



Unidade de Economia de Recursos

# Recursos geológicos e materiais para a fileira do hidrogénio

**Dia Mundial dos Materiais 2021**

Conferência "Os materiais e a fileira do hidrogénio"

*03 novembro 2021*

Sofia G. Simões

**LNEG – Laboratório Nacional de Energia  
e Geologia**

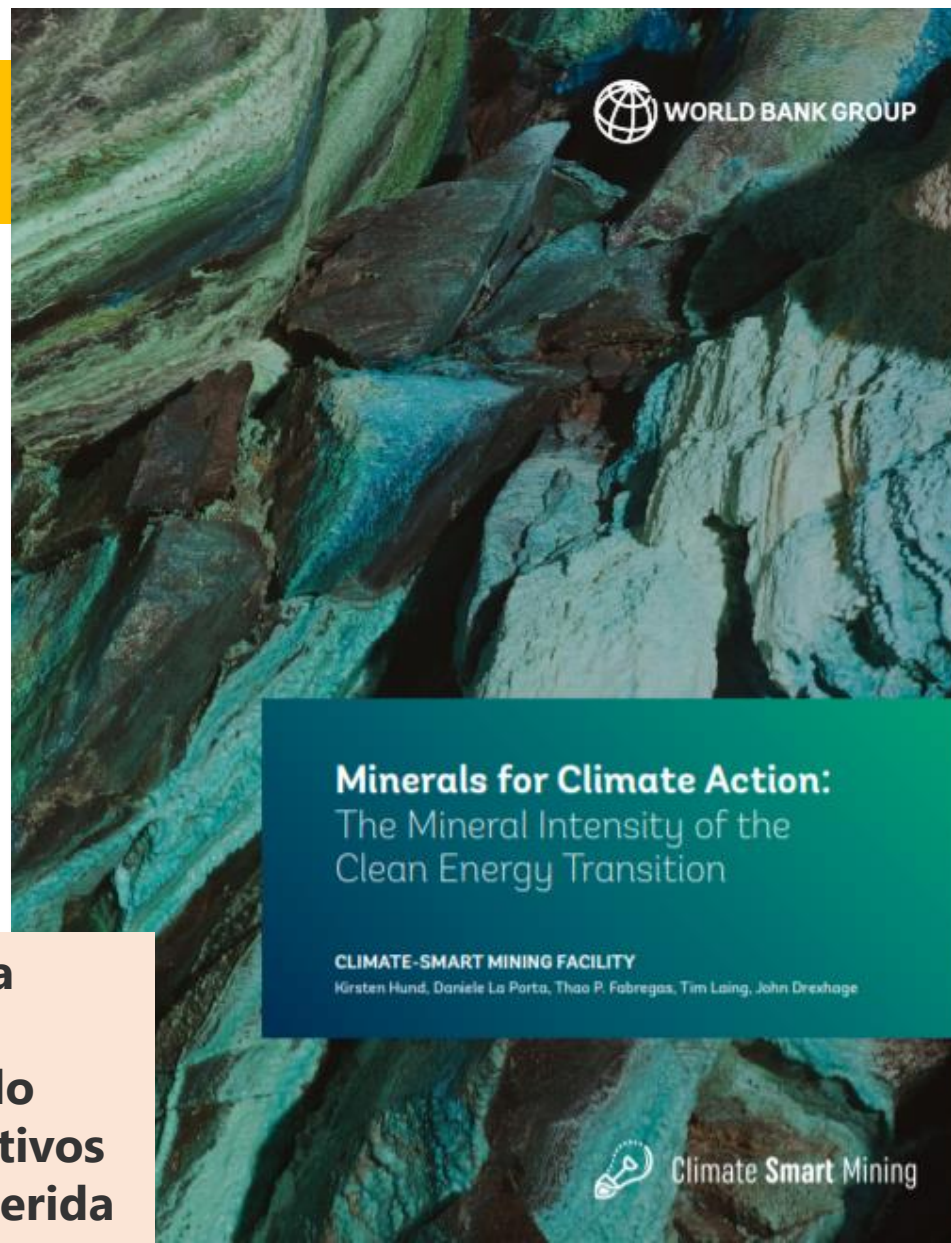
UER – Unidade de Economia de Recursos

# Minerais para ação climática

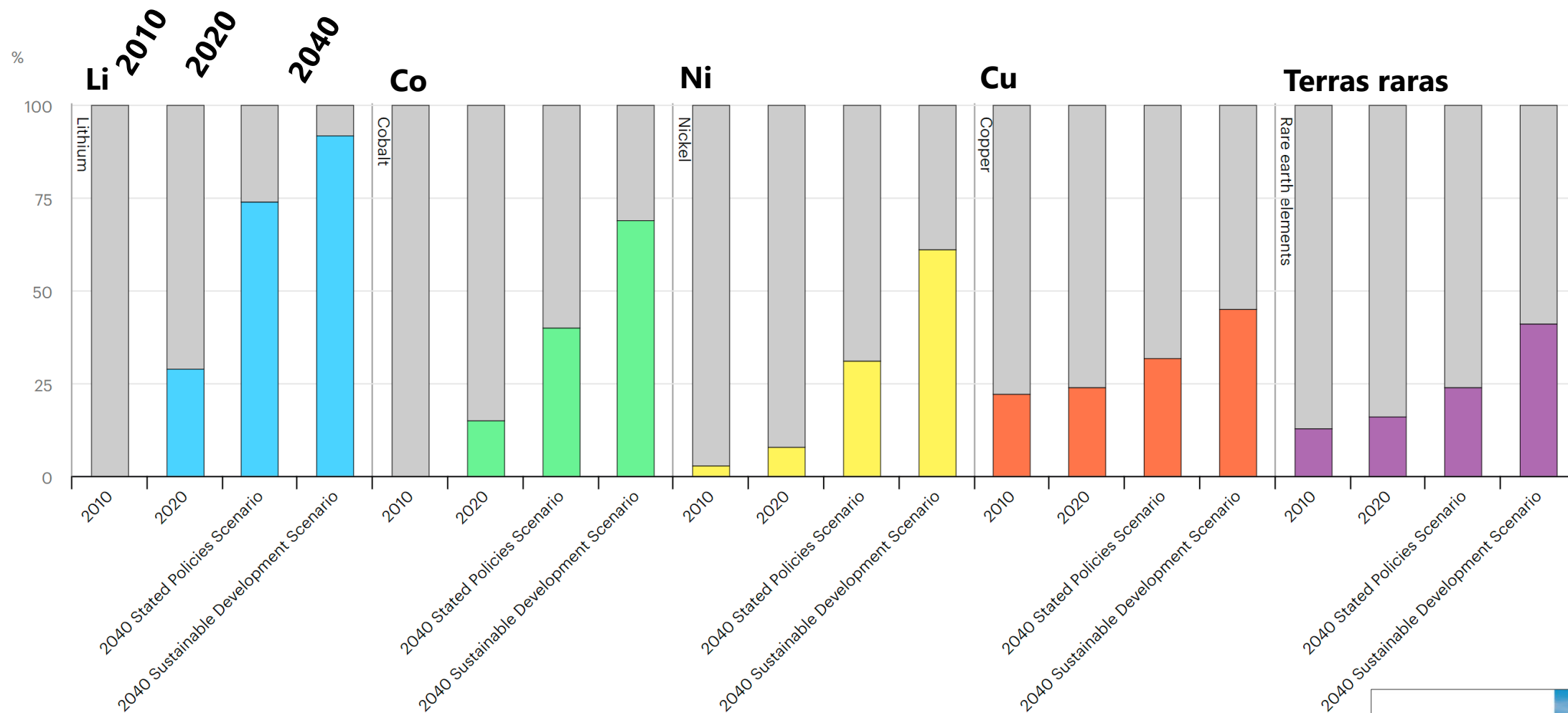
“a produção de minerais como a grafite, lítio e cobalto, pode **aumentar até cerca de 500% em 2050** para satisfazer a procura crescente por tecnologias mais limpas. É estimado que serão necessárias mais de 3 mil milhões de t de minerais para implementar a capacidade de eólica, solar e geotérmica necessária para um futuro abaixo dos 2°C”

