas gerar pontos de sobreaquecimento e elevada pressão de vapor no interior das peças, o que, aliado à baixa permeabilidade da peça em cru, provoca explosões e fraturas das peças durante o processo [12, 13].

Quando se compara a tecnologia de secagem por micro-ondas com a secagem convencional por ar quente, verifica-se que cada uma das tecnologias apresenta uma série de vantagens e desvantagens. A secagem convencional utiliza gás natural e tem uma elevada capacidade de produção, mas com elevadas perdas de calor por condução e convecção térmica e baixa eficiência, principalmente em sistemas abertos e a baixas temperaturas. O sistema de secagem por micro-ondas é mais eficiente na conversão

térmica e tem perdas mínimas por condução e convecção, uma vez que o produto a secar é aquecido diretamente.

A secagem de produtos cerâmicos conformados é realizada **convencionalmente em secadores com ar quente**, onde a fonte de energia é a combustão de um combustível, geralmente gasoso, e, por vezes, com recuperação parcial de energia de correntes residuais. A energia térmica é transferida por convecção para a superfície da peça, e deve entrar no seu interior por condução, para garantir uma distribuição uniforme de temperatura. Esta mesma corrente é também o agente de transporte do vapor de água que é retirado do produto. Estes fenómenos de transporte podem ser observados na Figura 4.14.

O ar quente gerado, além de aquecer as peças, aquece também, de forma indesejada, toda a estrutura do secador. Os gases de combustão saturados de vapor de água proveniente das peças devem ser extraídos pela chaminé

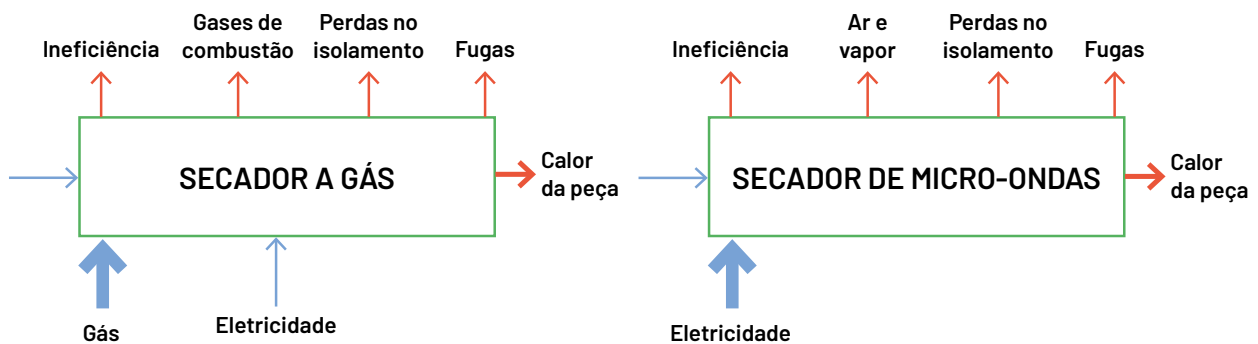


Figura 4.13. Diagrama dos fluxos energéticos num secador a gás em comparação com um secador de micro-ondas no processo de secagem de cerâmica de pavimento/revestimento.

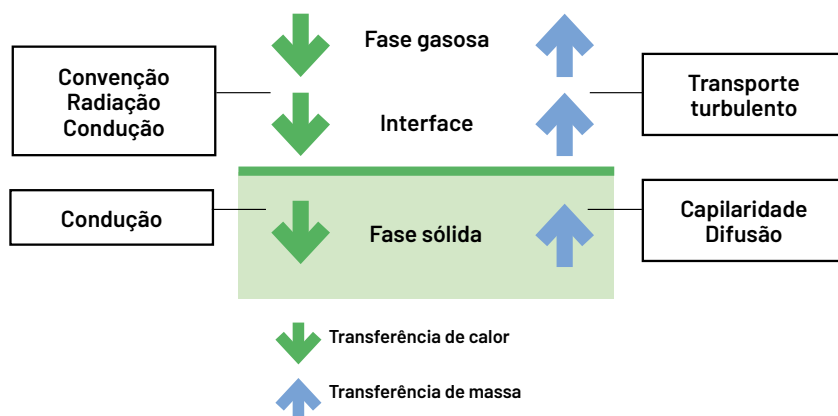


Figura 4.14. Fenómenos de transporte na secagem convencional de materiais cerâmicos.



a uma temperatura suficiente para não gerar condensação. As perdas de calor que ocorrem na extração pela chaminé, as fugas, as perdas no isolamento e o calor residual nas peças fazem com que a eficiência energética global do sistema, considerando a evaporação da água e o aquecimento das peças a temperaturas adequadas para posterior vidragem e decoração, seja de 45-55%.

Na **secagem por micro-ondas**, o mecanismo de aquecimento é completamente diferente da secagem convencional. Neste caso, o calor é gerado no interior da peça devido principalmente à rotação dipolar das moléculas de água e, em menor proporção, ao movimento iônico dentro do campo elétrico alternado gerado, pelo que as perdas de calor são muito reduzidas e não é necessário um isolamento especial (secador de parede fria). O vapor de água gerado deve ser extraído do equipamento para, por um lado, evitar a condensação e, por outro, para que a energia das micro-ondas se foque nas peças a secar e não se dissipe no ar saturado de vapor de água.

A eficiência energética do sistema depende principalmente da eficiência da conversão de eletricidade em energia de micro-ondas no magnetrão (superior a 70%) e da fração de energia de micro-ondas não utilizada pelo material, assim como do calor residual nas peças (Figura 4.15).

Um dos aspetos a destacar da secagem por esta técnica é que é possível aplicar instantaneamente uma grande quantidade de energia em toda a peça. Se esta energia for muito elevada, a velocidade de secagem tolerada pela permeabilidade das peças é ultrapassada, formando-se vapor de água no seu interior e levando à fratura, muitas vezes de forma violenta, das peças.

Por outro lado, neste tipo de equipamento, é extremamente importante a disposição correta do da fonte micro-ondas dentro da câmara de secagem. É necessário um campo eletromagnético uniforme em toda a câmara de secagem para evitar a formação de pontos quentes ou "hot-spots" nas peças processadas. O aparecimento destes pontos quentes nas peças pode levar à sua quebra abrupta ou ao aparecimento de fissuras de secagem.

Em projetos anteriormente realizados de secagem de pavimento/revestimento cerâmico [14] destacou-se a importância de adaptar a configuração do equipamento de micro-ondas à evolução das propriedades dielétricas e à dinâmica de secagem, de modo a obter um perfil de aquecimento homogêneo que evite quebras e proporcione

resultados semelhantes ao sistema de secagem convencional. Verificou-se que é possível secar peças cerâmicas de tamanho industrial utilizando micro-ondas num secador horizontal com um único plano de secagem, obtendo um rendimento na secagem duas vezes superior ao sistema convencional a gás, com tempos de secagem de cerca de 13 min.

Convém referir que os equipamentos de secagem industrial convencional possuem elevada produtividade. Atualmente, e de acordo com a informação disponível, existem equipamentos comerciais de secagem por micro-ondas a nível laboratorial e em pequenas instalações piloto, mas não são suficientes para cobrir as necessidades de produção de uma instalação industrial de fabrico cerâmico. Seriam necessários secadores de micro-ondas de maior comprimento, largura e vários planos de secagem para cobrir as elevadas taxas de produção dos sistemas convencionais. Isto exigiria um investimento elevado de muitas unidades de magnetrões de baixa potência ou uma nova configuração com um magnetrão de maior potência e um guia de ondas ramificado para distribuir uniformemente o campo eletromagnético.

Por estes motivos, embora a secagem de materiais cerâmicos utilizando a tecnologia de micro-ondas, ou combinando a secagem por micro-ondas e a secagem convencional para tirar partido dos benefícios de cada tecnologia, seja obviamente uma tecnologia muito promissora, há ainda muito trabalho a fazer para a tornar uma tecnologia madura e aplicável a nível industrial.

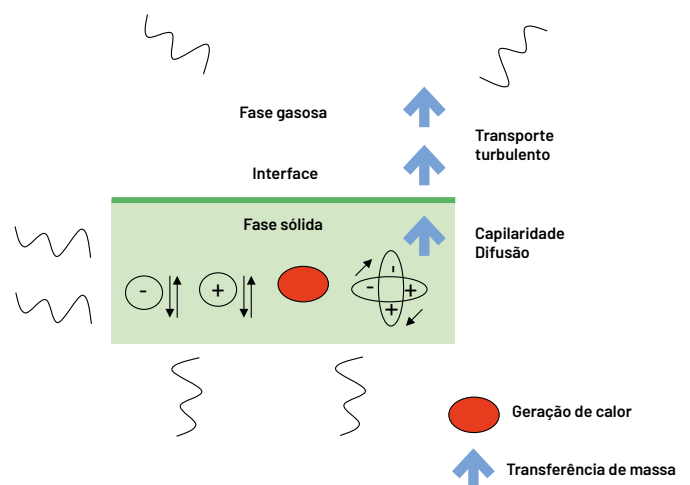


Figura 4.15. Esquema de secagem de uma peça cerâmica por micro-ondas.

# SECAGEM DE PAVIMENTO/REVESTIMENTO CERÂMICO ATRAVÉS DE AQUECIMENTO POR INFRAVERMELHOS

Estudos recentes indicam que outros métodos alternativos à secagem por micro-ondas poderão ser a secagem por convecção de ar quente (substituindo os queimadores de gás por resistências elétricas), o aquecimento por radiação através de lâmpadas de infravermelhos, ou mesmo a concepção de equipamentos híbridos que combinem os dois métodos [15–17].

No caso da radiação infravermelha (IV), ao contrário da condução e da convecção, não necessita de um meio para se propagar, incidindo diretamente no corpo sólido, e provocando o aumento da sua temperatura. Dependendo do comprimento de onda, a radiação é classificada como:

**IV próximo:** 0,7  $\mu\text{m}$  – 1,4  $\mu\text{m}$

**IV médio:** 1,4  $\mu\text{m}$  – 3  $\mu\text{m}$

**IV longínquo:** 3  $\mu\text{m}$  – 1000  $\mu\text{m}$  [18]

Os comprimentos de onda mais curtos tendem a ser mais transmissivos e, portanto, penetrantes, enquanto a energia infravermelha de onda média e longa geralmente penetra menos, convertendo a maior parte de sua energia em calor na superfície da peça. Por esse motivo, para a secagem de materiais, obtêm-se melhores resultados com a radiação infravermelha de onda curta, uma vez que é mais penetrante e permite um aquecimento mais homogêneo.

Neste caso, a radiação infravermelha é absorvida pelo material e, em particular, pelas moléculas de água nele contidas, provocando a vibração das moléculas, gerando calor no interior do corpo cerâmico. O calor gerado no interior do material aumenta a velocidade de evaporação da água, uma vez que a energia térmica aumenta a temperatura da água, facilitando a sua passagem de líquido a vapor. Isto ajuda a reduzir o tempo de secagem, acelerando o processo de evaporação até à superfície.

A incorporação de um fluxo convectivo de ar quente no processo de secagem por radiação infravermelha pode ajudar a eliminar o vapor de água que se liberta do material, evitando a saturação de vapor junto à sua superfície.

A radiação infravermelha oferece inúmeras vantagens, entre as quais se destacam a fácil instalação, o arranque rápido sem tempo de espera para atingir a potência máxima da lâmpada e a poupança de tempo e energia durante a secagem. Além disso, garante um produto final de elevada qualidade, mantém um ambiente de trabalho limpo e amigável do ambiente e permite uma monitorização rigorosa dos parâmetros do processo.

No entanto, apesar de nos últimos anos ter aumentado a sua popularidade em processos de secagem em indústrias como a alimentar [19], a têxtil [20], a química [21] ou a de automóvel [22], entre outras, na revisão efetuada quase não foram encontrados estudos ou fabricantes de equipamentos de secagem por infravermelhos aplicados a produtos cerâmicos conformados.

No Instituto de Tecnologia Cerâmica (ITC-AICE) (Espanha) foram realizados dois projetos muito interessantes nesta linha (projetos CerOh [23] e Demo-Electrics [24]), nos quais foi construído um equipamento à escala semi-industrial com a empresa Dastech Solutions (Figura 4.16). O equipamento é constituído por um total de 5 módulos, com uma potência total instalada de 120 kW. Cada um destes módulos possui um pirómetro ótico instalado à saída, que permite a regulação da potência do módulo em função da temperatura pretendida no ciclo de secagem.

No momento da redação deste documento (outubro de 2024), já estão disponíveis alguns resultados de secagem de cerâmica, tanto de revestimento como de pavimento, especificamente para as seguintes tipologias:

- Porosa vermelha: 182 kWh/  $t_{ss}$  (IV) vs 209 kWh/  $t_{ss}$  (gás industrial)
- Grés porcelânico: 143 kWh/  $t_{ss}$  (IV) vs 125 kWh/  $t_{ss}$  (gás industrial)

Assim, os resultados preliminares mostram que é possível obter consumos específicos próximos dos atuais secadores industriais a gás. Apesar destes resultados serem bastante encorajadores, o projeto prevê a realização de uma nova fase de experimentação adicional para otimizar o processo. O objetivo é melhorar os consumos específicos acima referidos, através da integração da tecnologia de infravermelhos com um sistema de convecção de ar quente.



Figura 4.16. Vista geral do equipamento de secagem por IV (empresa fabricante do equipamento: Dastech Solutions) e pormenor do interior da câmara de secagem.



# FORNOS ELÉTRICOS

Atualmente, os dois tipos de fornos contínuos mais utilizados para a cozedura de produtos cerâmicos conformados são: os fornos de túnel e os fornos de rolos. No caso de produtos de espessura reduzida e geometria aproximadamente plana (pavimento/revestimento cerâmico, telhas esmaltadas, pratos de louça, cerâmica técnica), o forno mais utilizado é o forno de rolos, que permite ciclos rápidos (40-70 minutos), enquanto para produtos de grandes espessuras ou geometrias complexas (tijolos, louça sanitária, telhas, etc.), os fornos mais utilizados são os fornos de túnel com ciclos longos (12-60 horas) e elevadas densidades de carga.

Nos dois tipos de fornos, a energia necessária para o ciclo térmico obtém-se através de processos de combustão de diferentes combustíveis, sendo os combustíveis gasosos os mais utilizados, especialmente nos fornos de rolos. A cozedura em ambos os fornos é realizada em três fases: pré-aquecimento, zona de temperatura máxima ou de cozedura propriamente dita e arrefecimento (com ar). A temperatura de cozedura e a duração do ciclo são muito variáveis e dependem do tipo de suporte, da composição, do tamanho e da espessura dos produtos, da produção do forno, do tipo de vidrado, do tipo de forno, etc.

**Uma vez que estes dois tipos de fornos são utilizados na indústria cerâmica há mais de 30 anos, tem sido implementado um grande número de medidas para melhorar a sua eficiência energética [25–29]. No entanto, estas tecnologias atingiram um grau de maturidade em que, para reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> é necessário adotar uma mudança de tecnologia e/ou fonte de energia (biometano, hidrogénio ou eletricidade são as principais candidatas). Neste cenário, a utilização de fornos elétricos é uma das opções mais promissoras, pelo menos para alguns produtos e tendo em conta que na Europa a disponibilidade de biometano ou hidrogénio é atualmente bastante limitada.**

Na indústria cerâmica, até agora, o uso de fornos elétricos tem sido praticamente limitado a aplicações laboratoriais, em pequenas instalações ou na cerâmica avançada e, por isso, as produções obtidas são muito limitadas, sendo a sua implementação considerada nula.

Algumas das vantagens que este tipo de fornos apresenta são:

- Podem atingir **temperaturas de trabalho de 1600-1800°C**, o que cobre toda a gama de aplicações normais dos fornos industriais.
- **Maior segurança**, uma vez que os problemas elétricos que podem surgir são reduzidos e não há perigo de explosão devido a falhas nos sistemas de combustão.
- **Elevada precisão** nos processos e **repetibilidade** nos fornos contínuos, ligeiramente superior à dos fornos de combustão.
- Elevada **flexibilidade** de funcionamento a diferentes ritmos de trabalho.
- Utilização de **energia limpa** (se a sua origem for renovável).
- **Ausência de gases de combustão**. Este facto permite melhorar as condições ambientais nas proximidades do forno e no exterior da fábrica. Embora exista emissão de gases provenientes da cozedura do material, assim como da decoração aplicada.
- **Sem emissões diretas de CO<sub>2</sub>**. O CO<sub>2</sub> só será emitido durante a cozedura de materiais porosos com carbonatos na sua composição. Mas, em qualquer caso, as emissões serão muito reduzidas
- **Menores perdas de energia pelas chaminés**. A quantidade de gases gerados no forno pode ser reduzida em 80-90%, uma vez que não há combustão. Apenas é necessária a extração dos gases gerados durante o tratamento térmico do material cerâmico (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, etc.).
- **Menores caudais de gases poluentes**. A redução da quantidade de gases gerados no forno permitirá o seu tratamento a um custo inferior, uma vez que haverá um menor caudal de gases a eliminar e o investimento em sistemas de tratamento depende em grande medida

do caudal de gases a tratar. No entanto, prevê-se que as concentrações de poluentes aumentem, o que deverá ser tido em conta no projeto e nos valores-limite de emissão.

- **Menor consumo.** O consumo de energia nos fornos elétricos para a mesma produção é geralmente inferior. As peças necessitam do mesmo consumo de energia, mas nos fornos elétricos o consumo durante o tempo de permanência é inferior ao dos fornos de combustão. Além disso, como referido anteriormente, o consumo de energia dos ventiladores do forno será muito menor, uma vez que terão de extrair uma menor quantidade de gases.
- **Possibilidade de autoprodução de eletricidade.** Na própria fábrica, através da instalação de painéis fotovoltaicos e/ou sistemas de cogeração para a gestão energética dos fornos.

Em seguida, são apresentados os resultados de alguns projetos em que foram estudadas as possibilidades de eletrificação da produção cerâmica e, em particular, em que

foram concebidos e construídos fornos elétricos para a cozedura de pavimento/revestimento cerâmico (forno monoestrado) e louça sanitária (forno de túnel).

#### ● Pavimento e revestimento cerâmico

Em 2022, o Instituto de Tecnologia Cerâmica (ITC-AICE) desenvolveu um projeto para a Associação Espanhola de Fabricantes de Revestimento e Pavimento Cerâmico (ASCER) intitulado “Análise das possibilidades de eletrificação da cozedura da cerâmica de pavimento/revestimento” [30], no qual foi realizado um estudo sobre o estado da arte da tecnologia de cozedura elétrica a nível industrial.

Nas conclusões salientou-se o facto de o uso de fornos elétricos ser cada vez mais frequente em muitos setores industriais, devido às suas vantagens operacionais e ambientais (não emitem CO<sub>2</sub> de forma direta).

Também se constatou que, no setor espanhol de fabrico de pavimento/revestimentos cerâmico apenas existia um forno elétrico de rolos monoestrado utilizado para



Figura 4.17. Vista geral do forno elétrico (zona de entrada de material).

produção industrial (concretamente na empresa Levantina Techlam), que era usado exclusivamente para o fabrico de cerâmica de baixa espessura (até 5 mm). Este forno foi construído em 2006 por uma empresa de maquinaria cerâmica [31]. Durante o desenvolvimento do projeto, foi efetuada uma caracterização do forno e, apesar de algumas limitações de conceção e construção, obtiveram-se resultados de rendimento energético superiores aos dos fornos de combustão. Estes resultados demonstraram que a tecnologia de aquecimento elétrico pode ser muito interessante para a cozedura de pavimento/revestimento cerâmico se for devidamente otimizada.

Com base neste estudo preliminar, o Instituto Tecnológico da Cerâmica (ITC-AICE) decidiu realizar em dois projetos de investigação específicos (Energético [32] e Demo-Electrics [24]), o desenvolvimento de um forno elétrico específico para a cozedura de pavimento/revestimento cerâmico. Como resultado destes trabalhos, e a partir de um desenho

concebido por simulação computacional e da validação de alguns projetos preliminares em módulo experimental, foi construído o forno-piloto apresentado na Figura 4.17, no qual o calor é fornecido totalmente através de resistências elétricas distribuídas ao longo do forno, na parte superior e inferior da superfície dos rolos.

Atualmente, estão a ser realizados os ensaios necessários para resolver todos os aspetos que limitam o desenvolvimento desta tecnologia, de modo que, num futuro próximo, possa ser integrada no processo de fabrico industrial. Esta tecnologia poderá reduzir praticamente 100% das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da cozedura de cerâmica.

Convém salientar que em 2024 uma empresa do sector cerâmico espanhol [33] instalou um forno industrial de rolos monoestrado de funcionamento totalmente elétrico, concebido exclusivamente para a cozedura de pavimento/revestimento cerâmico. Este forno elétrico é o resultado de



Figura 4.18. Forno elétrico para cozedura de cerâmica de pavimento/revestimento instalado na empresa Equipe Cerâmicas [37].

um projeto de I+D+i, desenvolvido graças à participação da Universidade Jaime I [34], do Instituto de Tecnologia Cerâmica - AICE [35], da empresa SYSTEMFOC [36] e da forte aposta do fabricante de levar a cabo um projeto pioneiro para a descarbonização da indústria cerâmica.

O forno elétrico é relativamente pequeno, mas funciona em modo contínuo numa das linhas de produção da empresa. O forno tem um comprimento de 31 m, uma potência elétrica nominal de 1,2 MW, e pode atingir uma temperatura nominal máxima de 1200°C e uma capacidade de produção nominal de aproximadamente 1500 m<sub>2</sub>/dia. É de salientar que este forno foi projetado tendo como base o forno piloto desenvolvido pelo ITC, com um design específico para funcionar como forno elétrico, com base na tecnologia de aquecimento por resistências elétricas. Os dados disponíveis indicam que o consumo de energia é muito inferior ao dos fornos de combustão (15-35%), uma vez que, ao contrário de outros fornos elétricos, não é um

forno de combustão adaptado ao funcionamento elétrico, mas sim um equipamento em que todos os seus elementos foram projetados, desde o início, para um funcionamento totalmente elétrico (dimensões e geometria da câmara de cozedura, abóbada, localização e configuração dos elementos resistivos, controladores, etc.).

#### Louça sanitária (forno de túnel)

Também em 2024, a Empresa Roca Group colocou em funcionamento um forno de túnel elétrico para a produção de louça sanitária na unidade industrial de Laufen, Gmunden (Áustria).

Neste caso, segundo informação publicada na imprensa [38], o forno elétrico envolveu um investimento de 5 M€, foi construído e instalado pela empresa Keramischer Ofenbau [39], e evita a emissão de cerca de 5 000 tonCO<sub>2</sub>/ano.



Figura 4.19. Forno de túnel elétrico para a cozedura de louça sanitária.

## Referências

- [1]. Ferrer, S.; Mezquita, A.; Monfort, E.; Vedri, J. *Guía de Tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas*. IVACE+i, IT-C-AICE, 2021. Disponível em: <https://www.itc.uji.es/wp-content/uploads/2022/06/Tecnologias-Hipocarbonicas.pdf>
- [2]. García-Ten, F. J.; Quereda, M. F.; Vicente, M. J.; Gil, C.; Miralles, C.; Flors, J. R.; Peña, A. *Obtención de baldosas cerámicas mediante la utilización de sistemas de granulación sostenibles*. Póster apresentado em Qualicer 2014.
- [3]. Mezquita, A.; Monfort, E.; Ferrer, S.; Gabaldón-Estevan, D. "How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route." *Journal of Cleaner Production*, vol. 168C, 2017, pp. 1566-1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.082.
- [4]. Casadio, S.; Costa, D.; Ricci, C.; Bresciani, A. *Descarbonización del proceso cerámico con calentamiento eléctrico procedente de fuentes renovables*. SACMI, Imola (BO), Italia, 2024. Congreso Qualicer 2024.
- [5]. De Boer, R. et al. "Strengthening industrial heat pump innovation. Decarbonizing Industrial Heat". 2020.
- [6]. Rank. "Rank Heat Pumps." Disponível em: <https://www.rank-orc.com/es/rank-hp/>
- [7]. DryFiciency. *DryFiciency - Industrial heat-pump waste-heat recovery project* [Online]. Disponível em: <https://dryficiency.eu/>
- [8]. Wilk, V.; Helming, F.; Lauermann, M. *High temperature heat pumps for industrial processes - application and potential*. Proceedings of ECEEE Industrial Summer Study, 14-19 Sept. 2020, Digital event.
- [9]. Agrafiotis, C.; Tsoutsos, T. "Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review." *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 12, 2001, pp. 1231-1249.
- [10]. Cárdenas, C.; Restrepo, R.; García-Sucerquia, J.; Marín, J.; García, C. "Las microondas como una alternativa para el secado de materiales cerámicos tradicionales." *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. S1, no. 1, 2009, pp. 427-432.
- [11]. Segerer, H. "Producing technical ceramics by microwave drying." *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 77, no. 3, 1998, p. 64.
- [12]. Skansi, D.; Tomas, S. "Microwave drying kinetics of a clay-plate." *Ceramics International*, vol. 21, no. 3, 1995, pp. 207-211.
- [13]. Kowalski, S.; Mielniczuk, B. "Analysis of Effectiveness and Stress Development during Convective and Microwave Drying." *Drying Technology*, vol. 26, no. 1, 2007, pp. 64-77.
- [14]. López-Buendía, A. M.; Guaita-Delgado, V. L.; Aguilera-Forés, M.; Boix-Palomero, J.; García-Baños, B. *Secado eco-eficiente de baldosas cerámicas recién prensadas mediante tecnología microondas*. Qualicer 2018.
- [15]. Onwude, D. I.; Hashim, N.; Abdan, K.; Janius, R.; Chen, G. "The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato." *Journal of Food Engineering*, vol. 241, 2019, pp. 75-87.
- [16]. Afzali, F.; Darvishi, H.; Behroozi-Khazaei, N. "Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system." *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, 2019, pp. 358-367.
- [17]. El-Mesery, H. S.; El-Fatah Abomohra, A.; Kang, C-U.; Cheon, J-K.; Basak, B.; Jeon, B-H. "Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy efficient drying of biomass." *Energies*, vol. 12, 2019, p. 2818.
- [18]. Ceramicx. "Preferred wavelengths for comfort heating." Disponível em: <https://www.ceramicx.com/es/information/media/white-papers/preferred-wavelengths-for-comfort-heating/>
- [19]. FoodTechProcess. "Infrared Dryer IDU." Disponível em: <https://foodtechprocess.com/es/secaadores/358-infrared-dryer-idu.html>
- [20]. Chiossi e Cavazzuti. Ficha de produto. Disponível em: <https://www.directindustry.es/prod/chiossi-e-cavazzuti-srl/product-191456-2270476.html>
- [21]. Kreyenborg GmbH. Ficha de produto. Disponível em: <https://www.directindustry.es/prod/kreyenborg-gmbh-co-kg/product-185112-1911954.html>
- [22]. Astra. Ficha técnica do secador. Disponível em: <https://www.directindustry.es/prod/astra/product-104021-2097133.html>
- [23]. Proyecto CerOh! *Strategies - Estrategias de economía circular para una industria cerámica hipocarbónica*. IVACE-FEDER, IMDEEA/2018/12. Disponível em: <http://py.itc.uji.es/fichaPY.aspx?idProy=%272063%27>
- [24]. Proyecto DEMO-ELECTRICS. *Demostradores de electrificación de calor*. IVACE, IMAMCA/2023/1.
- [25]. Monfort, E.; Mezquita, A.; Granell, R.; Vaquer, E.; Escrig, A.; Miralles, A.; Zaera, V. "Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas." *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 49, no. 4, 2010, pp. 303-310.
- [26]. Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granell, R.; Vaquer, E. *Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana*. AVEN, 2011.
- [27]. SACMI. *Revamping Forno 2018*. Disponível em: <https://revamping.sacmi.com/es-es/?display=FORNO%202018&tab=Macchine>
- [28]. SITIBT. Catálogo de hornos. Disponível em: <https://sitibt.com/hornos-esp>
- [29]. ICF & Welko. "Hornos monocanal." Disponível em: <https://www.icf-welko.it/es/ceramic-es/productos/tratamiento-termico/hornos-monocanal/>
- [30]. ASCER. *Informe de transparencia*. Disponível em: [https://transparencia.ascer.es/media/1088/c221382\\_2.pdf](https://transparencia.ascer.es/media/1088/c221382_2.pdf)
- [31]. System Ceramics. Portal institucional. Disponível em: <https://www.systemceramics.com/es>
- [32]. Proyecto Energètic. *Lineas estratégicas para la transición energética del proceso de fabricación de baldosas cerámicas*. IVACE-FEDER, IMDEEA/2021/35.
- [33]. Equipe Cerámicas. Portal institucional. Disponível em: <https://www.equipeceramicas.com/>
- [34]. Universitat Jaume I. Disponível em: <https://www.uji.es/>
- [35]. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE). Disponível em: <https://www.itc.uji.es/>
- [36]. System FOC. Disponível em: <https://systemfoc.com/>
- [37]. Equipe Cerámicas. *Presentación horno 100% eléctrico*. Disponível em: <https://www.equipeceramicas.com/presentacion-horno-100-electrico/>
- [38]. Roca Group. *First electric tunnel kiln for sanitary ceramics*. Disponível em: <https://www.roca.com/news/roca-group-first-electric-tunnel-kiln-world-sanitary-ceramics>
- [39]. Keramischer Ofenbau. Portal institucional. Disponível em: <https://www.keramischerofenbau.de/>

# PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VERDE

Sara Freitas

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis – Recurso solar

## Contributo do solar fotovoltaico na descarbonização da indústria cerâmica

### Recurso solar

Portugal é um dos países da Europa onde o recurso solar é mais generoso, sendo a metade sul relativamente mais beneficiada do que a norte: por um lado, tem-se a cidade de Lisboa como 3<sup>a</sup> capital europeia com mais horas de sol por ano e uma irradiação média no plano horizontal próxima de 1,7 MWh/m<sup>2</sup>/ano e, por outro lado, conforme a Figura 4.20, a sul, tem-se por exemplo Faro onde a mesma ascende aos 1,9 MWh/m<sup>2</sup>/ano e, mais a norte, no Porto esta reduz-se ligeiramente para 1,6 MWh/m<sup>2</sup>/ano.

Deste modo, considerando uma eficiência de conversão da irradiação para eletricidade de cerca de 20% e um fator de desempenho de 90%, grosseiramente se pode calcular um potencial fotovoltaico médio próximo de 300 kWh por metro quadrado de painel na horizontal, por ano, em Portugal.

O aproveitamento da radiação solar através da tecnologia fotovoltaica permite a produção de eletricidade sem emissões locais, sem ruído ou necessidade de partes móveis.

Pela sua modularidade e pequena dimensão unitária, possibilita diversas formas de aplicação ou integração quer seja em cobertura, fachada, no solo, ou noutras (Figura 4.21), e um processo de instalação relativamente simples e célere. Além disto, é uma tecnologia cujos custos de fabrico dos seus componentes têm vindo a decrescer significativamente ao longo dos anos (fruto da manufactura ter transitado na sua grande maioria para países asiáticos), chegando ao consumidor final a preços muito mais acessíveis hoje do que há 1 ou 2 décadas e incluindo cada vez mais soluções inovadoras ao nível das cores, flexibilidade, forma e transparência.

Estando os módulos solares certificados para um alto desempenho durante pelo menos 25 anos (isto é, uma redução máxima da potência nominal até 80%), apenas será necessário realizar a correta monitorização e manutenção de todo o sistema ao longo do seu tempo de vida, sendo o inversor (para conversão de corrente contínua em alternada) o equipamento mais crítico cuja garantia tipicamente ronda os 10 anos – embora, dependendo do modelo, alguns fornecedores já ofereçam a extensão deste período até mais de 20 anos.



Figura 4.20. Irradiação solar anual no plano horizontal na Península Ibérica (Fonte: PVGIS).





Figura 4.21. Exemplos de instalações fotovoltaicas no meio edificado: cobertura curva numa estação de comboios (esquerda, superior); painéis orientados Este-Oeste num supermercado (esquerda, inferior); módulos semi-transparentes em fachada (direita, superior); e estrutura de sombreamento num estacionamento (direita, inferior). (Fontes: FirstRule, Solis-Lisboa, GJP, SunEnergy).

Porém, o fotovoltaico também comporta algumas desvantagens, como por exemplo: a impossibilidade de produção fora das horas de sol; a baixa produtividade específica e densidade de potência (quando comparado com outras tecnologias); ou a diminuição da eficiência de conversão com o aumento da temperatura.

No projeto de um sistema fotovoltaico é, portanto, fundamental implementar boas práticas e considerar todos os possíveis condicionantes logo de início. Desde a adequabilidade da orientação, inclinação e capacidade estrutural das superfícies de interesse, à existência de elementos

circundantes que possam provocar sombreamento parcial nos módulos, ou até mesmo a presença de espécies animais ou vegetais que possam obstruir ou danificar os equipamentos, diversos aspetos técnicos podem impedir uma maximização do aproveitamento de um bom potencial teórico. Não obstante, o principal critério a avaliar é o nível de correspondência entre o perfil de consumo que se pretende alimentar e o perfil de produção de eletricidade solar.

### Autoconsumo fotovoltaico

Através da instalação de um sistema fotovoltaico para autoconsumo, possibilita-se a produção própria de eletricidade para fornecimento dos consumos locais. Assim, é reduzida a compra de eletricidade proveniente da rede a uma comercializadora - por um preço mais elevado do que aquele que custaria a produzi-la através de um sistema próprio - e a dependência de oscilações do mercado ou de política energética. Por sua vez, é desencorajada a venda dos excedentes da produção solar a um agregador de eletricidade, dado que estes têm sido remunerados a um valor pouco atrativo que ronda os 0,06 €/kWh (sem prejuízo de campanhas comerciais mais vantajosas).

Para avaliar a viabilidade e tirar o máximo proveito de um autoconsumo fotovoltaico, é crucial analisar em detalhe o perfil de consumos de eletricidade nas instalações às quais se pretende ligar o sistema. Valores acumulados anuais ou mensais podem ajudar a balizar as dimensões do sistema, porém os detalhes técnicos como a melhor orientação ou inclinação dos painéis só são possíveis de estimar através da análise de curvas diárias típicas, em diferentes dias da semana e alturas do ano, com a melhor resolução temporal possível. Isto porque o consumo de eletricidade varia conforme a utilização das instalações e dos equipamentos, o que por sua vez é afetado não só pelos turnos dos ocupantes e pelos horários das tarefas, mas também por fatores do ambiente como a temperatura, luz solar, pluviosidade, entre outros. No fundo, é essencial perceber se o perfil de

consumo se consegue adaptar a uma unidade de produção para autoconsumo (UPAC) fotovoltaica, no curto e no longo prazo.

É igualmente importante ter uma visão de futuro em paralelo com intervenções que venham a aumentar a eficiência energética no local, tais como a substituição de equipamentos e dispositivos para outros mais eficientes ou a eletrificação de processos e atividades ainda baseados em recursos fósseis. Desta forma, poderá dimensionar-se o sistema fotovoltaico, ou acautelar uma futura expansão do mesmo, considerando desde logo as alterações expectáveis no consumo de eletricidade.

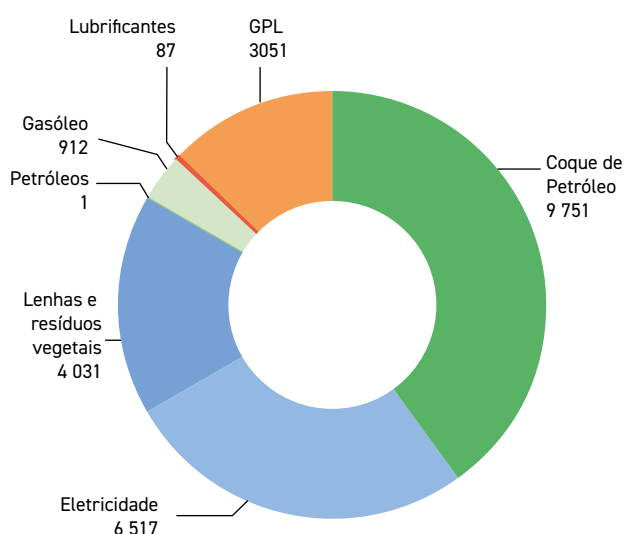
### Consumo e produção

De acordo com o Balanço Energético Nacional disponibilizado pela DGEG, para o ano 2022 [1], o setor da cerâmica (Figura 4.22) caracterizou-se da seguinte forma:

Tendo em conta os processos produtivos e principais sistemas consumidores de energia empregues na indústria cerâmica, segundo dados de 2014 [2], o consumo de energia tipicamente distribui-se em:

- Eletricidade - para iluminação, AVAC, sistemas de ar comprimido, sistemas de ventilação e/ou despoejamento, moinhos (no processo de preparação ou moagem), prensas (no processo de prensagem e/ou moldagem), e outros equipamentos diversos;

**Consumo Final [tep]**  
**Indústrias transformadoras - Cerâmicas**



**Consumo Final [tep]**  
**Cerâmicas**

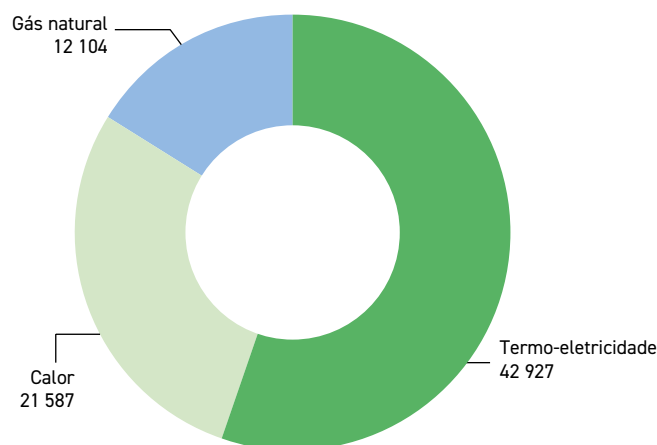


Figura 4.22. Balanço energético para o setor da cerâmica: consumo final (esquerda) e cogeração (direita). (Fonte: Balanço Energético Nacional 2022, DGEG).

- Gás natural e gás propano - para fornos e caldeiras (nos processos de atomização, secagem, e cozedura em fornos de funcionamento contínuo ou intermitente);
- Gasóleo - para a frota automóvel.

Deste modo, identificam-se diversas possibilidades de aproveitamento da eletricidade solar pelo setor da indústria cerâmica, principiando-se no fornecimento às necessidades já assentes em energia elétrica e seguindo-se daquelas que requerem gás natural e/ou propano, pressupondo, pois, a sua substituição por alternativas eletrificadas. Por fim, a transição para uma frota automóvel e outros meios de mobilidade elétricos poderá beneficiar de um carregamento das baterias no local, mais económico e flexível.

Contudo, dada a dimensão relativamente pequena das empresas na indústria cerâmica portuguesa [3], é possível que uma baixa disponibilidade de capital para um investimento profundo em medidas de eficiência energética seja uma barreira à adoção imediata do fotovoltaico pelas mesmas. Este aspeto realça, mais uma vez, a importância da monitorização cuidada e caracterização dos consumos energéticos em todas as etapas do processo de produção, de forma a apoiar não só o dimensionamento otimizado do sistema fotovoltaico, como também a definição das medidas de eficiência energética mais adequadas a cada caso e horizonte temporal individualmente, informando uma tomada de decisão custo-eficiente.

## O individual e o coletivo

Em Portugal, o regime do autoconsumo individual (ACI) entrou em vigor somente a partir de 20 de outubro de 2014, com a publicação do Decreto-Lei n.º 153/2014, tendo sido introduzidos os moldes do autoconsumo coletivo (ACC) e das comunidades de energia renovável (CER), cerca de 5 anos mais tarde, por via do Decreto-Lei n.º 162/2019. Atualmente, é o Decreto-Lei n.º 15/2022 que regula o autoconsumo.

O autoconsumo tem sofrido um incremento significativo de ano para ano, evidente após a introdução dos novos regimes jurídicos e a disponibilização de apoios à aquisição e instalação dos sistemas, abrangendo um pouco todos os setores. No lado da indústria, comércio e serviços, têm sido particularmente relevantes os POSEUR, PRR e Programas do Fundo Ambiental na alavancagem de diversas instalações fotovoltaicas a par com a implementação de medidas de eficiência energética como um todo. Por sua vez, a mudança de paradigma do autoconsumo individual para o coletivo tem sido um pouco mais lenta, dada a maior complexidade administrativa e técnica envolvida.

Apesar da mais demorada adoção, são já vários os exemplos de aproveitamentos coletivos que optaram por principiar-se como ACC, pela maior simplicidade, tendo como objetivo futuro constituir-se como CER e alargar a sua abrangência geográfica. Entre estes, diversos estão estabelecidos entre comércio e serviços, indústria e residencial, entre o setor público e o privado.

Na Tabela 4.2, exemplificam-se alguns perfis de consumo e de produção de eletricidade solar em diversas configurações de autoconsumo que podem ser consideradas:

**Tabela 4.2. Exemplos ilustrativos de autoconsumo individual (de A a C) e coletivo (D).**

<p><b>a) autoconsumo individual:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● consumos de eletricidade são constantes desde o início da manhã até ao início da noite, diminuindo no período noturno;</li> <li>● produção fotovoltaica é máxima nas horas próximas do zênite solar - típico de sistemas com orientação a sul.</li> </ul>	
<p><b>b) igual a A) mas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● produção fotovoltaica tem um pico de manhã e outro à tarde - típico de sistemas com orientação este-oeste.</li> </ul>	
<p><b>c) igual a B) mas o sistema possui armazenamento com baterias que:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● carregam com o excedente solar;</li> <li>● descarregam durante o período de consumos noturnos.</li> </ul>	
<p><b>d) autoconsumo coletivo ou comunidade de energia:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● consumos de outras instalações vizinhas durante o período diurno absorvem parte dos excedentes solares.</li> </ul>	

No encadeamento das situações ilustrativas anteriores, torna-se evidente o incremento na taxa de autoconsumo do sistema fotovoltaico, através da exploração de outras orientações e inclinações que permitam tirar melhor partido do ciclo circadiano, pela introdução de armazenamento da eletricidade solar excedente e pela participação de outros consumidores e/ou produtores. Em cenários mais complexos onde o perfil de consumos do agregado permita absorver mais excedente, poderá ainda ser possível reduzir as necessidades de armazenamento e, assim, o investimento inicial.

É evidente que uma total autossuficiência, em qualquer das configurações anteriores, se torna praticamente impossível de alcançar devido aos consumos noturnos. Contudo, além do armazenamento da eletricidade solar em baterias, é possível “armazená-la como calor”, isto é, tirando partido do excedente, recorrer a bombas de calor para a produção de água quente ou fria, ou de ar quente ou frio, a aproveitar mais tarde nos processos industriais ou mesmo na (pré-)climatização de espaços. Deste modo, salienta-se novamente a importância de pensar todo o sistema fotovoltaico e os seus moldes de operação e exploração numa lógica de eficiência energética geral.

Finalmente, importa referir que o autoconsumo reduz o recurso à rede elétrica, trazendo poupança na fatura energética, mas que haverá sempre alturas em que o recurso solar estará ausente ou a quantidade de energia armazenada não será suficiente para as necessidades. A rede elétrica estará, assim, disponível para colmatar a procura na ausência da produção renovável local, permitindo-se, assim, uma gestão própria dos sistemas de energia e, consequentemente, a otimização dos custos com eletricidade através da escolha de tarifa que se adapte melhor ao calendário e horários das atividades.

## Considerações finais

Segundo diversos testemunhos disponíveis publicamente, parece haver um consenso de que a adoção da energia fotovoltaica traz uma vantagem competitiva significativa. A tecnologia e os moldes sob os quais pode ser explorada origina poupanças de energia, redução de custos operacionais e transmite uma imagem positiva no âmbito do ESG.

Através da informação disponível na plataforma Observatório Fotovoltaico, um mapeamento baseado em crowdsourcing e opendata, foi possível estimar a existência de cerca de 40 projetos fotovoltaicos atualmente instalados pelo setor da cerâmica. Destes, apenas 33 projetos apresentam a potência instalada (Tabela 4.2), totalizando a mesma cerca de 17 MWp:

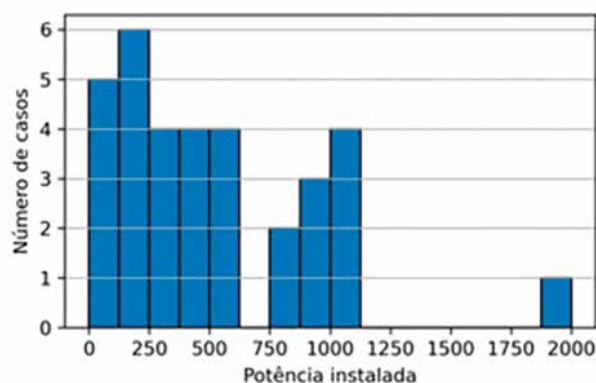


Figura 4.23. Distribuição da potência fotovoltaica instalada [kWp] no setor da cerâmica em Portugal. (Fonte: Observatório Fotovoltaico, consultado em maio de 2024).

Adicionalmente, recolheram-se alguns testemunhos, apresentados de seguida, presentes no site de um fornecedor de solução fotovoltaica tratando especificamente exemplos no setor da cerâmica. Dentro destes, alguns

reportam que a eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico representa: “16% do total de custos”, “de 25 a 30% dos custos de produção”, e “30% da estrutura de custos”.

Os grandes benefícios desta parceria são a redução de custos na fatura da energia, menor dependência da rede e diminuir a pegada carbónica. Para além destas vantagens, outros benefícios são a valorização do imóvel e da imagem de sustentabilidade da marca.

#### Cobertura fotovoltaica

A oportunidade de rentabilizar todo o espaço do edifício levou a que a central fosse instalada na cobertura da fábrica trazendo a vantagem “*de produzir energia onde ela será consumida e sem utilizar áreas ou espaços que poderiam ter outra utilização (agrícola, industrial, económica, etc...)*”. É um espaço que para a Primus Ceramics não tem outra forma de rentabilização, logo, a utilização para a produção de energia renovável, é uma situação win-win aliando as vantagens económicas e Ecológicas”.

#### Substituição da cobertura em fibrocimento

O investimento Helexia também permitiu à Soladrilho a retirada de 11.200 m<sup>2</sup> de cobertura em fibrocimento, material que contém amianto, substituindo-a posteriormente por uma cobertura em painel sandwich, promovendo a eliminação de um agente nocivo para a saúde. Todo o processo de retirada e colocação de nova cobertura bem como a instalação da central fotovoltaica, foi possível, sem qualquer interrupção no processo de produção da Soladrilho.

A central fotovoltaica promove a eficiência energética com relevantes vantagens económicas, assegurando mais um passo no caminho da descarbonização, ao mesmo tempo que promove a melhoria da qualidade de vida dos colaboradores pela via da substituição da cobertura do edifício, permitindo melhorar a iluminação natural e a remoção de todo o amianto existente, com a Helexia.

#### Referências

[1]. Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG). *Balancos Energéticos Nacionais*. Lisboa: DGEG. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/balancos-energeticos-nacionais/>

[2]. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE); APICER; Vivapower Consulting. *Manual de Eficiência Energética – Sector Cerâmico*. Lisboa: ERSE; Junho 2016. Disponível em: [https://www.erse.pt/media/qlqbxpim/mee\\_setorceramico\\_apicer\\_ppec2013-2014.pdf](https://www.erse.pt/media/qlqbxpim/mee_setorceramico_apicer_ppec2013-2014.pdf)

[3]. Ruivo, Luís; Russo, Michael; Lourenço, Rúben; Pio, Daniel. “Energy management in the Portuguese ceramic industry: Analysis of real-world factories.” *Energy*, vol. 237, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121628



# ENERGIA DESCENTRALIZADA: AS COMUNIDADES DE ENERGIA COMO FATOR DE COMPETITIVIDADE

Maria João Benquerença

Vice-Presidente de Comunidade de Energia - CleanWatts

No contexto do plano de descarbonização do setor da cerâmica em Portugal, as Comunidades de Energia Renovável (CER) assumem um papel central e inovador. Estas comunidades unem empresas, infraestruturas e residentes de uma mesma zona geográfica para produzir, partilhar e consumir energia limpa de forma coletiva, aproximando a geração do consumo e promovendo benefícios ambientais, económicos e sociais. O conceito de produtor âncora – normalmente uma unidade industrial ou infraestrutura de grande consumo energético – é particularmente relevante para este setor, já que permite instalar centrais fotovoltaicas sobredimensionadas, capazes de suprir as necessidades energéticas do produtor e partilhar o excedente com outros membros da comunidade, sejam empresas vizinhas ou residentes locais.

A criação destas comunidades obedece a critérios geográficos rigorosos, facilitando não só a produção e consumo de energia renovável, mas também a diminuição da utilização da rede elétrica nacional. Para setores industriais como a cerâmica, onde a energia representa uma fatia significativa dos custos operacionais e das emissões de carbono, esta proximidade entre produção e consumo traduz-se numa redução das perdas energéticas, menor dependência da rede e ganhos diretos em competitividade e sustentabilidade. Além disso, a partilha de excedentes

energéticos a preços mais baixos do que os praticados no mercado reforça a atratividade do território e dos próprios ativos das empresas, promovendo a coesão territorial e a acessibilidade energética.

O setor da cerâmica já iniciou um percurso de descarbonização, apostando em:

- **Melhoria da eficiência energética** e otimização de processos.
- **Substituição progressiva de combustíveis fósseis** por fontes renováveis, como eletricidade de origem solar e eólica, hidrogénio verde e biometano.
- **Desenvolvimento de fornos híbridos e elétricos**, integrando energia renovável e tecnologias digitais de controlo.

Contudo, para que o setor possa realmente cumprir as metas de descarbonização, é fundamental participar na transformação do modelo atual da rede elétrica, evoluindo para redes mais complexas, multidirecionais e digitalizadas, capazes de integrar múltiplas fontes renováveis de forma distribuída e responder à crescente eletrificação dos processos industriais. As CER, ao promoverem o equi-



Instalação de painéis solares fotovoltaicos no telhado, captando energia do sol para gerar eletricidade limpa e sustentável.





Sistema fotovoltaico instalado na cobertura do edifício, composto por múltiplos módulos solares interligados em série e paralelo, otimizados para a captação de radiação solar.

líbrio entre a eletricidade gerada e consumida numa área delimitada, contribuem para uma gestão mais eficiente, estável e segura da rede elétrica, com menores perdas e maior capacidade de resposta a disrupções. A possibilidade de introdução de camadas de comando e controlo local, através de sistemas inteligentes, potencia ainda mais a otimização dos recursos integrados.

A digitalização das redes elétricas, através da implementação de tecnologias avançadas, permite uma comunicação bidirecional entre todos os agentes do sistema – desde operadores de rede, produtores e consumidores, até agregadores e operadores de carregamento de veículos elétricos. Esta rede digital conecta a geração descentralizada, os sistemas de armazenamento, micro-redes e centrais virtuais, tirando partido do potencial de casas e edifícios inteligentes e da Internet das Coisas (IoT), tornando as redes mais confiáveis, resilientes e capazes de responder automaticamente a interrupções ou necessidades de reconfiguração. A introdução de elementos com comportamento não linear e menor inércia, como as renováveis e o armazenamento, exige novos modelos dinâmicos para avaliar a estabilidade e resiliência da rede. Neste contexto, a digitalização e a monitorização permanente, aliadas a sistemas de automação, são essenciais para antecipar

e mitigar riscos, bem como para garantir a continuidade e segurança do abastecimento energético.

Para as organizações do setor da cerâmica que pretendem liderar a sustentabilidade energética, estas soluções integradas trazem impactos ambientais, económicos e sociais significativos.

A integração das CER no setor da cerâmica proporciona:

- **Redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>** e outros poluentes, alinhando-se com as metas nacionais e europeias de neutralidade carbónica até 2050.
- **Diminuição dos custos operacionais** e aumento da competitividade das empresas, tornando o setor mais resiliente a choques externos e à pressão regulatória.
- **Desenvolvimento de competências e inovação**, promovendo a digitalização, automação e qualificação dos trabalhadores para a indústria do futuro.
- **Envolvimento das comunidades locais** e criação de novos modelos de negócio, com partilha de benefícios e reforço da coesão territorial.



Por um lado, permitem reduzir a pegada ambiental e descarbonizar os processos produtivos, promovendo o consumo de energia limpa e local. Por outro, contribuem para a redução dos custos energéticos, aumentam a competitividade e protegem as empresas face à volatilidade dos preços da energia. Além disso, ao envolver colaboradores e comunidades locais, as CER reforçam a coesão territorial, aumentam a acessibilidade à energia e criam oportunidades de partilha de excedentes a preços mais acessíveis.

A gestão eficaz destas comunidades exige plataformas digitais sofisticadas, capazes de otimizar a produção e o consumo, considerando variáveis como a disponibilidade de energia, flexibilidade das cargas, armazenamento e necessidades do operador de sistema. Algoritmos de inteligência artificial e autoaprendizagem são cada vez mais

relevantes para garantir a robustez do sistema e a adaptação aos perfis de consumo industrial e residencial.

Descarbonizar o setor da cerâmica implica, assim, apostar na produção de eletricidade limpa e na eletrificação dos processos, substituindo gradualmente o uso de combustíveis fósseis por recursos renováveis. Graças aos avanços tecnológicos, como painéis fotovoltaicos mais eficientes, sistemas de armazenamento e veículos elétricos, esta transição energética é cada vez mais local e centrada no utilizador, promovendo uma abordagem democrática e participativa. As CER, com o seu carácter local e inclusivo, são agentes decisivos neste novo paradigma, contribuindo para o equilíbrio da rede elétrica e acelerando a transição energética.



Instalação fotovoltaica em cobertura industrial, composta por um conjunto de módulos solares organizados em arranjos matriciais, projetados para maximizar a captação de irradiância solar e a geração descentralizada de energia elétrica, integrada à infraestrutura elétrica adjacente para injeção ou autoconsumo energético.

# DESCARBONIZAR ATÉ 2050: DESAFIOS ATUAIS E FUTUROS DO MERCADO ELÉTRICO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

António Vidigal

Consultor e especialista em energia e TIC

## Contexto

Em 2016 Portugal assumiu o objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050 e esse objetivo deu origem ao Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), que foi publicado pela Resolução de Conselho de Ministros nº 107/2019. Posteriormente Portugal assumiu o compromisso, exigente, de antecipar a neutralidade climática para 2045.

O RNC2050 reconheceu que é até ao ano de 2030 que se devem concentrar os maiores esforços de redução de emissões de GEE. A forma como o País se propõe assegurá-lo está traduzida no Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030).

## O PNEC2030

É o setor da energia que até 2030 deverá dar o maior contri-

buto para a transição energética. Para o conseguir torna-se necessário atuar em diversas frentes: eficiência energética e energias renováveis, hídrica, solar, eólica e também gases renováveis como o hidrogénio verde e o biometano.

Para viabilizar estes objetivos, Portugal alocou cerca de 30% do PRR à transição climática, dando relevo às medidas com efeito multiplicador na economia. A inovação tem aqui um papel a desempenhar.

O maior desafio para a viabilização destes objetivos passa necessariamente pela eletrificação dos consumos, que deverão subir dos atuais 50 TWh, para 90 TWh. Um objetivo difícil, porque o consumo tem-se mantido há vários anos. Mas é importante referir que este valor se refere à produção e não considera o efeito da produção fotovoltaica distribuída, que já é relevante.

**Tabela 4.3. Metas nacionais de Portugal para 2030 de acordo com o PNEC 2030 [1].**

METAS NACIONAIS	EMISSIONES (sem LULUCF; em relação a 2005)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (redução em energia primária e meta de consumo)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (meta de consumo de energia final)	RENOVÁVEIS (no consumo final bruto de energia)	RENOVÁVEIS NOS TRANSPORTES	INTERLIGAÇÕES ELÉTRICAS
PNEC 2030	-45% a -55%	35%	-	47%	20%	15%
Revisão	-55%	16 711 ktep	14 371 ktep	51%	29%	15%

LULUCF – Land Use, Land-Use Change and Forestry

**Tabela 4.4. Quotas nacionais de energia renovável de acordo como o PNEC 2030 [1].**

	PNEC 2020			Revisão PNEC 2020	
	2025	2025	2025	2025	2030
Eletricidade	60%	69%	80%	86%	93% *
Aquecimento e Arrefecimento	34%	36%	38%	46%	63%
Transportes	10%	13%	20%	19%	29%

Este valor não considera o consumo de eletricidade para produção de hidrogénio, tal como definido na metodologia europeia para tal (no âmbito dos SHARES, do Eurostat)



A redução de emissões de GEE é muito ambiciosa no que refere as indústrias de manufatura e construção, conforme se pode verificar na tabela seguinte.

**Tabela 4.5. Emissões diretas de GEE no setor de Indústrias de Manufatura e Construção [1].**

Ano	2005	2030	2040
ktCO <sub>2</sub> eq	10 579	4 952	991

Para esta redução, segundo estima o PNEC 2030 deverão contribuir muito as energias renováveis que se deverão tornar progressivamente dominantes. Na Figura 4.24 apresentam-se dois cenários, o WEM com as medidas existentes, e o WAM com medidas adicionais. Nos dois cenários o consumo de gás natural e de produtos petrolíferos reduzem-se muito como resultado de medidas de eletrificação.

No cenário WAM do PNEC2030 a capacidade instalada para a produção de eletricidade por tecnologia em Portugal vai evoluir de acordo com a tabela 4.6.

Trata-se de objetivos extremamente exigentes e no limite

do realizável, o que é fácil de aceitar se olharmos para o ponto de partida.

Enquanto a produção hídrica pouco evolui, já os objetivos traçados para a produção eólica e solar centralizada, parecem dificilmente realizáveis. Os maiores obstáculos são o tempo necessário ao licenciamento dos projetos e a falta de capacidade das redes de transporte e distribuição de que o país dispõe.

Já os valores definidos para a energia solar distribuída parecem mais facilmente atingíveis, em virtude do seu menor impacto ambiental e a menor exigência de pontos de interligação com a rede. Constituem por isso uma boa oportunidade para indústria cerâmica, nomeadamente se vierem a ser objeto de apoios PRR.

É importante referir que os objetivos apontados para o armazenamento, quer hídrico por bombagem, quer com recurso a baterias parecem modestos. Está a decorrer um concurso PRR para apoio à instalação de baterias colocalizadas com produção solar e eólica centralizada, que tem o objetivo de assegurar a instalação de 500 MW até ao final de 2025; foram disponibilizados para esta iniciativa 100 M€. Existe a possibilidade de, a médio prazo, aparecerem novos concursos que podem vir a constituir uma oportunidade para a indústria cerâmica.

