

## Hidrogénio e armazenamento de energia

Ricardo Barbosa



# ÍNDICE

1. Contexto
2. Tecnologias de Armazenamento de Energia Elétrica
3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia
4. Estudo H2SE
  - i. Casos de estudo selecionados
  - ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada
  - iii. Resultados do cenário ongrid
  - iv. Resultados do cenário offgrid
  - v. Conclusões



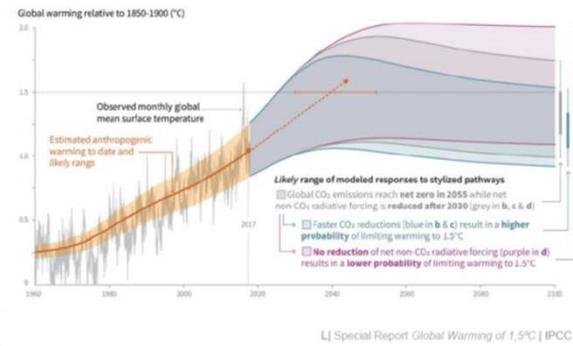
Since 1986

# 1. Contexto

Relatório Especial do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas *Global Warming of 1,5°C*

## Limite de 1,5°C em relação ao período pré-industrial pode travar terríveis consequências do aquecimento global

- Limite de 1,5°C ainda é possível, mas requer mudanças sem precedentes e ação climática urgente
- Aquecimento global está neste momento 1°C acima dos níveis pré-industriais, e já afeta todos os países e regiões do mundo, tornando os eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes e severos
- Aquecimento global pode atingir 1,5°C até 2052
- Diferença entre o aumento de 1,5°C ou de 2°C é significativa
- Subida acima dos 2°C terá consequências ainda mais devastadoras e impactos irreversíveis para a sociedade, meio ambiente e economia
- O IPCC mostra que os prejuízos futuros dependerão da rápida redução das emissões de GEE e, portanto, do nível de aquecimento global que poderemos evitar – descarbonização tem um papel fundamental

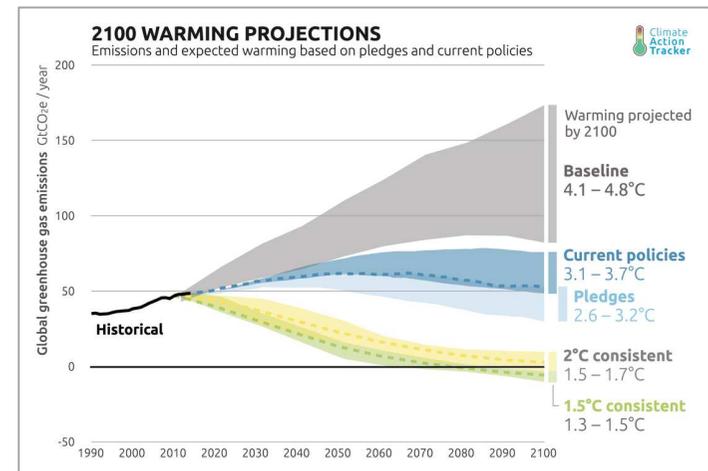


Fonte: Roteiro para a neutralidade carbónica / RNC 2050

Fonte: IPCC

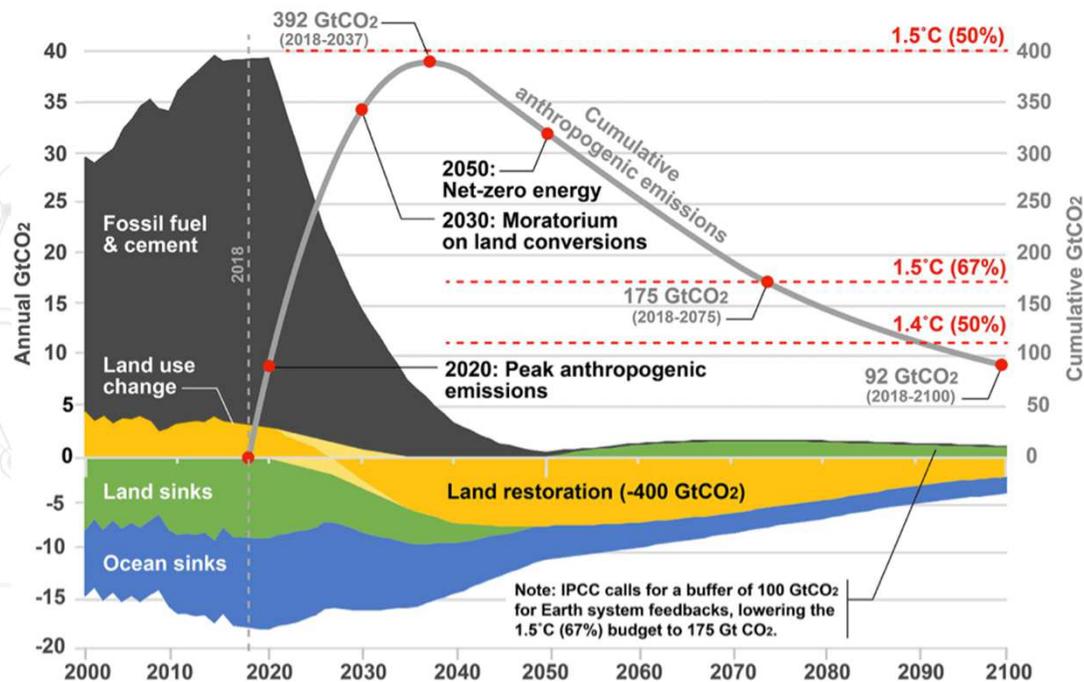


© INEGI todos os direitos reservados



## 1. Contexto

One Earth Climate Model: LDF1.5C Scenario



Fonte: IPCC

Há vários números alarmantes neste gráfico:

- Se o pico das emissões GEE fosse no próximo ano (2020), só teríamos 50% de probabilidades de limitar o aquecimento a 1.5 °C.
- A queda vertiginosa das emissões derivadas das fontes de energia fósseis a partir de 2020 será muito difícil de implementar.
- Muitos dos cenários propostos implicam recorrer a recuperação de solos já a partir da década de 2020, quando em muitas partes do mundo se assiste a uma destruição sem paralelo das florestas.

# 1. Contexto



## Descarbonização

**Siza Vieira diz que descarbonização é desafio que significará esforço de adaptação para empresas**

O ministro adjunto e da Economia, Siza Vieira, afirmou hoje que a "descarbonização é um desafio" que significará para as empresas "um esforço de adaptação".

5 Jun 2019 20:25

Atualidade / Lusa

Atualidade

0 comentários

ançã linha de crédito de 100 milhões para ajudar empresas a descarbonizar

https://rr.sapo.pt/noticia/153894/lançada-linha-de-credito-de-100-milhoes-para-ajudar-empresas-a-descarbonizar

**Lançada linha de crédito de milhões para ajudar empresas a descarbonizar**

06 Jun, 2019 - 02:58 - Ana Carrilho

"Estamos no limite e se querem que a vossa empresa no futuro, têm que agir agora. Queremos apoiar aquelas empresas que não querem pôr a cabeça na areia", afirmou o ministro do Ambiente.

**Metas de um roteiro para descarbonizar a economia**

Para descarbonizar a economia portuguesa até 2050, as palavras mais fortes do plano do Governo são: electrificar muito e com fontes renováveis, baixar até metade a produção de bovinos e conseguir que a floresta arda apenas metade do que costuma arder.