**Maior crescimento para: Grafite, Lítio, Cobalto (em % da procura atual) e Alumínio (em termos absolutos)**

**“Embora a crescente procura por minerais e metais ofereça oportunidades económicas tanto para países em desenvolvimento ricos em recursos como para entidades do setor privado, irão provavelmente surgir desafios significativos se a transição energética para a descarbonização não for gerida de forma responsável e sustentável. ”**



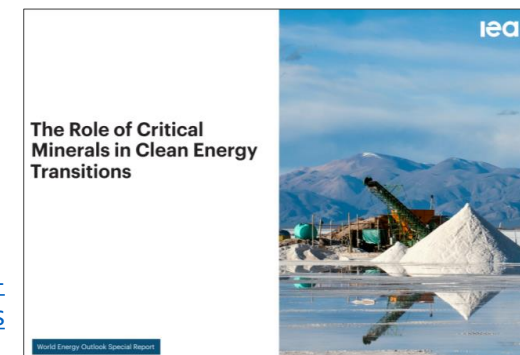
# % do consumo de minerais pelo Sistema Energético no total dos mercados mundiais de minerais



A % da procura global de minerais pelo Sistema energético irá aumentar significativamente nas próximas duas décadas até mais de:

- > **40% para o cobre e elementos de terras raras,**
- > **60-70% para níquel e cobalto**
- > **quase 90% para o lítio**

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>



# 4ª lista UE de 30 Matérias Primas Críticas (MPC) setembro 2020

Antimónio (Sb)**	Háfnio (Hf)*	Fósforo (P)
Barita (BaSO <sub>4</sub> mineral)	Elementos de Terras Raras Pesados (HREE)	<b>Escândio (Sc)*</b>
Berílio (Be)*	Elementos de Terras Raras Leves (LREE)	Silício-metal (Si)**
Bismuto (Bi)	Índio (In)*	Tântalo (Ta)*
Borato (compostos de BO <sub>3</sub> ou BO <sub>4</sub> )	Magnésio (Mg)*	Tungsténio ou Volfrâmio (W)*
<b>Cobalto (Co)*</b>	Grafite Natural (C)	Vanádio (V)*
Carvão de coque (C)	Borracha Natural	<i>Bauxite (Al &amp; Ga)</i>
Espatoflúor (CaF <sub>2</sub> )	Nióbio (Nb)*	<i>Lítio (Li)*</i>
Gálio (Ga)*	Metais do Grupo da Platina*	<b>Titânio (Ti)*</b>
Germânio (Ge)**	Fosfato natural	<b>Estrôncio (Sr)*</b>

**ítrio (Y)\***, európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb), lutécio (Lu)

**lantânio (La)**, cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm)

Não constam da lista de MPC mas relevante para energia renovável:

