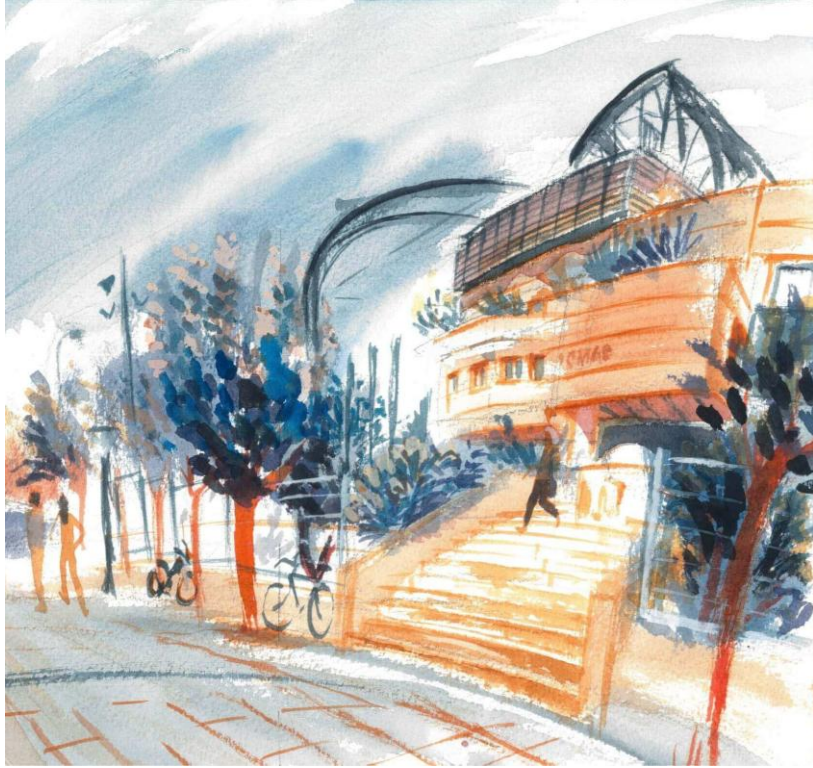




Nous paradigmes per a les xarxes elèctriques del futur

Xavier Obradors

Institut de Ciència de Materials de Barcelona, ICMAB-CSIC
Campus UAB, Bellaterra, Catalonia, Spain



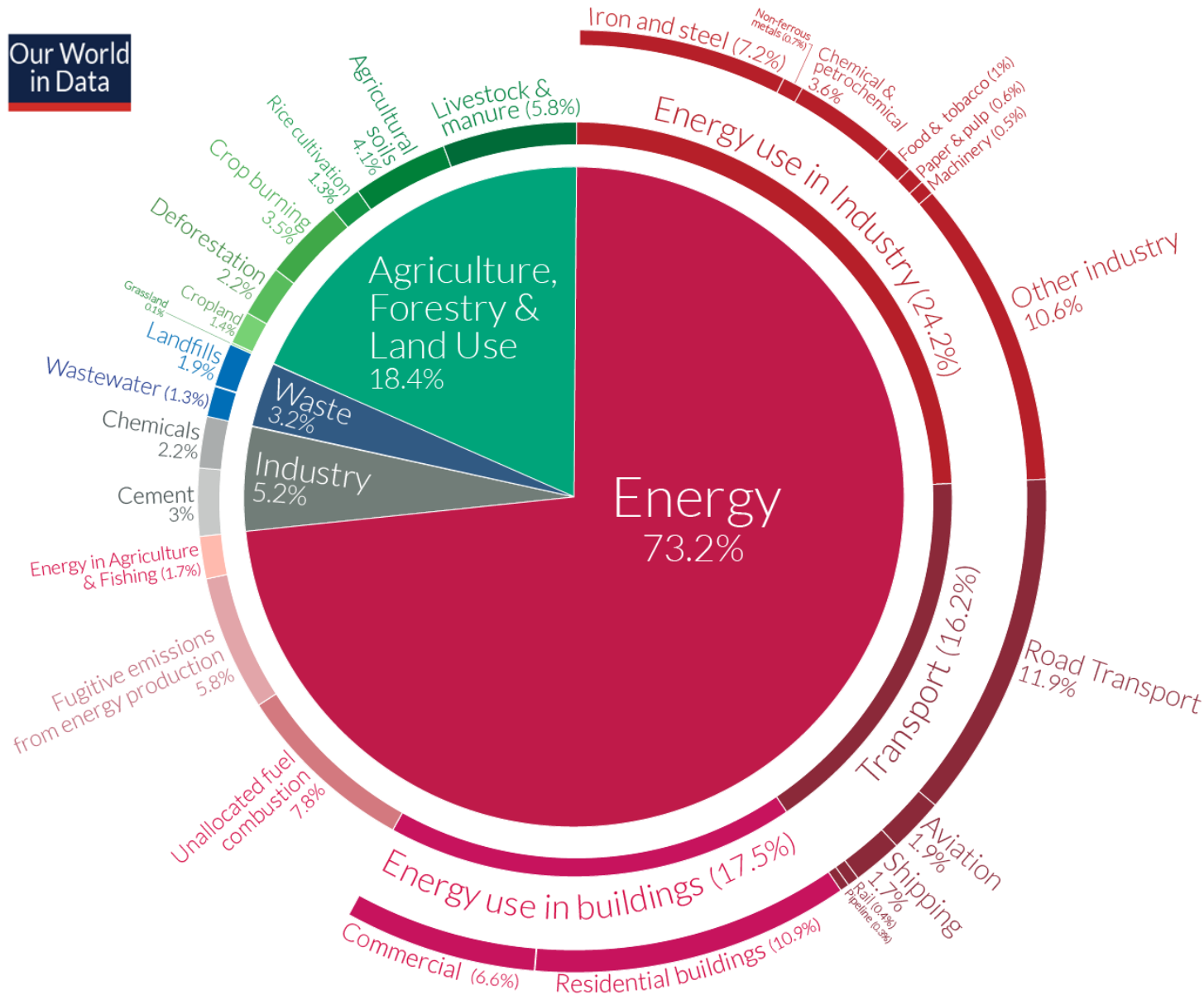
REAL ACADEMIA
DE CIÈNCIES I ARTS DE BARCELONA
Fundada el 1764

Preàmbul: crisi climàtica i transició energètica

- **Crisi climàtica**: un repte excepcional per a la humanitat
- **Repte global**: el nostre compliment en els objectius no assegura reeixir en el repte
- **Transició energètica**: canvi de paradigma en la indústria més gran del món
- Objectius a llarg termini (**aturar i revertir**) i a curt termini (**adaptació i mitigació efectes**).
- Existeix un “**gap**” **considerable** entre la xarxa elèctrica de que disposem i el que es necessita per a transmissió (**capacitat x 3 en 25 anys!**)
- Ens calen **tecnologies disruptives** sostenibles i competitives (**superconductivitat**)
- Missatge positiu (no catastrofista): tenim capacitats (**coneixement, ciència, medis**) per reeixir
- Comunicació: temps convulsos. El rigor substituït per la **demagògia, la mentida i el populisme**
- Crisi climàtica afectada pel **negacionisme i el NIMBY**: cal una lluita aferrissada contra la desinformació interessada, el dubte científic (arma del negacionisme) i la manca de solidaritat

Emissions Gasos Efecte Hivernacle (GEH) per sector

Our World
in Data



Sectors generadors de GEH

Segle XX: energies fòssils (75-85 %)

GEH equivalent: ~ 30.000.000.000 Tm CO₂
(~ 7 Tm CO₂/càpita)

La crisi climàtica

Crisi energètica: necessitat de la transició energètica neutre en carboni

Darrers 70 anys (càpita)

Població: x 3

Consum energia: x 6 (x 2)

GEH: X 4 (x 1.3)

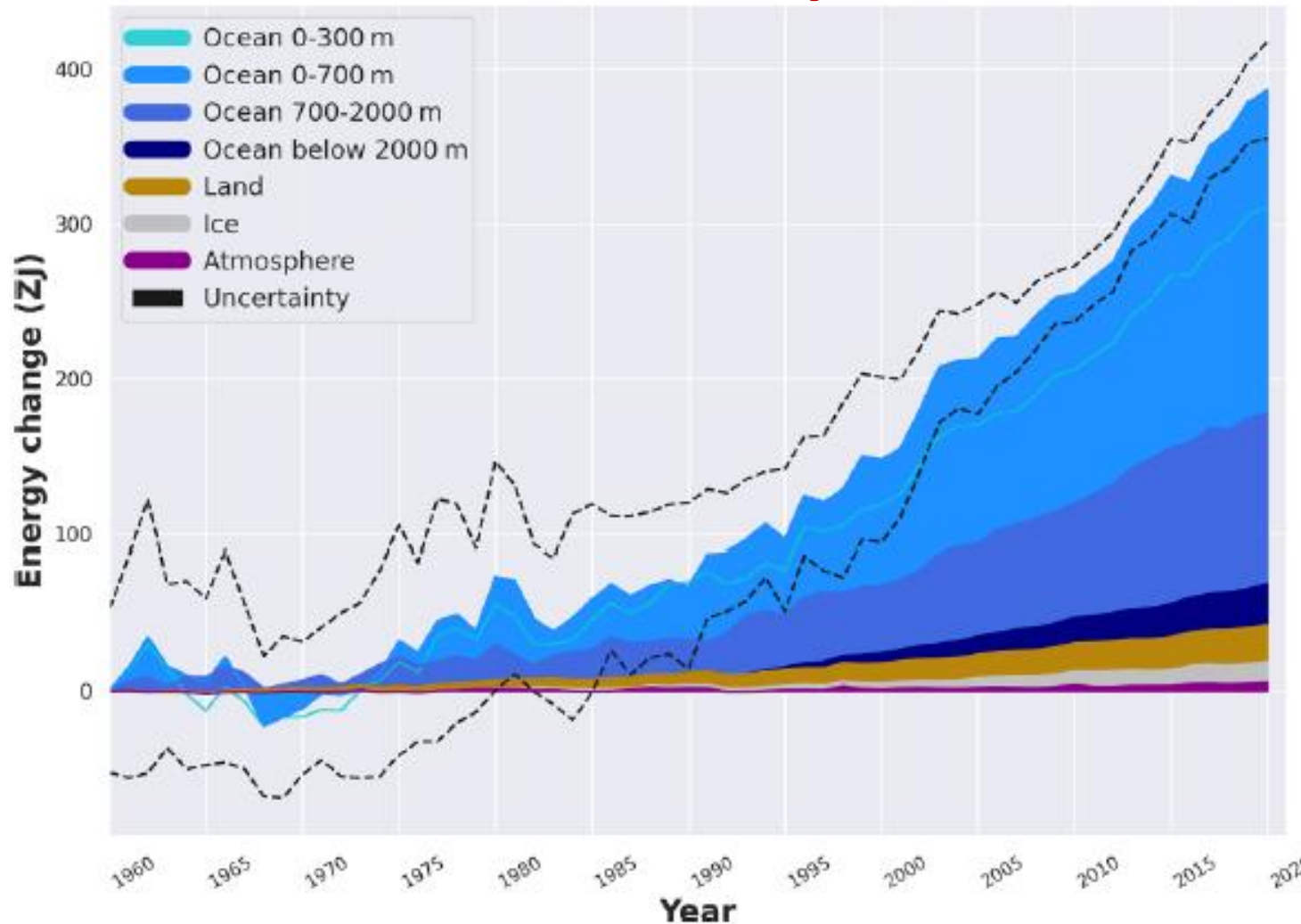
PIB: X 12 (x 4)

Desacoplament PIB – CO₂

30 % regions del món ho han aconseguit!

Energia acumulada a la terra degut a l'efecte hivernacle (6 % radiació IR)

1 ZJ (zeptajoule) = 10^{21} J

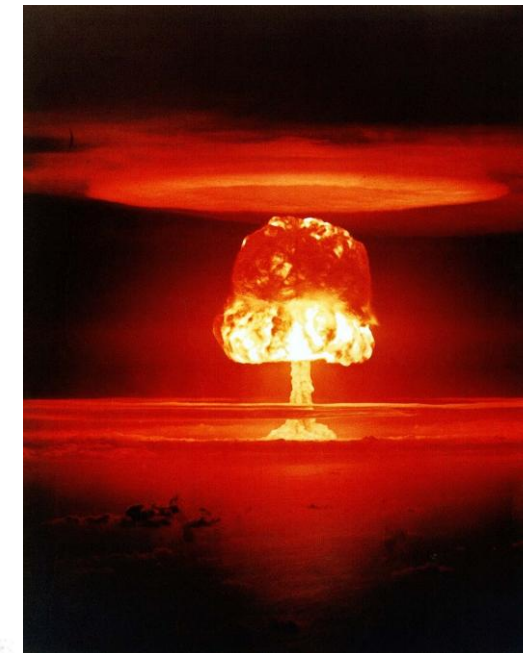


89 % mar

5 % Terra

4 % crioesfera

2 % atmosfera

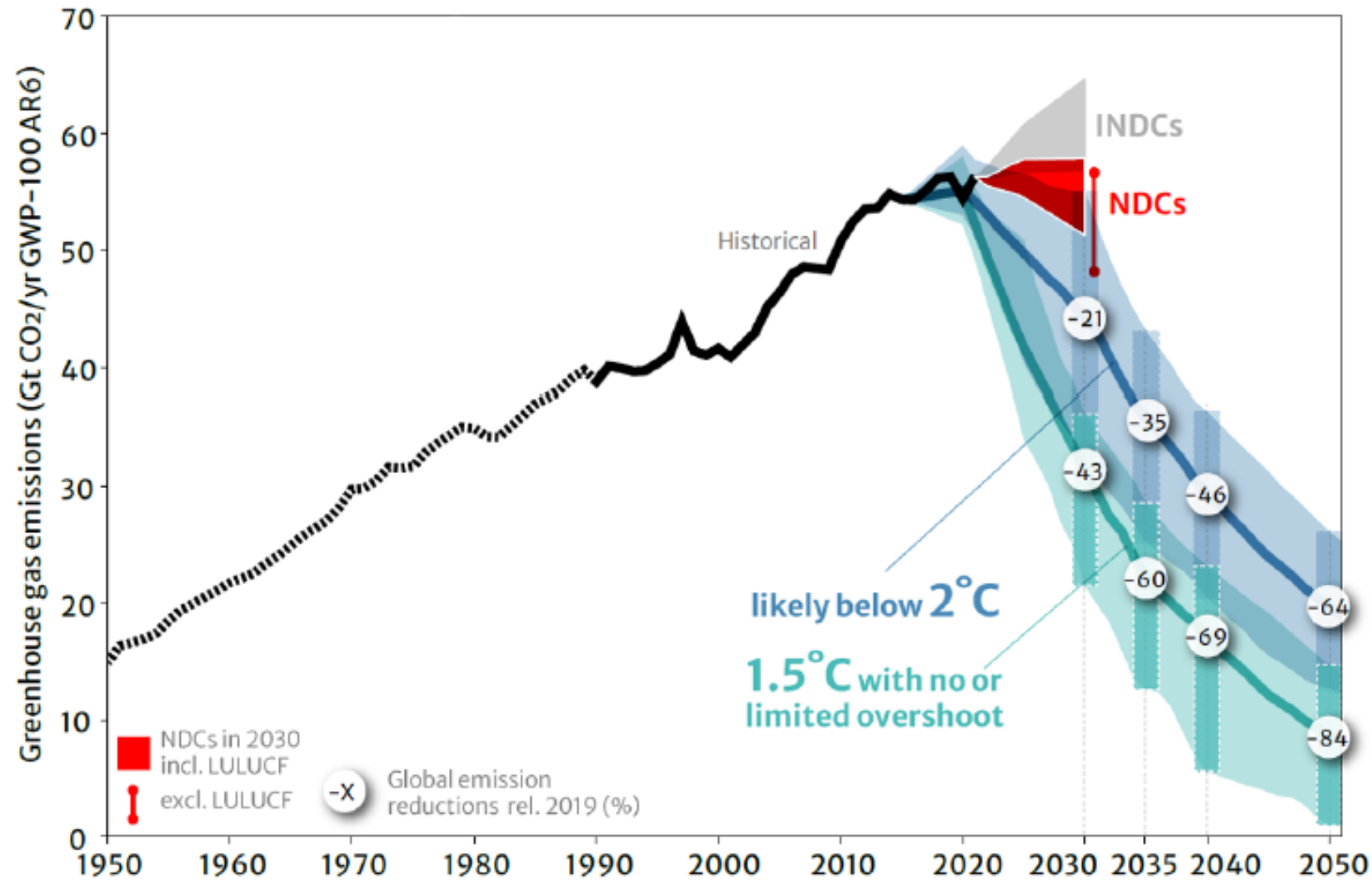


Desbalanç
també amb
energies
renovables ?