Lurdes Ferreira - 5 de Dezembro de 2018, 16:58

**EM DESTAQUE**

Isolados e sem comunicações, adiva anno denovo aise inrudine

# 1. Contexto



## Plano de ação Português

SEGURANÇA DO ABASTECIMENTO  
MERCADO INTERNO  
INVESTIGAÇÃO, INOVAÇÃO  
E COMPETITIVIDADE



DESCARBONIZAÇÃO  
ENERGIAS RENOVÁVEIS  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

**RNC 2050**  
ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE  
CARBÓNICA 2050

GRANDES PROJETOS ESTRUTURANTES



© INEGI todos os direitos reservados



# 1. Contexto



Plano de ação Português



RNC – 2050  
ROTEIRO PARA A  
NEUTRALIDADE CARBÓNICA

4.12.2018

caminho de futuro



[www.descarbonizar2050.pt](http://www.descarbonizar2050.pt)



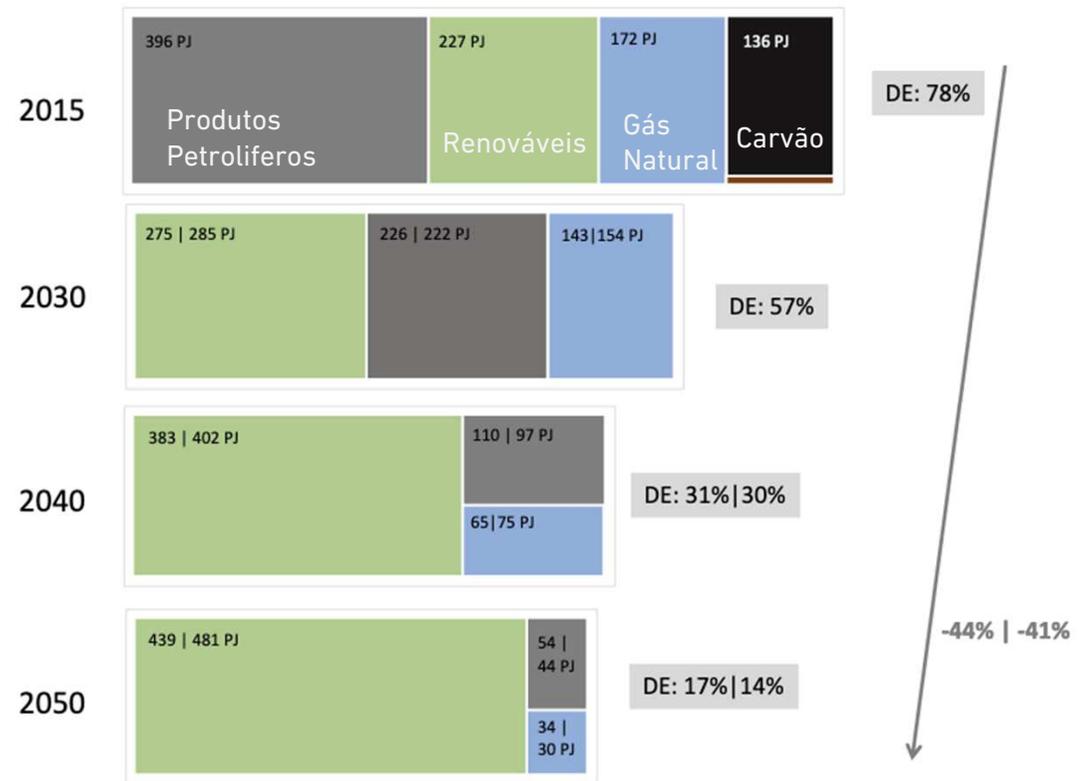
© INEGI todos os direitos reservados



# 1. Contexto



- Diminuição acentuada do uso de energia primária
- Consumo de GN diminui mais de 80% entre 2015 e 2050 (10% 2030, 56% em 2040)
- Energia primária de fontes renováveis duplica



Fonte: [https://descarbonizar2050.pt/uploads/RNC2050\\_Sessao\\_publica\\_4dez2018.pdf](https://descarbonizar2050.pt/uploads/RNC2050_Sessao_publica_4dez2018.pdf)

## 1. Contexto

- **Descarbonizar e eletrificar!**
- Sistema Electroprodutor baseado em Energias Renováveis;
- Desafios para gestão de rede e armazenamento de energia.

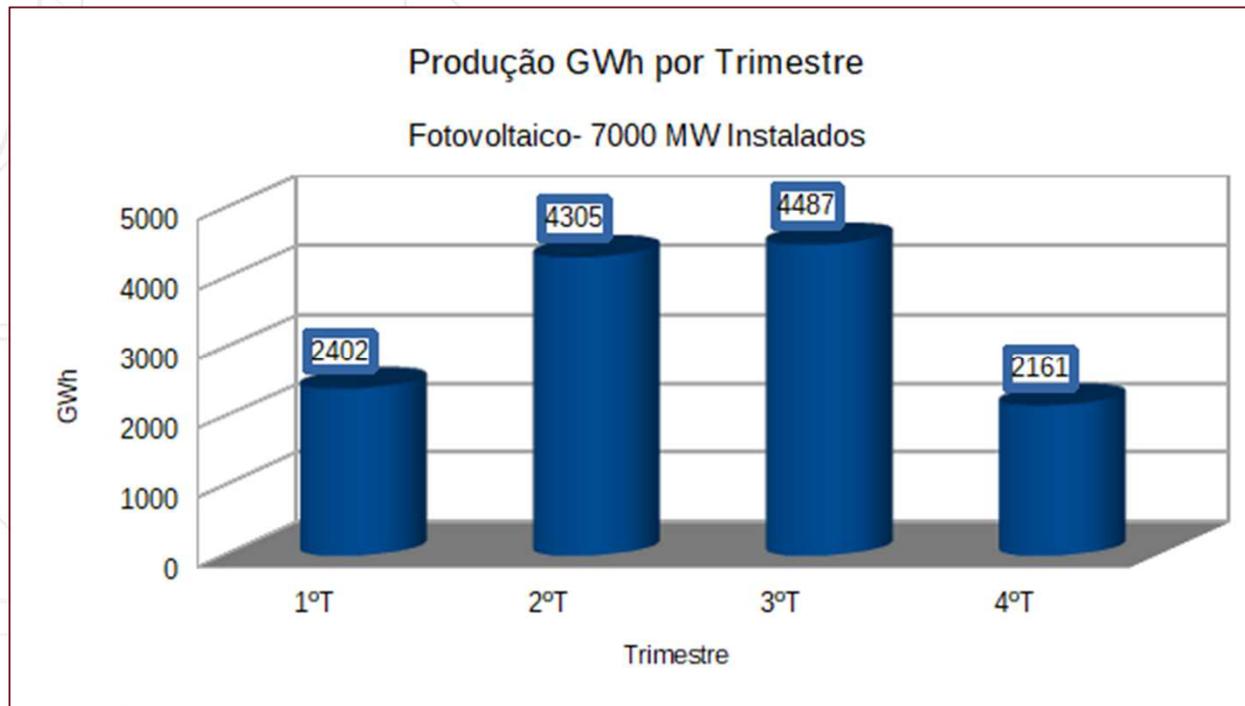
7 GW  
Solar PV

Descarbonização

Eletrificação

Desafios de  
Gestão da rede  
elétrica

## 1. Contexto



7 GW  
Solar PV

Armazenamento  
Sazonal de energia

Fonte: AP2H2

## 1. Contexto

# RETRATO 2050

## REDES E ARMAZENAMENTO

- O sistema eletroprodutor maioritariamente renovável é suportado por investimento na gestão das redes e no equilíbrio do consumo e da produção.
- Ao nível da produção/consumo independente, é assumida a dificuldade da gestão da intermitência das fontes renováveis variáveis (solar e eólica) com medidas que evitem que os consumidores se desliguem da rede; as comunidades energéticas vão sendo conectadas sequencialmente com a rede maior, no entanto, tem sido dada atenção às "ilhas energéticas" e às perdas de eficiência associadas a preços mais elevados; sendo que a produção descentralizada não implica estar *off-grid*.
- O armazenamento de energia elétrica não é um fator crítico, devido à existência de baterias, tecnologias como CSP e a bombagem hídrica. Os veículos elétricos assumem um papel moderado no armazenamento.
- O hidrogénio assume um papel importante como vetor energético de armazenamento, na gestão do excesso de produção da rede.
- O solar fotovoltaico descentralizado é responsável por minimizar as perdas na distribuição.
- A exportação de eletricidade revela-se importante para aumentar a rentabilidade da potência instalada.



186

CADERNOS2050

RNC2050

Fonte: [www.descarbonizar.pt](http://www.descarbonizar.pt)

# 1. Contexto



**d** ÚLTIMAS HOJE MAIS VISTAS SECÇÕES

EDP investe 500 milhões em redes inteligentes

## EDP investe 500 milhões em redes inteligentes

EDP. (REUTERS/Eloy Alonso)

**d** **Sobre o impacto que o investimento terá na fatura da luz, EDP garante que os consumidores não vão pagar mais.**

Dinheiro Vivo  
02.12.2019 07:44

A EDP vai investir 500 milhões de euros na rede de distribuição elétrica. O objetivo é “responder aos desafios da transição energética”, contou João Marques da Cruz, administrador executivo da EDP, responsável por esta área ao [Jornal de Negócios](#).