**Estimativa de evolução do consumo de energia primária**

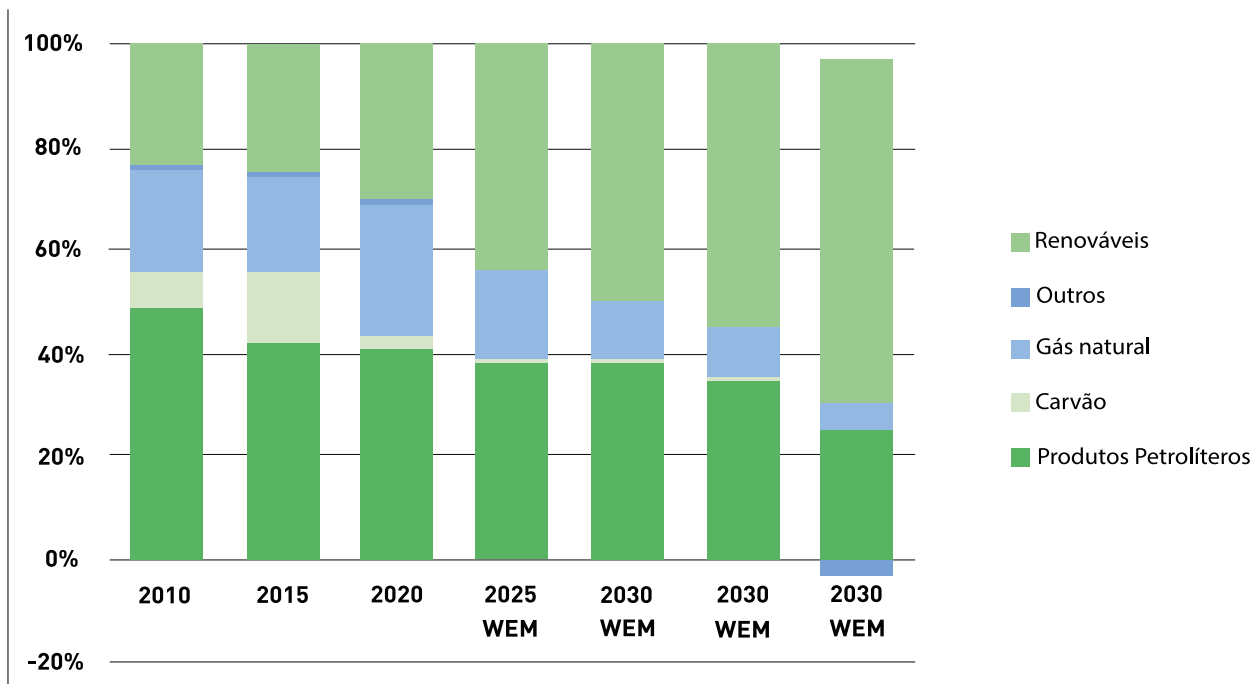


Figura 4.24. Estimativa de evolução do consumo de energia primária [1].



Tabela 4.6. Cenário WAM [1].

(GW)	2025	2030
<b>Hídrica</b>	<b>8,1</b>	<b>8,1</b>
da qual em bombagem	3,6	3,9
<b>Eólica*</b>	<b>6,3</b>	<b>12,4</b>
Eólica onshore	6,3	10,4
Eólica offshore	0,03	2,0
<b>Solar Fotovoltaico*</b>	<b>8,4</b>	<b>20,8</b>
do qual centralizado	6,1	15,1
do qual descentralizado	2,8	5,7
<b>Solar Térmico Concentrado **</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Biomassa/Biogás e resíduos</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
<b>Geotermia</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Ondas</b>	<b>0</b>	<b>0,2</b>
<b>Gás Natural</b>	<b>4,8</b>	<b>3,5</b>
<b>Produtos Petrolíferos</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>
<b>Armazenamento (Baterias)</b>	<b>0,5</b>	<b>2,0</b>
<b>TOTAL</b>	<b>31</b>	<b>48</b>

\* Inclui capacidade instalada para a produção de hidrogénio;

\*\* Esta tecnologia é identificada em 2040, onde se prevê uma capacidade instalada de 600 MW

Tabela 4.7. Evolução da potência renovável em Portugal entre 2015 e 2024

	Potência Instalada (MW)									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Total Renovável</b>	12 273	13 416	13 762	13 994	14 423	14 606	15 370	17 450	18 818	20 061
<b>Hídrica</b>	6 031	6 812	7 086	7 098	7 129	7 129	7 126	8 141	8 140	8 299
da qual em bombagem	1 687	2 467	2 737	2 737	2 737	2 737	2 737	3 659	3 659	3 659
> 30 MW	5 367	6 147	6 417	6 417	6 447	6 447	6 447	7 462	7 462	7 622
> 10 e ≤ 30 MW	255	254	258	270	270	270	270	266	266	266
≤ 10 MW	409	410	410	410	412	412	409	414	412	411
<b>Eólica</b>	5 034	5 313	5 313	5 379	5 459	5 502	5 643	5 730	5 891	5 933
<b>Biomassa</b>	552	564	564	629	693	682	679	679	678	678
c/ cogeração	428	434	434	484	467	465	452	452	451	451
s/ cogeração	123	130	130	144	226	217	227	227	227	227
<b>Resíduos Sólidos Urbanos</b>	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>Biogás</b>	85	89	91	92	93	93	97	94	94	93
<b>Geotérmica</b>	29	29	34	34	34	34	34	34	34	34
<b>Fotovoltaica</b>	454	520	585	673	925	1 076	1 701	2 682	3 892	4 934
Convencional	274	295	293	332	489	595	1 119	1 493	1 960	2 676
UPAC	-	43	86	124	205	246	342	953	1 593	1 874
UPP	-	-	18	30	44	48	55	56	159	204
Micro/Mini	170	174	174	172	171	171	170	165	164	164
Concentração	9	9	14	15	15	15	15	15	15	15

Fonte: DGEG



### O caso da indústria cerâmica portuguesa

A energia é um custo relevante para a indústria cerâmica, com duas componentes principais: gás natural e eletricidade.

Alinhada com os objetivos nacionais traçados no PNEC 2030, esta indústria está num processo profundo de descarbonização, o qual deverá recorrer a inovação que assegure uma utilização mais eficiente da energia com recurso a maior eletrificação.

O custo da eletricidade tem, por isso, um impacto relevante e crescente na competitividade da indústria, o que torna importante estudar a evolução que se prevê para o preço da eletricidade em Portugal, em valor e em volatilidade, identificando quais os riscos que haverá que considerar e quais as medidas de mitigação a implementar.

A introdução no país de valores muito elevados produção renovável eólica e solar, à qual se soma um forte investimento histórico em produção hídrica, tem feito descer os preços da eletricidade, mas tem feito, também, aumentar a sua volatilidade.

O preço da eletricidade no mercado grossista Ibérico (MIBEL / OMIE), posiciona-se vantajosamente dentro da União Europeia. O preço médio em 2024 foi, até ao final de novembro, de 59 €/MWh, o que compara com 88 €/MWh em 2023. Analistas de referência apontam para que, no médio prazo, os preços se mantenham baixos, mas com uma grande volatilidade.

Esta volatilidade tem, ao nível horário, origem na existência de um valor crescente de produção fotovoltaica, que faz descer muito os preços nas horas solares, por vezes para valores nulos e até negativos.

Nesta análise tem especial relevância o “spread” diário dos preços, que é a diferença entre o preço mais alto do dia e o preço mais baixo. Este valor encontra-se nos 50 €/MWh valor que tem tendência a aumentar. Percebe-se, assim, o interesse de procurar tirar vantagem do “spread”, modulando consumos e/ou armazenando energia.

Ao nível anual a volatilidade está também ligada à hidraulicidade que em Portugal é muito variável de ano para ano. Num ano seco a produção hídrica pode ser de apenas 5 TWh enquanto num ano húmido poderá exceder os 15 TWh.

### Os PPAs, os CFDs e os Futuros

Conforme identificado no Relatório Draghi [2], o atual mercado elétrico marginalista da União Europeia, não tem conseguido desacoplar os preços da energia renovável do preço do gás natural que é por natureza mais alto e mais volátil, o que tem impedido os consumidores, domésticos e empresariais, de beneficiar da aposta que a UE tem feito na energia renovável. Em 2022 ao nível de toda a UE as centrais a gás natural apenas produziram 20% da energia elétrica e, apesar disso, marcaram o preço em 63% das horas do ano. Em Portugal, nesse ano, produziram menos de 40% da energia e marcaram o preço 90% do tempo.

Price-setting technology per Member State and their generation mix (% 2022)



Figura 4.25. Tecnologia de fixação de preços por Estado-Membro e mix energético.



O mercado elétrico está em profunda transformação e o caminho indicado pela União Europeia passa pela estabilização dos preços, através do recurso de contratos de médio e longo prazo.

Os “Power Purchase Agreements” (PPAs, ou CAEs em português) os “Contracts for Difference” (CfDs) e os Contratos Futuros de Energia (Futuros), são instrumentos que podem ajudar a desacoplar o preço das renováveis do preço do gás. São soluções que começam a ser adotadas na União Europeia e a indústria cerâmica tem toda a vantagem em se familiarizar, cedo, com este tipo de instrumento e começar a utilizá-los.

Com efeito a volatilidade dos preços no mercado grossista de eletricidade, veio para ficar, e está a tornar clara a vantagem do recurso a este tipo de instrumentos, como a melhor forma de proteger produtores e consumidores.

No caso dos PPAs, os dominantes são os financeiros, nos quais não há troca direta de energia entre o produtor e o consumidor. O consumidor compra a energia localmente, o produtor vende a energia no mercado em que opera e posteriormente há um acerto de contas de acordo com o contrato no PPA.

Os contratos financeiros são muito flexíveis, permitindo ultrapassar distâncias geográficas abrindo por isso muito o mercado. Uma empresa cerâmica portuguesa pode assinar um PPA com uma empresa de outro país, se o preço for vantajoso.

Os PPAs têm risco de contraparte, isto é, se uma empresa da indústria cerâmica estabelecer um contrato de compra de energia com um fornecedor, este pode não conseguir honrar o contrato. Os PPAs devem por isso ser contratados

a empresas financeiramente sólidas. Para obviar a este problema, poderão vir a ser autorizadas garantias de Estado.

Uma alternativa aos PPAs, e aos CfD, que reduz o risco de contraparte, é a compra de Futuros num mercado organizado. No âmbito do MIBEL, opera em Portugal o OMIP, que oferece diversos produtos normalizados.

### **A indústria cerâmica como autoprodutor e parte ativa da gestão de sistema**

O preço da produção solar fotovoltaica e do armazenamento da energia em baterias tem tido um forte decréscimo de preço, o que a tem tornado muito competitiva. Estudar a adoção deste tipo de solução está a tornar-se indiscutível.

Em paralelo, a indústria cerâmica tem vantagem em considerar posicionar-se como um fornecedor de serviços de flexibilidade ao Sistema Elétrico Nacional. Com o aumento da percentagem de energia renovável volátil (solar e eólica), os serviços de sistema serão progressivamente mais necessários. São serviços remunerados aos quais a indústria cerâmica pode concorrer.

Para isso ser possível, torna-se necessário um estudo detalhado do processo fabril, por forma a identificar quais os consumos que podem ser temporariamente suspensos sem pôr em causa a economia do processo.

Em muitos casos, a inclusão de uma bateria “behind-the-meter” na instalação fabril, pode ter justificação. É por isso importante estar atento a concursos que venham a ser lançados pelo Governo Português para apoio a este tipo de solução.

### **Referências**

[1]. Agência Portuguesa do Ambiente (APAmbiente). *Revisão do Plano Nacional Energia e Clima (PNEC 2030)*. 2024. Disponível em: [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/20241118\\_pnec2030\\_para\\_aprov\\_ar.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/20241118_pnec2030_para_aprov_ar.pdf)

[2]. Comissão Europeia. *Relatório de Mario Draghi sobre competitividade da União Europeia* [online]. 2024. [consultado em 7 Dez. 2025]. Disponível em: [https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead\\_en?preFLang=pt&etrans=pt#paragraph\\_47059](https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en?preFLang=pt&etrans=pt#paragraph_47059)



# O POTENCIAL PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NO FUTURO DESCARBONIZADO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Bruno Soares Gonçalves

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

A produção de cerâmica é um processo intensivo em energia, com a moldagem de matérias-primas e a cozedura a altas temperaturas (> 1000 °C) para formar produtos com propriedades únicas de durabilidade, mecânicas, térmicas, elétricas e bioquímicas. O setor da cerâmica atualmente utiliza gás natural nos processos de cozedura. O total das emissões da indústria cerâmica europeia ascende a 19 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, o que representa cerca de 1% do total das emissões industriais da Europa abrangidas pelo regime de comércio de licenças de emissão da UE (ETS) [1]. As emissões ligadas à produção de cerâmica podem ser divididas em três categorias principais: i) combustão de combustível para o processo de secagem e aquecimento; ii) emissões de processo geradas pela transformação mineralógica da argila; e iii) emissões indiretas, principalmente da produção de eletricidade.

A redução de emissões no setor combina uma série de medidas com o objetivo de reduzir gradualmente as emissões até atingir a neutralidade carbónica em 2050. Estas medidas incluem uma mudança para as energias renováveis (hidrogénio verde, biocombustíveis e eletricidade descarbonizada). É expectável que a eletrificação possa chegar a 1/3 do processo de manufactura e que o hidrogénio tenha cada vez mais um papel preponderante. As soluções de descarbonização passarão pela eletrificação total do processo de cozedura (com eletricidade descarbonizada) ou na substituição de gás natural por gases de origem renovável (onde o H<sub>2</sub> verde irá ter um grande destaque). As soluções para a cerâmica podem também passar por mix energéticos (gás natural + H<sub>2</sub>; eletrificação + gás natural; eletrificação + gás natural + H<sub>2</sub>).

A utilização de H<sub>2</sub> na indústria cerâmica apresenta-se como uma solução promissora para a descarbonização que poderá passar por uma mistura com gás natural, desde que seja a preço competitivo com garantia de abastecimento e utilização segura. No entanto, o abastecimento de hidrogénio descarbonizado em grande escala e a preços acessíveis apresenta desafios. As vias de produção de hidrogénio potencialmente adequadas incluem: azul (gaseificação do carvão ou reformação do gás natural com CCUS), turquesa (pirólise do metano), rosa (eletrólise da água utilizando a energia nuclear) e o hidrogénio verde (eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis). Quando fornecido através da eletrólise, a acessibili-

dade exige um preço muito baixo da eletricidade, um fator de carga muito elevado para os eletrolisadores e quedas acentuadas no custo dos eletrolisadores.

Embora pouco explorada, o amoníaco produzido a partir de hidrogénio descarbonizado é também uma alternativa com enorme potencial [2, 3]. Do ponto de vista da infraestrutura, o amoníaco é o substituto futuro mais realista e isento de carbono dos combustíveis fósseis. O amoníaco é isento de carbono e pode ser produzido a partir do ar, da água e de eletricidade renovável por eletrólise. É facilmente liquefeito e a sua densidade energética relativamente elevada (3,53 MW.hm<sup>3</sup>) torna-o um vetor energético atrativo para cenários energéticos sustentáveis, em comparação com a utilização do hidrogénio. A produção de amoníaco através da eletrólise a baixa temperatura para o fabrico de hidrogénio e da separação criogénica do ar para o fornecimento de azoto foi praticada em todo o mundo antes do advento de instalações modernas, baseadas no gás natural, que utilizam a reforma a vapor para a produção de gás de síntese de amoníaco. O processo envolve a utilização de hidrogénio proveniente da eletrólise da água e de azoto separado do ar para produzir amoníaco, denominado verde se alimentado por energia renovável. Embora este método não emita CO<sub>2</sub> durante a produção, atualmente, tanto a energia proveniente de fontes renováveis como o processo de eletrólise são dispendiosos, o que torna difícil a sua utilização para a produção de energia. Há a expectativa que o preço da eletricidade renovável continue a baixar, tornando o amoníaco verde num combustível viável para o futuro. O recurso à energia nuclear para a sua produção pode oferecer uma via para a sua viabilização.

A eletrificação dos fornos é atualmente considerada economicamente inviável na maioria dos subsectores cerâmicos. Isto deve-se ao custo muito mais elevado da eletricidade em comparação com o gás natural e também à falta de incentivos para passar à queima elétrica. O acesso à eletricidade descarbonizada é fundamental para a transição ecológica da indústria, e depende do fornecimento, que também depende das infraestruturas necessárias. A fiabilidade do fornecimento é também crucial. A cerâmica, enquanto indústria de energia intensiva, necessita de um fornecimento constante de combustível de qualidade (quer seja hidrogénio ou gás natural) para garantir processos de produção ininterruptos. Qualquer interrupção não



planeada pode provocar danos graves nos fornos que funcionam 24 horas por dia, 7 dias por semana.

Em qualquer uma destas vias para a descarbonização, eletrificação ou produção de gases de substituição, a energia nuclear oferece uma proposta interessante.

### O papel das tecnologias nucleares

O nuclear é uma fonte de energia com baixo teor de carbono e fornece eletricidade e calor ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana. Pode produzir calor para aplicações industriais, bem como hidrogénio, criando alternativas sem recurso a combustíveis fósseis. Grande parte dos setores difíceis de descarbonizar necessita de um fornecimento contínuo de energia, tornando a fiabilidade essencial. A energia nuclear oferece uma fiabilidade inigualável e as tecnologias nucleares avançadas oferecem vias para a descarbonização total dos processos industriais intensivos em energia e emissões. Entre estas, e para além da produção de eletricidade de forma fiável, destacam-se:

- **Produção de hidrogénio limpo:** O hidrogénio pode ser gerado com pouca ou nenhuma emissão com tecnologias como a energia nuclear (denominado hidrogénio rosa). Existem vários métodos para usar a energia nuclear, como fonte de eletricidade e calor, para produzir hidrogénio de forma eficiente e com pouca ou nenhuma emissão de CO<sub>2</sub>.
- **Produção de calor para a indústria:** A energia nuclear é uma alternativa livre de carbono que pode alimentar instalações industriais e fornecer calor de alta temperatura limpo, confiável e constante. Há formas de obter calor através da eletricidade, utilizando um eletrolisador ou outro tipo de intermediário, mas a energia nuclear é também capaz de fornecer esse calor diretamente do reator avançado. Os reatores nucleares convertem um terço do calor produzido em eletricidade. Normalmente, o calor restante é libertado para o meio ambiente, mas pode ser aproveitado para atender à procura de calor para a indústria.

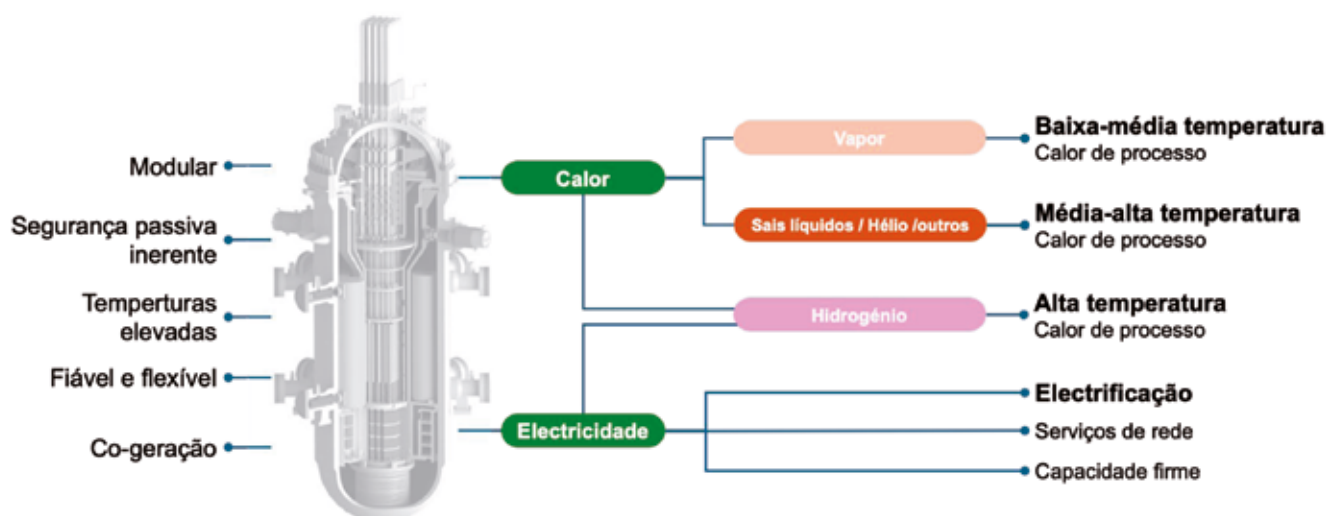


Figura 4.26. Os reatores nucleares avançados e SMR apoiam múltiplos caminhos para a descarbonização providenciando calor e eletricidade para processos industriais.

### Os pequenos reatores modulares (SMRs)

Existe um grande interesse em unidades pequenas e mais simples para a produção de eletricidade a partir da energia nuclear e de calor de processo. Nos próximos 10 anos, os pequenos reatores modulares (SMRs) avançados podem mudar a maneira como pensamos em energia nuclear confiável, limpa e acessível. Os SMR são reatores nucleares avançados com uma potência que pode variar desde menos de 10 megawatts elétricos (MWe) até 300 MWe, e podem utilizar uma gama de refrigerantes possíveis, incluindo água leve, metal líquido ou sal fundido, dependendo da tecnologia. SMR é o termo genérico para designar estes tipos de reatores, mas os que se baseiam em tecnologia que não a da água leve são também frequentemente designados por reatores modulares avançados (AMR). Todos eles utilizam reações de cisão nuclear para gerar calor que pode ser utilizado diretamente para aplicações industriais (Figura 4.27) ou para gerar eletricidade.

Os SMR são concebidos com tecnologia modular utilizando o fabrico em fábrica de módulos possibilitam que os sistemas e componentes sejam montados na fábrica e transportados como uma unidade para um local de instalação. A modularidade visa uma maior simplicidade de conceção, economia de produção em série em grande parte em fábricas, tempos de construção curtos e custos de implantação reduzidos. Dada a sua menor dimensão, os SMR podem ser instalados em locais não adequados para centrais nucleares de maiores dimensões. Os SMRs oferecem poupanças em termos de custos e de tempo de construção, e podem ser instalados gradualmente para responder ao aumento da procura de energia. Em comparação com os reatores existentes, as conceções propostas para os SMR são geralmente mais simples e o conceito de segurança para os SMR baseia-se frequentemente em sistemas passivos e nas características de segurança inerentes ao reator, como a baixa potência e a pressão de funcionamento.

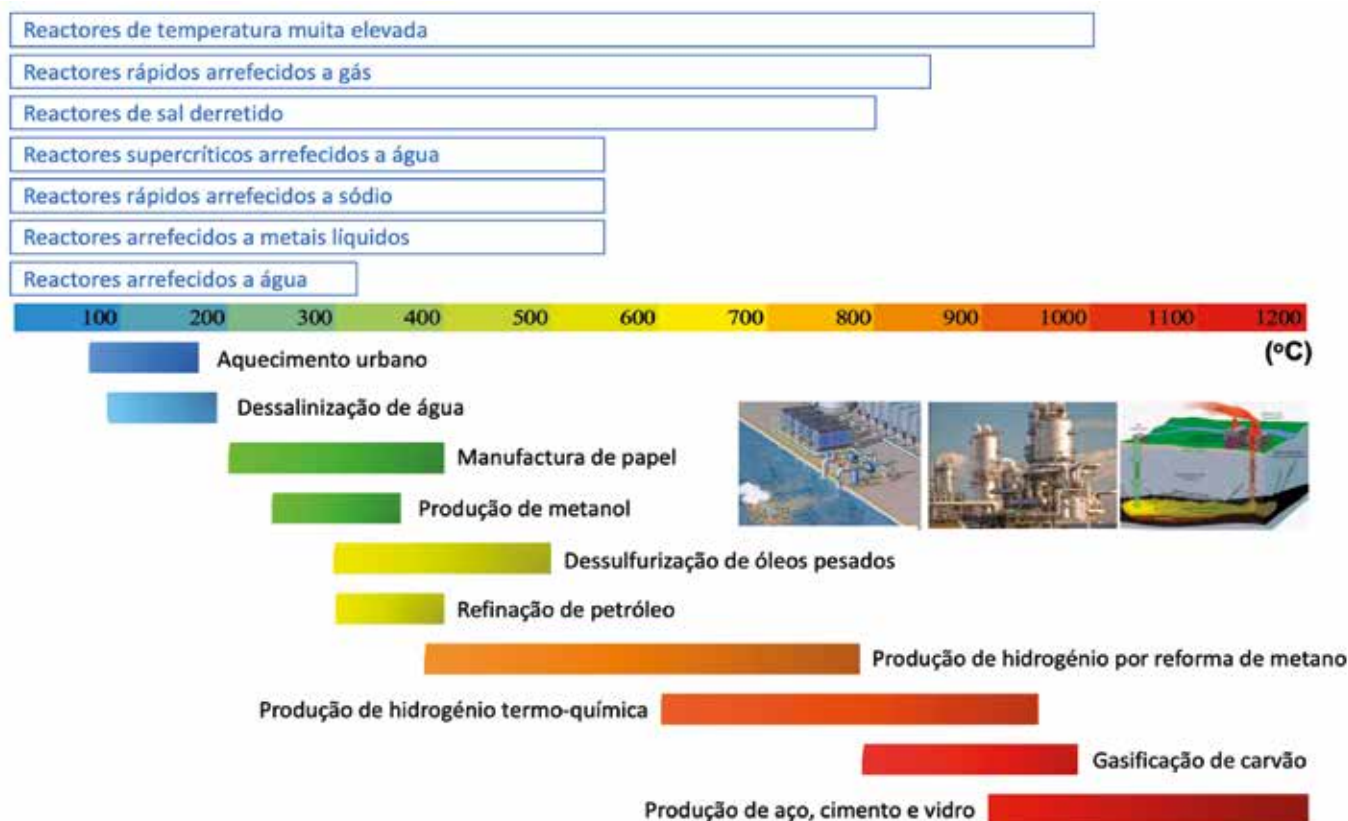


Figura 4.27. Aplicações adicionais para reatores nucleares de acordo com a gama de temperatura (créditos: Adaptado de “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”, IAEA (2020), [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf))

## O nuclear na substituição do gás natural na indústria da cerâmica

O hidrogénio produzido por eletrólise é atualmente de custo proibitivo, para a indústria e a produção de hidrogénio a partir de fontes intermitentes também apresenta desafios consideráveis [4]. Várias empresas estão a experimentar novas tecnologias de eletrolisadores para lidar com a intermitência da energia renovável, mas novas tecnologias levarão tempo a desenvolver. O fornecimento não intermitente de eletricidade descarbonizada como é o caso do providenciado por energia nuclear é uma opção que pode e deve ser considerada.

### Hidrogénio de origem nuclear

A produção de hidrogénio com base na energia nuclear representa uma via fiável, segura e económica para a produção sustentável de hidrogénio em grande escala e as centrais elétricas da Geração IV poderão permitir co-geração de hidrogénio e eletricidade. Atualmente, vários projetos em todo o mundo estão a considerar a eletrólise convencional para permitir o funcionamento eficiente do atual parque de centrais nucleares, contribuindo para a rentabilidade da exploração de centrais nucleares. Alguns reatores de Geração IV funcionam a alta temperatura, o que permite o funcionamento da central com elevada eficiência térmica. Estes reatores são viáveis para fornecer a fonte de energia necessária para impulsionar um processo termoquímico de produção de hidrogénio.

Existem várias vias possíveis para associar as tecnologias do hidrogénio à energia nuclear para a produção de hidrogénio em grande escala [5]. A eletrólise alcalina da água a uma temperatura elevada de 200°C, a eletrólise a vapor a alta temperatura (HTSE), a separação termoquímica da água através dos ciclos enxofre-iodo (S-I), HyS ou Cu-Cl, a reforma do gás natural assistida por energia nuclear e a gaseificação do carvão, são algumas das tecnologias que podem ser consideradas para a produção de hidrogénio em grande escala com energia nuclear a curto e médio prazo. A eletrólise a vapor de água pode ser associada à maioria das concepções de reatores nucleares de alta e muito alta temperatura. O ciclo Cu-Cl é compatível com cerca de 70% das concepções de reatores da Geração IV atualmente existentes. Os processos de reforma do gás natural e de gaseificação do carvão são também compatíveis com alguns projetos. A HTSE é vista como uma boa opção para ser associada a reatores nucleares de alta temperatura, o que lhe confere o potencial para uma implantação e demonstração bem-sucedidas com alguns dos reatores da Geração IV [6].

O custo do hidrogénio é crucial para que este seja considerada uma alternativa viável. A produção de hidrogénio a partir da eletrólise a baixa temperatura e da HTSE poderá não ser competitiva com a reforma do metano a vapor, a menos que sejam amplamente aplicadas taxas sobre a descarga de dióxido de carbono na atmosfera. A produ-

ção de hidrogénio por eletrólise pode ser competitiva se for enquadrada no funcionamento em carga de base das centrais nucleares. É expectável que com a combinação de células de eletrólise de óxido sólido (SOEC) e pequenos reatores modulares (SMR), o hidrogénio possa ser produzido por menos de 3,50 €/Kg, significativamente mais barato do que os métodos alternativos [7]. A eletrólise SOEC pode produzir mais hidrogénio por potência total de entrada quando comparada com as tecnologias convencionais de eletrólise. Espera-se que o custo possa ser reduzido para menos de 2 €/Kg até 2050 tendo em conta o valor da flexibilidade para reduzir a produção de hidrogénio e fornecer eletricidade a uma rede cada vez mais intermitente.

### O nuclear para a produção de amoníaco

Com a utilização do excesso de calor e eletricidade das centrais nucleares, o hidrogénio e o amoníaco podem ser produzidos de uma forma fiável, com baixo custo expectável e promissora em termos de impacto ambiental [8] quando comparada com a atual produção de hidrogénio e amoníaco a partir do gás natural. O processo Haber-Bosch pode ser utilizado para a síntese de amoníaco, podendo o hidrogénio de origem nuclear ser providenciado por qualquer um dos métodos de produção de hidrogénio de origem nuclear. Na produção de amoníaco a alta temperatura com base em energia nuclear, o sistema é constituído por uma central nuclear, um eletrolisador de alta temperatura, uma unidade de separação criogénica do ar e uma unidade de síntese Haber-Bosch. A eletricidade necessária é utilizada a partir da central nuclear e o calor necessário para a eletrólise a alta temperatura é fornecido a partir do calor residual nuclear. Na eletrólise a alta temperatura, o excesso de calor na central nuclear é utilizado para diminuir a quantidade de eletricidade necessária para a eletrólise. Além disso, na opção baseada na eletrólise nuclear, a eletricidade é produzida na central nuclear e utilizada diretamente na eletrólise associada ao circuito de síntese de amoníaco Haber-Bosch. Para a produção de amoníaco, também é necessário azoto. A separação criogénica do ar é um método normalmente utilizado para a produção de grandes quantidades de azoto que requer a eletricidade para o processo [22]. Existem também estudos para avaliar a integração da tecnologia de reatores de alta temperatura arrefecidos a gás (HTGR) com processos químicos convencionais [9].

### O nuclear como fonte de oxigénio para fornos de oxi-combustível (oxy-fuel)

Os fornos oxi-combustível, já comumente utilizados em aplicações especializadas e específicas como fusão de vidros especiais ou de alta temperatura (borossilicato, por exemplo) [10], são outra tecnologia relevante para mitigar as emissões. Tem sido sugerido que a conversão da queima ar-gás para a queima oxi-gás é o meio mais promissor para reduzir o consumo de energia [11]. O custo adicional do oxigénio deve ser mais do que compensado pela redução do custo do combustível, para que seja uma opção

economicamente eficiente. O desenvolvimento de técnicas de separação de oxigénio de baixo custo permite a utilização de oxidante com quase 100% de oxigénio, tornando a conversão para oxi/combustível económica [12]. A principal preocupação para a implantação desta tecnologia é a energia e os custos necessários para produzir oxigénio. O processo de eletrólise oferece um meio alternativo de fornecimento de oxigénio, sendo as aplicações que requerem hidrogénio para além do oxigénio especialmente atrativas, uma vez que o subproduto oxigénio está virtualmente disponível sem qualquer custo adicional. A utilização de processos mais eficientes e de baixo custo na produção de hidrogénio poderá certamente contribuir para uma maior adoção desta solução. Da mesma forma que o nuclear pode contribuir para a produção barata de hidrogénio, poderá contribuir para a produção de oxigénio.

### Reatores nucleares para fornecimento de calor

A produção de cerâmica utiliza uma elevada proporção de gás, mas também de combustíveis sólidos, em fornos e fornalhas de alta temperatura. Este sector é dominado por processos com necessidades de calor >1000°C. Os pequenos reatores modulares não podem fornecer uma temperatura de processo superior a 1000°C tornando muito limitada a viabilidade do nuclear em geral (reator convencional, avançado ou pequeno reator modular) para a produção de materiais como a cerâmica. Por conseguinte, é provável que a energia nuclear desempenhe apenas um papel muito limitado neste setor [13]. Os estudos sugerem que o calor dos reatores de alta temperatura arrefecidos a gás (*High Temperature Gas-cooled Reactor - HTGR*) poderia ser utilizado para o pré-aquecimento de matérias-primas, a fim de complementar o fornecimento de calor, mas tal exigiria ainda uma reconfiguração do processo, que pode ser significativa em alguns casos, e a escala de fornecimento pode ser apenas parcial. É necessária uma análise mais pormenorizada para compreender as aplicações potenciais do calor dos HTGR nestes sectores.

### O nuclear para a eletrificação total do setor

A indústria cerâmica não é classificada como eletrointensiva ao abrigo das UE "Emissions Trading System" (ETS), pelo que não beneficia de qualquer compensação por transferência de eletricidade. No entanto, prevê-se que a eletrointensidade do setor da cerâmica aumente até 2050, uma vez que alguns processos podem passar da queima a gás para a queima elétrica. A energia nuclear é adequada para suprir esta procura, podendo alavancar indústrias eletrointensivas. Para tal não é necessário que cada indústria aposte na sua fonte de produção de eletricidade, bastando que exista uma rede descarbonizada e de baixo custo que supra as necessidades industriais.

A eletrificação generalizada da indústria cerâmica abre as portas a outras opções interessantes que têm sido descartadas por, para além da complexidade técnica, reque-

rerem volumes significativos de eletricidade. Na indústria cerâmica a utilização de forno de micro-ondas e secagem estão a ser considerados, embora ainda requeiram investimento adicional [14]. Esta é uma tecnologia potencial para o aquecimento de cerâmica, a fim de melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Esta opção é aplicável ao processo de secagem ou cozedura através da transferência de energia de micro-ondas para a cerâmica. Um inconveniente do aquecimento por micro-ondas é o facto de as cerâmicas aquecidas necessitarem de uma temperatura superior à temperatura ambiente quando expostas a um campo de micro-ondas. Por conseguinte, é considerada uma tecnologia complementar que deve ser combinada com o aquecimento convencional ou elétrico. A tecnologia parece ser especialmente adequada para cerâmicas de grão fino e permite uma redução significativa do consumo de energia. A técnica de micro-ondas (ou infravermelhos) pode também ser combinada com um forno elétrico, para fornecer calor de forma mais eficiente a secções específicas de alta temperatura do forno.

### Pode a fusão nuclear contribuir?

A fusão nuclear tem surgido como uma tecnologia nuclear promissora para o futuro sistema de energia sustentável, visando fornecer uma fonte infinita de energia limpa e confiável. Progressos significativos abrem a perspectiva de um futuro próspero embora a fusão esteja ainda a algumas décadas de se tornar uma tecnologia omnipresente. Os dispositivos atualmente em construção e/ou projeto têm como objetivo principal demonstrar o ganho líquido de energia. No ITER as experiências que demonstrarão energia líquida, não terão lugar antes de 2039. Existem atualmente múltiplos projetos com investimento privado, muitos deles assentes em novos conceitos, com prazos mais agressivos [15]. Estes dispositivos pretendem demonstrar rapidamente grandes progressos, ganho líquido de energia e elevada multiplicação de potência. É uma questão em aberto, se concretizarão os objetivos e performances ambiciosas a que se propõem, havendo algum ceticismo da comunidade científica ligada à fusão nuclear, motivada pelos muitos desafios comuns, científicos e tecnológicos, que terão ainda de enfrentar.

Na UE o reator de demonstração (DEMO), cujo desenho conceptual está a cargo do consórcio europeu EUROfusion iniciou-se em 2022, deverá entrar em funcionamento em meados deste século e demonstrará a produção de 300-500 MW de eletricidade proveniente de fusão nuclear e a sua ligação à rede. Existem outros projetos de reatores de demonstração em curso em vários outros países com previsão de entrada em funcionamento em escalas temporais similares. Assim que as primeiras centrais comerciais forem comprovadas haverá um enorme esforço industrial necessário para promover a implantação da energia de fusão. Pode levar décadas depois disso para que a fusão represente uma parte substancial da produção global de energia e é ainda impossível determi-

nar, o futuro custo da energia de fusão, dadas as enormes e variadas incertezas.

### Conclusão

A reindustrialização e a descarbonização das indústrias, incluindo a cerâmica, exigirão enormes quantidades de energia descarbonizada, pelo que serão necessárias todas as fontes de baixo carbono disponíveis para cumprir os objetivos da União Europeia. Este esforço exige inovação, avanços tecnológicos e visões agnósticas sobre as diferentes formas de produção de energia.

Não esquecendo que o objetivo último é a descarbonização, a energia, nas suas diversas formas (eletricidade, hidrogénio, combustíveis sintéticos, ...), é apenas um facilitador para a criação de valor com indústrias competi-

tivas. E nesta perspetiva o nuclear oferece uma solução potencialmente interessante para o setor da cerâmica. É uma fonte de energia com baixo teor de carbono e fornece eletricidade e calor ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana. Pode produzir calor para aplicações industriais, bem como hidrogénio e oxigénio, criando alternativas sem recurso a combustíveis fósseis.

A integração da energia nuclear na carteira de energias limpas é essencial para enfrentar os desafios mais difíceis em matéria de redução das emissões e alcançar um futuro sustentável e com baixas emissões de carbono. Promissor é certamente e as áreas onde poderá contribuir no caso da indústria da cerâmica estão bem identificadas. Será fácil? Ainda existe um longo caminho a percorrer para que possa se tornar uma realidade.



## Referências

- [1]. The European Ceramic Industry Association. *CERAMIC ROADMAP TO 2050*. [online]. Disponível em: <https://www.cerameunie.eu/media/zyqd-wwwp/ceramic-roadmap-to-2050.pdf>
- [2]. David, William I. F., et al. "J. Phys. Energy", vol. 6, 2024, 021501. DOI: 10.1088/2515-7655/ad0a3a
- [3]. Valera-Medina, A., et al. "Ammonia combustion in furnaces: A review." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, Part B, 2024, pp. 1597-1618. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.241
- [4]. Nguyen, E., et al. "Impacts of intermittency on low-temperature electrolysis technologies: A comprehensive review." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 70, 2024, pp. 474-492. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.217
- [5]. Konings, R. J. M., et al. *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors: A Guidebook*, 2.<sup>a</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. ISBN: 978-0-12-820588-4. DOI: 10.1016/C2019-0-01219-8
- [6]. Vostakola, M. F., Ozcan, H., El-Emam, R. S., Horri, B. A. "Recent Advances in High-Temperature Steam Electrolysis with Solid Oxide Electrolyzers for Green Hydrogen Production." *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023.
- [7]. World Nuclear News. "SMRs cost-effective in hydrogen production, study." [online]. Disponível em: <https://world-nuclear-news.org/Articles/SMRs-cost-effective-in-hydrogen-production,-study?s=08>
- [8]. Bicer, Yusuf; Dincer, Ibrahim. "Life cycle assessment of nuclear-based hydrogen and ammonia production options: A comparative evaluation." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 33, 2017, pp. 21559-21570. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.002
- [9]. Idaho National Laboratory (INL). *Nuclear-Integrated Ammonia Production Analysis*, Document ID: TEV-666, Revision ID: 2, Effective Date: 25 May 2010. Disponível em: [https://art.inl.gov/NGNP/NEAC%202010/INL\\_NGNP%20References/TEV-666%20Nuclear-Integrated%20Ammonia%20Prod.pdf](https://art.inl.gov/NGNP/NEAC%202010/INL_NGNP%20References/TEV-666%20Nuclear-Integrated%20Ammonia%20Prod.pdf)
- [10]. Ireson, R., et al. *Alternative Fuel Switching Technologies for the Glass Sector*, BEIS Industrial Fuel Switching Phase 2, Final Report, 2019.
- [11]. Levine, E., et al. *Advancing energy efficiency in the U.S. Glass industry: perspective from the DOE industrial technologies program*. [online], 2007. Disponível em: [https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/ACEEE\\_industry/2007/Panel\\_6/p6\\_9/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_industry/2007/Panel_6/p6_9/)
- [12]. Baukal Jr, C. E. (Ed.). *Oxygen-enhanced combustion*. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [13]. Peakman, A.; Merk, B. "The Role of Nuclear Power in Meeting Current and Future Industrial Process Heat Demands." *Energies*, vol. 12, 2019, 3664. DOI: 10.3390/en12193664
- [14]. Besier, Jorick; Marsidi, Marc. *Decarbonisation options for the Dutch ceramic industry*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency; TNO, 2020. PBL publication number: 4544, TNO project no. 060.33956 / TNO 2020 P12017
- [15]. União Europeia. *Supporting the EU competitiveness: looking ahead*. [online]. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83bc3ecd-b19c-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-281356207>



# BIOCOMBUSTÍVEIS

A transição energética da indústria cerâmica passa, necessariamente, pela substituição progressiva dos combustíveis fósseis por alternativas renováveis e de baixo carbono, como os biocombustíveis. A adoção de biocombustíveis não só reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria cerâmica, como também fortalece a resiliência energética do sector, promovendo um modelo produtivo mais sustentável e alinhado com os objetivos europeus de neutralidade carbónica.

## Biomassa sólida

Combustíveis neutros em carbono, onde se destaca a biomassa, que por ser de origem biológica e renovável, pode constituir uma fonte de energia descarbonizada, uma vez que o CO<sub>2</sub> libertado na sua queima é compensado pelo CO<sub>2</sub> absorvido pelas plantas durante o seu crescimento.

Na indústria cerâmica, os tipos de biomassa sólida mais viáveis incluem:

- *pellets* de madeira (biomassa densificada e padronizada);
- estilha de madeira (resíduos florestais ou agrícolas triturados);
- bagaço de azeitona, cascas de frutos secos, palha compactada, etc.;
- resíduos de serrarias (ex. pó de serrim) e de fábricas de mobiliário;
- farinhas de biomassa.



Figura 4.28. Estilha de madeira, um resíduo florestal que pode ser valorizado como combustível neutro em carbono, para a indústria cerâmica (Fonte: diaplant, 2025).

A biomassa utilizada deve apresentar baixo teor de humidade, alto poder calorífico e baixo teor de cinzas para evitar problemas de operação nos fornos.

Deve ainda cumprir com os critérios de sustentabilidade, previstos na diretiva RED, para ser considerada neutra em carbono no CELE.

## Vantagens

- Redução de emissões diretas de CO<sub>2</sub> (consideradas emissões biogénicas).
- Utilização de resíduos locais, promovendo a economia circular.
- Substituição direta de combustíveis fósseis, sem necessidade de eletrificação.

## Desafios e Considerações Técnicas

- Adaptação dos fornos: a combustão da biomassa é diferente da combustão do gás natural. Pode ser necessário adaptar queimadores, controlar melhor a temperatura, lidar com a formação de cinzas, etc.
- Abastecimento **estável e sustentável: é preciso garantir que a biomassa usada vem de fontes sustentáveis e esteja sempre disponível.**
- Normas ambientais e qualidade do ar: a queima de biomassa pode emitir partículas finas e compostos voláteis (efeito cruzado). É fundamental ter sistemas de controlo eficientes.
- Custo de investimento inicial: adaptação de fornos, silos de armazenamento, sistemas de alimentação automática.

A descarbonização deste setor com biomassa é particularmente interessante em Portugal dada a forte presença florestal ou agroindustrial, com abundância de matéria-prima residual.

# OS BIOCOMBUSTÍVEIS AVANÇADOS NA INDÚSTRIA CERÂMICA

## Associação de bioenergia avançada

Os biocombustíveis avançados derivam de fontes renováveis que não competem com a produção de alimentos e têm um impacto ambiental significativamente menor comparado aos biocombustíveis de primeira geração, já que são produzidos a partir de matérias-primas residuais, como óleos alimentares usados (OAU), gorduras animais, resíduos de palha, molhos fora de prazo, borras de café, algas, e resíduos florestais ou industriais. Além disso, esta fonte energética oferece uma maior flexibilidade e alcance, podendo ser incorporada nos combustíveis e infraestruturas já existentes.

Os biocombustíveis surgem como uma resposta eficaz e sustentável aos desafios ambientais e à crescente procura por soluções energéticas mais limpas. Estes combustíveis verdes têm-se consolidado como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, promovendo a descarbonização de diversos setores económicos, mas em especial foco no setor dos transportes e na indústria. A produção de biocombustíveis avançados envolve tecnologias mais sofisticadas que permitem uma maior eficiência energética e menor emissão de gases de efeito estufa. A substituição direta de combustíveis fósseis por biocombustíveis avançados representa uma redução de emissões de GEE de,

peelo menos, 83% em relação ao gasóleo.

## O desenvolvimento sustentável de Portugal até hoje

A produção e utilização de biocombustíveis avançados em Portugal tem registado um crescimento significativo, marcada por flutuações ao longo do tempo, mas com uma tendência geral de aumento de utilização de matérias-primas avançadas desde 2021.

Portugal está igualmente a investir na produção de biometano, gás renovável de composição idêntica ao gás natural. É produzido a partir de matérias-primas orgânicas, tais como resíduos de indústria alimentar, agrícolas, estrume, lamas de ETAR, gás de aterro e resíduos, configurando, assim, um recurso endógeno. O biometano constitui um exemplo relevante de bioenergia avançada. Obtido a partir da purificação do biogás, processo que elimina CO<sub>2</sub> e outras impurezas, pode ser usado como combustível na indústria.

Através das diversas medidas em curso, desde o Renewable Energy Directive (RED) III, o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 e, recentemente, o Plano de Ação para o Biometano, verifica-se que Portugal se encontra no início

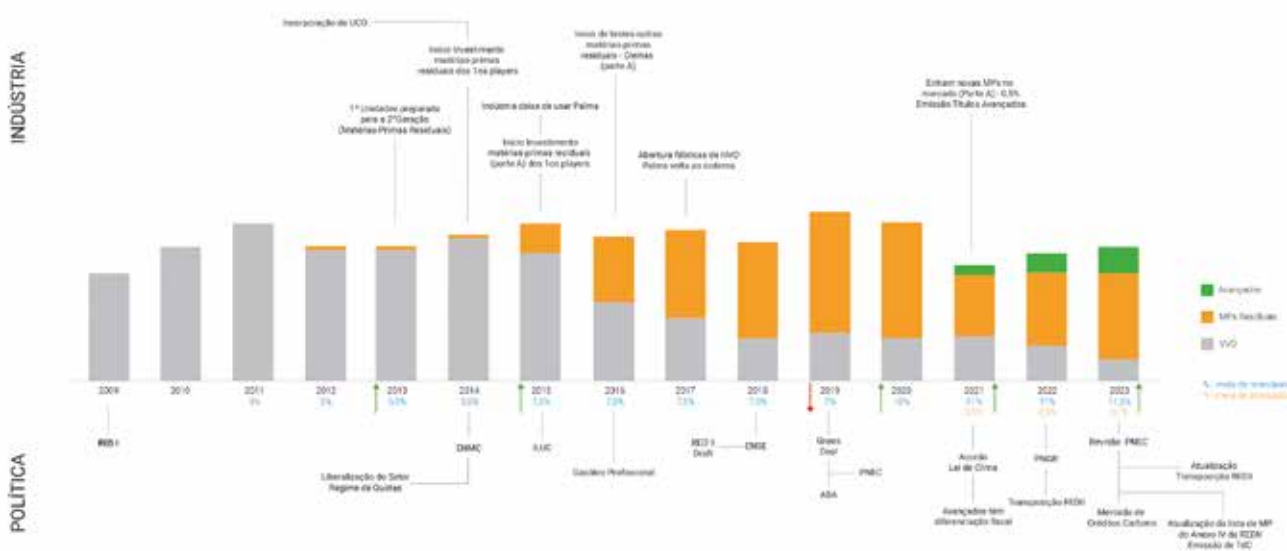


Figura 4.29. O desenvolvimento do setor de biocombustíveis em Portugal [1].

daquele que poderá vir a ser um caminho marcante no setor da bioenergia. Os esforços até agora realizados confirmam que o país está empenhado em apoiar eficazmente as alternativas verdes e, conseqüentemente, promover uma economia descarbonizada e circular.

**Projetos futuros e perspectivas do setor para o horizonte 2050**

O futuro dos biocombustíveis em Portugal é promissor, com metas ambiciosas para a neutralidade carbónica até 2050, sendo que o setor antecipa um crescimento significativo na produção e utilização de biocombustíveis avançados, marcado por projetos focados na maximização da economia circular e na transformação de resíduos em energia útil.

Em Portugal e na Europa, existem diversos projetos em funcionamento na área dos gases renováveis, destacando-se o biometano como uma fonte promissora (Figura 4.30).

Além de unidades de produção de biometano através de resíduos orgânicos provenientes de resíduos sólidos urbanos e lamas de estações de tratamento de águas residuais (ETARs), existem outros projetos que visam impulsionar a transição energética do país, promovendo a redução das emissões de gases com efeito de estufa e a diversificação da matriz energética, rumo a um futuro mais sustentável e descarbonizado.

A visão para 2050 envolve um setor energético diversificado e sustentável, onde os biocombustíveis avançados e o biometano desempenham um papel central na descarbonização dos transportes e da indústria - visão esta que será suportada por políticas de incentivo e apoio à inovação, promovendo a competitividade e a sustentabilidade do mercado nacional.

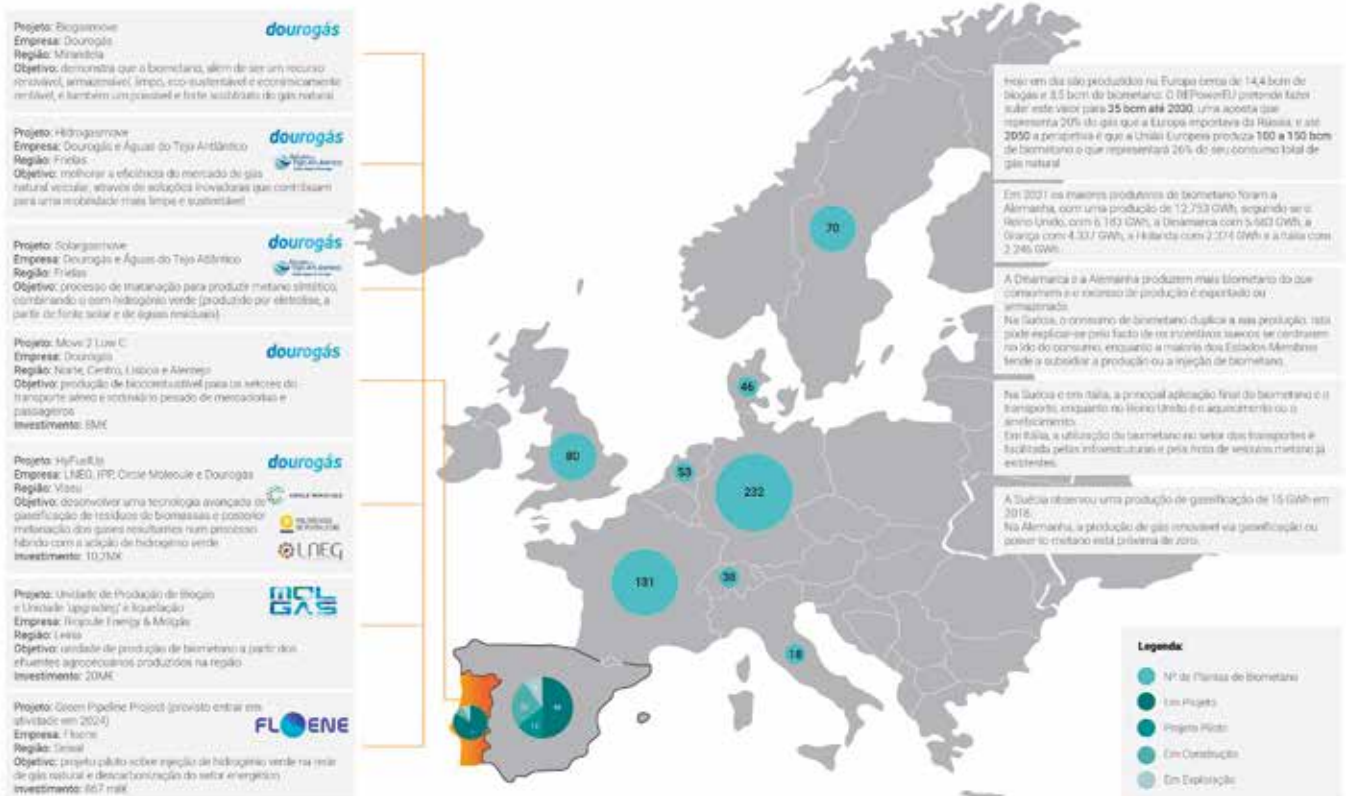


Figura 4.30. Infografia sobre os projetos de biocombustíveis desenvolvidos na UE e em Portugal [1].

### Como pode a bioenergia ser utilizada na indústria cerâmica

A indústria cerâmica é conhecida pelo seu elevado consumo energético, especialmente nos fornos. A substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis avançados pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, promovendo a economia circular através da utilização de resíduos orgânicos que, de outra forma, seriam descartados em aterros sanitários.

A transição para biocombustíveis na indústria cerâmica não só contribui para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, como também pode melhorar a eficiência energética dos processos produtivos, otimizando o consumo de energia.

A descarbonização do setor da cerâmica, é essencial para atingir as metas de neutralidade carbónica. Os biocombustíveis avançados e o biometano oferecem uma solução prática e eficiente para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, aproveitando resíduos e promovendo a circularidade económica. No entanto, para que esta realidade se concretize, são necessárias políticas de incentivo e uma adaptação eficaz das regulamentações, aliadas à adoção de práticas e mentalidades abertas à mudança que o país necessita urgentemente. A harmonização destas medidas e ações com a estreita colaboração com o setor e os seus players levará Portugal a liderar a transição energética global, assegurando um futuro sustentável e resiliente para todos os setores da economia.

### Referências

[1]. ABA. 2023. *Relatório semestral ABA, 31 Julho 2023* [Online]. Disponível em: [https://cdn.prod.website-files.com/5e79d405743cef233e32a700/64ca68ae70743592da1f36f4\\_Relatório%20Semestral\\_ABA\\_31\\_Julho\\_2023.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/5e79d405743cef233e32a700/64ca68ae70743592da1f36f4_Relatório%20Semestral_ABA_31_Julho_2023.pdf)



# O BIOMETANO E A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR DA CERÂMICA

Fernando Loureiro, Daniel Direito, Gonçalo Lourinho, Carolina Gonçalves, Joana Bernardo, Francisco Gírio  
BIOREF -Laboratório Colaborativo para as Biorrefinarias

Associado às alterações climáticas evidentes, o conflito Ucrânia-Rússia reforçou a urgência de ações coordenadas da União Europeia, uma das quais conhecida como o plano REPowerEU, o qual apresenta um conjunto de medidas para reduzir a dependência europeia de combustíveis fósseis russos e acelerar a adoção de energias limpas, com o objetivo de alcançar uma redução de 55% das emissões de gases de efeito estufa até 2030 e garantir uma transição energética sustentável. O investimento no aumento da produção e utilização de biometano é um dos destaques do REPowerEU, sendo que de acordo com o plano, o biometano poderá vir a substituir até 10% do gás natural fóssil na UE até 2030. Assim, no sentido de cumprir com esta meta proposta, a UE lançou ações para aumentar a produção sustentável de biogás e biometano, incluindo uma parceria industrial para o biometano, aceleração de licenças para energias renováveis, incentivos a investimentos e avaliação de desafios infraestruturais. Na própria Diretiva (UE) 2023/2413 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de outubro de 2023 é contemplada a produção de biogás que possui emissões muito reduzidas de gases com efeito de

estufa quando comparado com as emissões devidas ao gás natural.

A nível nacional, o PRR é um instrumento fundamental do REPowerEU, uma vez que incorpora medidas para o incentivo da produção e consumo de gases renováveis. Uma das medidas estratégicas que advém do PRR será o leilão para a compra centralizada de gases renováveis, com uma injeção prevista de 140 milhões de euros ao longo de 10 anos, financiado pelo Fundo Ambiental, e aberto a projetos de biometano. Paralelamente, têm sido reunidos esforços no sentido de simplificar o licenciamento da sua produção.

Estes são passos que marcam o início da implementação de uma série de ações estratégicas dentro de um plano que representa um avanço significativo para a tecnologia de biometano no cenário nacional: o **Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB)** aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 41/2024 de 15 de março de 2024 (Figura 4.31). Este é um compromisso governamental relevante no sentido de expandir o mercado do biometano,



Figura 4.31. Sessão pública de apresentação do PAB 2024-2040 no Auditório do LNEG em 10/01/2024.

alinhá-lo com as metas de descarbonização da economia nacional e quebrar as barreiras ao desenvolvimento do setor, intervindo no estabelecimento dos quadros legislativo e de incentivos. O PAB apresenta 20 linhas de ação, distribuídas em duas fases com horizontes distintos e com um eixo transversal.

A **primeira fase** constitui a criação de um mercado de biometano em Portugal, sendo de carácter imediato e prioritário, pois foca-se em ações de desenvolvimento do setor de biogás e biometano até 2026. As principais prioridades são acelerar o desenvolvimento da produção de biometano e garantir um quadro regulatório adequado, juntamente com uma política pública de incentivos. Em paralelo, é fomentada a clarificação dos procedimentos de licenciamento e o estudo e gestão da integração do gás renovável na rede a nível regional. As medidas propostas incluem iniciar a produção e fornecimento, e desenvolver o mercado a partir da produção existente, que motivam uma adaptação às novas condições, exigindo a revisão de modelos de negócio. Surge assim uma oportunidade para reconverter as unidades para a produção de biometano, tornando-as pilares do setor e explorando sinergias com a indústria do gás. Contudo, também está previsto o investimento em novas unidades de produção, especialmente em projetos aprovados nos setores agropecuário e agroindustrial.