- Generació equivalent calor: (1 bomba atòmica Hiroshima / 30 s) during 60 anys
- Actualment fins i tot pitjor: ~ 1 bomba atòmica Hiroshima / 15 s

Estabilització clima: reducció emissions carboni

Emissions annuals GEH equivalent: $\sim 60.000.000.000 \text{ Tm CO}_2$



Informe NU 2023

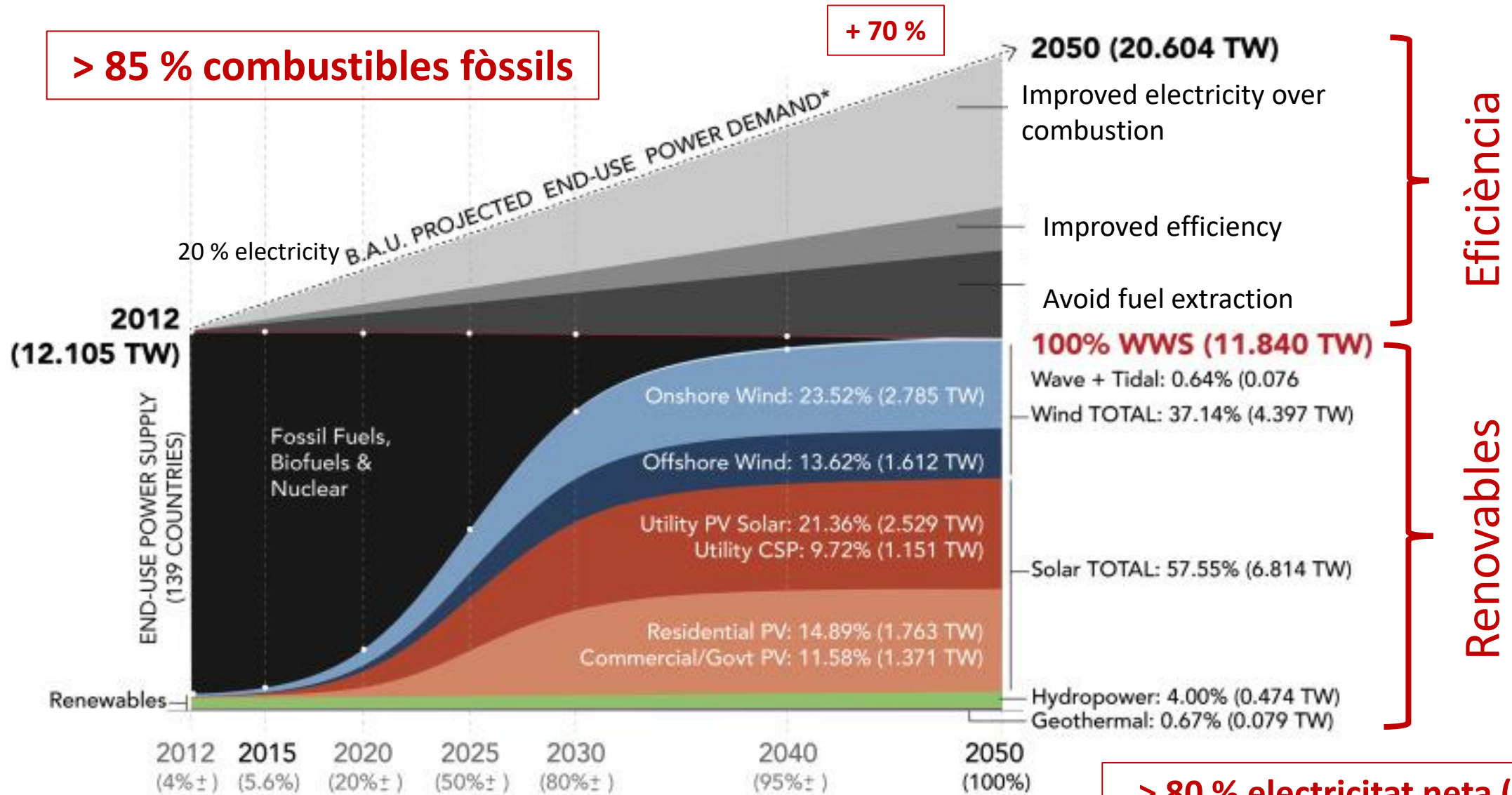
Acord Paris IPCC (2015):
+1.5 °C in 2050 !

Reptes intermedis (- CO₂):

- 45% el 2030
- 70% el 2040
- 85% el 2050!

Necessitem passar pel pic d'emissions urgentment!

Transició energètica: full de ruta global



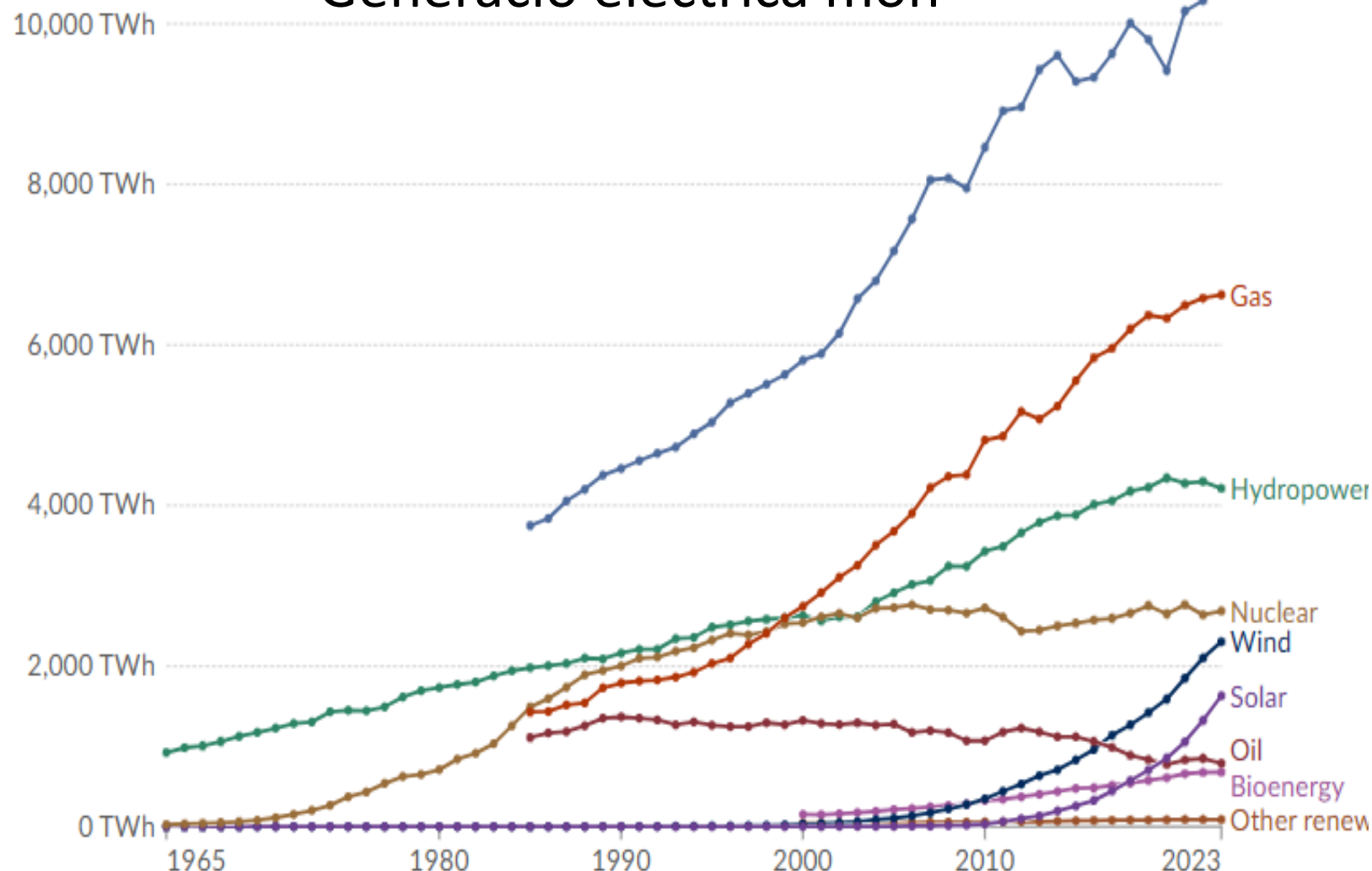
> 80 % electricitat neta (20 % actual)

- Balanç net positiu de ~ 25 milions de llocs de treball**

M.Z. Jacobson et al., Joule 1, 108 (2017)

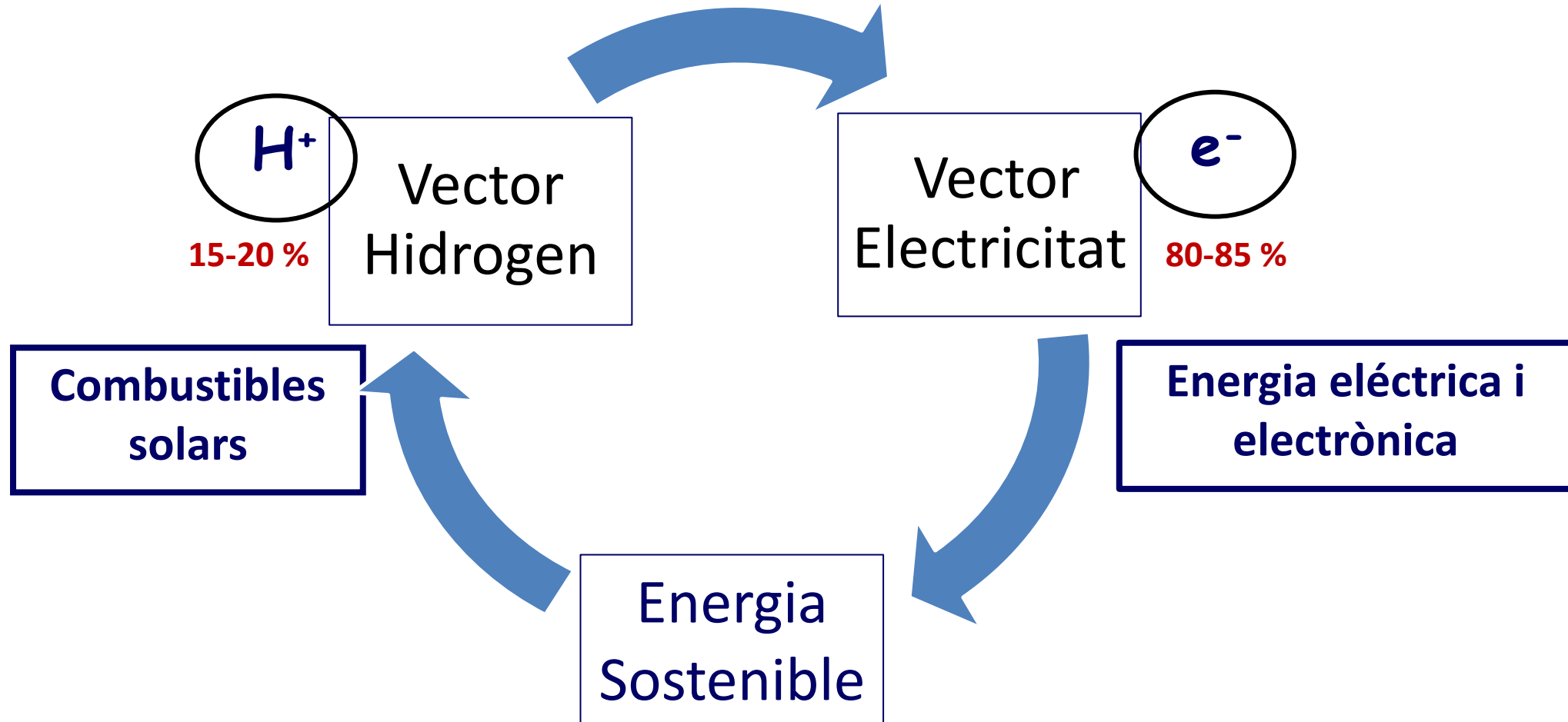
Creixement mundial de les energies renovables

Generació elèctrica món



- Urgent revertir les inversions en energies fòssils cap a les renovables!
- Els usuaris finals tenen poder per impulsar aquesta transició
- Exemple: Taiwan (Nº 1 al món producció semiconductors). Del carbó a eòlica!

Un nou paradigma energètic: electricitat i combustibles renovables combinats

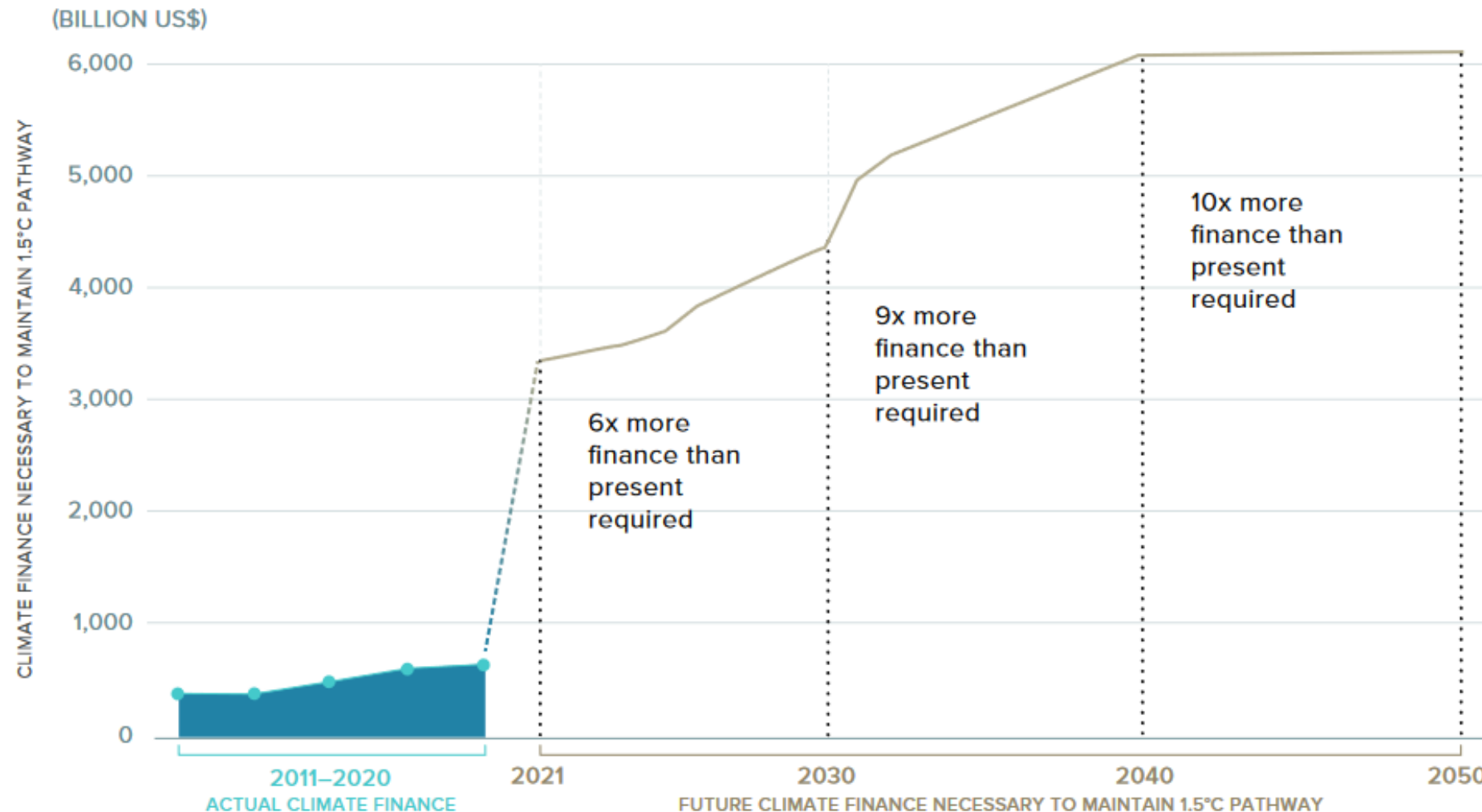


Electricitat esdevindrà el vector energètic dominant (80-85 % energia)

H_2 verd (amoniac) com a forma final d'energia?: Baixa eficiència de l'electròlisis (40 % pèrdues)!

Inversió estimada necessària per aconseguir l'objectiu $\Delta T < 1.5^\circ\text{C}$

Necessitem augmentar les inversions en un 590 % respecte valors actuals !



