

La energía nuclear una opción sustentable para el desarrollo del sector energético nacional



Juan Luis François

Grupo de Ingeniería Nuclear

Facultad de Ingeniería – UNAM

2 de septiembre de 2023

Observatorio Ciudadano de la Energía



Contenido

- Desarrollo sostenible
- Energía nuclear hoy
- ¿Hacia dónde va?
- Dimensión económica
- Dimensión ambiental
- Dimensión social
- El plan nuclear

Desarrollo sostenible



El desarrollo sustentable busca la equidad entre las naciones a través de las generaciones, e integra, de manera equilibrada, el crecimiento económico, la protección ambiental y el bienestar social.

Naciones Unidas: Objetivos de Desarrollo Sostenible



- ❑ Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas son 17 objetivos que los 193 Estados miembros de la ONU acordaron alcanzar para el año 2030
- ❑ Los ODS de la ONU brindan orientación mundial para abordar los desafíos que enfrentan las naciones
- ❑ La importancia de los ODS es garantizar soluciones de infraestructura confiables y sostenibles que respalden el desarrollo económico y el bienestar humano, al mismo tiempo que garantizan la asequibilidad financiera.





OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE





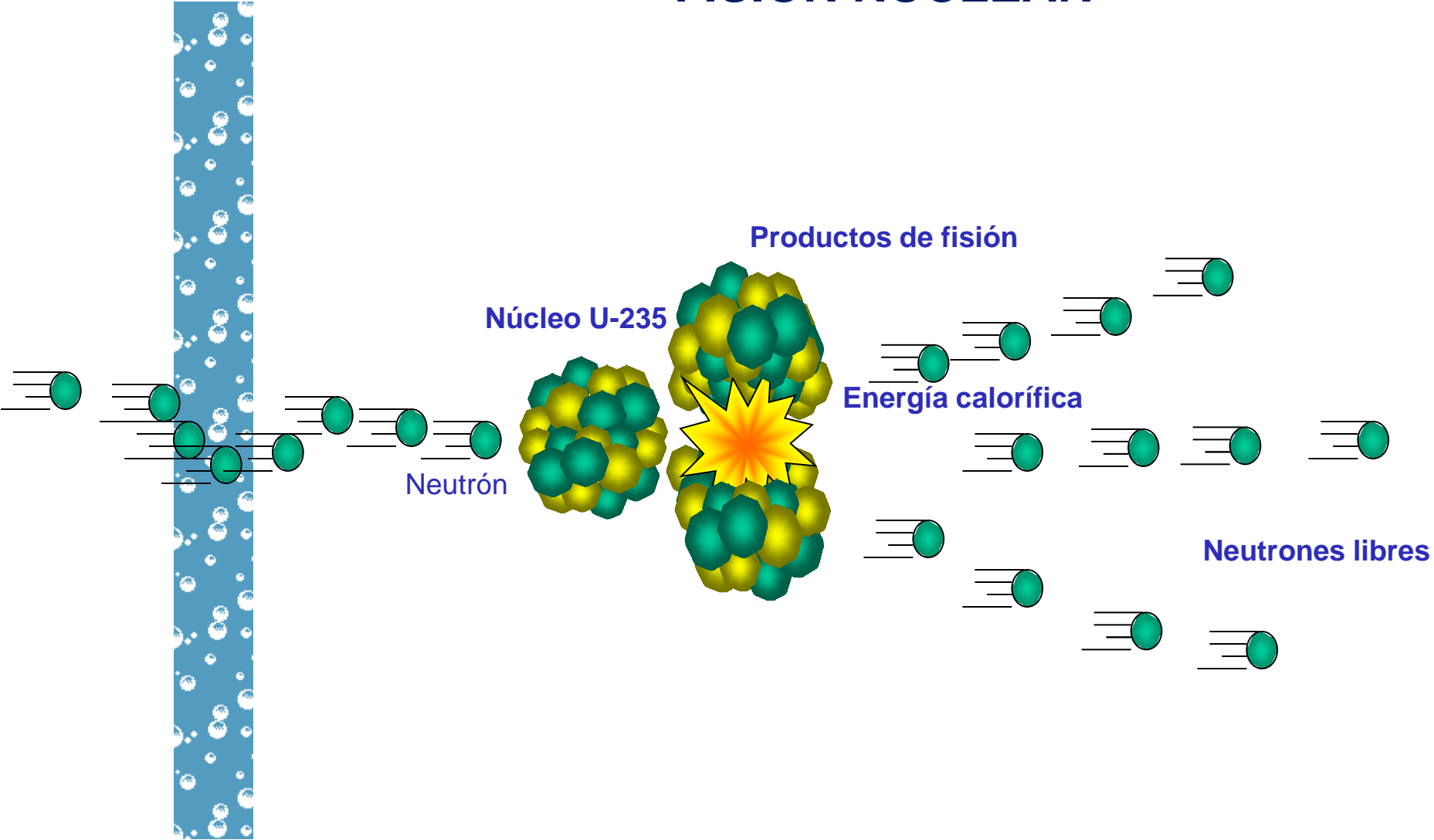
La energía nuclear y la sociedad

- La dimensión social y humana del desarrollo sustentable comprende el capital humano en forma de conocimiento, educación, oportunidades de empleo, bienestar, equidad y participación, y capital social en forma de instituciones y asociaciones voluntarias, leyes y reglamentos, y cohesión social.
- La energía nuclear, como otras tecnologías avanzadas, se caracteriza por una contribución neta al capital social y humano.
- Es uno de los grandes descubrimientos científicos del Siglo XX, y representa un componente muy valioso del capital intelectual para transmitirse a las generaciones futuras.
- Tiene una fuerte cimentación en ciencia y tecnología.
- Su gran reto es la aceptación pública, determinada, en buena medida, por una muy variable percepción de sus riesgos y beneficios.

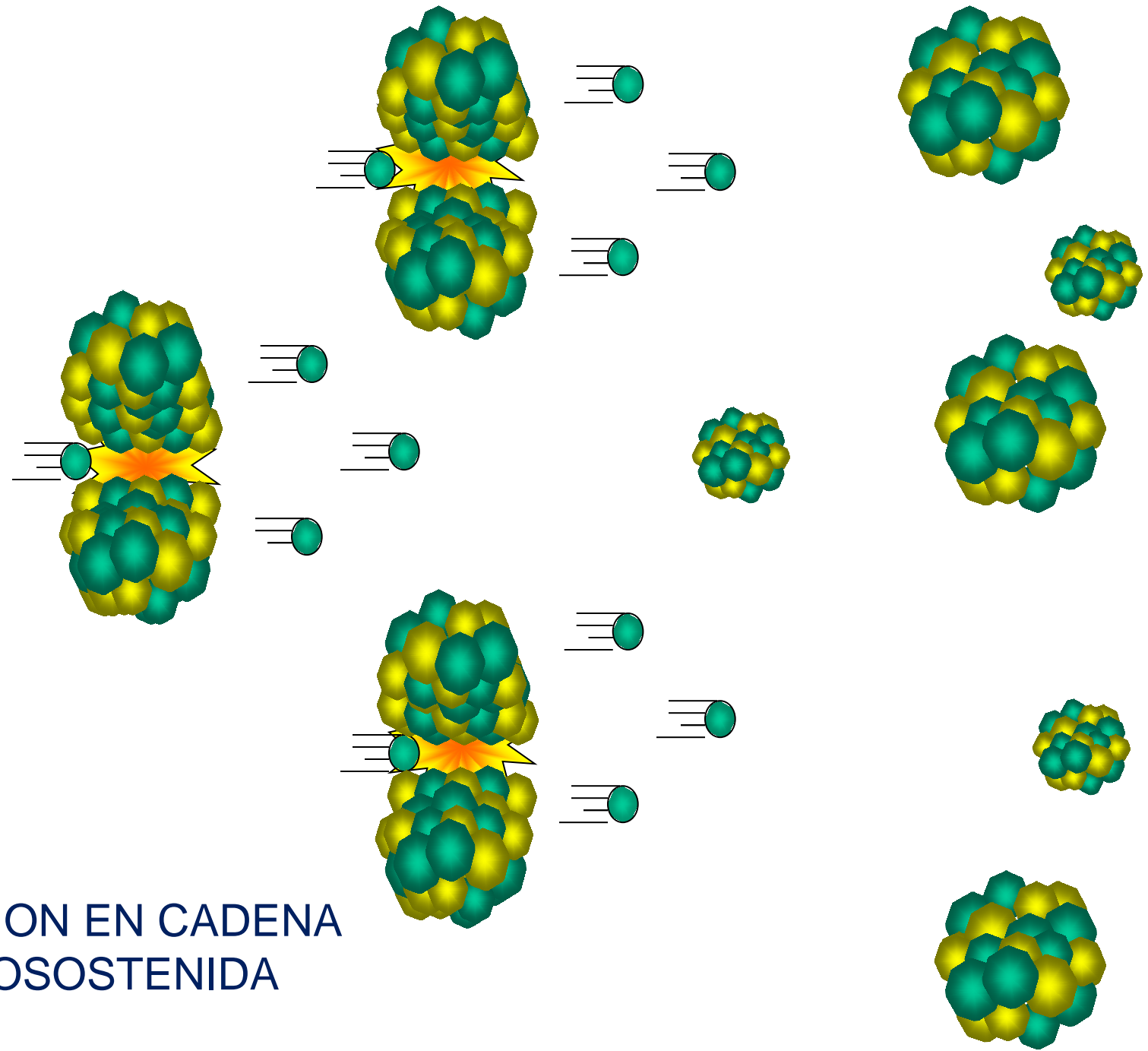


La energía nuclear hoy

FISION NUCLEAR

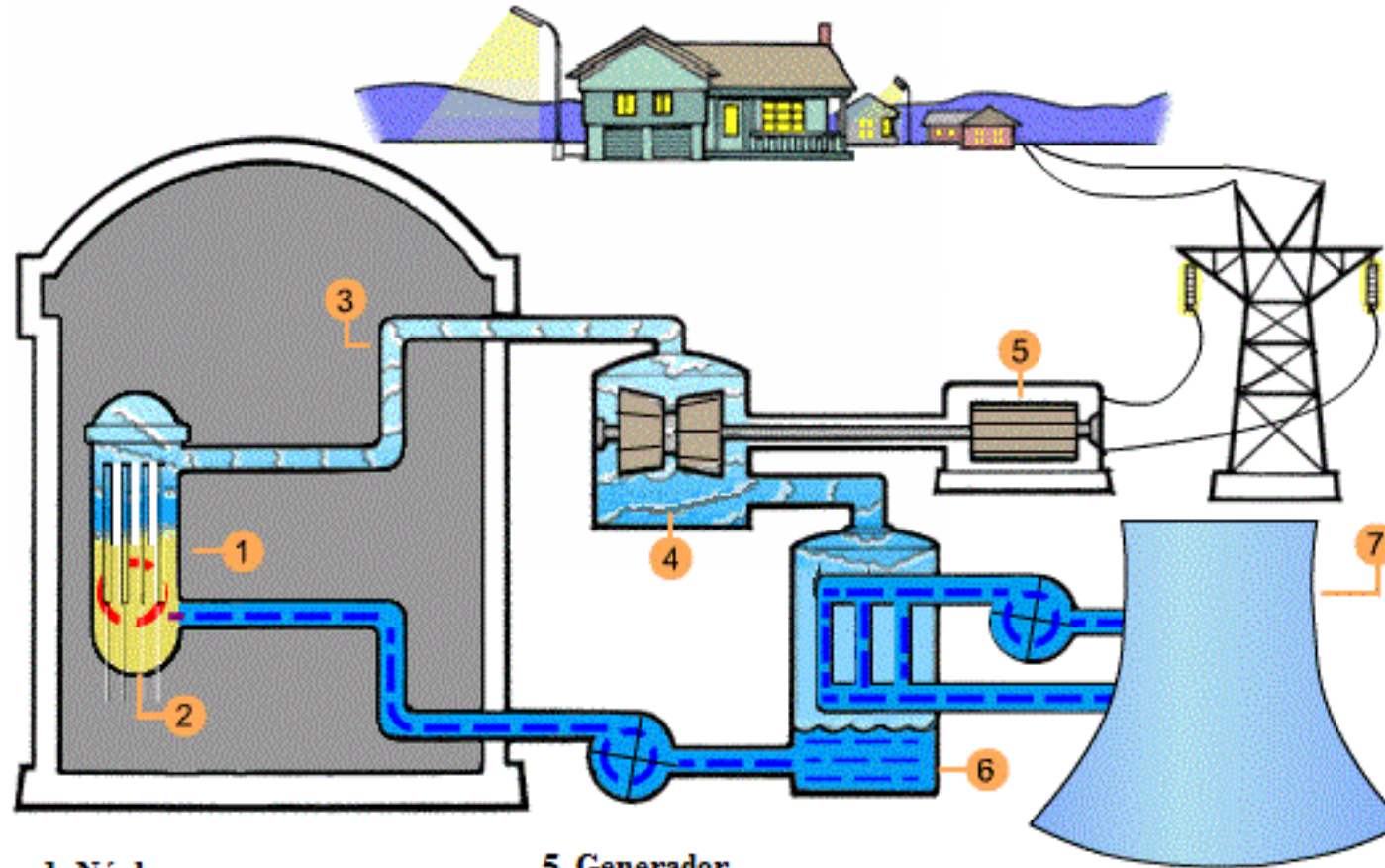


AGUA PURA
MODERADOR DE LA VELOCIDAD DE LOS NEUTRONES



REACCION EN CADENA
AUTOSOSTENIDA

Reactor nuclear de agua ligera en ebullición



- 1. Núcleo
- 2. Barras de control
- 3. Agua en ebullición
- 4. Turbina

- 5. Generador
- 6. Condensador
- 7. Chimenea de refrigeración



CURRENT STATUS

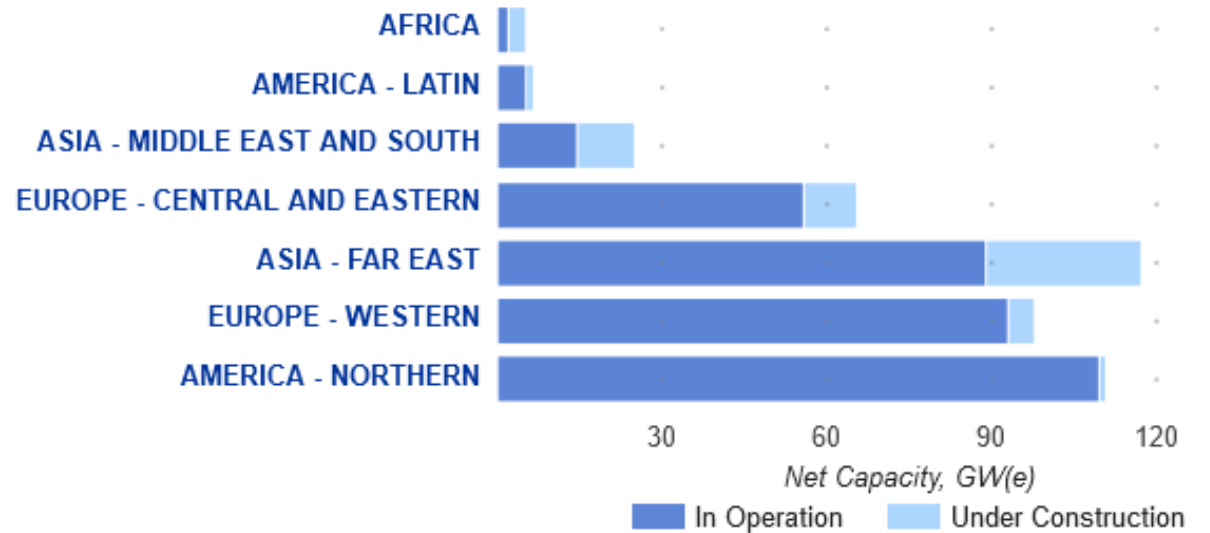
410 NUCLEAR POWER REACTORS
IN OPERATION
368 610 MWe TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

