

Descarbonização e Transição Climática na Indústria

Jorge Teixeira

Processos Industriais de Baixo Carbono

Principais fontes de emissões industriais

- **Combustão Estacionária:** Queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, fuelóleo) para gerar calor ou vapor.
- **Emissões de Processo:** Reações químicas inerentes à transformação da matéria (ex: descarbonatação do calcário no cimento ou oxidação de carbono na fundição).
- **Emissões Importadas (Eletricidade):** Relativas ao consumo de electricidade na fábrica (Emissões resultantes da produção da energia elétrica disponibilizada na rede).

Tecnologias de Baixo Carbono

A transição para **processos industriais de baixo carbono** em Portugal é hoje impulsionada tanto por metas ambientais (Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050) como pela necessidade de independência energética.

- **Modernização tecnológica:** Digitalização e automação
- **Electrificação de Calor:** Uso de caldeiras eléctricas e Bombas de Calor Industriais (HTHP) .
- **Recuperação de Calor Residual:** pré-aquecimento de fluidos e/ou produção eléctrica - ORC (*Organic Rankine Cycle*)).
- **Sistemas de Gestão de Energia (EMS/BMS):** Instalação de sensores e *softwares* que ajustam o consumo em tempo real (ligados à **ISO 50001**).

Estratégias de Substituição de Combustíveis

O objetivo é substituir o "Carbono Fóssil" (Gás e Gasóleo) por fontes neutras ou renováveis.

- **Eletrificação de processos térmicos:** Inclui de baixa/média temperatura e a transição para vetores limpos nos processos de alta temperatura
- **Biomassa Sólida:** Ideal para vapor. Substitui o Gás Natural com neutralidade biogénica.
- **Biometano:** Substituição direta ("drop-in") no sistema de gás atual sem necessidade de alterar a caldeira, embora com custo de mercado ainda elevado.
- **Hidrogénio Verde (H₂):** Utilizado em processos de alta temperatura (siderurgia, cimento, vidro) onde as bombas de calor não chegam.

Exercício Prático: Cálculo de Emissões

Exercício 3

Exemplo de Cálculo de Emissões

A auditoria e Diagnóstico de uma fábrica revelou que consome 100.000 m³ de Gás Natural por ano na produção de vapor e 5000 litros de gasóleo, dos quais 85% em transportes. Pretende-se proceder a uma transformação generalizada eliminando 100% dos combustíveis fósseis. Com base nos consumos, quantificar as emissões de CO₂e de base e a redução futura, após a acção proposta. Admitam que uma renovação da frota poupa 30% do combustível.

Valores de Referência:

Para converter o volume em energia e depois em emissões, utilizamos os factores de conversão oficiais (ex: valores da APA ou DGEG):

Gás Natural:

- Poder Calorífico Superior (PCS): ~11,9 kWh/m³
- Factor de Emissão: ~0,202 kgCO₂e/kWh

Gasóleo:

- Poder Calorífico Superior (PCS): ~10.74 kWh/L
- Factor de Emissão: ~0,267 kgCO₂e/kWh

Factor de Emissão (Rede Eléctrica PT): ~0,150 kg CO₂e/kWh

Exemplo de Cálculo de Emissões

A. O Cenário

- **Baseline (Fóssil):**

- Caldeira de Gás Natural (100.000 m³/ano) + Gasóleo (5.000 L/ano).

- **Projecto (Baixo Carbono):**

- Instalação de uma **Caldeira de Biomassa** (estilha) para o vapor e **Electrificação total** dos equipamentos anteriormente a gasóleo.

Gás Natural:

Energia equivalente: $100.000\text{m}^3 \times 11,9 = 1.190.000 \text{ kWh/ano}$

Emissões: $1.190.000 \text{ kWh} \times 0,202 \text{ kg CO}_2\text{e} = 240.380 \text{ kg CO}_2\text{e}$ **(240 toneladas/ano)**

Gasóleo:

Consumo equivalente de energia: $5.000 \text{ L} \times 10,74 \text{ kWh/L} = 53.700 \text{ kWh/ano}$

Emissões: $53.700 \text{ kWh} \times 0,267 \text{ kg CO}_2\text{e} = 14338 \text{ kg CO}_2\text{e}$ **(14.34 toneladas/ano)**

Exemplo de Cálculo de Emissões

B. Cálculo da Redução Futura

Fonte de Emissão	Emissões <i>Baseline</i> (tCO ₂ e)/ano	Emissões Projecto (tCO ₂ e)/ano	Redução Líquida (tCO ₂ e)/ano
Combustão (Vapor)	240 (Gás natural)	0 (biomassa)	-240
Motores (Processo)	2,15	1,21	-0,94
Logística (Camiões)	12,19	6,85	-5,34
TOTAL	254.34	8,06	-246,28

Exemplo de Cálculo de Emissões

C. Monitorização

- Para que este projecto seja certificado, a fábrica deve implementar:

Controlo de Consumo: Medidores de energia térmica (à saída da caldeira).