Cost 4-5 vegades més baix que despeses combustibles fòssils incloent emissions CO_2

Necessitem invertir 2-3 % PIB/any fins el 2050

Stern Review: “The Economics of Climate Change” (2006)

Project Drawdown (Reversion) (<https://drawdown.org/>)

Nature 619, 761 (2023)

(Nano)MATERIALS: una tecnologia facilitadora de la societat del benestar

MITIGACIÓ CANVI
CLIMÀTIC

ECONOMIA
CIRCULAR

MINIMIZACIÓ ÚS
MATERIALS CRÍTICS

Èxit cures de salut
Sistemes disruptius de diagnosi &
teràpies

Transició energètica
Mobilitat elèctrica
Indústria 5.0

Electrònica intel·ligent,
comunicacions &
computació

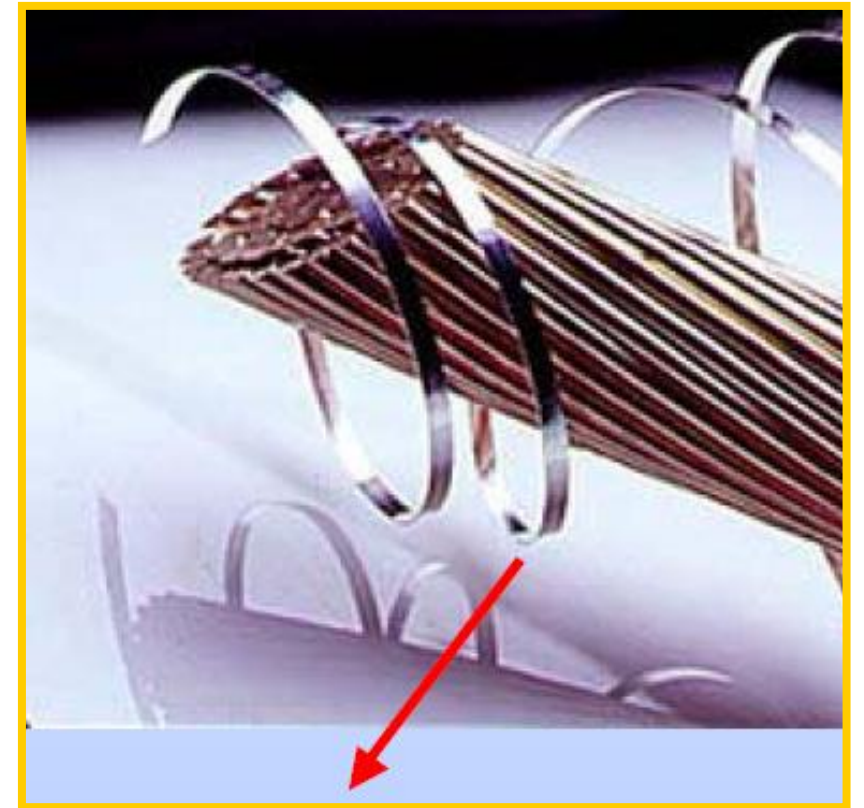
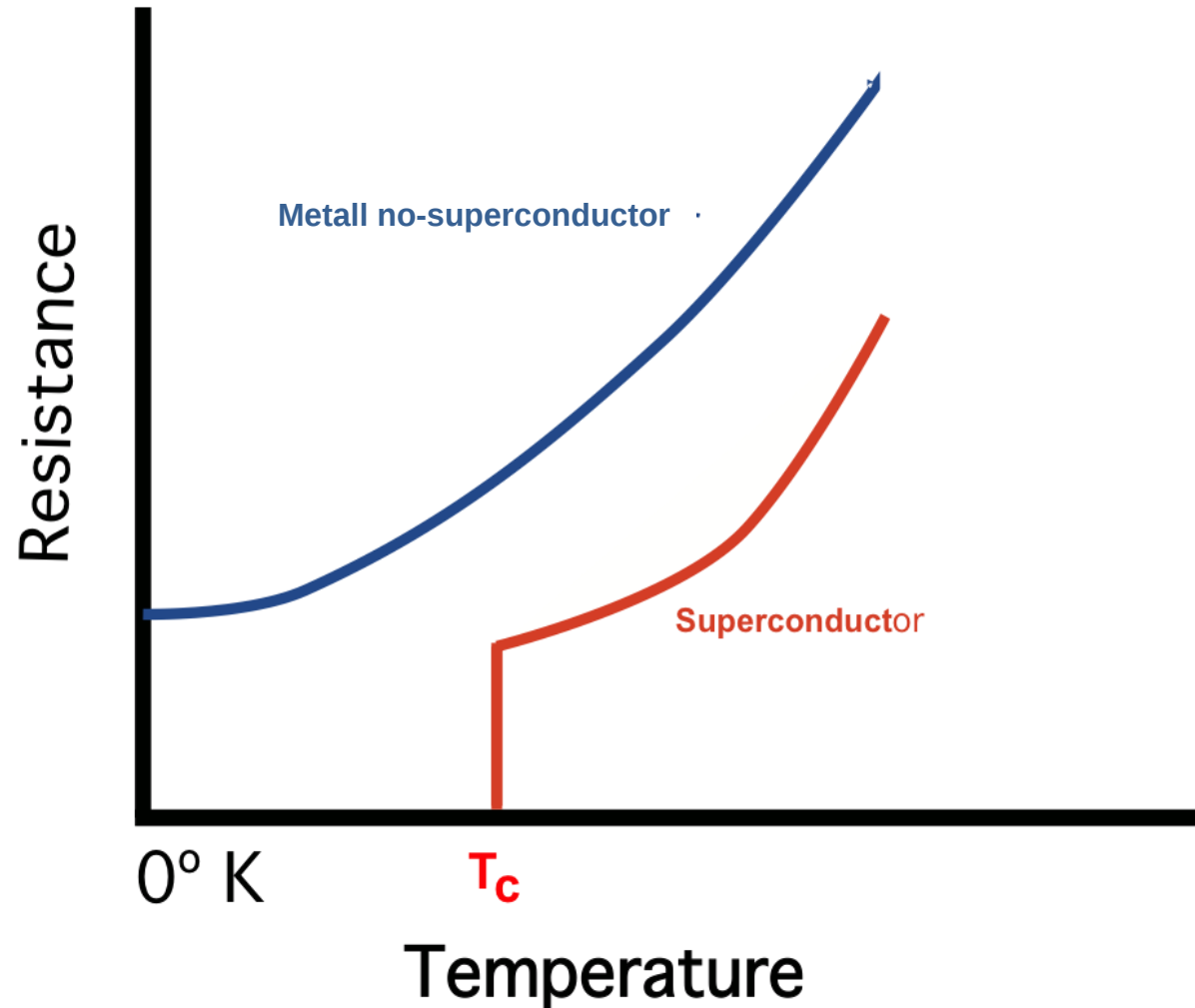
Ciència Bàsica a la
frontera del
coneixement



SOSTENABILITAT PLANETA

Superconductivitat: l'oportunitat d'un fenomen quàntic

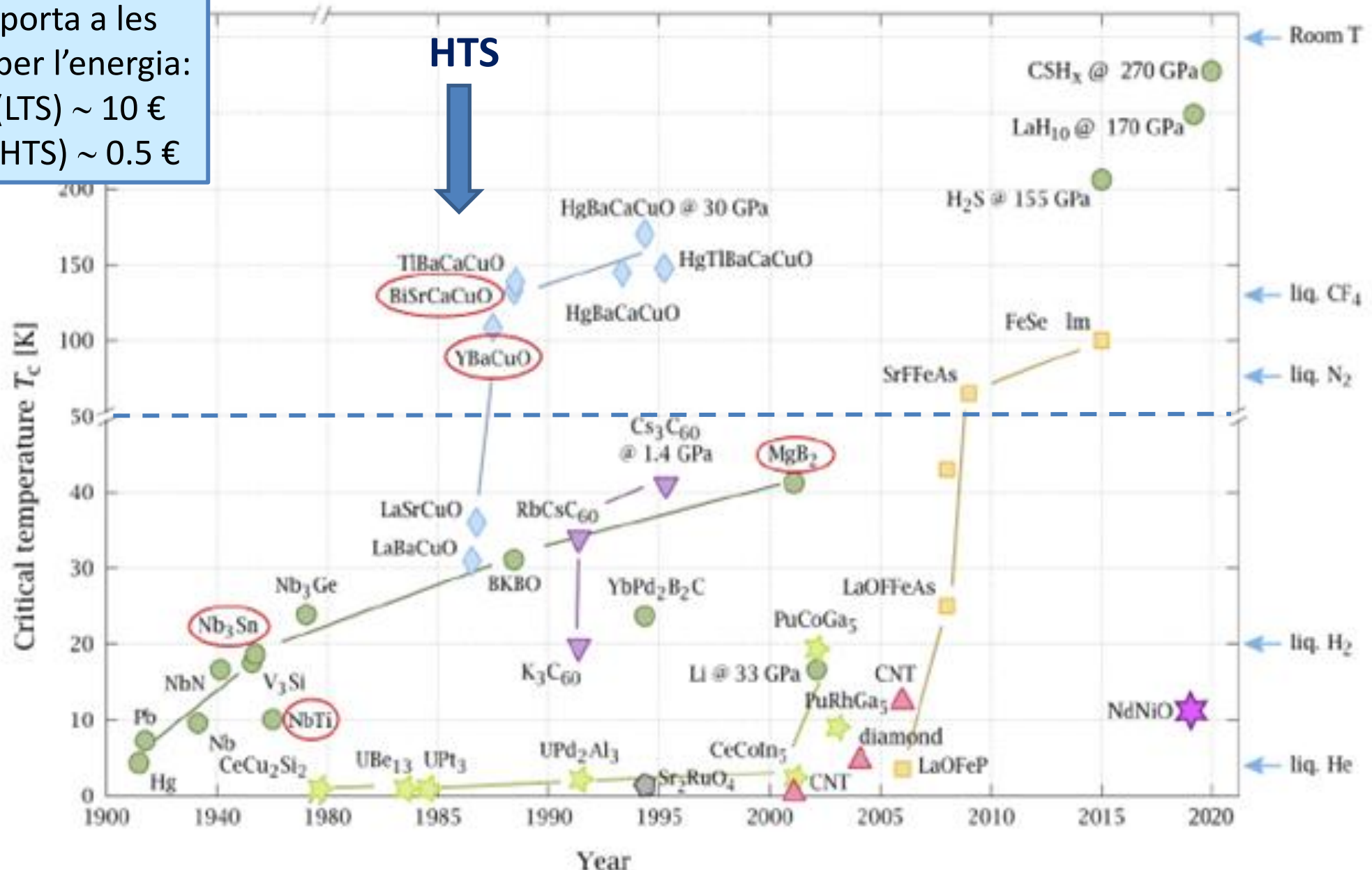
... amb 6 premis Nobel directes: 1913, 1972, 1973, 1987, 2003, 2025



Un material superconductor pot transportar corrents molt intenses sense pèrdues (x 100 vs Cu)

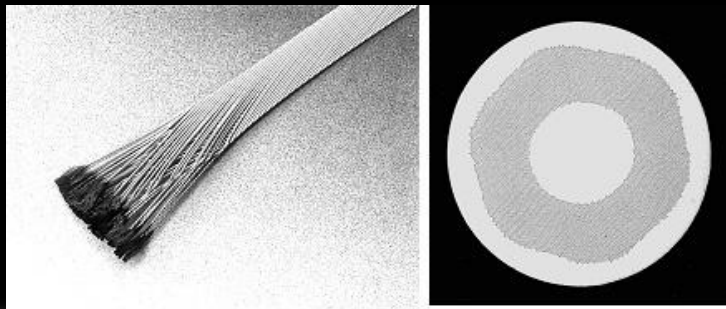
Materials superconductors alta temperatura (HTS)

HTS obren la porta a les aplicacions per l'energia:
1 litre de He (LTS) ~ 10 €
1 litre de N₂ (HTS) ~ 0.5 €

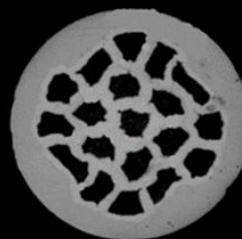


Fils, cintes i ceràmiques Superconductores

Metallic
NbTi (Nb₃Sn etc.)

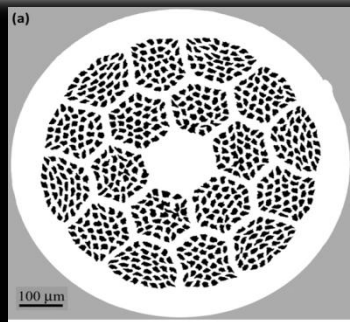


Metallic
MgB₂ / Fe based

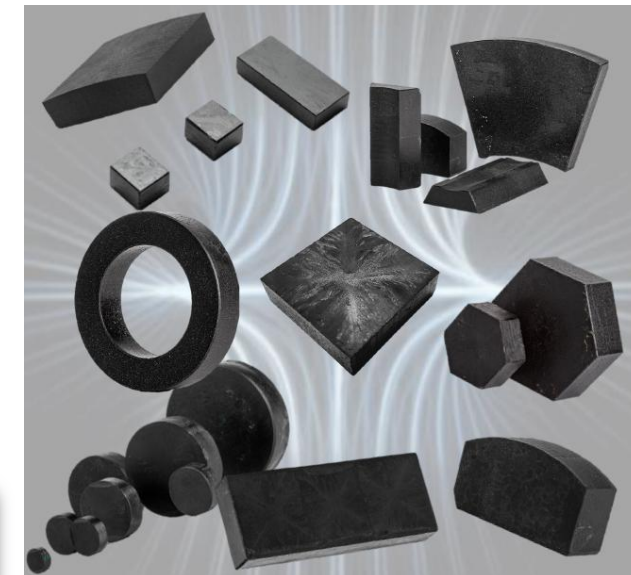
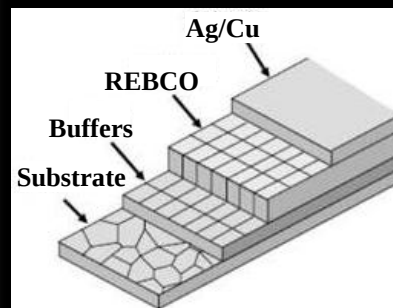


Oxide

Bi2223
Bi2212



Oxide
YBCO



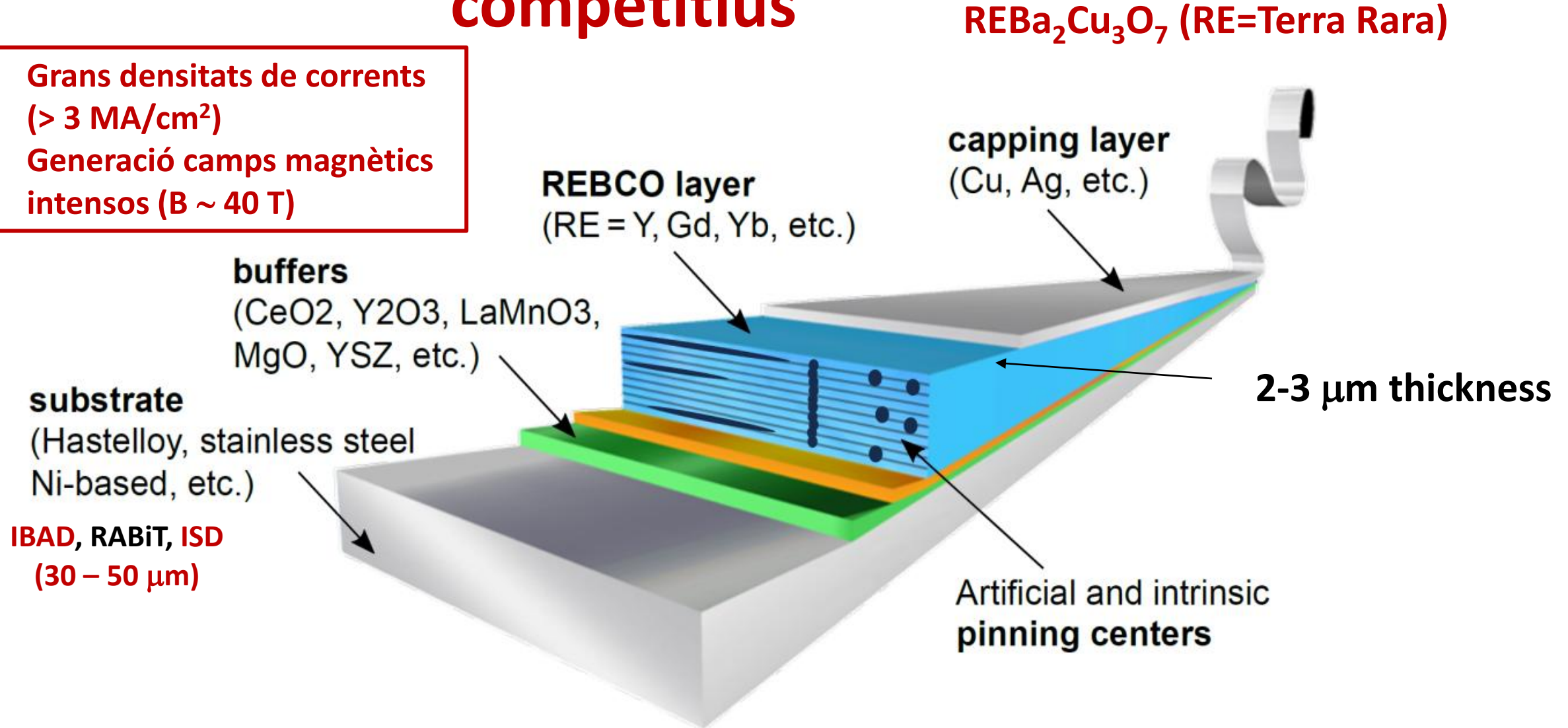
Bulk Melt textured Ceramics
REBCO: permanent magnets, levitation

can
superconductors

Només alguns materials es poden fabricar com a fils, cintes o ceràmiques màssiques!