27 NUCLEAR POWER REACTORS
IN SUSPENDED OPERATION
22 788 MWe TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

57 NUCLEAR POWER REACTORS
UNDER CONSTRUCTION
59 091 MWe TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

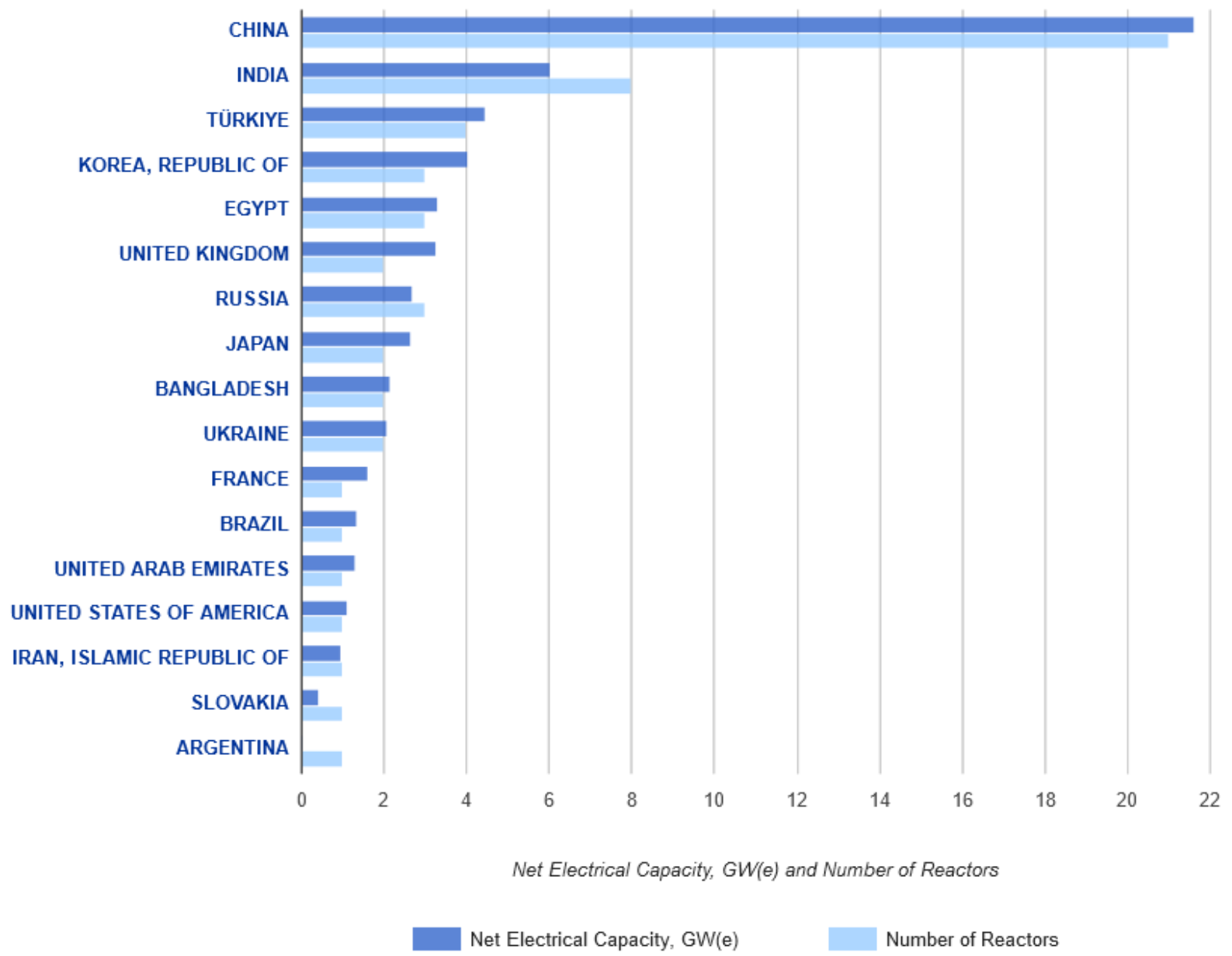
19 568 REACTOR-YEARS OF
OPERATION

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY





UNDER CONSTRUCTION



Net Electrical Capacity, GW(e) and Number of Reactors

■ Net Electrical Capacity, GW(e) ■ Number of Reactors

Central Nuclear Laguna Verde

Localización:

Laguna Verde, Ver.; 70 km. Al NNO de la Cd. de Veracruz

Número de Unidades:

Dos

Proveedor de los Sistemas Nucleares
de Suministro de Vapor:

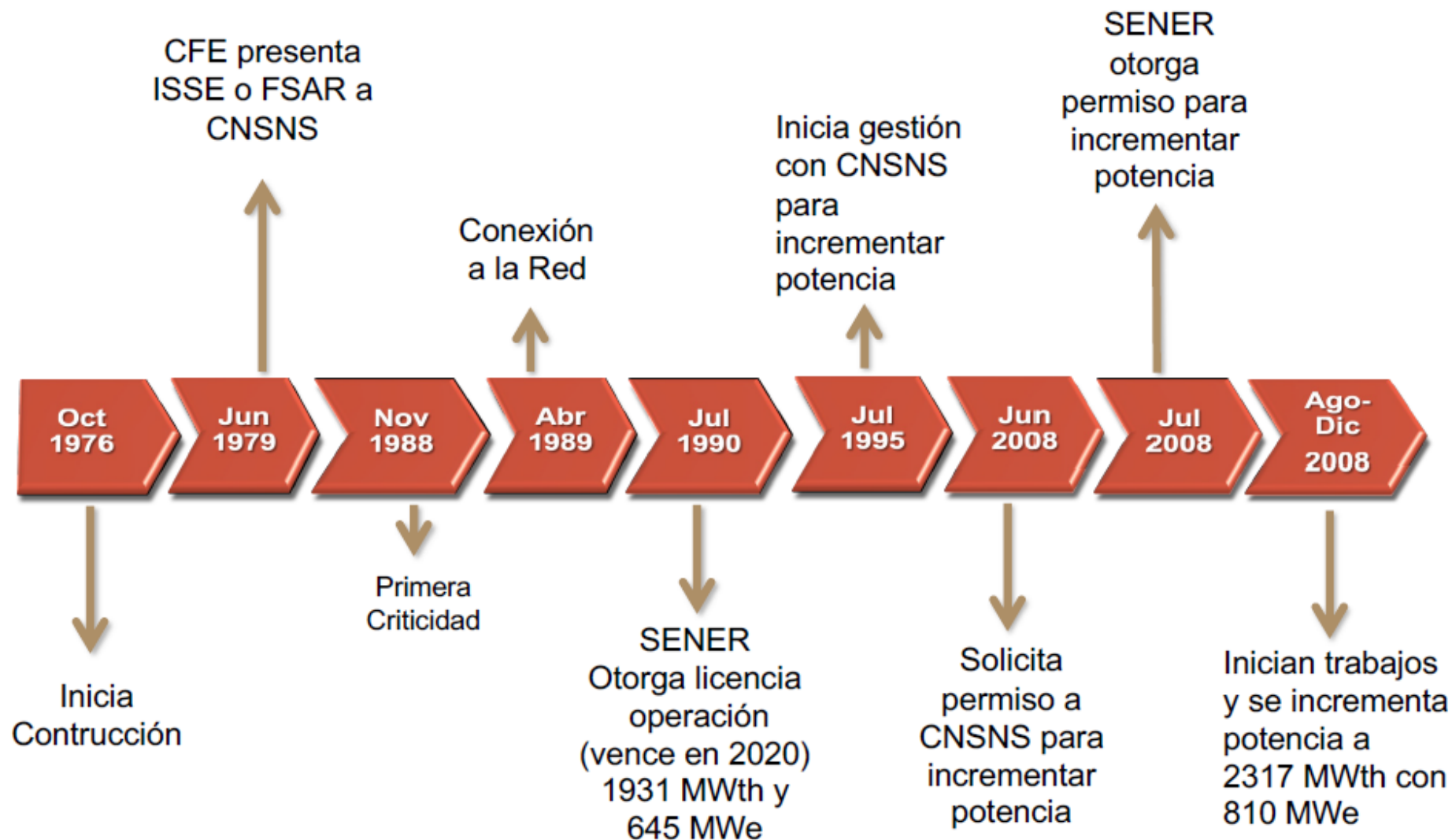
General Electric

Tipo de Reactor:

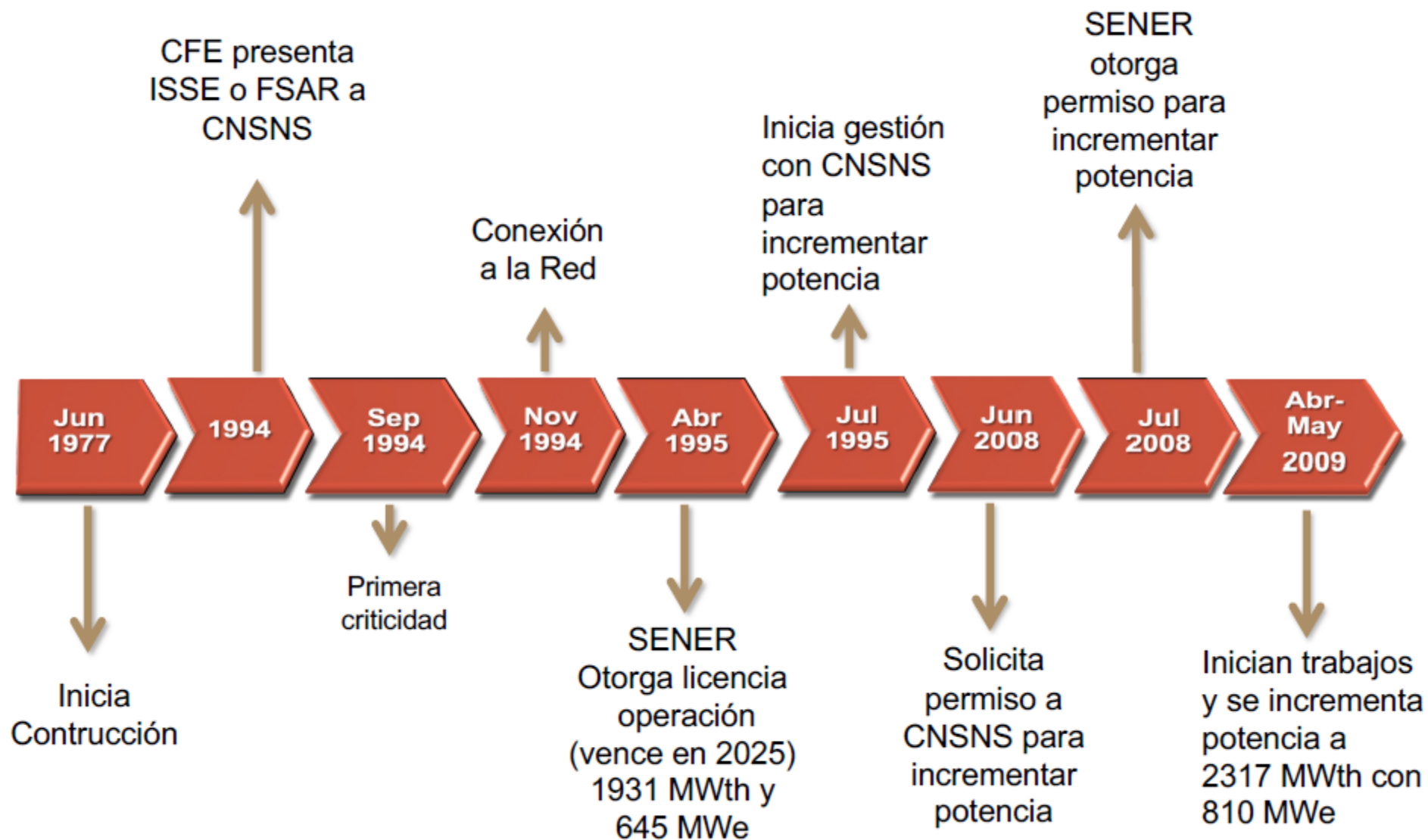
BWR/5 (Reactor de Agua Ligera en
Ebullición)




ANTECEDENTES UNIDAD 1



ANTECEDENTES UNIDAD 2





La U-1 entró en operación en 1990 y la U-2 en 1995, con licencia para operar 30 años. Mediante la renovación de la licencia, la vida operacional de las dos unidades se extenderá por 30 años más; para la U-1 hasta julio 2050 y para la U-2 hasta abril 2055.