Verificação de Origem: Certificados de sustentabilidade da biomassa (garantindo que não provém de desflorestação).

Factor de Emissão da Rede: Actualização anual do factor de emissão da electricidade em Portugal (publicado pela APA/DGEG), uma vez que a electrificação dos motores depende deste valor para o cálculo das emissões indirectas.

Exemplo de Cálculo de Emissões

D. Conclusão do caso

Ao implementar este projecto, a fábrica reduz a sua pegada de carbono em **97%**. Sob a **ISO 14064-2**, estas 246 toneladas evitadas anualmente podem ser transformadas em activos de sustentabilidade para relatórios ESG ou mesmo comercializadas em mercados voluntários de carbono.

Optimização de Matérias Primas

1. Eficiência Material e Substituição de Matérias-Primas

- **Substituição por subprodutos ou materiais reciclados:** Utilizar resíduos de outras indústrias (ou reciclagem interna) reduz drasticamente a pegada de carbono.
- **Eco concepção de produtos:**
Redesenhar o produto final para que ele utilize menos material sem perder as suas propriedades mecânicas ou estruturais, reduzindo indirectamente a energia necessária para a sua extracção e transporte.

Optimização de Processos

2. Recuperação de Calor Residual

- **Sistemas de Cogeração e Trigeração:**

- Utilizar o calor que sobra da geração de eletricidade para produzir vapor industrial ou água quente para o processo.

- **Permutadores de Calor:**

- Implementar redes de permutadores de calor (como a análise [*Pinch*](#)) para pré-aquecer fluidos ou ar de combustão que entram no sistema, utilizando as correntes quentes que estão a sair. Isto reduz diretamente a necessidade de queimar novo combustível para atingir a temperatura de trabalho

- **Bombas de calor industriais:**

- Elevar o potencial térmico de calores residuais de baixa temperatura para que possam ser reutilizados em etapas de lavagem, secagem ou esterilização.

Exercício Prático: Recuperação Energética

Rotomoldagem

Exercício 4

Exemplo: Rotomoldagem

Numa fábrica de Rotomoldagem o equipamento de base são fornos de alta potência térmica que funcionam a Gás natural (GN) com uma temperatura tipicamente de 260 °C. Os queimadores introduzem no forno os gases de combustão, que devem ser extraídos para evitar a contaminação da fábrica com gases poluentes. Dados do caso:

Propriedade	Valor
Potência do Queimador	1260 KW
Densidade do ar a 260°C	0,662 kg/m ³
Densidade do GN (nas condições de adução)	0,8019 kg/m ³
PCS do GN	11,5 kWh/ m ³
Relação Ar/GN	12:1
Calor Específico do ar a 260°C	1,035 kJ/kg.°K

Se o calor extraído pelo sistema de extracção for aproveitado para aquecer o ar de combustão a fornecer ao queimador, haverá uma poupança de GN na manutenção da temperatura do forno. Considere que o permutador de calor permite a recuperação de 80% do calor. Determinar o potencial de poupança que esta medida poderia proporcionar.



Análise do Impacto

No perfil de utilização verificou-se que a carga média do forno é tipicamente de 75% da potência máxima. Também se verifica que o ciclo de trabalho é de 1890 horas anuais.
O custo médio¹ do GN, sendo muito variável, situa-se no intervalo **50-80** €/m³

Tendo em conta os cálculos: 

$$\text{Consumo Anual GN} = 1890 \times 0.75 \times 110 \approx 155\,925 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Potencial de Poupança Anual} = 0.8 \times 0.053 \times 155\,925 \approx 6\,611 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Valor da Poupança} = \textit{entre 330 k€ e 530 k€}$$

O que mostra um resultado significativo eventualmente motivador para adopção desta medida

(1) O preço do gás é muito volátil e que os valores devem ser confirmados no fornecedor da empresa-caso à data da utilização