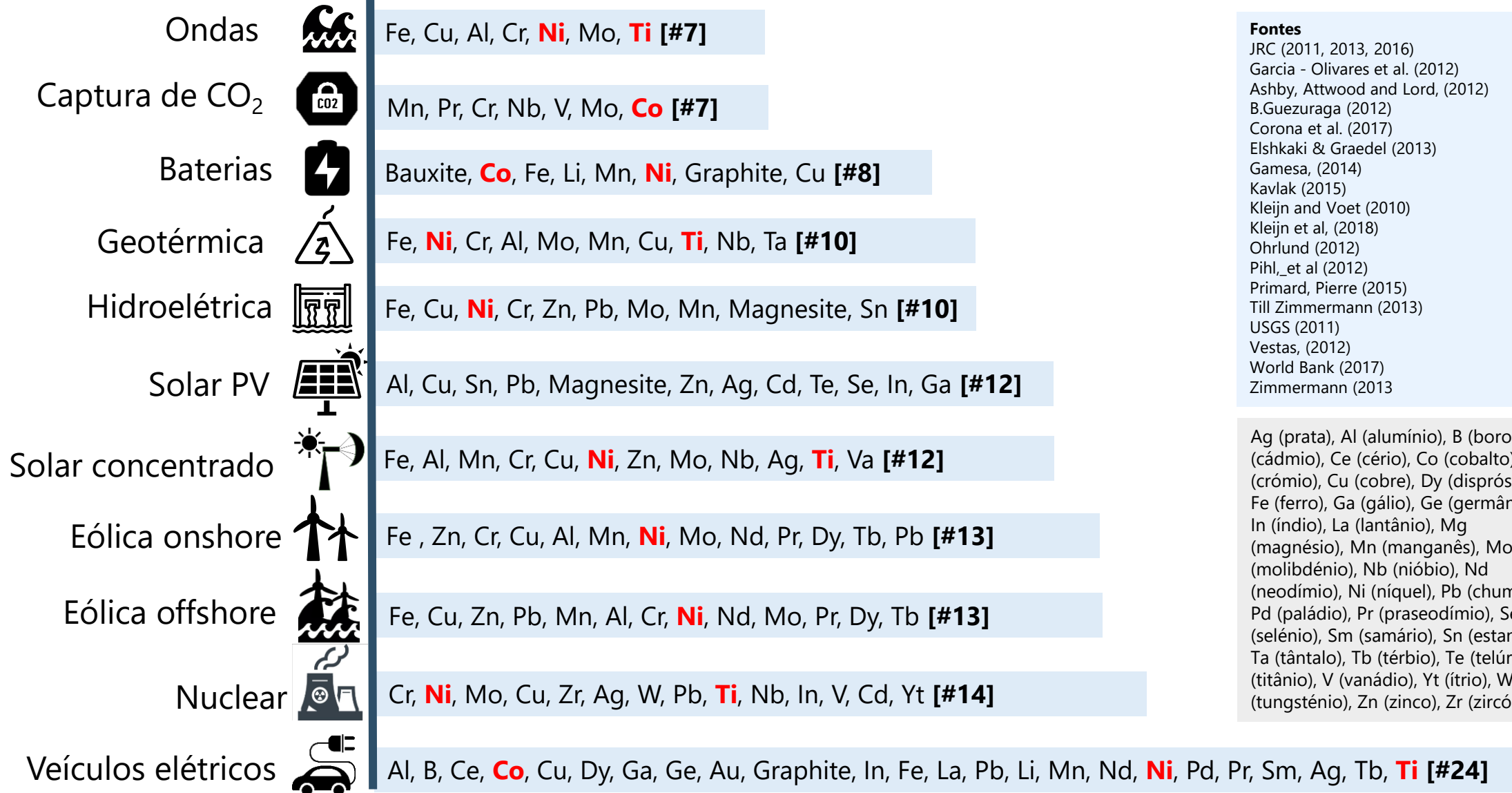
telúrio (Te), cádmio (Cd), molibdénio (Mo), **níquel (Ni)**, prata (Ag), selénio (Se), estanho (Sn)

**ruténio (Ru)**, **ródio (Rh)**, **paládio (Pd)**, ósmio (Os), **irídio (Ir)**, **platina (Pt)**

HREEs = Elementos de Terras Raras Pesados; LREEs = Elementos de Terras Raras Leves; PGMs = Metais do grupo da platina

**Vermelho/roxo** – relevantes para o H<sub>2</sub>, **Itálico e negrito** – novos materiais na lista de MPC de 2020, \* Metal (ou metal de transição); \*\* Metalóide

# Necessidades de materiais para neutralidade carbónica









## Fontes


JRC (2011, 2013, 2016)  
 Garcia - Olivares et al. (2012)  
 Ashby, Attwood and Lord, (2012)  
 B.Guezuraga (2012)  
 Corona et al. (2017)  
 Elshkaki & Graedel (2013)  
 Gamesa, (2014)  
 Kavlak (2015)  
 Kleijn and Voet (2010)  
 Kleijn et al, (2018)  
 Ohrlund (2012)  
 Pihl, et al (2012)  
 Primard, Pierre (2015)  
 Till Zimmermann (2013)  
 USGS (2011)  
 Vestas, (2012)  
 World Bank (2017)  
 Zimmermann (2013)

Ag (prata), Al (alumínio), B (boro), Cd (cádmio), Ce (cério), Co (cobalto), Cr (crómio), Cu (cobre), Dy (disprósio), Fe (ferro), Ga (gálio), Ge (germânio), In (índio), La (lantânio), Mg (magnésio), Mn (mangânês), Mo (molibdénio), Nb (nióbio), Nd (neodímio), Ni (níquel), Pb (chumbo), Pd (paládio), Pr (praseodímio), Se (selénio), Sm (samário), Sn (estanho), Ta (tântalo), Tb (térbio), Te (telúrio), Ti (titânio), V (vanádio), Yt (ítrio), W (tungsténio), Zn (zinco), Zr (zircónio).




- Batteries 
- Fuel cells 
- Wind 
- Traction Motors 
- PV 
- Robotics 
- Drones 
- 3D Printing 
- ICT 