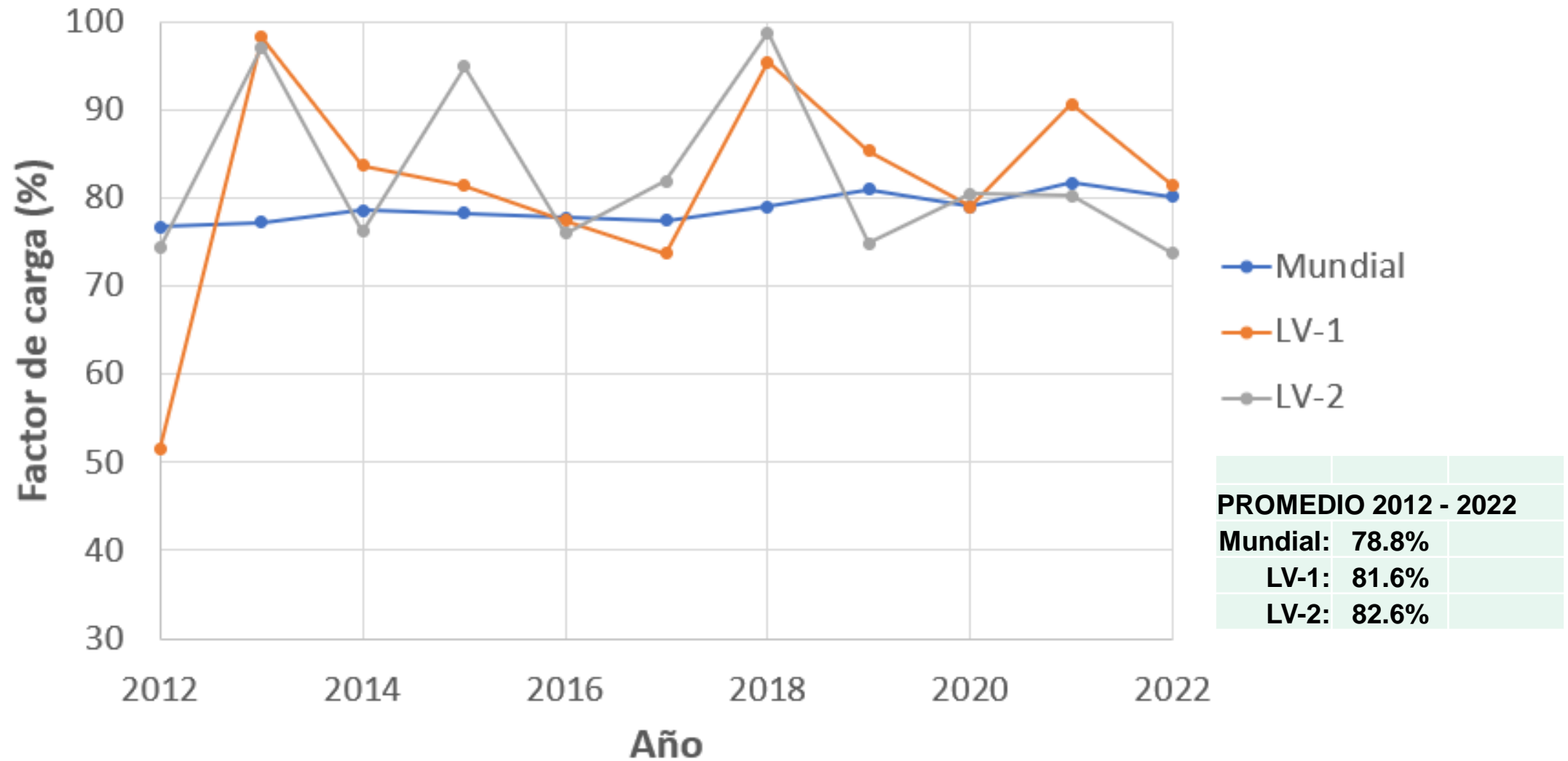
Aun cuando no se han construido nuevas unidades, el aumento de hasta el 20% en la potencia de los reactores, con respecto a la capacidad original de diseño, y las mejoras sustanciales en sus factores de disponibilidad han hecho posible una mayor generación bruta a costos muy bajos.

La CLV produce la energía eléctrica limpia más barata que se despacha en la red eléctrica nacional.

Dato histórico: durante 2018 la CLV entregó a la red nacional 13,200.33 GWh, lo que representó ingresos por venta de energía de \$15,071 mdp y se alcanzó un factor de planta de 96.23 %. En 2021 la U1 acumuló 465 días operando sin interrupción.

(CFE, Informe Anual 2018)

Factor de carga

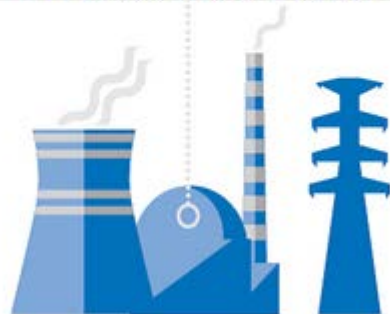




Mexico

IN OPERATION

1 552 MW(e) TOTAL NET CAPACITY



2 NUCLEAR POWER REACTORS

ELECTRICITY PRODUCTION SHARE IN 2022

10 539 GWh ELECTRICITY SUPPLIED



NUCLEAR SHARE TREND





¿Hacia dónde va?

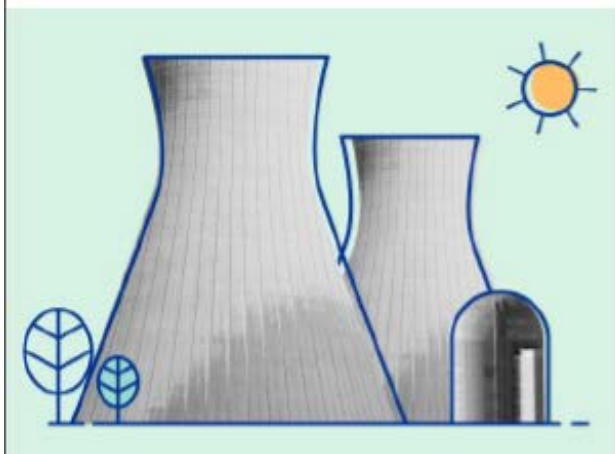
Generaciones de reactores nucleares



Producción de:

- Potencia térmica**
- Potencia eléctrica** en forma continua para todo tipo de aplicaciones energéticas

Fuente: Gen IV International Forum y Foro Nuclear



LARGE, CONVENTIONAL REACTOR
700+ MW(e)



SMALL MODULAR REACTOR
Up to 300 MW(e)



MICROREACTOR
Up to ~10 MW(e)





https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/SMR%20Booklet_22-9-22.pdf

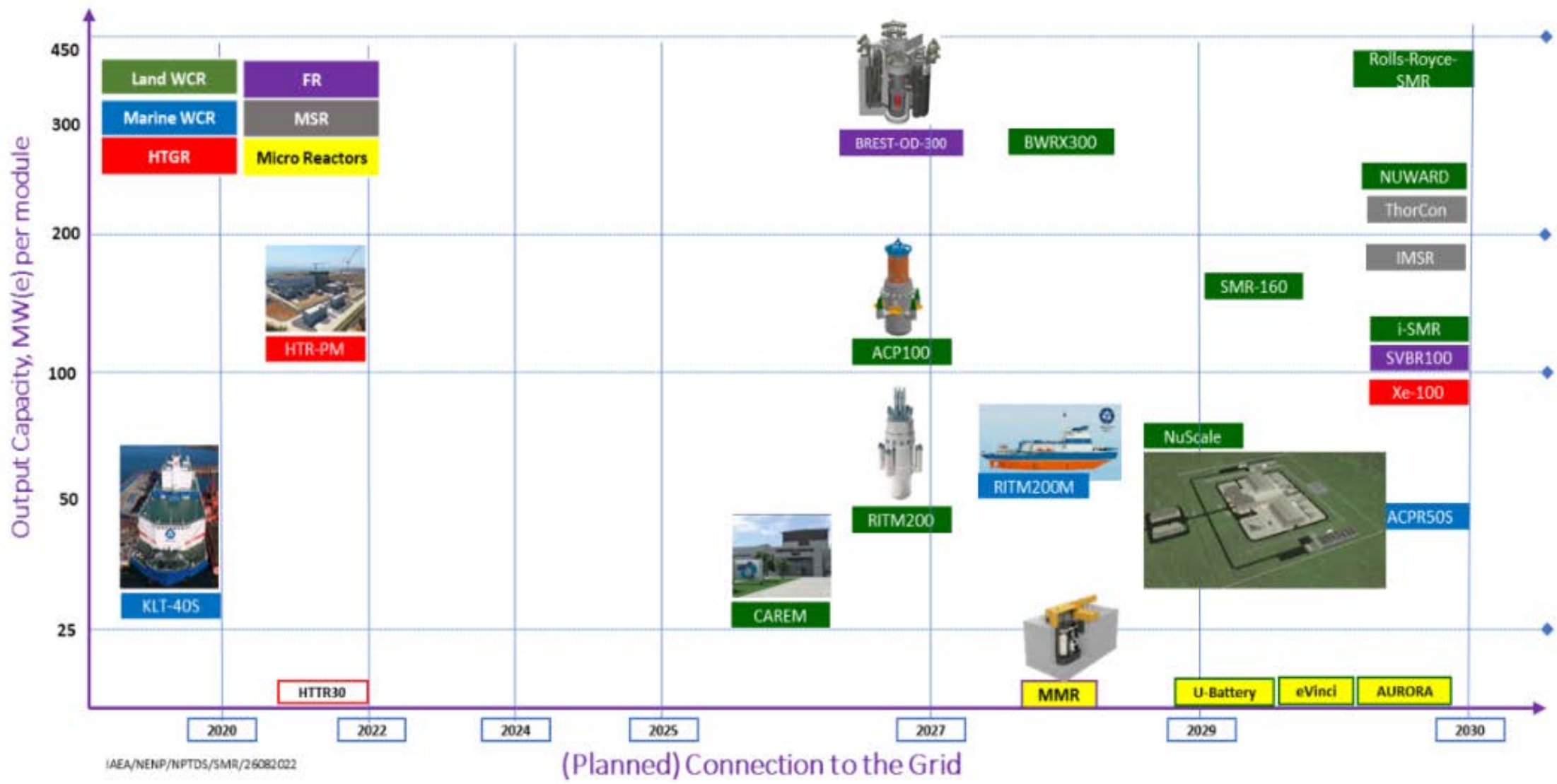


Reactores Modulares Pequeños



Power range MW(e)	1	2	3	4	5
301-450					<ul style="list-style-type: none"> UK-SMR IMR IRIS VBER-300 (Land Based)
251-300					<ul style="list-style-type: none"> BWRX300 DMS CANDU SMR VK-300
151-250					<ul style="list-style-type: none"> CAP200 Westinghouse SMR NUWARD mPower SMR-160
51-150					<ul style="list-style-type: none"> ACP100 SMART DHR KARAT-100
25-100					<ul style="list-style-type: none"> CAREM25 NuScale RITM-200 KARAT-45 HAPPY200
< 25					<ul style="list-style-type: none"> UNITHERM ELENA TEPLATOR RUTA-70

Land-based water-cooled reactors





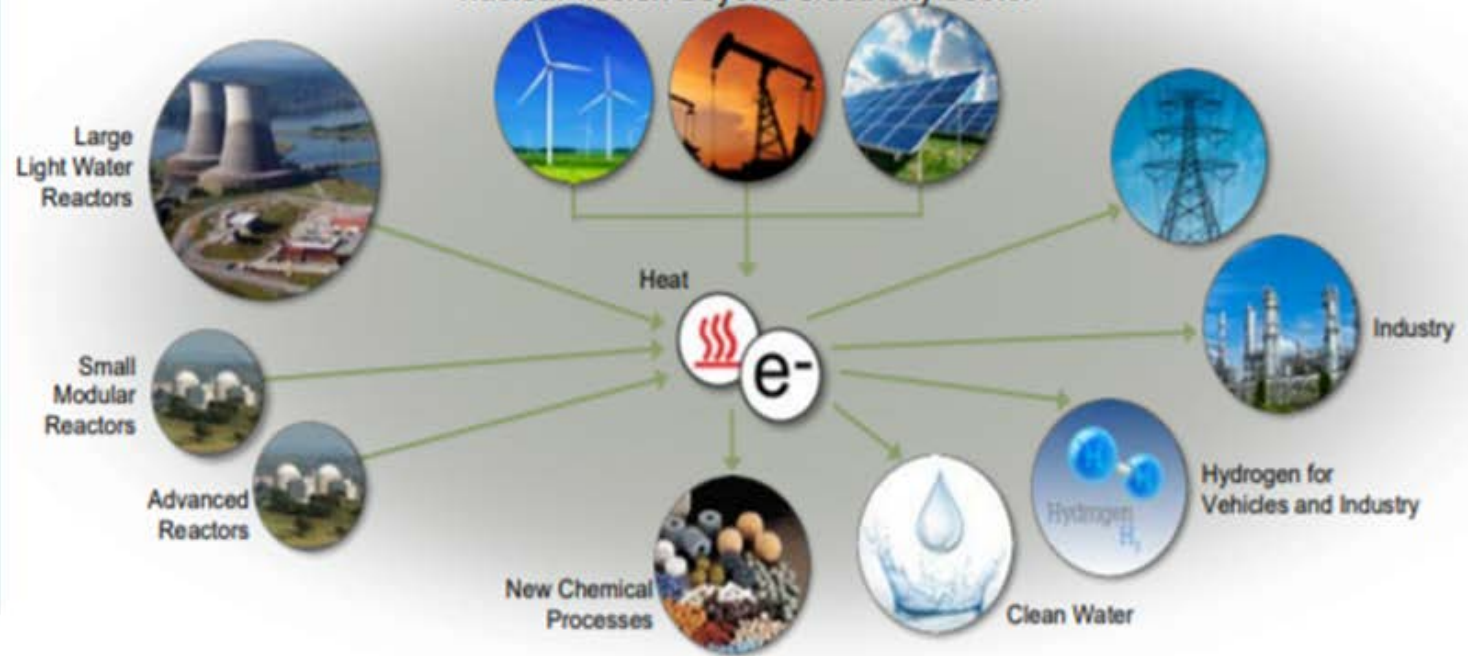
Today

Electricity-only focus



Potential Future Energy System

Integrated grid system that leverages contributions from nuclear fission beyond electricity sector



Algunas opciones de integración de energía nuclear y renovables

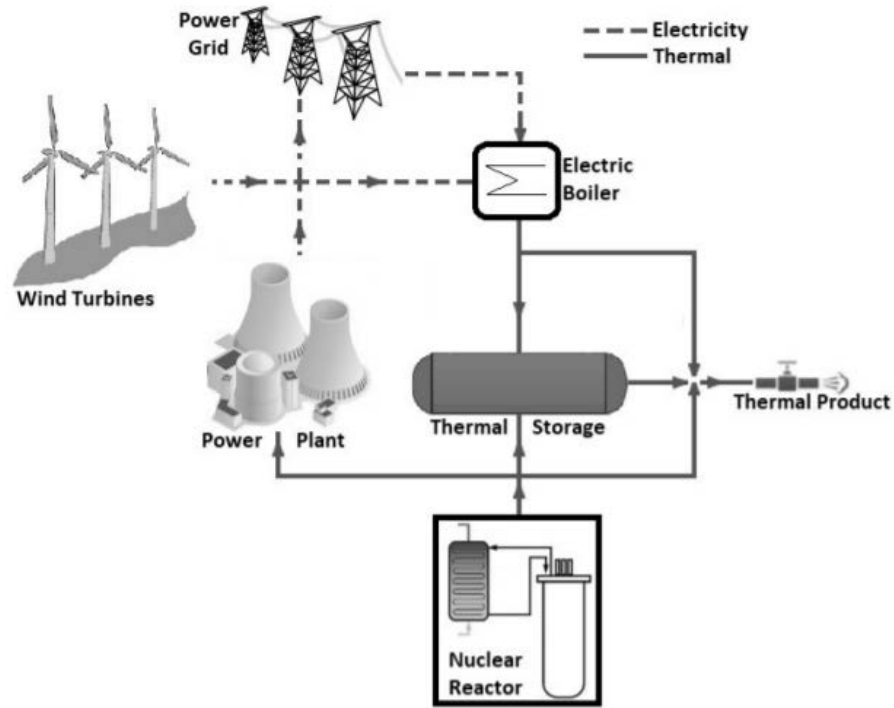


FIG. 9. Proposed hybrid nuclear-wind energy system for Turkey (adapted from [37]).