Sistemas de Gestão Energética

3. Digitalização e Controlo Avançado de Processo (Indústria 4.0)

- **Sensores de Alta Precisão e Monitorização Contínua:**
 - Medir variáveis críticas (temperatura, pressão, caudal, composição de gases) em pontos estratégicos da linha de produção para identificar desvios quase instantaneamente.
- **Algoritmos de Controlo Avançado (APC) e Gémeos Digitais:**
 - Criar modelos matemáticos e digitais da fábrica que simulam o comportamento real do processo. Estes sistemas conseguem prever anomalias e ajustar automaticamente os parâmetros operacionais (como a taxa de oxigénio na combustão ou a velocidade de uma esteira) para garantir que as máquinas operam sempre no seu ponto de **máxima eficiência e menor consumo específico de energia**.
- **Manutenção Preditiva:**
 - Evitar paragens não planeadas e desgaste de componentes que fazem com que os equipamentos operem de forma ineficiente ou consumam energia em vazio.

Avaliação Técnico-Económica

4. Benefício Directo na Avaliação Técnico-Económica

- Do ponto de vista de custo-benefício, as medidas de otimização de processos costumam ser as mais atrativas para as empresas.
- Como muitas destas soluções dependem de melhorias de *software* (automação), pequenos ajustes de operação ou investimentos com tempos de retorno (*payback*) relativamente curtos (como isolamentos térmicos e permutadores), elas geram poupanças financeiras imediatas na fatura energética, libertando capital para investimentos mais pesados a longo prazo (como a transição para o hidrogénio ou eletrificação total)

Hidrogénio e Novos Vetores Energéticos

Fundamentos, Regulação e Cadeia de Valor

- **Tipologias de hidrogénio e enquadramento regulatório:**

- O hidrogénio não é uma fonte de energia primária, mas sim um vetor. A sua pegada ambiental depende de como é produzido:
 - **Cinzeno** se produzido a partir de gás natural;
 - **Azul** produzido com captura de carbono;
 - **Verde** produzido através de eletrólise com energias renováveis.

- **Cadeia de valor do hidrogénio:**

- Abrange todo o ciclo de vida do vetor: desde a **produção** (eletrólise, reforma), passando pelo **transporte e distribuição** (pipelines, camiões-cisterna), até ao **armazenamento e utilização final**. Cada etapa adiciona custos e perdas energéticas que afetam a eficiência global do processo.

Aplicação e Integração Industrial

- **Aplicações industriais do hidrogénio:**
 - ***Calor:***
 - Substituição do gás natural em queima directa para altas temperaturas (ex: indústrias vidreira, cerâmica e cimenteira).
 - **Processos:**
 - Utilização como matéria-prima (gás de síntese) na refinação, produção de amoníaco/fertilizantes e na rota do aço verde (redução directa do ferro).
 - ***Mobilidade:***
 - Foco no transporte pesado (frotas logísticas, camiões, barcos) onde as baterias eléctricas falham pela limitação de peso e autonomia.

Integração com processos existentes

- **Mudar para o hidrogénio:** A mudança de combustíveis para hidrogénio é um processo com desafios significativos
- **Exige Avaliar:**
 - Compatibilidade com os queimadores actuais
 - Misturas progressivas com gás natural (*blending*)
 - Impacto térmico e químico que a chama de hidrogénio (que é mais quente e seca) tem nos materiais e nos produtos de forno

Infraestruturas, Segurança e Viabilidade

- **Infraestruturas, segurança e armazenamento:**
 - O hidrogénio é a menor molécula do universo. Isto levanta desafios únicos de **segurança** devido à fragilização por hidrogénio (capacidade de fissurar certos aços) e à sua elevada inflamabilidade. O **armazenamento** exige alta compressão (350 a 700 bar) ou liquefação (a -253°C), o que requer infraestruturas altamente especializadas.
- **Custos, maturidade tecnológica e perspetivas:**
 - Atualmente, a maturidade tecnológica (TRL - *Technology Readiness Level*) dos eletrolisadores está a avançar rapidamente, mas o custo do hidrogénio verde (*OpEx*) ainda é significativamente superior ao do gás natural. As perspetivas apontam para uma paridade de custos à medida que a escala de produção aumenta e o custo da eletricidade renovável diminui.

Estratégia e Tomada de Decisão

- **Limitações e oportunidades reais:**

- **Limitações:**

- Destaca-se a baixa eficiência energética global (perde-se muita energia na electrólise e na compressão).

- **Oportunidades:**

- Assentam na independência energética, na eliminação total de emissões locais e na criação de novos mercados de exportação energética.