A **segunda fase**, prevista para o período de 2026 a 2040, visa o reforço e a consolidação do mercado de biometano em Portugal que será criado na fase anterior. Portanto, são incluídas ações de médio prazo, como a ampliação da escala de produção e a melhoria do aproveitamento do potencial do setor pecuário. Também se pretende avaliar estrategicamente tecnologias inovadoras e produtos resultantes da produção de biometano, como o digerido e o CO<sub>2</sub> biogénico. Adicionalmente, é destacada a necessidade de um aumento do financiamento em investigação, desen-

volvimento e inovação para sustentar e expandir o setor.

Em paralelo, deverá ser tido em conta um eixo transversal importante dedicado à garantia da sustentabilidade social e ambiental do aproveitamento do biometano. O foco está na sustentabilidade das ações necessárias ao crescimento do mercado, na participação ativa da sociedade no desenvolvimento do setor e no estímulo das sinergias entre os diferentes *stakeholders* da cadeia de valor.

Prevê-se que a produção de biometano atinja cerca de 2,7 TWh em 2030, aproveitando a capacidade instalada de biogás e o início da utilização de efluentes pecuários e agrícolas. Tecnologias emergentes, como gaseificação e *Power-to-Methane* (PtM), também ajudarão a expandir o mercado nacional de biometano. O tratamento de resíduos florestais e a metanação do CO<sub>2</sub> biogénico podem elevar a produção para 5,6 TWh em 2040. Isso permitirá **reduzir o consumo de gás natural em 9,1% em 2030 e 18,6% em 2040, resultando em poupanças de 135 e 278 milhões de euros nas importações e diminuindo as emissões de carbono.**

Efetivamente, é possível identificar a nível europeu um claro crescimento na produção anual de biogás e de biometano (Figura 4.32), perspetivando-se que, com os incentivos supramencionados, seja possível que também a nível nacional se possa acompanhar o ritmo de crescimento europeu.

A injeção de biometano na rede de gás nacional é já uma realidade desde 2022. Nesse ano, a empresa Dourogás, através de um projeto-piloto, realizou com sucesso a primeira injeção de biometano na rede em Urjais, Mirandela, para o abastecimento de 10 clientes industriais e de 80 clientes domésticos (Figura 4.33).

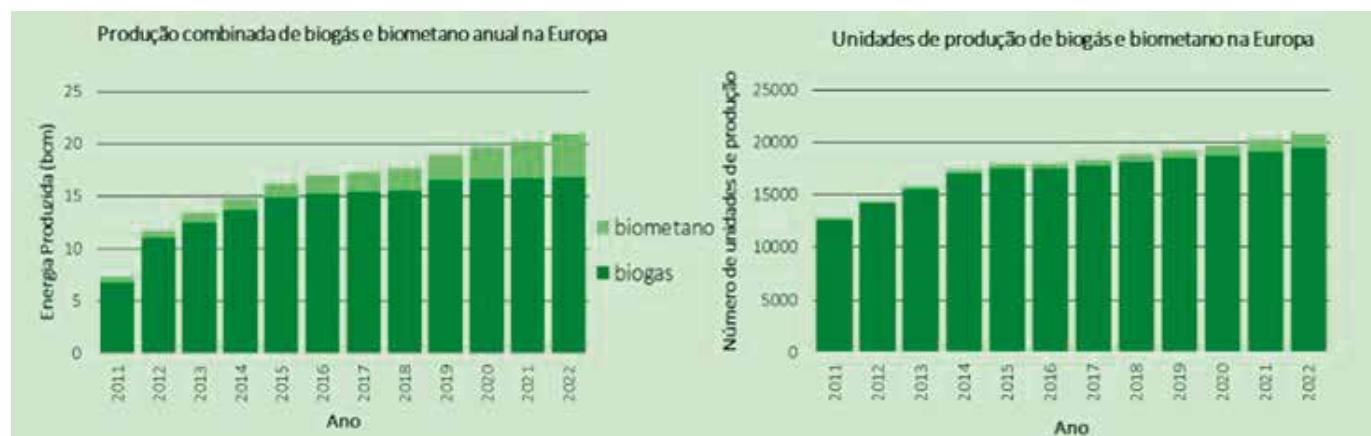


Figura 4.32. Evolução da produção de biogás e biometano na Europa entre 2011 e 2022. Fonte: Decoding Biogases: Made in Europe, Sustainable, and Affordable', European Biogas Association, 2024.





Figura 4.33. Posto de injeção de biometano da empresa Dourogás, em Urjais, Mirandela (Fonte: Dourogás<sup>10</sup>).

### O papel do biometano na indústria cerâmica

A concretização destes planos, nomeadamente para o biometano, poderá representar um elevado impacto na redução de emissões de GEE, principalmente nos setores onde a descarbonização por eletrificação é mais difícil, como é o caso do setor cerâmico. Em 2019, os dados apontavam que mais de 80% das emissões do setor diziam respeito a consumos energéticos, dos quais mais de 60% correspondiam à combustão de combustíveis fósseis, principalmente gás natural pelo que a descarbonização da indústria da cerâmica será tanto complexa como desafiante. **O biometano surge como um vetor energético alternativo imediato e, sendo um gás intermutável com o gás natural, não apresenta questões complexas quanto à sua veiculação ou utilização nas infraestruturas e equipamentos já existentes, proporcionando uma solução alternativa pragmática, prática e economicamente mais sustentável quando comparada com soluções providenciadas por outros gases renováveis. Numa primeira fase, uma solução mista deverá conduzir ao início de uma transição sustentável na área, utilizando-se uma mistura entre gás natural e biometano.**

Sendo o biometano um gás renovável, desde julho de 2024 que a EEGO (Entidade Emissora de Garantias de Origem) iniciou a emissão de **Garantias de Origem (GO)** para os gases renováveis produzidos em Portugal e injetados nas redes de serviço público de gás.

As GO relativas ao biometano são um documento certificado que comprova a origem renovável do gás, funcionando como um mecanismo de transparência, permitindo que o biometano, injetado na rede de gás natural, seja identificado e atribuído a um consumidor final como energia verde. Para a indústria, nomeadamente a da cerâmica, as GO podem representar uma ferramenta essencial para comprovar a sustentabilidade e a redução de emissões de GEE associadas ao biometano. Até ao final do ano, prevê-se que o sistema de emissão de GO esteja integrado no sistema da Associação de Entidades Emissoras (AIB) possibilitando o início das operações internacionais de GO para gases renováveis.

### Tecnologias disponíveis

No que concerne às diferentes tecnologias de produção de biometano, destaca-se a **digestão anaeróbia**, sendo a **gaseificação de biomassa** e a **tecnologia PtM** duas alternativas que, apesar de terem uma utilização ainda reduzida, apresentam um grande potencial.

A **digestão anaeróbia** é uma tecnologia ideal para efluentes orgânicos líquidos, mas que converte praticamente qualquer tipo de matéria orgânica em biogás através do metabolismo de um consórcio de microrganismos (archaea metanogénicas e bactérias), passando por etapas sequenciais como hidrólise (quebra de estruturas moleculares),

<sup>10</sup>Disponível em: <https://www.dourogassgps.pt/2023/08/22/biometano-revolucao-verde-rede-gas/>. Acesso em: 6 de setembro de 2024

acidogénese, acetogénese (duas etapas de produção de produtos intermediários) e metanogénese (produção de metano levada a cabo pelas archaea). O biogás produzido é composto por diferentes componentes, sendo que é necessário retirar a fração de impurezas e a de dióxido de carbono biogénico para aumentar a concentração de biometano. As tecnologias de *upgrading* de biogás em biometano incluem separação por membranas, lavagem com água, lavagem com aminas e adsorção com modulação de pressão. A digestão anaeróbia é a tecnologia mais madura para a produção de biometano e com um histórico alargado de utilização neste contexto, representando 90% da produção mundial. Pode ser aplicada a resíduos de agroindústrias, agropecuária, indústria alimentar, resíduos urbanos (fração orgânica) e águas residuais (lamas de ETAR), produzindo biogás, que atualmente em Portugal é praticamente todo encaminhado para a produção de energia elétrica e/ou térmica, e em paralelo uma fração digerida que pode ser usada como biofertilizante com menor pegada de carbono devido à sua composição e à redução de custos energéticos e logísticos de produção de fertilizantes. Em Portugal, apesar da existência de todos os resíduos supramencionados, a produção de biogás apenas é efetuada com recurso aos resíduos urbanos (fração orgânica) e águas residuais (lamas de ETAR). Contudo, e face ao potencial existente, tem-se verificado uma diversificação relativamente às matérias-primas a utilizar, nomeadamente os efluentes pecuários, com diversas unidades a serem construídas a nível nacional.

**A gaseificação de biomassa**, por sua vez, é mais adequada para materiais lenhocelulósicos com baixo teor de humidade. Este processo termoquímico ocorre a temperaturas elevadas (700 - 800°C) numa atmosfera com oxigénio reduzido, produzindo gás de síntese (maioritariamente composto por hidrogénio e monóxido de carbono) cuja conversão em biometano envolve o arrefecimento, remoção de poluentes e o processo de metanação. Embora esta tecnologia ainda esteja em escala de demonstração (TRL 6-8), possui grande potencial de crescimento a médio e longo prazo, oferecendo flexibilidade de matérias-primas e possibilidade de implementação em maior escala.

**A tecnologia *power-to-methane* (PtM)** é também uma via emergente e com futuro promissor para a produção de biometano, embora ainda esteja em fase piloto a nível europeu (TRL 5-7). É uma tecnologia de conversão de energia elétrica renovável em energia química, através da metanação de

CO<sub>2</sub> com H<sub>2</sub> renovável proveniente de eletrolisadores. A origem do CO<sub>2</sub> pode ter diversas proveniências nomeadamente, emissões industriais, do ar ambiente ou da purificação do biogás, entre outras. Uma integração do conceito PtM com a digestão anaeróbia, permitirá que 100% do biogás produzido seja convertido em biometano.

### Benefícios da utilização de biometano

Em suma, o biometano, obtido maioritariamente através da conversão bioquímica de matéria orgânica, nomeadamente resíduos orgânicos, é já amplamente utilizado em alguns países europeus e beneficia atualmente de relevantes esforços institucionais nacionais (como o PAB) e globais para o seu desenvolvimento. A aplicação deste gás renovável tem associadas emissões negativas de CO<sub>2</sub>, contribuindo para as metas nacionais de descarbonização tendo em conta a redução drástica das emissões geradas pela utilização de gás natural e para a redução da dependência neste e, conseqüentemente, das suas importações, o que também aporta vantagens económicas. Em paralelo, o biometano constitui um projeto claro de economia circular, uma vez que permite aproveitar os recursos endógenos, gerar subprodutos com valor acrescentado, reduzir a balança comercial energética do país, fixar as populações fora das maiores áreas metropolitana, sendo uma fonte renovável com previsibilidade, complementando, assim, outras fontes caracterizadas pela intermitência, enquanto contribui para a diversificação das energias renováveis na matriz energética nacional.

A fácil substituição do gás natural sem investimentos relevantes em novas estruturas, com um plano nacional de incentivos em vigor e acompanhado pelo recente lançamento de GO para garantia de sustentabilidade, somado aos inúmeros benefícios adjacentes relacionados com a redução de emissões, faz do biometano uma oportunidade próxima de se apelidar de “chave-na-mão” para uma indústria onde a descarbonização aparentava ser uma eterna quimera.

# PRODUÇÃO DE BIOMETANO ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA: CONTRIBUIÇÕES PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Paulo Brito

Valoriza - Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, Instituto Politécnico de Portalegre, Portugal

A presente secção faz uma abordagem sobre a produção de biometano a partir da utilização de biomassa residual sólida segundo processos de gaseificação térmica seguidos de metanação. É feita uma abordagem tecnológica apresentando as suas vantagens, desvantagens e grau de maturidade, bem como, uma abordagem de aspetos económicos no sentido de verificar a sua contribuição para o processo de descarbonização.

## Introdução

É já muito notória a urgência de uma descarbonização do nosso planeta no sentido de se limitar e inverter o desequilíbrio climático. A temperatura média do planeta tem vindo a aumentar devido ao efeito de estufa, resultado do excesso de emissões de CO<sub>2</sub>, criando uma destabilização do equilíbrio ambiental provocando situações climáticas globalmente extremas: nalgumas regiões secas prolongadas e noutras, chuvas torrenciais. A principal forma de mitigar estes problemas passa pela redução da utilização de recursos fósseis, em particular, combustíveis, num processo denominado de descarbonização. Vivemos, também, na União Europeia (UE) uma necessidade de segurança energética já que estamos muito dependentes de recursos externos (petróleo e gás natural), sendo premente criar alternativas que levem a uma redução nas importações de energia. Assim, a UE tem vindo a definir objetivos ambiciosos para alcançar a descarbonização e a segurança energética. Em 2019 lançou o “Green Deal” com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica até 2050 [1]. Em 2022, a Comissão Europeia (CE) publicou o seu Plano “REpowerEU” [2], que visa acelerar a transição verde e a dependência das importações de recursos fósseis, bem como combater os preços recordes da energia e acelerar a descarbonização da economia europeia. Neste plano, os gases renováveis como o hidrogénio e o biometano, considerados vetores energéticos, são fundamentais para se conseguir atingir os objetivos da neutralidade carbónica.

Em Portugal, o hidrogénio e o biometano são vistos como importantes vetores energéticos com elevadas e promissoras oportunidades de mercado. A “Estratégia Nacional para o Hidrogénio” [3] e o “Plano Nacional para o Biometano” [4] referem-se à biomassa, e em particular às tecnolo-

gias de gaseificação de biomassa, como relevantes para o desenvolvimento de um mercado nacional de hidrogénio e biometano e promovem uma integração progressiva deste gás no setor energético. Além disso, a nova legislação relativa ao sistema nacional de gás natural abriu as infraestruturas existentes ao biometano e incentivou o estabelecimento de critérios técnicos e de segurança para atingir esse objetivo. Portugal espera produzir 65 ktep de hidrogénio para o setor dos transportes até 2030 e 984 ktep/ano de produção de biometano.

Por outro lado, a gestão de resíduos é, também, um desafio social crucial, já que são cada vez maiores as descargas de resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos industriais, resíduos agrícolas, bem como, as lamas de depuração das unidades de tratamento de águas. Com o aumento crescente da população, do desenvolvimento económico e do aumento do consumo e dos padrões de vida, tem-se vindo a verificar um aumento significativo da produção de RSU, incluindo plásticos e pneus, com enorme impacto na saúde, na economia e no ambiente. Em Portugal o valor médio de produção de RSU em 2023 foi estimado em 505 kg per capita [5]. Um volume significativo destes resíduos ainda acaba em aterros, sem qualquer valorização e com impactos ambientais em termos de emissões de gases e produção de lixiviados. Embora os resíduos, com a sua heterogeneidade, sejam compostos por conteúdos biodegradáveis e não degradáveis, a sua fração orgânica como recurso económico e renovável tem grande potencial para tecnologias de recuperação de energia sob a forma de calor, energia e produtos químicos, em particular, biometano.

Resíduos agroindustriais e florestais, são outra fonte de matéria-prima para processos de gaseificação. Biomassa agrícola e agroindustrial ocupa cerca de 26,2% da área total do continente. Globalmente, esta atividade é mais significativa na região do Alentejo, atingindo 27,3% da cobertura do solo (Estatísticas Portugal INE, 2023). Os resíduos de biomassa neste setor provêm principalmente de subprodutos da agricultura produção e atividades agroindustriais como vinho, horticultura, produção de azeite, frutos secos, cereais e forragens [6]. Estes resíduos incluem palhas de cereais, azeite, bagaços de extração ou produção de vinho e biomassa de resíduos sólidos



resultantes das operações de poda periódica em olivais, vinhas, e pomares de frutas ou cascas de nozes. Alguns resíduos agroindustriais já são utilizados para produção de calor por combustão direta, mas a sua utilização para produção de gases renováveis permite estimar uma produção de cerca de 42. GWH/ano, o que corresponde a cerca de 10 % da nossa utilização de combustíveis fósseis [6].

**Tecnologia termoquímica de produção de biometano**

O biometano pode ser produzido por meio de processos biológicos (por exemplo, digestão anaeróbica com condicionamento adicional de gás) e por processos termoquímicos que normalmente incluem gaseificação seguida por uma etapa de metanação. Os processos de produção de biometano por gaseificação térmica ainda não estão disponíveis comercialmente (TRL 6-8). Ainda assim, o potencial de crescimento da tecnologia é grande a médio/longo prazo e a gaseificação pode ser vista, como uma alternativa a explorar para diversificar a base tecnológica da produção de biometano. As principais vantagens do processo são a flexibilidade em termos de matérias-primas e a possibilidade de implementação a uma escala superior quando comparado com a digestão anaeróbia.

Na Figura 4.34 está apresentado um fluxograma típico de um processo de produção de biometano a partir de gaseificação de resíduos sólidos. A biomassa sólida (em particular biomassa residual) é convertida em gás de síntese rico em CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (2-7 vol. %), CO<sub>2</sub> e hidrocarbonetos.

A quantidade de CH<sub>4</sub> pode ser aumentada por meio de reações de metanação entre CO, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

A gaseificação converte os resíduos num gás combustível, sob temperaturas tipicamente entre 700 - 900°C e quantidades limitadas de oxigénio quando comparadas com os processos de combustão tradicionais [7]. A menor quan-

tidade de oxigénio e as características intrínsecas desse processo térmico apresentam todas as vantagens em relação a outros tratamentos de resíduos, como aterro direto e incineração: menores emissões de contaminantes oxigenados e, portanto, um impacto ambiental reduzido, maior eficiência em termos de conversão de energia, flexibilidade de implementação e possibilidade de construção de unidades descentralizadas (uma vantagem relevante para áreas rurais ou outras áreas remotas). Além disso, os subprodutos da gaseificação (carvão e alcatrões) têm potencial para serem convertidos noutros produtos de valor acrescentado, como biocarvões para utilização em solos, materiais catalíticos para decomposição de alcatrões ou para extrair compostos orgânicos para a indústria química (por exemplo, naftaleno) [7]. A valorização desses subprodutos melhora substancialmente a viabilidade económica das unidades de gaseificação.

A gaseificação pode ser conduzida em diferentes configurações de reatores, como leitos fixos (corrente ascendente, corrente descendente, corrente cruzada), leito fluidizado, reator rotativo e gaseificadores assistidos por plasma [8]. A seleção do gaseificador depende do tipo de matéria-prima, do modo de contacto entre a matéria-prima e o agente gaseificador, do tempo de residência, da taxa de transferência de calor, bem como do uso final do gás produzido. Devido à facilidade de fluxo de material, os gaseificadores que trabalham com o ar atmosférico como agente oxidante são os mais comuns. Os gaseificadores de leito fixo (gaseificador Downdraft e gaseificador Updraft) são conhecidos como reator de fase densa e os de leito fluidizado, como gaseificador de fase fina. Os reatores de leito fluidizado podem ser tipo borbulhante, leito circulante e de fluxo arrastado. Para os gaseificadores tipos Downdraft e Updraft a dimensão de partícula exigida, situa-se em granulometrias inferiores a 50 mm, enquanto para gaseificadores tipo leito fluidizado as dimensões das partículas podem ser inferiores a 6 mm. Existem variações perceptíveis no perfil de temperatura do gaseificador.

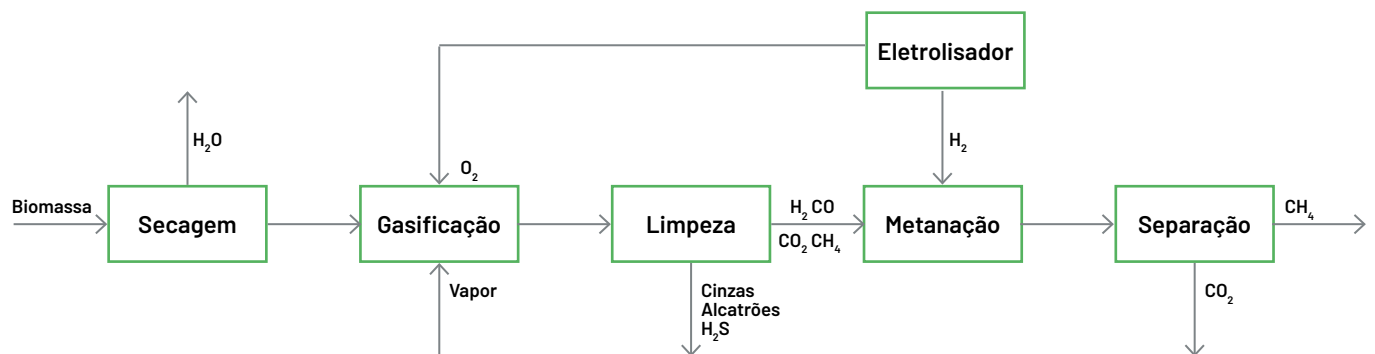


Figura 4.34. Fluxograma do processo de produção de biometano por gaseificação térmica.



Para além dos gases principais que constituem o gás de síntese, são várias as substâncias que também estão presentes, tais como, partículas sólidas, alcatrões, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais pesados, H<sub>2</sub>S, COS, NH<sub>3</sub> e HCl, que são tóxicos para o meio ambiente e podem causar problemas de incrustação e corrosão nos equipamentos. Além disso, a presença de cloro e das cinzas volantes pode aumentar o risco de formação de dioxinas [9]. No entanto, como a gaseificação requer quantidades menores de oxigénio para ser executada, a formação de compostos químicos com oxigénio é reduzida, tais como, dioxinas, furanos, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>. Assim, um conjunto de equipamentos de limpeza do gás são necessários, tais como, como ciclones, filtros, adsorventes, depuradores húmidos e conversores catalíticos [10].

O processo de metanação que se segue envolve reações entre CO<sub>2</sub>, CO e H<sub>2</sub> contidos no gás de síntese para gerar mais CH<sub>4</sub>. Este é um processo catalítico usando catalisadores à base de Ni (por exemplo, Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ru e outros metais nobres. A operação deve ocorrer a cerca de 350°C com relações H<sub>2</sub>/CO elevadas (por exemplo, 3:1 a 5:1) para se atingir a máxima eficiência de conversão, sem a indesejada deposição de carvão na superfície dos catalisadores [11]. Uma vez que essas proporções normalmente não são alcançadas diretamente no processo de gaseificação, o H<sub>2</sub> adicional necessário para as reações pode ser obtido por meio de um processo de eletrólise da água, com base em energia elétrica renovável. O oxigénio gerado no processo de eletrólise pode ser utilizado no processo de gaseificação térmica, diminuindo, assim, a quantidade de azoto presente no gás de síntese.

O gás formado no final do processo de metanação é um gás constituído essencialmente por CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, com composições similares às do biogás produzido por digestão anaeróbia, ou seja, 40 a 50% de metano. Este gás é depois separado com base em processos de separação cujas tecnologias já estão perfeitamente maduras, obtendo-se metano, que pode ser utilizado diretamente como substituto do gás natural, e dióxido de carbono, químico com elevado valor comercial.

### Projetos de demonstração

A nível europeu são vários os projetos de demonstração a decorrer. Refira-se, por exemplo, o projeto Gaya [12] na França o projeto GoBiGas [13] na Suécia e o HYFUELUP [14], em Portugal. O projeto europeu HYFUELUP foi desenvolvido com o objetivo de produzir biometano a partir da gaseificação de matérias-primas de baixa qualidade, nomeadamente, lamas e resíduos florestais, combinada com hidrogénio verde produzido a partir de eletrólise da água. A tecnologia de gaseificação é baseada no conceito SEG/Oxy-SEG (*Sorption-enhanced gasification*). O processo consiste num gaseificador de leito fluidizado borbulhante (BFB) ligado a um regenerador de leito fluidizado circulante (CFB). O material utilizado no leito fluidizado é à base de

CaO, o que permite que o CO<sub>2</sub> produzido no gaseificador seja capturado e transportado até ao reator de combustão sob a forma de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Esta captura de CO<sub>2</sub> no interior do gaseificador melhora a qualidade do gás produzido e permite a sua conversão em biometano na unidade de metanação em leito fluidizado. O processo de metanação catalítica apresenta uma grande flexibilidade em termos da qualidade do gás que entra no leito fluidizado e permitirá que haja uma elevada conversão em biometano de qualidade. A adição flexível de um fluxo auxiliar de hidrogénio renovável, que permitirá a conversão da maior quantidade possível de gases de combustão (CO<sub>2</sub>), aumentando assim a eficiência global de conversão do carbono. O projeto de demonstração está a ser instalado no centro de Portugal para uma capacidade de produção de cerca de 50 Nm<sub>3</sub>/h de biometano.

### Potencial económico para a descarbonização

A descarbonização da indústria e, em particular, a indústria cerâmica, passa pela substituição do gás natural por alternativas renováveis. A opção mais interessante é produzir moléculas iguais, ou que apresentem desempenhos similares, mas que sejam renováveis. O biometano e o hidrogénio verde são alternativas interessantes de conseguir esta alteração de forma suave e a baixo custo. O biometano produzido a partir de resíduos, quer por processos biológicos quer por processos termoquímicos, é uma opção sustentável em termos ambientais e permite uma gestão eficiente dos resíduos numa perspetiva de economia circular. Também sob o ponto de vista económico, estas são opções que começam a ser competitivas face à utilização dos combustíveis fósseis. Em primeiro lugar, utilizam recursos residuais, com baixo valor e que, em muitos casos, não implicam custos elevados para o seu tratamento. Depois, a utilização deste tipo de recursos conduz à possibilidade de obter créditos de carbono, valorizando, também, economicamente estes projetos.

Considerando um forno cerâmico que consome 50 Kg de gás natural por cada tonelada de cerâmico processado (50 Kg GN/ton produto), se utilizarmos um processo de gaseificação térmica de resíduos florestais com produção de biometano, utilizando o excesso de energia térmica gerada no processo e o biometano produzido, a necessidade de biomassa seria da ordem das 250 Kg (250 Kg biomassa/ton produto). Admitindo um custo atual do gás natural de aproximadamente 40 €/Kg GN e o custo da biomassa florestal residual de aproximadamente 30 €/ton, haveria uma redução de custos energéticos de cerca de 4 vezes. A este cálculo ainda acresce a valorização dos créditos de carbono (por não estar a utilizar um combustível fóssil) e, se utilizar resíduos que iriam para aterro, a poupança da taxa de deposição que pode ascender a 25€/ton de residuo. É certo que há necessidade de fazer um investimento numa unidade de processamento que será, a preços atuais, aproximadamente, em torno de 1K€/KW. Continuando com o mesmo exemplo, se o forno tiver ciclos de 2 horas, esta-

mos a falar de um investimento de cerca de 350 K€ que é amortizado em cerca de 5 anos.

Havendo disponibilidade de matéria-prima residual junto a unidades industriais e havendo a possibilidade de alguma associação entre empresas do setor que atuam na mesma zona, situação que ocorre com muita frequência, ainda torna estes projetos mais interessantes do ponto de vista económico. Apesar de haver sempre fatores de escala positivos em processos industriais, a implementação de pequenos projetos próximos dos recursos, que não tenham necessidade de os transportar, apresenta mais valias económicas que minimizam o efeito de escala [15].

## Conclusão

A possibilidade de valorização de recursos endógenos, em particular, recursos biomássicos residuais, para fazer face a uma alteração de paradigma energético para a indústria, é uma estratégia que permite criar sustentabilidade a todos os níveis. A produção de gases renováveis, em particular o biometano, a partir destes materiais com base em tecnologias de gaseificação térmica estão cada vez mais próximas do mercado e terão um papel importante na descarbonização de indústrias muito intensivas energeticamente, como a indústria cerâmica, e que estejam instaladas junto de áreas agrícolas e florestais.

## Referências

- [1]. Comissão Europeia. *Pacto Ecológico Europeu*. Bruxelas: Comissão Europeia, 11 dez. 2019. COM(2019)640 final.
- [2]. Comissão Europeia. *REPowerEU Plan*. COM/2022/230 final, 2022.
- [3]. Portugal. *Estratégia Nacional para o Hidrogénio*. Diário da República, n.º 158/2020, Série I, 14 ago. 2020.
- [4]. Portugal. *Plano Nacional para o Biometano*. Diário da República, n.º 54/2024, Série I, 15 mar. 2024.
- [5]. Agência Portuguesa do Ambiente. *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2023*. Lisboa: APA, out. 2024.
- [6]. Ferreira, S.; Monteiro, E.; Brito, P.; Vilarinho, C. "Biomass resources in Portugal: Current status and prospects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017), pp. 1221-1235.
- [7]. Santos, S.M.; Assis, A.C.; Gomes, L.; Nobre, C.; Brito, P. "Waste Gasification Technologies: A Brief Overview". *Waste*, 1(2022), pp. 140-165.
- [8]. Passos, J.; Alves, O.; Brito, P. "Management of municipal and construction and demolition wastes in Portugal: future perspectives through gasification for energetic valorization". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(2020), pp. 2907-2926.
- [9]. Kantarelis, E.; Donaj, P.; Yang, W.; Zabanioto, A. "Sustainable valorization of plastic waste to energy with environmental safety via high-temperature pyrolysis (HTP) and high-temperature steam gasification (HTSG)". *Journal of Hazardous Materials*, 167(2009), pp. 675-684.
- [10]. Woolcock, P.J.; Brown, R.C. "A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas". *Biomass and Bioenergy*, 52(2013), pp. 54-84.
- [11]. Arena, U. "Process and technological aspects of the gasification of urban solid waste: A review". *Waste Management*, 32(4) (2012), pp. 625-639.
- [12]. ENGIE. *Gaya: Energy from waste to renewable gas*. Disponível em: <https://www.engie.com/en/news/gaya-energy-waste-gas-renewable>
- [13]. Thunman, H.; Seemann, M. "The GoBiGas plant". In: *Substitute Natural Gas from Waste – Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes*. 2019, pp. 455-474.
- [14]. HyFuelUp Project. *HyFuelUp*. Disponível em: <https://hyfuelup.eu/>
- [15]. Alves, O.; Calado, L.; Panizio, R.M.; Gonçalves, M.; Monteiro, E.; Brito, P. "Techno-economic study for a gasification plant processing residues of sewage sludge and solid recovered fuels". *Waste Management*, 131 (2021), pp. 148-162.



# HIDROGÉNIO VERDE

Dentro do contexto da descarbonização da economia até 2050 estipulada pela União Europeia, tanto o hidrogénio como a eletricidade estão a ganhar destaque em relação aos combustíveis fósseis, que tendem a ser progressivamente substituídos por fontes de energia livres de carbono. A produção de hidrogénio através de eletrólise da água, usando energia elétrica proveniente de fontes renováveis (FER), está a despertar um interesse crescente. Este gás surge como um vetor energético versátil, podendo ser produzido, armazenado e transportado como gás ou líquido. O hidrogénio mostra-se uma possível solução para armazenar de forma flexível a energia proveniente de fontes renováveis (FER), sendo urgente investir em investigação, inovação e desenvolvimento tecnológico.

Vários projetos estão em curso na Europa visando a distribuição de hidrogénio através das redes de distribuição de gás natural existentes. É relevante mencionar que uma mistura de gás natural com até 15% de hidrogénio não requer alterações significativas na rede. Já estão disponíveis no mercado módulos de produção descentralizada de H<sub>2</sub> por eletrólise da água, com a vantagem de serem alimentados por energias renováveis, aproveitando tam-

bém o oxigénio (O<sub>2</sub>) no processo de queima (oxi-fuel ou oxi-combustão), o que pode resultar numa redução significativa do consumo energético.

Apesar de representar um investimento dispendioso, a produção de hidrogénio pode tornar-se viável com a diminuição do custo da energia proveniente de fontes renováveis. As limitadas infraestruturas existentes para o hidrogénio e o longo período de construção de uma rede de distribuição representam obstáculos para a sua adoção generalizada. Na indústria cerâmica, a utilização de H<sub>2</sub> emerge como uma solução promissora para a descarbonização, podendo ser uma alternativa misturada com gás natural, desde que seja economicamente competitiva, com garantia de fornecimento e utilização segura.

Com uma mistura de 15% de H<sub>2</sub>, as emissões de CO<sub>2</sub> podem diminuir aproximadamente 5%. Apesar de não representar uma redução significativa em termos percentuais, pode ser vantajoso devido ao impacto financeiro cada vez mais pesado das licenças de dióxido de carbono e/ou impostos relacionados com o carbono nas estruturas de custo das organizações.



# O HIDROGÉNIO COMO GÁS RENOVÁVEL NA DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

José Campos Rodrigues

AP2H2 – Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio

## Caracterização do desafio

A indústria cerâmica é um setor industrial dependente do gás natural (GN) enquanto fonte energética. A decisão anunciada de retirar o GN do sistema energético em 2040 (PNEC 2030) é uma ameaça direta ao setor. É de esperar que as penalizações associadas à emissão dos gases de efeitos de estufa se tornem cada vez mais gravosas, na lógica do poluidor pagador. O setor terá, num quadro em que se espera que o *dumping* ambiental seja banido do comércio internacional, que encontrar alternativas energéticas viáveis. O objetivo é o de assegurar a continuidade duma indústria que faz parte do património cultural e social do país. O setor terá de se adaptar a estas novas realidades e saber encontrar as soluções adequadas para vencer os obstáculos que as exigências da neutralidade carbónica impõem. O hidrogénio será parte da solução, e é essa análise que nos propomos realizar nesta contribuição para o Roteiro de descarbonização do Setor da Cerâmica.

- *O hidrogénio pode constituir uma alternativa ao GN na indústria cerâmica?*
- *Tecnologias disponíveis e qual a sua maturidade?*
- *Custos associados a esta solução energética?*
- *Implicações sobre a competitividade das empresas?*
- *Riscos adicionais associados?*

*Estas são algumas das questões que empresários e trabalhadores do setor legitimamente se colocam, quando colocados perante os desafios da descarbonização.*

Em 2022, segundo os dados publicados, o consumo em GN no setor dos minerais não metálicos, CAE 23, que abrange as indústrias da cerâmica e vidro, foi de 513 MNm<sup>3</sup> (6,10 TWh), representando cerca de 9,5% do consumo total de GN em 2022, 14,3% sem considerar o consumo para a produção de energia. A substituição do GN consumido por H<sub>2</sub>(V)<sup>11</sup> reduziria as emissões de CO<sub>2</sub> em 1,92 Mton<sup>12</sup>, 3,4% do total nacional (sem LULUF) emitido em 2022, 10% das emissões resultantes do consumo de GN.

O desafio é encontrar fontes alternativas de energias primárias, não poluentes, que permitam a substituição progressiva do GN, por combustíveis limpos, amigos do ambiente.

Na estratégia do Roteiro Neutralidade Carbónica, a prioridade é dada à eletrificação dos processos produtivos. É uma tarefa em curso.

A eletrificação tem limites, não sendo, para muitas situações, a tecnologia mais adequada a várias das etapas produtivas usadas pelo setor. Outras medidas visam a racionalização e a economia de energia, que se traduzirão em poupanças energéticas, espera-se que significativas. Estas medidas podem representar alguma redução do consumo de GN, ainda não quantificada, mas não se espera que possam conduzir a alterações significativas dos paradigmas produtivos atuais.

Em conclusão, a necessidade de um combustível substituto/alternativo ao GN continua a impor-se, sendo o H<sub>2</sub> (V), direta ou indiretamente<sup>13</sup>, o principal candidato a essa substituição.

<sup>11</sup>H<sub>2</sub>(V) - H<sub>2</sub> renovável ou verde, produzido com recurso a eletricidade verde

<sup>12</sup>CO<sub>2</sub> emitido: 3,00kg<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kgGN (fator de emissão: 56,6 kg<sub>CO<sub>2</sub></sub>/GJ<sub>GN</sub> - PRR C11- tabela anexa)

<sup>13</sup> Recurso ao metano ou amónia renováveis - Amónia (V) e Metano (V)



## O H<sub>2</sub> (V) como vetor energético de substituição

- ▶ Primeiro elemento da tabela periódica
- ▶ Substância mais abundante no Universo, mas... não em estado livre (pensava-se)
- ▶ Densidade: 0,0899 kg/m<sup>3</sup> | (Ar: 1,225 kg/m<sup>3</sup>)
- ▶ PCS: 39, 41kWh/kg | 3,54 kWh/m<sup>3</sup> (GN: 14,84 kWh/kg | 11,90 kWh/m<sup>3</sup>)

### Produção de H<sub>2</sub>

O Hidrogénio é o elemento mais abundante existente no Universo. É o combustível com maior poder calorífico, em massa (mais de 3 vezes superior ao do GN). É uma matéria-prima usada numa grande variedade de processos industriais, nomeadamente refinarias, fabricação de aço e indústria química. É um combustível limpo, o efluente emitido na sua combustão é vapor de água.

São várias as tecnologias para a produção de Hidrogénio, sendo as principais a reformação de hidrocarbonetos e a eletrólise da água. Outras tecnologias estão em desenvolvimento em estádios variados de TRL.

A reformação de GN é a tecnologia mais comum atualmente de produção de H<sub>2</sub>, mas emite gases de efeito de estufa

(CO<sub>2</sub>). Já a cadeia de valor da eletrólise, se alimentada por eletricidade renovável, é ambientalmente sustentável. Os combustíveis fósseis (incluindo o GN) têm o seu destino traçado face ao compromisso assumido pela COP 28 (Dubai, 2023). O desafio atual é o da produção de H<sub>2</sub>(V) por via eletrolítica, processo potenciado por um sistema electroprodutor renovável, valorizando o H<sub>2</sub> como vetor energético.

A amónia (V) e o metanol (V), por sua vez, ganham novas valências como vetores energéticos: são combustíveis alternativos ao GN e *carriers* de H<sub>2</sub>(V) no comércio internacional<sup>14</sup>, nomeadamente transcontinental, permitindo à economia do H<sub>2</sub>(V) beneficiar de uma logística já bem estabelecida.

<sup>14</sup>Os processos de produção são reversíveis



### A cadeia de valor de H<sub>2</sub> (V)

O H<sub>2</sub> (V) é um vetor energético com grande versatilidade e flexibilidade, fazendo a comunicação entre diferentes cadeias energéticas, nomeadamente entre a rede elétrica e a rede de gases renováveis.

As pilhas de combustível asseguram a reversibilidade do processo de eletrólise, isto é, a partir do H<sub>2</sub> (e O<sub>2</sub>) posso obter novamente energia elétrica (com as perdas inevitáveis - a termodinâmica não perdoa).

Como gás, pode substituir o GN (parcial ou na totalidade) nos processos de combustão (descarbonização total ou parcial dos processos de queima). É uma matéria-prima em reações catalíticas, de que as mais comuns são com o CO<sub>2</sub>/CO (cadeia de hidrocarbonetos sintéticos renováveis) e com o N<sub>2</sub> (produção de amónia verde para fertilizantes)

O H<sub>2</sub> (V) permite armazenar os excessos de energia produzida e não consumida, transferindo-os para outros usos ou voltando a injetá-la na rede, quando a oferta não é suficiente para satisfazer a procura. Está assegurada a despachabilidade do sistema renovável.

### H<sub>2</sub> (V) na Indústria da Cerâmica

Procurando caracterizar a dimensão do desafio que o setor enfrenta, importa estimar a quantidade de H<sub>2</sub> (V) que seria necessário produzir anualmente para substituir os consumos atuais de GN, assumindo um consumo energético de 6,10 TWh de GN para a CAE de minerais não metálicos:

- H<sub>2</sub> (V) equivalente - 155 Kton / 1.723 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/ano

A produção desta quantidade anual de H<sub>2</sub> pode ser assegurada por 1,25 GW de eletrolisadores (*load charge* de 6.000h/ano) com um fator de adicionalidade em energias renováveis (fotovoltaica + eólica) de 2,5 GW. O investimento associado estima-se em cerca de 4.000 M€.

Contextualizando estes valores, refere-se que o PNEC2030 projeta uma potência de eletrólise para a produção de H<sub>2</sub> (V) de 3 GW (cerca de 300 kton/ano). Isto é, a descarbonização do setor representa metade dos objetivos traçados para o H<sub>2</sub> (V) na ENH2<sup>15</sup> para 2030.

### PTX - As cadeias de valor do H<sub>2</sub> verde

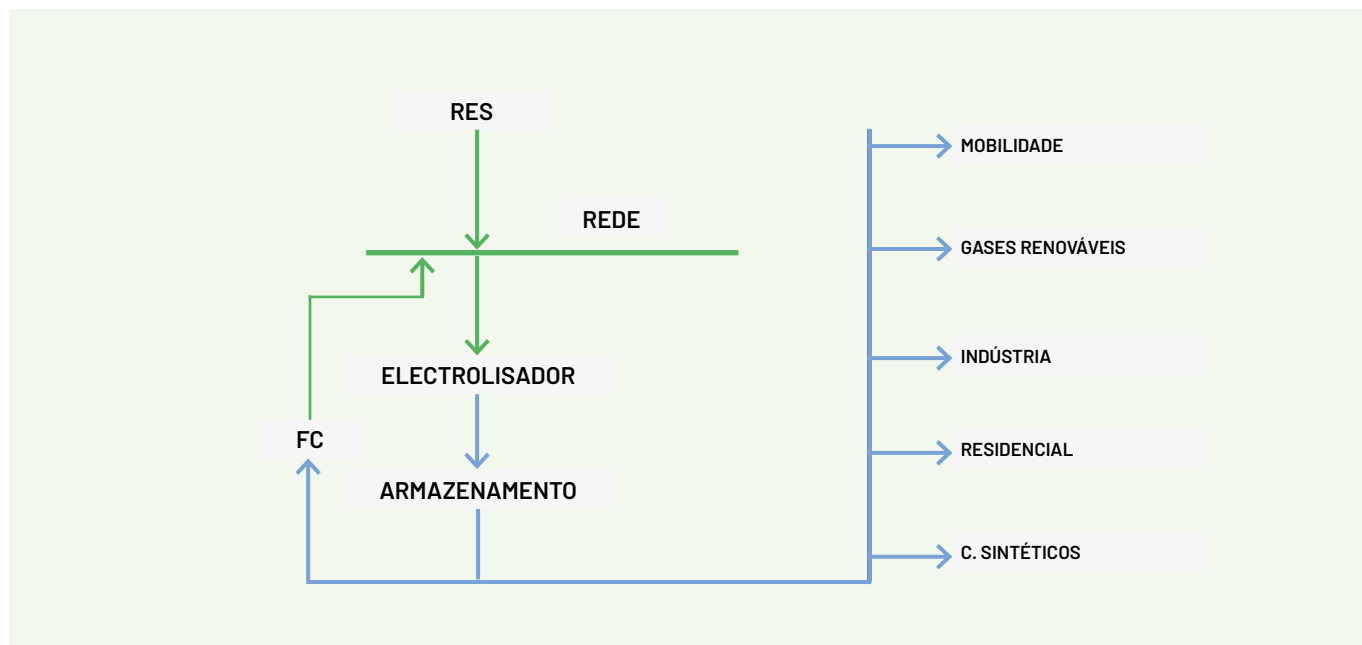


Figura 4.35. Cadeia de valor do H<sub>2</sub> (V).

<sup>15</sup>ENH2 - Estratégia Nacional para o Hidrogénio Renovável, RCM n.º 63/2020, 14 de agosto de 2020

Mas a substituição direta de GN por H<sub>2</sub> traz problemas de natureza técnica ainda em avaliação. Para além da necessidade de substituição dos queimadores, as características da combustão do H<sub>2</sub> (comprimento da chama, gama de radiação e temperatura são os parâmetros mais referidos) obrigam a estudos complementares podendo obrigar a adaptações dos processos de fabrico, que são objeto de estudos laboratoriais e que servirão de referência à indústria para a sua adoção futura.

Desenham-se, entretanto estratégias alternativas que conduzam à adoção progressiva do H<sub>2</sub> em substituição do GN, visando a descarbonização dos processos e minimizando o seu impacto na competitividade das empresas.

### Estratégias de Descarbonização

Elencando algumas das soluções intercalares que se colocam:

- Injeção de H<sub>2</sub>
- Blend H<sub>2</sub>/GN
- Metanação /captura de CO<sub>2</sub> (lógica da economia circular)
- Amoníaco e respetivos blend
- Hydrogen Valleys

#### i) Injeção de H<sub>2</sub> -Tecnologia UC3 – Ultimate Cell® Continuous Combustion

A Tecnologia UC3 – Ultimate Cell® Continuous Combustion<sup>16</sup> otimiza os processos de combustão contínua em instalações industriais<sup>17</sup>. É uma tecnologia inovadora de H<sub>2</sub> que melhora as características do processo de combustão convencional e reduz as emissões associadas.

O processo está patenteado (Patente Europeia, World Patent, US e mais de 30 países) e está comercializado em 28 Países, com um total de mais de 200 unidades instaladas de produção de H<sub>2</sub>.

O efeito do H<sub>2</sub> é o de assegurar que partículas (ou gotículas no caso dos combustíveis líquidos) que estariam apenas incandescentes (*smouldering*) passem a ter chama viva. A base científica do processo é a seguinte:

*O H<sub>2</sub> tem muita afinidade para o carbono, e mesmo com apenas 0,1 % de teor médio de H<sub>2</sub>, mais de 90 % desse hidrogénio adsorve-se de imediato à superfície das partículas do PetCoke ou da madeira. A adsorção referida conduz a uma mais elevada concentração de H<sub>2</sub> na superfície, ocorrendo localmente micro explosões que favorecem a entrada de O<sub>2</sub> e a saída de CO<sub>2</sub> e a combustão passa a ser muito mais completa.*

*Um exemplo prático de uma empresa que tem uma caldeira de produção de vapor, em que alimenta estilha de madeira à fornalha:*

*Com a caldeira a funcionar em estado estacionário, a introdução de 0,1 % de H<sub>2</sub> (V:V) permite reduzir o consumo de estilha em 25% mantendo a produção da mesma quantidade de vapor por hora. Se não se reduzir a alimentação de estilha, a temperatura média na fornalha sobe e consegue-se produzir cerca de 33 % mais de vapor.*

#### A análise das cinzas:

*Antes da introdução de H<sub>2</sub>: 76 % de carvão. (Cinza de cor negra)*

*Após a introdução de H<sub>2</sub>: 8 % de carvão (Cinza cinzento-claro)*

#### ii) Blend H<sub>2</sub>/GN

A mistura de H<sub>2</sub> com GN é uma solução de transição que tem sido preconizada como a via mais imediata e progressiva de redução das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da combustão do GN, podendo assumir duas abordagens complementares:

- Descarbonização da rede de distribuição de gás, via CUR (comercializador de último recurso);
- Instalação dedicada de H<sub>2</sub>, com produção e mistura de H<sub>2</sub> na própria unidade fabril.

<sup>16</sup>Tecnologia desenvolvida e comercializada exclusivamente pela UTIS.

<sup>17</sup>Fábricas de cimento, incineradoras de resíduos sólidos urbanos, indústrias de vidro, pasta de papel, siderurgia e grandes centrais de energia, entre outras aplicações.



### • **Descarbonização da rede**

Uma das medidas previstas na EN-H2 é a da descarbonização progressiva da rede de GN, através da injeção de hidrogénio na rede de GN. Esta mistura pode atingir valores de 20% em volume de H<sub>2</sub>, mantendo-se o GN nos limites das suas especificações conforme a legislação em vigor. Este será um passo muito importante: consumir um GN enriquecido em hidrogénio renovável e menos poluente, havendo vários projetos hoje a ser estudados e preparados com esse objetivo.

São os projetos PtG (*Power to Gas*), com os excedentes de energia elétrica que a rede não absorve convertidos em hidrogénio, injetado na rede de gás natural. De acordo com a experiência já adquirida em projetos piloto esta solução é transparente para os consumidores, sejam estes domésticos ou industriais, não obrigando a adaptações dos equipamentos de queima.

O gás da mistura terá com um LHV superior em termos mássicos (embora inferior em termos volúmicos), dadas as diferentes densidades volúmicas entre o GN e o H<sub>2</sub>. É uma medida que abrangerá todos os consumidores, mas cujo alcance terá os limites que decorrem dos valores máximos de mistura definidos tecnicamente. O impacto macroeconómico (diminuição das importações de GN) e ambiental pode ser progressivamente mais relevante.

Um projeto piloto a nível nacional está a ser realizado pela FLOENE no Seixal, num ramal isolado da rede de GN. Todos os consumidores desse troço (cerca de 80), doméstico e industrial, consomem um gás que é mistura de GN/H<sub>2</sub>, sem ter havido necessidade de qualquer adaptação dos equipamentos. Um segundo teste, numa escala já alargada a mais de 1 milhar de consumidores, vai ser brevemente iniciado em Rio Maior. Recentemente foi realizado um leilão nacional para a compra de H<sub>2</sub>(V) pelo CUR, processo ainda não concluído. Esta compra centralizada visa a descarbonização, parcial, das redes de distribuição de GN. De acordo com a EN-H2 são previstos leilões anuais de aquisição pelo CUR de H<sub>2</sub>(V), o que se traduzirá numa descarbonização progressiva, da rede atual de GN

Mas esta solução tem um alcance limitado no que se refere à descarbonização: a injeção de 20% em volume de H<sub>2</sub> traduz-se numa redução na emissão de CO<sub>2</sub> de 7%.

### • **As soluções dedicadas**

Uma alternativa a ser considerada pelas empresas consumidoras de GN é a de elas próprias procederem internamente à descarbonização do combustível usado, procedendo à mistura "in-house" de hidrogénio no GN, com redução das suas emissões de gases com efeito de estufa.

A Figura 4.36 representa a percentagem de H<sub>2</sub> a misturar no GN, de acordo com os objetivos de redução pretendidos de emissões de CO<sub>2</sub>. A Tabela 4.8 apresenta um case study de blend de H<sub>2</sub> com GN, de acordo com os objetivos de redução de CO<sub>2</sub>. Tem como referência o consumo de 1 ton/ano de GN, (11,8 MWh) e analisa vários cenários de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, através da injeção de H<sub>2</sub> na mistura de queima.

A realização destas misturas terá de ser feita em colaboração com os fornecedores dos equipamentos de queima, obrigando a regulações específicas dos mesmos, face às características diferentes do combustível: densidade volumica, temperaturas de chama, velocidade de propagação da chama. É uma matéria que exige ainda um trabalho experimental e de teste a realizar em cooperação entre o SCTN, as empresas interessadas e os fornecedores de equipamento visando otimizar as condições em que a injeção pode ser realizada.

**Tabela 4.8. Percentagem de injeção de H<sub>2</sub> (em vol.) no GN e redução correspondente de emissões de CO<sub>2</sub>.**

GN	KG	1000	985	968	931	771	590	272	0
H <sub>2</sub>	kg	0	5,81	12,05	26,08	86,37	154,33	274,17	376,50
GN	% (Vol)	100%	95%	90%	80%	50%	30%	10%	0%
H <sub>2</sub>	% (Vol)	0	5%	10%	20%	50%	70%	90%	100%
Vol GN	m <sup>3</sup>	1247	1227,6	1207,0	1160,5	960,8	735,8	338,9	0,0
Vol H2	m <sup>3</sup>	0	64,6	134,1	290,1	960,8	1716,8	3050,1	4188,5
Vol blend		1247	1292,3	1341,1	1450,6	1921,7	2452,6	3389,0	4188,5
CO <sub>2</sub> emitido	ton	3,00	2,96	2,91	2,79	2,31	1,77	0,82	0,00
CO <sub>2</sub> evitado	ton	0	0,05	0,10	0,21	0,69	1,23	2,19	3,00
CO <sub>2</sub> evitado	%	0%	2%	3%	7%	23%	41%	73%	100,00%

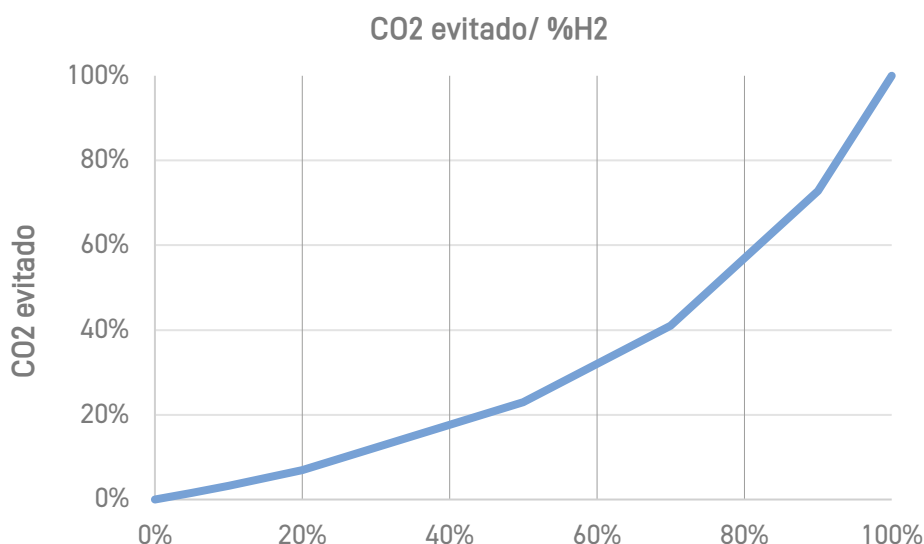
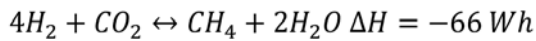


Figura 4.36. Redução de CO<sub>2</sub> - blend - GN:H<sub>2</sub>.

### iii) Metanação com captura de CO<sub>2</sub>

A produção local de metano renovável, é uma alternativa a ser considerada, nomeadamente nos casos de consumos significativos de GN.

Nesta solução procede-se à metanação do H<sub>2</sub>(V)(produzido localmente ou adquirido) por reação com o CO<sub>2</sub> emitido e capturado com a obtenção de Metano renovável (processo de Sabatier):



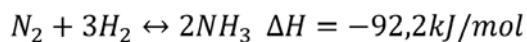
Esta solução tem a vantagem de não ser necessário alterar os atuais processos de combustão (o GN é composto basicamente por Metano - 98%) e de poder ser adotada progressivamente.

A solução passa pela captura do CO<sub>2</sub> emitido, criando um círculo virtuoso da metanação, com emissão nula para o exterior do CO<sub>2</sub> produzido. O O<sub>2</sub> produzido na eletrólise pode ser usado na melhoria do processo de combustão, com redução da entrada de ar, aumentando a concentração do CO<sub>2</sub> nos gases de escape e facilitando a sua captura.

As tecnologias envolvidas (metanação e sequestro de CO<sub>2</sub>) têm TRL elevados (7 a 9) justificando-se uma avaliação económica e tecnológica da solução comparativamente à utilização direta do H<sub>2</sub>.

### iv Amoníaco e blends

A combustão de amoníaco (V) em alternativa ao GN (ou em *blend* com este) é outra solução que está a ser estudada e testada no sentido da descarbonização da rede. A **sintese do amoníaco** (processo de Haber-Bosch), é uma reação catalisada de nitrogénio e hidrogénio:



É um processo industrial já amplamente utilizado, nomeadamente na produção de fertilizantes.

Mas, a abordagem que neste caso se valoriza é a do amoníaco enquanto combustível (pcs= 6,23 kWh/kg) renovável, na medida em que o H<sub>2</sub> usado seja renovável. O nitrogénio é obtido por fracionamento do ar atmosférico. É uma tecnologia em desenvolvimento, no que se refere à sua aplicação em fornos cerâmicos, quer em queima isolada quer em misturas com GN e H<sub>2</sub>.

É um processo que permite reduzir ou mesmo eliminar a emissão de CO<sub>2</sub>, mas que conduz à emissão de NO<sub>x</sub>, que são igualmente nocivas e que terão de ser eliminados.

### v) Hydrogen Valleys/redes de H<sub>2</sub> (V)

A promoção de *Hydrogen Valleys* é uma estratégia que está a ser incentivada pela CE. Corresponde à criação de comunidades de produtores e consumidores de H<sub>2</sub> com ligação a uma rede dedicada de H<sub>2</sub> autónoma da rede de GN. A REN tem em Sines o projeto de um anel de H<sub>2</sub> a que se podem ligar diversos produtores e consumidores. Outros projetos a nível nacional de produção de H<sub>2</sub> assumem este conceito, de uma unidade produtiva a abastecer uma rede de H<sub>2</sub>, a que se podem ligar diferentes *offtakers* (consumidores), com aplicações diferenciadas (mobilidade, descarbonização de processos industriais, consumos industriais...).

É uma solução que permite às empresas industriais a aquisição de H<sub>2</sub> sem os custos associados de investimento, esperando-se que a revisão prevista da ENH2 venha a contemplar os incentivos a estas iniciativas.

### H2 – uma alternativa viável de descarbonização

#### A logística do H<sub>2</sub>

O abastecimento de hidrogénio poderá ser realizado segundo vários modelos:

- Acordos com potenciais fornecedores de hidrogénio, nomeadamente nos casos em que haja uma produção localizada em zonas próximas da unidade industrial;
- Produção própria, por eletrolisadores dimensionados para os objetivos específicos da empresa, neste caso ainda com duas variantes no que se refere à fonte de energia elétrica (instalação dedicada, tendencialmente off-grid ou ligação à rede);
- Partilha de uma central de produção de H<sub>2</sub> com fornecimento comum a várias unidades industriais, ganhando efeito de escala, fator relevante no custo do hidrogénio (*Hydrogen Valley*).

Eventualmente haverá uma evolução na opção das soluções mais adequadas. Numa fase inicial, a aquisição externa do hidrogénio poderá ser a solução mais conveniente, para projetos piloto de teste e demonstração, com a empresa a concentrar-se nas questões associadas aos aspetos técnicos relacionados com a queima do “novo” combustível. A produção autónoma, on site, poderá verificar-se subsequentemente, beneficiando da redução esperada de custos (CAPEX e OPEX).

#### A maturidade das tecnologias e custos

Relativamente às tecnologias de produção de H<sub>2</sub> por eletrólise há atualmente duas principais tecnologias em fase comercial (TRL 9): alcalina e PEM. A tecnologia PEM permite produzir H<sub>2</sub> com elevado grau de pureza (5 noves), de

acordo com os requisitos das pilhas de combustível utilizados na mobilidade. A tecnologia alcalina produz H<sub>2</sub> com menor grau de pureza (3 naves) o que no caso das aplicações de combustão não é relevante, sendo atualmente significativamente mais barata que a PEM (k€/kW). Aparenta-se, porém, para uma evolução tecnológica das PEM, podendo traduzir-se numa redução significativa dos custos de investimento associados até 2030. Em pipeline (TRL 5 a 7) estão outras soluções tecnológicas que poderão entre 2025 e 2030 vir a competir com as soluções atuais: SOE<sup>18</sup>, termólise, membrana anódica. A reter, é o facto de haver atualmente uma oferta de tecnologias com maturidade que responde às especificações da indústria, prevendo-se que até 2030 a gama de alternativas tecnológicas comerciais se alargue com benefício da indústria<sup>19</sup>.