“Coated Conductors”: els superconductors competitius

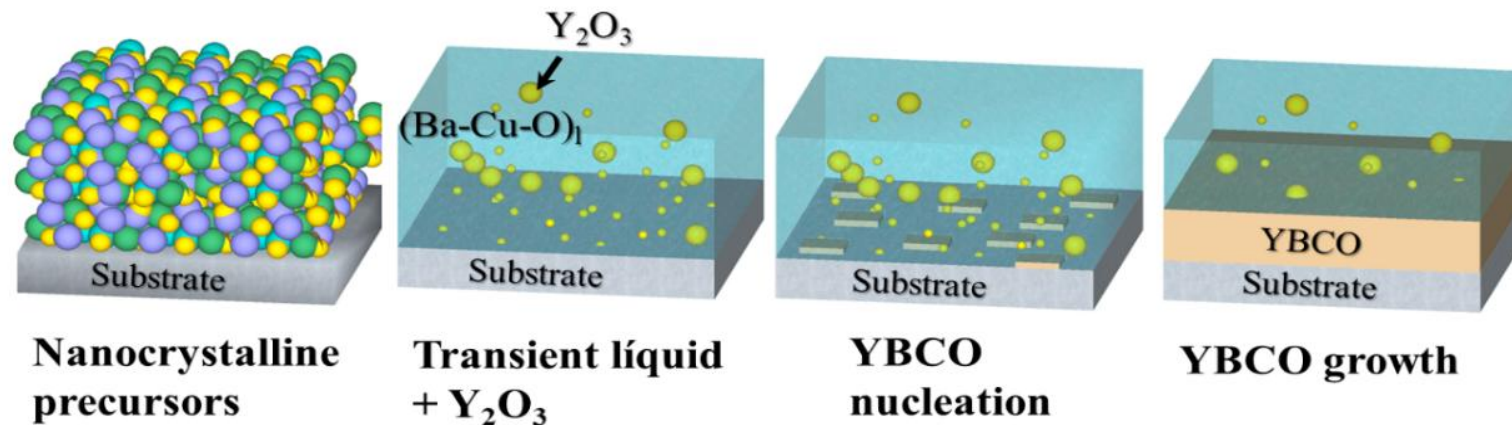
- Grans densitats de corrents ($> 3 \text{ MA/cm}^2$)
- Generació camps magnètics intensos ($B \sim 40 \text{ T}$)



Grans llargàries ($> 1 \text{ km}$) i capes superconductors epitaxials i nanoestructurades gruixudes (2-5 μm) sobre un substrat metàl·lic flexible

Metodologia baix cost ICMAB

Transient Liquid Assisted Growth (TLAG)



Creixement ultrarràpid mitjançant un líquid transitori
Baix cost: química de solucions (patent)

- Creixement ultrarràpid (millora x 100)
- Creixement en grans àrees i llargàries
- Fabricació nanocompostos: alts camps magnètics
- Reducció figura de mèrit cost/prestació (€/kA m): comercialització en curs



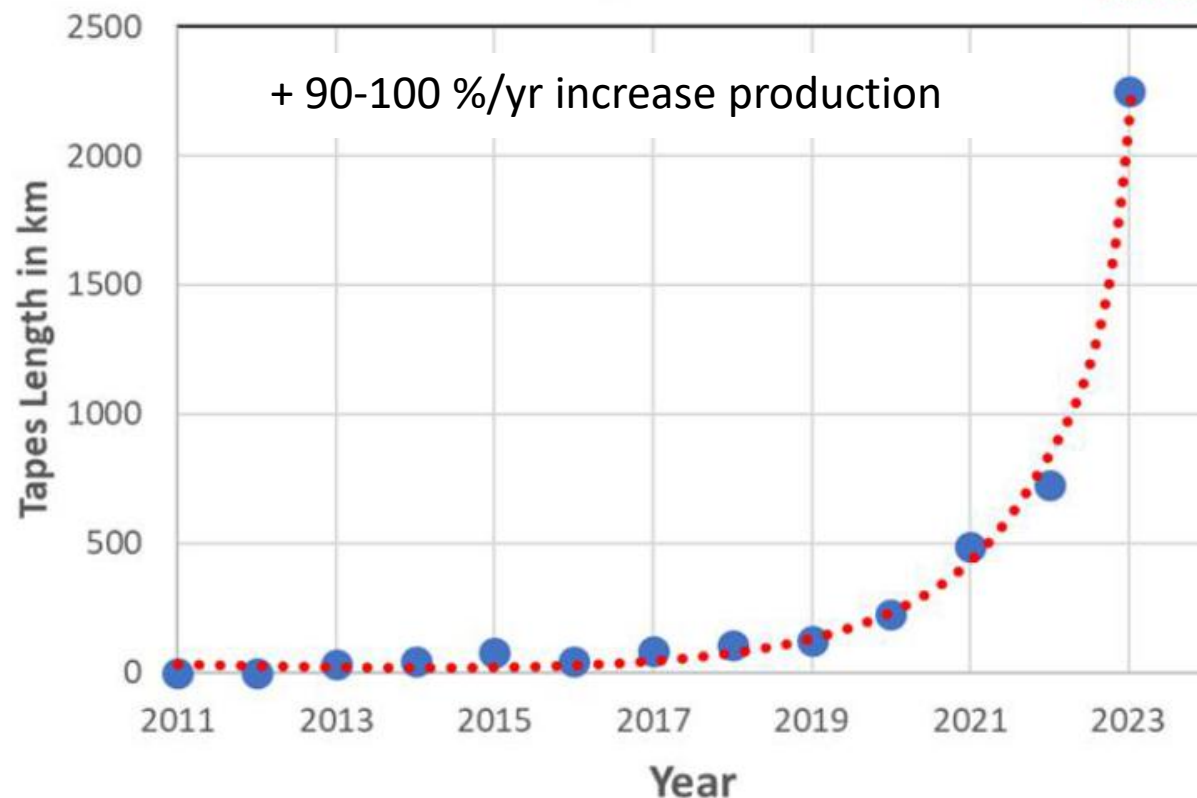
L. Soler et al., Nat Comm (2020)
S. Rasi et al., Advanced Science (2022)
Patent 2022
T. Puig, X. Obradors, Nature Rev Physics (2023)
L. Saltarelli et al., Advanced Materials (2025)

Manufactura Industrial

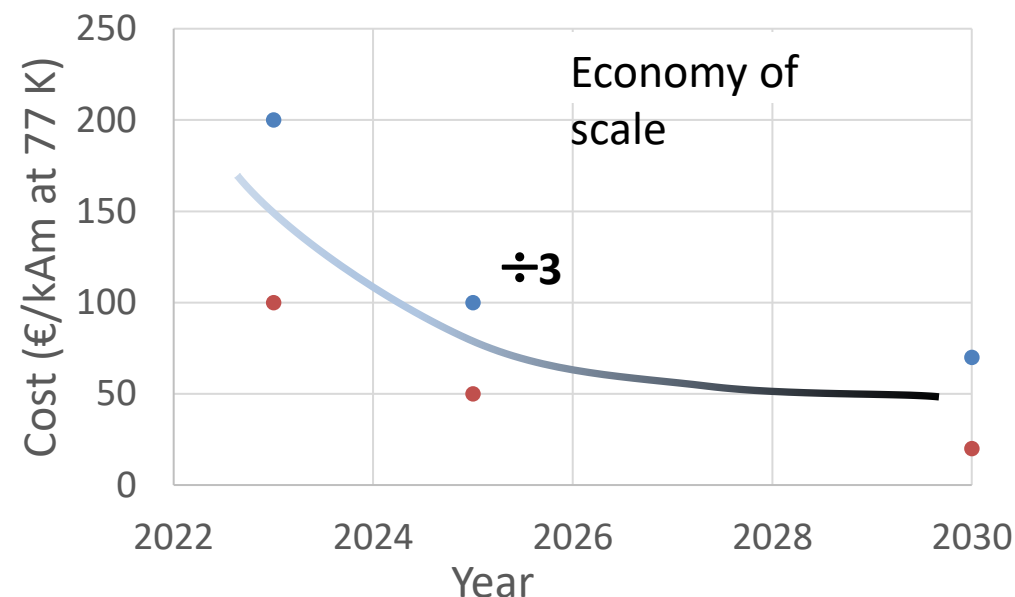
~ 10 companyies consolidades



4mm HTS Tape Production



<https://www.youtube.com/watch?v=oP51LC16nok>



- Grans esforços i inversions per augmentar la producció anual: > 5.000 km/any actualment

Figura de mèrit € / kA m

“Figura de mèrit de HTS atraparà LTS i Cu amb un augment de 10 en el volum de producció”

Manufactura Industrial

~ 10 companyies consolidades



<https://www.youtube.com/watch?v=oP51LC16nok>

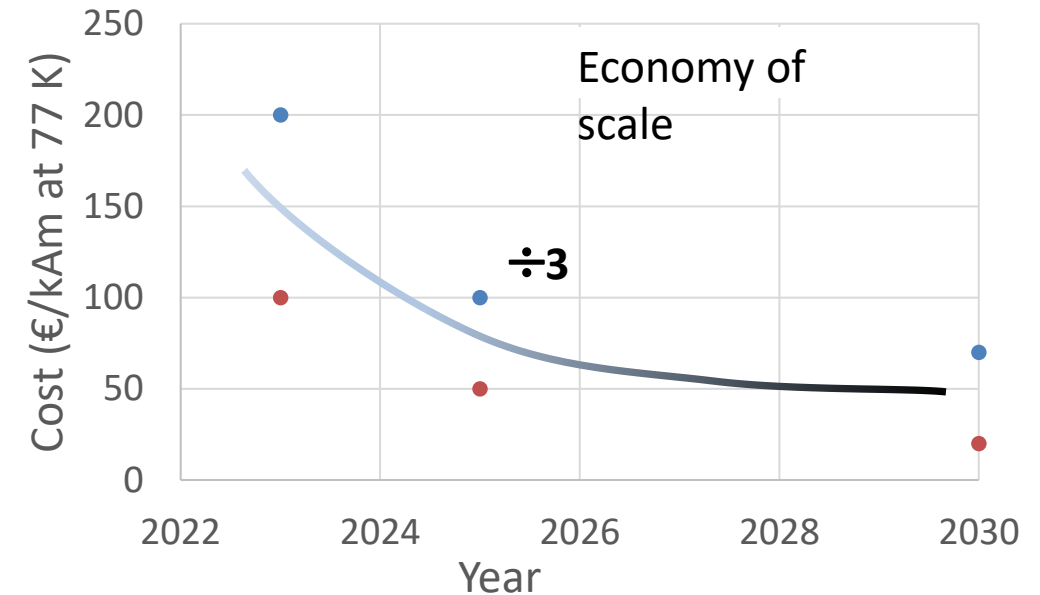


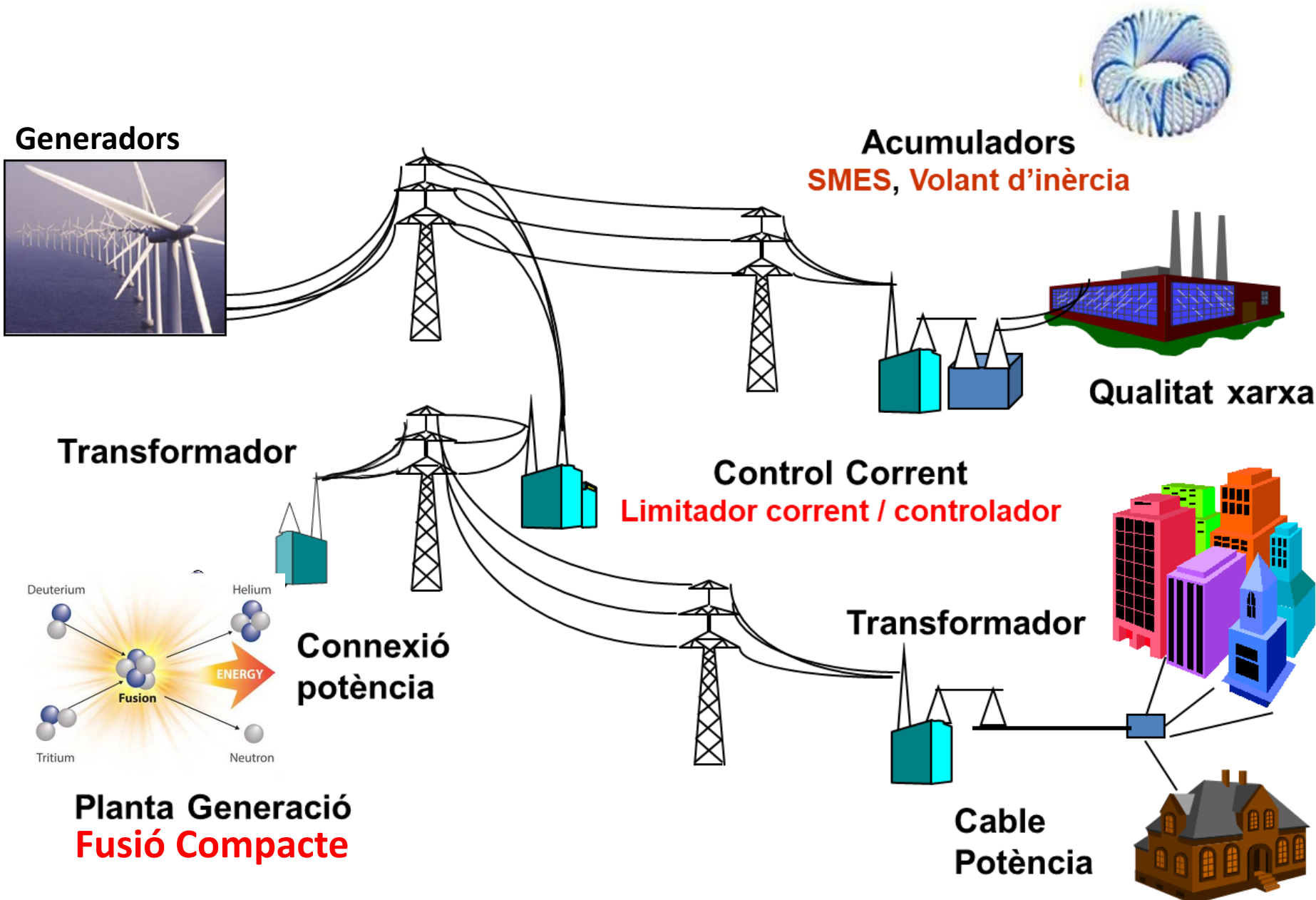
Figura de mèrit € / kA m

“Figura de mèrit de HTS atraparà LTS i Cu amb un augment de 10 en el volum de producció”

 **上创超导**
Shanghai Creative Superconductors



Superconductivitat: el segon segle de l'electricitat



Transport

Aviació elèctrica

MAGLEV



Generació (fusió), eficiència, xarxa Intel·ligent, qualitat, sostenible, menys materials crítics

The prospects of high-temperature superconductors

Overcoming cost barriers could make high-temperature superconductors pervasive

By Alexander Molodyk¹ and
David C. Larbalestier²

Science 380, 1220 (2023)

20.000 km cinta HTS
(18 bobines toroidals)

Força motriu indústria superconductors

= 1 l aigua (D)

= 250 l petroli

= 300 Kg Carbó

$E = mc^2$

“...the present outlook for high-temperature superconductor materials and their industrial applications is historic...”

araciència

muY
INTERESANTE

“Fusión nuclear: utopia o realidad?” X. Obradors, T. Puig

“Superconductividad al rescate de la energía de fusión”



The prospects of high-temperature superconductors

Overcoming cost barriers could make high-temperature superconductors pervasive

By Alexander Molodyk¹ and David C. Larbalestier²

Science 380, 1220 (2023)

“...the present outlook for high-temperature superconductor materials and their industrial applications is historic...”