- **Critérios de decisão para adopção:**

- A pegada de carbono actual e o custo das licenças de emissão de CO₂ (*ETS*)
 - A proximidade a infra-estruturas de abastecimento ou capacidade de auto-produção
 - O custo nivelado do hidrogénio (LCOH) face às alternativas fósseis.
 - Incentivos financeiros disponíveis para mitigar o investimento inicial (*CapEx*)

Caso Prático

Descarbonização de uma Fábrica de Cerâmica

Exercício 5

Avaliação da viabilidade do hidrogénio

- **Diagnóstico e Mapeamento de Emissões (Situação Atual)**
 - **O processo:** A fábrica opera um Forno Túnel Contínuo que queima gás natural para atingir temperaturas de 950 °C a 1050 °C, e vários Secadores que utilizam calor residual do forno misturado com queima directa de gás para secar a argila húmida antes da cozedura.
 - **Consumo Energético Anual:** 50.000 MWh de gás natural.
 - **Emissões Industriais:** Cerca de 10.200 t de CO₂ por ano (emissões de combustão)
 - **Factor Crítico:** O custo das licenças de emissão de CO₂ (ETS) está a penalizar severamente a margem financeira da empresa.

Avaliação da viabilidade do hidrogénio

- **Fase I: Otimização de Processos (A Base Necessária)**

Antes de injetar hidrogénio, a fábrica aplica medidas de eficiência material e térmica para reduzir a procura de energia:

- **Recuperação de Calor Residual (*Waste Heat Recovery*):** Instalação de uma rede de permutadores de calor na chaminé do forno túnel. O ar quente recuperado é canalizado diretamente para os secadores, eliminando totalmente a queima direta de gás natural nesta etapa.
- **Digitalização e Controlo Avançado (Indústria 4.0):** Implementação de sensores de oxigénio e temperatura ao longo das zonas do forno, geridos por um sistema de controlo avançado (APC) que otimiza a curva de cozedura em tempo real.
- **Resultado da Otimização:** O consumo de gás natural cai de 50.000 MWh para 38.000 MWh/ano (uma redução de 24% na necessidade de combustível e nas emissões, sem alterar a fonte energética).

Avaliação da viabilidade do hidrogénio

- **Fase II: Avaliação da Rota do Hidrogénio**

Com a fábrica otimizada, avalia-se a introdução de hidrogénio verde para substituir os 38.000 MWh restantes no forno.

- **Abordagem de Integração (Tecnologia e Processo)**

- **Estratégia Progressiva (*Blending*):** Como os queimadores actuais não suportam 100% de hidrogénio devido à velocidade da chama e ao risco de retrocesso , opta-se por uma fase inicial de mistura de 20% de hidrogénio em volume no fluxo de gás natural..
- **Adaptação de Infra-estrutura:** Instalação de uma estação de regulação e medição (GRMS) dedicada ao hidrogénio e tubagens de aço inoxidável adequadas para evitar a fragilização do metal.

- **Logística e Abastecimento (Cadeia de Valor)**

- **Opção Escolhida:** Produção local (*On-site*) através de um **Electrolisador PEM**.
- **Integração Material Simbiótica:** O oxigénio puro gerado como subproduto da electrólise é injectado no forno para realizar **oxicombustão**, aumentando ainda mais a eficiência térmica do forno e reduzindo o volume total de gás necessário

Avaliação da viabilidade do hidrogénio

- **Avaliação Técnico-Económica (Custo-Benefício)**

Para validar o investimento, a administração analisa os seguintes indicadores económico-financeiros:

Indicador Analisado	Impacto no Projecto
CapEx (Investimento Inicial)	Elevado. Inclui o electrolisador, sistema de compressão a 30 bar, armazenamento local e alteração parcial de queimadores.
OpEx (Custo Operacional)	Dependente do preço da electricidade renovável contratada (PPA) para alimentar o electrolisador. O custo por MWh do hidrogénio ainda é 2.5 vezes superior ao do gás natural.
Custos Evitados	Redução imediata na compra de licenças de emissão de CO ₂ e eliminação de potenciais coimas regulatórias.
Apoios e Subsídios	Factor crítico de sucesso: o projecto concorre a fundos europeus/nacionais de descarbonização industrial para cobrir 60 % do CapEx.

Avaliação da viabilidade do hidrogénio

- **CrITÉrios de Decisão e Conclusão:**

- O projecto de transição imediata para 100% hidrogénio é classificado como tecnicamente viável, mas economicamente inviável a curto prazo sem subsídios a fundo perdido devido ao elevado preço do OpEx energético
- A empresa aprova o seguinte **plano faseado**:
 - Avançar de imediato com a **Fase I (Optimização e Recuperação de Calor)**, que tem um *payback* de apenas 2 anos e reduz logo as emissões.
 - Preparar a infra-estrutura para o nível de *Ready for H₂* (queimadores duplos/mistos).
 - Contratar o fornecimento de hidrogénio via mistura na rede pública (*blending*) assim que a infra-estrutura local de distribuição de gás natural o permita, mitigando a necessidade de investimento num electrolisador próprio numa primeira fase.