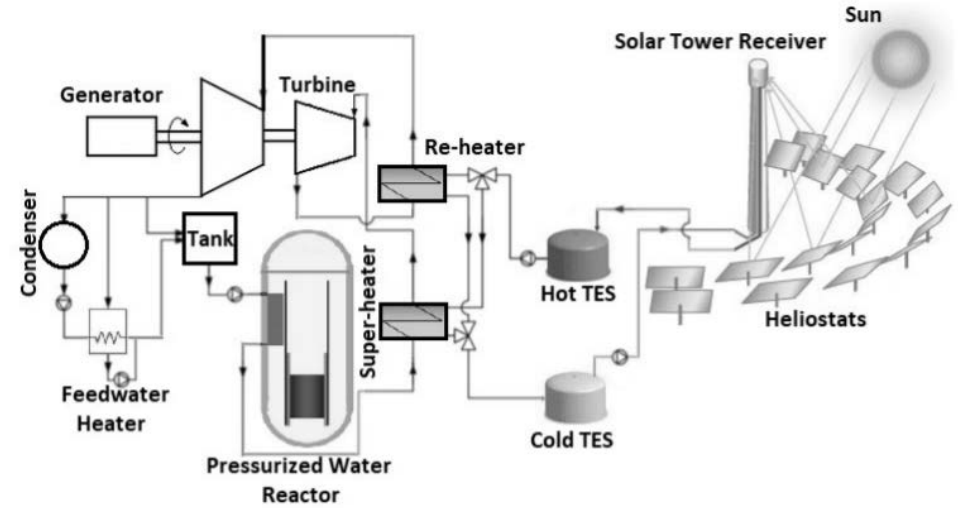


FIG. 7. Proposed hybrid nuclear-solar tower energy system for Turkey (adapted from [34,35]).

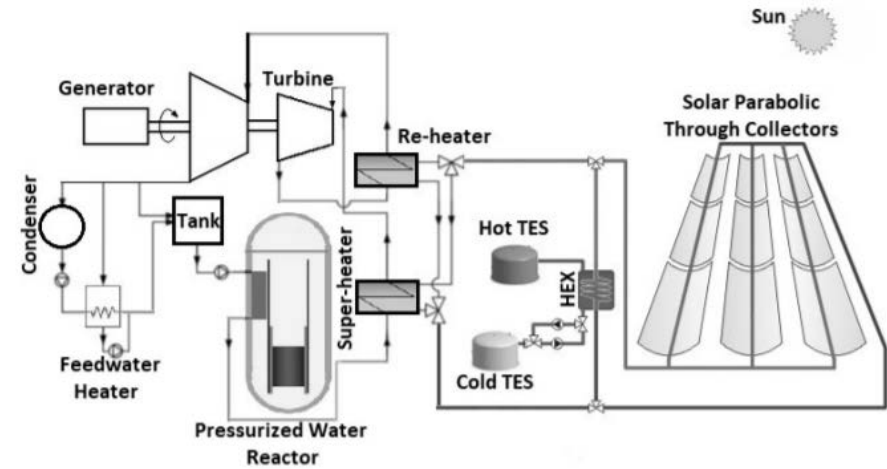
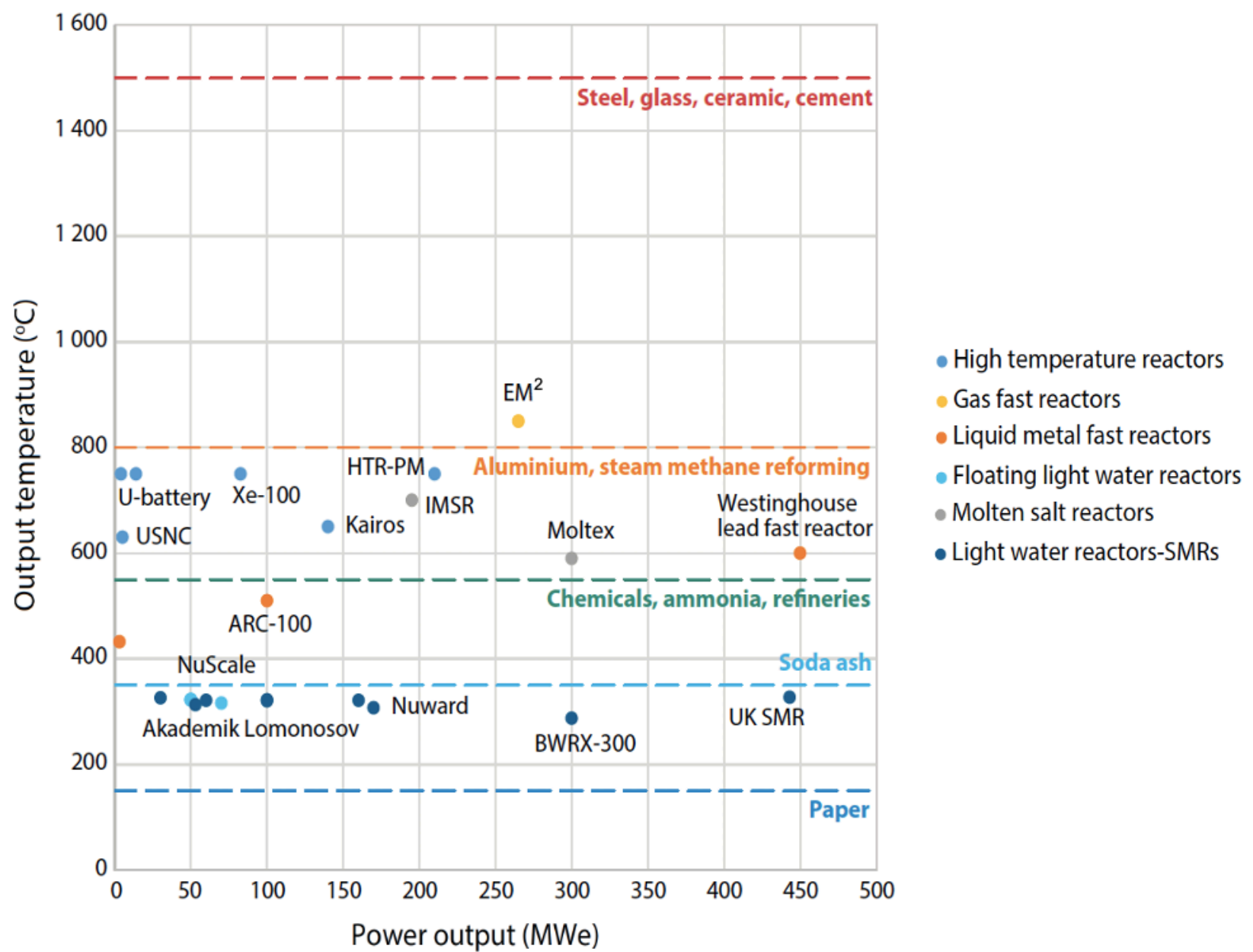


FIG. 8. Proposed hybrid nuclear-solar parabolic through collector energy system for Turkey (adapted from [36]).



NEA (2022). *Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy*. OECD .

www.oecd-nea.org/jcms/pl_69396/meeting-climate-change-targets-the-role-of-nuclear-energy

Dow and X-energy to build U.S. Gulf Coast nuclear demonstration plant

<https://www.reuters.com/business/energy/dow-x-energy-build-us-gulf-coast-nuclear-demonstration-plant-2023-03-01/>

Xe-100

200 MW ...Thermal Output

80 MW ...Electric Output

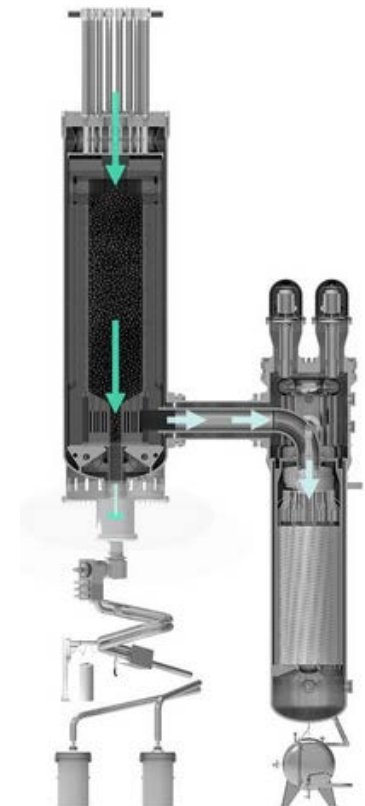
750°C ...Helium Temperature

6 MPa ...Helium Pressure

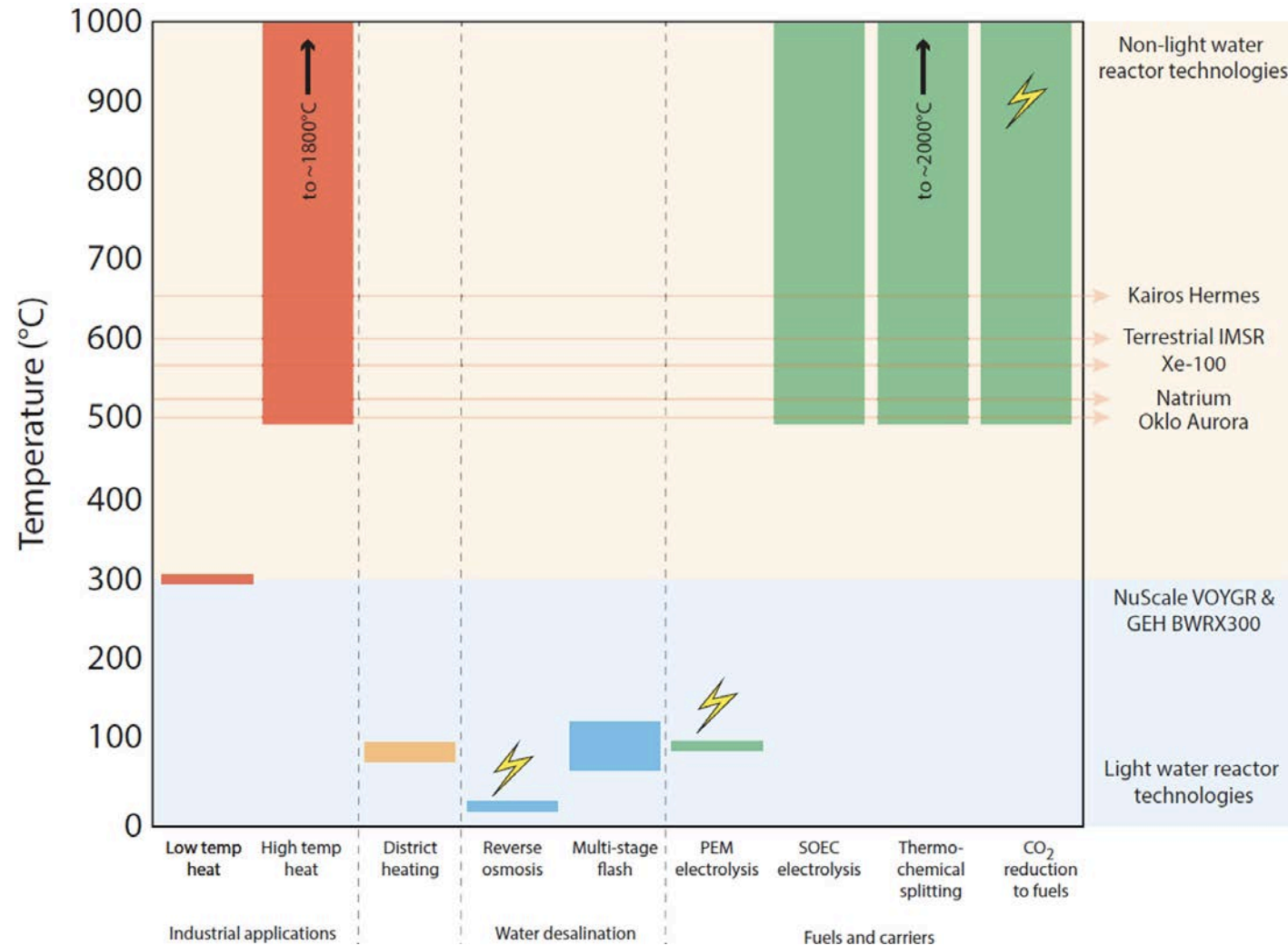
565°C ...Steam Temperature

16.5 MPa ...Steam Pressure

- 220,000 Graphite Pebbles with TRISO Particle fuel
- High temperature tolerant graphite core structure
- ASME compliant reactor vessel, core barrel & steam generator
- Designed for a 60-year operational life
- Flexible application – electricity and/or process heat
- Base load or load following
- Online refueling (95% plant availability)
- High burn-up fuel cycle (160 GWd/tHM)



Microreactores ($P < 10\text{MWe}$)



- Los microreactores pueden suministrar electricidad o calor de proceso para uso directo (o ambos).
- Mercados con redes eléctricas pequeñas, generación distribuida o en lugares donde la infraestructura energética es mínima.