Uma questão a considerar, nos casos em que a opção seja a de produção autónoma de hidrogénio, relaciona-se com a valorização do O<sub>2</sub> produzido na eletrólise. Há um mercado de oxigénio a explorar. A utilização direta deste na combustão traduz-se em melhorias relevantes na eficiência da queima dos combustíveis. É uma temática a estudar e sobre a qual se torna necessário desenvolver trabalho experimental, podendo contribuir para uma redução dos custos globais associados a esta solução (1kg de H<sub>2</sub> representa a produção associada de 8 kg de O<sub>2</sub>).

### Riscos associados e competitividade das empresas

Em termos industriais o hidrogénio é um gás cuja utilização se encontra regulamentada, não diferindo nesse aspeto de outras matérias-primas utilizadas pela indústria. Existe um quadro normativo aplicável a toda a sua cadeia logística a cumprir, e relativamente ao qual há grande experiência industrial. O tratar-se de hidrogénio renovável não introduz qualquer alteração às práticas industriais já aprovadas.

O impacto na competitividade das empresas vai decorrer de outros fatores a ter em consideração futuramente, nomeadamente a penalização associada à emissão de CO<sub>2</sub>. Prevê-se um agravamento significativo destas, podendo-se antecipar valores superiores a €100,00/ton CO<sub>2</sub>, até ao final da corrente década. Esta penalização afetará diretamente o custo do GN consumido pela indústria, em benefício do hidrogénio cujo valor não será afetado.

Segundo o MIBGAS IBHYX, o primeiro índice ibérico de preços do hidrogénio renovável, o preço de produção do H<sub>2</sub> 100% renovável é atualmente de 148,36 €/MWh. Este preço tenderá a reduzir-se significativamente no decorrer da próxima década, pelo efeito conjugado de vários fatores: em termos do CAPEX refere-se o efeito de escala nos custos dos eletrolisadores, aumento do *load factor*, produção em série industrial, tecnologias alternativas emergentes, maiores eficiências e curvas de aprendizagem. Igualmente no que se refere ao OPEX podem-se prever reduções

significativas nos custos da eletricidade renovável, de que os recentes leilões de centrais solares fotovoltaicas constituem um exemplo bem ilustrativo. Conjugando os dois fatores as projeções apontam para a paridade entre o preço do H<sub>2</sub> e do GN<sup>20</sup> até 2035 viabilizando economicamente a substituição do GN por H<sub>2</sub> (V) preservando a competitividade das empresas. À semelhança do que se tem verificado para outros vetores energéticos (PV, eólico e o próprio GN) espera-se que este <sup>gap</sup> possa ser coberto por um quadro de incentivos (nacional e comunitário) que assegure a competitividade das empresas neste período de transição e de que os leilões do Banco Europeu de Hidrogénio são já um primeiro sinal. A alternativa será muito mais penosa no médio prazo.

### Conclusão

O RNC e as metas definidas para a sustentabilidade energética constituem um desafio ao setor cerâmico na parte em que está dependente do GN como principal fonte energética. A EN-H2 identifica a descarbonização da rede de GN como uma das utilizações privilegiadas do hidrogénio. O hidrogénio é um gás combustível a ser utilizado diretamente na indústria, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> nas aplicações em que a eletrificação não é uma solução adequada. A indústria cerâmica está muito diretamente afetada por estas novas realidades. Se hoje o hidrogénio ainda não será uma alternativa competitiva ao gás natural a previsão é que ao longo da década nos deparemos com duas tendências de sentidos contrários e favoráveis ao hidrogénio: aumento dos custos do GN decorrente da penalização das emissões de CO<sub>2</sub> e redução significativa dos custos de produção do H<sub>2</sub> pelas razões enunciadas. No fim do processo, e até 2035, prevê-se que o H<sub>2</sub> (V) em aplicações industriais compita com os custos do GN (€/MJ).

A injeção de H<sub>2</sub>, o blend, o recurso ao Metano (V) e à Amónia (V) são soluções já disponíveis que permitem uma substituição progressiva do GN e conseqüente descarbonização progressiva do setor. Mas, para que essa transição energética possa acontecer sem ruturas haverá muito trabalho preparatório a realizar e experiência a adquirir. A EN-H2 (e mecanismos financeiros associados), o Green Deal e o Innovation Fund são instrumentos já hoje disponíveis para promover a transição energética necessária. Há que os aproveitar.

<sup>18</sup>SOE - Solide Oxide Electrolyser

<sup>19</sup>As descobertas recentes de jazidas de H<sub>2</sub> geológico pode vir a ser uma "wild card" com implicações estratégicas na economia da sustentabilidade estratégica.

<sup>20</sup>Assumindo os custos das licenças de emissão de CO<sub>2</sub> que penalizam o GN e a implementação do CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), que defenda a indústria europeia de dumpings ambientais.

# O HIDROGÉNIO COMO COMBUSTÍVEL HIPOCARBÓNICO, CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES: UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA CERÂMICA

Edgar C. Fernandes

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro IN+, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

A transição energética exige a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis como hidrogénio verde (e os seus derivados) e biogás, especialmente em setores difíceis de descarbonizar, como o da cerâmica. Nestes setores, o hidrogénio pode ser utilizado como co-combustível do metano nos queimadores industriais, embora apresente desafios técnicos devido às suas distintas propriedades termodinâmicas, quando comparadas com as

do metano, como se apresenta na Tabela 4.9. Como consequência, a combustão de uma mistura entre hidrogénio e metano apresenta particularidades interessantes, onde se destaca a velocidade laminar de chama em função da razão de equivalência<sup>21</sup> (ver Figura 4.37), uma característica fundamental no estudo do processo de estabilização de chamas e no projeto de queimadores.

**Tabela 4.9. Propriedades do metano e hidrogénio (1bar, 25°C).**

Combustível	Poder Calorífico Inferior PCI (MJ/kg)	Poder Calorífico Superior PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/m <sup>3</sup> )	Massa específica $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Energia de ignição mínima (mJ)	Coef. difusão em ar D (cm <sup>2</sup> /s)
Metano	50	56	32	0.65	0.29	0.16
Hidrogénio	120	144	9.687	0.08	0.02	0.61

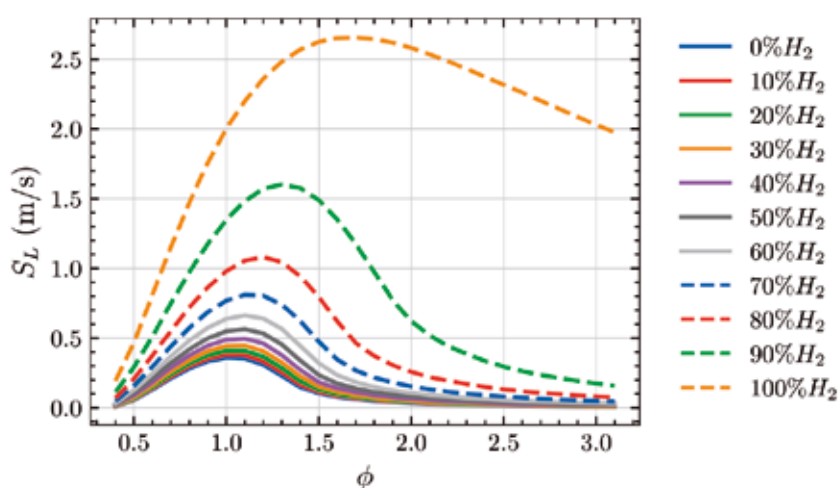


Figura 4.37. Velocidade laminar de chama,  $S_L$ , em função da razão de equivalência,  $\phi$ , para misturas de combustível  $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ .

<sup>21</sup> Simulação numérica de reação química de  $(\text{CH}_4 + \text{H}_2) + \text{ar}$  na plataforma Cantera com a classe de chamas planas e com a base de dados de cinética de reação USC II com a adição do mecanismo de formação de  $\text{NO}_x$ .

A Figura 4.37 apresenta a evolução detalhada da velocidade laminar de propagação de chamas em misturas de CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub> em função da razão de equivalência,  $\phi$ <sup>22</sup>, sob condições PTN. Observa-se um valor máximo próximo da estequiometria, cuja magnitude e localização variam consoante a percentagem de H<sub>2</sub> adicionada. De forma geral, a introdução de H<sub>2</sub> na mistura combustível, até 70% em volume, provoca uma translação quase linear das curvas. No entanto, para percentagens de H<sub>2</sub> superiores a 70%, essa translação torna-se mais acentuada e fortemente não linear, devido ao fato de o mecanismo de combustão do H<sub>2</sub> começar a dominar a cinética química da reação.

Neste contexto, considerando agora os queimadores industriais existentes na indústria da cerâmica, a Figura 4.38 apresenta um esquema típico de queimadores com injeção de ar e combustíveis em linhas distintas. O injetor de combustível situa-se na extremidade do queimador, rodeado por um corpo não fuselado (disco) onde se estabele-

za a chama. O ar primário que passa em redor do disco vem animado de momento angular (rotação) imposta pelas pás fixas ("swirler"). Esta configuração contribui para promover uma mistura turbulenta de ar e combustível, aumentando a gama de estabilidade da chama e criando uma zona de reação próxima do injetor com características de chama de pré-mistura (Zona I) e uma segunda zona a jusante que apresenta uma característica próxima de chamas de pré-mistura parcial (Zona II). Uma mistura de combustível CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub> ao ser injetado num queimador com estas características, enquadradas nas exigências dos processos de tratamento térmico nos fornos, poderá exigir uma adaptação da geometria do queimador, o que terá impacto nos limites de operação e na emissão global de poluentes [1], na característica fluido-reativa da chama nas zonas I e II com impacto na composição química local [2-5], e nas características de radiação espectral para efeitos de deteção e controlo [6, 7].

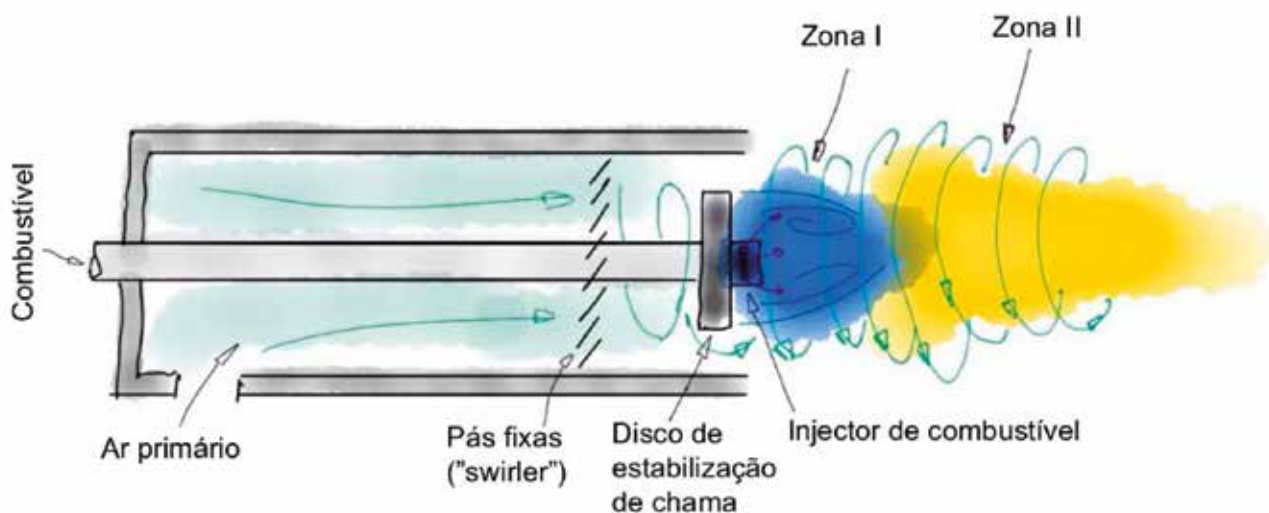


Figura 4.38. Esquema geral de um queimador industrial com estabilização de chamas por disco e rotação do escoamento de ar.

<sup>22</sup>  $\phi < 1$ : chama pobre (excesso de ar),  $\phi > 1$ : chama rica (excesso de combustível),  $\phi = 1$ : chama estequiométrica (ar necessário e suficiente para completa oxidação de C e H)

**Impacto da alteração do combustível na geometria do queimador**

Recorrendo à conservação de massa e de quantidade de movimento entre um reservatório e a zona de injeção de combustível do queimador representando na Figura 4.37, assumindo que as perdas de carga e efeitos de compressibilidade são desprezáveis, obtém-se a seguinte expressão, dada pela Equação 4.1, para a potência de queima:

$$P_{ot}(MW) = \frac{\sqrt{2} A \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{\rho_{ar}}} \left[ \frac{HHV_{mix}}{\sqrt{\frac{\rho_{mix}}{\rho_{ar}}}} \right] \tag{Equação 4.1}$$

onde ΔP (Pa) corresponde à perda de carga entre o reservatório de combustível até ao local de injeção, A (m<sup>2</sup>) é a área de injeção de combustível (mas que conservadoramente se pode também associar à área equivalente da secção transversal do queimador como um todo), HHV<sub>mix</sub> (MJ/m<sub>3</sub>) o máximo calor que se pode obter na queima do combustível ρ<sub>mix</sub> (kg/m<sup>3</sup>) e a massa específica da mistura. Nesta expressão  $\frac{HHV_{mix}}{\sqrt{\frac{\rho_{mix}}{\rho_{ar}}}}$  corresponde ao Índice de Wobbe que depende da fração volúmica x de H<sub>2</sub> na mistura de CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> como expresso na Equação 4.2:

$$Indice\ de\ Wobbe_{mix}(MW/m^3) = \left[ \frac{(1-x)HHV_{CH_4} + x \cdot HHV_{H_2}}{\sqrt{\frac{(1-x)\rho_{CH_4} + x\rho_{H_2}}{\rho_{ar}}}} \right] \tag{Equação 4.2}$$

O índice de Wobbe é um parâmetro importante quando se pretende avaliar a intermutabilidade de combustíveis e corresponde à potência calorífica fornecida a um queimador. Combustíveis com diferentes composições químicas, mas que tenham o índice de Wobbe semelhante garantem a mesma potência térmica do queimador, mantendo a área e queda de pressão de acordo com a

$$P_{ot}(MW) = \frac{\sqrt{2} A \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{\rho_{ar}}} \left[ \frac{HHV_{mix}}{\sqrt{\frac{\rho_{mix}}{\rho_{ar}}}} \right] \tag{Equação 4.1}$$

A evolução do índice de Wobbe com a fração volúmica de H<sub>2</sub> encontra-se representada na Figura 4.39 e mostra que a evolução não é constante.

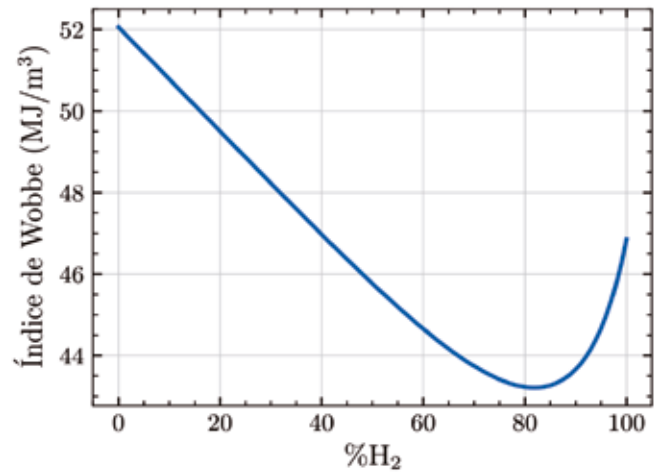


Figura 4.39. Evolução do índice de Wobbe com a fração volúmica de H<sub>2</sub> na mistura entre CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>.

Assim, para uma adaptação deste tipo de queimadores a esta nova mistura de combustível, a recomendação conservadora e clássica que sugeriria a manutenção do índice de Wobbe como aproximadamente constante por forma a minimizar qualquer impacto no desenho da instalação, admite agora [8] a possibilidade do índice de Wobbe da nova mistura poder ser reduzida até 0.95 do valor original (a que corresponde uma injeção máxima de 10% H<sub>2</sub>), sem alteração da geometria do queimador mas sacrificando a potência de queima segundo a

$$P_{ot}(MW) = \frac{\sqrt{2} A \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{\rho_{ar}}} \left[ \frac{HHV_{mix}}{\sqrt{\frac{\rho_{mix}}{\rho_{ar}}}} \right] \tag{Equação 4.1}$$

Porém, admitindo que se pretende manter a potência constante

$$P_{ot}(MW) = \frac{\sqrt{2} A \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{\rho_{ar}}} \left[ \frac{HHV_{mix}}{\sqrt{\frac{\rho_{mix}}{\rho_{ar}}}} \right] \tag{Equação 4.1}$$

deveremos como linhas de orientação manipular o termo A (área dos injetores ou área do queimador) e/ou a parcela ΔP (Pa) compensando assim a variabilidade do índice de Wobbe (semelhante ao sugerido por Quintino et al. [9] para a utilização de biogás e H<sub>2</sub> em queimadores domésticos). Contudo, é de esperar que estas alterações tenham implicação direta na morfologia de chama (Zona I e II na Figura 4.38).



### Impacto da alteração do combustível na emissão global de poluentes

Para uma avaliação global do impacto da adição de H<sub>2</sub>, numa mistura com CH<sub>4</sub>, no processo de queima conjunto das zonas I e II da chama (ver Figura 4.38), devemos admitir queima completa do combustível num sistema adiabático (simulação numérica de reação química de (CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>)+ar na plataforma Cantera com a classe de chamas planas e com a base de dados de cinética de reação USC II com a adição

do mecanismo de formação de NO<sub>x</sub>). A Figura 4.40 mostra a evolução da temperatura, CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub> com a razão de equivalência, para três composições de combustível (100% CH<sub>4</sub>, 50% CH<sub>4</sub>+50% H<sub>2</sub>, 100% H<sub>2</sub>). De um modo geral verifica-se que o maior aumento de temperatura é da ordem de 10% (metano puro vs hidrogénio puro), há uma redução de CO<sub>2</sub> da ordem de 20% com adição de 50% de H<sub>2</sub> e que a emissão de NO<sub>x</sub> é ligeiramente inferior à do metano puro nas mesmas condições, mas que aumenta substancialmente com 100% H<sub>2</sub>.

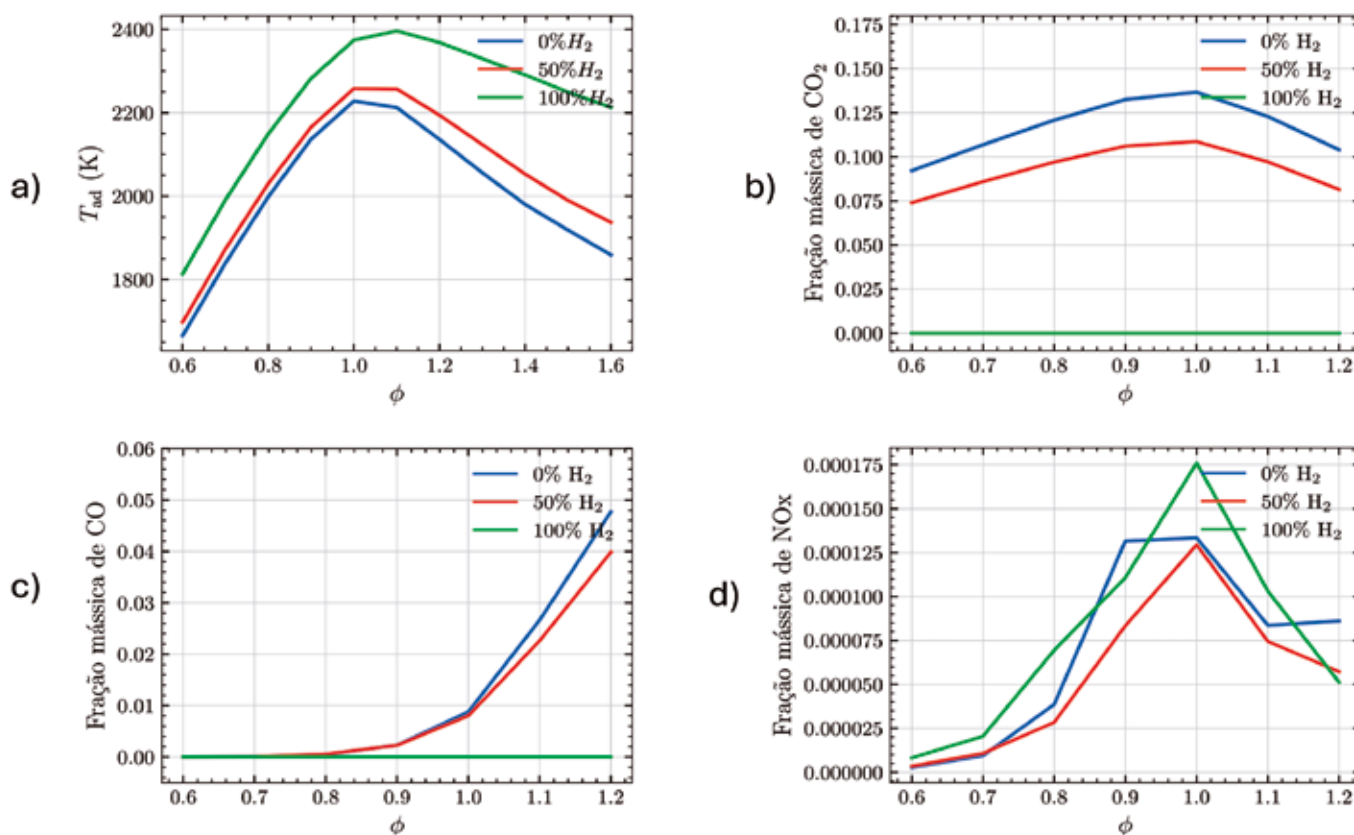


Figura 4.40. Impacto da adição de H<sub>2</sub>, numa mistura de CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>, em: a) Temperatura; b) CO<sub>2</sub>; c) CO e d) NO<sub>x</sub> em função da razão de equivalência

A Figura 4.41 a) apresenta agora a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> em função da percentagem de H<sub>2</sub> na mistura CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> para três razões de equivalência (chama pobre, estequiométrica e rica). Por outro lado, a Figura 4.41 b) ilustra a redução percentual das emissões de CO<sub>2</sub> em função da percentagem de H<sub>2</sub>, considerando as mesmas razões de equivalência.

De forma geral, os resultados indicam que a introdução de hidrogénio numa mistura combustível de metano e hidro-

génio tem um impacto significativo na redução absoluta de CO<sub>2</sub> emitido, dependendo da razão de equivalência. A percentagem de redução de CO<sub>2</sub> em função da adição de H<sub>2</sub> apresenta uma evolução de carácter exponencial e demonstra ser quase independente das razões de equivalência analisadas (ver Figura 4.41 b). Observa-se que uma injeção de 10% de H<sub>2</sub> resulta numa redução de aproximadamente 5% nas emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto uma redução de 50% nas emissões de CO<sub>2</sub> requer uma mistura combustível com 80% de H<sub>2</sub> em volume.

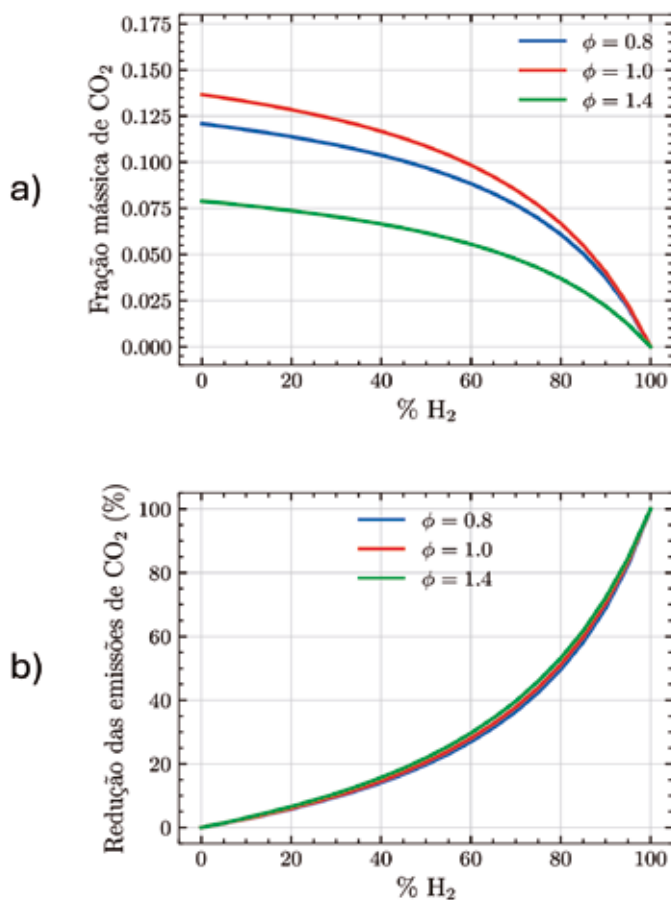


Figura 4.41. Impacto da adição de H<sub>2</sub> numa mistura de CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub> para três razões de equivalência, na: a) fração mássica de CO<sub>2</sub> e na b) redução de emissão de CO<sub>2</sub>

### Impacto da alteração do combustível na morfologia de chama

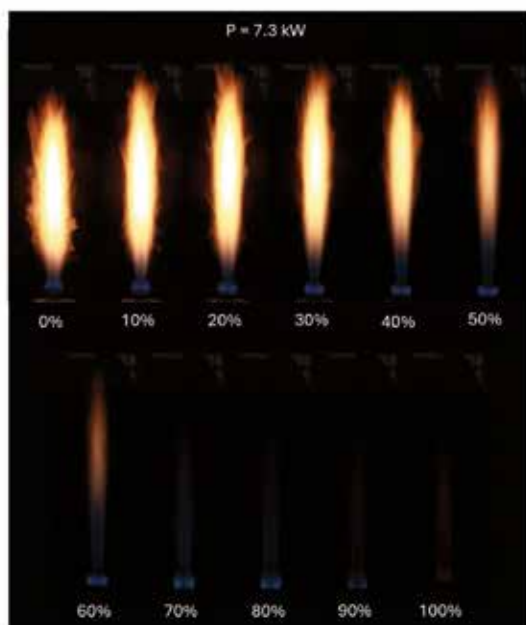
As propriedades distintas e a não linearidade na cinética química, em função das misturas de CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, determinam que a morfologia da chama obtida em queimadores industriais, como ilustrado na Figura 4.38, apresente configurações características, exemplificadas na Figura 4.42 a) [10]. Neste estudo, considera-se uma mistura de combustível variando de 100% CH<sub>4</sub> a 100% H<sub>2</sub>, com um escoamento de ar rotativo caracterizado por um número de Swirl = 0.2, número de Reynolds (Re) = 3000 e caudal volumétrico de ar de 124 LPM. Este regime de escoamento turbulento assegura uma mistura parcial de combustível e ar, mantendo uma potência térmica constante de 7.3 kW.

Observa-se na chama a presença de duas regiões distintas:

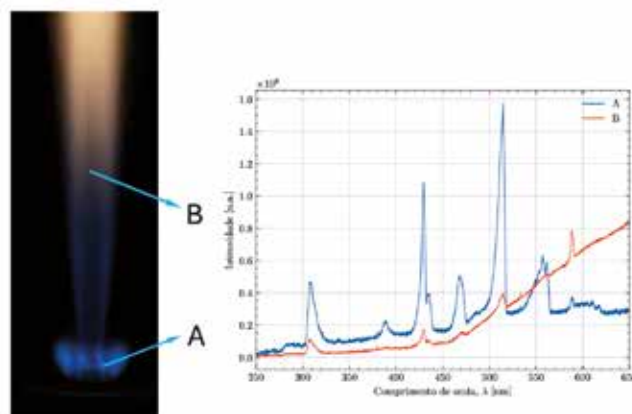
1. **Zona I**, localizada junto ao injetor, com características típicas de combustão em pré-mistura, evidenciada pela tonalidade azulada.

2. **Zona II**, mais extensa e situada a jusante, apresentando características de pré-mistura parcial ou combustão por difusão, com tonalidades avermelhadas associadas a condições redutoras, até um teor de injeção de H<sub>2</sub> de 60%.

Os espectros radiativos obtidos para estas regiões estão representados na Figura 4.42 b). Para uma chama com 50% de H<sub>2</sub>, os espectros foram medidos na **região A** (correspondente à Zona I) e na **região B** (correspondente à Zona II). Ambos os espectros revelam picos de emissão característicos, associados aos radicais excitados das famílias OH\*, CH\* e C<sub>2</sub>\*, bem como uma emissão contínua acima de 500 nm, atribuída à radiação de fuligem gerada na Zona II devido à combustão em condições redutoras. A monitorização ótica destes picos de emissão constitui a base para o desenvolvimento de sistemas de controlo e diagnóstico não intrusivos, capazes de estimar em tempo real as propriedades da combustão na chama.



a)



b)

Figura 4.42. Estudo experimental sobre o efeito da adição de H<sub>2</sub> num queimador industrial:

a) Evolução de chamas de CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>, com variação da fração volumétrica de H<sub>2</sub>, para uma potência fixa de 7.3kW.

b) Espectros na região visível da chama com 50% H<sub>2</sub> em duas regiões distintas: Região A = Zona I correspondente à base da chama junto ao injetor (chama azul) e Região B = Zona II a jusante do injetor (chama amarela).

### Resumo técnico sobre a conversão de queimadores para misturas CH<sub>4</sub>+ H<sub>2</sub> no tratamento térmico em fornos industriais:

Com base na análise do índice de Wobbe, na expressão para a potência térmica de combustão, nos resultados da reação global de combustão e nas características de emissão radiativa, propõem-se as seguintes diretrizes:

#### Injeção de H<sub>2</sub> até 10% em volume:

- Mínimas alterações na geometria do queimador, uma vez que a estrutura de chama e a potência térmica permanecem praticamente inalteradas.
- Redução das emissões globais de CO<sub>2</sub> em até 5%.

#### Injeção de H<sub>2</sub> entre 10% e 80% em volume:

- Modificações significativas na geometria do queimador para garantir a estabilidade e a estrutura da chama, conforme os requisitos específicos dos processos de tratamento térmico.
- A redução das emissões de CO<sub>2</sub> pode atingir até 50%.

- As alterações necessárias na geometria do queimador poderão ser feitas para também acomodar a utilização de biogás (CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>) com vantagens de sustentabilidade ambiental na emissão de CO<sub>2</sub>.

- Mantém-se viável a utilização de técnicas de diagnóstico e detecção óticas no controlo da chama.

#### Injeção de H<sub>2</sub> superior a 80% em volume:

- Alterações substanciais na geometria do queimador para acomodar as características dominantes de combustão do H<sub>2</sub>, como a elevada reatividade e difusividade térmica.
- Observa-se uma transformação profunda na morfologia da chama, com reduções de CO<sub>2</sub> superiores a 50%.
- Contudo, o diagnóstico ótico e o controlo da chama por emissão espectral tornam-se desafiantes por perda de emissão espectrais associadas aos radicais CH\* (emissão azul) e C<sub>2</sub>\* (emissão verde). Nestas condições, recomenda-se a injeção parcial de biogás contendo CO<sub>2</sub> biogénico e/ou NH<sub>3</sub> verde, permitindo uma operação global do queimador mais próxima das condições observadas com misturas de H<sub>2</sub> na faixa de 10% a 80%.

### Referências

- [1]. Anacleto, P. M.; Fernandes, E. C.; Heitor, M. V.; Shtork, S. I. "Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor". *Combustion Science and Technology*, 2003, vol. 175, n.º 8, p. 1369-1388. DOI: 10.1080/00102200302354. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00102200302354>
- [2]. Fernandes, E. C.; Heitor, M. V.; Shtork, S. I. "An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor". *Experiments in Fluids*, 2006, vol. 40, n.º 2, pp. 177-187. DOI: 10.1007/s00348-005-0034-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0034-4>
- [3]. Cala, C. E.; Fernandes, E. C.; Heitor, M. V.; Shtork, S. I. "Coherent structures in unsteady swirling jet flow". *Experiments in Fluids*, 2005, vol. 39, n.º 6, pp. 1026-1039. DOI: 10.1007/s00348-005-0066-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0066-9>
- [4]. Shtork, S. I.; Cala, C. E.; Fernandes, E. C. "Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, vol. 31, n.º 7, pp. 779-788. DOI: 10.1016/j.exptthermflusci.2006.08.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2006.08.008>
- [5]. Shtork, S. I.; Vieira, N. F.; Fernandes, E. C. "On the identification of helical instabilities in a reacting swirling flow". *Fuel*, 2008, vol. 87, n.º 10 11, p. 2314-2321. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.10.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.10.016> researchportal.ulisboa.pt+1

[6]. Quintino, F. M.; Trindade, T. P.; Fernandes, E. C. "Biogas combustion: Chemiluminescence fingerprint". *Fuel*, 2018, vol. 231, pp. 328-340. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.086. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.086>

[7]. Rocha, N.; Quintino, F. M.; Fernandes, E. C. "H<sub>2</sub> enrichment impact on the chemiluminescence of biogas/air premixed flames". *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, n.º 4, pp. 3233-3250. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.115. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.115>

[8]. Shkarovskiy, A.; Koliienko, A.; Turchenko, V. "Interchangeability and Standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen". *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, n.º 1, pp. 33-45. DOI: 10.23968/2500 0055 2022 7 1 33 45. Disponível em: <https://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/543>

[9]. Quintino, F. M.; Nascimento, N.; Fernandes, E. C. "Aspects of Hydrogen and Biomethane Introduction in Natural Gas Infrastructure and Equipment". *Hydrogen*, 2021, vol. 2, n.º 3, pp. 301-318. DOI: 10.3390/hydrogen2030016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673 4141/2/3/16>

[10]. Santa Rita, Diogo. "Refitting of a low swirl burner for a fuel blend of methane and hydrogen for ceramic industry applications" [MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa]. Lisboa, 2023.



# O CONTRIBUTO DAS REDES DE GÁS NATURAL NA DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA

Nuno Nascimento  
Floene

Sendo um setor energeticamente intensivo, a indústria cerâmica é classificada como *hard-to-abate*, o que significa que a sua descarbonização representa um desafio acrescido.

Todavia, este desafio tem sido minimizado por via da ligação às redes de gás, sendo estas o veículo da primeira grande descarbonização deste setor, ao permitir a mudança de combustíveis fósseis com elevada carga poluente (ex. fuel óleo, diesel, GPL, etc.) para o gás natural.

A mudança para o gás natural tem permitido uma redução da pegada carbónica num setor cujos processos produtivos de alta temperatura estão aliados a consumos muito elevados de energia, com particular foco na utilização intensiva e ininterrupta de gás natural. De acordo com a Figura 4.43, esta mudança contribui com, aproximadamente, uma redução entre 16% e 32% nas emissões de carbono. Neste contexto, as redes de gás têm assumido, ao longo dos tempos, um papel importante no processo de descarbonização do setor industrial. As redes de gás têm, portanto, vindo a revelar-se bastante resilientes na sua função central de distribuição de energia, de uma forma segura e competitiva, e alinhadas com os objetivos de crescente incorporação de gases de origem renovável, como o hidrogénio verde (H<sub>2</sub>) e o biometano. Importa ain-

da salientar a vantagem oferecida pela rede de distribuição de gás portuguesa: sendo uma das mais modernas da Europa, e constituída por mais de 94% de polietileno, reúne já condições para a distribuição de moléculas de H<sub>2</sub>. A crescente incorporação de gases com origem renovável, permitirá uma gradual descarbonização dos consumos energéticos industriais, diminuindo assim a pegada carbónica associada.

O tecido industrial está associado a elevadas quantidades de energia consumida. Para satisfazer as suas necessidades, as unidades industriais precisam de ver assegurada a segurança de abastecimento e a acomodar os preços da energia nas suas operações e processos. Com o conflito na Ucrânia, estas necessidades fizeram-se acentuar, levando a um aumento muito significativo dos preços de energia e a uma incerteza do fornecimento. A incerteza gerada com a crise energética, conduziu a perda de competitividade de algumas indústrias e, em alguns casos, à cessação de atividade. As redes de gás têm também aqui um papel fulcral, tendo historicamente garantido uma segurança de abastecimento energético, através de soluções competitivas, com custos baixos para o consumidor final. São, portanto, um garante de segurança de abastecimento, quer em termos de continuidade de negócio, quer de custos para as indústrias.

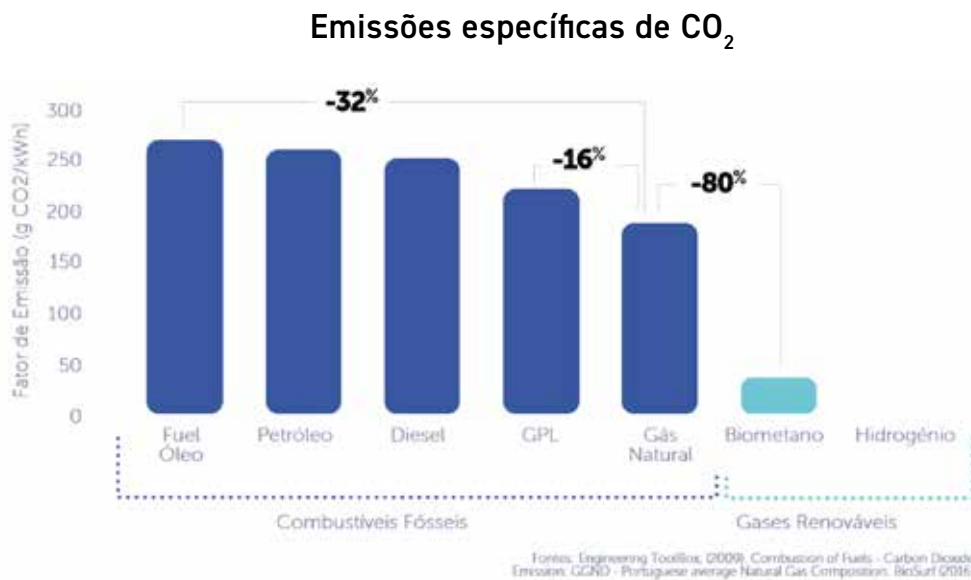


Figura 4.43. Emissões específicas de dióxido de carbono por combustível.



Sendo o setor cerâmico um forte consumidor de gás natural, e com os fatores acima mencionados sendo cruciais para a atividade desta indústria, a descarbonização do setor estará intimamente ligada à descarbonização das redes de distribuição, através da injeção de gases com origem renovável. Este caminho para a descarbonização terá desafios técnicos e tecnológicos para os industriais, bem como para a rede de distribuição, desafios esses que têm já sido endereçados por vários industriais e que estão continuamente a ser estudados pelos operadores da rede. O futuro do setor terá, assim, um parceiro de descarbonização nas redes de gás.

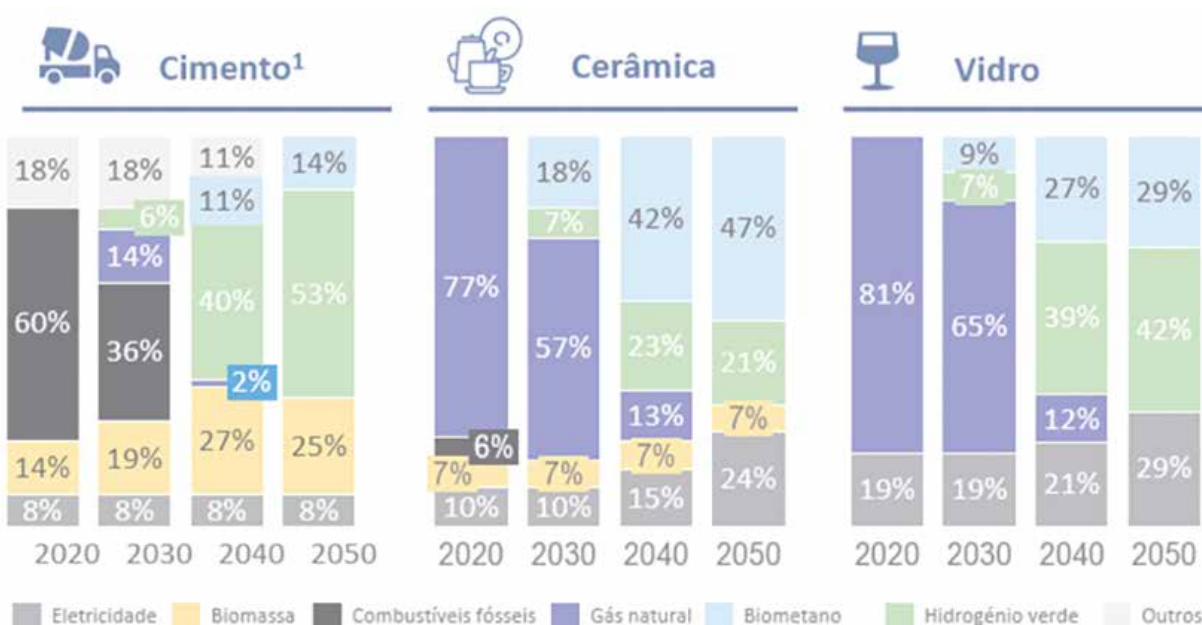
Os mais de 100 industriais cerâmicos já abastecidos pelas redes de distribuição de gás, encontram nestas uma solução económica, democrática e mais simples para atingir as metas de redução da pegada carbónica. Estes fatores serão cruciais para garantir o futuro do setor em Portugal, sem perda de competitividade.

Englobado num recente estudo desenvolvido por uma consultora internacional intitulado de "Redes de Futuro", estudo este com o intuito de analisar em detalhe o papel das redes nacionais de gás e a sua evolução ao longo das próximas décadas, detalhou também a evolução expectável dos consumos energéticos associados ao setor, ilustrados na figura seguinte.

Para o setor cerâmico, estima-se que 68% das necessidades energéticas possam ser aprovisionadas por gases

renováveis, com o biometano a fornecer quase metade de toda a energia consumida pelo setor. O hidrogénio permite suprir mais de um quinto de todas as necessidades energéticas, sendo que este poderá conduzir a necessidades de adaptação de equipamentos. Neste sentido, a indústria cerâmica tem já hoje investido na sua descarbonização, identificando os processos suscetíveis de serem adaptados para reduzir a sua pegada carbónica. As empresas do setor estão comprometidas com a transição energética, melhorando os seus fornos, otimizando processos e estudando novas tecnologias, nomeadamente no que respeita à incorporação de hidrogénio. A substituição gradual do gás natural por gases com origem renovável – nomeadamente o biometano, metano sintético ou o hidrogénio verde – conduzirá à descarbonização total da rede de distribuição de gás e, conseqüentemente, dos seus clientes, processos e consumos. O setor cerâmico evoluirá também neste sentido.

Em conclusão, é já hoje possível afirmar que as redes de gás desempenharam, e continuarão a desempenhar um papel crucial na transformação e descarbonização do setor cerâmico. No passado, com o acesso ao gás natural, e no futuro, com a distribuição de gases renováveis, este setor sempre teve nas redes de distribuição um garante energético para os seus processos, altamente intensivos em termos de consumos. A moderna e eficiente infraestrutura das redes de gás, possibilita uma transição energética sustentável, de forma segura e competitiva, num setor onde estas condições são absolutamente cruciais.



<sup>1</sup> A biomassa e os resíduos renováveis no cimento incluem: resíduos industriais, domésticos e florestais.

Figura 4.44. Evolução do mix energético em setores hard-to-abate.



# SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Blanca I. Arias-Serrano, Catarina Matos, David Parra

Centro Ibérico de Investigação em Armazenamento Energético Iberian (CIIAE), Cáceres, Espanha

## Introdução

Os produtos cerâmicos servem uma ampla gama de aplicações; como por exemplo: construção, equipamento industrial, bens de consumo, saúde, eletrónica, transportes, defesa, aeroespacial e eletrodomésticos. As suas propriedades funcionais, como a elevada durabilidade, estabilidade térmica e resistência química, representam algumas das suas principais vantagens em muitos destes setores. Desempenham também um papel importante nos sistemas de energia renovável, por exemplo como componentes em painéis solares térmicos ou em pilhas de combustível e/ou eletrolisadores. Importa referir que a maior quota de aplicação da cerâmica provém de revestimentos e pavimentos (31,8%) e de tijolos e telhas cerâmicas (20,9%), seguindo-se os refratários (18,2%), os abrasivos (9,3%) e as cerâmicas técnicas (9%). Outras quotas menores, mas ainda assim relevantes, incluem os sanitários, a louça de mesa e os tubos cerâmicos. [1, 2] No geral, a indústria cerâmica europeia combina uma estrutura produtiva altamente descentralizada, distribuída por 30 países da UE, com uma forte posição exportadora (saldo comercial positivo superior a 5 mil milhões de euros).<sup>1</sup> Globalmente, gera mais de 26 mil milhões de euros e cerca de 80% das suas operações estão associadas a PME, empregando diretamente cerca de 200.000 pessoas.<sup>1</sup> Contudo, permanece altamente sensível aos custos energéticos, que podem representar até 30% das despesas de produção.[1-3]

A indústria cerâmica representa uma parte significativa da atividade industrial da Península Ibérica. De acordo

com dados do Eurostat de 2020, Espanha e Portugal foram responsáveis por cerca de 14,6% e 4% do valor total da produção cerâmica da UE27, acolhendo mais de 4.000 instalações de produção cerâmica. Isto coloca a Península Ibérica entre as regiões mais ativas da Europa no fabrico cerâmico, seguindo países líderes como a Alemanha e a Itália, que representam cerca de 16% e 24%, respetivamente. [1]

As unidades de produção cerâmica dependem fortemente de processos térmicos, particularmente fornos, secadores e atomizadores, que requerem temperaturas constantes acima dos 1000 °C e são normalmente alimentados a gás natural. Esta dependência de energia térmica de alta temperatura resulta em elevado consumo de combustível e elevadas emissões de CO<sub>2</sub>. A nível da UE, o setor cerâmico é responsável por mais de 120 TWh de consumo energético anual e por quase 19 MtCO<sub>2</sub> de emissões, posicionando-se entre as indústrias mais intensivas em energia no âmbito do EU ETS. [1, 2, 4]

Reduzir a dependência da indústria cerâmica dos combustíveis fósseis através de: (i) eletrificação e/ou (ii) integração de sistemas avançados de armazenamento de energia (ES, da sigla inglesa *Energy Storage*) é considerado essencial para atingir os objetivos climáticos da UE e reforçar a resiliência económica.[2-4]. É importante notar que esta transição poderá, simultaneamente, servir de modelo para esforços semelhantes noutros setores de difícil descarbonização, [5] ao mesmo tempo que assegura a competitividade a longo prazo de um dos setores industriais mais consolidados da Península Ibérica.

## O papel do armazenamento de energia na indústria cerâmica

Os sistemas de armazenamento de energia (ES) estão a tornar-se um componente-chave dos sistemas energéticos à medida que a descarbonização da nossa economia avança. O principal motor desta mudança é a penetração de tecnologias de energia renovável, como a solar e a eólica, que são estocásticas e, portanto, não conseguem fornecer energia conforme a necessidade. As tecnologias de ES são classificadas em diferentes categorias com base nos seus princípios físicos e/ou químicos, nomeadamente: químicas, eletroquímicas, elétricas, mecânicas e térmicas. Estas famílias abrangem um vasto leque de tecnologias específicas, cada uma com as suas próprias características e aplicações. Curiosamente, algumas tecnologias de ES poderão desempenhar um papel crucial na descarbonização da indústria cerâmica, onde a volatilidade dos preços da energia e as elevadas necessidades de calor a altas temperaturas podem gerar tanto incertezas financeiras como desafios ambientais. Ao atuar como um amortecedor entre a produção e o consumo de energia renovável, os sistemas de ES podem fornecer energia renovável conforme a necessidade, em particular a energia solar e eólica em crescimento, enquanto melhoram a flexibilidade dos processos produtivos. Entre as opções de ES, destacam-se três grupos principais de tecnologias capazes de apoiar o cumprimento das metas do Fit for 55 e do *Net-Zero Industry Act* (NZIA) para a descarbonização da indústria cerâmica (Tabela 4.10).




O armazenamento de energia elétrica (EES), utilizando tecnologias de baterias de iões de lítio ou outras (por exemplo, baterias à base de sódio e baterias de fluxo), poderá de-

sempear um contributo importante na descarbonização da indústria cerâmica. O seu principal valor reside em fornecer eletricidade renovável, como solar e eólica, conforme a necessidade, bem como em facilitar a eletrificação parcial de determinados processos.

O EES, quando associado a tecnologias renováveis, pode acrescentar valor à indústria cerâmica desempenhando funções tais como:

- **aumento do autoconsumo de energia renovável** (autosuficiência energética), ou seja, carregar um EES sempre que a geração renovável local for superior à procura de eletricidade local e descarregar quando for inferior.
- **evitar o desperdício de eletricidade renovável**, ou seja, carregar um EES durante períodos de pico de geração renovável em redes elétricas que não acomodem esses picos.
- **deslocamento da carga da procura elétrica**, ou seja, carregar um EES para antecipar ou adiar o consumo de eletricidade quando os preços de venda ao consumidor são mais baixos, e descarregar um EES quando os preços são mais altos, devido à variação temporal dos preços da eletricidade.
- **atenuação de picos de consumo elétrico**, ou seja, descarregar um EES para suprir picos na curva de procura elétrica que determinam a componente da tarifa elétrica baseado na potência.
- **fonte de energia de reserva (back-up)** em caso de falha na rede elétrica.

**Tabela 4.10. Resumo das tecnologias de armazenamento elétrico (ES) e do seu papel no apoio à descarbonização da indústria cerâmica.**

Tecnologia de armazenamento de energia (ES)	Oportunidade	Aplicação na indústria cerâmica
 EES	Integração de energias renováveis, redução de picos de consumo, autoconsumo	Armazenamento de energia solar/eólica, redução da dependência do sistema elétrico
 HyES	Armazenamento de longa duração, substituição do gás natural (GN), compensação sazonal	Substituição do GN em fornos, fonte de calor backup, Armazenamento de energia renovável a longo prazo
 TES	Recuperação de calor residual, reutilização do calor nos processos de secagem/queima	Recuperação de calor dos fornos/ gases de combustão para uso na secagem e pré-aquecimento do ar

Embora as baterias elétricas não sejam adequadas para fornecer diretamente energia a processos de alta temperatura, como sinterização ou queima, podem efetivamente apoiar processos de baixa e média temperatura (por exemplo, secagem ou pré-aquecimento) [6]. Estes processos frequentemente exigem um fornecimento de calor controlado e contínuo, que pode ser assegurado por aquecedores elétricos alimentados por baterias carregadas durante períodos de baixa procura ou de elevada disponibilidade de energia renovável. Para além das aplicações específicas nos processos, o EES pode armazenar excedentes de energia renovável e fornecer energia a sistemas auxiliares, como misturadores, transportadores ou unidades de controlo/monitorização. As principais barreiras continuam a estar relacionadas com o elevado custo inicial por kWh armazenado (Li-ion 100-300 €/kWh), a inadequação face às necessidades térmicas centrais de alta temperatura (>900 °C) e os desafios ao longo do ciclo de vida devido às taxas de degradação em ambientes industriais. [7]

O armazenamento de energia baseado em hidrogénio (HyES) está entre as soluções mais promissoras para substituir combustíveis fósseis em processos cerâmicos de alta temperatura, onde os fornos normalmente operam entre 900 - 1400 °C. Semelhante ao gás natural, o hidrogénio pode ser queimado diretamente para fornecer calor de alta temperatura, misturado (20-30% com gás natural) ou utilizado puro em sistemas de queimadores recém-desenhados. A capacidade de armazenar hidrogénio durante longos períodos (por exemplo, várias semanas, ao contrário das baterias) torna-o também adequado para lidar com variações diárias ou sazonais na produção de energia renovável, especialmente quando combinado com eletrolisadores que sincronizam a produção de hidrogénio com o excedente de energia renovável, ou seja, promovendo um autoconsumo renovável de longo prazo. Assim, a aplicação do HyES pode ser especialmente relevante em fornos contínuos e fornos de túnel, onde é necessário manter uma carga térmica elevada e estável durante longos períodos de operação. Para além das necessárias adaptações nos queimadores e nos sistemas de controlo, a combustão de hidrogénio altera significativamente a atmosfera do forno, uma vez que os típicos subprodutos de CO<sub>2</sub> e CO provenientes da combustão do gás natural estão ausentes, evitando a sua contribuição nos processos de vidro e acabamento das peças finais através de processos redutores. [8] No entanto, outros aspetos, como diferentes dinâmicas de combustão com uma velocidade da chama três vezes superior, elevadas emissões de NO<sub>x</sub> resultantes das temperaturas mais altas da chama e os custos de *retrofit* continuam a ser obstáculos-chave não resolvidos. Projetos-piloto atuais nesta área procuram abordar estas desvantagens, promovendo soluções customizadas para os processos mais sensíveis aos materiais.

Partindo das tecnologias de hidrogénio, as tecnologias *power-to-X*, como a metanação, oferecem maior flexibilidade ao converter o hidrogénio produzido em combustí-

veis armazenáveis, que podem ser utilizados diretamente nos processos de produção sem grandes modificações. No entanto, a reação de metanação requer um consumo intensivo de energia, infraestruturas de captura de carbono e introduz perdas adicionais de eficiência no sistema. [9] Estes fatores aumentam significativamente a complexidade operacional e tornam as aplicações diretas de hidrogénio mais atrativas quando tecnicamente viáveis, apesar dos desafios de compatibilidade com alguns materiais e processos. As tecnologias HyES também oferecem potencial para soluções híbridas, em que parte da energia é fornecida por sistemas elétricos (por exemplo, durante a secagem) e parte por combustão de hidrogénio (por exemplo, durante a queima). A investigação e desenvolvimento existentes estão focados em otimizar a conversão catalítica e os sistemas híbridos que utilizam combustíveis *power-to-X* apenas durante as fases de combustão mais sensíveis, com o objetivo de equilibrar a qualidade cerâmica com as metas de descarbonização.

O armazenamento de energia térmica (TES) constitui a opção de armazenamento mais direta e integrada para descarbonizar a indústria cerâmica, dada a sua elevada dependência de energia térmica ao longo de uma ampla gama de temperaturas (100-1400 °C). Os sistemas TES podem armazenar calor utilizando materiais que sofrem aumentos de temperatura (armazenamento por calor sensível), mudanças de fase (calor latente) ou reações químicas reversíveis (armazenamento termoquímico). Entre estes, o armazenamento por calor sensível é o mais desenvolvido e de aplicação imediata no setor cerâmico, devido à sua simplicidade e baixo custo (15-30 €/kWh). [10] Muitos processos intrínsecos da produção cerâmica geram calor residual que pode ser recuperado e armazenado para utilização posterior. Por exemplo, o calor proveniente dos gases de exaustão dos fornos pode ser armazenado em meios sólidos, como tijolos refratários, betão ou até resíduos cerâmicos da própria linha de produção (por exemplo, azulejos partidos, peças cozidas rejeitadas), que apresentam elevada estabilidade térmica e capacidade calorífica (Cp). Assim, estes materiais podem constituir a base de uma bateria térmica, alinhada com os princípios da economia circular, que é carregada com calor residual e posteriormente utilizada para, por exemplo, pré-aquecer o ar de combustão, alimentar secadores ou manter a temperatura do forno durante períodos de inatividade — aumentando a eficiência em 10-25%.

O armazenamento de energia térmica latente é particularmente adequado para as etapas de secagem, que tipicamente operam entre 150-250 °C e exigem necessidades energéticas variáveis consoante a humidade e/ou uma maior densidade de energia volumétrica. Para outros processos, como a cozedura ou a sinterização, onde as necessidades energéticas são superiores, os sistemas TES podem ser acoplados a eletricidade de origem renovável, utilizando aquecimento por resistência elétrica ou indução para carregar e armazenar calor durante as horas de

ponta e fornecê-lo durante as horas de vazio (i.e., deslocamento da carga da procura). Embora ainda em desenvolvimento, os ciclos termoquímicos baseados em reações químicas mostram potencial para estas aplicações de alta temperatura (800-1200 °C), pois oferecem elevada densidade energética e a capacidade de armazenar calor sem perdas para fornos descontínuos ou produção sazonal. [11]

Apesar do seu potencial, os sistemas TES ainda enfrentam barreiras críticas que dificultam a sua adoção generalizada na indústria. As limitações dos materiais (baixa condutividade térmica) e dos permutadores de calor (baixa transferência de calor/massa) restringem significativamente a sua capacidade de fornecer potência. A compatibilidade térmica e a degradação dos materiais ao longo dos ciclos de carga/descarga exigem frequentemente um controlo preciso da temperatura, o que constitui um desafio para fornos cerâmicos com variabilidade térmica inerente. Além disso, as complexidades de integração ao adaptar infraestruturas existentes requerem modificações substanciais, limitando a viabilidade financeira.

Por fim, o armazenamento de energia híbrido (HbES) entre as diferentes tecnologias surge como uma solução robusta, combinando as vantagens únicas de cada sistema enquanto mitiga as suas limitações individuais. Os sistemas TES e HyES destacam-se em aplicações de longa duração e alta temperatura, enquanto os sistemas EES oferecem resposta rápida perante flutuações renováveis e necessidades de gestão da rede elétrica. A integração destas tec-

nologias pode permitir uma gestão inteligente da energia, utilizando EES para processos de elevada precisão, como a cozedura de vidrados, TES para a recuperação de calor residual em etapas de secagem, e HyES para ciclos de cozedura a alta temperatura. Além disso, os futuros sistemas de controlo inteligentes irão otimizar ainda mais o equilíbrio entre estas tecnologias, com base em preços de energia em tempo real, requisitos do processo e disponibilidade de renováveis. À medida que a indústria cerâmica avança rumo à descarbonização, uma abordagem multi-tecnológica poderá trazer particular valor para grandes fornos contínuos, ajudando a suavizar tanto a variabilidade diária como a sazonal, preservando simultaneamente os padrões de qualidade do produto.

### Demonstrações-piloto na descarbonização da indústria cerâmica

A Tabela 4.11 destaca exemplos selecionados do potencial da integração de tecnologias de armazenamento de energia (ES) no setor cerâmico. Embora não se pretenda que constitua um registo exaustivo de todos os projetos existentes, fornece uma contextualização representativa dos principais esforços na Península Ibérica e em outros países, onde HyES, TES e HbES estão a ser implementados.