**A seguir**

Elétricas europeias lideradas pela EDP pedem menos 55% de emissões até 2030

**Mais Vistas**

**CAÇADO**  
Sapatos velhos e pneus ganham nova vida na Bolflex

Co-financiado por:  
**COMPETE 2020** **PORTUGAL 2020** **UNIÃO EUROPEIA**  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

© INEGI todos os direitos reservados



## 2. Tecnologias de Armazenamento de Energia Elétrica

- Para alcançar as metas de redução de emissões de GEE mencionadas, quase toda a produção e consumo de energia na UE terão que se originar de FER → **novos desafios para o sistema de energia.**
- A eletricidade produzida a partir de FER é intermitente;
- Esse desequilíbrio entre oferta e procura será mais crítico à medida que mais e mais energias renováveis forem integradas ao sistema energético;
- **É urgente desenvolver soluções** para colmatar esse desfasamento.



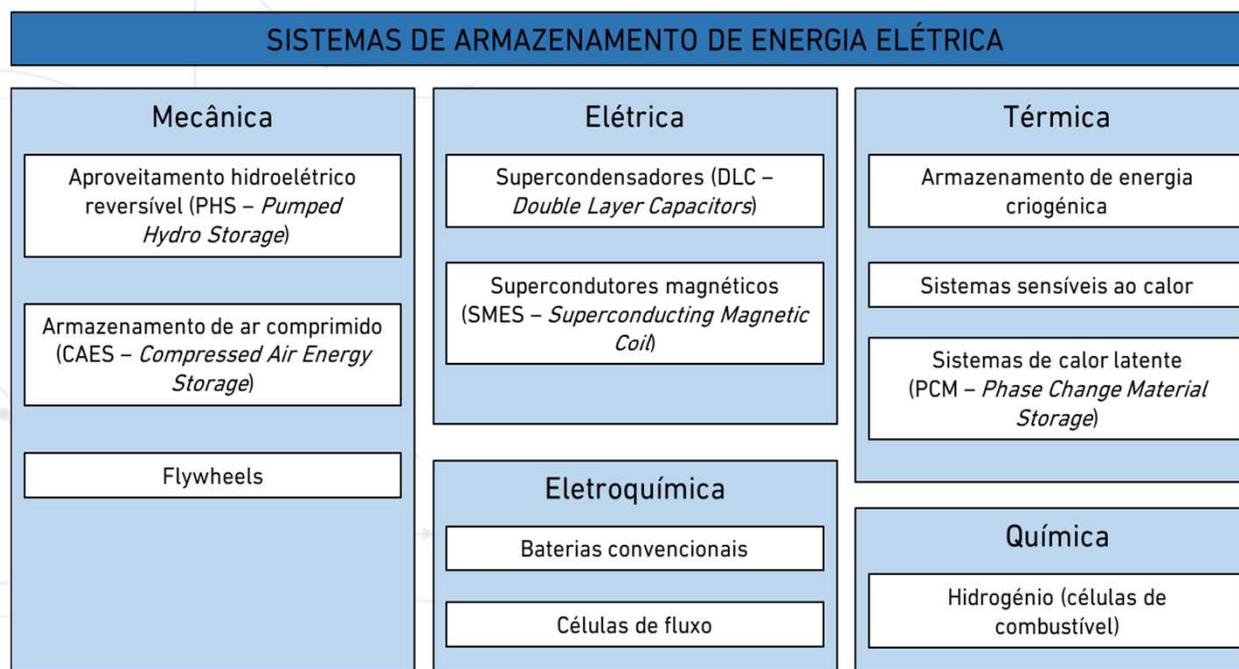
Cofinanciado por:



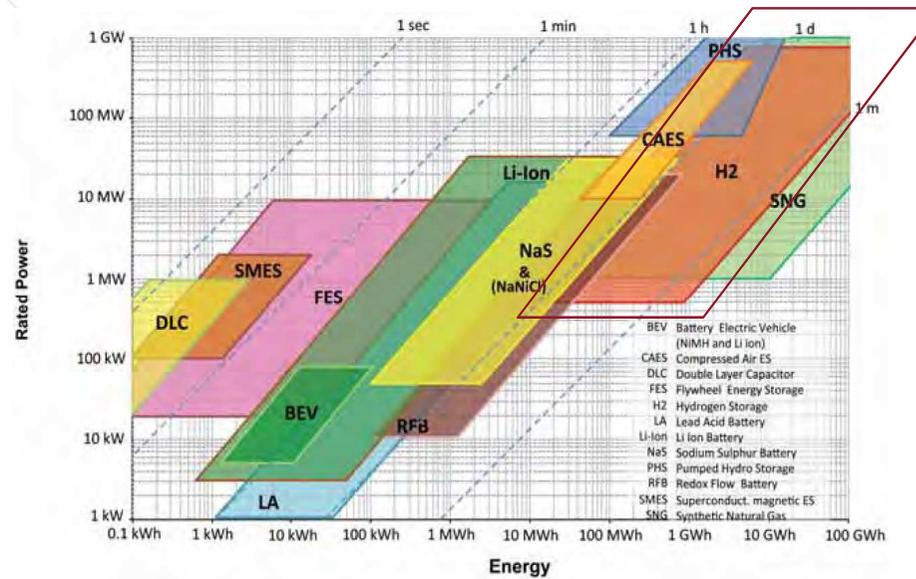
© INEGI todos os direitos reservados



## 2. Tecnologias de Armazenamento de Energia Elétrica



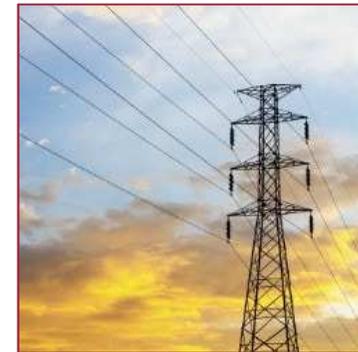
## 2. Tecnologias de Armazenamento de Energia Elétrica



Posicionamento das tecnologias de armazenamento em função da sua energia e potência

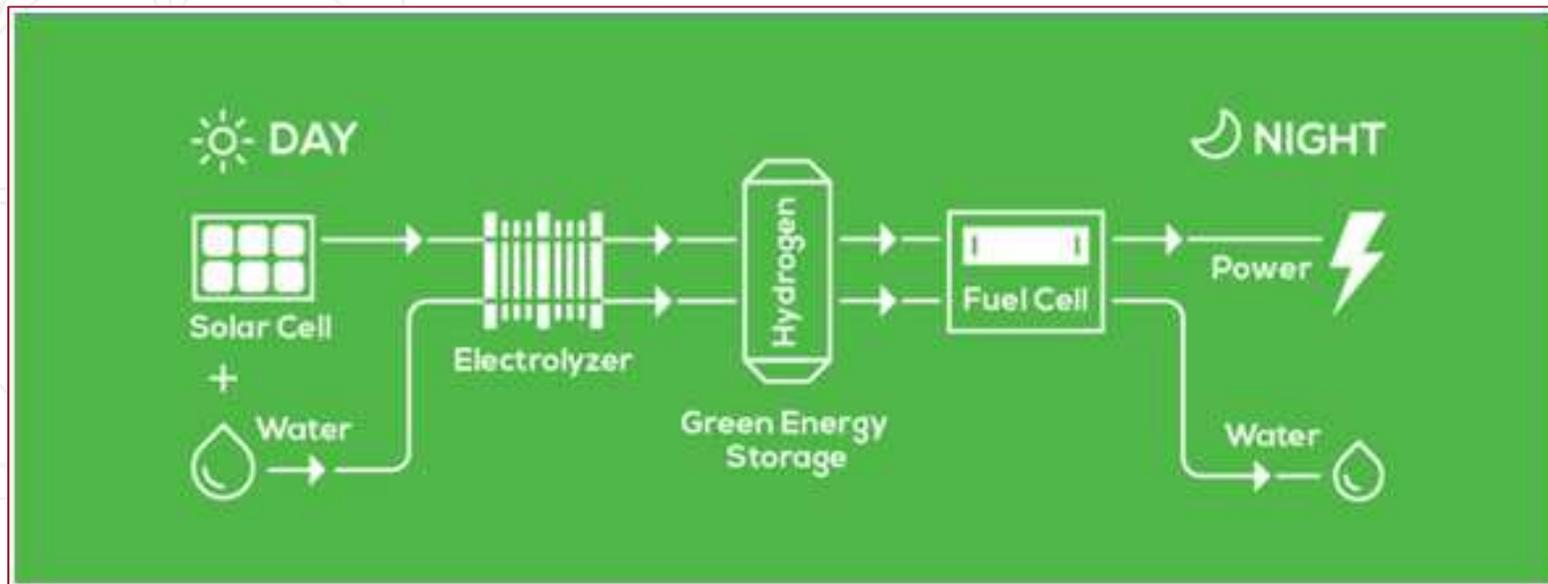
### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

- Num sistema energético sustentável, otimizado e eficiente, a capacidade de armazenar energia é tão importante como a capacidade de gerar energia;
- As tecnologias que permitem a produção e **armazenamento de hidrogénio** para posterior geração de eletricidade (ou outros fins) constituem uma alternativa ao armazenamento de energia como baterias, bombagem em centrais hidroelétricas ou armazenamento em ar comprimido;
- O **hidrogénio** tem a vantagem de permitir o armazenamento de grande quantidade de energia durante longos períodos de tempo permitindo mitigar a variabilidade entre estações do ano de fontes como a energia solar, eólica ou até das ondas.



### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

O **Hidrogénio** pode servir como um armazenamento flexível de eletricidade a partir de FER, resolvendo assim o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de energia



### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

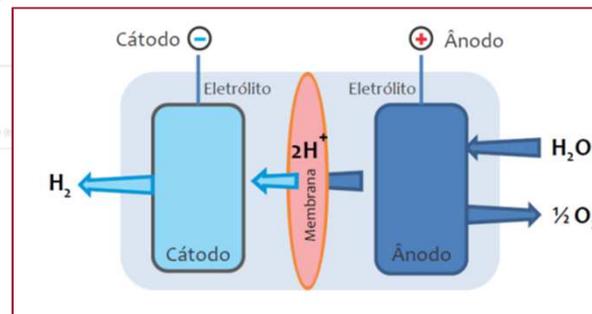
- Em relação a outras tecnologias de armazenamento, as experiências já implantadas mostram que o armazenamento estacionário sob a forma de hidrogénio apresenta vantagem para instalações com maior potência disponível (tipicamente acima de 10 MW) e pode tornar-se interessante para períodos de armazenamento superiores ao semanal.



### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

O hidrogénio permite uma maior penetração das fontes de energia renovável, oferecendo uma integração mais eficiente e **flexível** das fontes de energia renováveis no mix energético – e em particular das FER intermitentes –, por três vias principais:

- Convertendo e valorizando os períodos de excesso de eletricidade renovável em hidrogénio – via eletrólise da água. O H<sub>2</sub> produzido pode então ser usado como fonte flexível de energia armazenada (centralizada, descentralizada) face a quebras de produção no sistema elétrico ou em outros sectores (transportes, no sistema de abastecimento de gás ou na indústria).



© INEGI todos os direitos reservados

### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

- Armazenando e utilizando o hidrogénio como solução de armazenamento sazonal, sem emissão de carbono a longo prazo. As baterias, os supercondensadores e o ar comprimido também podem suportar esta função, contudo não possuem a capacidade ou têm valores muito reduzidos de auto-descarga do armazenamento de energia necessário para resolver desequilíbrios sazonais. A energia hidroelétrica através de bombagem, altamente dependente da disponibilidade hídrica, é atualmente a via principal de armazenamento em grande escala e, no longo prazo, com a qual o hidrogénio armazenado terá de competir.
- Facilitando a distribuição inter e intrarregional e/ou sectorial da energia. Como o hidrogénio e seus compostos têm uma alta densidade de energia e são fácil, eficiente e economicamente transportados, o transporte canalizado de hidrogénio poderá ajudar a (re)distribuir energia de forma eficaz e flexível se for economicamente viável.

Cofinanciado por:

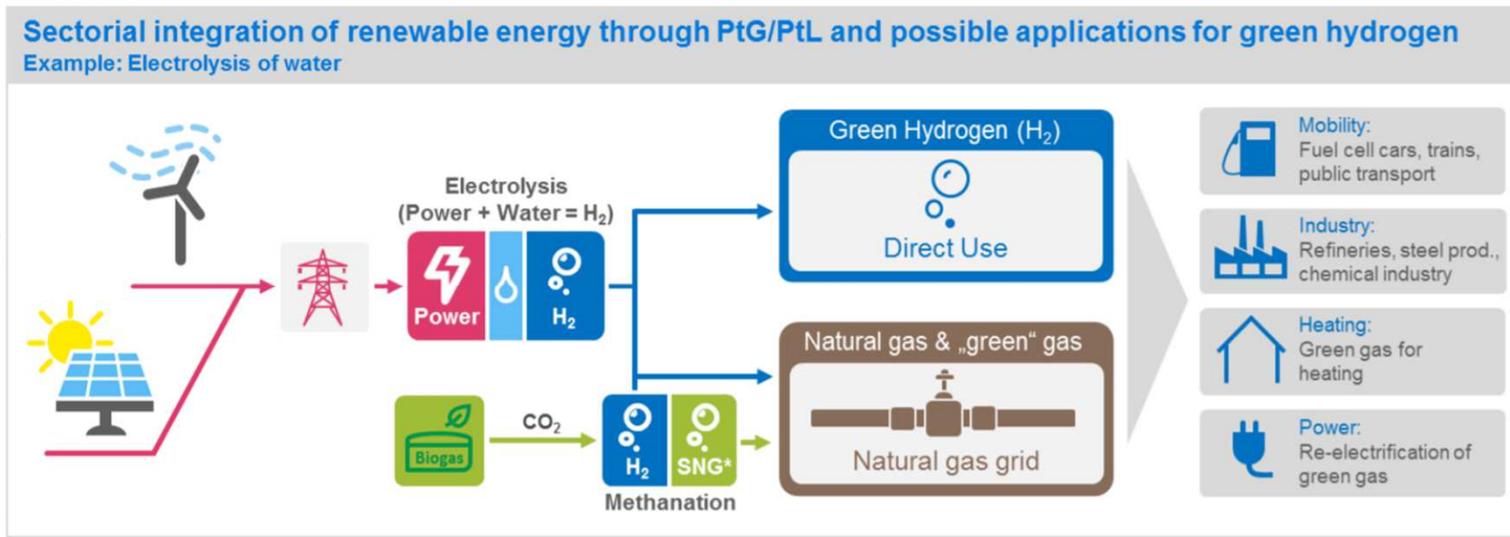


© INEGI todos os direitos reservados



### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

*Power to Gas*



\*SNG = Synthetic Natural Gas

Source: Uniper, 2017

### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

#### *Power to Gas*

#### **Caso Prático**

- Na Escócia, foi recentemente instalado um sistema power-to-gas com eletrolisador do tipo PEM e uma potência de 1 MW, em que o hidrogénio é usado para armazenar eletricidade renovável excedentária produzida em alturas de pico, para posterior transporte e utilização em pilhas de combustível noutra região.



### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

#### GRANDES CENTRAIS



Armazenamento Sazonal | Grande Escala

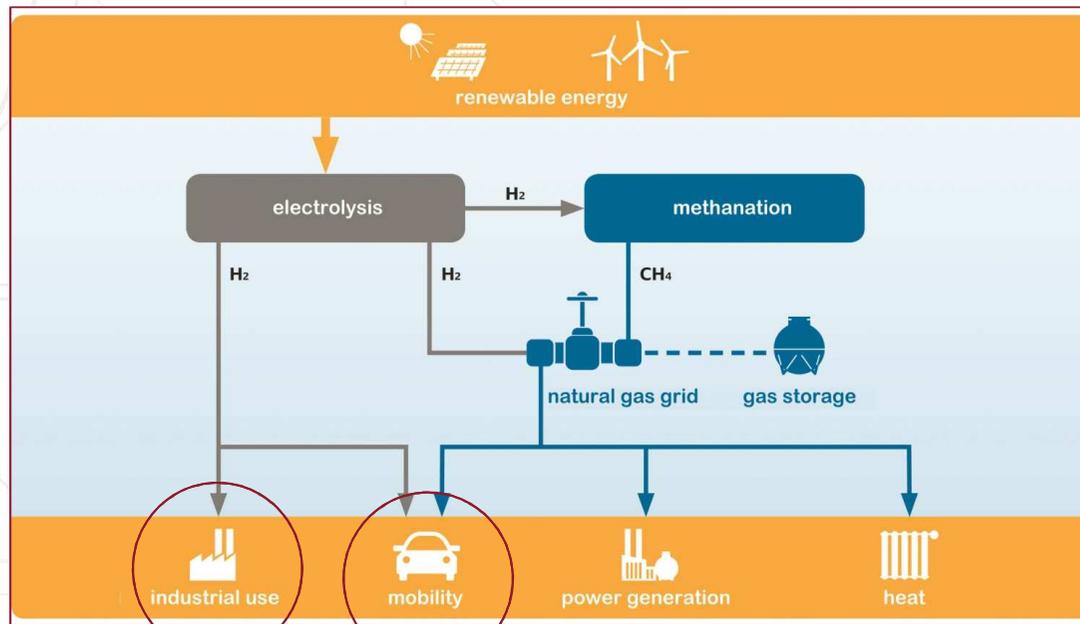
#### COMUNIDADES DE ENERGIA



Como o novo Paradigma das **Comunidades de Energia** o Hidrogénio pode assumir um papel importante também na produção descentralizada