Renewables



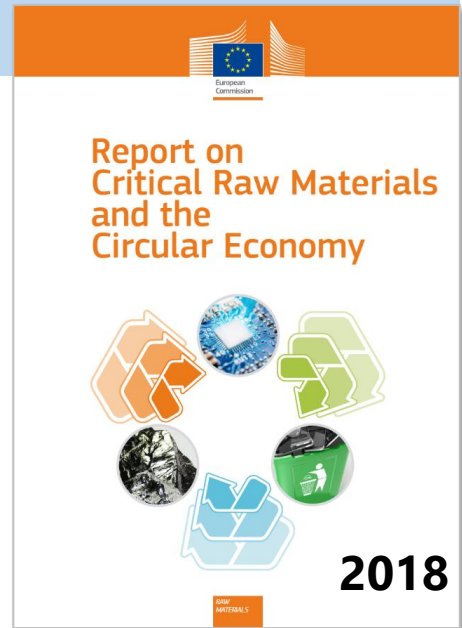
e-mobility



Defence & Space



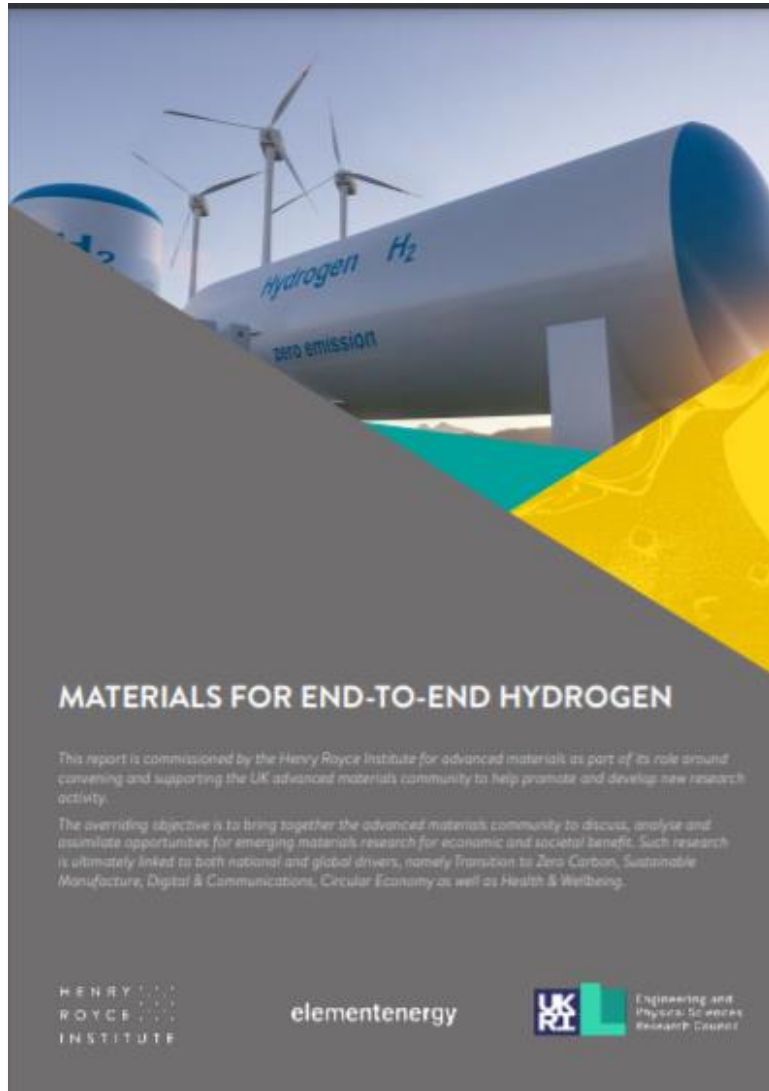
**Equipamento elétrico e eletrónico**  
**Baterias**  
**Setor automóvel**  
**Energia Renovável**  
**Indústria da defesa**  
**Químicos e fertilizantes**



[https://ec.europa.eu/commission/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/commission/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en)

<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>

# Materials para o hidrogénio



**Abr 2021**

[https://www.royce.ac.uk/content/uploads/2021/06/Materials-for-End-to-End-Hydrogen\\_Roadmap.pdf](https://www.royce.ac.uk/content/uploads/2021/06/Materials-for-End-to-End-Hydrogen_Roadmap.pdf)

Received: 16 September 2020 | Revised: 15 January 2021 | Accepted: 16 January 2021  
DOI: 10.1002/er.6487

RESEARCH ARTICLE

ENERGY RESEARCH WILEY

## Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany

Steffen Kiemel<sup>1</sup> | Tom Smolinka<sup>2</sup> | Franz Lehner<sup>3</sup> | Johannes Full<sup>1</sup> | Alexander Sauer<sup>1</sup> | Robert Mieke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Germany  
<sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg im Breisgau, Germany  
<sup>3</sup>E4tech Sàrl, Lausanne, Switzerland

**Correspondence**  
Steffen Kiemel, Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Nobelstraße 12, Stuttgart, Germany.  
Email: steffen.kiemel@ipa.fraunhofer.de

**Funding information**  
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Grant/Award Number: 03B41102; Fraunhofergesellschaft zur Förderung der angewandten forschung ev

**Summary**  
The present work aims to identify critical materials in water electrolyzers with potential future supply constraints. The expected rise in demand for green hydrogen as well as the respective implications on material availability are assessed by conducting a case study for Germany. Furthermore, the recycling of end-of-life (EoL) electrolyzers is evaluated concerning its potential in ensuring the sustainable supply of the considered materials. As critical materials bear the risk of raising production costs of electrolyzers substantially, this article examines the readiness of this technology for industrialisation from a material perspective. Except for titanium, the indicators for each assessed material are scored with a moderate to high (platinum) or mostly high (iridium, scandium and yttrium) supply risk. Hence, the availability of these materials bears the risk of hampering the scale-up of electrolysis capacity. Although conventional recycling pathways for platinum, iridium and titanium already exist, secondary material from EoL electrolyzers will not reduce the dependence on primary resources significantly within the period under consideration—from 2020 until 2050. Notably, the materials identified as critical are used in PEM and high temperature electrolysis, whereas materials in alkaline electrolysis are not exposed to significant supply risks.

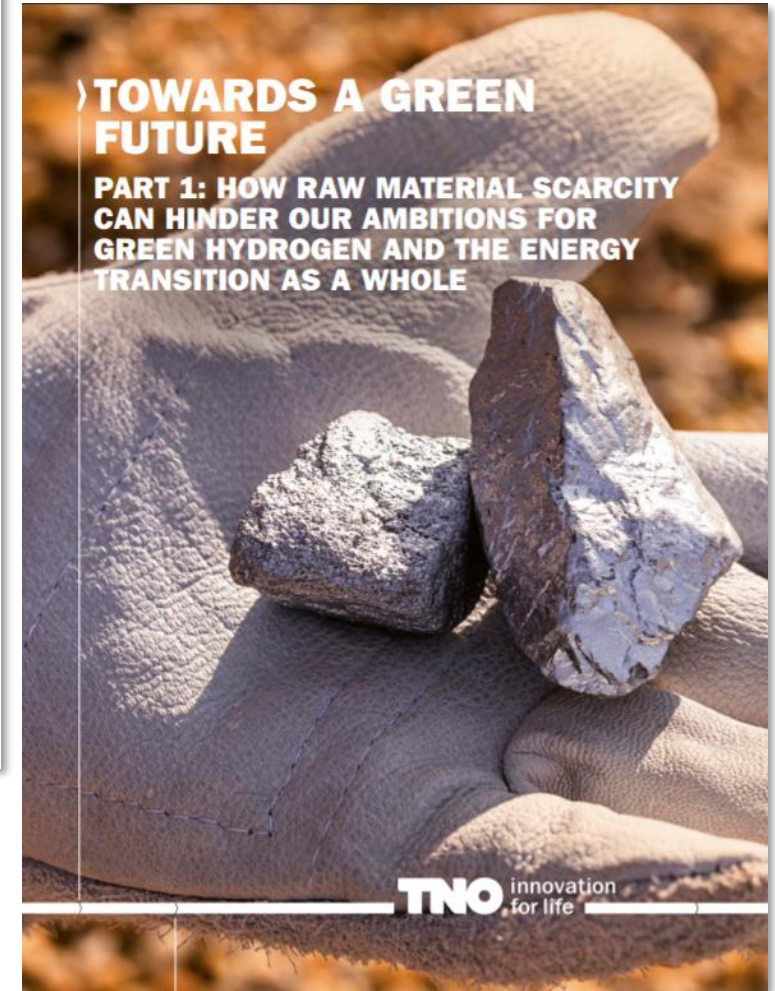
**KEYWORDS**  
green hydrogen, material criticality, recycling, supply risk, water electrolysis