araciència

MUY
INTERESANTE

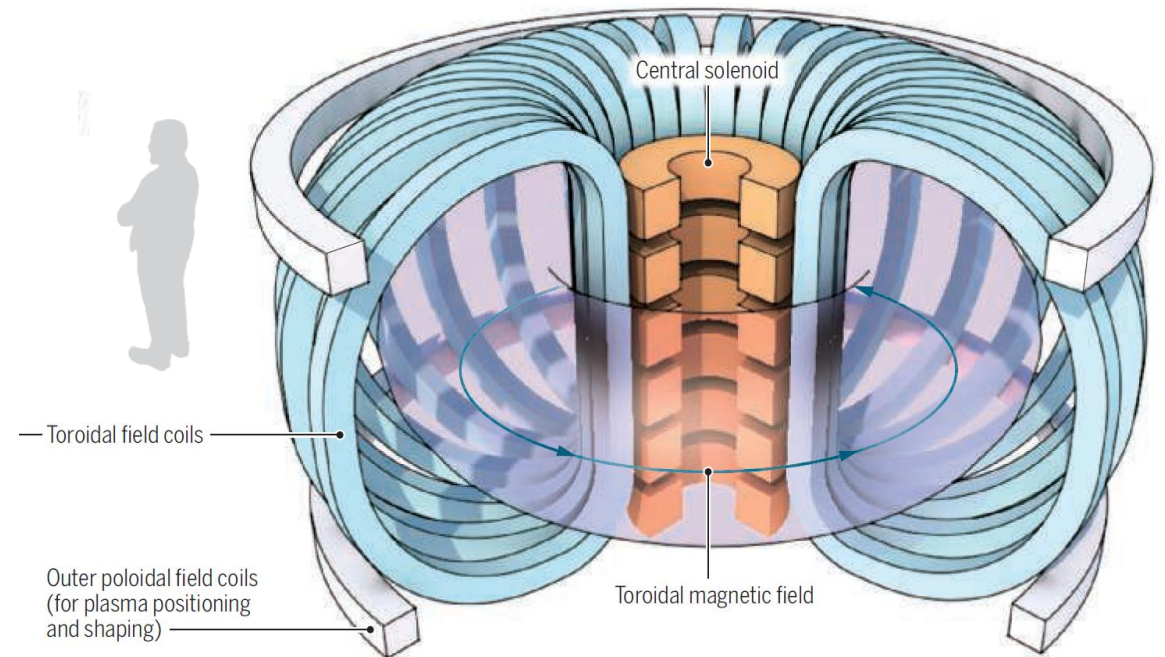
“Fusión nuclear: utopía o realidad?” X. Obradors, T. Puig

“Superconductividad al rescate de la energía de fusión”

COMPACT FUSION

20.000 km cinta HTS
(18 bobines toroidals)

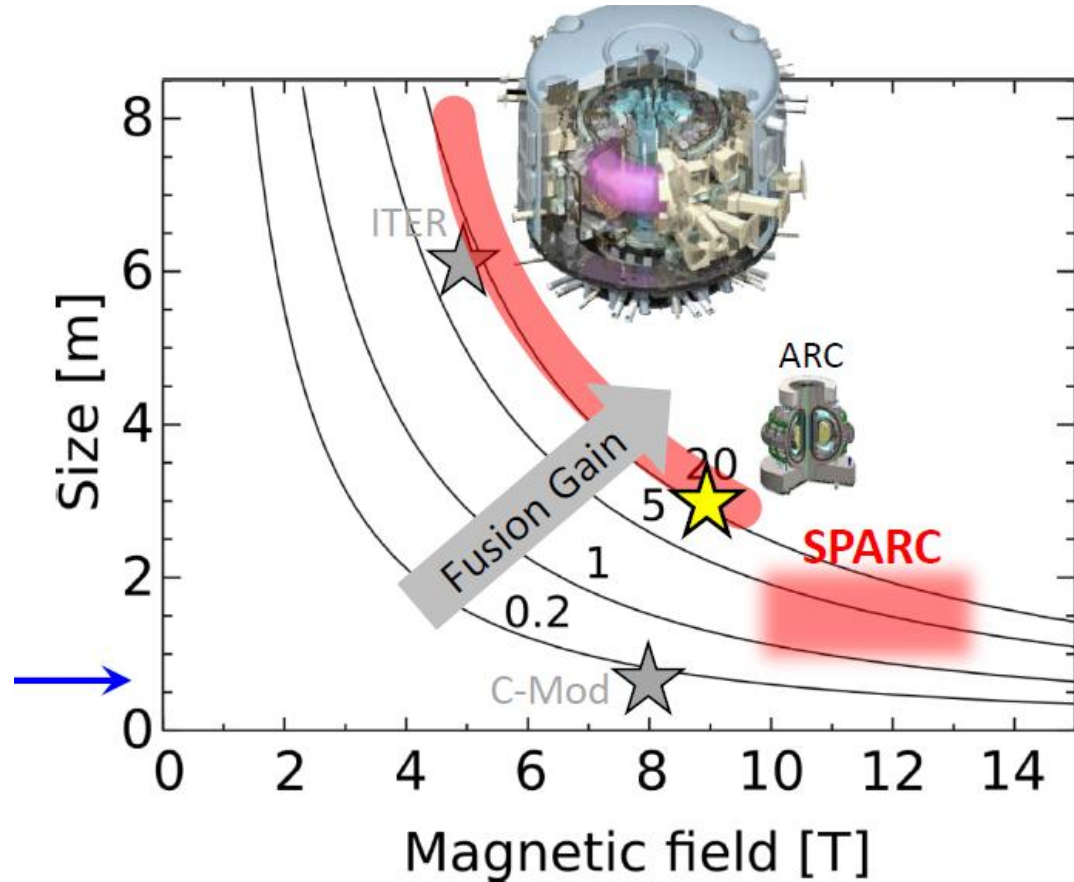
Força motriu indústria superconductors



Fusió compacte amb imants ultraintensos

SPARC: Smallest Possible Affordable, Robust, Compact

Una tecnologia disruptiva amb els superconductors alta temperatura



Disseny reactors >500 MW

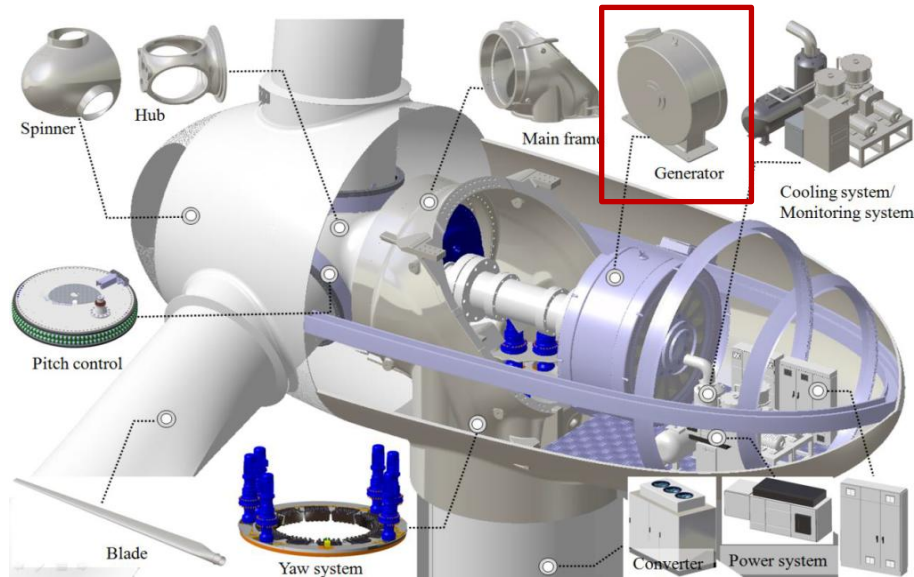
Inversió privada > 4.000 M\$

ANNALS OF SCIENCE OCTOBER 11, 2021 ISSUE
**CAN NUCLEAR FUSION
PUT THE BRAKES ON
CLIMATE CHANGE?**

<https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>

- Camps magnètics ultra-intensos amb HTS (x 2 respecte ITER): 20 T (x 400.000 camp magnètic terrestre)
- Volum tokamak molt més petit (÷ 40 ITER) ; gran estalvi construcció i funcionament
- Temperatures refrigeració superiors (20 K amb criogeneradors): reducció costos funcionament

Generadors eòlics superconductors



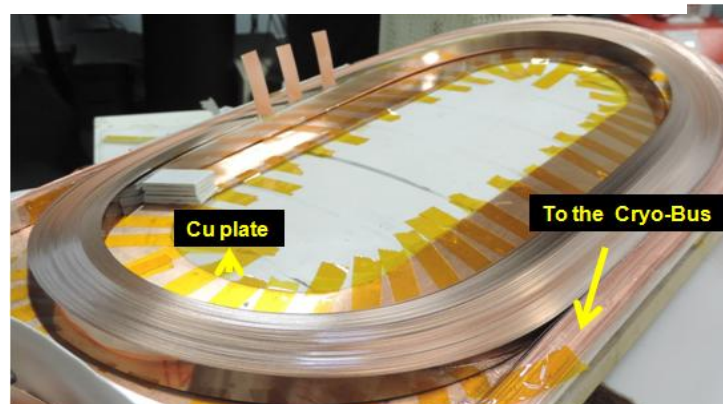
Més eficiència
Menys pes (- 70-80 %)
Menys material (-70 % Cu)
No RE dels imants permanents
Elevada fiabilitat
Off-shore!



10-15 MW, voltatge mitjà i generador directe (no reductor)



Estàtor HTS per generador de 2 MW

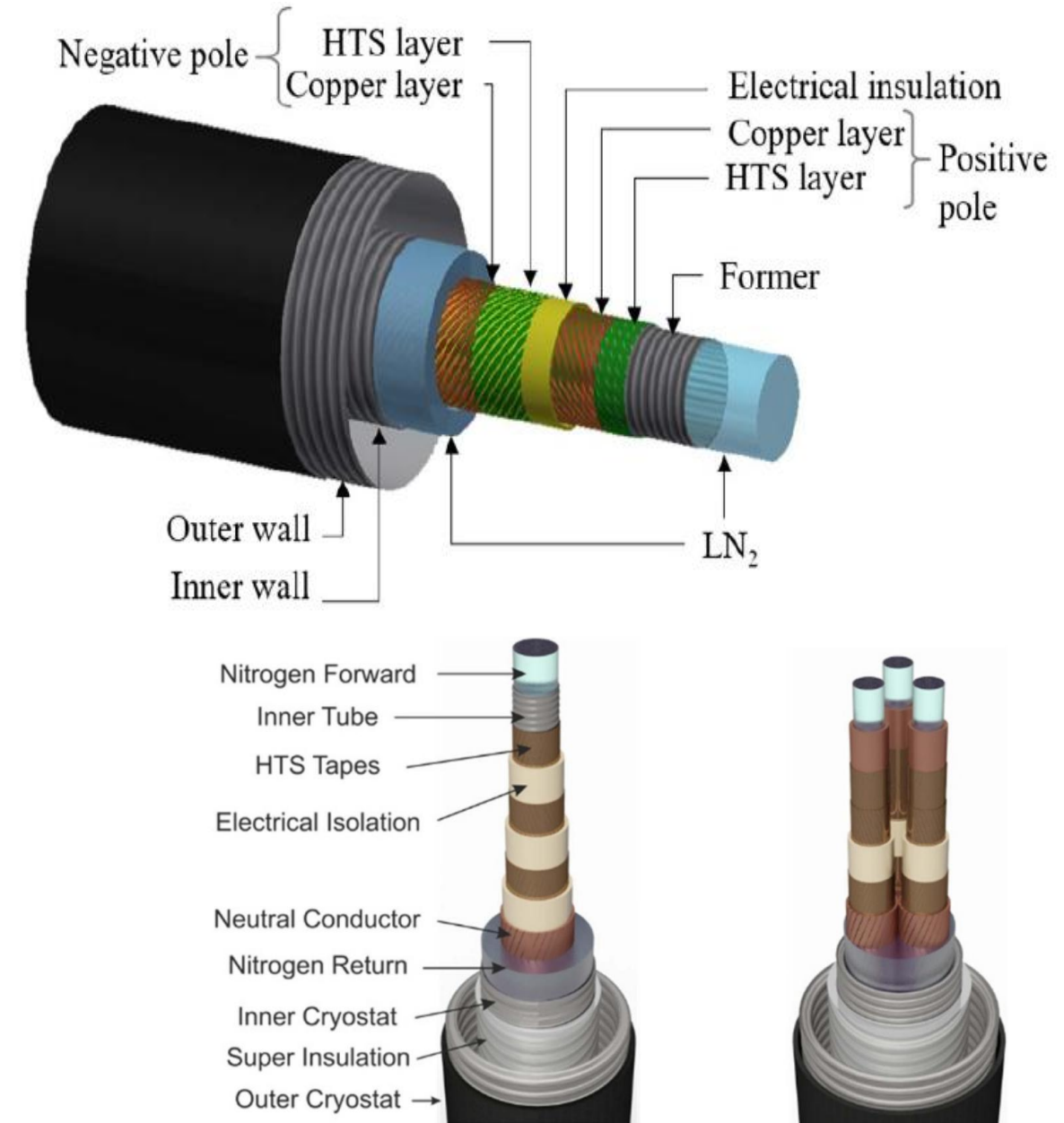


Patent PCT/EP2016/058934



Estructures i avantatges dels cables superconductors

- Augment de potència pel mateix diàmetre: **x 5**. Permet utilitzar conduccions existents
- Augment de corrent i reducció voltatge: estalvi en transformadors alta tensió
- Utilització a **zones urbanes** amb creixement de la demanda elèctrica i amb restriccions d'espai i drets d'ús.
- Reducció dels **efectes mediambientals**: cables enterrats, refrigerats amb N_2 líquid (no inflamable)
- Forta **reducció de costos** d'instal·lació (obra civil ja existent) i d'operació
- **Sense pol.lució electromagnètica** (apantallament), reducció impacte mediambiental



Estructures i avantatges dels cables superconductors

- Augment de potència pel mateix diàmetre: x 5. Permet utilitzar conduccions existents
- Augment de corrent i reducció voltatge: estalvi en transformadors alta tensió
- Utilització a zones urbanes amb creixement de la demanda elèctrica i amb restriccions d'espai i drets d'ús.
- Reducció dels efectes mediambientals: cables enterrats, refrigerats amb N₂ líquid (no inflamable)
- Forta reducció de costos d'instal·lació (obra civil ja existent) i d'operació
- Sense pol·lució electromagnètica (apantallament), reducció impacte mediambiental

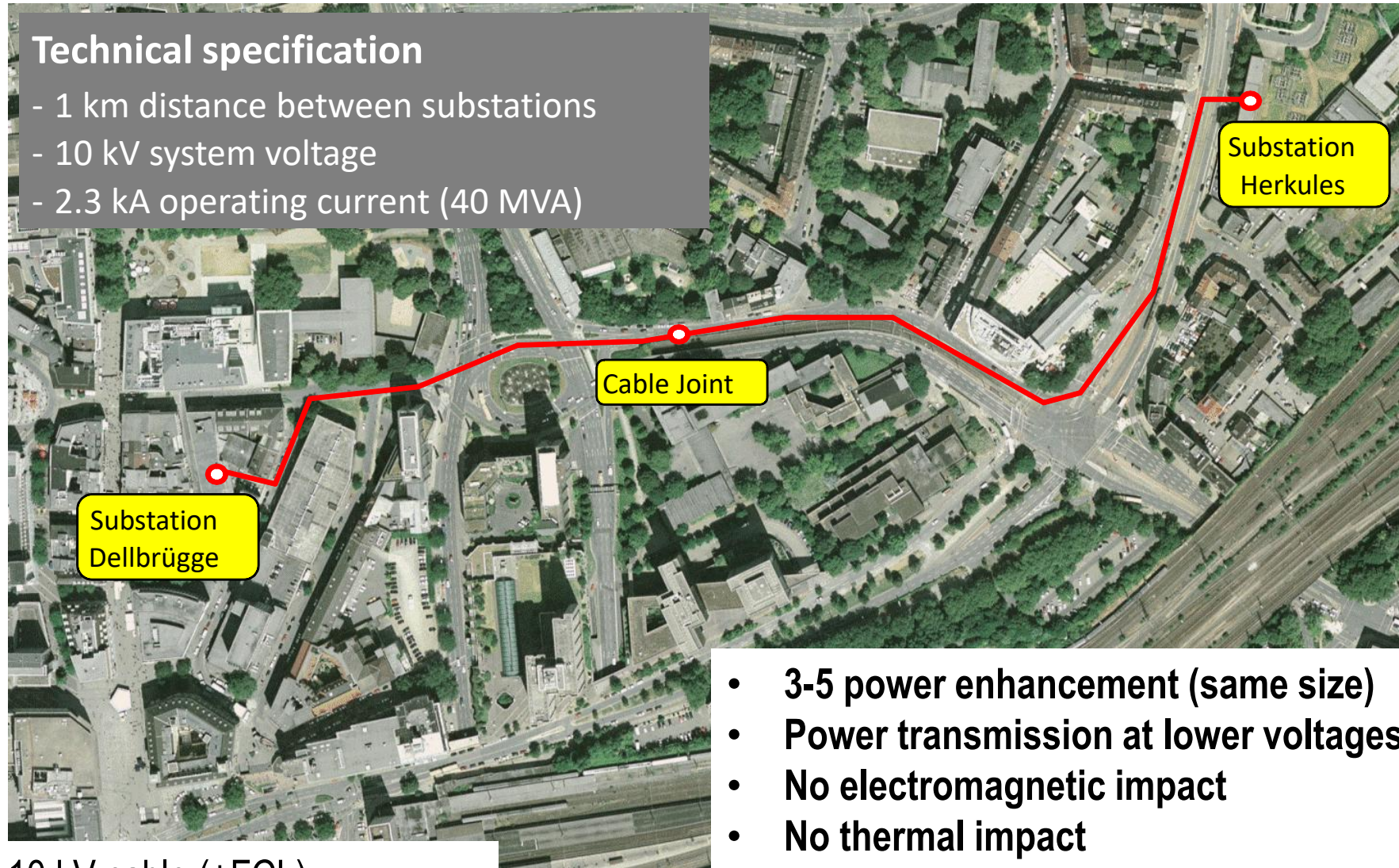


Cable superconductor 24kV-3200 A (Nexans-ICMAB). Barcelona (Premi Novare, 2012)