### 3. O Hidrogénio como vetor de armazenamento de Energia

#### COMUNIDADES DE ENERGIA



Parques Industriais

## 4. ESTUDO H2SE

---

### OBJETIVO

- Realização de um estudo sobre o armazenamento de energia: soluções alternativas atuais de armazenamento de energia elétrica em parques industriais ou ninho de empresas com produção solar fotovoltaica e análise comparativa da sua competitividade e aplicação potencial.
- No quadro deste estudo posiciona-se o Hidrogénio como solução de armazenamento de energia e posicioná-lo comparativamente com as tecnologias alternativas.

## 4. ESTUDO H2SE

### i. Casos de Estudo

- Edifício Sede das Águas do Porto (AdP) – Central de Nova Sintra;
- Pavilhão Gimnodesportivo e Piscina Municipal de Valongo – Complexo Desportivo de Valongo;
- Parque de Ciência e Tecnologia da Universidade do Porto (UPTEC);
- BICAFÉ;
- Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI)



**H2SE** Hidrogénio e Sustentabilidade Energética

**inegi** driving science & innovation

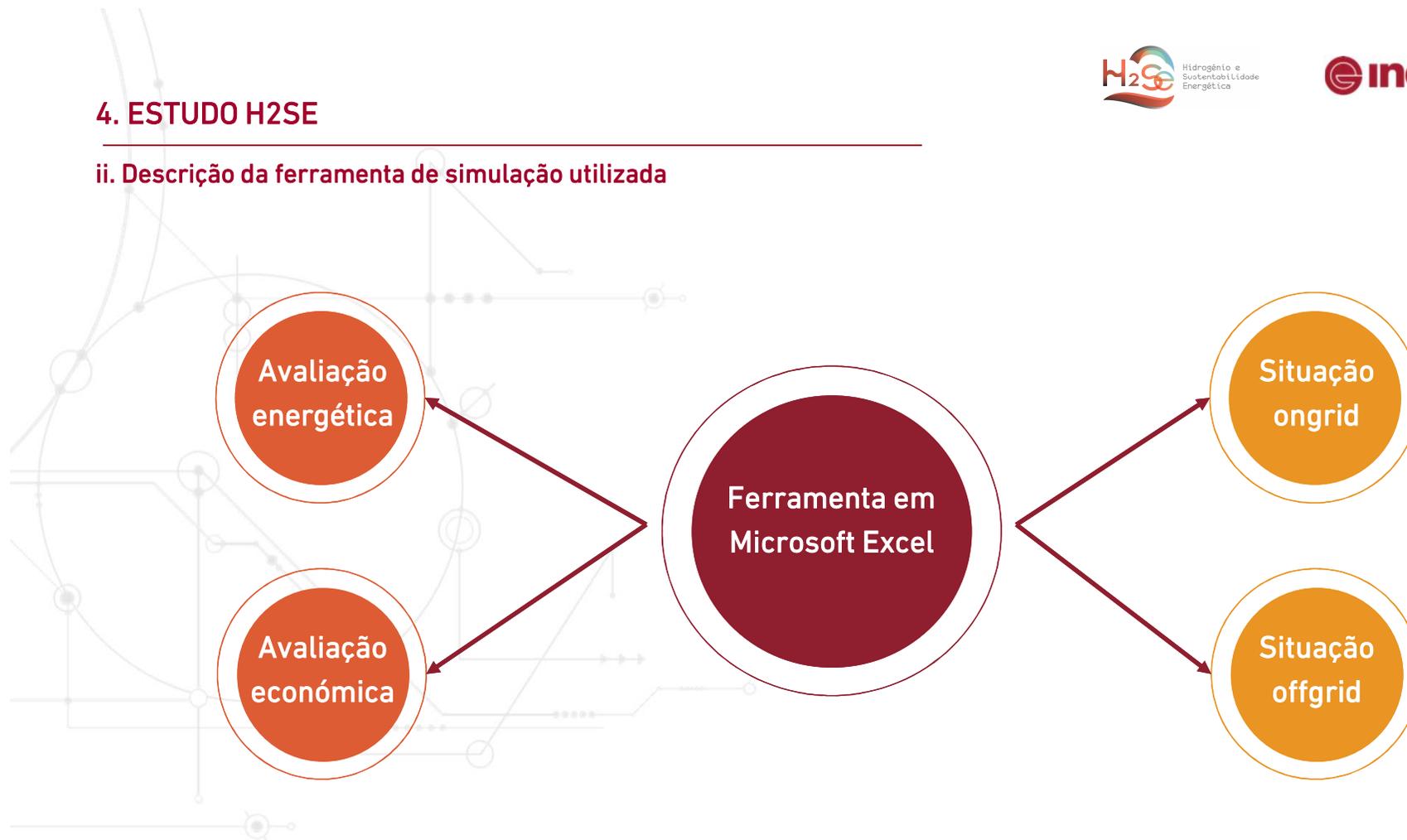
Since 1986

© INEGI todos os direitos reservados

AP2H2 **inegi** **I P P** Instituto Politécnico de Portugal

## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

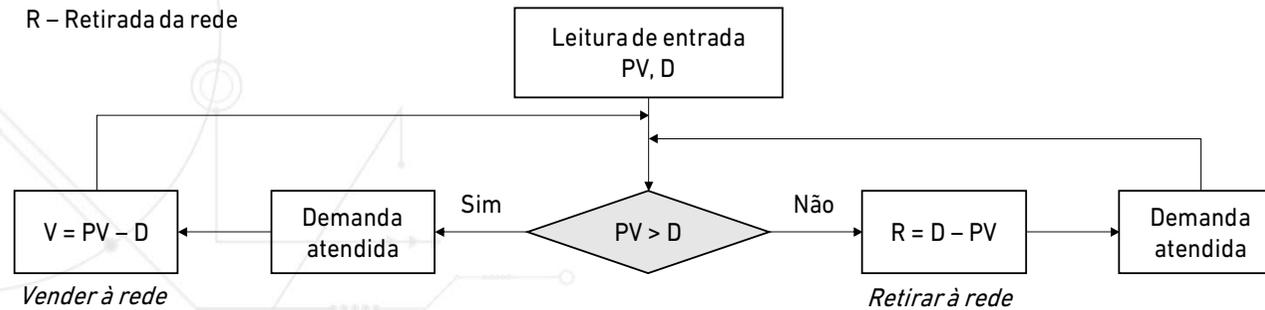


## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

- Cenário 1: Cenário de auto-consumo com produção fotovoltaica sem nenhum sistema de armazenamento de energia elétrica;

PV – produção fotovoltaica  
 D – demanda do consumo  
 V – Venda à rede  
 R – Retirada da rede

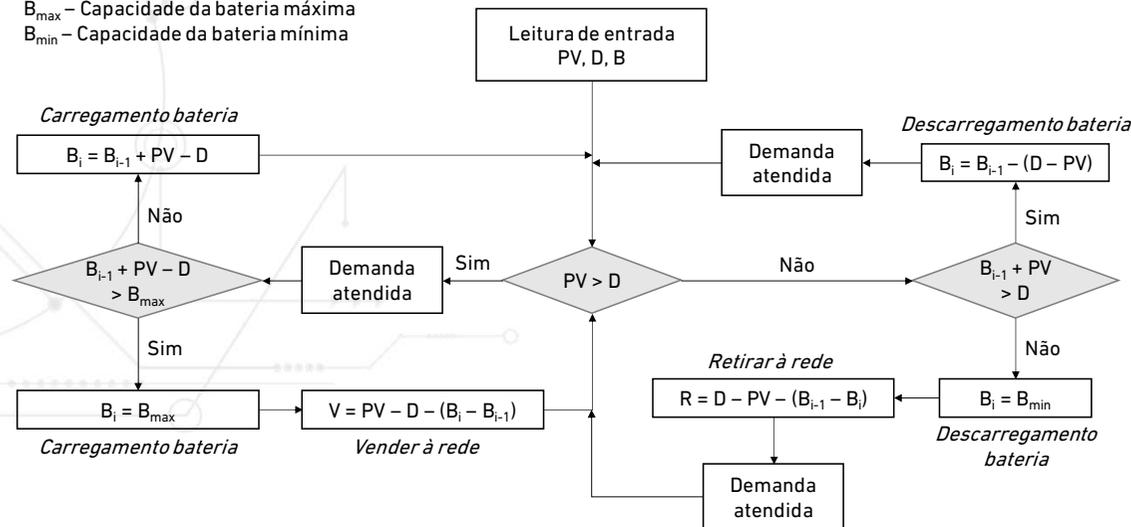


## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

- Cenário 2: Cenário de auto-consumo com produção fotovoltaica e armazenamento de energia elétrica através de baterias convencionais;