### 1 | INTRODUCTION

In comparison to the preindustrial era, the world's climate experienced an average temperature rise of 0.85°C.<sup>1</sup> The global temperature increase has significant consequences for vulnerable climate and ecological systems. Excessive meeting resulted in the first global and legally binding climate protection agreement and the pledge to keep global warming considerably beneath an increase of 2°C compared to the preindustrial era.<sup>3</sup> Hence, several countries pursue their own national climate action plans in order to reduce GHG emissions and thus contribute to

**Set 2020**

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/er.6487>



**Mar 2021**

<https://www.tno.nl/en/focus-areas/strategic-analysis-policy/expertise-groups/strategic-business-analysis/electrolysis/>

# Materiais para o hidrogénio

## Eletrolisadores PEM

Catalisadores

Írídio

(1–3mg MGP/cm<sup>2</sup>\*

ou 10g Ir/m<sub>2</sub> superfície ativa ou 0,667g Ir/kW)

Platina ou Paládio

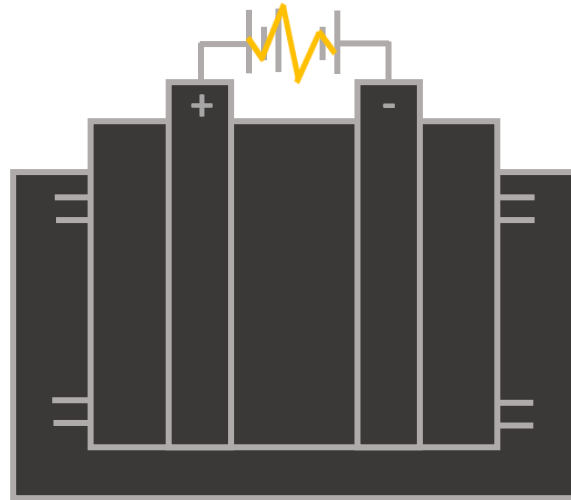
(0,025mg Pt /cm<sup>2</sup>\* ou 0,333-0,0375 g Pt/kW\*\*)

Titânio

Materiais de substrato baseados em TiO<sub>2</sub>

(0,32 g Ti/kW\*\*)

Sb, Ru, Nb, Ce



## Eletrolisadores Alcalinos

Níquel, Cobalto, Platina (ou Paládio)

Tu, Co, Ru

## Eletrolisadores SOEC

Ítrio (14g Y/kW capacidade\*\*)

Lantânio

Estrôncio e Titânio

Escândio (23g Sc/kW \*\*)

Níquel

Manganês

Ce, Sm, Gd, Nd, Ho, Cr



Cobre – ligas de Ni, cablagem; Grafite – placas bipolares; Alumínio- gestão térmica do stack

## Outros materiais necessários para:

- Catalisadores para produção e *cracking* de amoníaco: Ru, Ni, outros?
- Para transporte nas redes de gás natural
  - Purificação de H<sub>2</sub> por PSA (*pressure swing adsorption*): Si, Na, Al, Pd (testes com várias membranas)
  - Compressores centrífugos de H<sub>2</sub>: Ti (em teste)

\* [https://www.royce.ac.uk/content/uploads/2021/06/Materials-for-End-to-End-Hydrogen\\_Roadmap.pdf](https://www.royce.ac.uk/content/uploads/2021/06/Materials-for-End-to-End-Hydrogen_Roadmap.pdf)

\*\* <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/er.6487>

# Competição futura por materiais?



**“ambitious H<sub>2</sub> scenario”**  
8100 PJ H<sub>2</sub> na Europa em 2050  
(~60% consumo atual energia na Alemanha)  
Aumento de 7x da atual capacidade produtora



**Estimativa de materiais necessários em 2050 apenas para a eletrólise: que % na produção global atual?**

100% H<sub>2</sub> verde

50-50 eletrolisadores PEM/ALK

Substituição de capacidade de eletrolisadores entre 2020-2050

PEM tempo vida 7 anos, ALK tempo vida 10 anos

## **Írídio (H<sub>2</sub> 122%)**

Eletrolisadores PEM

Eletrónica (43%)

Eletroquímica (27%)

Indústria química (7%)

## **Platina (H<sub>2</sub> 25%)**

Eletrolisadores PEM/ALK

Catalisadores automóveis (80%)

Joalheria (10%)

Indústria química (10%)