Integració xarxa cables superconductors

Technical specification

- 1 km distance between substations
- 10 kV system voltage
- 2.3 kA operating current (40 MVA)



- 3-5 power enhancement (same size)
- Power transmission at lower voltages (138 kV/345kV 10kV/110 kV)
- No electromagnetic impact
- No thermal impact

10 kV cable (+FCL)
substituting 100 kV line
7 years installed in Essen grid

--- M. Stemmler et. al. „40 MVA HTS Cable and Fault Current Limiter Installation“, ASC Conference 2012, Portland USA

Integració xarxa cables superconductors

- Cable AC Superlink: 15 km (Munich)
- Connexió subterrània de subestacions
- Conducció ja existent: augment de potència
- Voltatge reduït: (110 kV/2.6 kA/500 MVA)
- Econòmic, eficient, reducció GEH

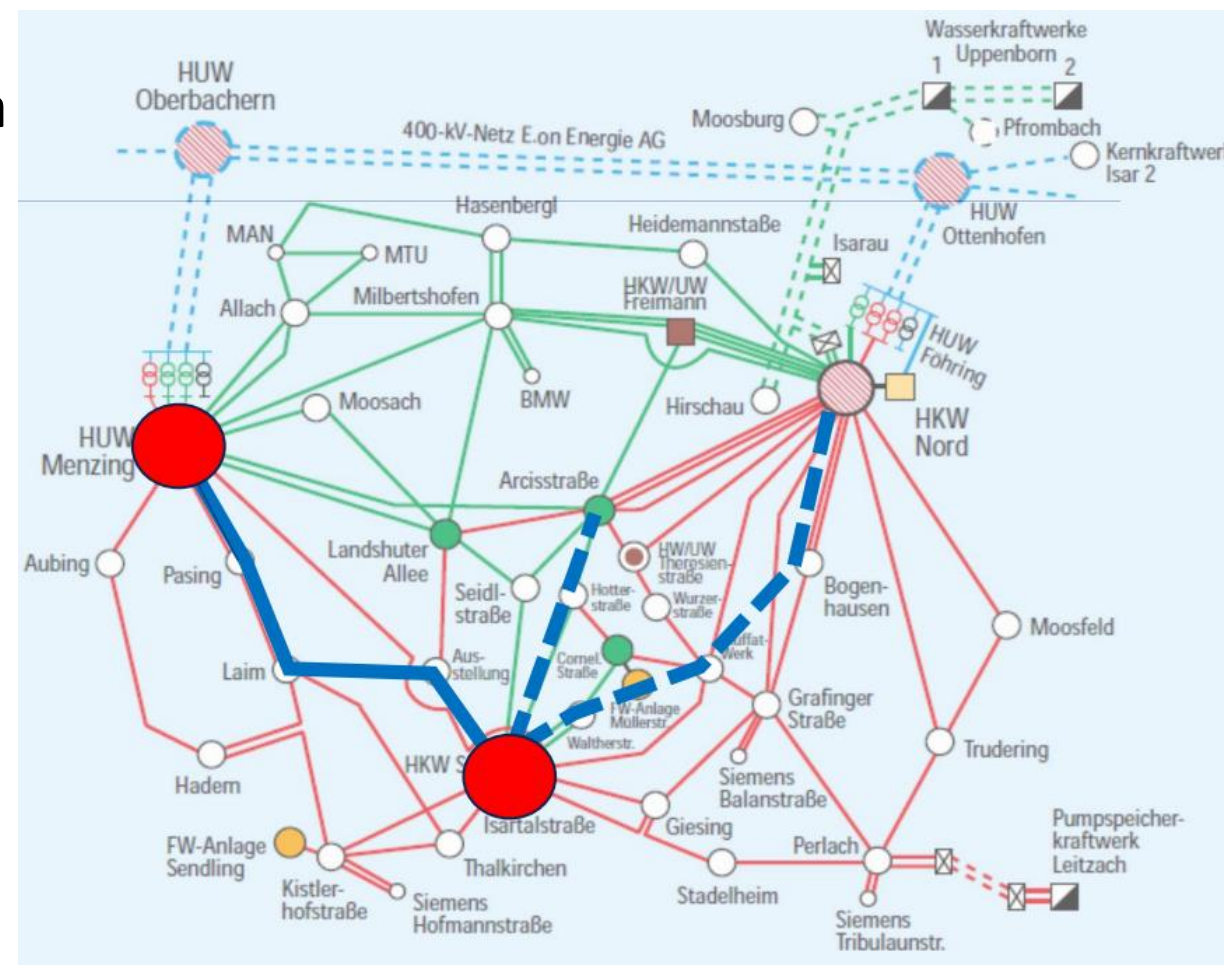
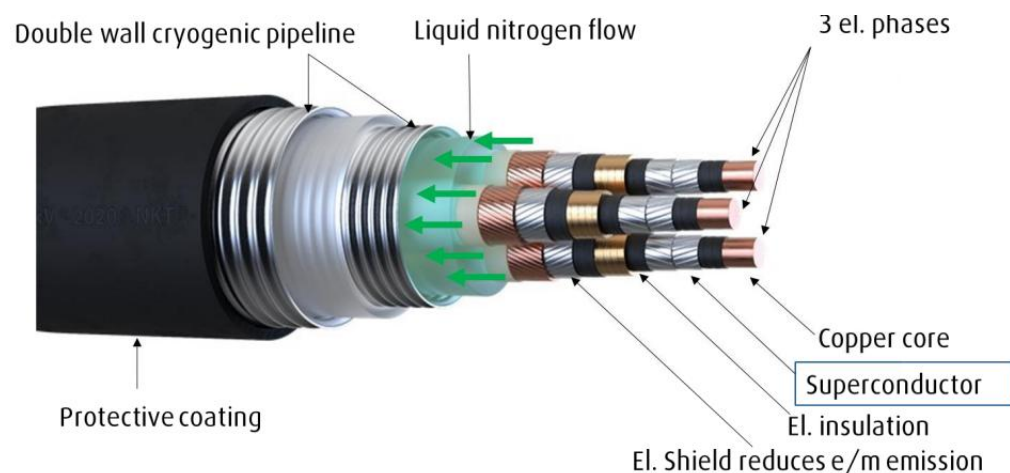


Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Integració xarxa cables superconductors



- **Cable DC** alimentació estació ferroviària (Montparnasse-Paris, 90 milions usuaris/any): 3500 A @ 1500 VDC (10 MW)



Cables de Cu no poden absorbir demanda



Integració xarxa: Cables superconductors

- **Simplificació subestacions**

Estalvi dimensió transformadors

Simplificació connexions

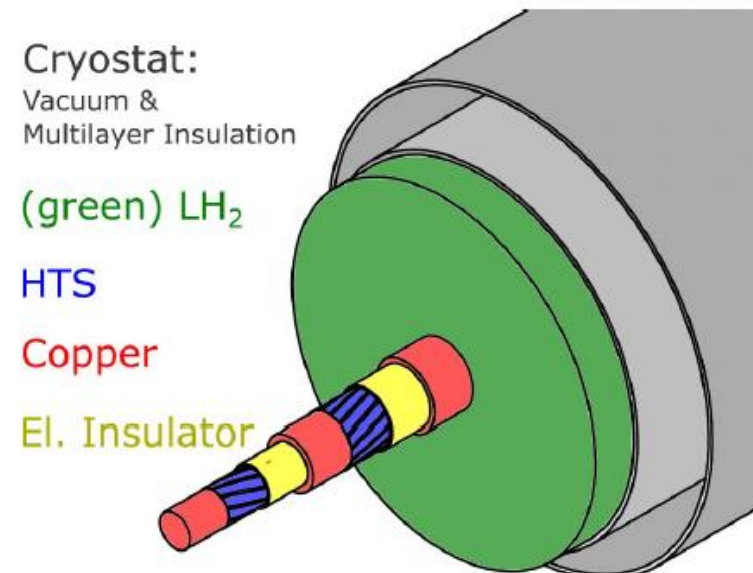
subestacions parcs eòlics off-shore
(80 kV DC vs 320 kV AC).

Projecte Supernode Mar del Nord
(Irlanda)

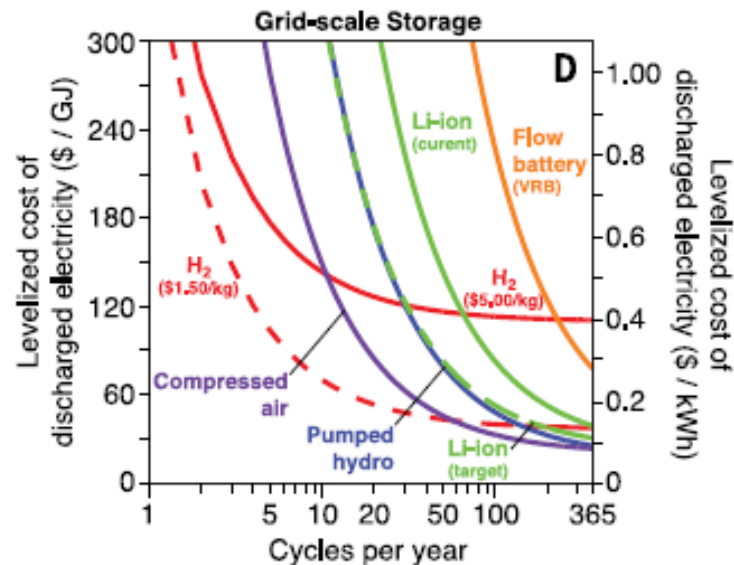
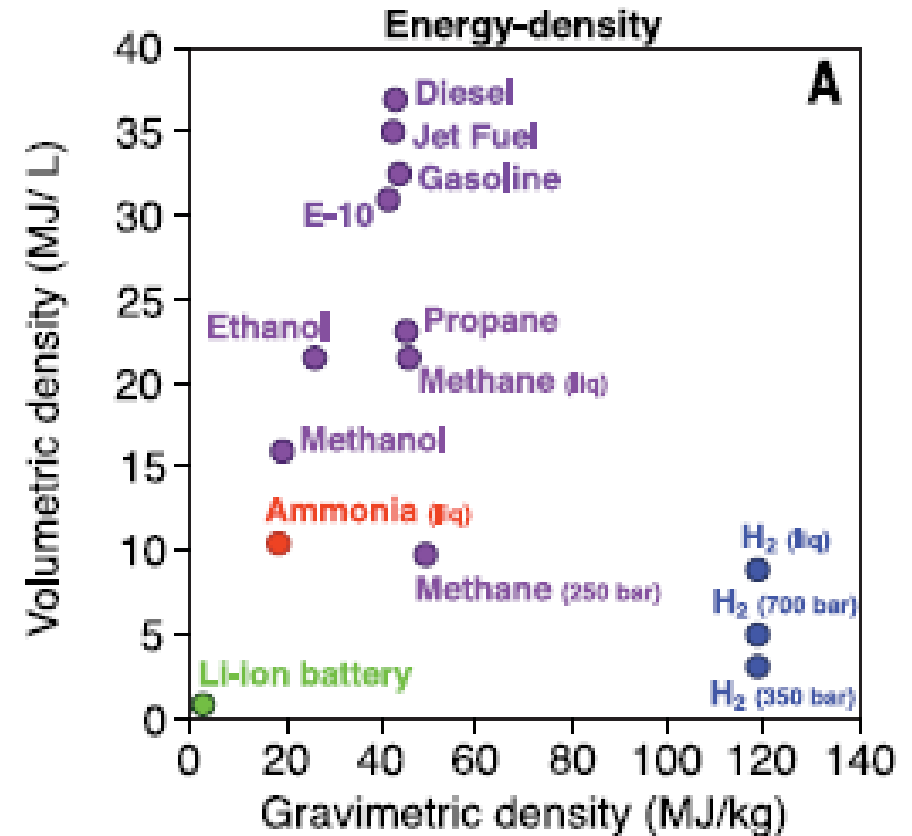
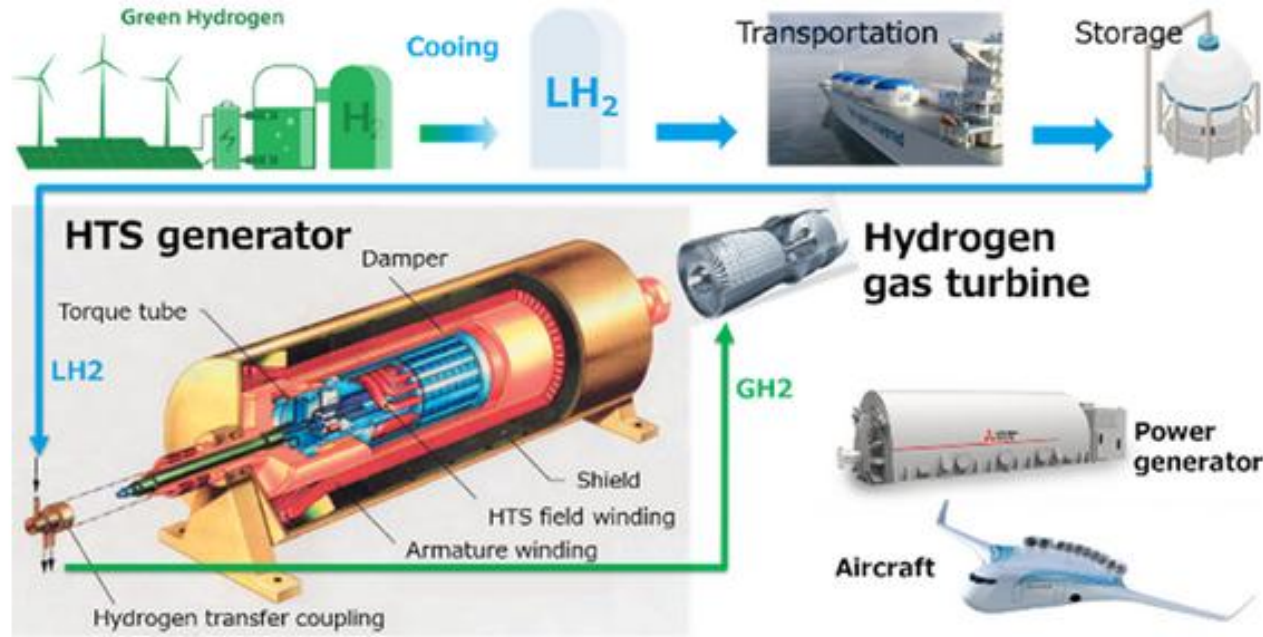


- **Xarxes híbrides transport energia**

Combustible LH_2 + HTS electricitat / (25 K).
Projecte TransHyde (Alemanya)