A integração de HyES representa uma oportunidade estratégica e de longo prazo para descarbonizar o setor cerâmico. Diversas iniciativas-piloto fornecem fortes evidências sobre a viabilidade de substituir o gás natural por

**Tabela 4.10. Resumo das tecnologias de armazenamento elétrico (ES) e do seu papel no apoio à descarbonização da indústria cerâmica.**

Integração	ES	Aplicação	Benefícios	Projeto/Iniciativa
Combustão de hidrogénio em fornos	HyES	Cozedura de azulejos	Demonstrou a viabilidade do hidrogénio a altas temperaturas	Lhyfe (Espanha)
Hidrogénio na fusão de fritas	HyES	Fusão de fritas em linhas de vidro	Avaliou a mudança de combustível e o impacto na qualidade	H2 Frit Pilot – Esmalglass (Espanha)
Retrofit para uso de hidrogénio em fábricas	HyES	Retrofit em fornos de alta temperatura	Comprovada viabilidade técnicas em fábrica	UK Industrial Fuel Switching Programme
Mistura hidrogénio/GN para combustão	HyES	Otimização de sistemas de combustão	Definidos limites de Mistura Segura e controlo de NO <sub>x</sub>	DNV Combustion Studies (Países Baixos)
Recuperação de calor residual em fornos	TES	Reutilização de calor em atomizadores	Redução do consume de GN através da recuperação de calor	ETEKINA (Espanha, Itália, Eslovénia)
Recuperação de calor de gases de exaustão de média temperatura	TES	Reutilização térmica interna na cerâmica	Melhoria da integração térmica e poupança de combustível	SMARTREC – ITC Castellón (Espanha)
Resíduos da indústria cerâmica para aplicações de ES	TES	Pré-aquecimento de processos	Uso de calor e materiais residuais para aumentar a eficiência energética	eLITHE – KTH em instalações de demonstração na Espanha, Grécia e Alemanha

hidrogénio renovável em ambientes industriais de alta temperatura. Por exemplo, a Lhyfe testou com sucesso a combustão de hidrogénio em fornos cerâmicos em Espanha. [12] De forma semelhante, o piloto H2-frit na fábrica da Esmalglass em Castellón (Espanha) está a testar o hidrogénio nos processos de fusão de fritas cerâmicas, [13] abordando tanto a substituição do combustível como os impactos na qualidade cerâmica. Para além da Península Ibérica, esforços recentes incluem o *Industrial Fuel Switching Programme* do Reino Unido, que explorou a modernização de fornos com hidrogénio em fábricas cerâmicas britânicas; [14] e os estudos de mistura para combustão da DNV nos Países Baixos, que analisaram o impacto das misturas hidrogénio/gás natural em parâmetros-chave da combustão, como propriedades da chama, transferência de calor e emissões de NO<sub>2</sub>. [15] Estes exemplos mostram como a integração do hidrogénio na substituição do gás natural está a evoluir do conceito à aplicação, embora a adaptação de queimadores e a gestão das emissões de NO<sub>2</sub> continuem a ser desafios importantes. O relatório da IEA de 2022 sobre aplicações industriais do hidrogénio aponta que o retrofit de fornos para hidrogénio pode exigir sistemas de queimadores de combustível duplo e ajustes significativos nos controlos de combustão. [3]

Outra oportunidade de integração direta é a recuperação de calor residual dos fornos, cujos gases de exaustão normalmente saem a 250–500 °C. Este calor pode ser armazenado em sistemas TES de calor sensível utilizando materiais refratários e reutilizado, por exemplo, em processos de secagem ou pré-aquecimento do ar de combustão. Segundo o Roadmap Cerâmico para 2050, esta integração poderia reduzir o consumo de gás natural em até 10–15%. [1] Neste sentido, foram realizados esforços significativos em projetos-piloto, como o **SMARTREC**, financiado pela UE, no qual foi instalado um **HPHE multi-pass** no Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) para recuperar calor de exaustão de 160–270 °C de um forno-piloto. Os primeiros testes confirmaram a viabilidade técnica de transferir o calor residual para sumidouros de água e reutilizá-lo em aplicações de secagem. [16] De forma semelhante, o projeto ETEKINA, também financiado pela UE, tem como objetivo recuperar 57–70% do fluxo de calor residual em indústrias intensivas em energia em Espanha, Itália e Eslovénia. No caso do setor cerâmico, o protótipo HPHE ETEKINA visa recuperar calor residual dos fornos utilizando permutadores de calor e reutilizá-lo em secadores por atomização, reduzindo significativamente o consumo de gás natural. [17] Outro projeto, como o eLITHE, envolve ciência de materiais para desenvolver baterias térmicas inovadoras, adaptadas aos novos requisitos de processos eletrificados na indústria cerâmica, testando resíduos como meio de armazenamento para aplicações de TES de calor sensível. [18]

Para além dos sistemas HyES e TES, os sistemas EES também estão a ganhar interesse no setor cerâmico, particularmente entre as PME com capacidade de energia solar

fotovoltaica no local. Por exemplo, o governo português planeia investir até 400 M€ para melhorar a gestão da rede e impulsionar o armazenamento em baterias, na sequência do apagão maciço que afetou Espanha e Portugal em abril de 2025, uma iniciativa que poderá também reforçar a resiliência energética em diversos setores industriais, incluindo o cerâmico. [19]

## Barreiras e desafios

A integração de sistemas de armazenamento de energia (ES) enfrenta diversos desafios técnicos, económicos, infraestruturais e organizacionais. Esta secção sintetiza as principais barreiras e desafios, com particular atenção aos sistemas HyES e TES. [20–22]

### Desafios técnicos e relacionados com a infraestrutura.

As elevadas temperaturas de operação exigidas nos fornos cerâmicos limitam significativamente a aplicabilidade de muitas tecnologias de armazenamento de energia comercialmente disponíveis. Por exemplo, a maioria dos sistemas de armazenamento elétrico (EES) não foi concebida para fornecer calor, mas sim eletricidade, e a sua utilização indireta para aquecimento elétrico implica perdas de conversão e um sobredimensionamento significativo da capacidade de armazenamento, tendo igualmente em conta que as bombas de calor industriais são mais adequadas para aplicações em gamas de temperatura entre 100–200 °C. Por outro lado, o armazenamento térmico (TES) com materiais refratários ou cerâmicos está mais alinhado com estes processos, mas apresenta baixa condutividade térmica, integração complexa com as correntes de gases de exaustão dos fornos e limitações ao nível dos permutadores de calor. No caso da integração de sistemas HyES, são necessários fornos adaptados e sistemas de controlo de combustão redesenhados para evitar emissões excessivas de NO<sub>2</sub>. Neste sentido, muitas PME continuam a manifestar preocupações de segurança e incerteza relativamente ao funcionamento destes novos sistemas nas suas infraestruturas. Além disso, uma vez que os fornos e outros ativos essenciais podem durar até 40 anos, o período de *retrofit* fica condicionado pela instalação previamente existente.

**Barreiras económicas e financeiras.** Os desincentivos económicos continuam a estar entre as barreiras mais persistentes. Vários sistemas de armazenamento de energia (ES), e em particular as tecnologias HyES, são intensivas em capital, ultrapassando frequentemente os limiares de investimento aceitáveis para os fabricantes cerâmicos. Evidências do setor mostram que muitos fabricantes estão relutantes em investir em tecnologias com períodos de retorno superiores a 5 anos, independentemente do seu potencial a longo prazo. Os incentivos governamentais e os mecanismos de financiamento destinados à adoção de ES continuam a ser escassos ou pouco adequados aos consumidores industriais de calor. Neste contexto, a eletrólise e as infraestruturas de armazenamento de hi-

drogénio permanecem particularmente dispendiosas, e a sua viabilidade dependerá provavelmente do acesso a eletricidade renovável de baixo custo. Adicionalmente, os fabricantes operam frequentemente com regras internas de orçamento restritas, que limitam a afetação de capital a atividades não essenciais.

**Desafios regulamentares e políticos.** O enquadramento regulamentar para sistemas de armazenamento de energia (ES) no setor cerâmico encontra-se pouco desenvolvido. Embora os objetivos de redução de emissões no âmbito do EU ETS proporcionem um impulso macroeconómico para a descarbonização, orientações específicas ou obrigações para a adoção de TES, HyES ou sistemas híbridos na cerâmica continuam ausentes. Frequentemente, os instrumentos de política nacional são insuficientemente detalhados para apoiar percursos de implementação específicos para o setor. Adicionalmente, a fragmentação da regulamentação entre os Estados-Membros da UE, aliada à lentidão dos processos de licenciamento para retrofit de sistemas térmicos, cria um risco significativo de não conformidade para os primeiros adotantes. Na ausência de normas técnicas e de segurança harmonizadas para a manipulação de hidrogénio ou para sistemas de recuperação de calor residual, a implementação permanece altamente dependente do contexto.

**Barreiras organizacionais e baseadas no conhecimento.** As barreiras resultam, igualmente, da limitada consciencialização, do conhecimento técnico e da prontidão organizacional. Muitos fabricantes, especialmente PME, não têm acesso a informações sobre as soluções de ES disponíveis, os seus requisitos de integração e análises de custo-benefício. Nota-se uma ausência significativa de pessoal técnico formado para gerir sistemas híbridos envolvendo baterias, TES e infraestruturas de hidrogénio. Em alguns casos, a resistência à mudança é cultural, motivada pela perceção de que os investimentos relacionados com energia desviam o foco das operações essenciais do negócio. Esta situação é reforçada pela falta de experiência em inovação colaborativa, particularmente em clusters de produção descentralizados e dispersos por regiões. Além disso, a ausência de plantas-piloto específicas do setor limita a exposição prática e retarda a difusão de casos de sucesso.

**Assimetrias geográficas e de infraestruturas.** Por fim, a dispersão física das unidades de produção cerâmica, especialmente em áreas rurais ou suburbanas com infra-estrutura elétrica fraca, dificulta o acesso a redes de hidrogénio ou a pólos centralizados de geração renovável. Considera-se que os sistemas baseados em hidrogénio poderão ser mais viáveis em *clusters* industriais, onde seja possível implementar infraestruturas partilhadas de eletrólise e armazenamento. A ausência de tais clusters em algumas regiões, incluindo algumas áreas da Península Ibérica, pode limitar a implementação em instalações piloto ou autónomas.

## Conclusões e recomendações

As soluções de armazenamento de energia (ES) podem ajudar a acelerar a descarbonização da indústria cerâmica, ao permitir o fornecimento local de energia renovável, a recuperação de calor residual, além de contribuir para a estabilidade da rede elétrica. As tecnologias HyES e TES estão bem alinhadas com as elevadas exigências de temperatura da indústria cerâmica, enquanto os EES podem fornecer flexibilidade de curto prazo para operações intensivas em eletricidade. A Península Ibérica, com mais de 4.000 instalações cerâmicas e responsável por 30% da produção da UE, encontra-se numa posição única para liderar esta transição, dado o seu *know-how* industrial, os abundantes recursos solares e a infra-estrutura renovável existente. No entanto, algumas barreiras críticas estão a atrasar a integração das ES na indústria cerâmica: (i) infra-estrutura energética fragmentada, (ii) custos elevados de retrofit, (iii) limitações de investimento das PME e, até ao momento, (iv) disponibilidade limitada de hidrogénio. Por conseguinte, algumas ações estratégicas poderiam ser prioritárias para os decisores políticos, tais como: promover a investigação fundamental para colmatar as lacunas técnicas existentes, aumentar a escala de projetos-piloto, reforçar a infra-estrutura de energias renováveis e de hidrogénio próxima dos *clusters* cerâmicos, e promover investimentos conjuntos e/ou coordenados em tecnologias e infra-estrutura, de modo a assegurar que o setor cerâmico ibérico se mantenha competitivo, alinhando-se simultaneamente com os objetivos climáticos e energéticos da UE.

## Referências

- [1]. CerameUnie. *Ceramic Roadmap to 2050: Delivering a Competitive, Carbon-Neutral Future*. Brussels: Cerame Unie, 2021. Disponível em: <https://www.cerameunie.eu/media/zyqdwwwp/ceramic-roadmap-to-2050.pdf>
- [2]. IRENA. *Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables*. 2024. Disponível em: <https://horizoneuropencpportal.eu/sites/default/files/2024-06/irena-g7-decarbonising-hard-to-abate-sectors-2024.pdf>
- [3]. European Commission. "A Clean Planet for All – A European Long-Term Strategic Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy". Brussels, 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52018DC0773>
- [4]. IEA. "The Role of Hydrogen in energy decarbonisation scenarios". *JRC Technical Report*, 2022. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b58c1d3a-8270-11ed-9887-01aa75ed71a1/language-en>
- [5]. Material Economics. "Industrial Transformation 2050: Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry". *Cambridge Econometrics*, 2019. Disponível em: <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2019/04/Material-Economics-Industrial-Transformation-2050.pdf>
- [6]. IEA. "Renewable Energy for Industry". 2017.
- [7]. IEA. "Batteries and Secure Energy Transitions". 2023.
- [8]. Johansson, A.; Fernberg, J.; Sepman, A.; Colin, S.; Wennebro, J.; Normann, F.; Wiinikka, H. "Cofiring of hydrogen and pulverized coal in rotary kilns using one integrated burner". *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 90, pp. 342-352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.327>
- [9]. Dincă, C.; Slavu, N. "Integrating Power-to-Methane with Carbon Capture (P2M-CC) for Sustainable Decarbonization in Cement Manufacturing". *Energies*, 2025, vol. 18, n.º 4. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en18040777>
- [10]. Pompei, L.; Nardecchia, F.; Miliozzi, A. "Current, projected performance and costs of thermal energy storage". *Processes*, 2023, vol. 11, n.º 3, p. 729. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11030729>
- [11]. Wu, S.; Zhou, C.; Doroodchi, E.; Nellore, R.; Moghtaderi, B. "A review on high-temperature thermochemical energy storage based on metal oxides redox cycle". *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 168, pp. 421-453. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.017>
- [12]. LHYFE. "Lhyfe successfully completes first combustion tests using green hydrogen as a replacement for natural gas in the industrial sector and makes its first delivery in Spain". Disponível em: <https://www.lhyfe.com/press/lhyfe-successfully-completes-first-combustion-tests-using-green-hydrogen-as-a-replacement-for-natural-gas-in-the-industrial-sector-and-makes-its-first-delivery-in-spain/>
- [13]. H2-View News. "Hydrogen trials to begin at Esmalglass' ceramic frit plant in Spain | H2 Energy Group". Disponível em: <https://www.h2-view.com/>
- [14]. UK Government. *IFS-HS Evaluation Report*. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/68400dfb1d85c6606009ccbb/IFS-HS-evaluation-report.pdf>
- [15]. DNV. "Hydrogen as a fuel for high-temperature heating processes". Disponível em: <https://www.dnv.com/article/hydrogen-as-a-fuel-for-high-temperature-heating-processes-219385/>
- [16]. Smartrec. Disponível em: <https://www.smartrec.eu/about>
- [17]. ETEKINA. Disponível em: <https://www.etekina.eu/>
- [18]. ELITHE. Disponível em: <https://elithe.eu/>
- [19]. Reuters. "Portugal to invest €466 million to boost grid management & battery storage after outage". Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/boards-policy-regulation/portugal-invest-466-million-boost-grid-management-battery-storage-after-outage-2025-07-28/>
- [20]. Furszyfer Del Rio, D. D.; et al. "Decarbonizing the ceramics industry: A systematic and critical review of policy options, developments and socio-technical systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 157, p. 112081. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112081>
- [21]. Venmans, F. "Triggers and barriers to energy efficiency measures in the ceramic, cement and lime sectors". *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 69, pp. 132-142. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.076>
- [22]. BEIS; British Ceramic Confederation. "Joint industry-government industrial decarbonisation and energy efficiency roadmap action plan". London, 2017.



# NOVOS PROCESSOS DE FABRICO

Michele Dondi, Chiara Zanelli

CNR-ISSMC; Instituto de Ciência, Tecnologia e Sustentabilidade para o Desenvolvimento dos Materiais Cerâmicos, Faenza, Itália

## Granulação de pó para pavimento e revestimento cerâmico e louça de mesa (“via seca”)

A microgranulação é o processo de granulação por via húmida de pastas cerâmicas, através do qual são produzidos grânulos (maioritariamente entre 0,1 e 1mm de diâmetro), ideais para o fabrico de pavimento e revestimento cerâmico e louça de mesa. Consiste em quatro fases principais: nucleação, crescimento por camadas-coalescência, consolidação e quebra, que refletem o equilíbrio dinâmico entre capilaridade, forças de atrito viscoso e atrito interparticular. A nucleação ocorre em torno das gotículas de água que são pulverizadas sobre o pó: ao ficarem húmidas, as partículas minerais aglomeram-se, formando o núcleo dos grânulos. O crescimento do grânulo ocorre por camadas, ou seja, pela adesão de camadas sucessivas de partículas em torno do núcleo original, e pela coalescência de dois grânulos. Este processo implica uma redução gradual da humidade do grânulo, que tende a distribuir-se uniformemente, e resulta na consolidação e arredondamento dos grânulos, especialmente quando é associado a movimentos de rolamento. Nesta fase, é possível que o grânulo se fragmente, quando as forças dissipativas (e/ou o atrito interparticular) forem maiores que as forças conserva-

tivas. Em aplicações industriais, as fases de nucleação, crescimento por camadas, coalescência, consolidação e quebra não ocorrem de forma sequencial e distinta ao longo do tempo, mas tendem a ocorrer, pelo menos em parte, em simultâneo, tornando o processo difícil de modelar.

### Características dos microgrânulos

Como o processo de granulação por via húmida é claramente diferente da secagem por atomização (*spray-drying*), o resultado também é diferente em termos de características dos microgrânulos comparado com os pós atomizados. Estas características dizem respeito principalmente à distribuição do tamanho de partícula, distribuição da humidade em função do tamanho de partícula, morfologia e rugosidade, densidade e estrutura interna, rigidez e compressibilidade dos aglomerados (que também afeta, o comportamento na cozedura). As diferenças entre os pós atomizados e os microgrânulos são mais ou menos acentuadas dependendo da tecnologia e condições aplicadas no processo de granulação húmida. Estas diferenças têm sido até agora o principal obstáculo para a adoção da microgranulação como alternativa à secagem por atomização.

**Tabela 4.12. Comparação das características do pó.**

Características dos pós	Pó atomizado	Microgranulado húmido	Figura
Distribuição do tamanho do grânulo	Usado como referência	A distribuição de tamanhos varia de acordo com a técnica de granulação	4.45
Distribuição da humidade	Humidade mais elevada nos grânulos maiores	Humidade uniforme nos diferentes tamanhos	4.45
Morfologia	Grânulos esferoidais com baixo aspect ratio	Grânulos esferoidais com elevado aspect ratio (ligeiramente ovais)	4.46
Estrutura interna	Cavidade interna afunilada	Sem cavidade	4.46
Fração de tamanhos maiores	Tendência para ter dois ou mais grânulos aglomerados	Sem alteração significativa na morfologia dos grânulos	4.47
Rugosidade superficial	Superfície geralmente lisa	Superfície geralmente mais rugosa	4.47
Rigidez	Grânulos rígidos	Rigidez alta ou baixa dependendo da técnica de granulação	
Densidade	Menor devido à cavidade interna	Densidade mais elevada	4.48
Compressibilidade	Menor devido à maior rigidez	Geralmente maior	4.48



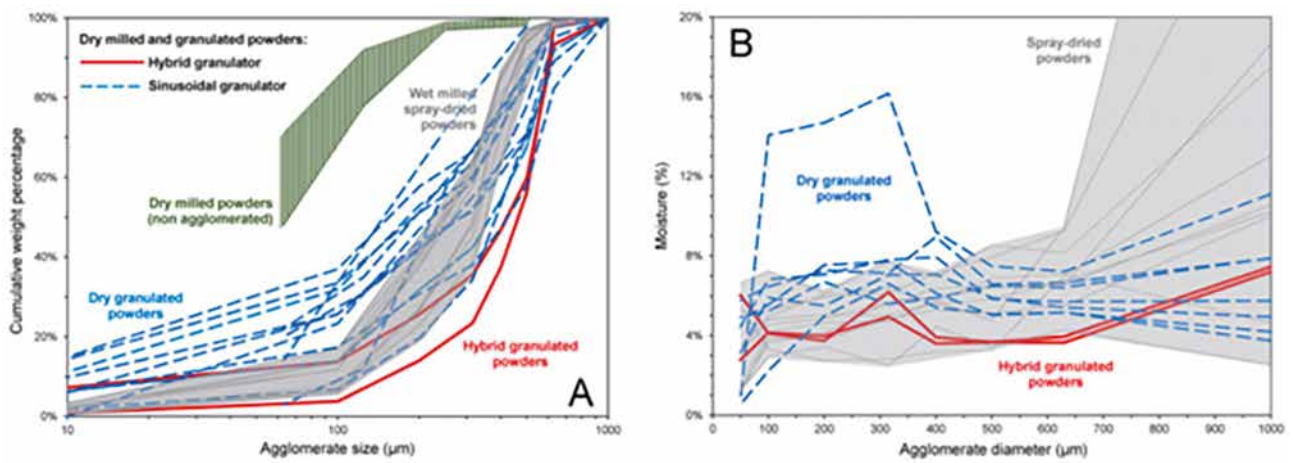


Figura 4.45. Distribuição de tamanho dos aglomerados (A) e distribuição do teor de umidade (B) de pós cerâmicos para pavimento/revestimento obtidos por secagem por atomização e diferentes técnicas de granulação [1].

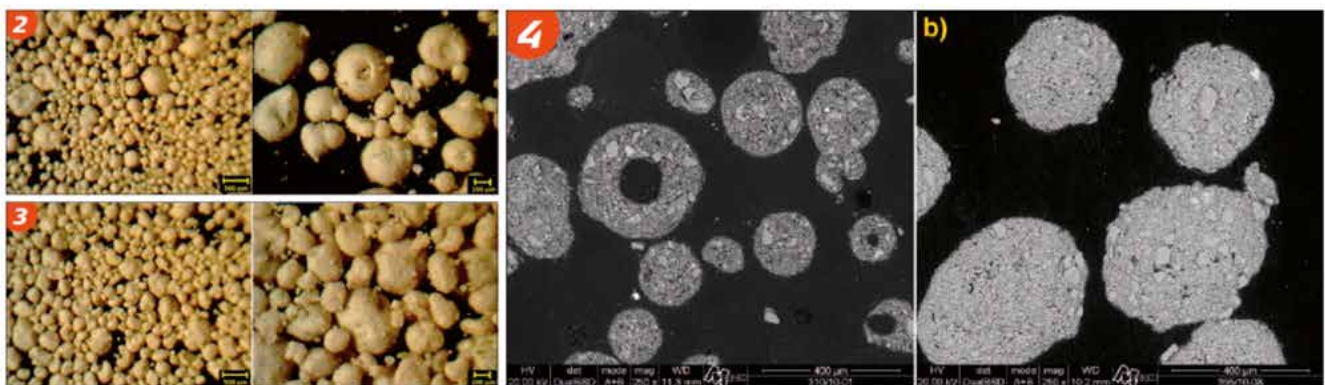


Figura 4.46. Morfologia dos grânulos atomizados (2) comparada com granulados úmidos (3). Estrutura interna dos grânulos (4): esquerda, grânulos atomizados; direita, grânulos úmidos [2].

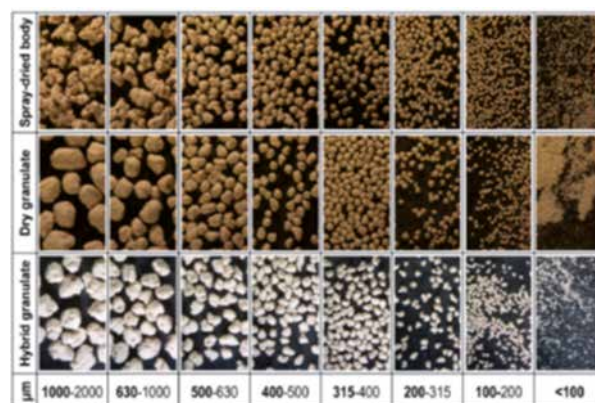


Figura 4.47. Forma dos aglomerados para diferentes gamas de tamanhos (direita; barra de escala = 1mm). “Granulado seco” = Granulador sinusoidal e secador de leito fluidizado; “Granulado híbrido” = tecnologia Migratech® [1].

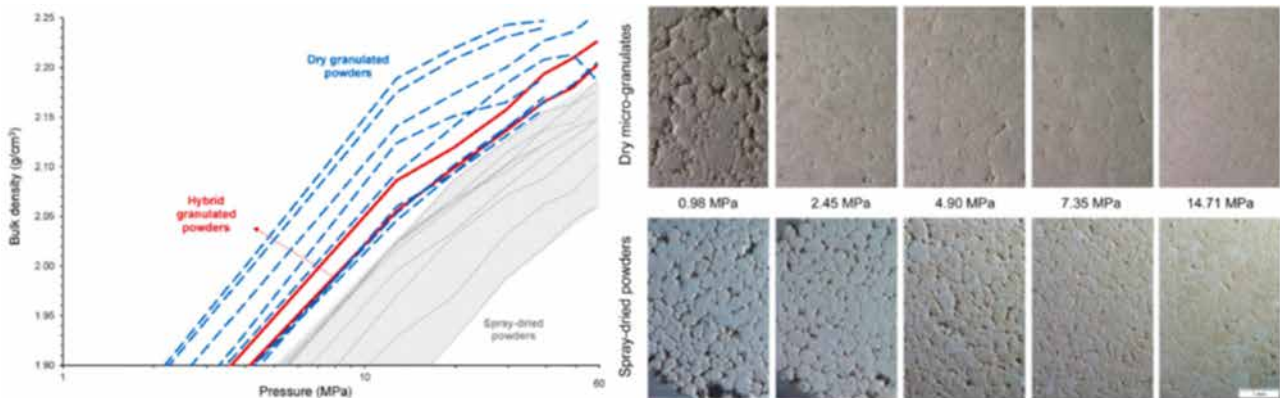


Figura 4.48. Compressibilidade do pó (esquerda) e microestrutura dos compactos (direita) em função da pressão. “Granulado seco” = Granulador sinusoidal e secador de leito fluidizado; “Granulado híbrido” = tecnologia Migratech® [1].

Não estão disponíveis dados técnicos para todas as tecnologias, pelo que não é possível uma comparação detalhada. De maneira geral, podem ser notadas as diferenças entre pós atomizados e microgrânulos húmidos apresentadas na Tabela 4.12.

### Técnicas de granulação húmida

A microgranulação é realizada industrialmente com tecnologias que são a evolução da obsoleta turbina de eixo vertical, que basicamente molha os pós cerâmicos, produzindo grânulos de maior tamanho com um grau de consolidação limitado. No jargão industrial, o processo é frequentemente designado de “via seca”, embora este termo seja uma contradição pois a água é sempre usada como ligante (por vezes com aditivos). Esta terminologia estabeleceu-se em oposição à “via húmida”, correspondente à secagem por atomização, que é uma tecnologia de referência para a indústria cerâmica e faz um uso extensivo da água na formulação da barbotina. É preciso ter em conta que tanto os requisitos tecnológicos para ambos os pós cerâmicos (fluidez, compressibilidade) quanto as condições de processamento (manuseamento do pó, enchimento dos moldes, dosagem na correia transportadora, prensagem e compactação) foram definidos ao longo do tempo em relação ao pó atomizado. Assim, o objetivo de desenvolver uma tecnologia adequada para microgranulação de pós cerâmicos é, na realidade, uma meta dinâmica, uma vez que é necessário responder às exigências de uma produção industrial cada vez mais complexa e tecnicamente difícil (dimensões cada vez maiores, ladrilhos muito finos ou muito grossos, decoração integral, rendimentos de produção muito elevados, etc.).

Existem várias soluções tecnológicas para a microgranulação disponíveis no mercado e já instaladas por alguns fabricantes de pavimento e revestimento cerâmico e louça de mesa (Tabela 4.13). Embora todas estas abordagens envolvam os estágios de granulação acima mencionados,

cada fornecedor desenvolveu as suas próprias soluções técnicas e aplicou-as nos seus equipamentos. As principais diferenças referem-se à alimentação (pós moídos a seco ou até mesmo barbotinas) e às etapas de granulação (realizadas em diferentes equipamentos). Existem tecnologias de etapa única, que realizam a granulação húmida de forma descontínua (misturador-granulador de alta intensidade), enquanto outras realizam separadamente os estágios nucleação-crescimento por camadas-coalescência e consolidação-secagem do excesso de água (e controlo da fragmentação) com duas máquinas diferentes (granulador horizontal/sinusoidal). Recentemente, têm sido desenvolvidos sistemas complexos capazes de controlar o processo de granulação em três etapas, proporcionando maior versatilidade e controlo nas propriedades dos microgrânulos formados. Estes sistemas diferenciam-se na técnica de nucleação-crescimento por camadas-coalescência (primeira etapa) e na produção de microgrânulos, realizada de maneira diferente nas duas fases subsequentes:

- Sistema de granulação *Migratech*®: formação de aglomerados com mais água, que são depois fragmentados (segunda etapa) e finalmente consolidados, onde o excesso de humidade é removido por secagem parcial (terceira etapa);
- Sistema de granulação *Fusion*®: peletização para obter briquetes (segunda etapa) e subsequente fragmentação (terceira etapa) sem necessidade de secagem.

Noutro sistema de granulação é possível realizar a granulação em duas etapas, com alimentação proveniente da moagem a seco e a húmido (sistema de granulação *Hybrid*®): nucleação -crescimento por camadas-coalescência-consolidação ocorrem em conjunto utilizando pós moídos secos e barbotina como ligante, seguindo-se a secagem do excesso de água.

**Tabela 4.13. Tecnologias de microgranulação usadas na cerâmica de pavimento/revestimento e na louça de mesa.**

Tecnologia de granulação	Moagem	Entrada	Etapas da granulação	Figura
Secagem por Atomização	húmida	barbotina/pasta	Um: aglomeração e secagem simultânea	
Misturador-granulador de alta intensidade	seca	pó	Um: Mistura e granulação sequenciais	4.49
Granulador horizontal Granulador sinusoidal	seca	pó	Dois: Mistura + granulação > secagem em leito fluidizado (FBD)	4.50
Migratech©	seca	pó	Três: mistura + aglomeração > fragmentação > FBD	4.51
Fusion©	seca	pó	Três: mistura + aglomeração > peletização > fragmentação	4.52
Hybrid©	seca + húmida	pó + barbotina	Dois: Mistura + granulação > secagem em leito fluidizado	4.53



Figura 4.49. Misturador-granulador de alta intensidade [3].



Figura 4.50. Granulador horizontal com secador de leito fluidizado [4].

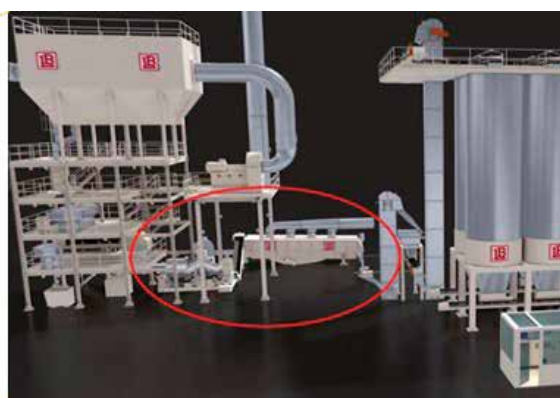
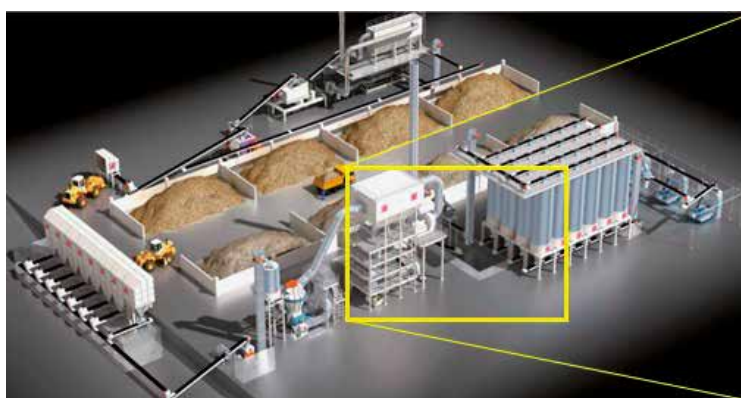


Figura 4.51. Tecnologia Migratech© [5].

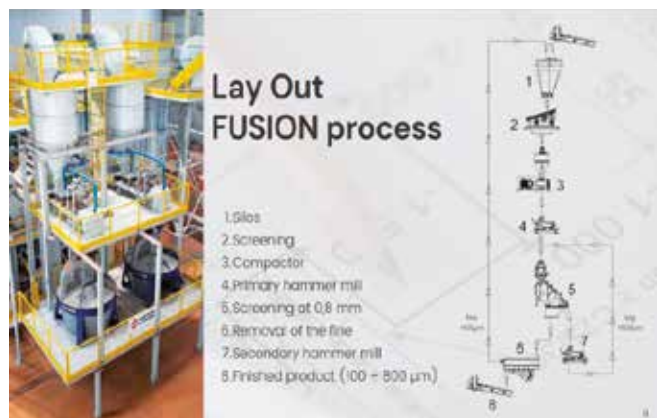


Figura 4.52. Tecnologia Fusion© [6].

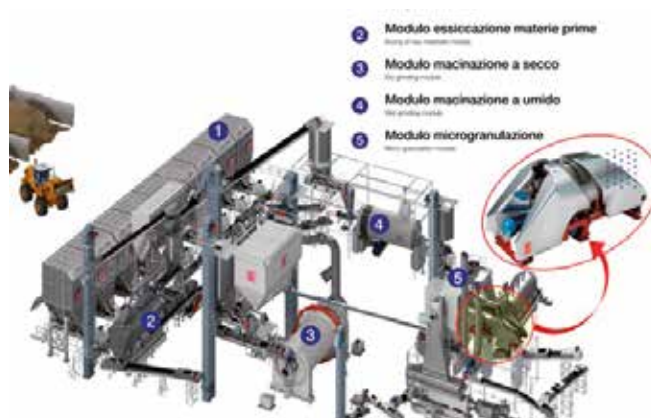


Figura 4.53. Tecnologia Hybrid© [5].

### Consumo de água e energia

A secagem por atomização é um processo intensivo de energia, responsável por cerca de um terço de consumo de energia térmica na produção de pavimento e revestimento cerâmico, com consumo de água de cerca de 400 - 500 kg por tonelada de pó atomizado seco. Assim, espera-se que esta etapa do processo de fabrico venha a ser substituída por tecnologias com menor consumo de água e energia, com vista à sustentabilidade e descarbonização da indústria cerâmica [7].

A granulação húmida é a melhor alternativa à secagem por atomização e tem vantagens indiscutíveis do ponto de vista do consumo de água e energia. No entanto, estas variam, consoante as tecnologias de granulação e as condições de processamento usadas para obter microgrânulos com características próximas dos pós atomizados. Os fornecedores das várias tecnologias de granulação húmida destacam as vantagens apresentadas na Tabela 4.14.

No entanto, é necessário ter em conta os prós e os contras considerando toda a fábrica, de pavimento e revestimento

**Tabela 4.14. Vantagem da granulação húmida relativamente à secagem por atomização em termos de consumo (energia, água e aditivos) e emissões de CO<sub>2</sub>.**

Tecnologia de granulação	Pasta Cerâmica	Referência	Consumo de gás	Emissões de CO <sub>2</sub>	Consumo de água	Consumo de eletricidade	Consumo de defloculante
Misturador-Granulador de alta intensidade	pasta branca	Ref. [8]	-78%	-78%	-74%	-36%	
Granulador horizontal	pasta vermelha	Ref. [4]		-35%	-90%		-100%
		Ref. [9]	-74%	-74%	-64%	+48%	
Migratech©	pasta vermelha	Ref. [10]	-74%	-74%	-80%	-53%	-100%
	pasta branca		-55%	-55%	-66%	-35%	-100%
Fusion©	-	Ref. [6]	-80%	-50%	-81%	+39%	-100%
	pasta vermelha	Ref. [11]	-67%		-82%	+9%	-100%
Hybrid©	-	Ref. [5]	-65%	-65%	-70%		

ou louça de mesa, tendo especial atenção para o balanço hídrico, que também inclui a água que não é usada na moagem húmida (lavagem das linhas, vidragem, etc.). Este balanço hídrico deve ser assegurado para atingir a meta de zero águas residuais, ou seja, reciclagem total das águas residuais do processo e das lamas resultantes da sua purificação. A adoção do método de preparação a seco de toda a pasta inviabiliza a eliminação das águas residuais e das lamas dentro do próprio processo de fabrico. Para resolver este problema, têm sido desenvolvidas soluções como a via híbrida, que abrem caminho para a adoção de um sistema de granulação capaz de também utilizar a barbotina como ligante na granulação húmida. Neste sentido, perspectiva-se a conceção de uma instalação articulada, composta pelo processo via seca (maior eficiência energética e poupança de água) e pelo processo via húmida (reciclagem das águas residuais e lamas).

## Considerações finais

As tecnologias de granulação húmida podem substituir a secagem por atomização na produção de pós cerâmicos destinados a pavimentos e revestimentos e a louça de mesa. Atualmente, as técnicas de granulação mais simples são principalmente utilizadas para o fabrico de produtos de baixo valor (p. ex., ladrilhos do grupo BII de pasta vermelha) devido aos ganhos significativos em termos de consumo de energia e água. Sistemas inovadores de granulação demonstraram ser adequados para uma larga gama de produtos, incluindo grés porcelânico e até mesmo ladrilhos de grande formato, com ensaios à escala industrial bem-sucedidos (e fábricas/instalações industriais em curso).

O aparecimento de obstáculos adicionais (isto é, o balanço hídrico nas fábricas) pode ser ultrapassado com sistemas de granulação híbrida. Contudo, para igualar o desempenho alcançado com os pós atomizados, os benefícios em termos de consumo de água são menos pronunciados e consequentemente as diferenças em termos de consumo de energia são também menos acentuadas, embora ainda assim relevantes.

## Referências

- [1]. Soldati, R.; Zanelli, C.; Cavani, G.; Battaglioli, L.; Guarini, G.; Melandri, C.; Piancastelli, A.; Dondi, M. "Powder rheology and compaction behavior of novel micro-granulates for ceramic tiles". *Powder Technology*, 2020, vol. 374, pp. 111-120.
- [2]. Melchiades, F. G.; Daros, M. T.; Boschi, A. O. "Porcelain tiles by the dry route". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2010, vol. 49, n.º 4, pp. 221-226.
- [3]. Melchiades, F. G.; Dos Santos Conserva, L. R.; Natri, S.; Cabral, E.; Boschi, A. O. "Viabilidade da fabricação de porcelanatos por via seca a partir de massas de cor de queima clara. Parte II: Condições de granulação da massa". *Cerâmica Industrial*, 2012, vol. 17, n.º 5-6, pp. 14-21.
- [4]. Arnau, A.; Arnau, P.; García-Ten, J.; Mezquita, A.; Monfort, E.; Soriano, M. "El proceso de microgranulación, una tecnología para descarbonizar la industria cerámica". *Qualicer 2024*, 11 p.
- [5]. LB Officine Meccaniche S.p.A. Disponível em: <https://www.lb-technology.it/>
- [6]. Manfredini & Schianchi - Minerali Industriali Engineering. "Fusion Technology". Disponível em: <https://www.manfredinieschianchi.com/en/fusion/>
- [7]. European Ceramic Industry Association "Ceramic Roadmap to 2050 – Continuing Our Path towards Climate Neutrality". Brussels, 2021.
- [8]. Mezquita, A.; Monfort, E.; Ferrer, S.; Gabaldón-Estevan, D. "How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route". *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 168, pp. 1566-1570. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.082>
- [9]. Shu, Z.; Monfort, E.; Garcia-Ten, J.; Zhou, J.; Amorós, J. L.; Wang, Y. "A new cleaner process to prepare pressing-powder". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2011, vol. 50, n.º 5, pp. 235-244.
- [10]. Bonucchi, R. "Dry preparation: quality and care for the environment". *Ceramic World Review*, 2012, vol. 22, n.º 99, pp. 86-89.
- [11]. Ergin, H.; Taşkıran, M. U.; Pilevne, A. A.; Turgut, H.; Kayaci, K. "A novel dry granule preparation technology and comparison of granule properties with conventional wet system for ceramic tiles production". *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2023, vol. 59, n.º 5, article 167498. Disponível em: <https://doi.org/10.37190/ppmp/167498>



# RADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A INDÚSTRIA CERÂMICA

Luis Manuel Cadillon Martins Costa  
Universidade de Aveiro, Portugal

## Conceitos gerais

Contrastando com o aquecimento convencional, que ocorre através da transferência de calor para o material, o aquecimento por micro-ondas ocorre através da geração de calor dentro do próprio material [1]. Este aquecimento depende da capacidade do material absorver a radiação eletromagnética e transformá-la em calor. Há materiais que praticamente refletem toda a radiação, que são os condutores, e sem a penetração da radiação, não aquecem o seu interior. Outros são transparentes à radiação, que os atravessa sem haver absorção, e consequentemente sem aquecimento. E finalmente os que absorvem a radiação, e podem por isso ser aquecidos [2]. Na Figura 4.54 representam-se as várias possibilidades quando uma radiação (onda incidente) atinge um material.

Este comportamento está intimamente relacionado com as propriedades elétricas do material, em particular com a permitividade complexa [3],  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ . A parte real desta quantidade ( $\epsilon'$ ) é a constante dielétrica e a parte imaginária ( $\epsilon''$ ) as perdas. Numa primeira aproximação, para um material não magnético, como é o caso da maioria dos cerâmicos, a potência absorvida por unidade de volume,  $P\alpha$ , pode ser expressa por [4]:

$$P\alpha = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

onde  $f$  é a frequência,  $\epsilon_0$  a permitividade do vazio e  $E$  o campo elétrico. Isto é, um aumento de  $\epsilon''$  promove uma

maior potência absorvida, e consequentemente um maior aquecimento. No entanto, a profundidade de penetração da onda eletromagnética no material é inversamente proporcional às perdas [5]. Materiais com elevadas perdas, como são os condutores, não permitem a penetração da onda, como se mostra na Figura 4.54 (a), e, portanto, não são volumetricamente aquecidos. Assim, valores intermédios de perdas, que se situam entre  $10^{-2}$  e 5, permitem uma penetração eficaz e uma absorção importante. Na Figura 4.55 é ilustrado este comportamento, à temperatura ambiente. Pode ver-se que a porcelana, à temperatura ambiente, praticamente não absorve, pelo que não é eficazmente aquecida. No entanto,  $\epsilon''$  aumenta com a temperatura no caso dos cerâmicos com baixas perdas, isto é, para materiais isolantes. Daí resulta que, se for possível aumentar a temperatura do cerâmico até se obter  $\epsilon''$  da ordem de  $10^{-1}$ , então, a partir daí a absorção da radiação de micro-ondas passa a ser eficaz.

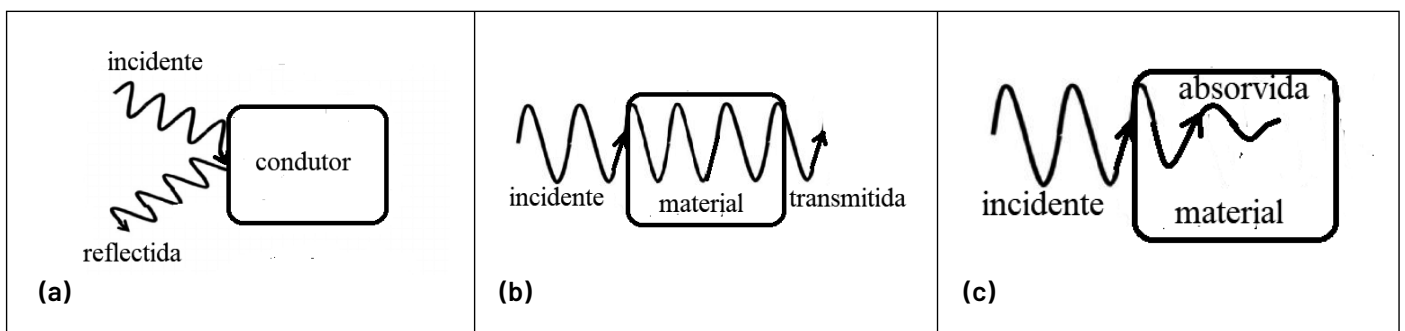


Figura 4.54. (a) A onda incidente é refletida pelo condutor; (b) A onda incidente atravessa o material sem absorção; (c) A onda incidente é absorvida pelo material.

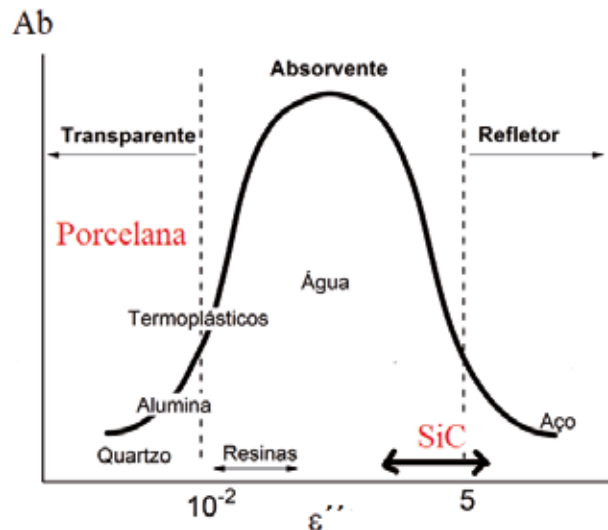


Figura 4.55. Capacidade de absorção, à temperatura ambiente em função de  $\epsilon''$ .

### Nova tecnologia híbrida para a sinterização de porcelana

A perda de energia num forno a gás depende, entre outros fatores, do tempo de processamento. Se os materiais forem processados mais rapidamente, então a perda de calor por unidade produzida pode ser reduzida. É consensual que o custo do gás depende fortemente das variações do preço do petróleo, e da conjuntura internacional, e traduz-se num custo elevado da fatura energética das empresas, o que tem evidenciado a necessidade premente de aumentar a eficiência energética dos processos produtivos. Assim, e apesar da economia de energia conseguida nas últimas décadas, a indústria cerâmica continua a procurar novas tecnologias, mais eficientes, de forma a poder limitar a pressão crescente exercida pelo aumento dos custos associados.

Quanto maior for a temperatura a atingir, que no caso da sinterização de porcelana ronda 1400°C, maior é o consumo de gás. No caso da utilização de radiação de micro-ondas para efetuar o processamento da porcelana, se aquela for absorvida de forma eficiente, é expectável que o consumo de gás possa ser consideravelmente diminuído. Dependendo do consumo de eletricidade necessário para alimentar os geradores de micro-ondas, versus consumo de gás, e respetivos encargos para a empresa fabricante de porcelana, pode esperar-se uma redução económica dos gastos energéticos.

Outro aspeto interessante desta tecnologia prende-se com a redução de emissões gasosas provenientes da queima de gás natural, quando substituídas por micro-ondas no processo de cozedura de cerâmicos. As emissões de gases com efeito de estufa são monitorizadas, especial-

mente na Europa, e os níveis de emissões permitidos são devidamente controlados. No âmbito da sua estratégia de redução de emissões de gases com efeito de estufa, e para garantir o cumprimento dos compromissos assumidos no contexto internacional, a União Europeia criou o mecanismo do Comércio Europeu de Licenças de Emissão, sendo o primeiro instrumento de mercado intracomunitário de regulação destas emissões [6]. São abrangidos diversos setores, em particular o de cerâmica.

Torna-se ainda premente equacionar a possibilidade de utilização de fontes energéticas alternativas, se possível de origem renovável. Neste contexto, a utilização de eletricidade produzida a partir de painéis fotovoltaicos para alimentar os geradores de micro-ondas deverá ser equacionada.

Face ao descrito, constata-se que para promover a cozedura de cerâmica ou porcelana, é necessário aquecê-las a temperaturas de cerca de 700°C, e então usar micro-ondas para elevar a temperatura até cerca de 1400°C. Consequentemente a opção do desenvolvimento de um forno misto é adequada. Numa primeira fase, o material cerâmico é sujeito a um aquecimento por gás, ao qual se segue então a radiação eletromagnética. A utilização de carbono de silício (SiC) para promover aquele prévio aquecimento é também uma opção, uma vez que este material absorve radiação de micro-ondas à temperatura ambiente [7], como se pode observar na Figura 4.55, e por contacto com os cerâmicos pode elevar a sua temperatura.

Na literatura podem encontrar-se vários artigos sobre o processamento de materiais usando radiação de micro-ondas, em particular cerâmicos [8-15].

### Demonstração da viabilidade da tecnologia com forno híbrido

A tecnologia de um forno misto gás-micro-ondas foi demonstrada em vários projetos nacionais [15, 16].

A Figura 4.56 mostra o forno que foi desenvolvido no âmbito dos projetos referidos.

As peças, dispostas em vagonas, sobre um suporte de carboneto de silício, entram na zona de pré-aquecimento, onde por ação de combustão a gás, são elevadas à temperatura de 700 °C. A esta temperatura, a absorção de radiação de micro-ondas já é eficaz, e então as peças dão entrada numa zona de alta temperatura, onde a radiação eletromagnética já é absorvida. É então possível dispensar o uso do gás.

Na Figura 4.57 (a) mostra-se as vagonas carregadas com peças a cozer, dispostas sobre placas de carboneto de silício e na Figura 4.57 (b) o sistema de alimentação do forno.

Os testes físico-químicos das peças cozidas no forno híbrido, quando comparados às cozidas a gás, mostram excelentes resultados. A absorção de água, a resistência ao impacto, retração e cor, são similares nos dois casos. O tempo de cozedura, para obter as mesmas características, foi reduzido em 30%. Verificou-se ainda que a temperatura de cozedura pode ser reduzida em cerca de 70°C, sem comprometer as propriedades do produto final. O consumo de energia por kg de louça foi também reduzido, podendo ir até 15%. A Figura 4.58 ilustra esta constatação, para dois ciclos diferentes de cozedura.



Figura 4.56. Forno híbrido gás-micro-ondas [17].

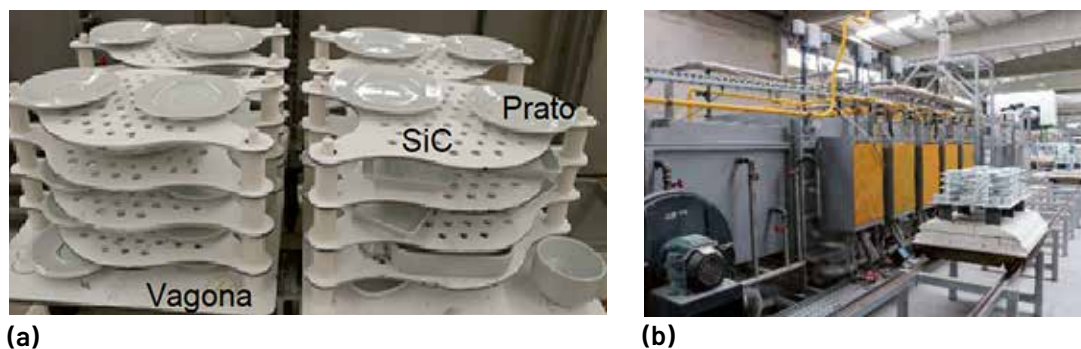


Figura 4.57. a) Vagona com placas de SiC e peças a cozer; (b) Sistema de alimentação do forno.

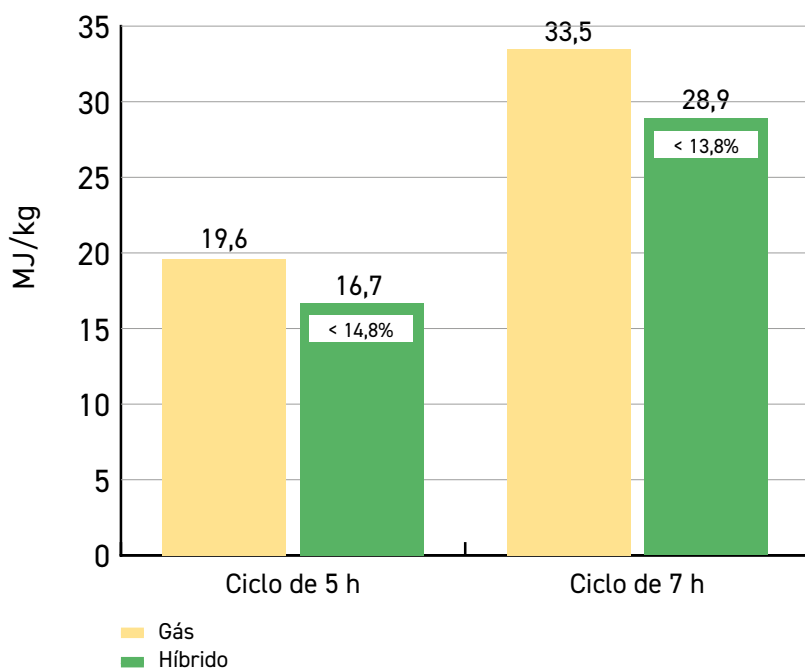


Figura 4.58. Consumo de energia por kg de louça, para dois ciclos diferentes de cozedura [18].

### Considerações Finais

Os resultados provenientes de dois projetos nacionais de co-promoção (Greenwave e Cerwave) permitem concluir que é possível aquecer e cozer porcelana com radiação de micro-ondas, com excelentes resultados. Porém, sendo materiais transparentes à radiação de micro-ondas à temperatura ambiente, é necessário aquecê-los até à temperatura em que a radiação pode ser absorvida. A opção por um forno híbrido de gás-micro-ondas, com o uso de carbono de silício resolve este problema.

A redução de energia e do tempo de cozedura, mantendo as propriedades dos materiais, é significativa.

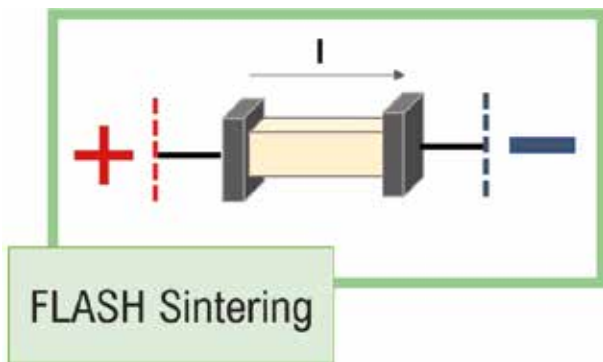
A utilização de eletricidade produzida a partir de painéis fotovoltaicos para alimentar os geradores de micro-ondas pode ser uma solução para alimentar os magnetrões, responsáveis pela produção da radiação de micro-ondas a ser introduzida no interior do forno misto.

## Referências

- [1] Bogdal, D.; Prociak, A. "Microwave-enhanced polymer chemistry and technology". USA: Blackwell Publishing Professional, 2007.
- [2] Menéndez, J. A.; Arenillas, A.; Fidalgo, B.; Fernández, Y.; Zubiarreta, L.; Calvo, E. G.; Bermúdez, J. M. "Microwave heating processes involving carbon materials". *Fuel Processing Technology*, 2010, vol. 91, pp. 1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.08.021>
- [3] Macdonald, J. R. *Impedance spectroscopy: emphasizing solid materials and systems*. USA: John Wiley Sons, 1983.
- [4] Thostenson, E. T.; Chou, T.-W. "Microwave processing: fundamentals and applications". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, vol. 30, n.º 9, pp. 1055-1071. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00020-2)
- [5] Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, L. T.; Lavine, A. S. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". USA: John Wiley Sons, 2007.
- [6]. Portal do Estado do Ambiente. Portugal, 2024.
- [7]. Mellodge, P.; Folz, D.; Clark, D.; West, J. "Heating rates of silicon carbide in a microwave field". In: *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics II: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2008.
- [8]. Menezes, R. R.; Souto, P. M.; Kiminami, R. H. G. A. "Microwave hybrid fast sintering of porcelain bodies". *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 190, pp. 223-229. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.041>
- [9]. Sutton, W. H. "Microwave Processing of Ceramic Materials". *Ceramics Bulletin*, 1989, vol. 68, n.º 2, pp. 376-386.
- [10]. Agrawal, D. K. "Microwave Processing of Ceramics". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, vol. 3, pp. 480-485. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(98\)80011-9](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(98)80011-9)
- [11]. Santos, T.; Costa, V. A. F.; Costa, L. C. "Microstructure analysis of microwave and conventionally fired porcelain". *Fire and Materials*, 2022, pp. 1-11. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fam.3103>
- [12]. Santos, T.; Gomes, C. S. F.; Santos, N. F.; Costa, V. A. F.; Costa, L. C. "Global insight into microwave stoneware firing: Crystallochemical transformations". *Ceramics International*, 2022, vol. 48, n.º 15, pp. 21533-21542. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.117>
- [13]. Santos, T.; Gomes, C. S. F.; Costa, V. A. F.; Costa, L. C. "Microwave versus conventional porcelain firing: Greenware to biscuit crystallochemical transformations". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, vol. 143, 121001, pp. 1-10. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4051130>
- [14]. Santos T.; Henrietier, L.; Costa, V. A. F.; Costa, L. C. "Microwave versus conventional porcelain firing: Colour analysis". *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 275, 125265. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125265>
- [15]. Santos, T.; Gomes, C. S. F.; Henrietier, L.; Costa, V. A. F.; Costa, L. C. "Global insight into microwave stoneware firing: Macro and microstructural changes". *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2021, pp. 1-13. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ijac.13736>
- [16]. PROJETO EM CO-PROMOÇÃO. GreenWave - Sinterização assistida por microondas. 2009/2011.
- [17]. PROJETO EM CO-PROMOÇÃO. CerWave - Demonstração do processo de cozedura de porcelana por gás-micro-ondas. 2017/2019.
- [18]. Santos, T. *Método alternativo baseado em radiação de micro-ondas para processamento térmico de materiais* [Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2020.

# SINTERIZAÇÃO *FLASH*

A sinterização *flash* é um processo de sinterização avançado, em que um campo elétrico é aplicado a um corpo cerâmico enquanto este é aquecido. Quando o material atinge uma determinada temperatura, inferior à temperatura de sinterização convencional, ocorre um fenómeno repentino, denominado de "efeito *flash*", em que a condutividade elétrica do material aumenta drasticamente, iniciando a densificação quase instantaneamente. A sinterização *flash* realiza-se a temperaturas entre 500 e 900 °C, abaixo das utilizadas na sinterização convencional, com tempos de sinterização extremamente curtos, de apenas alguns segundos a poucos minutos.