## **Níquel (H<sub>2</sub> 2,4%)**

Eletrolisadores ALK

Aço

Magnetos

Baterias

Moeda

Ligas

Indústria química

## **Cobalto (H<sub>2</sub> 0,1%)**

Eletrolisadores ALK

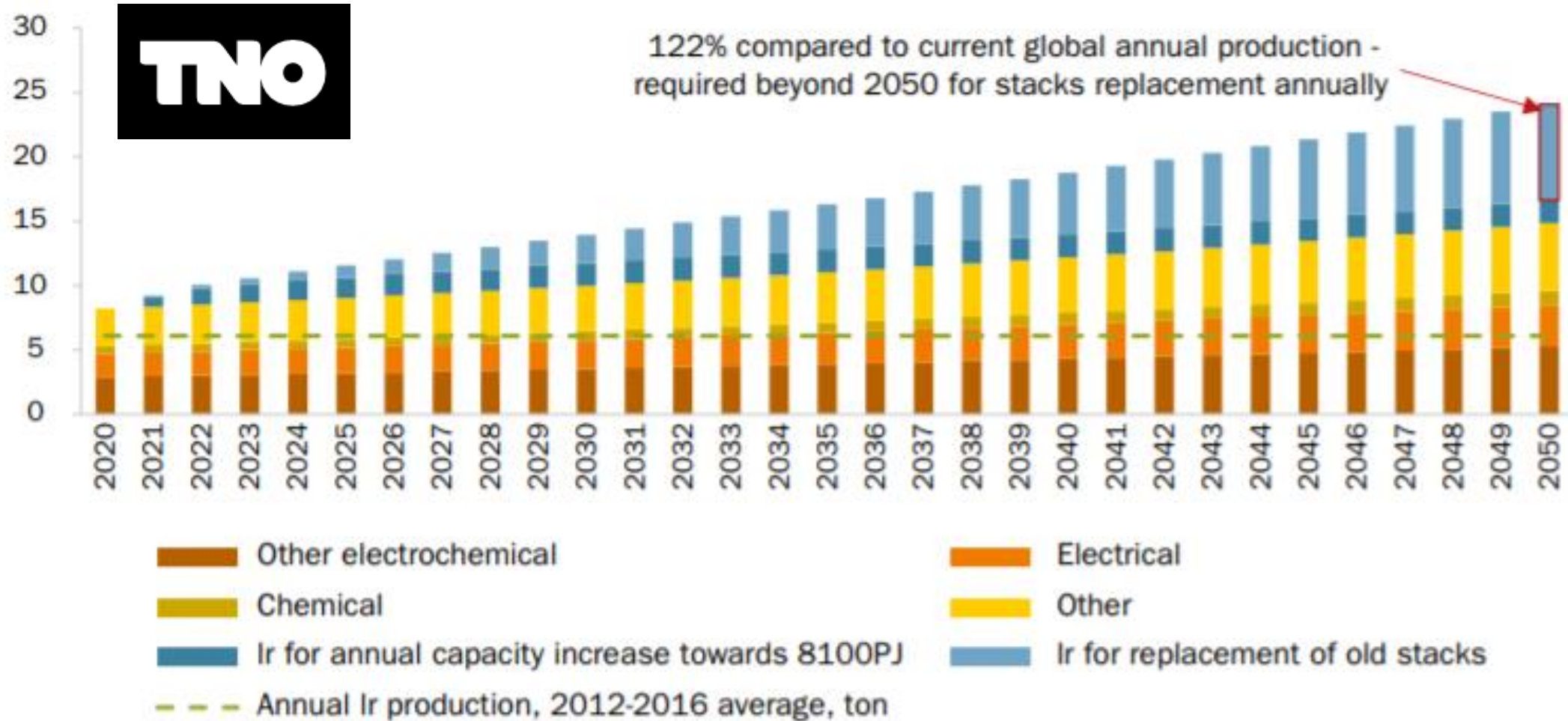
Baterias (42%)

Ligas (23%)

Outros (10%)

<https://www.tno.nl/en/focus-areas/strategic-analysis-policy/expertise-groups/strategic-business-analysis/electrolysis/>

# Simulação da procura europeia de irídio (t/ano)



# Mercados e criticalidade

## Como definir a criticalidade destes materiais?

- Disponibilidade do recurso
- Risco de rutura na cadeia de abastecimento
- Aspetos geopolíticos
- Volatilidade de preços

*“O custo do catalizador de platina representa apenas cerca de 8%\* do custo total do eletrolisador, mas as fragilidades da cadeia de abastecimento mundial e volatilidade dos mercados podem travar o desenvolvimento dos eletrolisadores PEM.”*

*Katherine Ayers, vice-presidente para investigação da Nel*

<https://www6.slac.stanford.edu/news/2019-10-14-study-shows-much-cheaper-catalyst-can-generate-hydrogen-commercial-device.aspx>

## Produção mundial em 2020 (USGS)

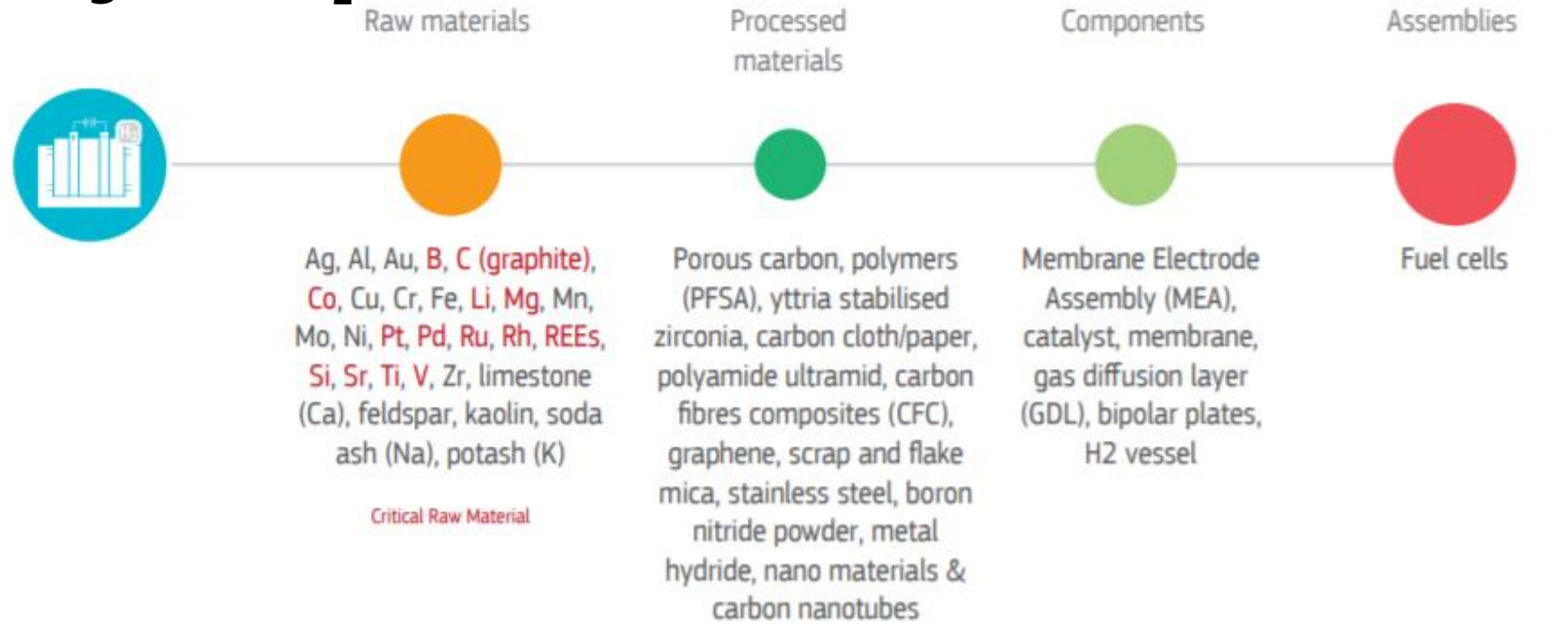
- **Pt:** 70% ZA, 12% RU, 8% Zimbabué, 5% Canadá
- **Co:** 68% Congo; 4,5% RU, 4% AU
- **Ti:** 28% CN, 15% ZA, 12% AU, 8% Canadá
- **1/3 produção Y** é subproduto da extração de Sa (13%), Ce (9%), La (5%), Fe (3%) & Se e Ti (<1%)
- **Terras raras:** 58% CN, 16% US, 13% Burma, 7% AU