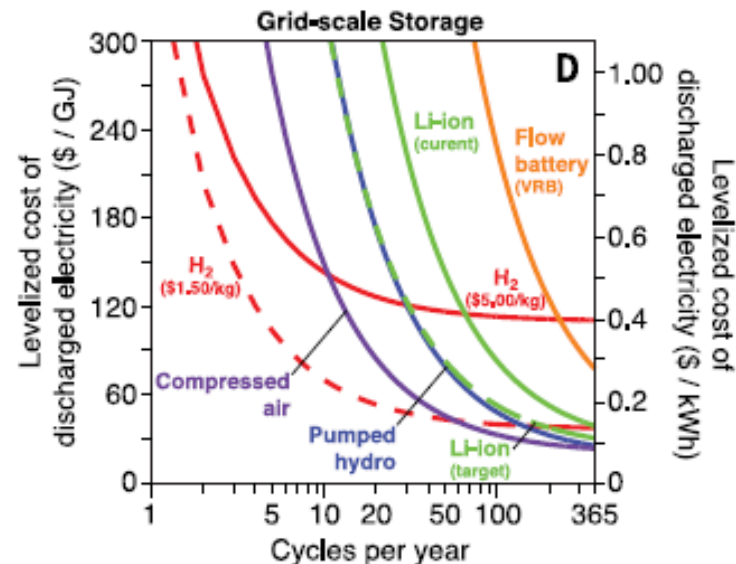
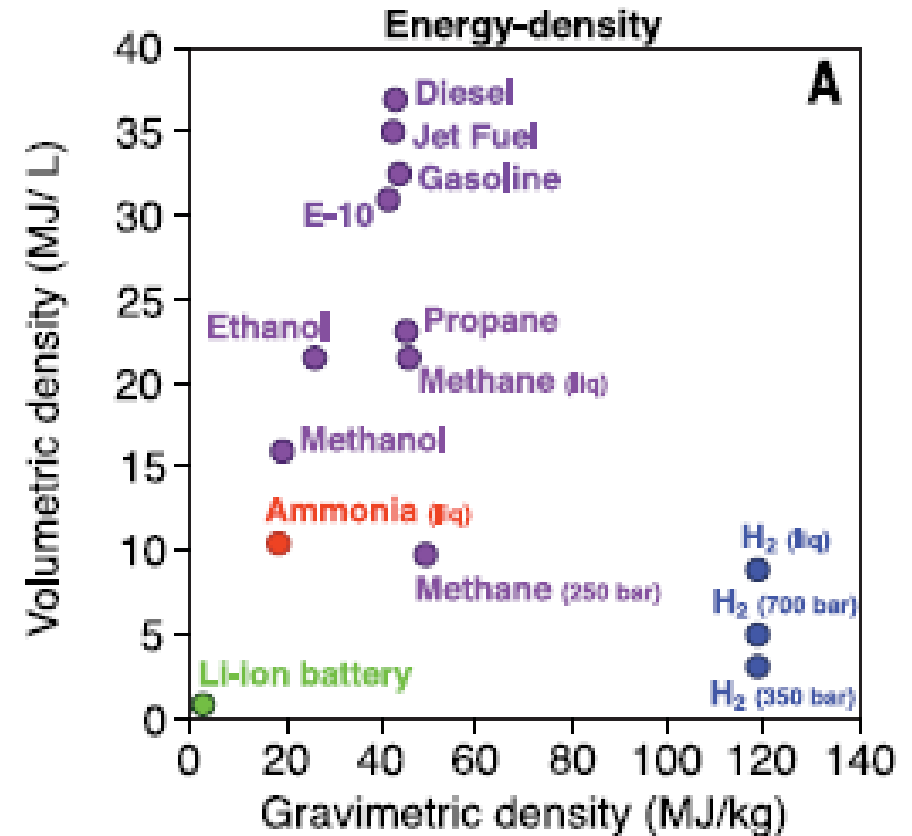
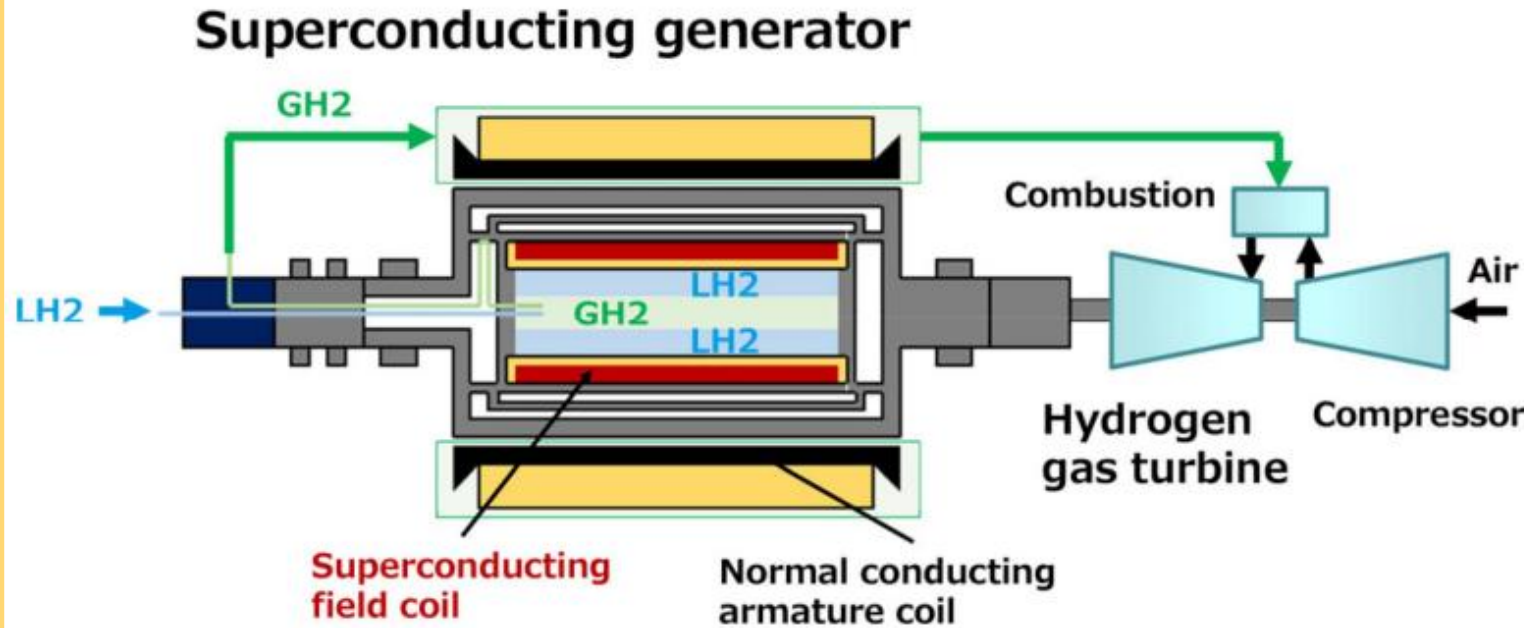


Sinèrgia Hidrogen líquid – HTS



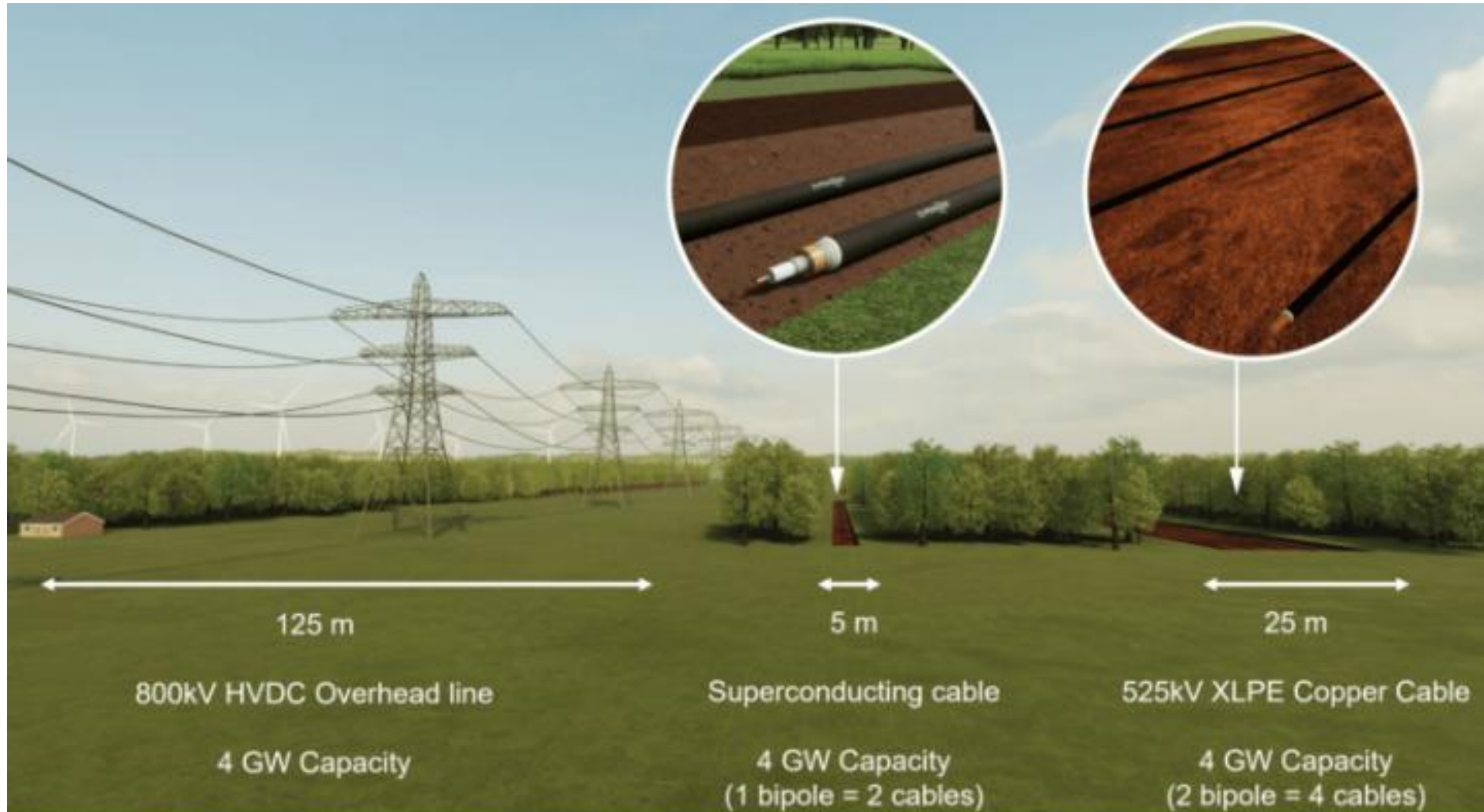
- H₂ líquid: millor densitat volumètrica el converteix en el millor mode de transport i emmagatzamatge
- Calor de refrigeració (20 K) es recupera amb un generador HTS i una turbina de gas de H₂ que generen electricitat
- Sinèrgia hidrogen verd – electricitat HTS

Sinèrgia Hidrogen líquid – HTS



- H₂ líquid: millor densitat volumètrica el converteix en el millor mode de transport i emmagatzamatge
- Calor de refrigeració (20 K) es recupera amb un generador HTS i una turbina de gas de H₂ que generen electricitat
- Sinèrgia hidrogen verd – electricitat HTS

Cables superconductors HVDC per llargues distàncies



- **Algún dia el transport elèctric aeri serà cosa del passat!**
- **Adaptat a túnels preexistents**

- **El més baix impacte mediambiental: acceptació social**
- **Afectació mínima del terreny: reducció costos, acceleració permisos, menys drets de pas**
- **Estalvi materials crítics. Cu: $\div 8$ (2 GW) , $\div 22$ (6 GW). Augment sostenibilitat!**

Cables superconductors HVDC per llargues distàncies



- Algún dia el transport elèctric aeri serà cosa del passat!
- Adaptat a túnels preexistents
- (MAT Pirineus?)
(8,5 km, 1,4 Gw)
- El més baix impacte mediambiental: acceptació social
- Afectació mínima del terreny: reducció costos, acceleració permisos, menys drets de pas
- Estalvi materials crítics. Cu: $\div 8$ (2 GW) , $\div 22$ (6 GW). Augment sostenibilitat!

Projecte SUPERNODE: transport elèctric DC a Europa

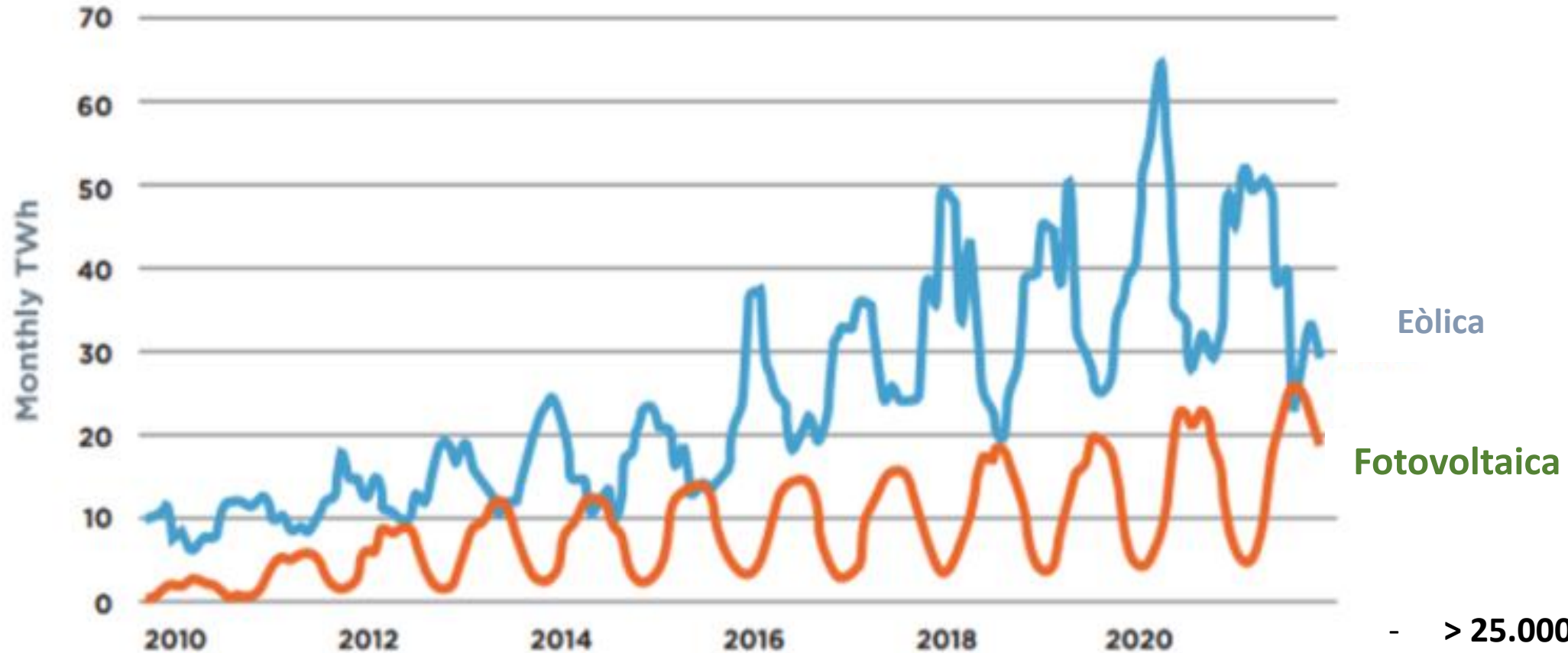
Conexió segura autopistes elèctriques amb cables superconductors DC (0,9 b€/cost; 30 anys; 3 anys fòssils) ?



Xarxa elèctrica Europa

- > 670 GW
- > 400 millions clients
- 27 països
- Xarxa més extensa del món
 - > 1.3 Mkm transmissió
 - > 10 Mkm distribució

Projecte SUPERNODE: distribució elèctrica Europea



- Generació eòlica (nord EU) i fotovoltaica (sud EU) complementària i distribuïda amb cables superconductors a tot EU
- Complements d'emmagatzematge energia elèctrica (bombeig, bateries cotxes)

- > 25.000 punts e-càrrega
- 300 millions cotxes a EU = 30 TWh de bateries EV!