*Aplicaciones no eléctricas para reactores avanzados
(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023)*

Recientemente, el Laboratorio Nacional de Idaho llevó a cabo una evaluación del mercado de microreactores con el fin de identificar sus mercados potenciales (Black et al., 2023). En este estudio, las aplicaciones de los microreactores se agruparon en cinco perfiles de mercado:

- Operaciones Aisladas
- Energía Distribuida
- Resiliencia Urbana
- Asistencia en Desastres
- Propulsión Marina



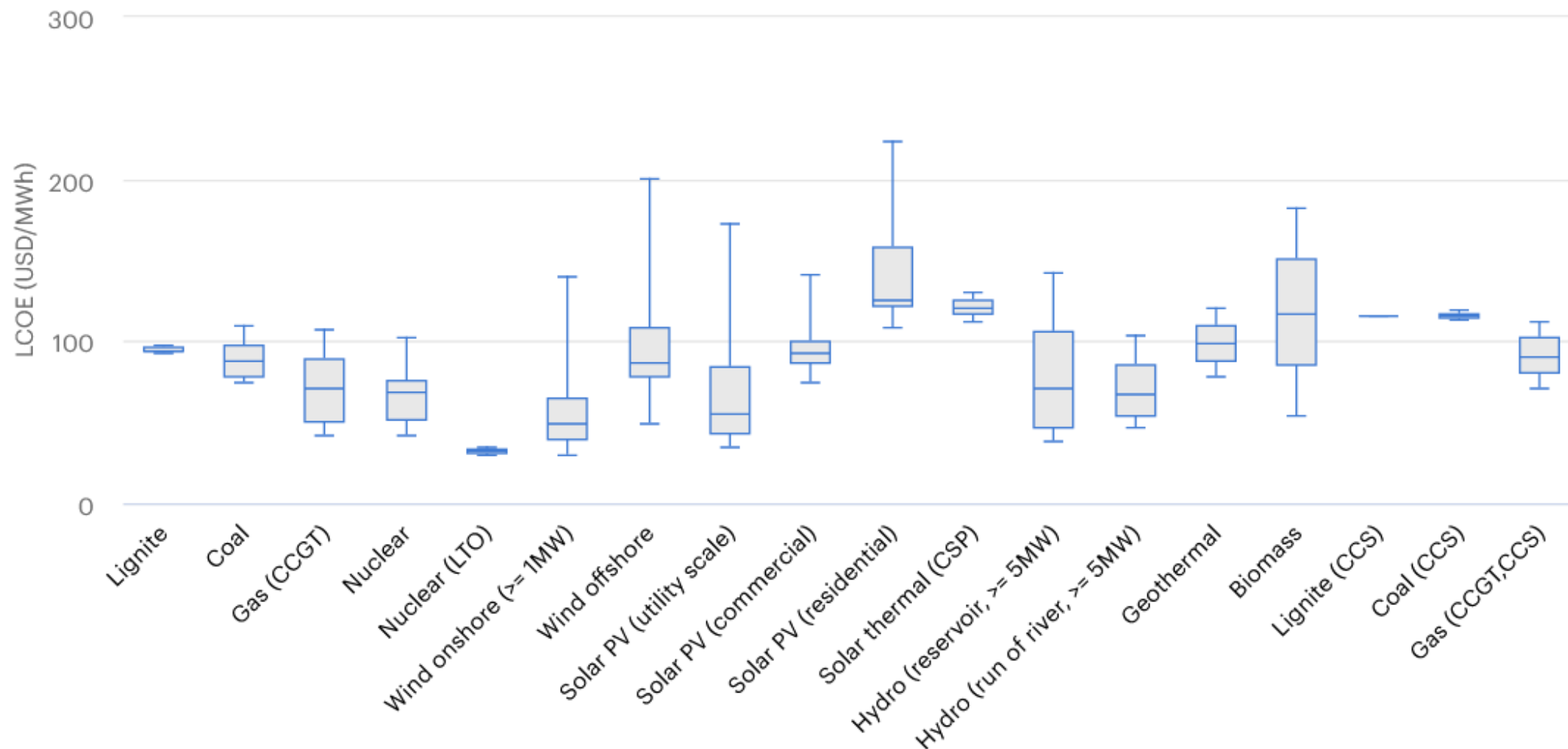
Caso de México

En este estudio, se clasificaron los mercados potenciales en 63 países, incluidos los países con experiencia nuclear y aquellos que van iniciando en la industria nuclear.

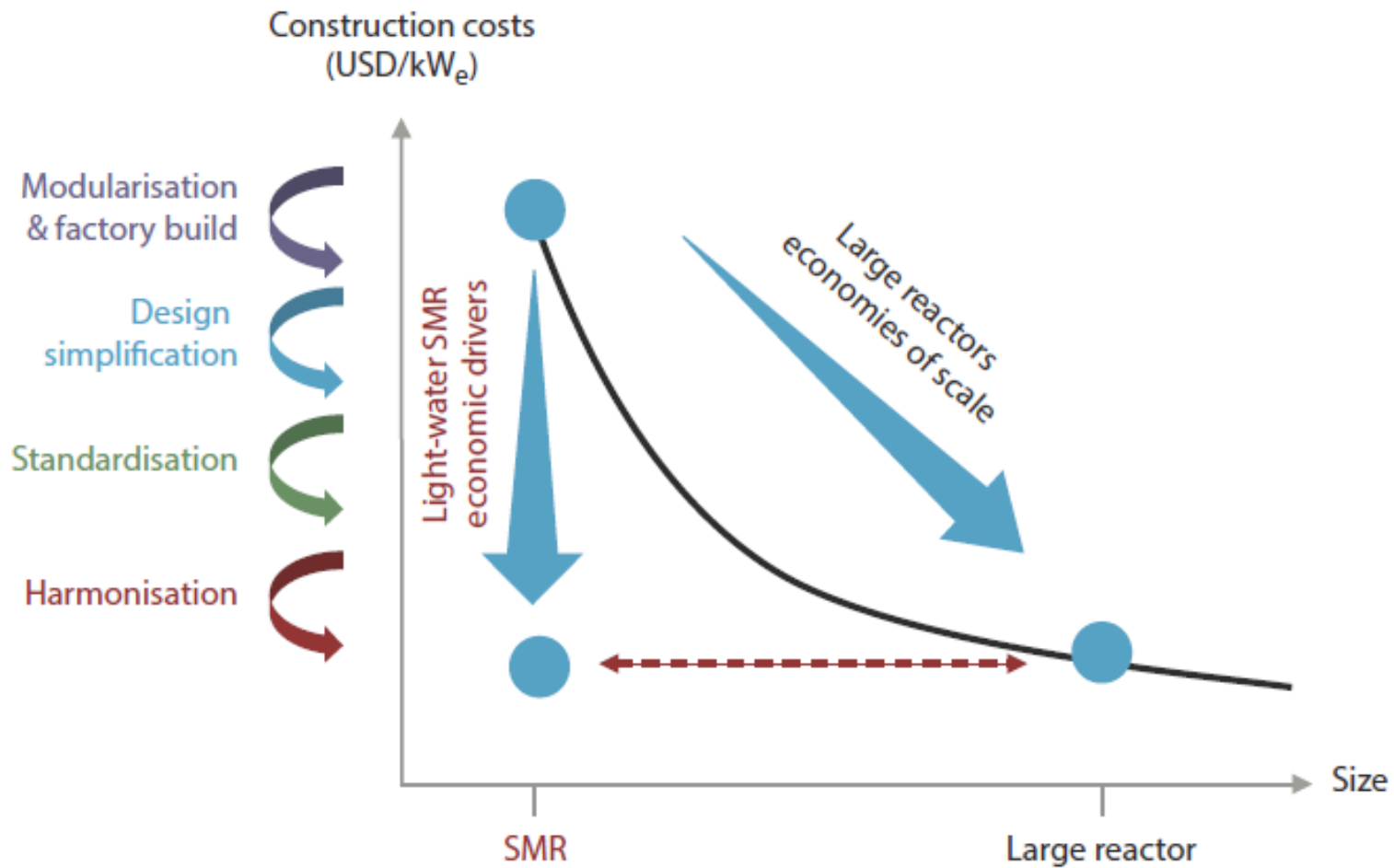
País	Calificación de Perfiles de Mercado				
	Operaciones Aisladas	Energía Distribuida	Resiliencia Urbana	Asistencia en Desastres	Propulsión Marina
México	37 / 40	28 / 30	20 / 20	8 / 10	9 / 10

Dimensión Económica

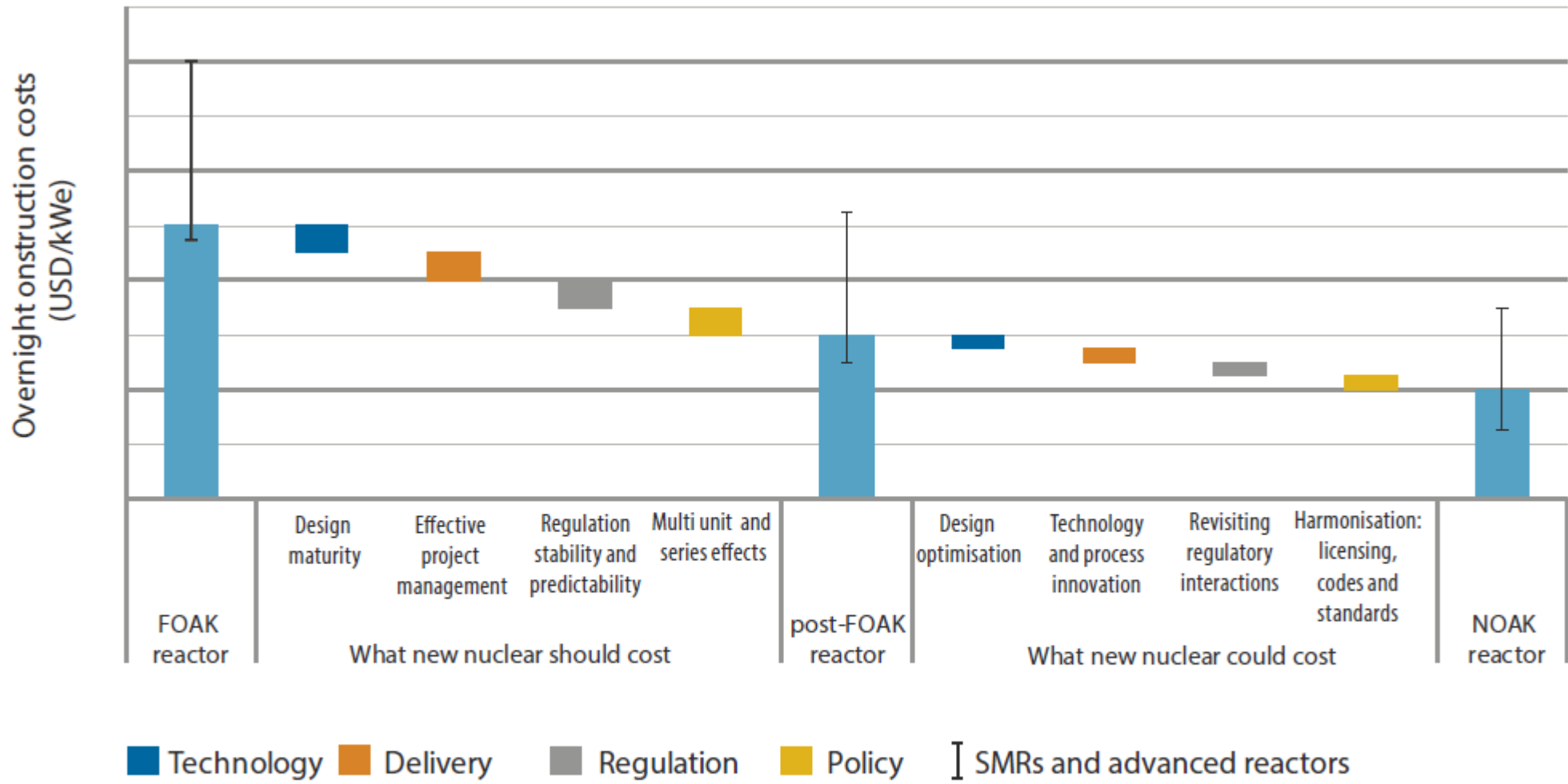
LCOE by technology, discount rate of 7%



IEA. All rights reserved.



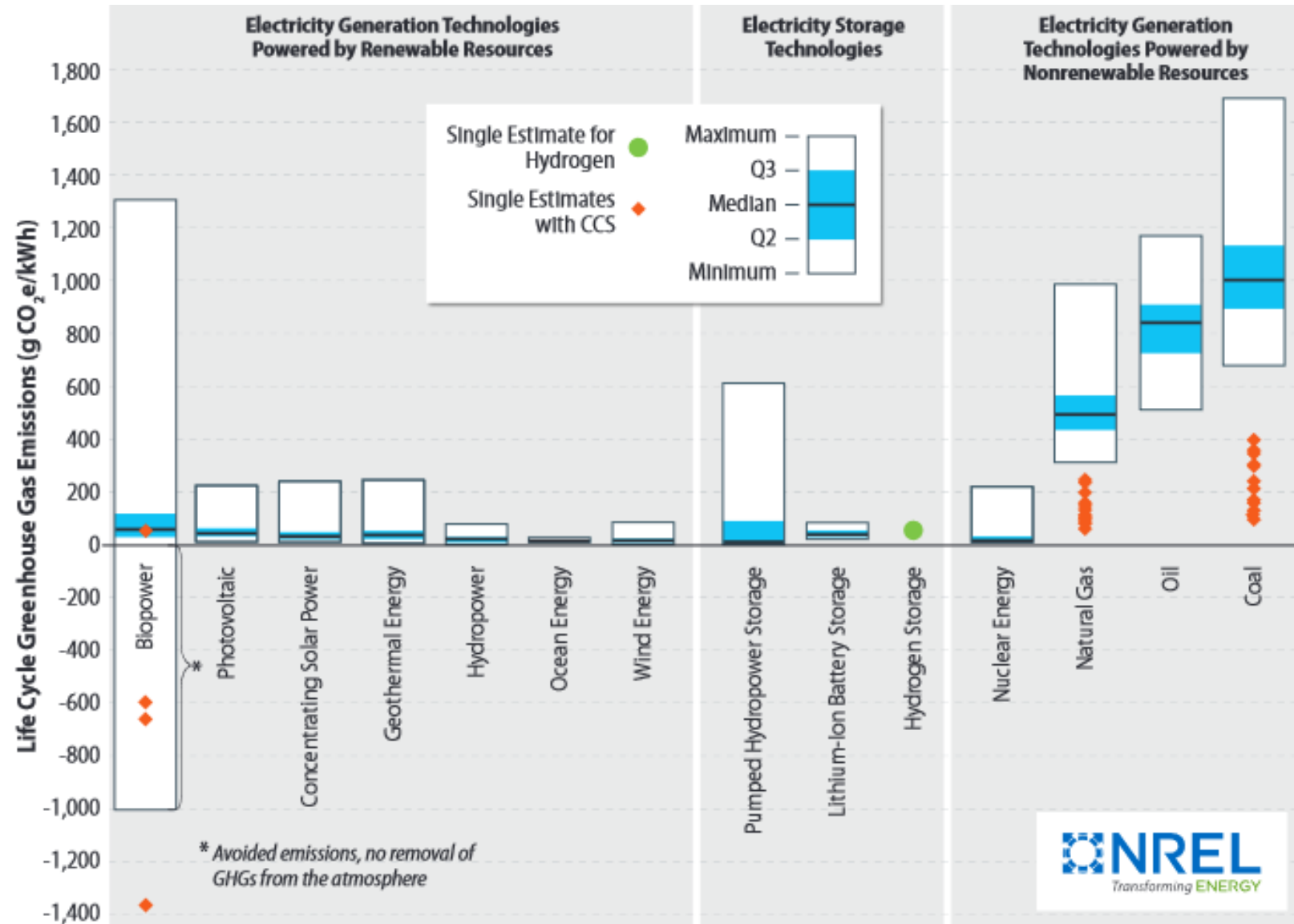
Source: NEA (2020).