**entre 1 Dez 2020 e o final Mar 2021 o preço do Ir aumentou de \$1,670 para \$6,000/Oz**

\* Outras fontes referem valores de 50% do custo total



# Materials e tecnologias de H<sub>2</sub> – cadeia de valor na UE



# Considerações finais

- A evolução da capacidade a instalar de hidrogénio por eletrólise não será linear como assumido no estudo do TNO e sim exponencial. Qual o impacto da concentração deste faseamento em menos anos?
- Deverá haver competição entre diferentes usos de materiais com impactos nos preços. Poderá haver uma priorização de usos de materiais escassos? Eletrónica *versus* energia?
- Deverá haver competição entre materiais entre regiões do planeta
- Diversos esforços no sentido da reciclagem e substituição de componentes

**“Garantir a disponibilidade de materiais críticos é uma tarefa à escala nacional e Europeia e envolve geopolítica, estratégia e regulamentação”\*\***

## Abordagens para reduzir risco de disponibilidade de materiais

- Desenhar para a reciclagem
- Desenvolver tecnologia de eletrólise usando outros materiais
- Aumentar tempo de vida dos eletrolisadores

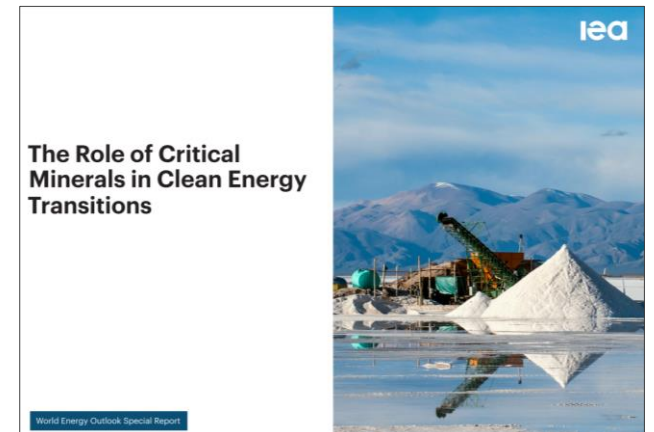
*Uma alternativa à Platina e irídio poderá ser um catalizador usando nanopartículas de fosforeto de cobalto\**

\* <https://www.nature.com/articles/s41565-019-0550-7>

\*\* <https://www.tno.nl/en/focus-areas/strategic-analysis-policy/expertise-groups/strategic-business-analysis/electrolysis>

**“New and more diversified supply sources will be vital to pave the way to a clean energy future. A strong focus on recycling, supply chain resilience and sustainability will be essential”**

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>



# Necessidades de água para produção de hidrogénio via eletrólise

**LNEG** INVESTIGAÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE **POLICYBRIEF**

## ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE (RENOVÁVEL) VIA ELETRÓLISE EM PORTUGAL

Junho 2021

**Autoras**  
Sofia G. Simões, Filipa Amorim, Justina Catarino, Carmen M. Rangel, Tiago Lopes, Francisco Gírio, Ana Picado, Teresa Ponce de Leão  
sofia.simoes@lneg.pt

**Problema**  
Quais as melhores fontes de água para produção de H<sub>2</sub> verde via eletrólise?

**Fontes de água**  
- Superfícies (rios, lagoas, açudes, etc.)  
- Subterrâneas  
- Resíduos (efluentes urbanos)  
- Mar  
- Rede Pública

**Qualidade**  
Análise qualitativa das fontes de água  
- Disponibilidade  
- Qualidade

**Apelo à tomada de decisão**  
Análise de custo e risco associada para a tomada de decisão  
- Disponibilidade  
- Qualidade  
- Sustentabilidade

**Custos**  
Análise de custo associada à produção de H<sub>2</sub> verde  
- Disponibilidade  
- Qualidade  
- Sustentabilidade

**QUAIS AS FONTES DE ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE EM PORTUGAL?**

O hidrogénio está na ordem do dia das agendas da política mundial. Em Portugal, o hidrogénio verde é considerado no planeamento estratégico:

- o Plano Nacional Energia e Clima (PNIEC 2030) refere valores de H<sub>2</sub> em 2030 de 2,27 PJ (22 697 t) que representam aproximadamente 304 000m<sup>3</sup> de água (0,4% do volume de águas residuais tratadas com tratamentos terciários em 2018);
- o Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica (RNC 2050) refere valores de H<sub>2</sub> em 2030 de 50 PJ (418 666 t) que representam aproximadamente 6 050 000m<sup>3</sup> de água (~1% do volume de águas residuais tratadas com tratamentos terciários em 2018);
- a Estratégia Nacional para o Hidrogénio EN-H2, cerca de refere valores de H<sub>2</sub> em 2030 de 50 PJ (418 666 t) que representam aproximadamente 6 050 000m<sup>3</sup> de água (~1% do volume de águas residuais tratadas com tratamentos terciários em 2018).