Princípio de funcionamento da técnica de sinterização *flash* (projeto FLASHPOR).

Apesar das vantagens significativas da sinterização *flash*, como a redução de temperatura e tempo de processamento, a sua implementação apresenta diversos desafios e limitações, nomeadamente:

- escalabilidade limitada: a maioria das aplicações permanece em fase laboratorial ou de prototipagem; sendo difícil escalar para grandes volumes ou peças grandes;
- necessidade de controlo rigoroso: exige precisão na temperatura, corrente elétrica e atmosfera de sinterização;
- compatibilidade com materiais: nem todos os materiais cerâmicos reagem da mesma forma ao campo elétrico;
- investimento em infraestruturas específicas

A transição para processos de fabrico cerâmico mais sustentáveis exige uma abordagem integrada: combinar fontes de energia limpa, novas tecnologias térmicas, matérias-primas alternativas e controlo digital da produção. Muitas destas soluções estão em fase piloto, mas têm potencial para revolucionar a indústria nos próximos anos.

## Referência

[1]. Porcelanas Costa Verde. *Projeto FLASHPor - FLASH como tecnologia alternativa de sinterização da porcelana* [Online]. Disponível em: <https://pro.costa-verde.com/projeto-flashpor/>



# ECONOMIA CIRCULAR

Considerando que o modelo económico atualmente dominante começa a revelar limitações físicas devido à crescente escassez de recursos necessários para satisfazer a procura, torna-se evidente a necessidade de evoluir do paradigma linear – baseado em extrair, produzir, consumir e eliminar – para um modelo de **economia circular**. Este novo modelo, ao promover a ligação entre o fim e o início do ciclo produtivo, valoriza a reintegração de resíduos e subprodutos como matérias-primas, convertendo desperdícios em novos recursos económicos. Trata-se, assim, de uma abordagem cada vez mais adotada pelas empresas, permitindo a criação de valor de forma progressivamente dissociada da utilização de recursos naturais finitos [1, 2].

Importa referir que, a nível mundial, a economia é atualmente apenas cerca de 7,2 % circular (2023) [3], o que significa que uma pequena fração dos materiais que entram no sistema económico é reutilizada. Em 2023, a extração global de recursos situou-se em mais de 100 mil milhões de toneladas por ano, mas apenas cerca de 7,2 mil milhões de toneladas de materiais secundários foram reintegrados nos processos produtivos, enquanto o restante se perde, sendo depositado em aterros, incinerado ou fica inacessível para reutilização.

A **economia circular** desempenha um papel fundamental na descarbonização da indústria cerâmica ao promover a utilização mais eficiente dos recursos e a redução das emissões ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos. Em contraste com o modelo linear de "extrair-produzir-e-eliminar", a economia circular privilegia a retenção de valor através da reutilização, reciclagem e reintrodução de materiais nos processos produtivos. Esta abordagem permite evitar emissões associadas desde a extração de matérias-primas virgens até à deposição de resíduos em aterro.

Em março de 2020, a Comissão Europeia adotou um novo Plano de Ação para a Economia Circular, que constitui o novo roteiro da Europa para o crescimento sustentável, na medida em que estabelece uma estratégia orientada para o futuro, visando criar uma Europa mais limpa e mais competitiva, tendo por base as ações desenvolvidas no domínio da economia circular desde 2015. Neste contexto, é proposto um conjunto de medidas dentro das quais um dos objetivos é a redução da produção de resíduos. A transição para a economia circular é vista pela Comissão Europeia como uma oportunidade para modernizar e transformar a Europa no seu caminho para uma competitividade sustentável, permitindo reduzir a pressão sobre os recursos naturais e constitui, assim, uma condição prévia para alcançar o objetivo de neutralidade climática até 2050 [4].

Assim, algumas das estratégias de economia circular na cerâmica englobam [2, 5, 6, 7, 8]:

- **Ecodesign:** Integra considerações ambientais no design do produto, influenciando até cerca de 70% a 80% dos seus impactos ambientais. A aplicação deste conceito desde o início do processo de desenvolvimento otimiza o perfil ambiental do produto em todas as etapas do seu ciclo de vida, nomeadamente, na extração de matérias-primas e auxiliares, fabricação, distribuição, utilização (podendo incluir previamente a construção) e fim de vida. Procura assim processos e produtos menos intensivos em recursos naturais materiais e energéticos.
- **Prevenção e valorização de resíduos | Simbioses industriais:** a incorporação de resíduos na cerâmica, tanto da própria indústria (poeiras, lamas, cacos) como de outros setores (papel, fundição, pedras, curtumes, etc.), reduzindo o consumo de matérias-primas e fortalecendo a economia circular. Inclui ainda partilha de infraestruturas (incluindo energéticas) e serviços. Pode incluir-se neste âmbito das sinergias a partilha de infraestruturas (ex. ETARI), equipamentos comuns ou aluguer, serviços comuns (p. ex. plataformas de logística, eletricidade para autoconsumo partilhado) [7].
- **Extensão do ciclo de vida:** visa prolongar a utilidade dos produtos cerâmicos e valorizar resíduos através da sua reconversão em novos materiais ou produtos.
- **Pensamento de ciclo de vida:** valoriza o uso eficiente de recursos em todas as fases do produto – da extração ao fim de vida – promovendo decisões mais sustentáveis. A abordagem subjacente no desenvolvimento de um processo ou produto com o Ciclo de Vida do Produto [2], é o mote para a valorização dos recursos empregues durante a sua produção. Em cada etapa do ciclo de vida do produto, desde a sua extração, produção, distribuição, utilização até ao seu fim de vida, existe o consumo de recursos e energia com impacto na natureza [2].

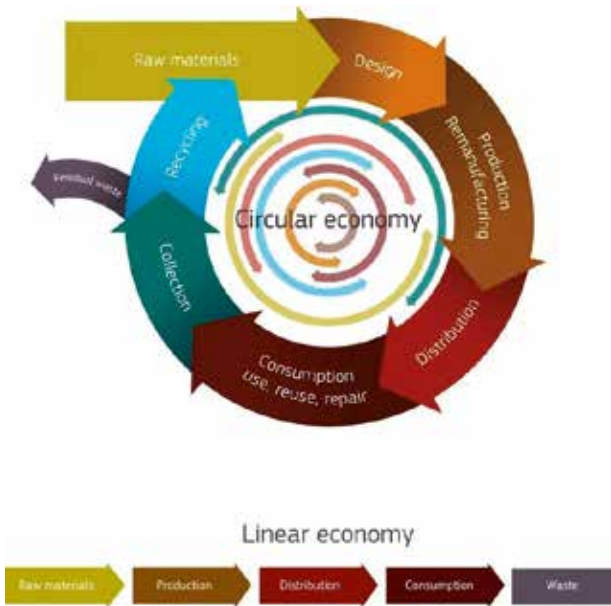


Figura 4.60. Abordagem da economia circular, face à abordagem da economia linear.

Um dos principais vetores de descarbonização passa pela substituição de matérias-primas carbonatadas, como o calcário ou a dolomite, por resíduos ou subprodutos industriais isentos de carbono ou com menor teor, ou seja, matérias-primas alternativas. Esta substituição evita as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da decomposição térmica dos carbonatos durante o processo de fabrico (emissões de processo), que podem representar até 15 a 20% das emissões diretas na indústria cerâmica [9].

Do lado energético, a incorporação de materiais com valor calorífico, incluindo resíduos ou subprodutos orgânicos, permite reduzir a dependência de combustíveis fósseis, que são a principal fonte de emissões diretas nesta indústria. Estes combustíveis alternativos não só contribuem para a neutralidade carbónica, como também evitam a emissão de GEE associados à decomposição de resíduos em aterro.

Além da redução direta de emissões, a economia circular gera benefícios indiretos, como a diminuição da pressão sobre os recursos naturais, menores emissões e a promoção de cadeias de abastecimento mais resilientes e sustentáveis. Ao fechar ciclos de materiais e energia, a indústria cerâmica pode alinhar-se com as metas de descarbonização sem comprometer a qualidade dos seus produtos e, ao mesmo tempo, gerar valor económico e ambiental [9–11].

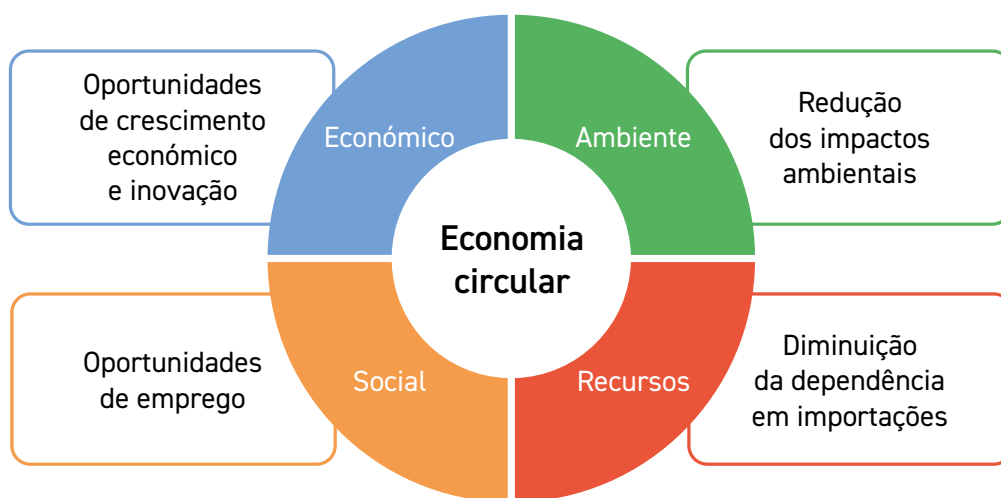


Figura 4.61. Benefícios da economia circular. Fonte [2].

A transição para a economia circular é vista pela Comissão Europeia como uma oportunidade para modernizar e transformar a Europa no seu caminho para uma competitividade sustentável, permitindo reduzir a pressão sobre os recursos naturais e constitui, assim, uma condição prévia para alcançar o objetivo de neutralidade climática até 2050.

Na indústria cerâmica, as fontes mais viáveis de matérias-primas secundárias incluem:

- **resíduos industriais** (ex.: cinzas volantes, escórias, lamas de ETAR, caco cerâmico);
- **resíduos agrícolas e florestais;**
- **subprodutos de outras indústrias** (pedra, papel, vidro, metalurgia, fundição, etc.).

#### **Vantagens da utilização de matérias-primas secundárias/ alternativas:**

- menor extração de recursos naturais, promovendo simbioses industriais;
- redução da deposição de resíduos em aterros;
- possível melhoria das propriedades dos produtos;
- redução da energia de cozedura e consequentes emissões de GEE.

#### **Principais desafios e considerações técnicas:**

- variabilidade na composição dos resíduos;
- necessidade de tratamento prévio;
- resistência à mudança no setor;
- cumprimento de normas e regulamentos.

As ferramentas de Avaliação de Ciclo de Vida, ACV, desempenham um papel crucial na demonstração da circularidade das estratégias [8, 9].

#### **Aplicações e exemplos:**

- uso de lamas de ETAR em produtos cerâmicos estruturais (tijolos e telhas);
- incorporação de cinzas volantes em grés;
- utilização de resíduos de vidro ou de construção e demolição como substitutos de feldspato ou areia.

A indústria cerâmica é um setor com fortes potencialidades para incorporação / valorização de resíduos, sendo esta uma prática crescente a nível nacional. Ao longo dos últimos anos, têm-se desenvolvido estudos de incorporação de resíduos, através da valorização de resíduos e subprodutos gerados na própria indústria (resíduos endógenos) (poeiras, lamas e cacos) minimizando deste modo a extração de recursos naturais e potenciando a economia circular, e na valorização de resíduos de outros setores em matrizes cerâmicas [1, 5, 7, 10].

Para além dos resíduos endógenos, tem-se efetuado uma série de ensaios de incorporação de resíduos exógenos (outros setores, promovendo-se as simbioses industriais, com vantagens a nível da poupança de recursos minerais mas também de recurso energéticos, tão diversificados como lamas de ETAR, lamas de ETA, resíduos de celulose, resíduos florestais, pó de cortiça, resíduos da indústria metalúrgica, cinzas volantes, lamas de curtumes, lamas de corte de pedra natural, resíduos de lâmpadas fluorescentes, etc., em materiais cerâmicos principalmente no subsector da cerâmica estrutural, pavimento e agregados leves, os quais se encontram esquematizados no website Centro de Recursos Economia Circular desenvolvido pelo CTCV (<https://www.ctcv.pt/economiacircular/>) [11], no âmbito do projeto SIAC CTCV 2020, dotado de exemplos nacionais e internacionais.

Atualmente, a Agenda Ecocerâmica e Cristalaria de Portugal (ECP) tem como objetivo reforçar a competitividade das indústrias de cerâmica e cristalaria a nível nacional, e pretende promover e estimular a economia circular nos sectores da cerâmica e do vidro, recolhendo várias informações sobre o setor, como: tipologia de resíduos e boas práticas implementadas de economia circular. Assim como desenvolver pastas cerâmicas e produtos inovadores numa perspetiva de ciclo de vida, utilizando matérias-primas secundárias, como resíduos ou subprodutos gerados pela atividade do setor ou de outros setores [5].

Sendo de ressaltar que a desclassificação de resíduos para subproduto, de acordo com a legislação em vigor é um passo fundamental em termos de enquadramento legal nacional para tornar um resíduo numa matéria-prima secundária e as ferramentas de Avaliação de ciclo de vida são fundamentais para demonstrar a circularidade das estratégias.

A incorporação de matérias-primas secundárias (por exemplo, cacos cerâmicos, resíduos de outras indústrias ou subprodutos minerais), a valorização de resíduos internos (endógenos) e externos (exógenos) e o ecodesign de produtos mais duráveis e recicláveis contribuem para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> de âmbito 3, ao encurtar cadeias de abastecimento e evitar emissões associadas à produção de matérias-primas primárias.

Paralelamente, estratégias circulares aplicadas ao processo produtivo — como a otimização de fornos, a recuperação de calor residual, a reutilização de água de processo e a simbiose industrial com por exemplo materiais carbonatados — promovem ganhos de eficiência energética que se traduzem numa redução direta das emissões de âmbito 1 e 2. Estas medidas facilitam ainda a integração progressiva de fontes de energia renovável e combustíveis de baixo teor de carbono, reforçando o alinhamento do setor com os objetivos de neutralidade climática.

Em suma, os vários setores da cerâmica têm capacidade para inovar e valorizar resíduos/subprodutos da própria e de outras indústrias, promovendo estratégias de economia circular e simbioses industriais.

É, no entanto, necessário garantir que os resíduos e subprodutos a incorporar não geram impactos ambientais ou de saúde e devem cumprir normas de qualidade e segurança dos produtos finais. O uso deve ser tecnicamente viável e economicamente justificável.

O aumento de circularidade requer uma “nova” visão sobre os fatores-chave de sucesso em toda a cadeia de valor do produto, desde a sua conceção até ao seu fim de vida, numa abordagem de ciclo de vida (ACV), de forma a perceber os pontos críticos e áreas de melhoria de desempenho. A economia circular oferece uma visão transformadora para o futuro, onde o crescimento económico e a sustentabilidade ambiental devem convergir. Ao adotar princípios circulares, estes setores industriais podem reduzir o impacto ambiental, criar oportunidades económicas e melhorar a qualidade de vida da sociedade, contribuindo para a sustentabilidade.

A legislação atualmente em vigor permite, de diferentes formas, a desclassificação de resíduos, o que facilita o processo de utilização de resíduos como matérias-primas, desempenhando as ferramentas de ACV um papel importante para demonstrar a circularidade das estratégias de economia circular.

## Referências

- [1]. M. Almeida, A. Baio Dias, V. Francisco, A. Amado e F. Simões, “Análise da viabilidade da aplicação de estratégias de economia circular na indústria cerâmica,” *Revista KÉRÂMICA*, n.º 345, pp. 8–13, mar./abr. 2017.
- [2]. M. Almeida, “Economia circular – Mesa temática nas Jornadas da Cerâmica 2019,” *Revista TÉCNICA*, n.º 0, pp. 38–41, jan. 2020.
- [3]. Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE), *The Circularity Gap Report 2023: The Global Circularity Gap*. Circle Economy Foundation, 2024.
- [4]. Comissão Europeia, *Um novo Plano de Ação para a Economia Circular – Para uma Europa mais limpa e competitiva*, COM(2020) 98, Bruxelas, 11 mar. 2020.
- [5]. M. Almeida, I. Rondão, A. Amado, V. Francisco, M. Capela, I. Vilarinho, P. Seabra e J. Labrincha, “Simbioses industriais e circularidade | Contributo do Projeto Ecocerâmica e Cristalaria de Portugal,” *Revista KÉRÂMICA*, n.º 391, pp. 15–18, dez. 2024.
- [6]. M. Almeida e S. Vaz, A. Baio Dias, *Impactes Ambientais e Comércio de Emissões, Indústria Cerâmica – Um caso de estudo*, Coimbra: APICER – Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica, 2004.
- [7]. M. Almeida, A. Amado e P. Frade, “Resíduos e subprodutos como matérias-primas secundárias – Uma alternativa para uma economia mais circular,” *Revista TÉCNICA*, n.º 6, pp. 18–20, nov./dez. 2020.
- [8]. M. Almeida, *Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal*, Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, 2019.
- [9]. M. Almeida, “Sustentabilidade, economia circular e neutralidade carbónica,” *Revista TÉCNICA*, n.º 11, pp. 16–21, set./out. 2021.
- [10]. M. Almeida, A. Amado, P. Frade e V. Francisco, “Exemplos de projetos de economia circular com simbioses industriais,” *Revista TÉCNICA*, n.º 6, pp. 26–29, nov./dez. 2020.
- [11]. Centro de Recurso para a Economia Circular. [Online]. Disponível em: <https://www.ctcv.pt/economicircular/>

# MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

João A. Labrincha

Universidade de Aveiro, Portugal

No processamento de materiais cerâmicos, a etapa de cozedura é a principal geradora de emissões carbónicas [1]. Estas podem ter origem química (reações de decomposição de carbonatos ou matéria orgânica/aditivos) e/ou térmica (da queima de combustíveis fósseis, maioritariamente gás natural). Ao contrário da fabricação de cimento Portland, maioritariamente constituído por calcário, os produtos cerâmicos tradicionais aqui visados, não incorporam carbonatos na sua composição, com exceção de produtos de revestimento (designados como monoporosa) e de faiança. Ainda assim, as percentagens de carbonatos nas formulações são relativamente reduzidas (em geral inferiores a 20% em massa). Por isso, as emissões de origem química, diretamente relacionadas com as matérias-primas, são minoritárias, mesmo nestes produtos. Naqueles em que não se usam carbonatos na formulação (porcelana, pavimentos, sanitários, etc.), as emissões de origem química na etapa de cozedura são praticamente nulas, podendo existir decomposições de aditivos/componentes orgânicos.

A utilização de carbonatos em produtos de monoporosa cumpre a função de minimizar/segurar a retração na fase de sinterização, fundamental para permitir a utilização de ciclos rápidos de cozedura (de 40 minutos, de frio a frio, em alguns casos). De facto, o gás gerado na decomposição do carbonato, gera porosidade que contraria a retração de sinterização. Além disso, o CaO formado reage com a sílica na mistura, gerando fases de reduzida expansão térmica. Só assim, se consegue garantir ajuste dimensional e evitar empenos/fissuração em peças com alguma dimensão e cozidas de forma tão rápida. Em produtos de faiança, os carbonatos respondem pela porosidade relativamente elevada das peças chacotadas, facilitadora da aplicação/adeseção da camada de vidro, principal veículo da obtenção de efeitos decorativos/cromáticos diversificados.

Isto para dizer que a substituição/eliminação de carbonatos na formulação daqueles produtos, desejável para reduzir as emissões carbónicas de origem química, pode ser de difícil concretização mantendo as condições processuais inalteradas. Nestes casos, uma estratégia possível envolve a utilização de fontes não primárias de carbonatos, nomeadamente resíduos ricos naqueles componentes, fazendo valer o crédito pela valorização de um resíduo/subproduto. Este princípio vigora noutros domínios, por exemplo na queima de biomassa para gerar energia elétrica relativamente à queima de carvão ou gás natural.

As *cascas/conchas de bivalves* (mexilhões, ostras, amêijoas, etc.) são fontes naturais de carbonato de cálcio. Também as cascas de ovo são essencialmente constituídas por este componente. São óbvias fontes potenciais alternativas de calcário, tal como demonstra o projeto EGGSHELLENCÉ [2]. De facto, as propriedades funcionais dos produtos não se alteram de forma significativa com a substituição completa da fonte de calcário, sendo também mínimas as alterações processuais uma vez tratados os resíduos de forma adequada. No caso das cascas de bivalves exige-se fragmentação e moagem em condições por vezes mais exigentes que as da rocha calcária. Já as cascas de ovo sofrem fragmentação e moagem mais fáceis, exigindo-se, no entanto, a remoção prévia da película orgânica para minimizar odores indesejáveis antes da queima e decomposições orgânicas no forno. Esta operação é delicada e exige equipamento próprio, desenvolvido na forma de protótipo no dito projeto [2]. Algumas cascas de bivalves podem induzir colorações indesejáveis, sendo um fator limitante na sua incorporação em produtos de pasta branca.

Em ambas as situações é crítica a fase de recolha dos materiais, pela sua elevada dispersão. Estimam-se elevadas as distâncias totais de transporte, com óbvia penalização ambiental.

Outros resíduos ricos em carbonato de cálcio que podem ser explorados incluem *finos/natas do corte/polimento de pedra calcária/mármore*, resíduos das empresas de celulose (*grits/lamas ou cinzas de cal*). Ao contrário do calcário de origem biológica antes indicado, existem unidades industriais de razoável/elevada dimensão que podem garantir fornecimento de elevada e razoavelmente constante quantidade de material, facilitando o estabelecimento de simbioses industriais. Por exemplo, os *grits (areões)* são essencialmente compostos por carbonato de cálcio, tendo teor de CaO superior a 49% (o carbonato de cálcio puro possui 56% de CaO). O teor de humidade varia entre 8-22% e a distribuição granulométrica pode atingir 2 mm. São geradas mais de 8000 toneladas anualmente deste resíduo, mostrado na Figura 4.62. A incorporação em pastas cerâmicas exigirá moagem do resíduo, sendo dispensável no caso das *lamas calcárias*, igualmente ou mais ricas em CaO e também geradas pelas empresas de celulose, mas muito mais finas (< 0,1 mm). Neste caso, o teor de humidade é elevado (> 50%), sendo necessária secagem prévia. A Figura 4.62 ilustra amostra de lama de cal previamente seca.



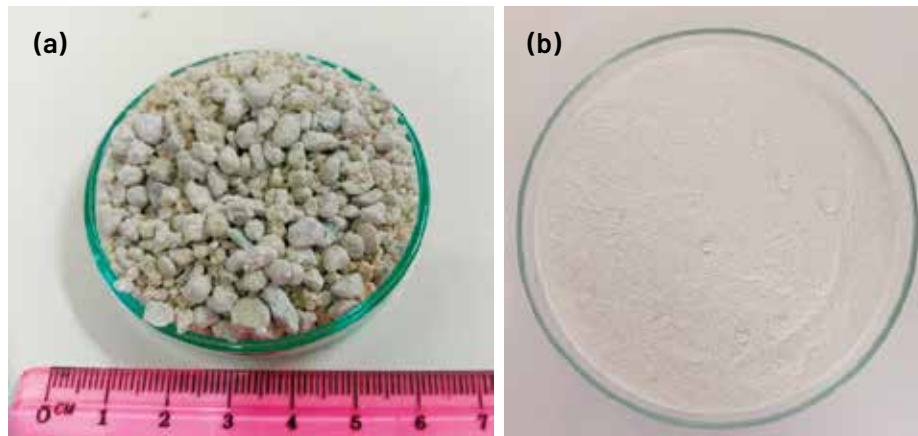


Figura 4.62. (a) Imagem de *grits*, tal como são gerados; (b) imagem de lamas de cal previamente secas.

As *cinzas calcárias*, quando existem nas empresas de celulose, são as mais adaptadas para transporte e incorporação, dada a finura granulométrica e reduzida humidade (< 1%). São geradas mais de 70000 toneladas/ano de lamas/ cinzas deste tipo. O aspeto é semelhante ao da lama seca mostrada na figura anterior.

As *natas/lamas geradas no corte de pedra calcária* têm características algo semelhantes às lamas de cal, prevenindo-se potencialidades e problemas semelhantes aos elencados. Os finos ou poeiras são, por sua vez, semelhantes às cinzas de cal. A localização das fontes geradoras relativamente às empresas cerâmicas ou unidades de transformação/preparação de matérias-primas pode influenciar a escolha, no sentido de minorar distância de transporte e respetivos danos ambientais. Em todos os casos, pode merecer atenção a coloração indesejável que os resíduos podem aportar (tom amarelado e não branco, devido à presença de ferro). No limite, pode justificar-se tratamento de purificação/branqueamento.

Como antes se indicou, a maioria dos produtos cerâmicos não utiliza (propositadamente) calcários na sua formulação, podendo existir como componente acessório de outras matérias-primas. Os produtos cerâmicos são elaborados essencialmente com três tipos de ingredientes: (i) argilas, que cumprem a função de conferir trabalhabilidade; (ii) fundentes, como feldspatos e carbonatos, que diminuem a temperatura de cozedura e fomentam a densificação dos produtos; (iii) inertes, como o quartzo, que minimiza as variações dimensionais das peças, na secagem e cozedura. Podem ainda usar-se ingredientes orgânicos em produtos específicos, como argila expandida, estando presentes nos outros produtos comuns na

forma de aditivos que ajustam a plasticidade, viscosidade, etc. Neste caso, as quantidades são sempre muito baixas, pelo que os efeitos da sua decomposição térmica se podem desprezar.

Quaisquer um daqueles ingredientes principais, em geral de origem mineral natural e não renovável, pode tentativamente ser substituído por resíduo/subproduto (como aliás se indicou para o caso do carbonato). Em termos gerais, a valorização de resíduos/subprodutos pode ter créditos em termos de menor energia incorporada versus a extração/tratamento de recursos primários, desde que o processamento seja efetivamente menos exigente. Além disso, contribui para a melhoria da sustentabilidade do setor, pela economia de recursos materiais (não renováveis).

A reciclagem de resíduos endógenos (sobras de pasta, de pó atomizado, peças secas defeituosas, etc.) pelas próprias empresas do setor é uma realidade com alguns anos. Permanece problemática a incorporação de cacos cozidos, mesmo que não decorados/corados, pela inerente dificuldade de moagem. Também a reutilização interna de lamas de ETAR pode enfrentar dificuldades, por alterar a reologia das suspensões/pastas e potenciar contaminação cromática. Obviamente que produtos como a porcelana serão menos recetivos à incorporação destes ou outros resíduos, dada a exigência de brancura.

Os produtos cerâmicos são também interessantes matrizes para incorporação de resíduos gerados por outros setores de atividade (exógenos). A cozedura fomenta a reatividade entre os diferentes componentes, assegurando a inertização de potenciais espécies ambientalmente perigosas e com interessante potencial corante. A litera-

tura sobre estudos de incorporação de resíduos em produtos cerâmicos é vasta, ainda que em muitos casos seja desconhecido o grau de implementação industrial das soluções estudadas. Por isso, optou-se por enumerar algumas situações, com indicações breves sobre o potencial e dificuldades/exigências de cada caso. Tentar-se-ão identificar os casos considerados mais promissores para a realidade nacional, tendo por base o possível estabelecimento de simbioses industriais.

### Areias de purga de leito fluidizado de queima de biomassa e de fundição

As *areias de leito fluidizado* são essencialmente geradas por empresas de celulose na queima de biomassa para produzir eletricidade e vapor de água, em quantidades que superam 10000 ton/ano. São basicamente constituídas por areia de sílica (quartzo), com alguma contaminação por cinza de fundo/pesada (com alguns metais e partículas de material orgânico inqueimado), e distribuição granulométrica muito estreita, em torno de 0,5 mm. A Figura 4.63 mostra imagens destes resíduos.

Têm sido esporadicamente incorporadas na formulação de argamassas [3]. Em produtos cerâmicos podem substituir o quartzo, sendo necessário ajuste granulométrico (moagem, não especialmente exigente). Alguma contaminação cromática pode limitar a quantidade a in-

corporar nas pastas ou mesmo impedir a reciclagem nos produtos de maior brancura. Não se conhecem estudos na literatura sobre esta aplicação.

As *areias (verdes) de fundição (de ferro)* são geradas em quantidades expressivas (60000 - 80000 ton./ano). São também essencialmente constituídas por quartzo, com adição de bentonite (para garantir plasticidade/liga) e pó de grafite (refratária e indutora de condições redutoras). Os teores destes aditivos são inferiores a 10% da massa total da mistura usada nos moldes de fundição. Granulometricamente, são constituídas por partículas entre 0,1 e 0,5 mm, podendo haver aglomerados de tamanho superior e uma pequena fração de partículas mais finas. Requer-se, por isso, moagem. A Figura 4.64 mostra grãos de areia após vazamento e abate dos moldes.

Podem também substituir o quartzo nas formulações de produtos cerâmicos, com limitações semelhantes às enunciadas no caso da areia anterior. Na verdade, estas areias têm cor escura devido à presença de grafite (teor de carbono inferior a 3%). Existem estudos que testaram a incorporação em cerâmica de barro vermelho (até 20% da massa da pasta total e não seletivamente de quartzo que não se adiciona isoladamente em produtos deste tipo), para além de misturas betuminosas e cimentíceas (argamassas) [4, 5]. Ainda assim, não se conhecem aplicações industriais em curso.



Figura 4.63. Imagens de areias purgadas de caldeira de leito fluidizado, recolhidas em períodos distintos.

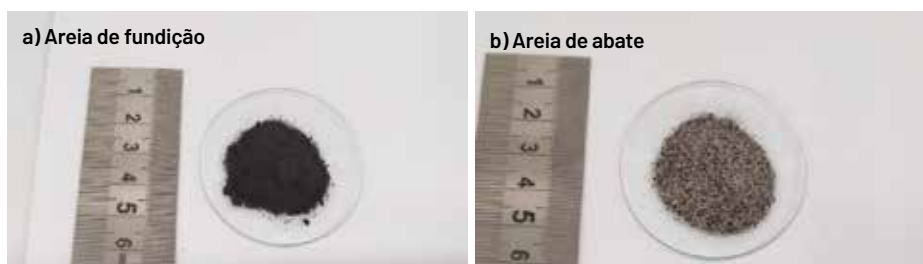


Figura 4.64. Imagem de grãos de areia de moldes abatidos após fundição de ligas ferrosas.

### Cinzas volantes (queima de biomassa)

São também geradas em empresas de celulose ou noutras dedicadas à produção de energia elétrica por queima de biomassa. Estima-se produção anual superior a 100000 toneladas. São essencialmente constituídas por sílica e alumina, contendo elementos alcalinos, alcalino-terrosos e ferro como constituintes secundários [6]. São muito finas granulometricamente (< 0,1 mm), pelo que dispensam operações de cominuição. A Figura 4.65 mostra imagens de cinza, recolhidas em dias distintos.

A composição pode variar significativamente, de empresa para empresa e ao longo do tempo na mesma caldeira, de acordo com o tipo de biomassa queimada [7]. Esta variabilidade exige loteamento para garantir homogeneização. Podem também induzir contaminação cromática, dada a presença de espécies metálicas como ferro. Não se espera que exerçam qualquer função específica (plastificante, fundente ou inerte) nas pastas cerâmicas, pelo que é aconselhável a sua adição ou substituição total dos componentes comuns daquelas. São muito escassos os estudos de utilização deste resíduo em produtos cerâmicos, sendo prudente limitar os teores de incorporação. Estudos de incorporação em argamassas sugerem potencial de incorporação em teores até 20% em massa [8], substituindo o cimento.

### Lamas metalúrgicas (galvanização, anodização, trefilagem de aço) e do tratamento de águas

Ao contrário dos resíduos antes elencados, que possuem reduzidos teores de humidade, as lamas metalúrgicas ou outras estão, em geral, muito húmidas (humidade > 50%). Isto exige secagem prévia do material, preferencialmente pela unidade geradora para minimizar custos e danos ambientais de transporte. Caso contrário, pode tentar-se incorporação direta em suspensões cerâmicas, ainda que a presença de flocculantes possa afetar a sua reologia. Granulometricamente são finas (partículas abaixo de 0,1 mm), dispensando-se etapa de cominuição [9].

A Figura 4.66 mostra imagens de lamas de galvanização, anodização e trefilagem [10].

A composição das lamas metalúrgicas depende naturalmente do processo gerador. *Lamas de galvanização de superfícies* são geradas em quantidades de 10000 toneladas/ano [11]. São ricas nas espécies depositadas nas peças, exemplo do crómio e níquel no caso de cromagem e niquelagem. Cálcio e silício são outras espécies comuns [9]. Por sua vez, as lamas de trefilagem de aço são essencialmente constituídas por ferro. Têm forte poder corante e, em geral, comportamento fundente. Pode explorar-se esta característica na coloração de produtos cerâmicos,

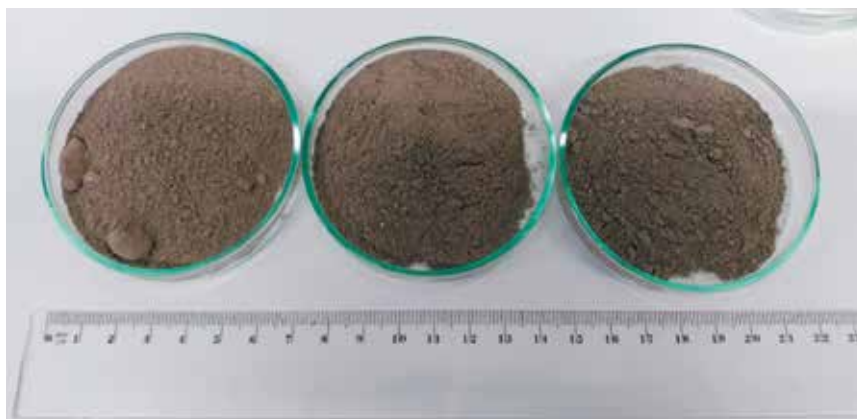


Figura 4.65. Imagem de cinza volante de queima de biomassa.

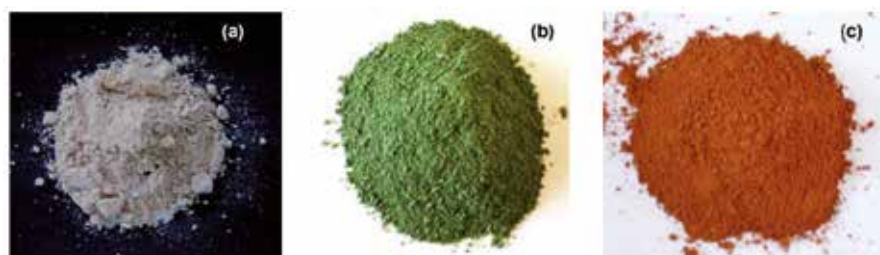


Figura 4.66. Imagens de lamas de anodização de alumínio (a), de cromagem/niquelagem (b) e de trefilagem de aço (c), previamente secas [10].

substituindo pigmentos [12] ou formulando-os, onde exista produção [13]. Trata-se de aplicação que consome/escoa quantidades modestas de resíduo, mas em produtos de elevado valor acrescentado. A presença de cloretos ou sulfatos em alguns destes resíduos exige controlo na fase de calcinação do material.

*Lamas de anodização de alumínio* são ricas neste elemento, podendo gerar alumina em teores superiores a 90% após calcinação/cozedura acima de 1000 °C [14]. Têm, por isso, características refratárias e coloração branca/acinzentada. Sofrem forte perda de massa por decomposição térmica, uma vez que são maioritariamente compostas por hidróxidos e sulfatos de alumínio [15]. A sua incorporação em formulações cerâmicas, como componente refratário, sem calcinação prévia, é difícil de realizar. Podem ser usadas em engobes refratários na mobília de fornos. Geram-se mais de 6000 toneladas destas lamas anualmente.

As *lamas/sedimentos da filtração/clarificação de água* para consumo humano, geradas em quantidade superior a 35000 toneladas/ano, são constituídas por areias e partículas argilosas carregadas pelos cursos de água, com adição de cal em alguns lotes onde se praticou clarificação. A composição é variável, sendo dominantes os óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO, e o tamanho máximo das partículas é 0,3 mm. A Figura 4.67 mostra imagem desta lama, tal como recebida [16].

Se devidamente loteadas, podem ser incorporadas em pastas cerâmicas de grés ou faiança (as ricas em cal)[16], com atenção a potencial coloração indesejável (presença de ferro e matéria orgânica) e decomposição de sulfatos (usados na desinfecção/clarificação). Operações de secagem e moagem podem ser necessárias, assim como eventual beneficiação para eliminar espécies contaminantes. Podem ser facilmente consumidas no fabrico de clínquer de cimento, sendo esta aplicação concorrencial com a incorporação em produtos cerâmicos comuns.



Figura 4.67. Imagem de lama de filtração de água, tal como é gerada na unidade da Asseiceira [16].

### Finos/natas de corte de granito

Tal como acontece em rochas carbonatadas, o *corte/polimento de granito* gera lamas (> 300000 toneladas/ano, considerando todo o tipo de rochas) e finos cuja composição traduz a da rocha usada (quartzo, feldspato e mica) com alguma contaminação pelas ferramentas de corte (fio diamantado e aço). O teor ponderal em sílica supera frequentemente 60%, sendo alumina (> 10%) e óxidos alcalinos (de sódio e potássio) os outros componentes intrínsecos mais relevantes. A estes, acresce a presença significativa de CaO (< 10%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, parcialmente introduzidos nas operações de manipulação da pedra ou na ETAR (caso das lamas). Em termos granulométricos, as lamas são finas: o tamanho médio de grão é, em geral, inferior a 10 µm mas os agregados podem atingir tamanhos acima de 0,2 mm. As natas possuem elevado teor (> 50%) de humidade [17].

Existem diversos estudos de incorporação do resíduo em pastas cerâmicas, por exemplo de grés [17]. Foi testado em substituição integral dos componentes da formulação ou como substituto de feldspato atendendo ao seu carácter fundente [18]. Esta alternativa gera maior valor e resultados mais interessantes. Coloração indesejável bem como necessidade de ajustar a distribuição granulométrica são as principais dificuldades que limitam a reciclagem deste material. A aglomeração com resina pode gerar produtos de elevado valor acrescentado, uma vez ajustada a qualidade dos produtos curados (impermeabilidade, resistência ao risco, dureza).

### Escórias siderúrgicas

A atividade siderúrgica em Portugal tem expressão algo reduzida, mas gera escórias em quantidade superior a 270000 ton./ano [19]. São constituídas essencialmente por óxido de ferro (muitas vezes separado para valorização) e silicatos de cálcio e alumínio. A granulometria é muito ampla, podendo atingir tamanhos até 40 mm (o diâmetro médio é de cerca de 10 mm). A Figura 4.68 mostra imagem de escórias [20].



Figura 4.68. Imagem de escórias siderúrgicas [20].

## Referências

- [1]. Monteiro, C.; Almeida, M.; Rondão, I.; Carvalho, S.; Francisco, V.; Frade, P. Almeida, M.; Frade, P. "Caminhos para a descarbonização da Indústria Cerâmica até 2050". *Técnica*, 2024, n.º 23 (junho/julho), pp. 30-33. <https://issuu.com/ctcv/docs/revista-tecnica23-junho-julho>
- [2]. LIFE EGGSHALLENGE. Disponível em: <https://www.lifeeggshellence.eu/en/home/>
- [3]. Modolo, R. C. E. "Valorização de resíduos sólidos da indústria de celulose e papel" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2014.
- [4]. Couto, D. M. S. "Estudos de inertização de lamas galvânicas em corpos cerâmicos tradicionais" [Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2000.
- [5]. Monosi, S.; Sani, D.; Tittarelli, F. "Used foundry sand in cement mortars and concrete production". *The Open Waste Management Journal*, 2010, vol. 3, pp. 18-25.
- [6]. Rejini, R. "Biomass fly ash incorporation in cement based materials" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2011.
- [7]. Capela, M. de N. "Tecnologias de melhoria de compatibilização das cinzas das caldeiras de biomassa com aplicações em cimento e argamassas" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2023.
- [8]. Saint Gobain. "Projeto Reclaim". Disponível em: <https://construir.saint-gobain.pt/noticias/projeto-reclaim>
- [9]. Magalhães, J. M. "Inertização de lamas galvânicas por incorporação em materiais cerâmicos" [Tese de Doutoramento, Universidade do Minho]. Braga, 2002.
- [10]. Costa, M. G. C. "Valorização de resíduos industriais na formulação de produtos e pigmentos cerâmicos: processamento e desenvolvimento de cor" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2009.
- [11]. Silva, J. E. "Valorização de lamas galvânicas por via hidrometalúrgica" [Tese de Doutoramento, Universidade do Minho]. Braga, 2006.
- [12]. Vilarinho, I. S.; Carneiro, J.; Pinto, C.; Labrincha, J. A.; Seabra, M. P. "Development of coloured stoneware bodies through the incorporation of industrial Cr/Ni electroplating sludge". *Sustainability*, 2021, vol. 13, p. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13041999>
- [13]. Hajjaji, W.; Seabra, M. P.; Costa, G.; Ribeiro, M. J.; Zanelli, C.; Dondi, M.; Labrincha, J. A. "An overview of using solid wastes for pigment industry". *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, vol. 32, n.º 4, pp. 753-764. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.10.018>
- [14]. Pereira, D. A. "Otimização das condições de processamento para inertização de resíduos industriais de alumínio em matrizes cerâmicas estruturais" [Tese de Doutoramento, Universidade do Minho]. Braga, 2004.
- [15]. Ribeiro, M. J. "Valorização de resíduos industriais e formulação de novas composições cerâmicas: reactividade e comportamento térmico e eléctrico" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2004.
- [16]. Raupp-Pereira, F. "Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas cimentíceas" [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro, 2006.
- [17]. Surra E.; Sousa, J.; Correia, M.; Carvalheiras, J.; Labrincha, J. A.; Marques, J. C.; Lapa, N.; Delereu-Matos, C. "Technical, environmental and cost assessment of granite sludge valorisation". *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, p. 4513. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13074513>
- [18]. Torres, P.; Fernandes, H. R.; Agathopoulos, S.; Tulyaganov, D. U.; Ferreira, J. M. F. "Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations". *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, pp. 3177-3185. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.039>
- [19]. Correia, A.; Ferreira, S.; Roque, A.; Cavaleiro, A. "Agregados siderúrgicos inertes para a construção. Um novo material de construção". *Atas do CINCOS'08*, 2008, pp. 61-71.
- [20]. Ortega, V. "Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales" [Tese de Doutoramento, Escola Politécnica Superior Campus San Amaro, Universidade de Burgos]. Burgos, 2011.

# CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO COMO OPÇÃO DE DESCARBONIZAÇÃO PARA A INDÚSTRIA CERÂMICA

Ana Rita Martinho, Frederico Coelho, Marcelo Costa, Hugo Matias  
Associação NET4CO<sub>2</sub> – Network for a Sustainable CO<sub>2</sub> Economy

A captura e armazenamento geológico de carbono (CAC) e captura e utilização de carbono (CUC) são opções tecnológicas estratégicas para a descarbonização de diversos setores de atividade e para gestão sustentável de carbono industrial [1, 2] promovendo a redução e mitigação de emissões, a economia circular e a independência econômica de combustíveis sintéticos através da substituição de produtos petrolíferos por concorrentes sintéticos produzidos através de carbono capturado e energia renovável.

Estas cadeias de processos envolvem diferentes opções técnicas com uma ampla oferta tecnológica. A aplicação desta solução na indústria cerâmica, envolve a instalação de condutas para recolha dos gases de queima, bem como de uma unidade de separação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), da qual se obtêm duas correntes principais: (1) CO<sub>2</sub> de elevada pureza e (2) corrente de gás de combustão limpo, que é emitida para a atmosfera. Algumas unidades auxiliares poderão ser necessárias, tais como unidades de pré-tratamento do gás de combustão, para remoção de impurezas que possam afetar o desempenho do processo de separação do CO<sub>2</sub>, ou unidades de preparação do CO<sub>2</sub> para as etapas a jusante. Depois de capturado, o CO<sub>2</sub> poderá ser convertido *in-situ* em produtos de valor acrescentado, ou terá de ser transportado para um *hub* de conversão ou um local de armazenamento geológico (ver Figura 4.69).

## Captura de carbono

A captura de carbono pode ser feita em diferentes pontos relativos à combustão (ver Figura 4.70), o que afetará a mistura do gás e por consequência, a seleção e desempenho do processo de separação. Apesar das concentrações de CO<sub>2</sub> serem mais baixas nos processos de pós-combustão, implicando maiores consumos energéticos, estes são os processos mais explorados em aplicações industriais por permitirem maior flexibilidade, uma vez que não implicam qualquer alteração dos processos industriais ou do processo de combustão.

Existem diferentes métodos de separação do CO<sub>2</sub> da mistura de gases. A seleção e o desempenho dos diferentes métodos dependem de alguns critérios tais como: (1) composição do gás, (2) concentração de CO<sub>2</sub>, (3) nível de contaminantes, (4) fluxo do gás e flutuações, (5) aplicação do CO<sub>2</sub> ou nível de pureza desejado (>95% para hidrogenação e >99% para transporte), (6) utilidades e oportunidades de integração energética, (7) custo e disponibilidade de soluções comerciais.



Figura 4.69. Cadeia de processos envolvidos nas soluções de captura, utilização e armazenamento geológico de carbono.





Em todos os subsetores da cerâmica surgem concentrações abaixo dos 3%, para as quais não existem ainda soluções comerciais de captura, mas diversas tecnologias estão a ser desenvolvidas, sobretudo com métodos de adsorção e ciclos químicos de absorção. Atualmente já existem algumas soluções de absorção que podem ser aplicadas em fábricas de cerâmica utilitária e decorativa com concentrações mais elevadas. A separação criogénica ou por membranas não é apropriada para o setor.

ou estão a desenvolver soluções comerciais de captura de CO<sub>2</sub> para a indústria e o número de soluções por método de separação. Muitas estão em fase de desenvolvimento ou demonstração e a absorção é o método que reúne maior oferta tecnológica. Entre as soluções que podem lidar com concentrações de CO<sub>2</sub> abaixo de 2%, as soluções de absorção enfrentam desafios de viabilidade económica e espera-se que as alternativas de adsorção e ciclo químico possam ser mais eficientes para lidar com concentrações tão baixas quanto a concentração atmosférica (aplicações de captura direta a partir do ar). O Global CCS Institute pu-

A Figura 4.72 ilustra os diferentes fornecedores que têm

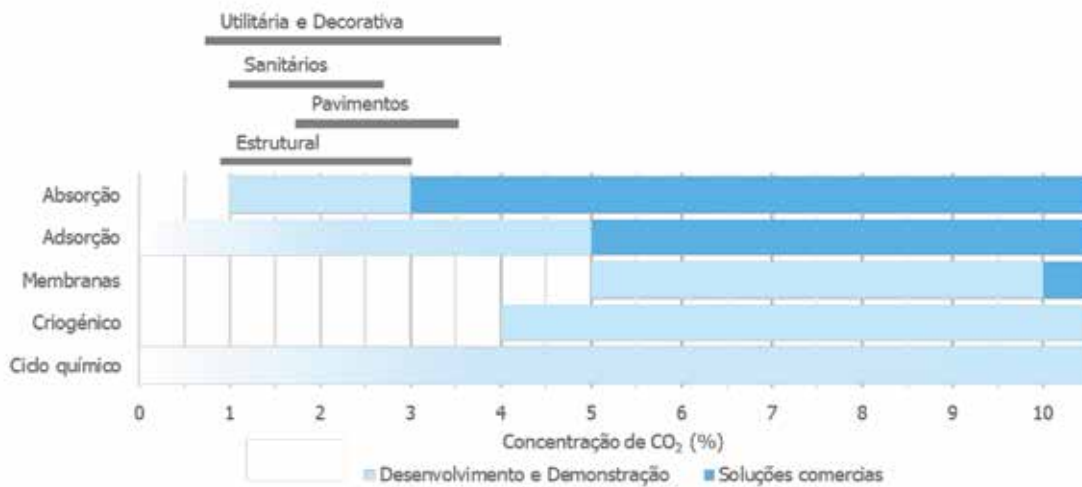


Figura 4.71. Gama de concentração de CO<sub>2</sub> típica dos diferentes subsectores da indústria cerâmica e gamas suportadas pelos diferentes métodos de separação de CO<sub>2</sub> em pós-combustão.



Figura 4.72. Soluções tecnológicas comerciais e em desenvolvimento por método de separação. Alguns fornecedores oferecem mais do que uma solução dentro de cada método.



blica periodicamente um relatório [4] que contempla uma revisão do estado da arte destas tecnologias.

**Transporte**

O transporte de CO<sub>2</sub> em longa distância é feito no estado líquido ou supercrítico (elevada densidade). Os critérios de qualidade em termos de contaminantes [5] são tipicamente os mais restritivos de toda a cadeia CAC e CUC, para evitar a mudança de fase e a corrosão dos materiais. A Figura 4.73 ilustra os custos totais indicativos para o transporte por conduta, navio, camião e ferrovia, em função da distância e dos volumes transportados anualmente.

Apesar da maturidade tecnológica destas soluções, a in-

fraestrutura existente é insuficiente para servir estas novas cadeias de valor e o período de demora, assim como os elevados custos de investimento associados, são os principais desafios para o seu desenvolvimento. Ação coordenada com suporte das autoridades regionais é essencial para a ignição destas novas vias de transporte à escala necessária.

**Utilização de carbono**

Aliando os princípios da economia circular à crescente necessidade de diminuir o consumo e dependência de combustíveis fósseis, novas cadeias de valor estão a emergir fazendo do carbono industrial a matéria-prima do futuro para diversas indústrias ou setores, tais como os trans-

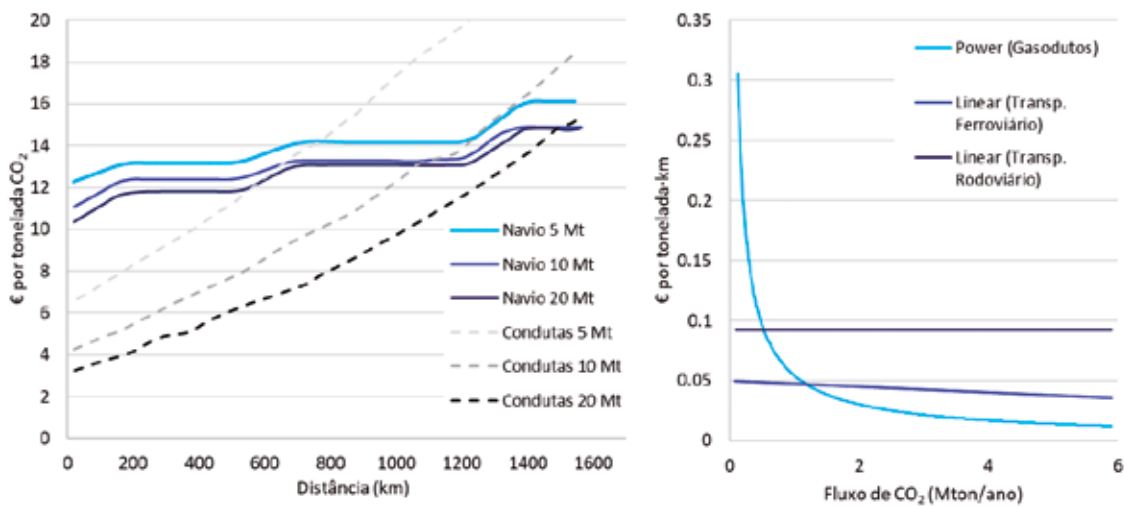


Figura 4.73. Custos de transporte de CO<sub>2</sub> em função do meio de transporte, distância e escala.

Grupo	Produto	Mercado	Taxa de produção kg prod / kg CO <sub>2</sub>	kg H <sub>2</sub> / kg CO <sub>2</sub> *	Tipo de conversão e Maturidade
Combustíveis e Armazenamento de Energia	Metano	Indústria, Aquecimento	0.36 *	0.18	T 7-9 E 4-5
	Metanol	Transporte marítimo, Indústria química	0.73 *	0.14	T 4-9 E 4-7
	Crude Sintético	Transporte aéreo ou de longa distância	0.31 - 0.43*	0.10	T 4-9 E 4-8
Químicos	Ureia	Fertilizantes	1.77 *	0.09	T 7-8
	Carbonatos cíclicos	Solventes para eletrólitos das baterias de lítio	2	X	T 7-9
	Polióis	Químicos intermediários	2.5 - 4	X	T 6-8
	Policarbonatos	Polímeros	> 2	X	T 7-9
Materiais	Cura do cimento	Indústria da construção	100 - 1000	X	M 9
	Agregados	Indústria da construção	10 - 20	X	M 9
	Carbonato de cálcio precipitado	Indústria química e do papel	0.44 *	X	M 6-9

\* Estequiometria da reação (máximo potencial de conversão)    T Conversão termocatalítica    E Conversão eletroquímica    M Mineralização

Figura 4.74. Principais produtos que podem resultar da conversão de CO<sub>2</sub>: principais fatores de custo e vias de conversão.



portes, indústria química e de polímeros e materiais de construção.

Os mecanismos de conversão são diversos e encontram-se em diferentes fases de desenvolvimento (ver Figura 4.74). Os processos eletroquímicos, que utilizam CO<sub>2</sub> e água, são os que estão numa fase de desenvolvimento mais prematura, com desafios na eficiência de conversão e pureza final dos produtos. Os processos termocatalíticos para produção de combustíveis e ureia, necessitam tipicamente de fontes contínuas de H<sub>2</sub> verde, o que constitui o principal fator de custo e o maior desafio para a sua aplicação em escala [6–8]. O principal desafio relacionado com os caminhos de produção de materiais relaciona-se com a baixa taxa de incorporação de CO<sub>2</sub>. Os desenvolvimentos e principais projetos que emergem nesta área podem ser acompanhados pelas comunicações e materiais publicados pelo CO<sub>2</sub> Value Europe [9].

### Armazenamento geológico

O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> pode ser feito em ambientes terrestres ou marinhos em estruturas geológicas que reúnam determinadas condições tais como presença de reservatório, rochas selo e pressão e temperaturas adequadas.

Foram identificados diversos locais potencialmente propícios à injeção de CO<sub>2</sub> na Europa e em Portugal, com um potencial de armazenamento estimado em 96 Gt na Europa [10] e em 7.6 Gt em Portugal [11]. No entanto, o processo de avaliação pormenorizada do potencial de armazenamento e do risco, bem como o processo de conceção, licenciamento e construção são bastante morosos (entre 4 e 10 anos [12]). Atualmente, na Europa existe apenas um projeto no Mar do Norte pronto para entrar em operação em 2025 [13], com outros 12 em fase de planeamento e construção [14], com destaque para o Ravenna no Mar Adriático, que já testou a operação em fase piloto e está a preparar infraestrutura para aumentar a capacidade e entrar novamente em operação em 2027 [15].

Apesar da pouca importância dada a CAC por parte das autoridades nacionais, o estudo recente do Joint Research Centre [16] com a estimativa da capacidade de armazenamento necessária na Europa e otimização da rede de transporte e armazenamento concluíram que Portugal deveria ter 1 a 2 poços de injeção a partir de 2040, armazenando CO<sub>2</sub> não só de Portugal como também de Espanha. O primeiro estudo realizado [11] identificou diversas áreas *offshore* e uma *onshore*, na Serra dos Candeeiros, com potencial de injeção. Atualmente, estudos de pormenor realizados pelo Colab Net4CO<sub>2</sub> em colaboração com a DGEG, estão a ser desenvolvidos de forma a avaliar o potencial de todas as bacias geológicas e assim poder desenvolver um plano nacional integrado para armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Considerando que o processo de planificação e execução de um poço piloto e teste de injeção demora

cerca de 5 anos, não é expectável que existam opções para armazenamento geológico em Portugal antes de 2035.

Em alternativa, poderia vir a ser equacionado o transporte de CO<sub>2</sub> para fora de Portugal viabilizando o armazenamento de CO<sub>2</sub> noutros projetos europeus. Nomeadamente, é possível transportar o CO<sub>2</sub> em longa distância (via ferroviária ou camião) para os projetos em desenvolvimento, tais como o projeto Pycasso em França (com data prevista de arranque entre 2030 e 2035). De ressaltar que existem regras de admissão nos projetos, que para além de especificações impostas à qualidade do CO<sub>2</sub>, tipicamente incluem o compromisso de um volume mínimo de CO<sub>2</sub> anual e por um período nunca inferior a cerca de 15-20 anos. Para isso, e atendendo aos volumes reduzidos de emissões das indústrias em Portugal, a formação de um consórcio entre diversos emissores pode tornar-se a opção mais viável. Além disso, será necessário que Portugal assine as últimas ratificações do Protocolo de Londres e que estabeleça acordos bilaterais com as outras Partes ao abrigo da proposta de 2019 do referido Protocolo.

### Modelos de negócio, desafios e oportunidades

Diferentes cadeias de valor e modelos de negócio podem surgir dependendo da origem e destino final do CO<sub>2</sub> (Figura 4.75). Para além da viabilidade técnica, é fundamental perceber o potencial das regiões locais para desbloquear estes modelos de negócio, analisando o potencial de absorção dos produtos e coprodutos no mercado, assim como as oportunidades para integrar os projetos europeus de interesse comum [17] para armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Além disso, para a definição de um modelo de negócio competitivo, para além de analisar os custos de investimento e operação, é necessário ter em conta os quadros de regulação regional e nacional, nomeadamente em termos do Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE) e no caso das vias de utilização, as regras impostas à produção de combustíveis renováveis [18, 19] e produtos e químicos sustentáveis (em preparação).