Note: kWe = kilowatt electrical capacity.

Source: NEA (2020).

Dimensión Ambiental



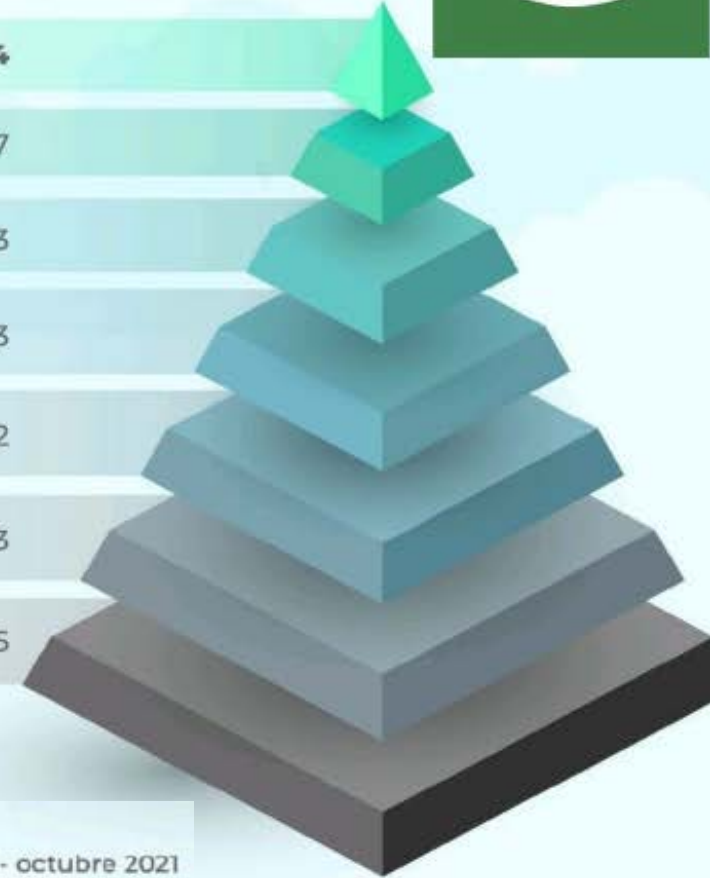
La energía nuclear está haciendo una contribución masiva a la lucha contra el cambio climático

13 ACCIÓN POR EL CLIMA



- Emisiones de CO₂ del ciclo de vida de distintas tecnologías
- La Energía Nuclear es la que menor emite
- Una matriz de energética basada en energía hidráulica y nuclear es menos contaminante

Tecnología	Rango (g CO ₂ / kWh)
 Nuclear	5,1 - 6,4
 Hidráulica	6,1 - 147
 Eólica	7,8 - 23
 Solar fotovoltaica	7,4 - 83
 Solar de concentración	14 - 122
 Gas	403 - 513
 Carbón	753 - 1.095



FuenteS: Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options
UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) - octubre 2021

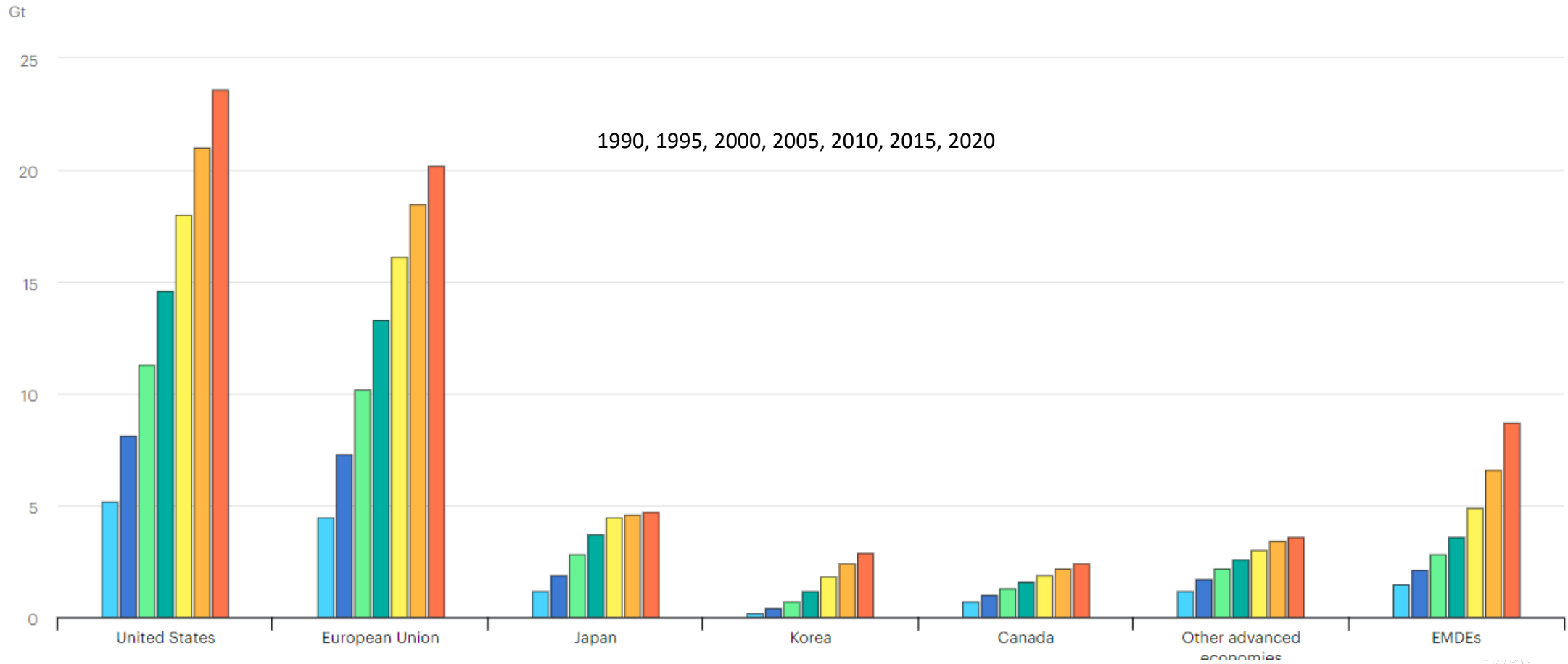


Aplicaciones Pacíficas de la Energía Nuclear

M.I. Florencia Rentería del Toro

Emisiones de CO₂ evitadas por la energía nuclear por país o región

Gt
acumuladas



Notes

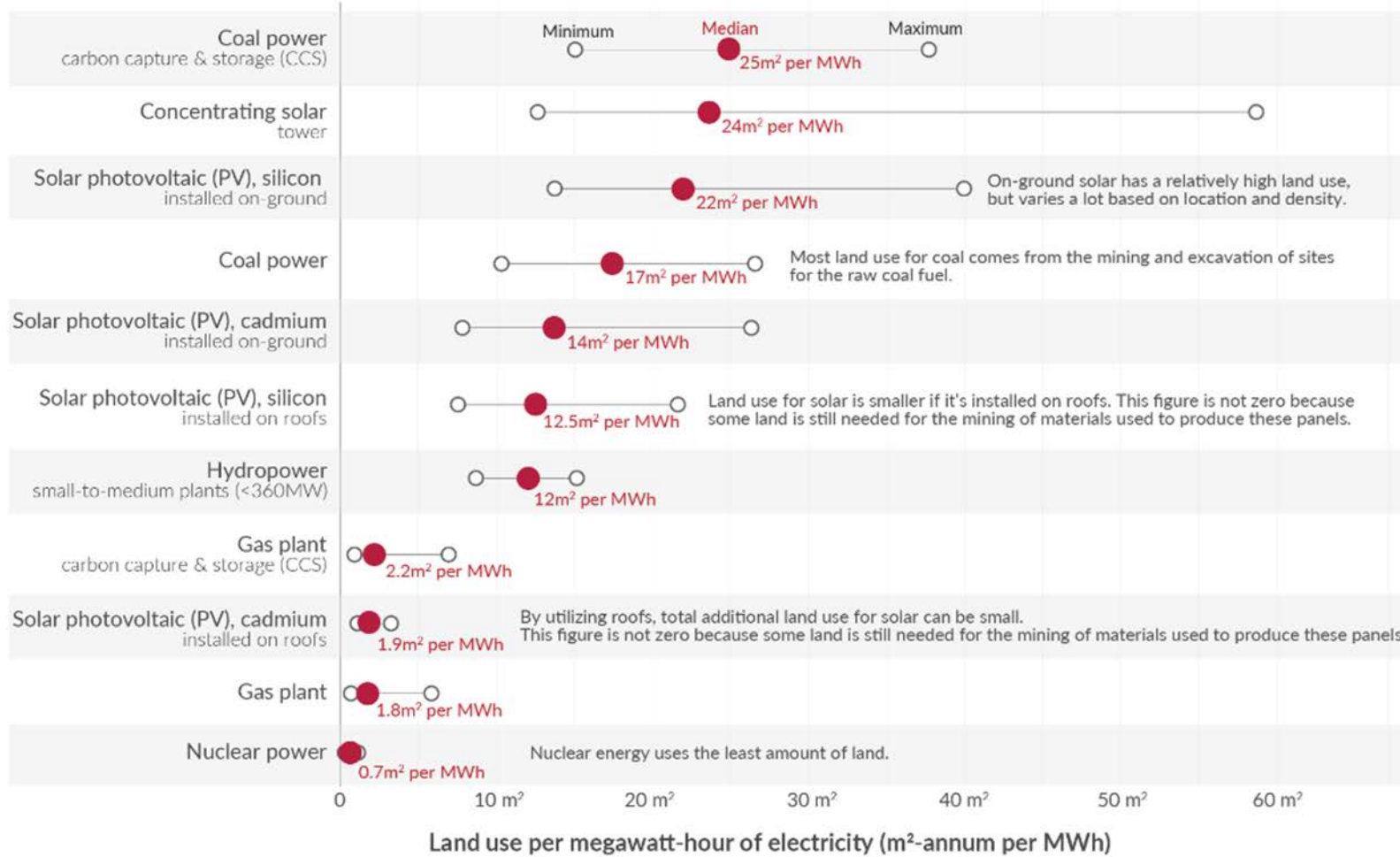
Avoided emissions are calculated starting from 1971. EMDEs = emerging market and developing economies

IEA, Cumulative CO₂ emissions avoided by nuclear power by country or region, **1990-2020**, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cumulative-co2-emissions-avoided-by-nuclear-power-by-country-or-region-1990-2020-2>, IEA. License: CC BY 4.0

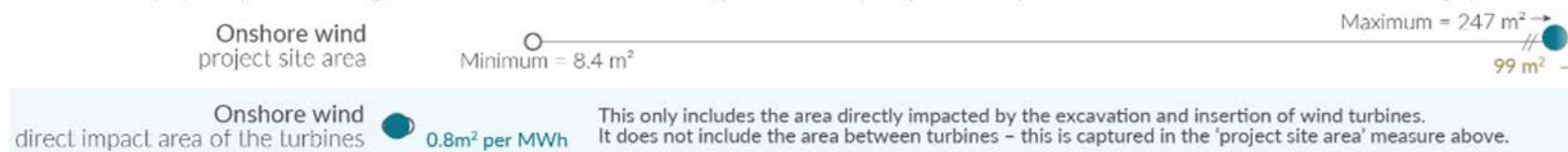
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cumulative-co2-emissions-avoided-by-nuclear-power-by-country-or-region-1990-2020-2>

Land use of energy sources per unit of electricity

Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.

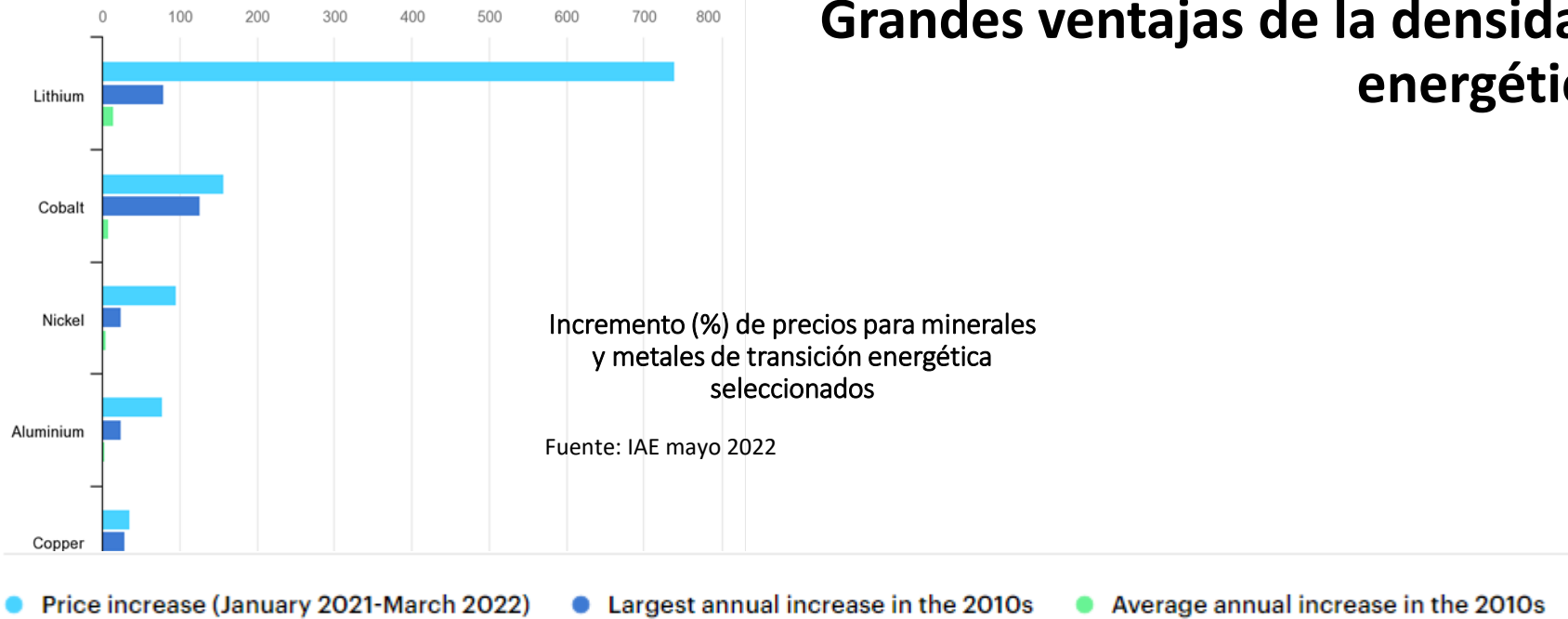


The land use of onshore wind can be measured in several ways, and is distinctly different from land use of other energy technologies. Land between wind turbines can be used for other purposes (such as farming), which is not the case for other energy sources. The spacing of turbines, and the context of the site means land use is highly variable.