Quais os tipos de fonte de água disponíveis em Portugal para alimentar projetos de produção de H<sub>2</sub> por eletrólise?

Qual a qualidade de água necessária?

Quais as implicações da utilização de diferentes fontes de água nos custos de produção de H<sub>2</sub> verde?

[https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2021/10/PB\\_UER\\_Fontes\\_de\\_Agua\\_para\\_H2\\_2021\\_PT\\_v7.pdf](https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2021/10/PB_UER_Fontes_de_Agua_para_H2_2021_PT_v7.pdf)

Journal of Cleaner Production 315 (2021) 128124

Contents lists available at ScienceDirect

**Journal of Cleaner Production**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro)

## Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production

Sofia G. Simoes, Justina Catarino, Ana Picado, Tiago F. Lopes, Santino di Berardino, Filipa Amorim, Francisco Gírio, C.M. Rangel, Teresa Ponce de Leão

Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. Estrada da Portela, Bairro de Zambujal Ap 7586 2700-990, Amadora, Portugal

**ARTICLE INFO**

Handling editor: Yuesong Wang

**Keywords**  
Energy  
Hydrogen production  
Sustainability index  
Sustainable value  
Water  
Water electrolysis

**ABSTRACT**

Europe is committed to a new growth strategy with no net greenhouse gases emissions by 2050, where hydrogen has a clear role to play. Portugal's strategy for H<sub>2</sub> sets public policies promoting an industry focused on the hydrogen value chain. Considering the production of green hydrogen from renewable sources is key, water electrolysis becomes a priority, and with it, the need to assess the suitability of water sources, which is determined by both quantitative and qualitative factors. This work presents a new approach to assess the suitability of water sources for hydrogen production via water electrolysis by applying a Sustainable Value Methodology for decision-making support, combining economic, environmental and social criteria. The approach is applied to two different sites in Portugal: a semi-urban location on the Atlantic coast (site A) and a rural area far from the coast (site B). For both sites, water sources are evaluated regarding water availability, quality, transport options, abstraction costs, treatment needs and regulation (including environmental constraints) and social acceptance. The resulting sustainable value indicator, aggregator of different levels of information, enables a relative quantitative comparison of the performance of different water sources for electrolysis and the involved costs. It is found that the public grid water is the most suited source of water for electrolysis due to lower risk of supply, lower costs and avoids complex permitting processes. Likewise, seawater and wastewater treatment plant effluent (only in site A) showed to be possible water sources where the factors most affecting suitability are transport costs for water and waste disposal from water treatment.

**1. Introduction**

Europe is committed to a new growth strategy that will transform the Union into a modern, resource-efficient and competitive economy, aiming for carbon neutrality by 2050 (European Commission, 2018) and for decoupling economic growth from resource use. The European Green Deal is the plan for a sustainable economy in Europe (European Commission, 2019).

In 2020, after the adoption of the European Industrial Strategy, a plan for a future-ready economy, and of proposal of a Circular Economy Action Plan focusing on sustainable resource use, the EU also adopted the strategies on energy system integration (European Commission, 2020a) and on hydrogen (European Commission, 2020b) to pave the way towards a fully decarbonised, more efficient and interconnected energy sector. As stated by the IEA (2019), this is a critical time for hydrogen, which is today enjoying unprecedented momentum. The world should not miss this unique chance to make hydrogen an important part of our clean and secure energy future (Fatih Birol in IEA, 2019). The EU hydrogen strategy foresees at least 6 GW of renewable hydrogen electrolyzers deployed up to 2024, producing up to 1 million tonnes of H<sub>2</sub>.

Cycles of expectations followed by disillusion are associated to H<sub>2</sub> technologies (Staffell et al., 2019). On the production side, hydrogen can be produced from different sources, namely fossil fuels, biomass, and water electrolysis powered with electricity, naturally with different degrees of impact on the environment (Partidário et al., 2019). For H<sub>2</sub> to make a significant contribution towards the clean energy transition, it needs to be adopted in sectors where it is almost completely absent, such as transport, buildings, and power generation (IEA, 2019).

According to Blank and Mollay (2020), roughly 96% of H<sub>2</sub> produced

\* Corresponding author.  
E-mail addresses: [sofia.simoes@lneg.pt](mailto:sofia.simoes@lneg.pt) (S.G. Simoes), [justina.catarino@lneg.pt](mailto:justina.catarino@lneg.pt) (J. Catarino), [ana.picado@lneg.pt](mailto:ana.picado@lneg.pt) (A. Picado), [tiago.lopes@lneg.pt](mailto:tiago.lopes@lneg.pt) (T.F. Lopes), [santino.diberardino@lneg.pt](mailto:santino.diberardino@lneg.pt) (S. di Berardino), [filipa.amorim@lneg.pt](mailto:filipa.amorim@lneg.pt) (F. Amorim), [francisco.girio@lneg.pt](mailto:francisco.girio@lneg.pt) (F. Gírio), [carmen.rangel@lneg.pt](mailto:carmen.rangel@lneg.pt) (C.M. Rangel), [teresa.leao@lneg.pt](mailto:teresa.leao@lneg.pt) (T. Ponce de Leão).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>  
Received 10 November 2020; Received in revised form 4 June 2021; Accepted 25 June 2021  
Available online 27 June 2021  
0959-6526/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>



**LNEG**  
Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I. P.

 Geology and Geological Risk	 Mineral Technology	<b>BUILDING A STRONGER AND CLEANER FUTURE</b>	
 Resource Economics	 Geo-Information		 Geological Resources
 Bioenergy and Biorefineries	 Energy in the Built Environment		 Integration of Renewable Energies in the Energy System
	 Materials for Energy		 Renewable Energies



<http://www.lneg.pt>



LNEG Estrada da Portela  
Bairro do Zambujal  
Apartado 7586. Alfragide  
2610-999 Amadora  
Portugal



+351 210 924 600 / 1



**Sofia G. Simões** [sofia.simoies@lneg.pt](mailto:sofia.simoies@lneg.pt)