PV – produção fotovoltaica  
 D – demanda do consumo  
 V – Venda à rede  
 R – Retirada da rede  
 $B_i$  – Energia da bateria no instante atual  $i$   
 $B_{i-1}$  – Energia da bateria no instante anterior  $i-1$   
 $B_{max}$  – Capacidade da bateria máxima  
 $B_{min}$  – Capacidade da bateria mínima



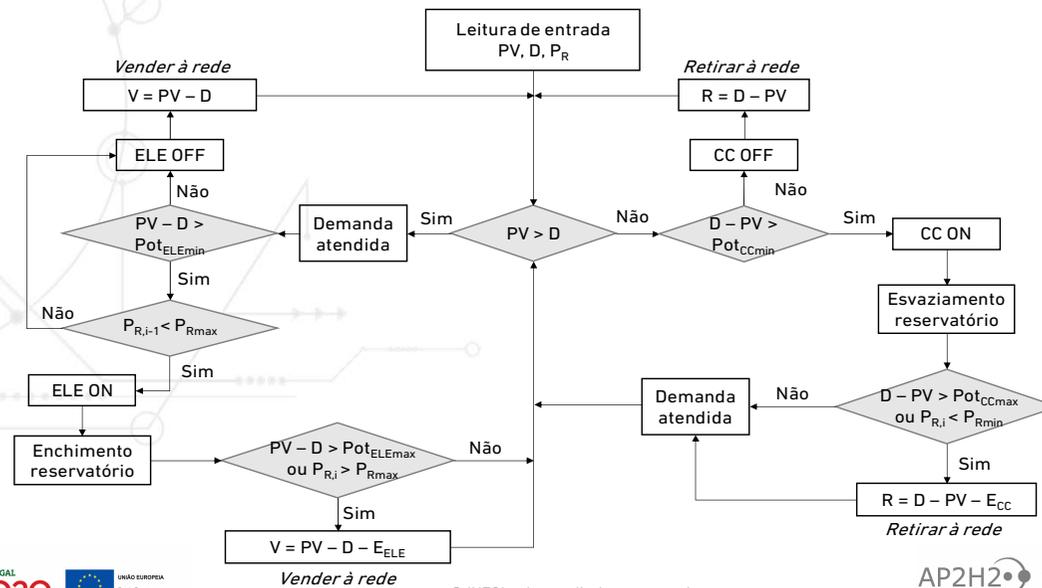
## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

- Cenário 3: Cenário de auto-consumo com produção fotovoltaica e armazenamento de energia elétrica via hidrogénio;

PV – produção fotovoltaica  
 D – demanda do consumo  
 V – Venda à rede  
 R – Retirada da rede  
 $P_{R,i}$  – Pressão no reservatório no instante atual i  
 $P_{R,i-1}$  – Pressão no reservatório no instante anterior i-1  
 $P_{Rmin}$  – Pressão no reservatório mínima

$P_{Rmax}$  – Pressão no reservatório máxima  
 $Pot_{ELEmax}$  – Potência do eletrolisador máxima  
 $Pot_{ELEmin}$  – Potência do eletrolisador mínima  
 $E_{ELE}$  – Energia consumida pelo eletrolisador  
 $Pot_{CCmax}$  – Potência da célula de combustível máxima  
 $Pot_{CCmin}$  – Potência da célula de combustível mínima  
 $E_{CC}$  – Energia cedida pela célula de combustível



## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

- Cenário 4: Cenário de auto-consumo com produção fotovoltaica e armazenamento de energia elétrica através de baterias convencionais e via hidrogénio.

PV – produção fotovoltaica

D – demanda do consumo

V – Venda à rede

R – Retirada da rede

$B_i$  – Energia da bateria no instante atual  $i$

$B_{i-1}$  – Energia da bateria no instante anterior  $i-1$

$B_{max}$  – Capacidade da bateria máxima

$B_{min}$  – Capacidade da bateria mínima

$P_{R,i}$  – Pressão no reservatório no instante atual  $i$

$P_{R,i-1}$  – Pressão no reservatório no instante anterior  $i-1$

$P_{Rmax}$  – Pressão no reservatório máxima

$P_{Rmin}$  – Pressão no reservatório mínima

$Pot_{ELEmax}$  – Potência do eletrolisador máxima

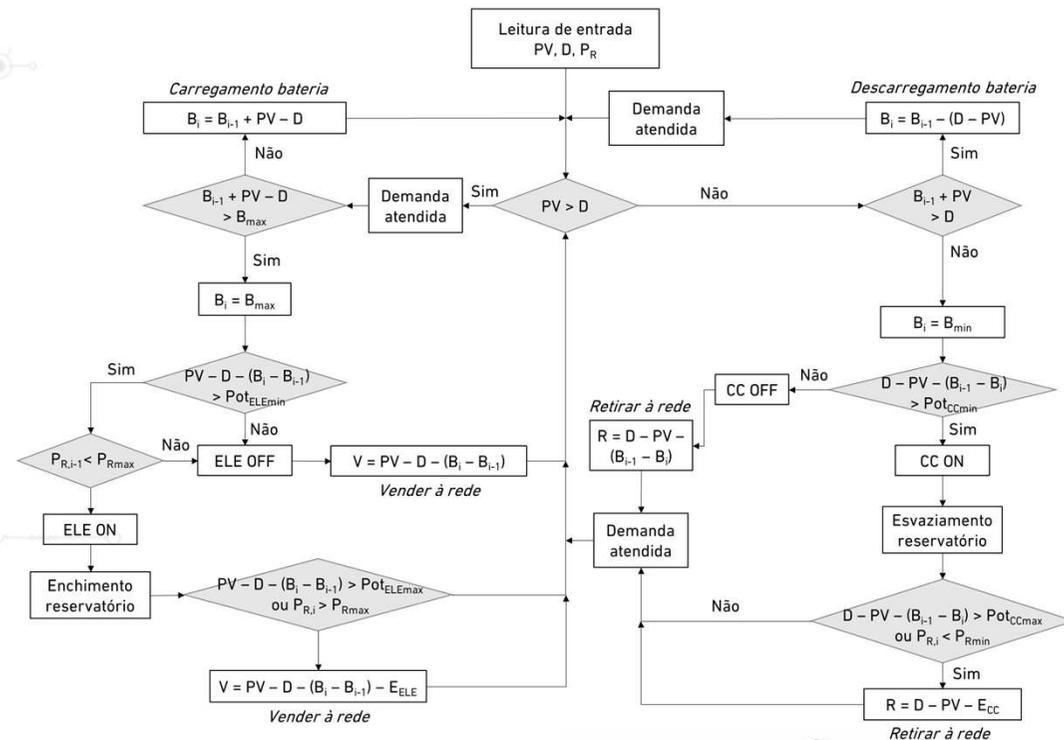
$Pot_{ELEmin}$  – Potência do eletrolisador mínima

$E_{ELE}$  – Energia consumida pelo eletrolisador

$Pot_{CCmax}$  – Potência da célula de combustível máxima

$Pot_{CCmin}$  – Potência da célula de combustível mínima

$E_{CC}$  – Energia cedida pela célula de combustível



## 4. ESTUDO H2SE

### ii. Descrição da ferramenta de simulação utilizada

Projeto fotovoltaico	
Potência nominal de cada módulo fotovoltaico	265 Wp
Degradação dos módulos fotovoltaicos	0,8%
Tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos	25 anos
Custo dos módulos fotovoltaicos (se < 100 kWp e >100 kWp)	1,14 €/Wp e 0,60 €/Wp
Custo O&M dos módulos fotovoltaicos	1% do investimento