Com a fábrica otimizada, avalia-se a introdução de hidrogénio verde para substituir os 38.000 MWh restantes no forno.

Avaliação da viabilidade do hidrogénio: Custos

- **CapEx (Investimento inicial)**

- **Eletrolisador Alcalino (Tecnologia mais madura):** 800.000 € a 1.200.000 € por MW.
- **Eletrolisador PEM¹ (Proporciona melhor resposta a energias renováveis variáveis):** 1.200.000 € a 1.700.000 € por MW.

Exemplo de Escala: Para a nossa fábrica de cerâmica substituir uma fracção significativa do seu consumo, um eletrolisador de **5 MW** exigiria um *CapEx* apenas para o equipamento de cerca de **5 M€ a 7,5 M€**

(1) – PEM Proton Exchange Membrane

Avaliação da viabilidade do hidrogénio: Custos

- **Infra-estrutura Complementar**
 - **Compressores** (para levar o H_2 de 1-30 bar até 200-350 bar): 200.000 € a 500.000 €, dependendo do caudal.
 - **Sistemas de Armazenamento local** (Garrafas de alta pressão): 500€ a 900€ por kg de hidrogénio armazenado.
 - **Adaptação de Queimadores Industriais:** Modificar um forno existente para aceitar *blending* (misturas até 20%) custa de dezenas a poucas centenas de milhares de euros. Contudo, mudar para queimadores 100 % H_2 de alta temperatura pode exigir 100.000 € a 300.000 € por queimador.

Avaliação da viabilidade do hidrogénio: Custos

• OPEX (Custos Operacionais)

O *OpEx* do hidrogénio verde é dominado quase inteiramente por um único factor: **o custo da electricidade renovável** (que representa cerca de 70 % a 80 % do custo de produção do gás).

Custo de Produção por Kg (LCOH - Custo Nivelado do Hidrogénio)

- Com electricidade de rede/mercado (Preço elevado): O custo do hidrogénio pode disparar para 8 €/kg a 12 €/kg.
- com contractos de longo prazo (PPA) dedicados (Eólica/Solar a ~40 €/MWh): O custo de produção situa-se actualmente entre 4.5 €/kg a 6.5 €/kg
- Manutenção anual: Estima-se em 2 % a 4% do valor do *CapEx* por ano (substituição de membranas do electrolisador a cada 7-9 anos).

$$LCOH = \frac{\text{CapEx Total} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{OpEx}_t + \text{Custos de Energia}_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Volume de } H_2 \text{ produzido}_t}{(1+r)^t}}$$

Avaliação da viabilidade do hidrogénio: Custos

• A Comparação de Viabilidade

Para a tomada de decisão industrial, a administração converte estes valores para a mesma unidade do gás natural (MWh térmico) para perceber a diferença de custos na factura energética:

- 1 kg de hidrogénio liberta 33.3 kWh de energia útil. Se o hidrogénio verde custar 5 €/kg, o preço equivalente da energia é de 150 €/MWh.
- O gás natural de mercado oscila entre 50 €/MWh e 80 €/MWh (dependendo da volatilidade geopolítica). A Taxa de carbono adiciona cerca de 14 € a 18 € por MWh ao seu custo.
- As licenças de emissão de CO₂ (CELE/ETS), rondam os 70 € a 90 € por tonelada de CO₂.

Conclusão Económica: Mesmo somando o custo do gás natural (65 €) com a penalização do CO₂ de 16 €, o custo real do fóssil fica em aprox. 81 €/MWh. Comparado com os **150 €/MWh** do hidrogénio verde, existe um défice operacional grande.

Avaliação da viabilidade do hidrogénio: Custos

- O que viabiliza o projeto hoje?
 - Devido à diferença de OpEx e do forte CapEx os factores críticos de sucesso assentam em:
 - **Subsídios de CapEx:** Programas públicos (como fundos de inovação ou PRR) que cobrem 50 % a 70 % do investimento inicial.
 - **Mecanismos de apoio ao OpEx:** Onde o Estado subsidia temporariamente a diferença de preço entre o hidrogénio e o gás natural para incentivar os pioneiros da indústria.

Descarbonização e Transição Climática na Indústria