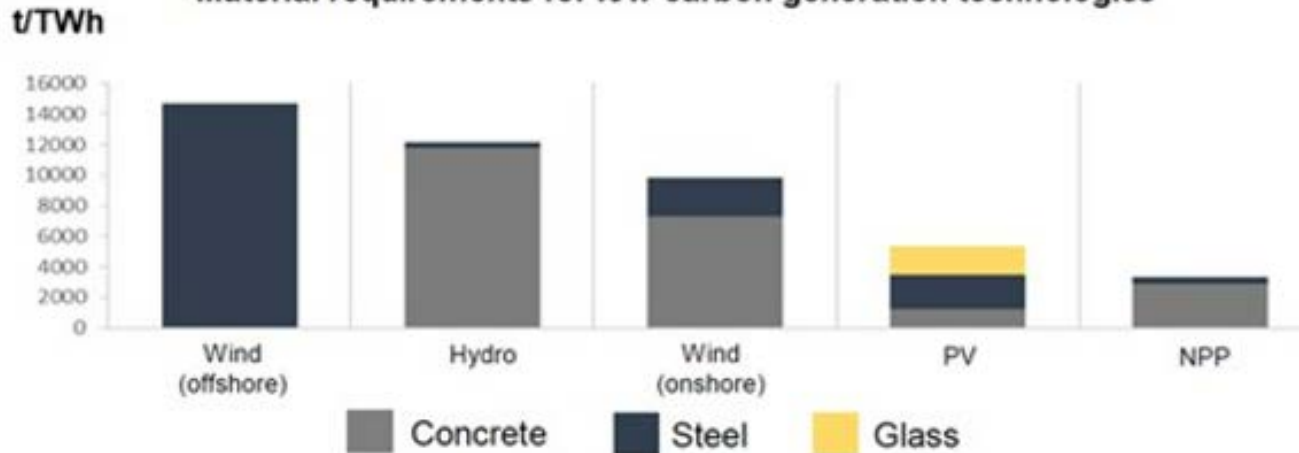


Note: Capacity factors are taken into account for each technology which adjusts for intermittency. Land use of energy storage is not included since the quantity of storage depends on the composition of the electricity mix. Source: UNECE (2021). Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe for all data except wind. Wind land use calculated by the author. OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

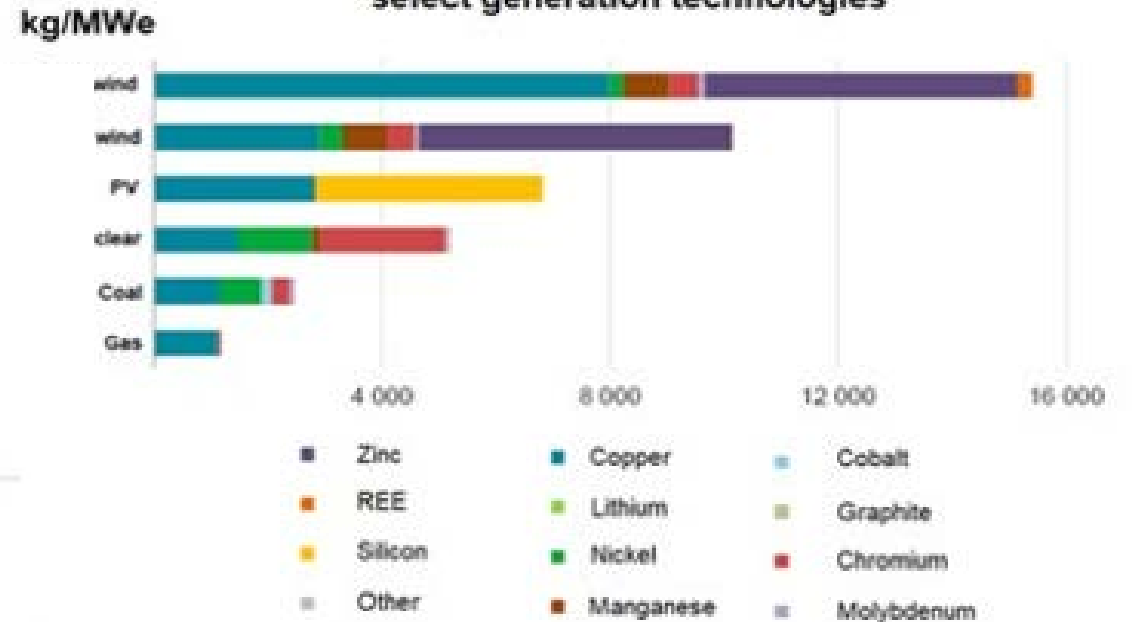
Grandes ventajas de la densidad energética



Material requirements for low-carbon generation technologies



Critical material requirements for select generation technologies



RESIDUOS PELIGROSOS



CORROSIVO

Son aquellos muy ácidos o alcalinos que reaccionan violentamente con otros materiales.

INFECCIOSO O PATÓGENO (RPBI's)

Son generados durante servicios de atención médica.



EXPLOSIVO

Son aquellos capaces de producir una reacción o descomposición detonante.

RADIATIVO

Fueron usados en medicina nuclear, industria, investigación y para producir electricidad.



INFLAMABLE

Son aquellos que pueden causar un incendio por fricción o cambios químicos espontáneos.

TÓXICO

Son aquellos que pueden causar muerte o provocar efectos nocivos a la salud.



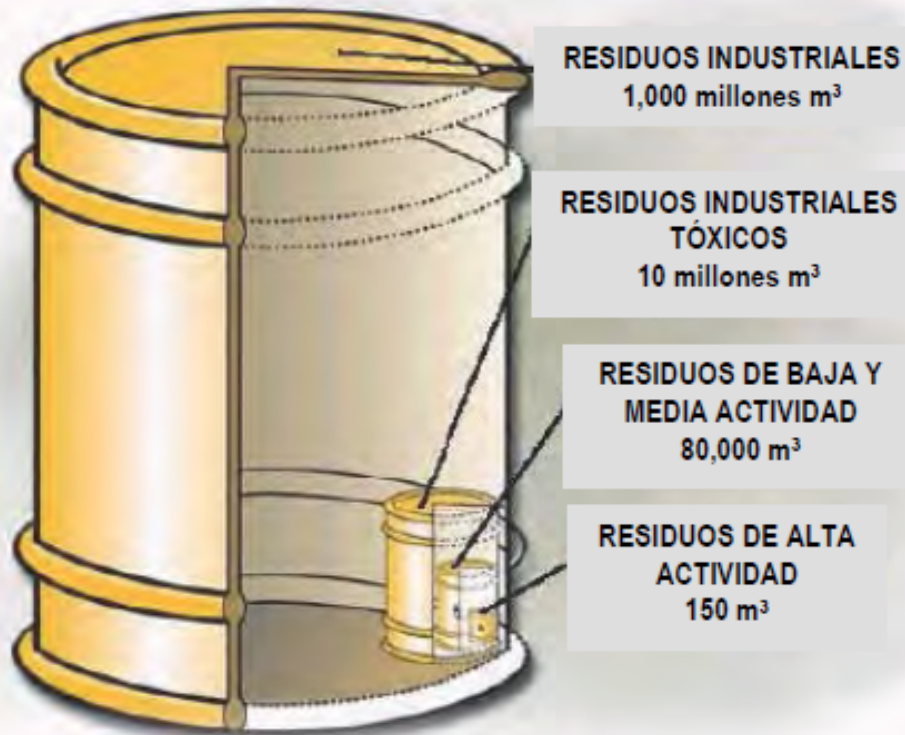
#CulturaNuclear



ININ

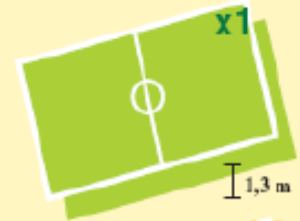
INSTITUTO NACIONAL
DE INVESTIGACIONES
NUCLEARES

Producción Anual de Residuos en la Unión Europea



Volumen de los residuos que se gestionarán en España en 40 años

Residuos de Alta Actividad
España (9 centrales nucleares)
(RAA) **12.000 m³ =**



Residuos de Baja y Media Actividad
España (hospitales, laboratorios, etc.)
(RBMA) **200.000 m³ =**



Residuos Tóxicos y Peligrosos
España (químicas, petroquímicas, siderurgias, etc.)
(RTP) **580 millones de m³ =**



Los residuos radiactivos producidos por las centrales nucleares españolas representan sólo el 0,1% del total de los residuos peligrosos

Confinamiento Definitivo de Desechos Radiactivos de Nivel Medio y Bajo

(Repositorios Superficiales con y sin Barreras de Ingeniería)

Repositorio Superficial sin Barreras de Ingeniería



Trincheras el confinamiento de Desechos Radiactivos de Nivel Medio y Bajo en los Estados Unidos

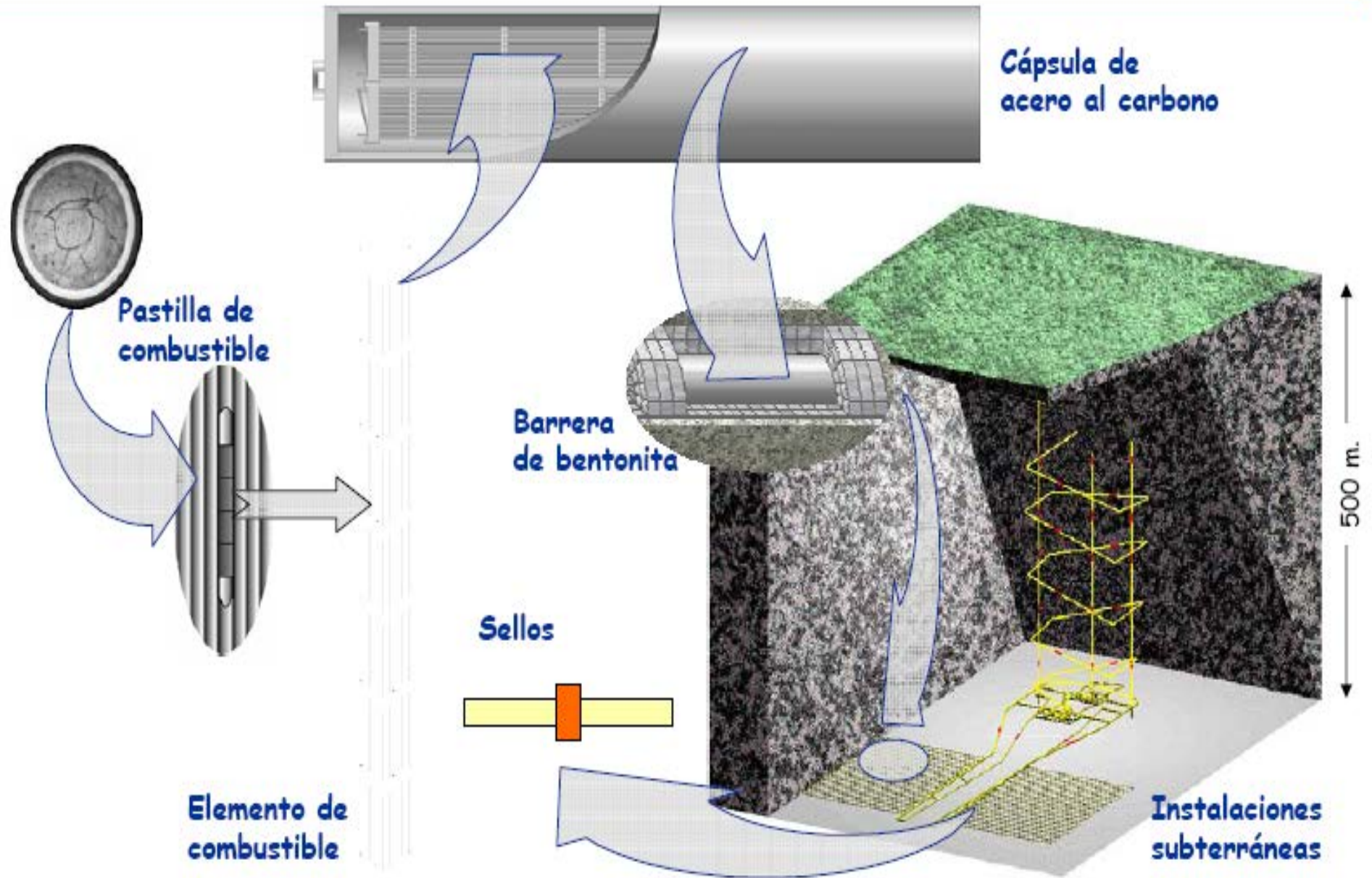
Repositorio Superficial con Barreras de Ingeniería