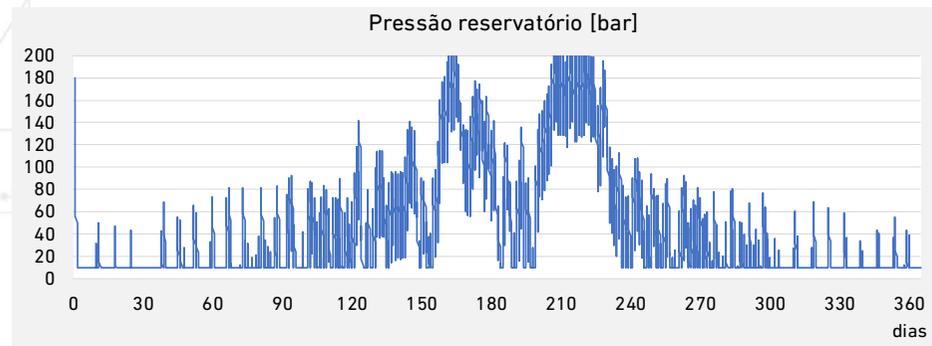
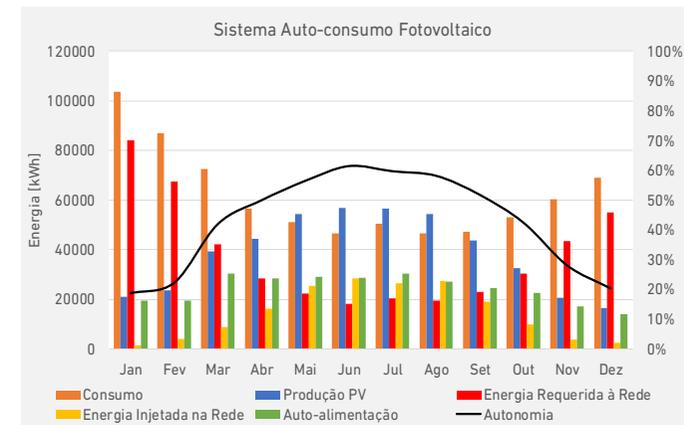
Sistema de armazenamento de energia elétrica com baterias	
Modelo das baterias	Hoppecke 24 OpzS 3000
Capacidade nominal de cada bateria	6 kWh
Profundidade de descarga máxima da bateria	80%
Carregamento máximo da bateria	98%
Nº ciclos da vida útil das baterias (se SOC médio < 50% e >50%)	6000 e 4000 ciclos
Custo das baterias	450 €/kWh
Custo O&M da bateria	1% do investimento

Sistema de armazenamento de energia elétrica via hidrogénio	
Eletrolisador e Compressor	
Consumo de energia específico do eletrolisador	50 kWh/kg
Potência mínima e máxima de operação do eletrolisador	5 e 100%
Pressão de saída do compressor	200 bar
Consumo de energia específico na compressão do hidrogénio	5 kWh/kg
Nº horas de funcionamento do eletrolisador	80000 horas
Custo do eletrolisador e compressor	1200 €/kW
Custo da substituição do eletrolisador	480 €/kW
Custo O&M do eletrolisador e compressor	4% do investimento
Reservatório	
Pressão mínima e máxima do hidrogénio no reservatório	10 e 200 bar
Tempo de vida útil do reservatório	25 anos
Custo do reservatório	125 €/kg
Custo O&M do reservatório	2% do investimento
Célula de combustível	
Eficiência da célula de combustível	50%
Potência mínima e máxima de operação da célula de combustível	2 e 100%
Nº horas de funcionamento da célula de combustível	30000 horas
Custo da célula de combustível	1600 €/kW
Custo da substituição da célula de combustível	640 €/kW
Custo O&M da célula de combustível	4% do investimento

## 4. ESTUDO H2SE

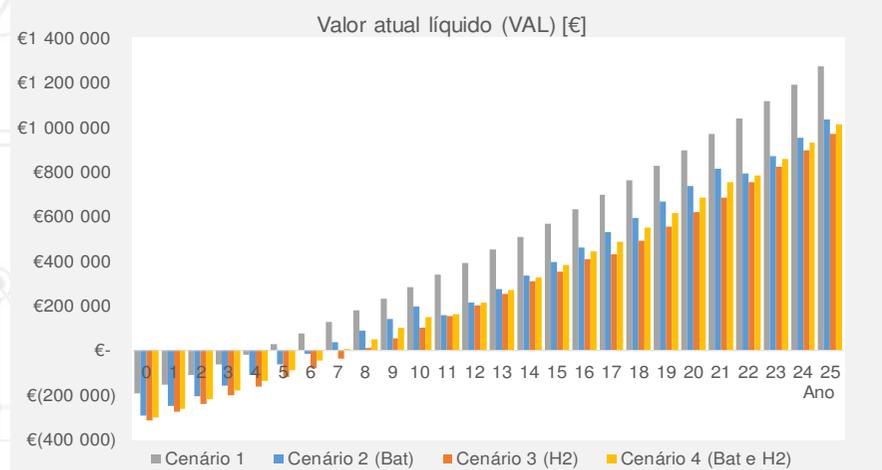
### iii. Resultados do cenário ongrid Central de Nova Sintra

Cenário 2 (Bat)	
Número de baterias usadas	36
Capacidade nominal total das baterias	216 kWh
Cenário 3 (H <sub>2</sub> )	
Potência do eletrolisador	75 kW
Volume do reservatório	2 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	15 kW
Cenário 4 (Bat e H <sub>2</sub> )	
Número de baterias usadas	16
Capacidade nominal total das baterias	96 kWh
Potência do eletrolisador	40 kW
Volume do reservatório	1 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	8 kW



## 4. ESTUDO H2SE

### iii. Resultados do cenário ongrid Central de Nova Sintra

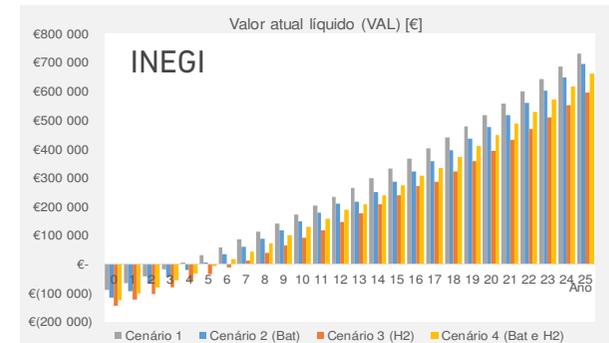
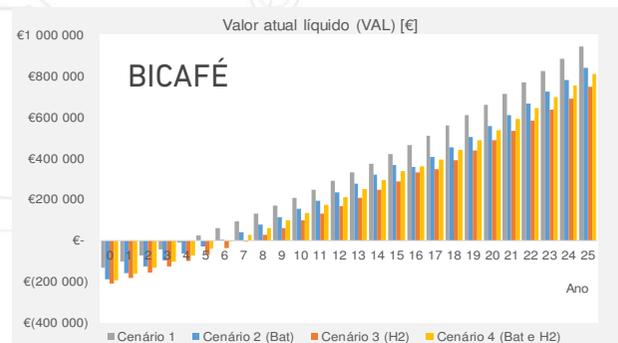
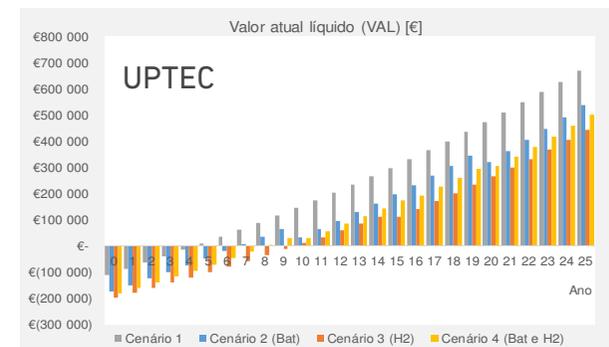


	Cenário 1 (Referência)	Cenário 2 (Bat)	Cenário 3 (H <sub>2</sub> )	Cenário 4 (Bat e H <sub>2</sub> )
Investimento [€]	195.252	292.452	313.318	301.285
Custos de manutenção [€]	1.953	2.925	6.594	4.857
Poupança anual [€]	44.602	46.184	42.743	44.545
Venda de energia à rede [€]	7.377	5.497	2.318	3.978
Retorno do investimento [anos]	4,39	6,30	7,81	6,97
TIR [%]	24,15	15,68	13,33	14,58
Valor atual líquido (25 anos) [€]	1.271.001	1.033.642	969.413	1.011.476