Para **fontes de carbono biogénico ou renovável** (ex.: biogás, biometano ou gases sintéticos de carbono reciclado) não há necessidade de aquisição de licenças de emissão para o CO<sub>2</sub> proveniente da combustão. No entanto, a aplicação de CAC e CUC permanente pode permitir, ao abrigo da Regulação de Remoção de Carbono [20], a venda de licenças para efeitos de compensação de emissões de outras fontes. Além disso, o carbono biogénico e renovável é, segundo a estratégia europeia [2], o principal *feedstock*

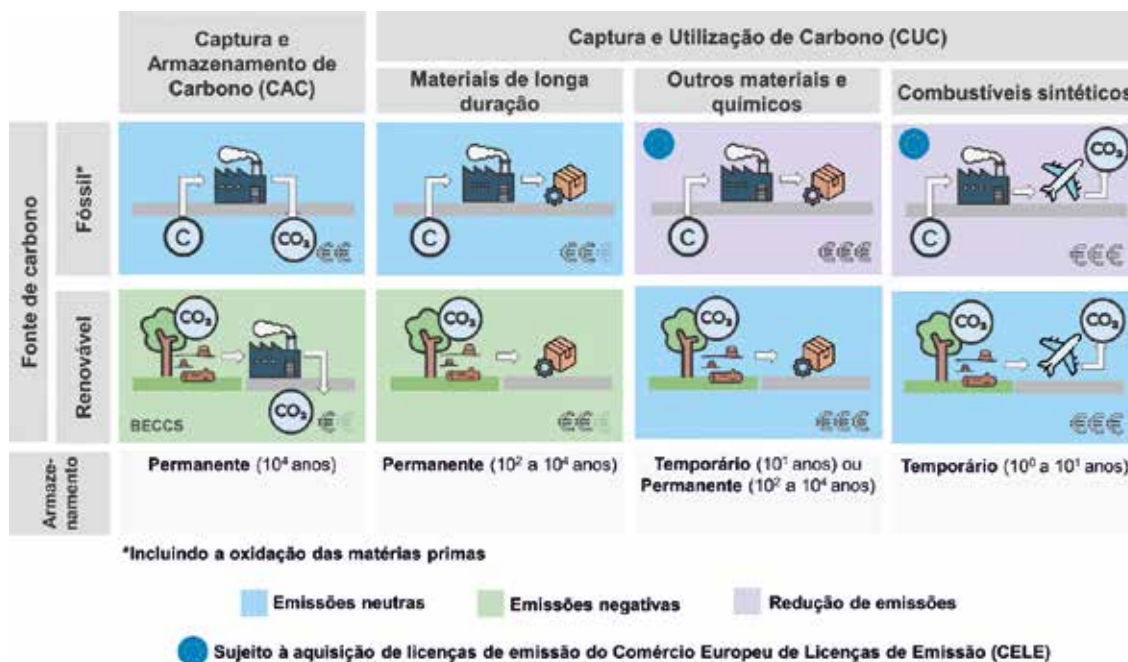


Figura 4.75. Cadeias de valor de CAC e CUC, performance ao balanço de carbono, custos indicativos e necessidade de aquisição de licenças CELE.

para as aplicações de CUC não permanente, o que pode facilitar o acesso a mecanismos de apoio financeiro.

Para fontes de carbono fóssil (de combustão ou oxidação de matérias-primas), podem-se atualmente distinguir três situações.

Quando o carbono capturado é armazenado geologicamente (CAC) ou convertido em produtos que garantem um sequestro permanente (CUC permanente) considera-se que a emissão foi evitada [21], ilibando as empresas de adquirir licenças CELE<sup>23</sup>. Assim, é possível descarbonizar os processos com competitividade económica se os custos totais nivelados (por tonelada de CO<sub>2</sub> capturado) ficarem abaixo ou próximo do preço das licenças, caso possivelmente atingível sobretudo quando estas deixarem de ser atribuídas gratuitamente [22]. Para o caso de CUC permanente, há ainda a possibilidade de rentabilizar o processo de conversão através da venda dos produtos, sobretudo se forem considerados sustentáveis. Os maiores desafios para implementar estas soluções na indústria cerâmica em Portugal são:

- a baixa maturidade das tecnologias de captura para lidar com baixas concentrações de CO<sub>2</sub>;
- a inexistência de infraestrutura de transporte e armazenamento para o caso de CAC e falta de planeamento e orientação para a sua implementação;

- garantir a absorção dos produtos obtidos para o caso do CUC permanente.

Quando o carbono é convertido em produtos (combustíveis, químicos) cuja emissão possa surgir em alguma fase do ciclo de vida (CUC não permanente), as licenças devem ser adquiridas. Nestes casos, a competitividade económica terá de se reger apenas pela comercialização dos produtos obtidos, que podem ser classificados como renováveis de origem não-biológica (ou de carbono reciclado), desde que as emissões de ciclo de vida calculadas pela metodologia disponível em [23] não ultrapassem o valor-limite (28.2 g CO<sub>2</sub>eq/MJ). Para isso será fundamental contar o CO<sub>2</sub> capturado como emissão evitada, caso que, segundo o disposto atual, será possível até 2040 para a indústria cerâmica. A partir de 2041, o CO<sub>2</sub> capturado será contabilizado como emissão evitada apenas se for prove-

<sup>23</sup>De mencionar que se encontra em discussão pública o novo regulamento de monitorização e medição que irá incluir regras de contabilização específicas para a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

niente de combustíveis renováveis (de origem biológica ou não biológica).

Importa realçar que a lista dos produtos à base de CO<sub>2</sub> que garantem um armazenamento permanente [21], pode ser eventualmente atualizada para incluir alguns químicos ou materiais como os polímeros, dependendo da capacidade de se provar essa capacidade de armazenamento através de metodologias suficientemente robustas [24].

Para além da aquisição de licenças, os elevados custos associados aos processos de conversão que requerem fontes contínuas de hidrogénio verde faz com que este tipo de soluções fique dependente de apoios financeiros, algo que é já previsto através dos apoios promovidos pelo Banco Europeu do Hidrogénio [25].

Além destes, um quarto caso de **circularidade interna de carbono** que se baseia num sistema de CUC para combustíveis com utilização direta na fábrica onde o CO<sub>2</sub> é capturado (Figura 4.76), levanta algumas incertezas quanto à possibilidade dessas fábricas ficarem ilibadas da aquisição de licenças uma vez que, devido ao ciclo fechado, e pelo menos até 2041, o combustível sintético produzido e

simultaneamente utilizado para a combustão poderia ser classificado como combustível renovável de origem não biológica segundo o disposto em [26].

### Apoios financeiros

Existem diversos tipos de apoios financeiros que podem suportar o arranque destes modelos de negócio, tanto a nível de custos de investimento através de empréstimos e subvenções (ex.: EU Innovation Fund e Connecting Europe Facility), como a nível de custos operacionais através de *feed-in-tariffs* ou *contracts-for-difference* (ex.: US 45Q).

Compreender a visão estratégica das regiões em matéria de descarbonização de indústria e de transição energética é importante para especular que tipo de apoios podem ser desbloqueados. A versão revista do Plano Nacional de Energia e Clima de 2024 [26] abre a janela às soluções de CAC e CUC no futuro da indústria Portuguesa, propondo objetivos para captura de carbono, mas estão ainda por responder várias questões relacionadas com os locais preferenciais para a captura de CO<sub>2</sub>, que destino final construir para o CO<sub>2</sub> capturado e que mecanismos de apoio serão disponibilizados. Esperamos que a próxima versão do Roteiro Nacional de Descarbonização, a par do PNEC, reconheça a importância destas soluções para descarbonizar a indústria mineral Portuguesa e que responda

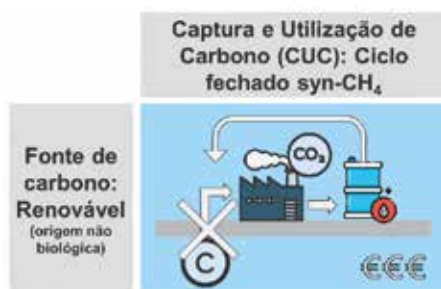


Figura 4.75. Cadeias de valor de CAC e CUC, performance ao balanço de carbono, custos indicativos e necessidade de aquisição de licenças CELE.

## Referências

- [1]. Bashmakov, I. et al. 6th Assessment Report: *Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, pp. 1161–1244.
- [2]. European Union. *Towards an Ambitious Industrial Carbon Management for the EU*. Strasbourg, 2024.
- [3]. Karayil, A.; Elseragy, A.; Aliyu, A. M. "An Assessment of CO<sub>2</sub> Capture Technologies towards Global Carbon Net Neutrality". *Energies*, 2024, 17(6), 1460.
- [4]. Barlow, H.; S. M. S. S. *State of the Art: CCS Technologies*. Global CCS Institute, 2024.
- [5]. Lights, N. *Liquid CO<sub>2</sub> Quality Specifications*. 2024.
- [6]. Heid, B. et al. *Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition*. McKinsey & Company / World Economic Forum – Clean Skies for Tomorrow initiative, 2022.
- [7]. IEA. *CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market*. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [8]. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. Abu Dhabi, 2021.
- [9]. CO<sub>2</sub> VALUE EUROPE. The non-profit association representing the Carbon Capture and Utilisation (CCU) community in Europe. Disponível em: <https://co2value.eu/> [Acedido em: 2024].
- [10]. CO<sub>2</sub>GEONET. *State-of-play on CO<sub>2</sub> Geological Storage in 32 European Countries – An Update*. 2021.
- [11]. Seixas, J. P. et al. *Captura e Armazenamento de CO<sub>2</sub> em Portugal – Uma Ponte para uma Economia de Baixo Carbono*. Lisbon: CENSE – FCT/UNL; U. Évora; LNEG; REN; Bellona, 2015.
- [12]. IEA. *Energy Technology Perspectives*. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [13]. TotalEnergies. *Northern Lights: The First Major Carbon Capture and Storage Project in Norway*. Disponível em: <https://totalenergies.com/projects/carbon-capture-and-storage/northern-lights-first-major-carbon-capture-and-storage-project> [Acedido em: 04/10/2024].
- [14]. Global CCS Institute. *CO<sub>2</sub> Storage and Transport Projects Selected under the EU's Projects of Common Interest and Projects of Mutual Interest*. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/latest-news/14-co2-storage-and-transport-projects-selected-under-the-eus-projects-of-common-interest-and-projects-of-mutual-interest/> [Acedido em: 30/11/2023].
- [15]. RavennaCCS. *Our Activities in Ravenna*. Disponível em: <https://ravnaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub> [Acedido em: 2024].
- [16]. Tumara, D.; Uihlein, A. A.; Gonzalez, I. H. *Shaping the Future CO<sub>2</sub> Transport Network for Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024.
- [17]. European Union. *Projects of Common Interest and Projects of Mutual Interest*. 2024.
- [18]. European Union. *Renewable Energy Directive*. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/> [Acedido em: 2024].
- [19]. European Union. *Renewable Hydrogen*. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/> [Acedido em: 2024].
- [20]. European Commission. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products*. 2024.
- [21]. European Commission. *Emissions Trading System (ETS) – Permanent Emissions Storage through Carbon Capture and Utilisation*. Brussels, 2024.
- [22]. União Europeia. Diretiva (UE) 2023/959 do Parlamento Europeu e do Conselho de 10 de maio de 2023 que altera a Diretiva 2003/87/CE (...) relativa à criação e ao funcionamento de uma reserva de estabilização do mercado para o sistema de comércio de licenças de emissão de gases com efeito de estufa da União. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2023.
- [23]. European Union. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185 of 10 February 2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 (...) establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels. *Official Journal of the European Union*, 2023.
- [24]. Bernier, T. Reunião entre CoLab Net4CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> Value Europe: ETS Market. 2024.
- [25]. European Commission. *European Hydrogen Bank*. Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/european-hydrogen-bank\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/european-hydrogen-bank_en) (acedido em: 2024).
- [26]. Agência Portuguesa do Ambiente. *Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030)*. 2024.



# CONTRIBUTO DA DIGITALIZAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA CERÂMICA

## Introdução/Enquadramento

A indústria cerâmica, enquanto indústria que contribui de forma considerável para as emissões globais de gases com efeito de estufa, enfrenta uma pressão crescente para descarbonizar os seus processos e adotar práticas cada vez mais sustentáveis. Sendo um setor responsável por cerca de 1% das emissões globais de CO<sub>2</sub> [1], o impacto ambiental da produção de produtos cerâmicos decorre, maioritariamente, dos seus processos intensivos em energia, com o uso de combustíveis fósseis em fornos de alta temperatura e processos de secagem; da dependência de matérias-primas carbonatadas; e de processos por vezes menos eficientes que aumentam o consumo energético.

Atravessamos uma época de mudança, nesta chamada Transição gémea – Verde e Digital. Sabemos que ambas as transições se podem reforçar mutuamente [2]. A Transição Verde, focada na descarbonização de todos os setores da economia, no uso de energias renováveis, na eficiência energética, na economia circular e na promoção de práticas sustentáveis para alcançar uma economia de baixo carbono e minimizar o impacto ambiental das atividades humanas. A Transição Digital, na digitalização de processos, produtos e serviços em todos os setores da economia, utilizando as tecnologias da Indústria 4.0 como a inteligência artificial (IA), a internet das coisas (IoT), Big Data, etc.

Estas ferramentas digitais oferecem hoje um caminho transformador para mitigar diversos desafios da descarbonização, permitindo que a indústria cerâmica otimize o consumo de energia, minimize o desperdício e melhore a eficiência dos recursos em toda a cadeia de valor. A convergência das tecnologias da Indústria 4.0 demonstra oportunidades para contribuir para revolucionar os processos de fabrico e impulsionar os esforços de descarbonização. Estas tecnologias facilitam a monitorização e o controlo em tempo real do consumo de energia, a manutenção preditiva para evitar falhas nos equipamentos e a otimização de parâmetros de produção para minimizar o desperdício e contribuir para melhoria da qualidade dos produtos. Por outro lado, as tecnologias digitais podem contribuir também para a criação de modelos de economia circular na indústria cerâmica, facilitando a reutilização de materiais e promover a gestão sustentável da cadeia de abastecimento, nomeadamente através de criação de plataformas ou *marketplaces* de resíduos e subprodutos. Estas plataformas promovem o desenvolvimento de novos modelos de negócio focados na redução, recolha, reutilização, recuperação e reciclagem.

## Ferramentas e tecnologias digitais de descarbonização

A transformação digital oferece hoje diversas soluções que contribuem para a redução da pegada de carbono na indústria cerâmica. Os processos de fabrico atualmente disponíveis apresentam, à partida, diversos obstáculos à descarbonização, nomeadamente:

- produção intensiva em energia em fornos e secadores, normalmente alimentados por combustíveis fósseis, que exigem elevados consumo de energia, levando a emissões significativas de CO<sub>2</sub>;
- ineficiências dos processos que podem resultar em desperdício de materiais e energia, bem como de qualidade dos produtos;
- monitorização limitada, com processos de controlo frequentemente ineficientes ou mesmo inexistentes e tecnologia produtiva oriunda de fornecedores onde a gestão da informação está muitas vezes vedada ou limitada por se tratar de tecnologia proprietária, condicionando as capacidades de gestão de informação no processo.

Descrevem-se de seguida algumas das principais tecnologias aplicáveis nesta ligação entre ferramentas digitais e descarbonização.

### • MES / SCADA / IoT – Controlo e otimização dos processos produtivos

Um MES (*Manufacturing Execution System*) é um sistema de informação que liga, monitoriza e controla os sistemas de produção e as operações no chão de fábrica. Atua como uma ponte entre os sistemas de gestão empresarial (como o ERP) e os equipamentos e operadores na produção. O MES recolhe dados em tempo real e ajuda a otimizar a produção, garantir a rastreabilidade e melhorar a eficiência operacional.

Um SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é um sistema de supervisão e aquisição de dados usado para controlar e monitorizar processos industriais em tempo real. Os componentes principais de um SCADA incluem controladores (PLCs) que recolhem dados dos sensores e atuadores no chão de fábrica e Interfaces Homem-Máquina (HMI), interfaces gráficas que permitem aos operadores visualizar o estado do processo, receber alertas e interagir com os equipamentos. Estes sistemas centralizam depois estes dados, armazenando



históricos, emitindo alarmes e permitindo assim o controle e análise dos processos.

Sensores IoT (*Internet of Things*) são dispositivos conectados à internet (ou a redes industriais locais) que recolhem e transmitem em tempo real dados do ambiente industrial ou dos equipamentos. Esses sensores permitem a integração com o SCADA e o MES, permitindo monitorizar variáveis críticas (como temperatura, consumo energético, emissões) em tempo real e, assim, ajustar os processos para minimizar consumos de energia e materiais. Contribuem também para a manutenção preditiva, analisando padrões de fabrico para antecipar avarias antes que ocorram.

- **Big data e Analytics - Análise de dados**

Tal como em muitas outras indústrias, a indústria cerâmica gera grandes volumes de dados de várias fontes no processo. O conceito de *Big data* refere-se à recolha, armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados gerados ao longo de toda a cadeia de produção - desde matérias-primas até ao produto final - com o objetivo de otimizar processos, melhorar a qualidade, reduzir custos e tomar decisões mais inteligentes.

As fontes de dados na indústria cerâmica são muitas e poderão vir em primeiro lugar de sensores IoT ligados a sistemas SCADA, incluindo temperaturas de fornos, vibração de prensas, níveis de humidade, velocidade de linhas, consumo de energia, etc. Nos MES e ERP, teremos ordens de produção, inventários, custos, rendimentos, etc. Em sistemas de controlo de qualidade teremos resultados de testes, imagens de inspeção visual, rejeições. Na manutenção, informação sobre falhas, paragens, intervenções, histórico de equipamentos. Como dados externos à organização, preços de energia, logística, tendências de mercado, clima, etc. Trata-se assim, de grandes quantidades de dados dada a cadência como são recolhidos (ex.: sensores a recolher dados a cada segundo), podendo ser tipos de dados diferentes: numéricos, imagens, texto.

O conceito de *Analytics* refere-se ao uso de técnicas de análise de dados - estatísticas, modelação preditiva, *machine learning*, entre outras - para compreender, otimizar e antecipar o desempenho dos processos industriais. Será desta forma que se conseguirá transformar dados "brutos" da fábrica em informação estratégica, evoluindo para uma produção mais inteligente, previsível e eficiente. As ferramentas *Analytics* permitem extrair insights muito impor-

tantes destes dados que contribuem para impulsionar os esforços de descarbonização como por exemplo análises de consumos de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, estabelecimento de correlações de dados de sensores com defeitos nos produtos para prever falhas e reduzir o retrabalho, análise de padrões de falha para prever e evitar avarias em equipamentos críticos, etc.

- **IA - Inteligência Artificial**

A Inteligência Artificial (IA) baseia-se na aplicação de algoritmos e sistemas que imitam a capacidade humana de aprender, adaptar e tomar decisões com base em dados, com maior rapidez, precisão e escala. A IA pode ser integrada em várias fases do processo industrial para aumentar a eficiência, reduzir erros, antecipar problemas e otimizar resultados. Uma subárea da IA é o *Machine Learning* (ML) que se concentra em ensinar as máquinas a aprenderem a partir de dados, sem serem explicitamente programados para cada tarefa específica.

Assumindo todo o potencial da sua utilização em processos produtivos, poder-se-ia afirmar que não existem limites à sua utilização, tal é a sua potencial abrangência e utilidade. Algoritmos de IA e ML podem analisar grandes quantidades de dados gerados durante o processo de fabrico de produtos cerâmicos para identificar padrões, otimizar parâmetros e melhorar a eficiência energética.

Um modelo de *Machine Learning* envolve tipicamente 4 etapas distintas - recolha de dados, treino do modelo (o sistema analisa os dados e aprende padrões), a avaliação onde o modelo é testado com novos dados para verificar a precisão e a predição ou decisão, quando o modelo prevê resultados ou sugere ações com base em dados novos.

Uma das áreas com maiores desenvolvimentos são os modelos preditivos baseados em IA. Algoritmos de ML podem prever o comportamento dos equipamentos e processos, ajustando-os para operar com maior eficiência. Um sistema de manufatura preditiva permite assim uma gestão inteligente da produção com integração de informação com capacidade preditiva e de suporte à decisão, permitindo a deteção antecipada de eventos irregulares, atuando e corrigindo dinamicamente parâmetros que visem otimizar a produção como temperaturas do forno, fluxos de ar e outros parâmetros para minimizar os consumos de energia.

De referir que as aplicações da IA não se esgotam aqui. A título de exemplo, na área de desenvolvimento de produto,



vemos emergir o design generativo enquanto metodologia que usa algoritmos e inteligência artificial para gerar automaticamente múltiplas soluções possíveis para um problema de design, com base em objetivos, restrições e dados fornecidos pelo utilizador. Este processo de design permite parametrizar o objetivo pretendido e em vez de o designer criar uma solução, define objetivos (ex.: maximizar resistência, reduzir peso ou espessura), restrições (ex.: materiais disponíveis, limites geométricos) e critérios de avaliação (ex.: custo, estética, desempenho). Esta metodologia pode contribuir para o ecodesign de produtos, otimizando o design para reduzir por exemplo a quantidade de material necessário ou minimizar o tempo de cozedura.

#### • Digital Twins – Gémeos Digitais

*Digital Twins* (Gémeos Digitais) são representações virtuais dinâmicas de algo físico, um conceito que tem vindo a ganhar relevo em contexto industrial pelo seu potencial de criação de modelos virtuais de equipamentos (um forno, uma linha de produção ou até mesmo uma fábrica inteira) para simular diferentes cenários, incluindo, por exemplo, alterar temperaturas, tempos de ciclo, etc., procurando configurações que reduzam o consumo energético e as emissões.

Estes sistemas recolhem dados em tempo real (via IoT, SCADA, MES) e simulam o comportamento do sistema real, permitindo realizar testes e previsões sem afetar o mundo físico, podendo para além disto aprender e adaptar-se com o tempo com IA e *Machine Learning*. Criar réplicas virtuais de fornos e linhas de produção permite a simulação de cenários de produção, suponhamos, para testar combustíveis alternativos, simular novas configurações de linhas de produção, de forma a proporcionar decisões baseadas em dados e simulações que conduzam a redução de desperdício e de custos operacionais.

Este conceito traz como grande vantagem a possibilidade de simulação de produção ao analisar alterações na linha antes de as implementar, sem qualquer necessidade de paragens. Criar uma réplica digital de um forno cerâmico por exemplo, permite simular o seu desempenho e otimizar os seus consumos com base em previsões. Na vertente de formação de operadores, traz uma possibilidade de formação virtual em cenários realistas, com maior segurança. Na otimização de processos, o teste de diferentes parâmetros sem necessidade de parar a produção. Ou no desenvolvimento de produto, com o teste do design e das propriedades de novos produtos, de modo a reduzir o tempo de desenvolvimento.

#### Exemplos

##### • SACMI-HERE

O SACMI HERE [3] é uma plataforma digital integrada desenvolvida pela SACMI, um dos principais fabricantes mundiais de maquinaria para a indústria cerâmica, que funciona como um MES (*Manufacturing Execution System*) específico para o setor cerâmico, incorporando também funcionalidades avançadas de monitorização, controlo e análise em tempo real. O nome "HERE" simboliza a presença digital em tempo real no chão de fábrica.

Enquanto sistema projetado especificamente para a indústria cerâmica, integra nativamente com os equipamentos SACMI, com recolha de dados em tempo real, integrando módulos para IA, *machine learning* e *digital twins*. Inclui módulos de supervisão em tempo real para visualização de todas as máquinas e linhas de produção, com indicadores de estado e performance, rastreabilidade total das matérias-primas até ao produto acabado, controlo de qualidade, ordens de produção, tempos de ciclo, paragens, produtividade, OEE, integração com ERP e SCADA



Figura 4.78. SACMI HERE (Fonte: SACMI).



para comunicação bidirecional com os sistemas de gestão empresarial e automação industrial. A plataforma é modular e pode ser escalada ou personalizada por linha ou área de produção. Trata-se assim de uma solução MES que atua como um “cérebro digital” da fábrica cerâmica, ligando todos os processos e contribuindo para a eficiência produtiva global, nomeadamente para minimizar consumos de energia e materiais.

#### • eLITHE - Projeto

O projeto eLITHE [4], financiado pelo Programa Horizon Europe, visa alterar alguns paradigmas da indústria cerâmica, aproveitando a eletricidade renovável para alimentar os processos térmicos. As tecnologias digitais desempenham um papel fundamental na implementação geral dos processos neste projeto, ao apoiar o seu design, integração e operação. O projeto inclui o desenvolvimento de gémeos digitais, escalonamento e integração das soluções elétricas, identificando as configurações ideais para cada processo. Paralelamente, está a ser desenvolvido um conjunto de serviços baseados nos gémeos digitais e dados provenientes do processo para suportar uma operação digital, nomeadamente: o desenvolvimento de algoritmos de IA a partir de câmaras visíveis e térmicas para facilitar a monitorização, controlo e intervenção necessários para alcançar condições ideais de processamento. O sistema usa também algoritmos de manutenção preditiva que otimizarão processos industriais e equipamentos elétricos. Trata-se assim de um sistema abrangente de monitorização e controlo que garante uma operação eficiente dos processos.



#### Referências

- [1]. Cerame Unie. *Facts & Figures* [Online]. Disponível em: <https://cerameunie.eu/ceramic-industry/facts-figures/>. [acedido em: 21 de abril de 2025].
- [2]. European Commission - Joint Research Centre. *The twin green & digital transition: How sustainable digital technologies could enable a carbon-neutral EU by 2050* [Online]. Disponível em: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/twin-green-digital-transition-how-sustainable-digital-technologies-could-enable-carbon-neutral-eu-2022-06-29\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/twin-green-digital-transition-how-sustainable-digital-technologies-could-enable-carbon-neutral-eu-2022-06-29_en). [Acedido em: 22 de abril de 2025].

#### Desafios

Embora as ferramentas digitais ofereçam um potencial significativo para descarbonizar a indústria cerâmica, subsistem desafios complexos que acompanham esta indústria desde longa data. Entre estes, destacam-se: a tecnologia disponível, maioritariamente proprietária e que retira alguma flexibilidade aos seus utilizadores; a disponibilidade e qualidade dos dados - uma implementação eficaz de ferramentas digitais requer acesso a dados de alta qualidade de várias fontes; a integração e interoperabilidade: integrar diferentes ferramentas e sistemas digitais é um processo complexo pela multiplicidade de plataformas e sistemas existentes; a necessidade de técnicos qualificados e com experiência: a adoção de tecnologias digitais experiência nomeadamente em análise de dados entre outros; e por fim os custos de implementação: a implementação de soluções digitais pode envolver investimentos iniciais significativos, sendo particularmente difíceis para pequenas e médias empresas (PMEs).

#### Conclusões

Em conclusão, a integração de ferramentas digitais na indústria cerâmica tem um imenso potencial para impulsionar a descarbonização, promover a circularidade e melhorar a sustentabilidade dos processos produtivos. Aproveitar tecnologias da Indústria 4.0 permite otimizar o consumo de energia, minimizar o desperdício com materiais e garantir a eficiência global dos recursos, para além de criar modelos de negócio alinhados com os princípios da economia circular.

Adotar algumas das tecnologias aqui referidas, como *Digital Twins*, IA, IoT, *big data*, permitirá a esta indústria aumentar o seu compromisso com a sustentabilidade; por outro lado, a evolução destas tecnologias posiciona este setor para alcançar um progresso significativo na sua descarbonização nos próximos anos. Sempre numa perspetiva de que a descarbonização contribuirá para aumentar a competitividade desta indústria e melhorar a eficiência de recursos.

- [3]. SACMI. *SACMI HERE* [Online]. Disponível em: <https://www.sacmi.it/pt-pt/ceramics/Azulejos/HERE-Software-manufatura-digital>. [Acedido em: 23 de abril de 2025].

- [4]. ELITHE Project. *ELITHE* [Online]. Disponível em: <https://elithe.eu>. [Acedido em: 23 de abril de 2025].







# Evolução prevista para o setor até 2050: produção, consumos e emissões de gases com efeito de estufa

Norma Franco, Hermano Rodrigues, Rui Ferreira, João Machado  
Fernandes, Sofia Mendes Ferreira, Eduardo Seduvm, Beatriz Costa  
e Afonso Pereira Gonçalves  
EY Parthenon



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# PROJEÇÕES DE PRODUÇÃO

As projeções da produção para os produtos cerâmicos foram baseadas numa seleção de indicadores económicos e setoriais, que permitem captar tanto a dinâmica histórica como as tendências futuras do mercado. Estes indicadores refletem diferentes dimensões que influenciam a evolução da produção e garantem maior robustez às estimativas.

Para efeitos analíticos, a seguinte divisão orientou a modelação da evolução da produção:

- Produtos cerâmicos de construção, mais expostos às tendências do mercado da construção e dos materiais de construção.
- Produtos cerâmicos de decoração (louça sanitária e louça utilitária e decorativa), mais expostos a preferências de consumo e ao mercado da construção residencial.

As projeções da produção dos produtos cerâmicos de construção baseiam-se numa combinação de tendências históricas, indicadores macroeconómicos e previsões futuras de alguns indicadores que procuram refletir a dinâmica dos produtos cerâmicos de construção em Portugal até 2050, nomeadamente:

- Produção histórica: este indicador baseia-se na produção histórica dos principais produtos da Cerâmica Estrutural (tais como abobadilha, tijolo, telha, acessórios para telhado, face à vista, *paver* e agregados leves) e dos pavimentos e revestimentos cerâmicos.
- Taxas de crescimento previstas em estudos de mercado: previsão das vendas de azulejos e revestimentos cerâmicos provenientes de estudos de mercado especializados, que projetam as vendas futuras destes produtos a nível nacional.
- Previsão do crescimento do mercado de materiais de construção em Portugal: este indicador reflete as perspectivas de evolução do mercado dos materiais de construção no país, englobando um conjunto mais amplo de produtos e fornecendo um contexto macroeconómico e setorial para a cerâmica.
- Previsão do crescimento do mercado da construção em Portugal e na União Europeia: estes indicadores contemplam a evolução esperada do setor da construção, ajustada para eliminar o efeito da inflação (preços constantes), tanto em Portugal como no conjunto da União Europeia. Serve para situar a produção cerâmica num contexto mais alargado, dada a forte dependência do setor da construção em material cerâmico.

- Taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de Portugal: a taxa de crescimento do PIB é utilizada como um indicador macroeconómico geral que influencia a procura interna, o investimento e o consumo. É uma variável de suporte que ajuda a contextualizar o ambiente económico global onde o setor da cerâmica opera.

A combinação destes indicadores, ponderados conforme a sua relevância específica para cada subsetor, permitiu construir projeções realistas e ajustadas ao contexto económico e setorial, contribuindo para uma visão abrangente e fundamentada da evolução da produção dos produtos cerâmicos de construção em Portugal até 2050 (Figura 5.1).

Em resultado da modelação económica realizada, perspetiva-se assim, um crescimento quer do subsetor da Cerâmica Estrutural quer do subsetor de Pavimento e Revestimento Cerâmico, decorrente de um crescimento médio anual de:

- 0,2% - 0,3% no subsetor da Cerâmica Estrutural. Este subsetor poderá atingir entre 1.359kt e 1.379 kt de produção em 2050, mantendo-se como o subsetor mais representativo desta indústria, em volume de produção, sendo impulsionado pela produção de tijolo e dos agregados leves.
- 0,4% - 0,5% no subsetor de Pavimento e Revestimento Cerâmico. Este subsetor poderá atingir entre 984 kt e 1.012 kt de produção em 2050.

Já as projeções da produção dos produtos cerâmicos de decoração basearam-se nos seguintes indicadores:

- Produção histórica dos subsectores cerâmicos de decoração: este indicador inclui a produção histórica dos principais subsectores de cerâmica, nomeadamente Louça Sanitária, Cerâmica Utilitária e Decorativa nas suas variantes de Grés, Porcelana, Faiança, e outros produtos, bem como Cerâmica Técnica, Refratária e Outros produtos relacionados. A análise destas séries possibilita a identificação de padrões passados e o entendimento dos ciclos específicos que caracterizam estes mercados.
- Previsão das vendas para alguns produtos cerâmicos: foram consideradas as estimativas de vendas, ajustadas a preços constantes, para Portugal. Este indicador é fundamental para aferir a procura futura interna e entender as dinâmicas de mercado específicas que afetam os produtos.

- Previsão do consumo privado: é um indicador macroeconómico que reflete a capacidade e propensão dos consumidores a adquirir bens e serviços, incluindo produtos cerâmicos. A sua inclusão nas projeções permite contextualizar a procura do setor num quadro mais amplo de comportamento económico dos consumidores.
- Previsão do crescimento do mercado da construção residencial em Portugal e na União Europeia: este indicador considera a evolução esperada do mercado da construção residencial, ajustada para preços constantes, tanto a nível nacional como europeu. Este dado é relevante dada a estreita ligação entre o setor residencial e a procura por produtos cerâmicos de decoração, quer na fase de construção nova, quer em remodelações.
- Taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de Portugal: a taxa de crescimento do PIB é utilizada como um indicador macroeconómico geral que influencia a procura interna, o investimento e o consumo. É uma variável de suporte que ajuda a contextualizar o ambiente económico global onde o setor da cerâmica opera.

Perspetiva-se assim um crescimento do subsector da Louça Sanitária, do subsector da Cerâmica Utilitária e Decorativa e do subsector da Cerâmica Técnica, Refratários e Outros, decorrente de um crescimento médio anual de:

- 1,0% - 1,2% no subsector da Louça Sanitária. Este subsector poderá atingir entre 121 kt e 129 kt de produção em 2050.
- 0,6% - 1,2% no subsector da Cerâmica Utilitária e Decorativa, alavancada pelas indústrias de Porcelana e Faiença. Este subsector poderá atingir entre 206 kt e 227 kt de produção em 2050.
- 0,28% - 0,34% no subsector da Cerâmica Técnica, Refratários e Outros. Este subsector poderá atingir entre 9 kt e 9,2 kt de produção em 2050, mantendo-se ainda assim como o subsector com menor representação nesta indústria.

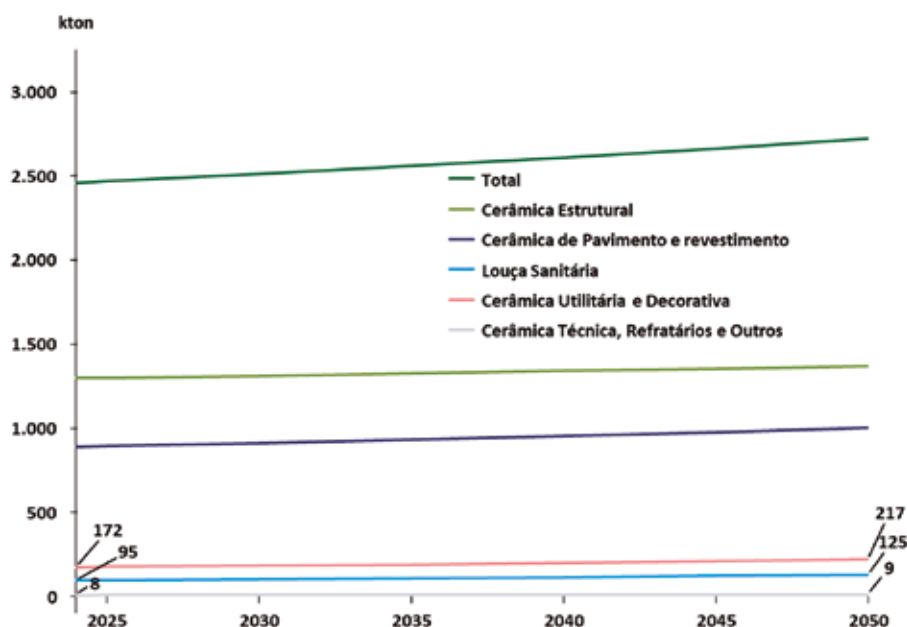


Figura 5.1. Projeções de produção da Indústria Cerâmica Nacional (Fonte: CTCV complementado com dados estatísticos do INE, Statista, Global Markets Model e Oxford).

# CONSUMO GLOBAL DE ENERGIA TÉRMICA E ELETRICIDADE – BUSINESS AS USUAL

O consumo total de energia na Indústria Cerâmica constitui-se como um fator crítico para a descarbonização, com impactos significativos a nível ambiental e financeiro. A avaliação da evolução das necessidades energéticas do setor é, por isso, essencial para apoiar estratégias de transição energética que potenciem a eficiência e a descarbonização.

A análise do consumo global de energia na Indústria Cerâmica foca-se em duas componentes principais, a energia térmica e a eletricidade. Para projetar a sua evolução até 2050, foram considerados dois elementos fundamentais: as projeções de produção do setor, o consumo específico de energia ao longo da série histórica. A projeção do consumo de energia da Indústria Cerâmica, alicerçada nos fatores acima referidos, é construída de acordo com um Cenário *Business as Usual* (BAU).

As projeções de produção até 2050 seguem a abordagem e os fatores previamente estabelecidos, permitindo estimar a evolução nos diversos subsectores. O consumo específico de energia é determinado com base na análise de dados históricos, refletindo a quantidade total de energia térmica e elétrica necessária, em cada subsector, para produzir uma unidade de massa de produto.

O cenário BAU estabelece o enquadramento industrial e externo para a elaboração das projeções, assumindo a manu-

tenção das condições atuais. Este cenário pressupõe que não existirão alterações significativas dos vetores energéticos utilizados, das tecnologias adotadas e das práticas industriais estabelecidas. Em adição, serve como referência para a avaliação de cenários alternativos de transição energética e tecnológica.

Com base nestes pressupostos, a análise considera que até 2050, face a 2024, existe potencial para um aumento anual médio das necessidades energéticas de 0,8% (Figura 5.2). Este aumento decorre da tendência de crescimento verificada para todos os subsectores da Indústria Cerâmica.

No subsector da Cerâmica Estrutural, projeta-se um crescimento anual médio de 0,2%, impulsionado pelo aumento da produção de produtos como tijolos e agregados leves. No subsector de Pavimento e Revestimento Cerâmico, estima-se um crescimento de 0,5%, reforçando a relevância deste segmento no contexto nacional.

A Cerâmica Utilitária e Decorativa apresenta a taxa de crescimento médio mais elevada, com uma projeção anual de 1,5%, impulsionada sobretudo pela intensificação da produção de porcelana e faiança. Esta tendência de aumento estende-se aos restantes subsectores, com a Cerâmica de Louça Sanitária a verificar um crescimento anual de 1,2% e a Cerâmica Técnica, Refratários e Outros a apresentar uma evolução mais moderada, na ordem dos 0,3%.

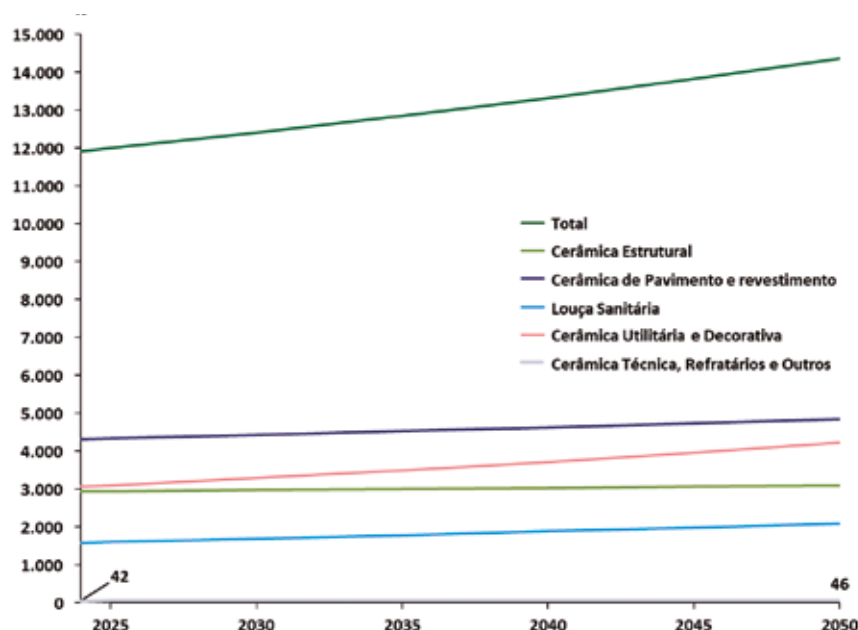


Figura 5.2. Projeções das necessidades energéticas *Business as Usual* da Indústria Cerâmica (Fonte: CTCV complementado com dados estatísticos do INE, Statista, Global Markets Model e Oxford).



# EMISSÕES GLOBAIS DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA – BUSINESS AS USUAL

A projeção de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) permite quantificar a evolução esperada das emissões, identificar os principais contributos por subsetor e avaliar o potencial impacto de diferentes vetores de descarbonização.

O presente exercício considera emissões diretas de âmbito 1 e emissões indiretas de âmbito 2. A projeção da evolução ao longo do tempo considera os seguintes elementos metodológicos: as projeções de produção, anteriormente apresentadas, o fator de emissão por unidade de massa de produto ao longo da série histórica e a adoção do Cenário *Business as Usual* (BAU).

É ainda considerada a desenvolvimento do fator de emissão da eletricidade, que depende diretamente da evolução do *mix* energético nacional ao longo do tempo. O cenário BAU assume uma descarbonização progressiva da rede elétrica nacional, com uma redução gradual do fator de emissão até atingir um valor nulo em 2050, em resultado do aumento da incorporação de fontes de energia renovável.

Com base nestes pressupostos, estima-se um aumento médio anual das emissões de 0,3%, até 2050 (Figura 5.3). Tal como observado para a evolução do consumo energético, este aumento decorre da tendência de crescimento da produção verificada praticamente para todos os subsectores da Indústria Cerâmica.

A análise desagregada por subsetor permite estimar um aumento anual de emissões de GEE de 0,1% no subsetor da Cerâmica Estrutural, de 0,4% no subsetor da Cerâmica de Louça Sanitária e de 1,1% no subsetor da Cerâmica Utilitária e Decorativa, sendo este último o mais intensivo em carbono de toda a Indústria Cerâmica.

Não obstante, esta tendência de crescimento é contrariada pelos subsectores de Pavimento e Revestimento Cerâmico, para o qual se estima uma redução anual das emissões de GEE de 0,3% e subsetor da Cerâmica Técnica, Refratários e Outros, com uma redução anual projetada das suas emissões de 0,1% ao ano.

Nestes subsectores em particular, apesar do crescimento previsto da produção e do consumo de energia nestes subsectores, a redução das emissões de GEE justifica-se pelo facto de se considerar a variação do fator de emissão da eletricidade, associado ao *mix* energético nacional. Com a progressiva descarbonização da rede elétrica nacional considerada no cenário BAU, o fator de emissão da eletricidade diminui até ser nulo em 2050.

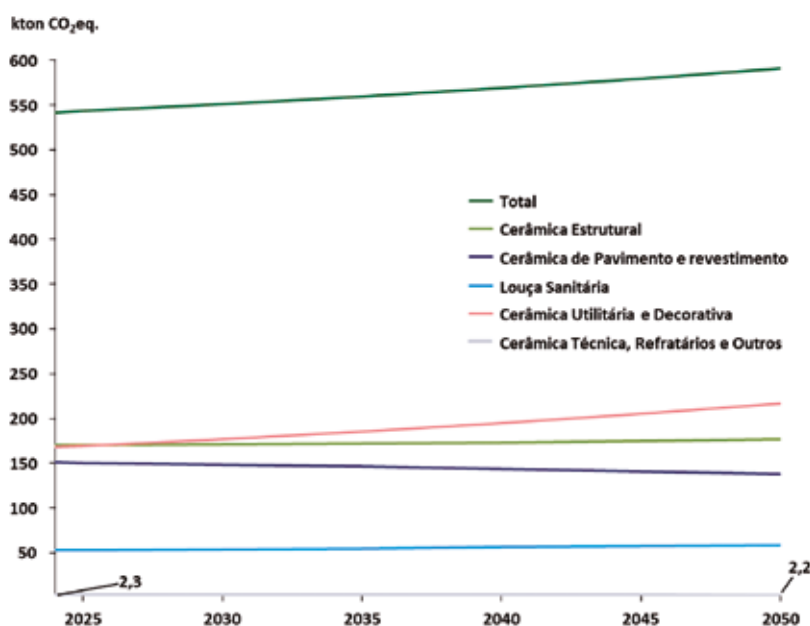


Figura 5.3. Projeções das emissões de gases com efeito de estufa *Business as Usual* da Indústria Cerâmica (Fonte: CTCV complementado com dados estatísticos do INE, Statista, Global Markets Model e Oxford).





Trajetórias  
custo-eficazes  
de redução de  
emissões de gases  
com efeito de estufa



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# ANÁLISE DE CUSTOS E BENEFÍCIOS RESULTANTE DA IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS, TÉCNICAS E TECNOLOGIAS

A definição de trajetórias ótimas de descarbonização carece de análises de custo-benefício aos vetores, medidas e tecnologias de descarbonização. A análise custo-benefício surge como uma ferramenta essencial para orientar decisões estratégicas e definir investimentos que maximizem a redução de emissões, com um custo competitivo.

A modelação das trajetórias de descarbonização da Indústria Cerâmica está assente em cinco vetores de descarbonização, os quais consideram um conjunto de tecnologias e

medidas seleccionadas com base nos custos de investimento e manutenção, eficácia na prevenção de emissões de GEE, Technology Readiness Level (TRL) das tecnologias e aplicabilidade ao contexto da Indústria Cerâmica nacional. A Tabela 6.1 enumera as tecnologias tidas em conta para cada um dos vetores de descarbonização considerados no modelo de descarbonização.

**Tabela 6.1. Tecnologias de descarbonização consideradas para a modelação das trajetórias de descarbonização da Indústria Cerâmica.**

Eficiência energética	Combustíveis renováveis
Isolamento em condutas de ar quente	Biometano
Isolamento em fornos	Hidrogénio (15%) <sup>24</sup>
Recuperação de calor	Biomassa
Substituição de forno cerâmico	
Otimização dos queimadores de fornos	
Sistemas de gestão de energia	
Instalação de variadores de velocidade	
Eletrificação	Tecnologias de remoção de emissões
Substituição por forno 100% elétrico	Tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono
Instalação de sistema fotovoltaico para produção de eletricidade	
Economia circular	
Reutilização do caco cerâmico	

<sup>24</sup>Considerado um máximo de 15% de hidrogénio no blend da rede energética.

A presente análise projeta, ao longo do horizonte temporal considerado, o custo de descarbonização por CO<sub>2</sub>eq. evitada (Figura 6.1 e Figura 6.2) resultante da introdução novas tecnologias, medidas ou substituição dos combustíveis fósseis utilizadas. Para cada tecnologia analisada, o custo-benefício é determinado considerando o custo de investimento e manutenção das tecnologias, o preço de energia, assim como o potencial de redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) resultante da transição energética e tecnológica.

As projeções de evolução do custo-benefício das fontes de energia consideradas para a presente análise, nomeadamente o mix energético da rede elétrica nacional<sup>25</sup>, gás natural<sup>26</sup>, biometano, hidrogénio verde, resultam de uma combinação de análise de tendência históricas e estimativas de evolução dos fatores de emissão e dos custos nivelados das referidas fontes energéticas.

Estima-se que o custo médio dos vetores de descarbonização considerados sofra uma evolução considerável até 2050, influenciados por fatores de carácter tecnológico, económico, regulatório e de mercado.

A análise custo-benefício ao vetor **eficiência energética**<sup>27</sup> teve como base os custos de investimento e poupança energética estimadas para cada tecnologia ou medida de eficiência energética apresentada quadro 6.1. Este vetor apresenta em 2025 um custo médio de descarbonização relativamente elevado, influenciado pelo investimento inicial em tecnologia. A redução considerável no consumo energético, traduz-se na redução de custos e emissões de GEE, pelo que se estima uma tendência de redução gradual dos custos médios de descarbonização ao longo do tempo, face a 2025. A evolução do valor médio de descarbonização do presente vetor dependerá da evolução do preço do carbono, do custo da eletricidade renovável e da capacidade de adaptação das tecnologias de eficiência energética à escala industrial, de forma custo-eficaz.

O custo médio de descarbonização estimado pela adoção de **combustíveis renováveis**, nomeadamente biometano<sup>28</sup>, hidrogénio verde<sup>29</sup> (15%) e biomassa<sup>30</sup>, estabelece-se em valores que variam entre os 20 e os 250 €/tCO<sub>2</sub>eq. evitada. No entanto, perante previsões de aumento da disponibilidade destes combustíveis e respetiva redução do preço dos feedstocks necessários à sua síntese, estima-se que ambos sejam soluções custo-eficazes a adotar pela Indústria Cerâmica no horizonte temporal estabelecido.

A redução do consumo de combustíveis fósseis por via da **eletrificação**<sup>31</sup> dos processos industriais é uma solução de descarbonização crítica para a indústria nacional alcançar as metas de redução de emissões estabelecidas. A transição para uma rede elétrica nula carbono em 2050, aliada a um preço de eletricidade cada vez mais baixo (estimando-se valores abaixo de 80€/MWh), tornam a eletrificação num importante vetor de descarbonização para esta indústria. Por outro lado, o elevado investimento inicial em tecnologias traduz-se num custo médio de descarbonização elevado em 2025. Estima-se que a evolução dos mercados de carbono, ou a capacidade de eletrificação dos processos à escala industrial serão fatores determinantes para a tendência de descida gradual dos custos de descarbonização do presente vetor, até 2050.

<sup>25</sup>Evolução do fator de emissão do mix da rede elétrica nacional projetada com base em análise Direção-Geral de Energia e Geologia. Evolução do preço da eletricidade projetada com base em análise da International Energy Agency.

<sup>26</sup>Evolução do fator de emissão gás natural projetada com base em análise da International Energy Agency. Evolução do preço do gás natural projetada com base em análise da International Energy Agency.

<sup>27</sup>Determinação de custos de investimento e poupanças energéticas com base em análise do Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro.

<sup>28</sup>Evolução do preço do biometano projetada com base no Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 e análise da International Energy Agency.

<sup>29</sup>Evolução do preço do hidrogénio verde projetada com base no Mercado Ibérico de Energia Verde e análise do World Energy Council.

<sup>30</sup>Evolução do preço da biomassa projetada com base em análise do Centro da Biomassa para a Energia e da base de dados ENSPRESO - BIOMASS.

Determinação de custos de investimento e poupanças energéticas com base em análise do Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro.

Pelo seu baixo nível de TRL<sup>32</sup> atual, as **tecnologias de remoção de carbono**, nomeadamente CCUS<sup>33</sup>, apenas são consideradas, neste roteiro, de 2040 em diante, prevenindo-se um custo médio de descarbonização abaixo dos 250€/tCO<sub>2</sub>eq. evitada<sup>34</sup>. A descida gradual dos custos associados a estas tecnologias dependerá do sucesso do *take-off* das mesmas, isto é, da adesão da indústria, assim como da evolução dos mercados de carbono.

A **economia circular**, mais concretamente a reutilização de caco cerâmico, constitui-se como um vetor de descarbonização custo-eficaz, pelo facto de permitir a redução de emissões através da redução da procura de matérias-primas virgens e, de não exigir um investimento inicial significativo. O sucesso das tecnologias associadas a este vetor de descarbonização dependerá de estratégias e políticas de gestão de resíduos que permitam a otimização dos fluxos reciclagem de resíduos cerâmicos.



Figura 6.1. Custo de descarbonização por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente evitada e análise da relevância de enablers na evolução dos custos dos vetores. <sup>1</sup>Biomassa, combustíveis fósseis (e.g. gás natural); <sup>2</sup>Tecnologias com TRL baixo (e.g. tecnologias de secagem de vácuo, novos processos de sinterização, micro-ondas/infravermelhos); <sup>3</sup> Carbon Capture and Storage; <sup>4</sup> Carbon Capture, Utilization and Storage.

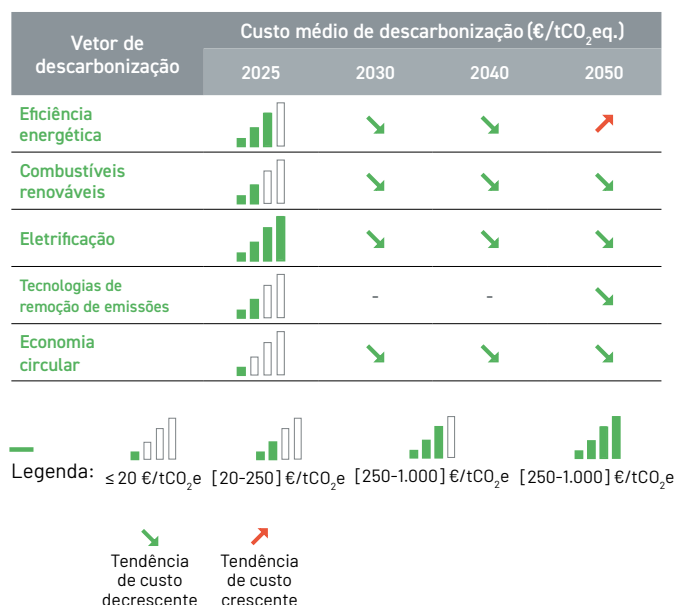


Figura 6.2. Tendência de evolução dos custos de descarbonização por década, até 2050.

<sup>32</sup>Technology Readiness Level   
<sup>33</sup>Carbon Capture, Utilisation and Storage   
<sup>34</sup>Custo de descarbonização determinado com base em análise da International Energy Agency

# PROPOSTAS DE TRAJETÓRIAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA

Para a construção das trajetórias de descarbonização custo-eficazes da Indústria Cerâmica nacional foram estabelecidos dois cenários de evolução de emissões:

- *Business as Usual* (BAU) – Cenário que estima a evolução das emissões de GEE considerando as previsões de crescimento da produção estabelecidas para o setor, mas mantendo os vetores energéticos, tecnologias e práticas industriais atuais.
- Neutralidade Carbônica – Cenário que estima a evolução das emissões de GEE considerando as previsões de crescimento da produção estabelecidas para o setor e a implementação de vetores, medidas e tecnologias de descarbonização custo-eficazes. Esta implementação considera as estratégias mais custo-eficazes e a sua disponibilidade para adoção no setor. A integração gradual do *mix* de tecnologias e medidas de descarbonização promoverá a redução das emissões ao longo do tempo, alcançando a neutralidade carbônica da Indústria Cerâmica em 2050.

Nas secções seguintes, são analisadas as trajetórias de descarbonização que resultaram do exercício de modelação realizado. Numa primeira fase, o exercício foi feito para o setor da Indústria Cerâmica, de forma agregada. Posteriormente, foram modeladas as trajetórias de cada um dos subsectores considerados no âmbito do presente roteiro: Cerâmica Estrutural, Pavimento e Revestimento Cerâmico, Louça Sanitária, Cerâmica Utilitária e Decorativa e a Cerâmica Técnica, Refratários e Outros.



# INDÚSTRIA CERÂMICA

O **Cenário Business as Usual (BAU)**, que pressupõe que as práticas e tecnologias industriais permanecem as *is*, ou seja, inalteradas, prevê um aumento das emissões de 9% em 2050, face ao ano de 2025 (Figura 6.3). Esta é a evolução prevista para as emissões de GEE num cenário onde a tendência de aumento da produção média anual, estimulada por um aumento da procura, se conjuga com a inexistência de uma transição tecnológica.

No **Cenário de Neutralidade Carbônica**, estima-se uma redução das emissões de âmbito 1 e 2 de 14% em 2030, quando comparando com o cenário BAU (Figura 6.3 e Figura 6.4). Esta redução resulta da introdução gradual de vetores de descarbonização como a eficiência energética, economia circular ou os combustíveis renováveis, em especial a biomassa.

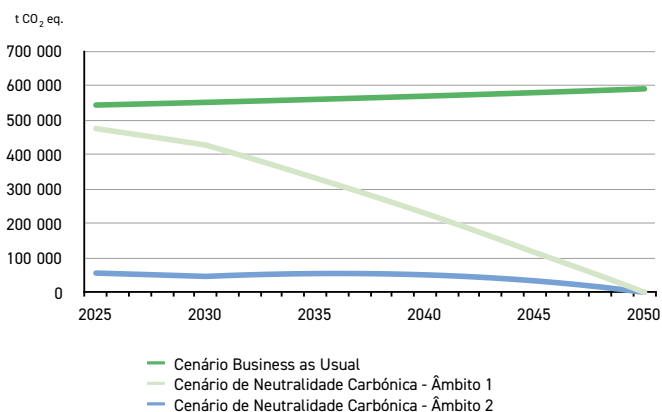


Figura 6.3. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para a Indústria Cerâmica.

Após 2030 estima-se que a redução de emissões de GEE seja mais acentuada, alavancada pela crescente utilização de biometano, biomassa, por medidas de eficiência energética e pela eletrificação dos processos industriais. Em 2040 prevê-se uma redução de emissões de 51% face ao cenário BAU, sendo a neutralidade carbônica alcançada em 2050. O desenvolvimento de novas tecnologias<sup>35</sup> e as tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono terão um papel de relevo no alcance da neutralidade carbônica no ano de referência.

Enquanto as emissões de âmbito 1 assumem uma tendência decrescente estável ao longo dos anos, impulsionada pela gradual introdução dos vetores de descarbonização, as emissões âmbito 2 apresentam uma tendência mais instável. Estas variam em função do *mix* da rede elétrica nacional e do nível da relevância das medidas e tecnologias associadas ao vetor da eletrificação. Após 2030, as emissões de âmbito 2 registam um ligeiro aumento devido ao maior consumo de eletricidade previsto, diminuindo ainda antes de 2040, devido à redução progressiva do fator de emissão do mix energético nacional, por força da produção de eletricidade ser cada vez mais assente em energias renováveis e de baixo carbono. Com um mix energético nulo, estima-se redução total das emissões de âmbito 2 em 2050. A trajetória de descarbonização das emissões de âmbito 2 pode, contudo, ser acelerada em virtude do estabelecimento de contratos de fornecimento de eletricidade com certificados de origem renovável pelas empresas do setor.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★★	★★★★★	★★★★☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Economia circular	★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆
Hidrogénio verde (15%)		★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Biomassa/Biometano	★★★☆☆	★★★★☆	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Eletrificação		★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★☆
CCUS				★☆☆☆☆	★☆☆☆☆
Novas tecnologias	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★★☆☆ Potencial moderado    ★★★★★ Potencial elevado    ★★★★★ Potencial muito elevado

Figura 6.4. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquénio, para a Indústria Cerâmica.

<sup>35</sup>Novas tecnologias são definidas como outras tecnologias de maturidade reduzida, relativamente às quais se prevê um aumento da disponibilidade em escala industrial ao longo do horizonte temporal considerado



# CERÂMICA ESTRUTURAL

No **Cenário Business as Usual (BAU)**, prevê-se um crescimento na produção relativa ao subsetor Cerâmica Estrutural até 2050, resultando num aumento das emissões de GEE de âmbito 1 e 2 em 4% em 2050, face a 2025 (Figura 6.5). Esta é a evolução prevista para as emissões de GEE num cenário onde a tendência de aumento da produção, estimulada por um aumento da procura, se conjuga com a inexistência de uma transição tecnológica.