Limitador Superconductor de Corrent de Falta (FCL) : Protecció xarxes intel·ligents



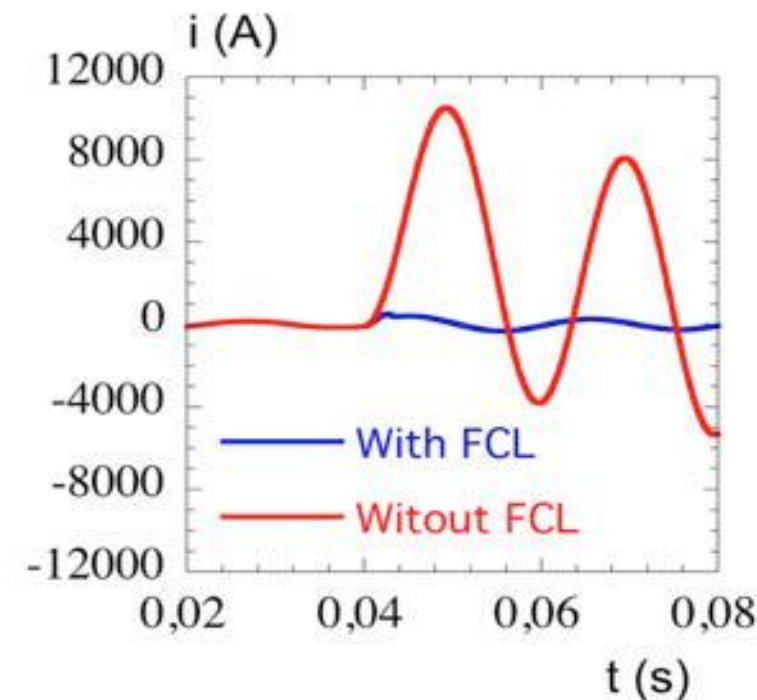
Protecció de la integració d'energies renovables i redundància de la xarxa intel·ligent

FastGrid

EU Consortium with
ICMAB, CNRS, SuperGrid
Institute, Theva

Mòdul DC SCFCL (1 kA – 50 kV)

Nous materials I idees d'enginyeria



- Sense límit en el mallat
- Invisible en operació normal
- Auto-disparat (molt fiable)
- Recuperació automàtica
- Interconnexions AC/DC

Cables superconductors aeris AC o DC



- Cables superconductors aeris refrigerats amb N_2 líquid (Veir-USA)
- Cables adaptats a l'alimentació de centres de dades (~ 10 MW)
- Cables DC (< 35 kV / $+2.4$ km): centres dades, barres per indústria, unitats electròlisi



Aviació elèctrica híbrida -turbo elèctrica

Components superconductors

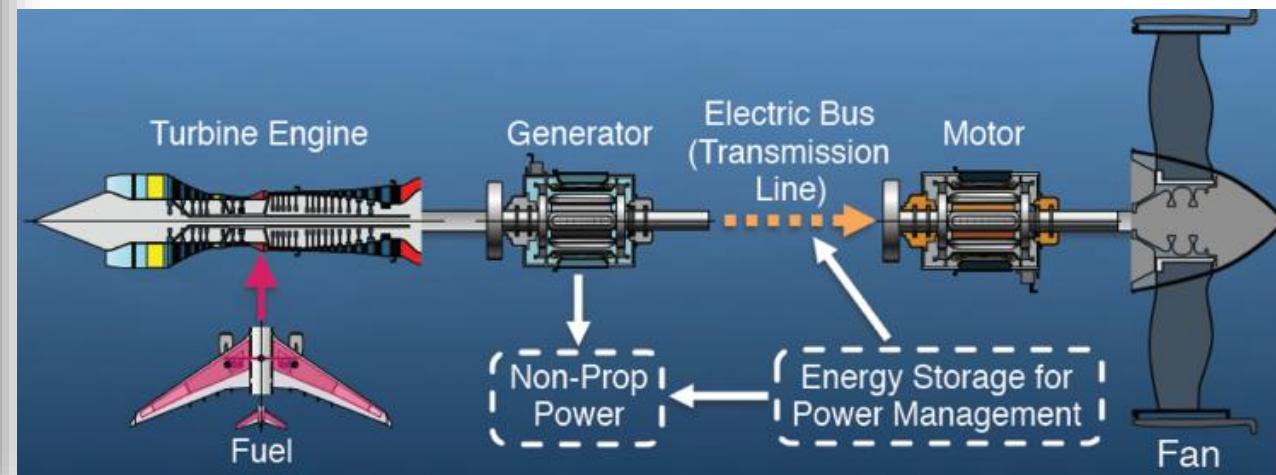
<https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>



Objectius tècnics

- Minimitzar pes dels components
- Densitat de potència dels motors / generadors HTS : 25-50 kW/kg (x 5 vs Cu)
- Turbogenerador amb hidrogen o combustibles solars

ASCEND (Advanced Superconducting & Cryogenic Experimental powertrain Demonstrator)



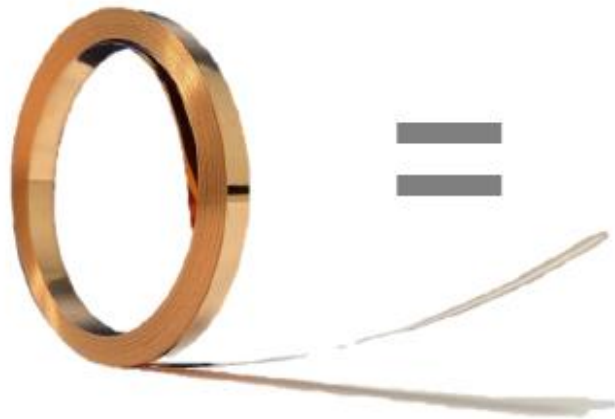
Beneficis principals de l'aviació elèctrica

- Augment de l'eficiència (+ 25 %)
- Electricitat i combustibles renovables (H_2)
- Menys manteniment
- Soroll reduït i llargària enlairament menor (localització més fàcil dels aeroports)
- Emissions reduïdes de CO_2 i NO_x

HTS technologies are extremely climate-positive

HTS use enables mitigation of carbon emissions with a rate of ~ 1 ton CO_{2eq}/meter length on average.

Faraday Factory Japan produces HTS tape at a rate equivalent to planting a large tree every minute, 24/7.



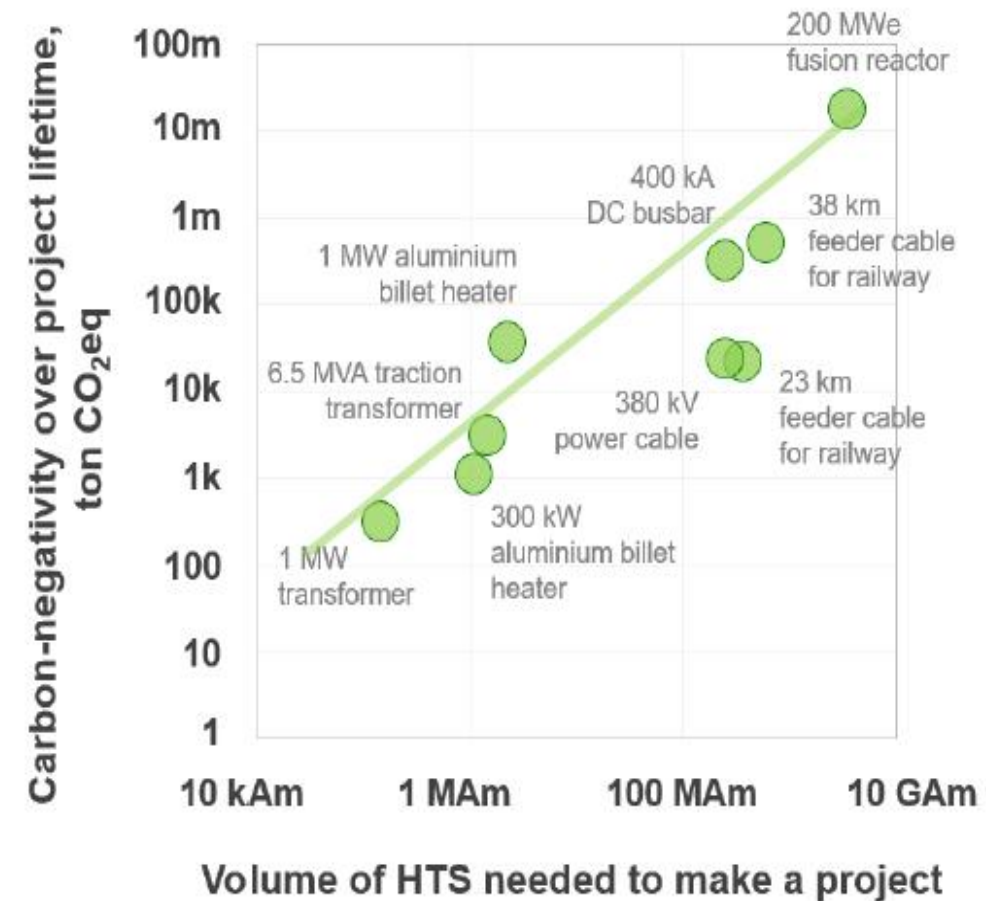
=



5 meters of HTS tape
(takes us 1 minute to make)

~ 5 tons of carbon
(takes nature 100 years to grow)

Carbon negativity of HTS projects

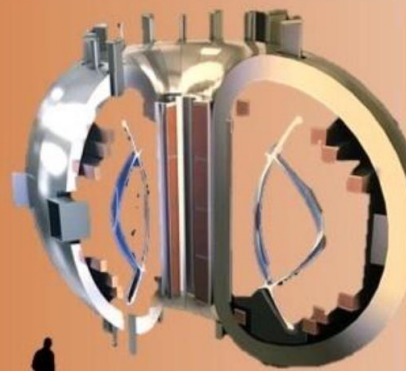


HTS tape is enabling or superior in zero-carbon markets

COMPACT NUCLEAR FUSION

\$40 trillion

Market size by 2050, Bloomberg Intelligence 2021



OFF-SHORE GRID

\$1 trillion

Market size by 2040, IEA 2019



WIND POWER GENERATORS

\$9 trillion

Market size by 2050, IRENA 2019



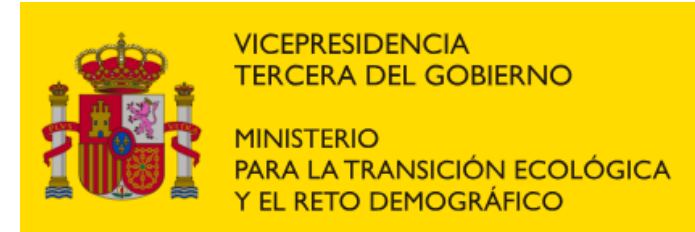
TRANSMISSION AND DISTRIBUTION

\$21 trillion

Market size by 2050, BNEF 2023

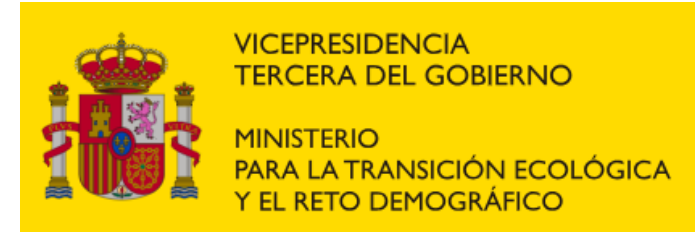


Plan Nacional Integrado Energía y Clima (2023-30) (PNIEC)



- **Reducció GEH 32 %**
- Energia final **renovable** 48 % (81 % elèctrica)
- **Eficiència** energètica 43 %
- Autonomia estratègica energia 50 % (- 86.750 M€ importacions fòssils)
- Demanda energia elèctrica vs total 35 %
- 5.5 milions de **cotxes elèctrics**
- Despesa energètica particular baixa a 5,7 %
- Reducció **contaminació atmosfèrica** baixa a la meitat les morts prematures
- **Renovables**: 76 GW PV, 62 GW (eòlica), 22,5 GW emmagatzatmatge, 12 GW electrolitzadors per H₂ (10 % total)
- **Inversió** període: 308.000 M€ (**80 % privat**) , 560.000 llocs treball, +3,2 % PIB

Plan Nacional Integrado Energía y Clima (2023-30) (PNIEC)

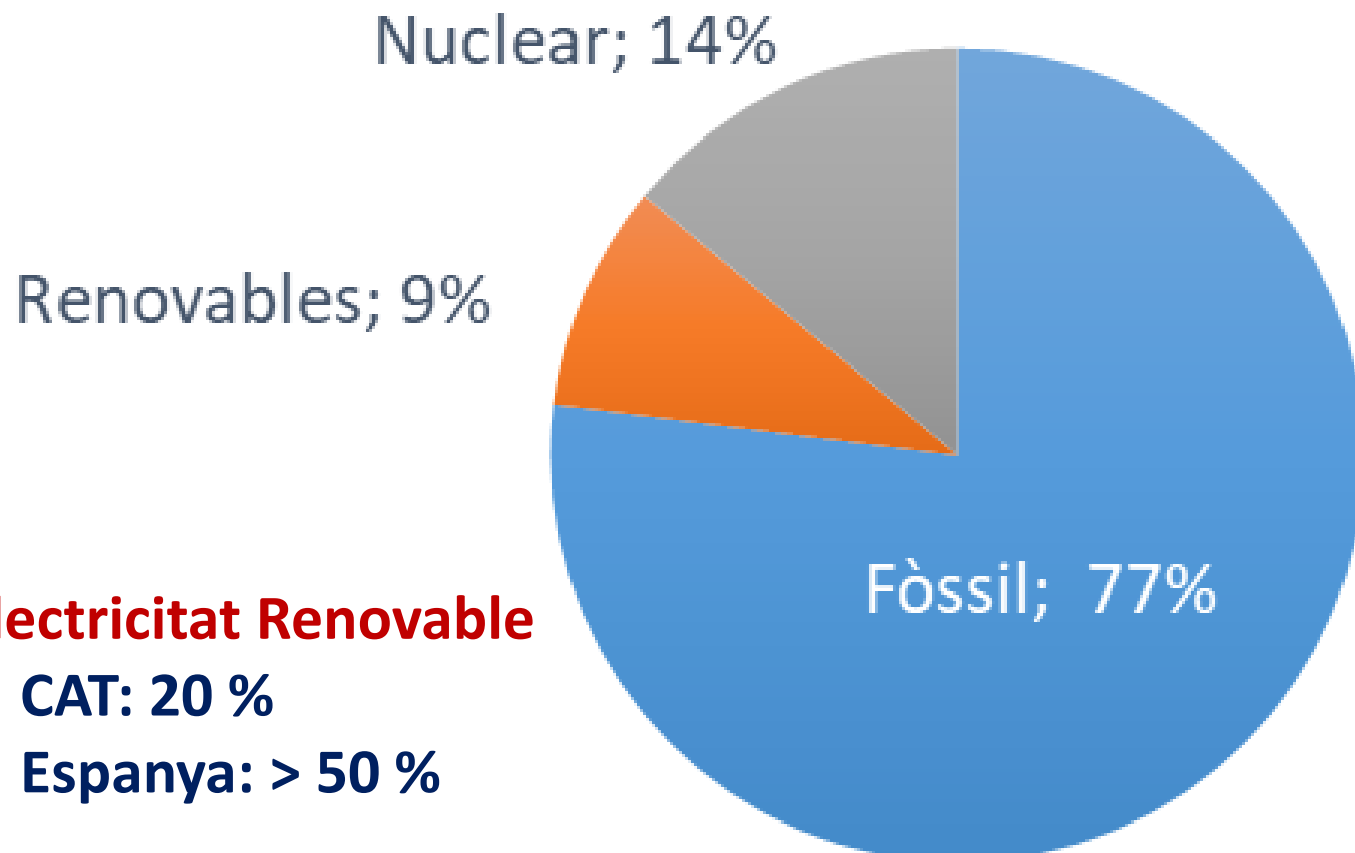


- **Reducció GEH 32 %**
- Energia final **renovable** 48 % (50 % amb renovables i 48 % amb importacions fòssils)
- **Eficiència** energètica 42 %
- Autonomia estratègica (reducció de dependència d'importacions fòssils)
- Demanda final 140 Mtoe
- 5.5 milions d'habitants
- Despesa 140.000 M€ (80 % privat)
- Reducció de la mortalitat prematura a la meitat les morts prematures
- **Renovables** (eòlica, solar, hidroelèctrica), 22,5 GW emmagatzematge, 12 GW electrolitzadors (total)
- **Inversió** període 2023-2030 140.000 M€ (80 % privat) , 560.000 llocs treball, +3,2 % PIB

Wish List?
Reality?

Energia a Catalunya: anem tard!

Energia final



Primària: 295.000 GWh/any
(+44 % vs final)

Final: 168.000 GWh/any

Molt marge a la millora en l'eficiència!

Electricitat: 45.000 GWh/any (27 % final)

Nuclear 55%, Ren. 20%, Fòssil 25%

(~ 30 % energia final a 75 % el 2050)

Potenciar centrals d'emmagatzematge
(bombament)

PROENCAT 2050

Electricitat Renewable

- CAT: 20 %
- Espanya: > 50 %

- Gran retard en la implementació de les renovables (efecte NIMBY)
- Forta dependència de l'energia nuclear (55%)

Conclusions

- Deute climàtic: herència d'un mode de vida no sostenible.
- Transició energètica: un repte colossal. Canvi de paradigma.
- Cal equilibrar el trilemma economia – medi ambient – ciència: buscar oportunitats
- Tenim bagatge científic **per** enfrontar-nos al major repte de la humanitat.
- L'augment de l'electrificació no és assumible amb les technologies actuals:
Generació, distribució, transport, ús final, mobilitat
- Nanomaterials: tecnologia disruptiva sostenible pel nou paradigma energètic.
Accelerar la R&D. Urgent expandir la distribució de coneixement.
- Renovables intermitents (fotovoltaica, eòlica) combinades amb generació elèctrica eficient, contínua (superconductors, fusió) i combustibles solars (H_2).
- Superconductors: fusió compacte, xarxes intel·ligents, generadors eòlics, transport (avions i vaixells híbrids, càrrega ràpida vehicles elèctrics, MAGLEV)
- Inversions multimilionàries en infraestructures inferiors a la despesa en combustibles fòssils i el cost del CO_2 . Creació nous llocs de treball: visió de futur!