	Cenário 1 (Referência)	Cenários 2, 3 e 4 (Armazenamento de Energia)
Auto-alimentação [MWh]	290	327
Taxa de autonomia [%]	39	44

## 4. ESTUDO H2SE

### iii. Resultados do cenário ongrid

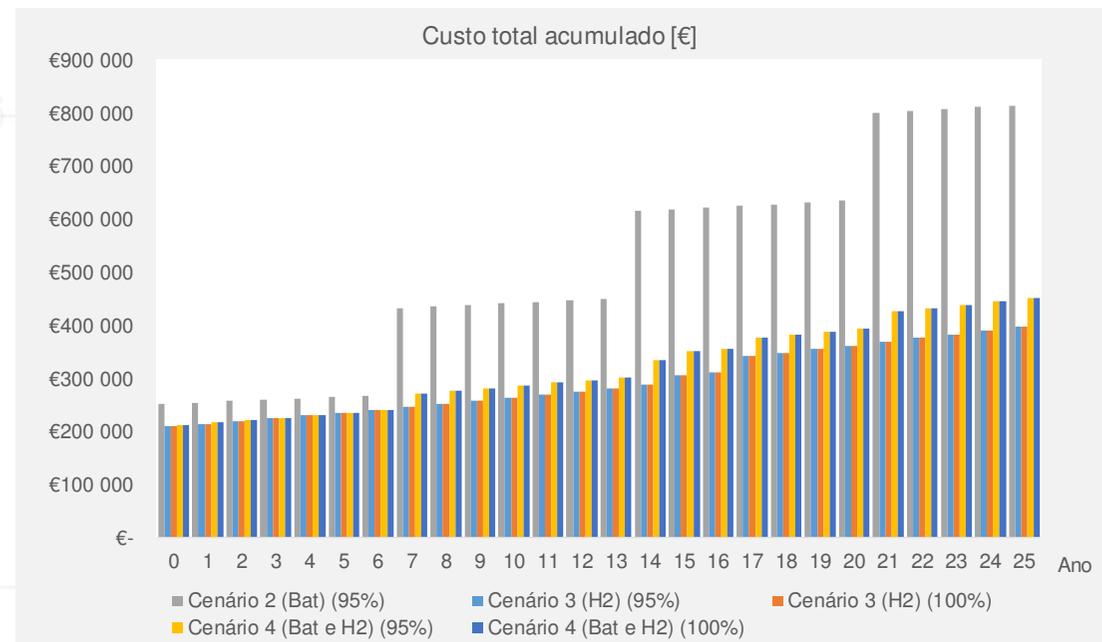


## 4. ESTUDO H2SE

### iii. Resultados do cenário offgrid

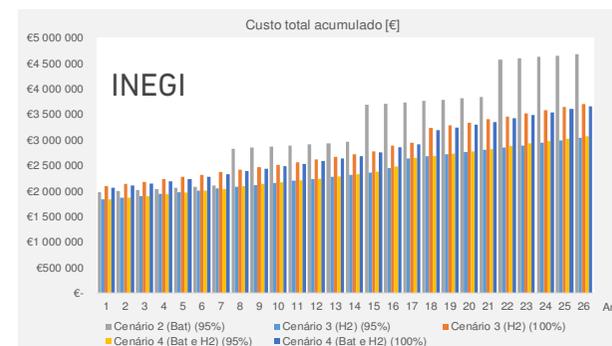
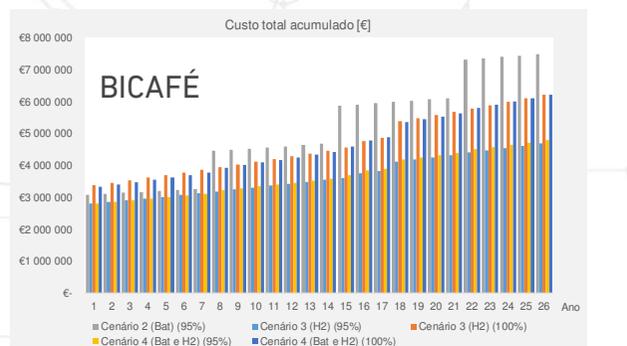
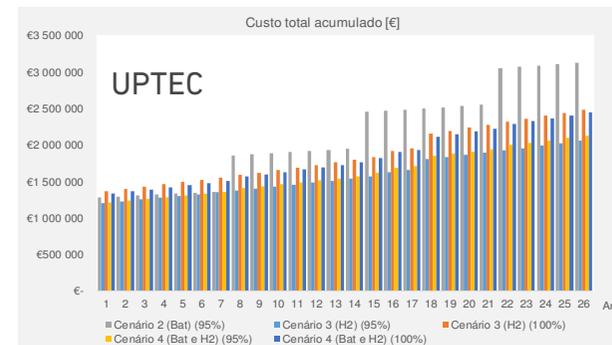
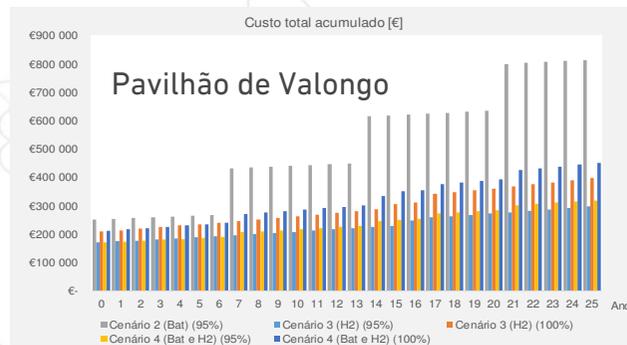
<b>Cenário 2 (Bat) (Autonomia 95%)</b>	
Número de baterias usadas	500
Capacidade nominal total das baterias	3.000 kWh
<b>Cenário 3 (H<sub>2</sub>) (Autonomia 95%)</b>	
Potência do eletrolisador	580 kW
Volume do reservatório	50 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	120 kW
<b>Cenário 3 (H<sub>2</sub>) (Autonomia 100%)</b>	
Potência do eletrolisador	1.200 kW
Volume do reservatório	60 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	220 kW
<b>Cenário 4 (Bat e H<sub>2</sub>) (Autonomia 95%)</b>	
Número de baterias usadas	8
Capacidade nominal total das baterias	48 kWh
Potência do eletrolisador	550 kW
Volume do reservatório	50 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	120 kW
<b>Cenário 4 (Bat e H<sub>2</sub>) (Autonomia 100%)</b>	
Número de baterias usadas	20
Capacidade nominal total das baterias	120 kWh
Potência do eletrolisador	1100 kW
Volume do reservatório	60 m <sup>3</sup>
Potência da célula de combustível	200 kW

### Central de Nova Sintra



## 4. ESTUDO H2SE

### iv. Resultados do cenário offgrid



## 4. ESTUDO H2SE

### v. Conclusões

- A relevância do armazenamento de energia elétrica via hidrogénio varia conforme o caso de estudo está numa situação *ongrid* ou *offgrid*;
- Situação *ongrid*: as soluções com armazenamento de energia não foram economicamente viáveis, quando comparadas com o cenário de referência;
- Situação *offgrid*: a solução de armazenamento via hidrogénio, além de tecnicamente mais viável (quando comparada com a utilização de 500 baterias), oferece resultados económicos melhores.



**H2SE** Hidrogénio e Sustentabilidade Energética

**inegi** driving science & innovation

Since 1986

AP2H2 **inegi** **IP** Instituto Politécnico de Portugal

© INEGI todos os direitos reservados

## 4. ESTUDO H2SE

### v. Conclusões

- Para viabilizar o uso do hidrogénio como vetor de armazenamento é urgente investir em investigação, inovação e desenvolvimento tecnológico (eletrolisadores);
- A viabilidade depende do uso final do hidrogénio (neste modelo foi considerada a produção de energia elétrica via Pilhas de combustível);



H2SE Hidrogénio e Sustentabilidade Energética

inegi driving science & innovation

Since 1986

AP2H2 Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio

inegi

Instituto Politécnico de Portugal

© INEGI todos os direitos reservados

39



MAIS DE 30 ANOS  
A CONVERTER  
CONHECIMENTO  
EM VALOR

Since 1986

OBRIGADO

rbarbosa@inegi.up.pt

INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL

www.inegi.up.pt



U.PORTO



© INEGI todos os direitos reservados