No **Cenário de Neutralidade Carbónica** estima-se, para 2030, uma redução das emissões de 22% comparando com o cenário BAU, em igual período (Figura 6.5 e Figura 6.6). Esta redução é alavancada, sobretudo, pela utilização de biomassa em detrimento de combustíveis fósseis. As medidas de eficiência energética, de economia circular e

a utilização de biometano têm igualmente grande relevo na trajetória da Cerâmica Estrutural neste período. Após 2030 prevê-se grande influência da utilização de combustíveis renováveis, sobretudo biomassa e biometano, a promoção da economia circular e a eficiência energética, vetores instrumentais na redução das emissões em cerca de 58% no Cenário de Neutralidade Carbónica, face ao BAU, até 2040. O desenvolvimento de novas tecnologias e o *take-off* das tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono terão papel de relevo no alcance da neutralidade carbónica da Cerâmica Estrutural, de 2040 em diante. Pela natureza dos processos industriais chave deste subsetor, muito assentes em processos térmicos com elevado potencial para aplicação de biomassa e biometano, a eletrificação assume menor relevância na trajetória modelada para o Cenário de Neutralidade Carbónica da Cerâmica Estrutural.

Enquanto as emissões de âmbito 1 assumem uma tendência decrescente gradual e estável, impulsionada pela contínua introdução dos vetores de descarbonização, as emissões de âmbito 2 diminuem até 2030, em função de um *mix* energético com um fator de emissão que diminui de forma gradual. Após 2030, estas registam um ligeiro aumento devido ao maior consumo de eletricidade previsto, diminuindo ainda antes de 2040 com a redução progressiva do fator de emissão, por força da produção de eletricidade, cada vez assente em energias renováveis e de baixo carbono. Com um *mix* energético nulo, estima-se redução total das emissões de âmbito 2 em 2050.

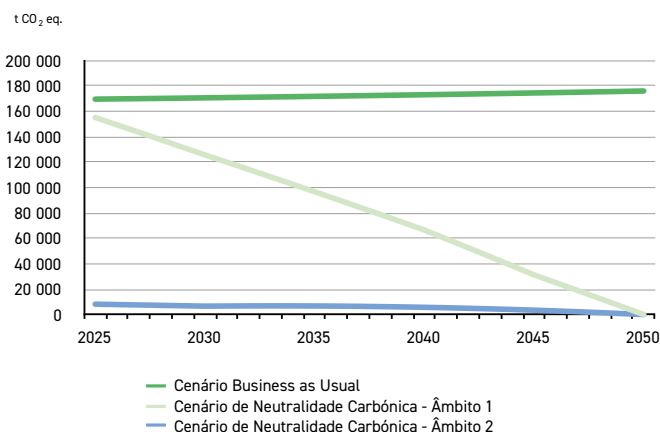


Figura 6.5. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para o subsetor da Cerâmica Estrutural.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆	★☆☆☆☆	★★☆☆☆
Economia circular	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆
Biomassa	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Biometano	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★★☆	★★★★★	★★★★★
Eletrificação		★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆
CCUS				★☆☆☆☆	★★☆☆☆
Novas tecnologias	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★☆☆☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★★☆☆ Potencial moderado    ★★★★★ Potencial elevado    ★★★★★ Potencial muito elevado

Figura 6.6. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquênio, para o subsetor da Cerâmica Estrutural.

# PAVIMENTO E REVESTIMENTO CERÂMICO

Contrariamente aos restantes subsetores, o **Cenário Business as Usual (BAU)** para o subsetor de Pavimento e Revestimento Cerâmico estima uma redução das emissões de GEE de 8% (Figura 6.7). Embora se preveja o crescimento da produção do subsetor até 2050, este será a uma taxa média anual reduzida, quando comparada com os restantes subsectores. Este facto conjugado com a gradual descarbonização do *mix* energético nacional ditam o decréscimo das emissões de GEE, ainda que num cenário que não preveja qualquer transição tecnológica da indústria.

No **Cenário de Neutralidade Carbónica**, até 2030, prevê-se uma redução das emissões de GEE de 11%, comparando com o BAU, promovida sobretudo, por medidas de eficiência

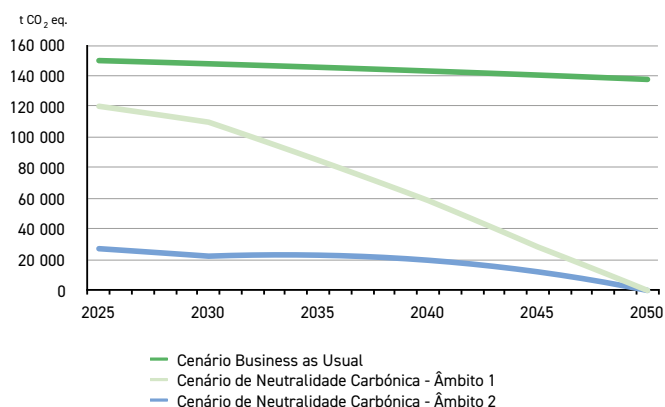


Figura 6.7. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para o subsetor do Pavimento e Revestimento Cerâmico.

cia energética e economia circular (Figura 6.7 e Figura 6.8). Após 2030 regista-se uma tendência de redução de emissões mais contundente, por via da otimização, não só de combustíveis renováveis como o hidrogénio verde (15%) ou o biometano, mas também da eficiência energética e da economia circular. Estima-se que em 2040 o Cenário de Neutralidade Carbónica alcance uma redução de emissões de 45%, comparando com o Cenário Business as Usual, em igual período. O desenvolvimento de novas tecnologias e o *take-off* das tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono terão papel de relevo no alcance da neutralidade carbónica do subsetor do Pavimento e Revestimento Cerâmico, de 2040 em diante.

Enquanto as emissões de âmbito 1 assumem uma tendência decrescente gradual e estável, impulsionada pela contínua introdução dos vetores de descarbonização, em especial combustíveis renováveis, as emissões de âmbito 2 registam alguma flutuação. Até 2030 regista-se uma redução em função de um *mix* energético com um fator de emissão que diminui de forma gradual. Após 2030, verifica-se um ligeiro aumento devido ao maior consumo de eletricidade previsto, retomando a tendência decrescente ainda antes de 2040 com a redução progressiva do fator de emissão, por força da produção de eletricidade cada vez assente em energias renováveis e de baixo carbono. Com um mix energético nulo, estima-se redução total das emissões de âmbito 2 em 2050.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★★	★★★★★	★★★★☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Economia circular	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Hidrogénio verde (15%)		★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Biomassa		★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Biometano		★★★☆☆	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Eletrificação		★☆☆☆☆	★☆☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
CCUS				★☆☆☆☆	★☆☆☆☆
Novas tecnologias	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★★☆☆ Potencial moderado    ★★★★★ Potencial elevado    ★★★★★ Potencial muito elevado

Figura 6.8. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquénio, para o subsetor do Pavimento e Revestimento Cerâmico.



# LOUÇA SANITÁRIA

No **Cenário Business as Usual (BAU)**, prevê-se que o crescimento da produção do subsetor da Louça Sanitária até 2050 irá promover o aumento das emissões de GEE de âmbito 1 e 2 em 11% em 2050, face a 2025 (Figura 6.9). Tal tendência deve-se ao facto de este ser um cenário que projeta um aumento da produção conjugado com uma transição tecnológica inexistente.

O **Cenário de Neutralidade Carbónica** modelado regista, em 2030, uma redução de 11% quando comparando com o

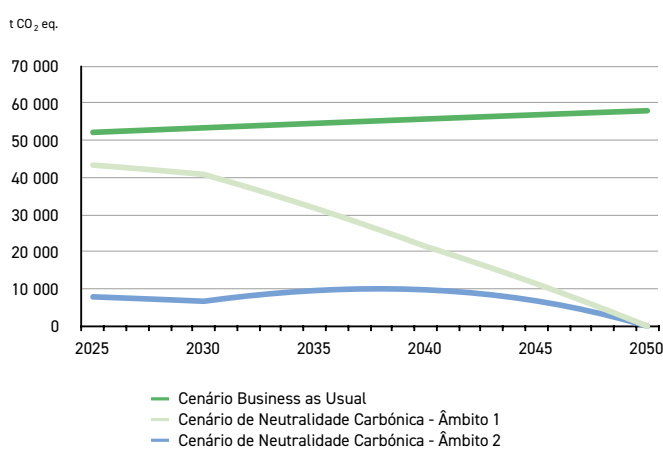


Figura 6.9. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para o subsetor da Louça Sanitária.

BAU, para o mesmo ano (Figura 6.9 e Figura 6.10). Tal redução encontra-se alavancada pelas medidas e tecnologias de eficiência energética introduzidas neste período. Na década 2030-2040 o cenário regista uma trajetória de descarbonização mais efetiva, assente sobretudo na eficiência energética, na substituição de combustíveis fósseis por renováveis, nomeadamente hidrogénio verde (15%) e no biometano e na eletrificação dos processos industriais. No ano de 2040 estima-se uma redução emissões de 44% face ao BAU. De 2040 em diante prevê-se que este seja um subsetor fortemente dependente da energia elétrica, apoiada num *mix* energético cada vez menos intensivo em carbono. Além da eletrificação, neste período considera-se ainda a influência crescente de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono, com *take-off* previsto para 2040. O Cenário de Neutralidade Carbónica alcança a neutralidade carbónica em 2050.

As emissões de âmbito 2 registam uma diminuição até ao ano de 2030, em função de um *mix* energético que decresce gradualmente. Após 2030, as emissões aumentam devido à preponderância do vetor eletrificação no subsetor, diminuindo novamente antes de 2040 devido à redução progressiva do fator de emissão, por força da produção de eletricidade cada vez assente em energias renováveis e de baixo carbono. Com um *mix* energético nulo, estima-se redução total das emissões de âmbito 2 em 2050.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★☆	★★☆☆☆
Economia circular	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆
Hidrogénio verde (15%)		★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★☆☆
Biometano		★★☆☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆	★★★☆☆
Eletrificação		★★☆☆☆	★★★☆☆	★★★★★	★★★★★
CCUS				★★☆☆☆	★★☆☆☆
Novas tecnologias	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★★☆☆ Potencial moderado    ★★★★★ Potencial elevado    ★★★★★ Potencial muito elevado

Figura 6.10. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquénio, para o subsetor da Louça Sanitária.



# CERÂMICA UTILITÁRIA E DECORATIVA

No **Cenário Business as Usual (BAU)**, prevê-se um crescimento médio anual da produção considerável do subsetor Cerâmica Utilitária e Decorativa até 2050, fator que promove um aumento das emissões de GEE, diretas e indiretas, de 28% em 2050, face a 2025 (Figura 6.11). Esta tendência prevista para as emissões de GEE resulta de um cenário influenciado pelo aumento da produção, conjugada com a inexistência de uma transição tecnológica.

No **Cenário de Neutralidade Carbónica** estima-se, para 2030, uma redução das emissões de 10% comparando com o cenário BAU, em igual período (Figura 6.11 e Figura 6.12). Esta redução será alavancada, sobretudo, por medidas de eficiência energética e pela eletrificação dos processos

produtivos. Para o período pós-2030 prevê-se a massificação da eletrificação dos processos industriais da Cerâmica Utilitária e Decorativa, estabelecendo-se como um dos principais vetores de descarbonização deste subsetor. A introdução de combustíveis renováveis, em especial de biometano e hidrogénio verde (15%), assim como as medidas de eficiência energética contribuem de forma decisiva para a redução de 50% das emissões de GEE no Cenário de Neutralidade Carbónica comparando com o BAU, em 2040. O desenvolvimento de novas tecnologias e o *take-off* das tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono terão papel de relevo no alcance da neutralidade carbónica da Cerâmica Estrutural, de 2040 em diante.

Enquanto as emissões de âmbito 1 assumem uma tendência decrescente gradual e estável, impulsionada pela continua introdução dos vetores de descarbonização, as emissões de âmbito 2 apresentam alguma flutuação, diminuindo até 2030, em função de um *mix* energético com um fator de emissão que diminui de forma gradual. Todavia, após 2030, regista-se um ligeiro aumento devido ao maior consumo de eletricidade previsto, seguido de nova redução ainda antes de 2040, potenciada pela redução progressiva do fator de emissão, por força da produção de eletricidade, cada vez assente em energias renováveis e de baixo carbono. Com um *mix* energético nulo, estima-se redução total das emissões de âmbito 2 em 2050.

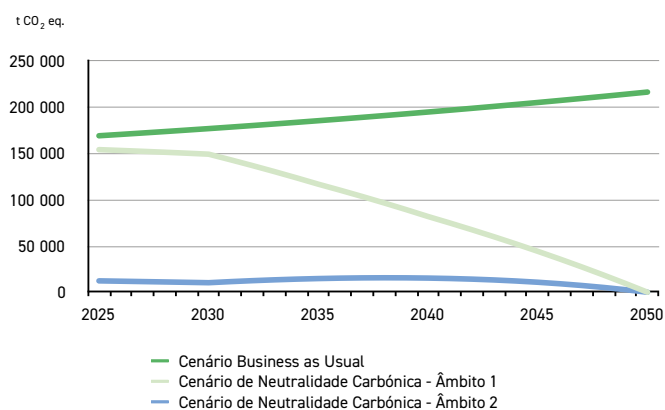


Figura 6.11. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para o subsetor da Cerâmica Utilitária e Decorativa.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★★	★★★★★	★★★★☆	★★★☆☆	★★☆☆☆
Economia circular	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆
Hidrogénio verde (15%)		★★☆☆☆	★★★☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆
Biometano		★★★☆☆	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Eletrificação		★★★☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
CCUS				★★☆☆☆	★★☆☆☆
Novas tecnologias	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★☆☆☆ Potencial moderado    ★★★☆☆ Potencial elevado    ★★★★☆ Potencial muito elevado

Figura 6.12. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquénio, para o subsetor da Cerâmica Utilitária e Decorativa.



# CERÂMICA TÉCNICA, REFRAATÓRIOS E OUTROS

À semelhança do subsetor do Pavimento e Revestimento Cerâmico, e contrariamente aos demais subsectores considerados no presente roteiro, o **Cenário Business as Usual** (BAU) para o subsetor de Cerâmica Técnica, Refratários e Outros estima uma redução das emissões de GEE em 2050 de 2%, face a 2025 (Figura 6.13). Este decréscimo de emissões verifica-se mesmo com a previsão de crescimento da produção média anual até 2050, ainda que este seja inferior comparativamente aos demais subsectores. O reduzido crescimento médio anual previsto conjugado com a gradual descarbonização do *mix* energético nacional ditam o decréscimo das emissões de GEE, ainda que o cenário não preveja qualquer transição tecnológica da indústria.

No **Cenário de Neutralidade Carbónica**, até 2030, prevê-se uma redução das emissões de GEE de 14%, comparando com o BAU, promovida por medidas de eficiência energética e economia circular (Figura 6.13 e Figura 6.14). Após 2030 regista-se uma tendência de redução de emissões mais efetiva, por via da introdução não só de combustíveis renováveis como o hidrogénio verde (15%), mas também da eficiência energética e da economia circular, contribuindo para uma redução de emissões de 51% em 2040. A eletrificação dos processos industriais estabelece-se como o principal vetor de descarbonização do subsetor, sobretudo de 2035 em diante. A utilização de energia elétrica, com um *mix* energético cada vez menos intensivo em carbono, prevendo-se que seja nulo em emissões no ano de 2050, será o fator determinante para alcançar a neutralidade carbónica no período de referência do presente roteiro.

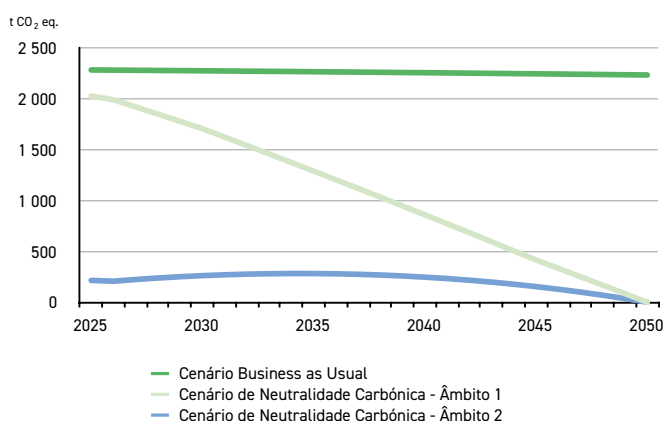


Figura 6.13. Trajetória de emissões (âmbitos 1 e 2) para o subsetor da Cerâmica Técnica, Refratários e Outros.

Vetor de descarbonização	2025-2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★☆	★★☆☆☆
Economia circular	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆
Hidrogénio verde (15%)		★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★☆☆☆
Biometano		★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆
Eletrificação	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★★	★★★★★
CCUS				★★☆☆☆	★★☆☆☆
Novas tecnologias	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆

Legenda: ★☆☆☆☆ Potencial reduzido    ★★☆☆☆ Potencial moderado    ★★★☆☆ Potencial elevado    ★★★★☆ Potencial muito elevado

Figura 6.14. Potencial de descarbonização face ao total de emissões evitadas em cada quinquénio, para o subsetor da Cerâmica Técnica, Refratária e Outros.







# Capacitar para a descarbonização



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

# COMPETÊNCIAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO

Descarbonizar a Indústria é uma das prioridades europeias no processo de transição energética e descarbonização, apontando-se metas muito ambiciosas para o setor industrial, num contexto em que os mercados se tornam cada vez mais exigentes

Apesar da alta pressão para contribuir com reduções significativas de emissões de dióxido de carbono, a indústria, através da continua eficiência energética, eco-inovação e evolução tecnológica para processos e produtos mais sustentáveis, continua a tentar dar passos firmes para reduzir significativamente as emissões de GEE, no difícil processo de transição climática.

Apesar de todo o esforço, a indústria requer uma transformação estrutural, para criar oportunidades no processo de transição climática e com isso conseguir um diferencial competitivo, na resposta a metas demasiado rígidas e ambiciosas para a realidade industrial e geopolítica europeia.

Para que tal aconteça, é imprescindível capacitar os quadros técnicos das empresas, de conhecimento na adoção de práticas, tecnologias e estratégias, que por um lado promovam uma economia de baixo carbono, mas por outro permita a criação de oportunidades.

Apesar de representar uma rutura com alguns dos paradigmas atuais, o processo de descarbonização deve ser visto como uma oportunidade para impulsionar uma transformação estrutural e reconfigurar a atividade industrial, tanto ao nível dos processos produtivos como da gestão e utilização dos recursos, promovendo, assim, o crescimento do setor.

De acordo com o estudo “O Futuro do Trabalho nos Setores da Cerâmica e Cristalaria”, promovido pelo CTCV com o apoio da Nova SBE, a maioria dos perfis profissionais apresenta lacunas significativas em quase todas as competências ambientais avaliadas. A capacidade de conhecer e aplicar ferramentas e técnicas de avaliação de sustentabilidade e descarbonização é atualmente uma competência crítica, com elevada necessidade de reforço em diversos perfis, sobretudo em funções técnicas e estratégicas como engenheiros de processo, técnicos de manutenção, qualidade ou desenvolvimento. Alguns destes perfis apresentam lacunas de competência que atingem 8 numa escala de 0 a 10, o que evidencia a urgência em capacitar os quadros técnicos da indústria cerâmica para os desafios da transição climática.

**Tabela 7.1. Nível de aptidão para competências para a descarbonização, demonstrado pelos diferentes perfis profissionais do Setor da Cerâmica.**

Profissões	APTIDÃO (proficiência) FUTURA (0 a 10)						
	1 - Ter conhecimento das mudanças climáticas	2 - Ter conhecimento do impacto ambiental ao longo do ciclo económico de determinado produto	3 - Ter conhecimento da legislação de fabricação sustentável	4 - Conhecer as ferramentas e técnicas de avaliação de sustentabilidade	5 - Ter noção da pegada de carbono	6 - Ler relatórios de sustentabilidade	7 - Escrever relatórios de sustentabilidade
Operador de instalações para o fabrico de cerâmica	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	4,5	4,5
Oleiro	1	1	2	2	1	2	NA
Modelador e formista de cerâmica	2	2	2	5	1	1	1
Engenheiro industrial e de produção	7,5	7,5	8	8	7,5	7,5	8
Encarregados das indústrias da transformação de minerais não metálicos	3	3	5	5	5	2	NA
Técnicos de controlo de processos industriais	6	6	5	5	6	5	5
Engenheiro de processos	8	8	8	8	8	8	8
Técnico de logística	8	8	8	8	8	5	5
Técnico de manutenção	8	8	8	6	8	4	8
Técnico de qualidade	8	8	8	8	8	8	8

Nível de Aptidão (proficiência) no Futuro (0 a 10)

- Básico (até 3)
- Intermédio (4 a 6)
- Avançado (maior que 6)
- NA Não Aplicável
- Alta necessidade de upskilling (gap maior ou igual a 3)



# DESAFIOS VS OPORTUNIDADES

Apesar de todos os constrangimentos à descarbonização, como a dimensão política e regulamentar, tecnológica, de dinâmicas de eficiência coletiva, conhecimento e outras barreiras, há também muitas oportunidades.

A resistência à adoção de comportamentos e práticas no domínio da descarbonização é ainda muito visível na cultura das empresas, falta uma clara estratégia para a descarbonização por parte dos empresários e falta de conhecimento por parte dos colaboradores, o que limita o investimento e a adoção de tecnologias, bem como a consciencialização das oportunidades de descarbonização e do potencial de rentabilidade para os seus negócios (inovação tecnológica e incentivos financeiros).

Capacitar é fulcral para uma adoção eficaz e em larga escala de processos e tecnologias de baixo carbono e está intimamente associada à premente necessidade de desenvolvimento de novos perfis de competências.

São algumas as barreiras, que podem traduzir-se em oportunidades, por via da capacitação de empresários e ativos das empresas:

- **Escassez de mão-de-obra**

Atualmente a escassez de mão-de-obra, é um desafio, mas também uma oportunidade, porque incentiva os empresários a repensar os seus processos industriais e o investimento em novas tecnologias de fabrico e automatização de processos, para processos mais eficientes, mais limpos, com uma menor produção de desperdícios e consumo de recursos.

- **Transição digital**

A transformação digital e automatização de processos, é um caminho para minimizar desperdícios e criar processos mais sustentáveis, mas é necessário dotar os colaboradores de competências digitais, análise de dados e ferramentas de automatização de processos. Da mesma forma, capacitar para a adoção de medidas e práticas sustentáveis e de descarbonização, é uma necessidade premente e com necessidade de *upskilling* em múltiplos perfis profissionais, especialmente em quadros técnicos.

- **Enquadramento legal**

O quadro regulatório e as metas europeias, são ambiciosas e os mercados cada vez mais exigentes, pelo que dotar os empresários e quadros técnicos das empresas de conhecimento, é imprescindível no caminho da sustentabilidade e descarbonização, que mais do que uma necessidade, deve ser entendido como uma oportunidade de transformação estrutural e de reconfiguração da atividade industrial.

# CAMINHOS PARA A CAPACITAÇÃO DA FORÇA LABORAL

Capacitar para a transição para uma economia de baixo carbono, necessita de estratégia e planejamento, apesar do elevado nível de incerteza, para aproveitar as oportunidades de reestruturação industrial.

- Mapear, através de uma projeção da força de trabalho futura, os processos industriais, identificando processos de modernização, assentes em processos de inovação, digitalização ou automação de tarefas (avaliar a extinção ou substituição de tarefas e requalificação de mão-de obra);
- Mapear necessidades e rever a matriz de competências das indústrias do setor da cerâmica;
- Diagnosticar, mapear cenários, aplicar métodos com um maior foco na resolução de problemas do chão-de-fábrica e focar tecnologias digitais (introduzindo os conceitos de indústria 4.0) e de Economia Circular/Sustentabilidade;
- Rever a oferta formativa existente e propor novos percursos formativos.
- Repensar e reformar os modelos de formação, nomeadamente na criação de novos formatos de formação, assentes em modelos imersivos de treino, baseados em experiências piloto de aprendizagem, que integrem experiências imersivas, podendo ser uma peça-chave no processo de transição para o novo paradigma da tripla transição (Ambiental, Digital e Social).
- Aproveitar as oportunidades de financiamento para requalificar e fazer evoluir a força de trabalho da Indústria.



# RE-SKILLING E UP-SKILLING DA FORÇA LABORAL

A capacitação dos quadros técnicos da indústria cerâmica implica proporcionar-lhes um conhecimento mais aprofundado e prepará-los para atuar na melhoria da eficiência de recursos, adoção de processos mais ágeis, que passem por soluções digitais e circulares, bem como dotá-los de conhecimento e ferramentas de suporte no processo de decisão de investimento.

O *reskilling* ou *upskilling* da força laboral, proporciona uma maior apetência para as novas tecnologias e tecnologia de baixo carbono, o que, apesar de funcionar como um vetor de suporte à descarbonização, se envolver empresas, governo, clusters e organizações setoriais, o impacto esperado, embora indireto e de médio-longo prazo, pode ser elevado.

Criar percursos formativos que incluam, entre outros, os seguintes vetores de descarbonização:

- **Eficiência Energética**

Melhorar o desempenho energético, capacitando para a identificação de processos de melhoria da Eficiência Energética.

- **Eletrificação**

Potenciar a eletrificação de processos térmicos, reduzir consumos energéticos e custos operacionais.

- **Biocombustíveis**

Explorar o potencial de integração de gases renováveis ou biocombustíveis, como o biometano ou o hidrogénio em comparação com outros combustíveis, avaliando a sua utilização em diferentes aplicações, garantindo o cumprimento dos requisitos técnicos, legais e de segurança, aplicáveis ao armazenamento e utilização.

- **Eco-Inovação**

Criar estratégias e práticas de Eco- inovação, no desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis, menos exigentes em recursos, prolongando o valor dos produtos e mantendo-os dentro de um circuito fechado.

**Tabela 7.2. Ranking de GAP esperado em competências ambientais (retirado do estudo “O Futuro do Trabalho nos Setores da Cerâmica e Cristalaria”**

Ranking de GAP esperado em competências Ambientais

#	Competência Ambiental	Gap: 2030 x Hoje (média)	Exemplo de Profissões com GAP na Competência <sup>1</sup>
1	4 Conhecer as ferramentas e técnicas de avaliação de sustentabilidade	2.28	Modelador e formista de cerâmica
2	3 Ter conhecimento da legislação de fabricação sustentável	1.97	Tecnico de logística
3	5 Ter noção da pegada de carbono	1.83	Encarregados das indústrias da transformação de minerais não metálicos
4	6 Ler relatórios de sustentabilidade	1.81	Técnico de Manutenção
5	7 Escrever relatórios de sustentabilidade	1.81	Técnico de Qualidade
6	2 Ter conhecimento do impacto ambiental ao longo do ciclo económico de determinado produto	1.72	Operador de instalações para o fabrico de cerâmica
7	1 Ter conhecimento das mudanças climáticas	1.64	Operador de instalações para o fabrico de cerâmica

1 - não exaustivo



- **Redução de Consumos**

Reduzir Consumos Energéticos e Custos Operacionais.

- **Tecnologias de Captura de CO<sub>2</sub>**

Explorar processos e metodologias de Captura de emissões de CO<sub>2</sub>, resultantes dos processos industriais.

- **Tecnologias Digitais, Automatização e Sensorização**

As tecnologias digitais e da Indústria 4.0 permitem fomentar práticas mais sustentáveis e monitorizar de forma preventiva e corretiva aos perfis de consumo de recursos das empresas. Consciencializar para o Impacto da Tecnologia (Sensores, Robots, IoT, Big Data, Cloud, Computing, IA, Machine learning, realidade aumentada e outros recursos inteligentes), para a recolha de dados, para a resposta rápida e eficiente e para a desmaterialização de processos. Adotar processos automatizados e robotizados, permitem aumentar a eficiência de processos industriais e aumentar a rentabilidade.

- **Reaproveitamento, Economia Circular e Simbioses Industriais**

Consciencializar para o reaproveitamento, para a Economia Circular e Simbioses Industriais, analisando criteriosamente os subprodutos resultantes da atividade de extração ou beneficiação.



# ACCELERAR A CAPACITAÇÃO PARA A DESCARBONIZAÇÃO ATRAVÉS DA AÇÃO COLETIVA

Na capacitação da força laboral, apesar de caber às empresas o papel principal, os clusters e associações setoriais assumem particular relevância, tendo em conta a natureza coletiva das mesmas, bem como o alinhamen-

to de regulamentação e financiamento. Liderar e Coopetir, partilhando uma visão única, vai permitir criar uma visão única e conjunta do setor, de médio e longo prazo



**A1. Task force:** desenvolvimento de uma estratégia de capacitação para descarbonização



**A2. Mapeamento das necessidades de competências** para a sustentabilidade e descarbonização



**A3. Oferta formativa STEAM** (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Matemática)



**A4. Formatos imersivos de treino:** aceleram a transferência de conhecimento



**A5. Parceria com universidades:** estimular o interesse dos jovens licenciados para a temática



**A6. Articulação com o Governo:** definição de estratégias e quadros políticos de apoio

# SUSTENTABILIDADE - DIMENSÃO SOCIAL E DIMENSÃO AMBIENTAL

A indústria cerâmica desempenha um papel fundamental na economia global, ao disponibilizar uma vasta gama de produtos com diversas aplicações, caracterizados pela sua versatilidade, resistência e longa durabilidade. Todavia, esta indústria depende da extração de recursos naturais como fonte de matérias-primas, apresenta um consumo energético elevado e é responsável pela emissão de gases com efeito de estufa (GEE), o que representa desafios ambientais significativos para o setor.

Com o intuito de mitigar os impactos decorrentes das suas atividades, muitas empresas têm vindo a adotar práticas sustentáveis e iniciativas de responsabilidade social.



# RESPONSABILIDADE AMBIENTAL

A dimensão do pilar ambiente constitui um dos principais eixos estratégicos para o desenvolvimento sustentável da indústria cerâmica. Dado o seu elevado consumo de energia, utilização intensiva de recursos naturais e emissão de poluentes, esta indústria está particularmente sujeita à regulamentação ambiental, tanto a nível europeu como nacional.

A adoção de práticas ambientalmente responsáveis não só é uma exigência legal, como também uma oportunidade para a inovação, competitividade e reputação das empresas do setor.

## Enquadramento e desafios ambientais

A atividade cerâmica está associada a diversos aspectos ambientais, entre os quais se destacam a extração de matérias-primas (argila, feldspato, caulino, entre outros); Consumo intensivo de energia; Emissões atmosféricas; Geração de resíduos e subprodutos industriais; Consumo de recursos hídricos, que originam uma série de impactes no ambiente.

Face a estes desafios, as empresas do setor cerâmico são chamadas a adotar políticas de responsabilidade ambiental assentes na **prevenção da poluição**, na **eficiência dos recursos** e na **transição energética**, em conformidade com o quadro legislativo vigente.

## Diretivas e Normas Europeias

Existe um quadro legal amplo e em constante evolução no domínio ambiental. Nesta secção procede-se ao enquadramento da principal legislação europeia e nacional associada à sustentabilidade ambiental e à descarbonização da indústria cerâmica, destacando-se os instrumentos com maior impacte regulatório e operacional para o setor.

### a) Diretiva 2010/75/UE – Diretiva das Emissões Industriais (DEI)

Esta diretiva estabelece as regras relativas à prevenção e controlo integrado da poluição (PCIP), aplicando-se a instalações de diversos setores industriais que cumpram com os limiares estabelecidos no Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de agosto, incluindo diversas fábricas cerâmicas. As empresas devem operar de acordo com as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD), definidas no documento BREF (Best Available Techniques Reference Documents), específico para o setor cerâmico.

Objetivos principais:

- Redução das emissões atmosféricas;
- Gestão eficiente de resíduos;
- Monitorização ambiental regular;
- Minimização do impacto nos recursos hídricos.

A **Diretiva 2010/75/UE** foi revista pela **Diretiva (UE) 2024/1785**, com o objetivo de reforçar as medidas de proteção ambiental e promover a transição para uma economia sustentável, impactando diretamente na indústria cerâmica.

As principais alterações incluem:

- **Expansão do âmbito:** Existe uma elevada probabilidade de um número significativo de instalações cerâmicas pertencentes aos diferentes subsectores, anteriormente não abrangidas pela Diretiva das Emissões Industriais (DEI) de 2010, venham agora a ser incluídas no âmbito da nova DEI 2.0, dependendo da transposição para a legislação nacional.
- **Reforço das exigências ambientais:** A indústria cerâmica terá de cumprir normas mais rigorosas quanto às emissões de poluentes, especialmente CO<sub>2</sub> e partículas, provenientes dos processos de cozedura.
- **Promoção da economia circular e descarbonização:** Incentiva-se a reutilização de materiais e a redução das emissões de carbono, o que exige da indústria cerâmica práticas mais sustentáveis e o uso de fontes de energia renováveis.
- **Inovação tecnológica:** A nova diretiva fomenta a adoção de tecnologias mais eficientes para reduzir o consumo de energia e as emissões, promovendo o desenvolvimento de produtos cerâmicos ecológicos e processos produtivos mais sustentáveis.

A transposição da nova diretiva para a legislação nacional exigirá que as empresas cerâmicas adotem medidas rigorosas para garantir a conformidade, contribuindo para a melhoria ambiental e o cumprimento dos objetivos climáticos da União Europeia.



No âmbito da nova diretiva DEI, encontra-se em revisão o BREF Cerâmico, no qual serão descritas as Melhores Técnicas Disponíveis para o setor cerâmico, com o objetivo de assegurar o cumprimento legal desta diretiva. Esta versão em revisão contempla já um capítulo para as emissões de GEE, incluindo indicadores e métricas de CO<sub>2</sub> e técnicas para promoção da descarbonização.

#### **b) Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE - CELE (EU ETS)**

Algumas empresas do setor cerâmico estão incluídas no Sistema de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia, cujas licenças gratuitas têm vindo a decrescer de forma a alinhar-se com os objetivos globais de sustentabilidade, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e os compromissos do Acordo de Paris, incluindo metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

A redução de emissões no contexto do **CELE** não é apenas uma tendência ambiental, mas uma necessidade estratégica para a indústria cerâmica. Embora envolva desafios em termos de custos e adoção de novas tecnologias, as oportunidades a longo prazo são significativas, incluindo acesso a mercados mais exigentes, maior competitividade e alinhamento com as metas globais de sustentabilidade. Ao adotar práticas de redução de emissões, a indústria cerâmica pode não só contribuir para a preservação ambiental, mas também se posicionar como líder em inovação e sustentabilidade no mercado global.

#### **c) Regulamento (UE) 2020/852 – Regulamento da Taxonomia Verde (EU Taxonomy Regulation)**

Este regulamento define os critérios para que uma atividade económica seja considerada ambientalmente sustentável. Isto visa combater o “*greenwashing*” (uso indevido de alegações de sustentabilidade) e ajudar investidores, empresas, legisladores e consumidores a tomar decisões informadas.

A indústria cerâmica, para beneficiar de financiamento verde, deverá demonstrar que contribui significativamente para objetivos como:

- Mitigação das alterações climáticas;
- Uso sustentável dos recursos;
- Economia circular e prevenção da poluição.

#### **d) Pacto Ecológico Europeu e Pacote “Fit for 55”**

O Pacto Ecológico Europeu e o pacote legislativo “Fit for 55”, lançado em 2021, visam reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 55% até 2030. A indústria cerâmica é incentivada a adotar tecnologias de baixa emissão, aumentar a eficiência energética e recorrer a fontes renováveis. No âmbito das instalações CELE esse compromisso é ainda mais ambicioso, cifrando-se nos 62% de redução em 2030 face a 2005.

#### **e) Diretiva-Quadro da Água – Diretiva 2000/60/CE**

Define uma estratégia comum para a proteção e gestão sustentável da água na União Europeia. Afeta a indústria cerâmica no que respeita à captação de recursos hídricos, tratamento de águas residuais e reutilização da água nos processos produtivos. Esta diretiva encontra-se em processo de revisão de forma a adaptar a legislação às novas exigências ambientais e aos desafios atuais relacionados com a gestão da água na União Europeia.

#### **Normas ambientais e certificações**

As normas e certificações constituem instrumentos com uma série de indicadores de desempenho, incluindo os associados às alterações climáticas, e nas empresas abrangidas pela PCIP são mesmo uma MTD prevista no BREF.

#### **a) Norma ISO 14001 – Sistema de Gestão Ambiental**

A ISO 14001 é uma norma internacional amplamente adotada pela indústria cerâmica em Portugal e noutros países europeus. Define requisitos para a implementação de sistemas de gestão ambiental que permitem às organizações:

- Identificar e controlar os impactos ambientais das suas atividades;
- Cumprir obrigações legais e regulatórias;
- Melhorar continuamente o seu desempenho ambiental.



## b) Regulamento EMAS – Sistema Comunitário de Gestão e Auditoria

Este sistema voluntário permite às organizações avaliar, reportar e melhorar o seu desempenho ambiental. Várias empresas cerâmicas têm vindo a aderir ao EMAS como forma de demonstração do seu compromisso com a transparência e melhoria contínua. O EMAS incorpora os requisitos da ISO14001 e ainda lhe acrescenta requisitos próprios.

## c) Rótulo Ecológico Europeu (Ecolabel)

Este sistema de certificação voluntário distingue produtos com reduzido impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Algumas empresas do setor cerâmico têm obtido este rótulo sobretudo, aplicável a revestimentos e pavimentos cerâmicos, promovendo produtos mais sustentáveis. A obtenção do rótulo implica o cumprimento dos indicadores de desempenho ambiental e energético.

### Enquadramento legal em Portugal

Portugal transpôs e complementou a legislação europeia com normas próprias, que regulam a atividade das empresas cerâmicas em matéria ambiental, destacando-se algumas das mais relevantes em temática de sustentabilidade e promoção da descarbonização:

**Decreto-Lei n.º 127/2013** – Regime jurídico das emissões industriais (transposição da Diretiva 2010/75/UE);

**Lei de Bases do Ambiente (Lei n.º 19/2014)** – Estabelece os princípios fundamentais da política ambiental nacional;

**Decreto-Lei n.º 102-D/2020** – *Regime geral da gestão de resíduos, incluindo a responsabilidade alargada do produtor*;

**Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030)** – Estabelece metas de descarbonização para a indústria;

**Estratégia Nacional para a Economia Circular (ENECP)** – Promove o reaproveitamento de resíduos e subprodutos nos ciclos produtivos.

**Decreto-Lei n.º 71/2008; Decreto-Lei n.º 226-A/2007; Decreto-Lei n.º 39/2018; Decreto-Lei n.º 101/2024**

## Boas Práticas Ambientais no Setor Cerâmico

As empresas do setor têm implementado medidas ambientais concretas, tais como:

- Recuperação e valorização de calor residual para aumento da eficiência energética;
- Substituição de combustíveis fósseis por biomassa ou biometano (em desenvolvimento) hidrogénio (em desenvolvimento);
- Eletrificação de processos (em desenvolvimento);
- Recirculação de água nos processos de fabrico;
- Valorização de resíduos cerâmicos como matérias-primas secundárias;
- Instalação de sistemas de monitorização ambiental e energético em tempo real;
- Otimização do design de produtos e processos com enfoque no ecodesign;
- Integração de energias renováveis para autoconsumo;
- Requalificação paisagística de áreas de extração.

# RESPONSABILIDADE SOCIAL

Para além das questões ambientais, a responsabilidade social constitui um pilar essencial da sustentabilidade na indústria cerâmica. Este conceito abrange o compromisso das empresas com práticas éticas, o respeito pelos direitos humanos, a promoção do bem-estar dos trabalhadores e o contributo para o desenvolvimento das comunidades onde operam.

## Enquadramento e Importância

A responsabilidade social empresarial (RSE) vai além do cumprimento das obrigações legais. Implica uma atuação voluntária das organizações em domínios, tais como:

- Condições de trabalho dignas e seguras;
- Igualdade de oportunidades e diversidade;
- Formação e desenvolvimento profissional;
- Diálogo com partes interessadas (stakeholders);
- Envolvimento comunitário e apoio a causas sociais;
- Transparência e ética nos negócios.

Na indústria cerâmica, marcada por um histórico de forte componente industrial e laboral, a adoção de práticas de RSE tem vindo a ganhar crescente relevância, refletindo-se na adoção de códigos de conduta, certificações e adesão a normas internacionais.

## Normas e Diretivas Europeias Relevantes

A União Europeia tem desempenhado um papel determinante na promoção da responsabilidade social e da sustentabilidade empresarial, através da criação de diretivas, regulamentos e orientações estratégicas. No contexto da indústria cerâmica, destacam-se os seguintes instrumentos:

### a) Diretiva (UE) 2022/2464 – Diretiva de Reporte de Sustentabilidade Corporativa (CSRD)

Esta diretiva obriga as grandes empresas e, gradualmente, as PME cotadas em bolsa, a divulgarem informação não financeira relacionada com o impacto ambiental, social e de governação (ESG). Isto inclui dados sobre:

- Condições laborais;
- Respeito pelos direitos humanos;

- Diversidade e igualdade de género;
- Cadeias de abastecimento responsáveis.

A sua aplicação tem vindo a ser faseada desde 2024 e visa aumentar a transparência, reforçando a confiança dos investidores e consumidores.

### b) Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*)

Embora centrado na transição ecológica, este pacto estabelece metas que obrigam os setores industriais, incluindo o cerâmico, a repensar os seus modelos de produção e de responsabilidade social, nomeadamente no que respeita à neutralidade carbónica, justiça social e apoio às regiões afetadas pela transição verde.

### c) Estratégia da UE para os Direitos Sociais

A União Europeia promove ainda a implementação do Pilar Europeu dos Direitos Sociais, cujos princípios visam garantir melhores condições de trabalho, proteção social adequada, formação e igualdade de oportunidades. Esta estratégia tem especial impacto nas indústrias mais tradicionais, como a cerâmica, incentivando a modernização e a valorização dos trabalhadores.

## Boas Práticas no Setor

Muitas empresas cerâmicas em Portugal têm adotado práticas exemplares de responsabilidade social, como:

- Programas internos de formação contínua;
- Adoção de horários flexíveis e apoio à conciliação entre vida profissional e pessoal;
- Projetos sociais em comunidades locais;
- Parcerias com instituições de ensino superior e centros tecnológicos para promover a empregabilidade jovem.

# PERSPETIVAS FUTURAS DA RESPONSABILIDADE AMBIENTAL E SOCIAL NA INDÚSTRIA CERÂMICA: ALINHAMENTO LEGAL E SUSTENTABILIDADE

À medida que os desafios ambientais e sociais se tornam mais complexos e interdependentes, a responsabilidade ambiental e social na indústria cerâmica está a assumir uma dimensão estratégica, não apenas em resposta a exigências legais, mas também como parte integrante da competitividade, inovação e resiliência do setor.

Num contexto marcado pelas metas da neutralidade carbónica até 2050, pela crescente pressão e expectativas dos consumidores por produtos sustentáveis e por cadeias de valor éticas e transparentes, o setor cerâmico encontra-se num ponto de viragem, onde a integração sistemática de práticas ambientais e sociais será determinante para o sucesso futuro.

## Tendências Futuras na Responsabilidade Ambiental

A transição “ecológica” irá impor profundas mudanças na forma como os produtos cerâmicos são concebidos, produzidos e distribuídos. As principais tendências incluem:

- **Descarbonização dos processos produtivos** – A substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis como o hidrogénio verde, a biomassa sustentável, o biometano ou a eletrificação direta será essencial para cumprir os compromissos do Pacto Ecológico Europeu e do Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030).
- **Ecoeficiência e economia circular** – A aposta em tecnologias limpas, na reutilização de resíduos cerâmicos e na reciclagem de água será reforçada pela Estratégia Europeia para a Economia Circular, que promove a sustentabilidade em todo o ciclo de vida dos produtos.
- **Digitalização ambiental** – A integração de sensores e sistemas digitais de monitorização ambiental em tempo real permitirá uma gestão mais eficiente dos recursos, em linha com os princípios da Indústria 4.0 verde.
- **Conformidade com requisitos de reporte** – As empresas estarão sujeitas a uma maior exigência de transparência e prestação de contas através da Diretiva sobre de Reporte de Sustentabilidade Corporativa (CSRD), que obriga à divulgação de dados sobre impactos ambientais e sociais, riscos climáticos e cumprimento de metas de descarbonização.

## Evolução da Responsabilidade Social e Aspetos Humanos da Sustentabilidade

A par da transição ecológica, a transição social é também um elemento-chave para o futuro da indústria cerâmica. A responsabilidade social deixará de ser apenas voluntária para passar a estar parcialmente regulada, especialmente nas áreas:

- **Direitos humanos e laborais nas cadeias de abastecimento** – A Diretiva Europeia sobre Diligência Devida em Matéria de Sustentabilidade Empresarial (CSDDD), em discussão a nível da UE, exigirá que as empresas identifiquem, previnam e mitiguem riscos sociais e ambientais em toda a cadeia de valor.
- **Igualdade, diversidade e inclusão** – As empresas serão incentivadas, e em alguns casos obrigadas, a promover políticas de equidade de género, acesso a oportunidades e valorização da diversidade, em linha com o Pilar Europeu dos Direitos Sociais.
- **Valorização do capital humano** – A aposta na qualificação, segurança e bem-estar dos trabalhadores será reforçada por políticas públicas e incentivos à inovação social, promovendo ambientes de trabalho saudáveis e justos.
- **Interação com a comunidade** – As empresas serão chamadas a desempenhar um papel mais ativo nas regiões onde operam, através de programas de envolvimento comunitário, educação ambiental e apoio ao desenvolvimento local.

## Conclusões

O futuro da responsabilidade ambiental, social e mesmo económica na indústria cerâmica será profundamente moldado por um novo paradigma de desenvolvimento sustentável, no qual a conformidade legal, a inovação e o compromisso ético caminharão lado a lado.

O setor será cada vez mais desafiado a demonstrar que é possível conciliar crescimento económico, competitividade internacional e responsabilidade socioambiental. O alinhamento com as normas e diretivas da União Europeia, bem como com as estratégias nacionais, não será apenas um imperativo legal, mas uma via de diferenciação e valorização no mercado global.



## Referências

- Associação Portuguesa da Indústria da Cerâmica – APICER. *Relatórios e estatísticas setoriais*. Disponível em: <https://www.apicer.pt>. [Acedido em: 9 abr. 2025].
- Cerame-Uni UNIE – European Ceramic Industry Association. *Sustainability Report 2022: Environmental performance of the European ceramic industry*. Bruxelas, 2022. Disponível em: <https://cerameunie.eu>. [Acedido em: 3 abr. 2025].
- Portugal. Ministério do Ambiente e da Ação Climática. Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030). Lisboa: MAAC, 2020. Disponível em: <https://apambiente.pt>. [Acedido em: 2 abr. 2025].
- Portugal. Ministério do Ambiente e da Ação Climática. Estratégia Nacional de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica 2050 (EN-LPNC). Lisboa: MAAC, 2019. Disponível em: <https://climaeenergia2020.apambiente.pt>. [Acedido em: 10 mar. 2025].
- Comissão Europeia. Pacto Ecológico Europeu – Comunicação COM (2019)640 final. Bruxelas, 2019. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pt](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt). [Acedido em: 10 mar. 2025].
- Comissão Europeia. Diretiva 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de novembro de 2010. Diretiva sobre as emissões industriais (DEI). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>. [Acedido em: 3 abr. 2025].
- Portugal. Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de agosto. Estabelece o regime de prevenção e controlo integrados da poluição (PCIP). Diário da República, 1.ª série, n.º 167, 30 ago. 2013. Disponível em: <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/127-2013-489471>. [Acedido em: 3 abr. 2025].
- International Organization for Standardization. ISO 14001:2015 – Environmental management systems – Requirements with guidance for use. Genebra: ISO, 2015.
- International Organization for Standardization. ISO 50001:2018 – Energy management systems – Requirements with guidance for use. Genebra: ISO, 2018.
- Comissão Europeia. Diretiva (UE) 2022/2464 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de dezembro de 2022. Diretiva sobre comunicação de informações de sustentabilidade pelas empresas (CSRD). Disponível em: [https://ec.europa.eu/info/publications/proposal-corporate-sustainability-due-diligence-directive\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/proposal-corporate-sustainability-due-diligence-directive_en). [Acedido em: 8 abr. 2025].
- Comissão Europeia. Proposta de Diretiva sobre Diligência devida das empresas em matéria de sustentabilidade (CSDDD). Bruxelas, 2022. Disponível em: [https://ec.europa.eu/info/publications/proposal-corporate-sustainability-due-diligence-directive\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/proposal-corporate-sustainability-due-diligence-directive_en). [Acedido em: 8 abr. 2025].
- Portugal. Presidência do Conselho de Ministros. Estratégia Nacional para a Igualdade e a Não Discriminação – Portugal + Igual. Lisboa: PCM, 2018.
- Comissão Europeia. Pilar Europeu dos Direitos Sociais. Bruxelas: Comissão Europeia, 2017. Disponível em: <https://ec.europa.eu/social/>. [Acedido em: 10 mar. 2025].







# Considerações finais



Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

A descarbonização do setor da cerâmica exige uma revisão profunda dos seus produtos e processos, tornando-os mais eficientes e sustentáveis. Esta transição implica uma maior flexibilidade tecnológica e produtiva, capaz de integrar alternativas energéticas e novos recursos, como matérias-primas secundárias e fornos híbridos.

As tecnologias prioritárias para a descarbonização do setor cerâmico passam por uma combinação de soluções que atuam em diferentes etapas do processo produtivo. A eficiência energética continua a ser uma base fundamental, através da modernização de equipamentos, otimização térmica e recuperação de calor nos fornos. A integração de fontes de energia renovável, como solar fotovoltaico ou combustíveis neutros em carbono, é igualmente essencial, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. A eletrificação dos processos, nomeadamente da secagem e cozedura, representa uma alternativa promissora, especialmente quando alimentada por eletricidade verde. Paralelamente, o desenvolvimento e a utilização de combustíveis alternativos, como o hidrogénio verde ou biometano, oferecem soluções viáveis para processos que exigem elevadas temperaturas. Por fim, tecnologias emergentes de captura e utilização ou armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCUS) poderão desempenhar um papel relevante no futuro, especialmente em unidades com emissões residuais difíceis de eliminar, contribuindo assim para uma trajetória efetiva rumo à neutralidade carbónica.

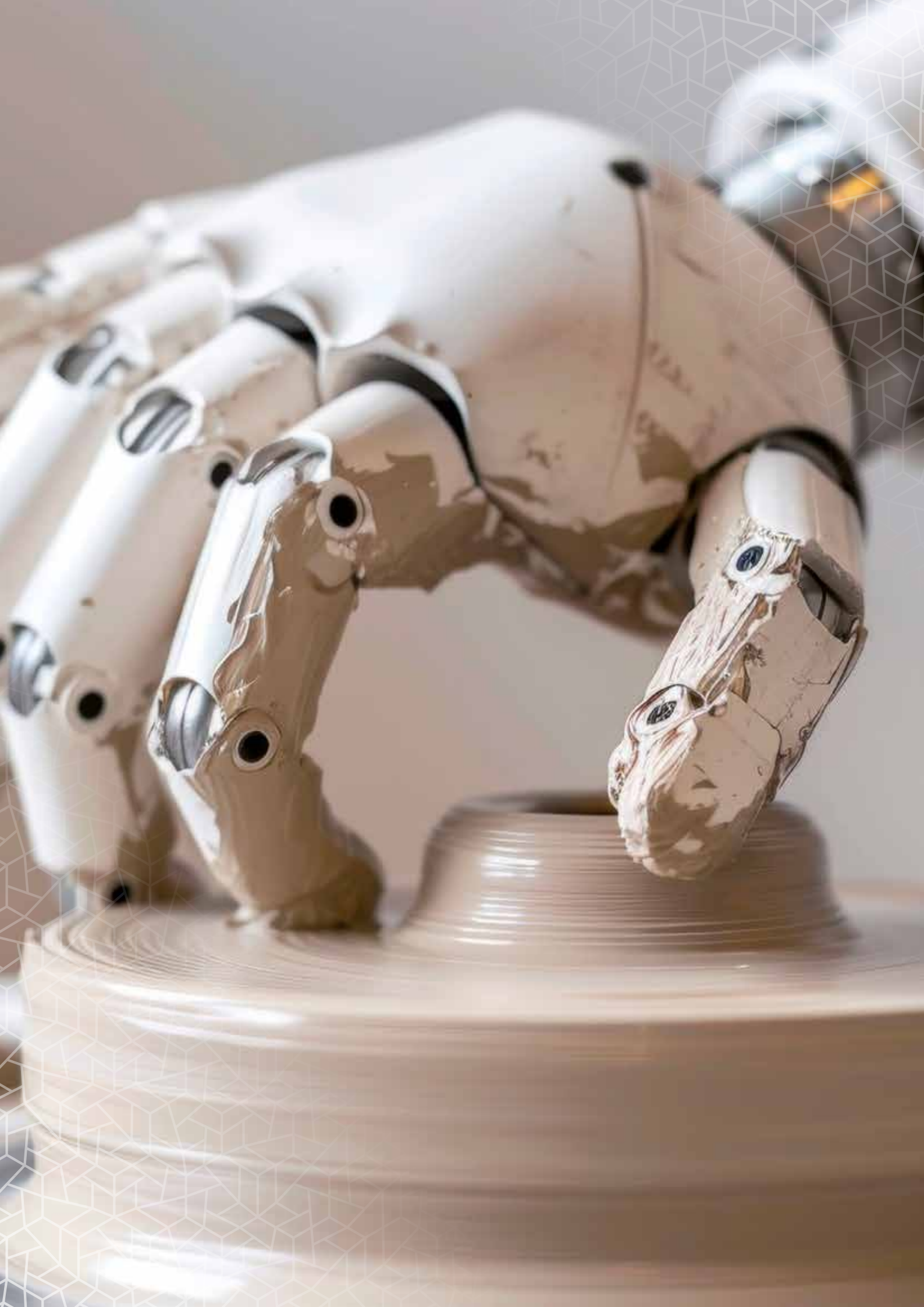
Uma redução significativa das emissões implica em alguns casos a adoção de tecnologias verdadeiramente disruptivas, muitas das quais ainda se encontram em fase de desenvolvimento. Nesse sentido, a implementação de projetos demonstradores assume um papel crucial para testar, validar e escalar soluções inovadoras. A colaboração intersectorial torna-se igualmente essencial para partilhar conhecimento, reduzir riscos e acelerar a inovação.

A modernização dos métodos de produção, como a introdução da microgranulação a húmido, permite ganhos significativos de eficiência energética e hídrica. O uso de matérias-primas secundárias, provenientes da reciclagem ou de resíduos industriais, contribui para uma economia mais circular e sustentável, reduzindo a extração de recursos naturais e o impacte ambiental global da cadeia de valor.

A concretização da descarbonização do setor cerâmico exige um quadro de políticas públicas robusto, com incentivos à modernização tecnológica, financiamento acessível às PME e uma implementação efetiva das estratégias nacionais para o biometano, o hidrogénio e as energias renováveis, assegurando a disponibilização efetiva em Portugal destes combustíveis renováveis em Portugal.

A capacitação de empresários e quadros técnicos é indispensável para liderar esta transição, que deve ser encarada como uma oportunidade para modernizar a indústria, aumentar a eficiência e reforçar a competitividade num mercado cada vez mais orientado para a sustentabilidade.

O caminho para a descarbonização no setor cerâmico não é único nem linear, exigindo abordagens diferenciadas consoante as especificidades de cada empresa, processo produtivo e contexto tecnológico. Reconhecendo essa diversidade, o setor tem vindo a trabalhar de forma colaborativa com os diferentes elementos da cadeia de valor, desde fornecedores de matérias-primas e equipamentos até clientes e distribuidores, bem como com centros tecnológicos e instituições de investigação. Esta cooperação tem sido essencial para testar soluções, partilhar conhecimento e desenvolver tecnologias adaptadas aos desafios da indústria. Mais do que apenas responder às metas climáticas impostas, esta dinâmica está a promover o crescimento do setor numa perspetiva de modernização, qualificação técnica e enriquecimento do know-how, preparando as empresas para um futuro mais sustentável e competitivo.



## Colaborações externas

O **Roteiro para a Neutralidade Carbónica da Indústria Cerâmica até 2050** contou com a participação de especialistas convidados, provenientes de diferentes áreas, instituições e empresas, que contribuíram com o seu conhecimento e experiência na elaboração de conteúdos em diversas áreas de conhecimento.

- **Carlos Zorrinho** (Ex-Eurodeputado – Membro efetivo da Comissão de Indústria, Investigação e Energia)
- **Magdalena Vallebona e Alessia Palleschi** (Cerame-Unie – Confederação Europeia da Indústria Cerâmica)
- **Paulo Gomes e Paulo Palhau** (Daikin Portugal)
- **Márcio Santos, Jorge André, Ricardo Mendes, José Baranda Ribeiro e Eduardo Costa** (Universidade de Coimbra, Portugal e Sciven)
- **Sara Ferrer, María Aguiella, María Jesús Sánchez, Ana Mezquita e Eliseo Monfort** (ITC-AICE e Universidade Jaime I, Espanha)
- **Sara Freitas** (APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis)
- **Maria João Benquerença, Rui Queiroga e Sofia Albuquerque** (CleanWatts)
- **António Vidigal** (Consultor e Especialista em energia e TIC)
- **Bruno Soares Gonçalves** (Instituto Superior Técnico, Portugal)
- **José Campos Rodrigues** (AP2H2 – Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio)
- **Edgar C. Fernandes** (Instituto Superior Técnico, Portugal)
- **Nuno Nascimento** (Floene)
- **ABA – Associação de Bioenergia Avançada**
- **Fernando Loureiro, Daniel Direito, Gonçalo Lourinho, Carolina Gonçalves, Joana Bernardo e Francisco Girio** (BIOREF – Laboratório Colaborativo para as Biorrefinarias, Portugal)
- **Paulo Brito** (Instituto Politécnico de Portalegre, Portugal)
- **Blanca I. Arias-Serrano, Catarina Matos e David Parra** (CIAE – Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético, Espanha)
- **João A. Labrincha** (Universidade de Aveiro, Portugal)
- **Michele Dondi e Chiara Zanelli** (CNR-ISSMC Faenza, Itália)
- **Luís Cadillon Costa** (Universidade de Aveiro, Portugal)
- **Ana Rita Martinho, Frederico Coelho, Marcelo Costa Costa e Hugo Matias** (Associação Net4CO<sub>2</sub> – Network for a Sustainable CO<sub>2</sub> Economy, Portugal)
- **Norma Franco, Hermano Rodrigues, Rui Ferreira, João M. Fernandes, Sofia M. Ferreira, Eduardo Seduvm, Beatriz Costa e Afonso P. Gonçalves** (EY, Portugal)





Ceramic  
Low CO<sub>2</sub>

Roteiro para  
a Neutralidade  
Carbónica da  
Indústria Cerâmica  
até 2050