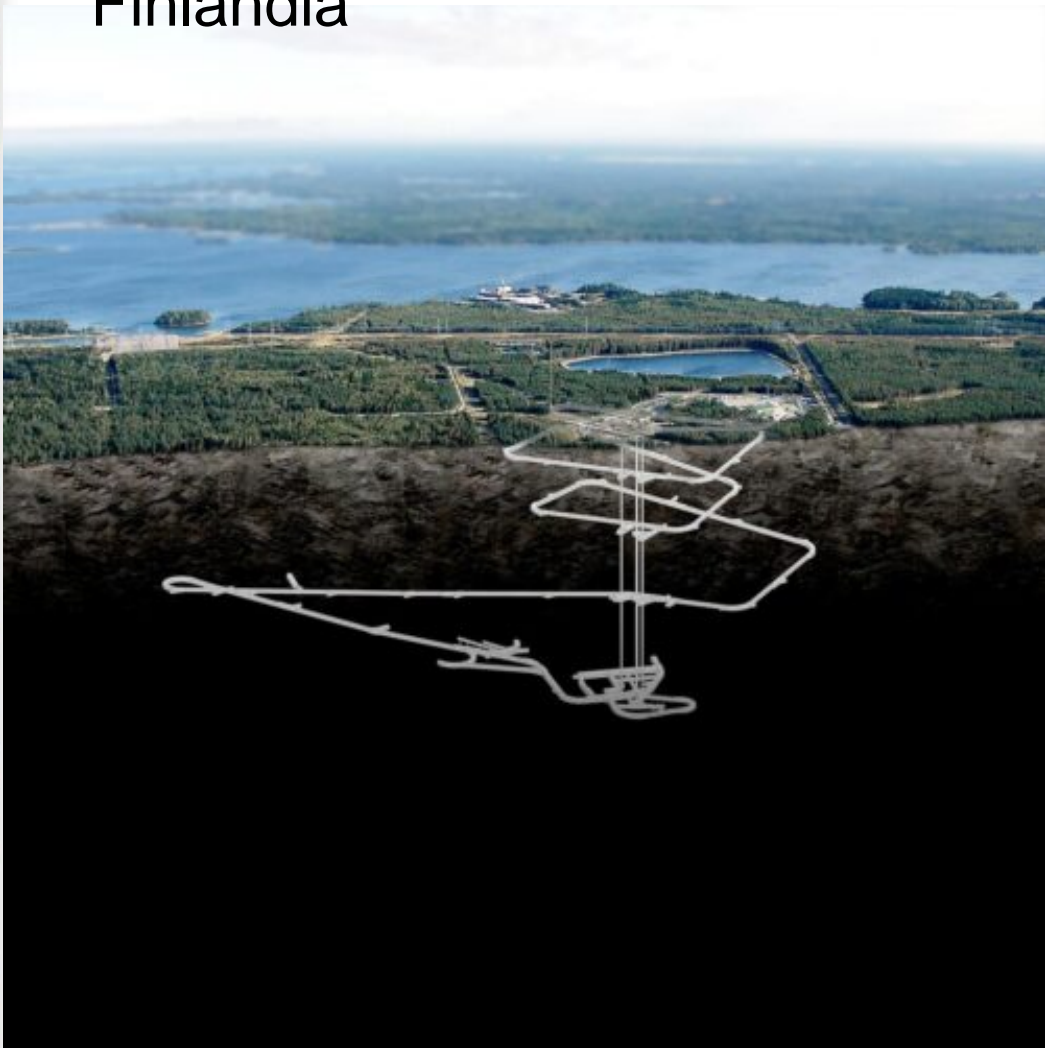
Trincheras para el confinamiento de Desechos Radioactivos de Nivel Medio y Bajo en Francia

Se tiene estimado que el volumen de Desechos Radiactivos de Nivel Medio y Bajo, a confinar definitivamente al final de la operación comercial de la CLV (después de 60 años de operación comercial) será de 2,690 m³. Este volumen equivale a aproximadamente la capacidad de una alberca olímpica.

Barreras de Ingeniería



Onkalo: Primer Almacén Geológico Profundo (AGP) del Mundo Finlandia

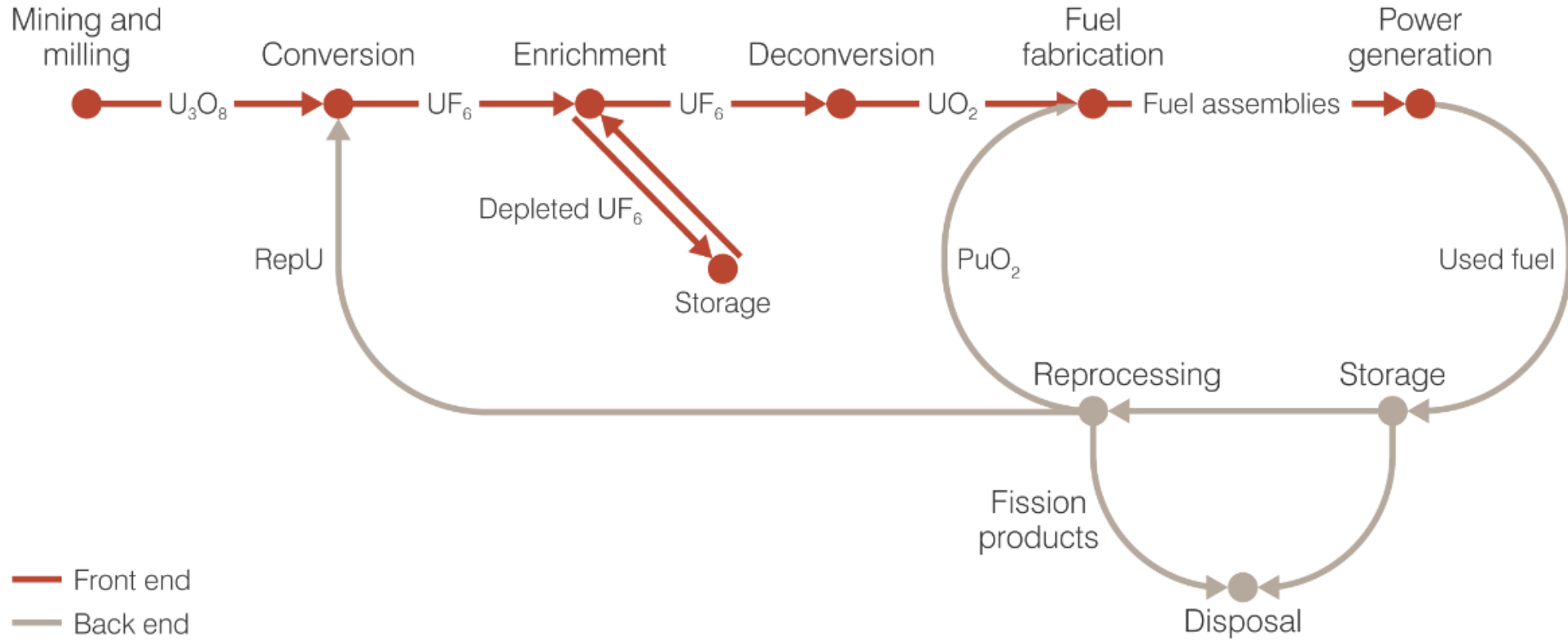


<https://rinconeducativo.org/es/noticias/onkalo-primer-almacen-geologico-profundo-del-mundo/>

Ciclo de Combustible Nuclear

U234 2.455E+5 y 0+ α,n,sf,... 0.0055	U235 7.038E+8 y 7/2- α, ²⁰ Ne,sf,...* 0.7200
---	--

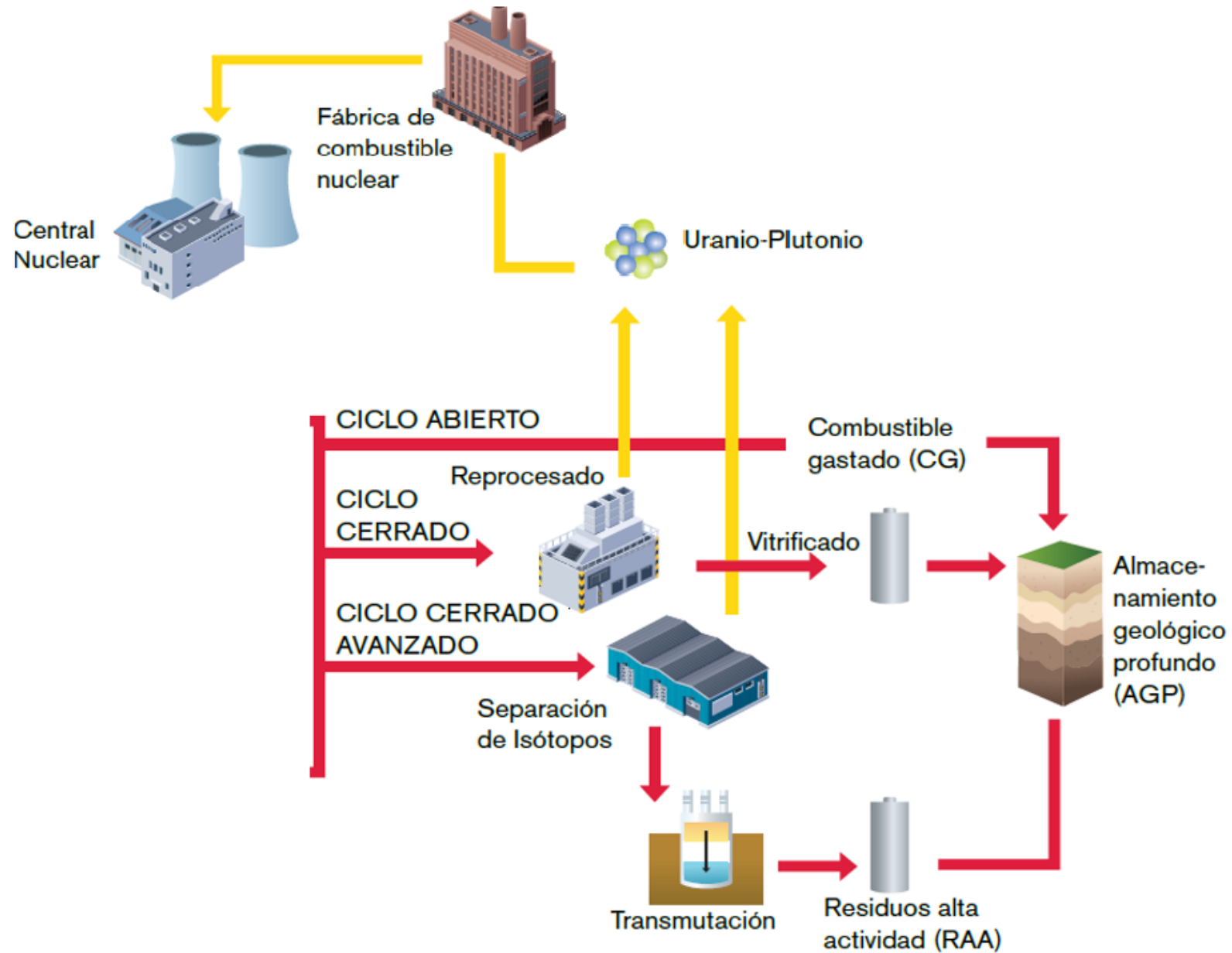
U238 4.468E+9 y 0+ α,β-β-,sf,... 99.2745



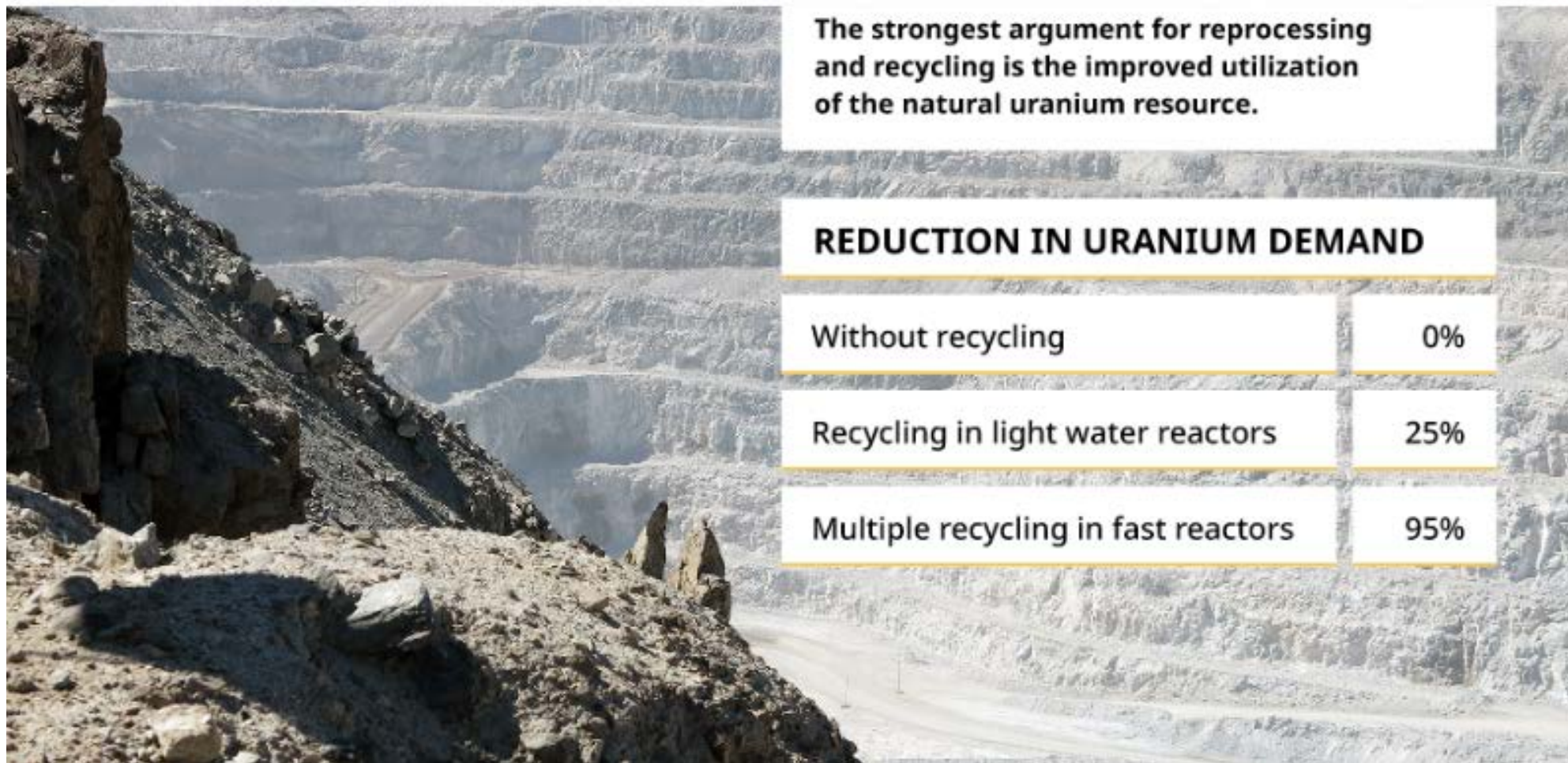
World Nuclear Association Image Library:

<https://www.world-nuclear.org/gallery/the-world-nuclear-fuel-report-expanded-summary/the-nuclear-fuel-cycle.aspx>

Ciclo de Combustible Nuclear Avanzado



Utilization of Natural Resources

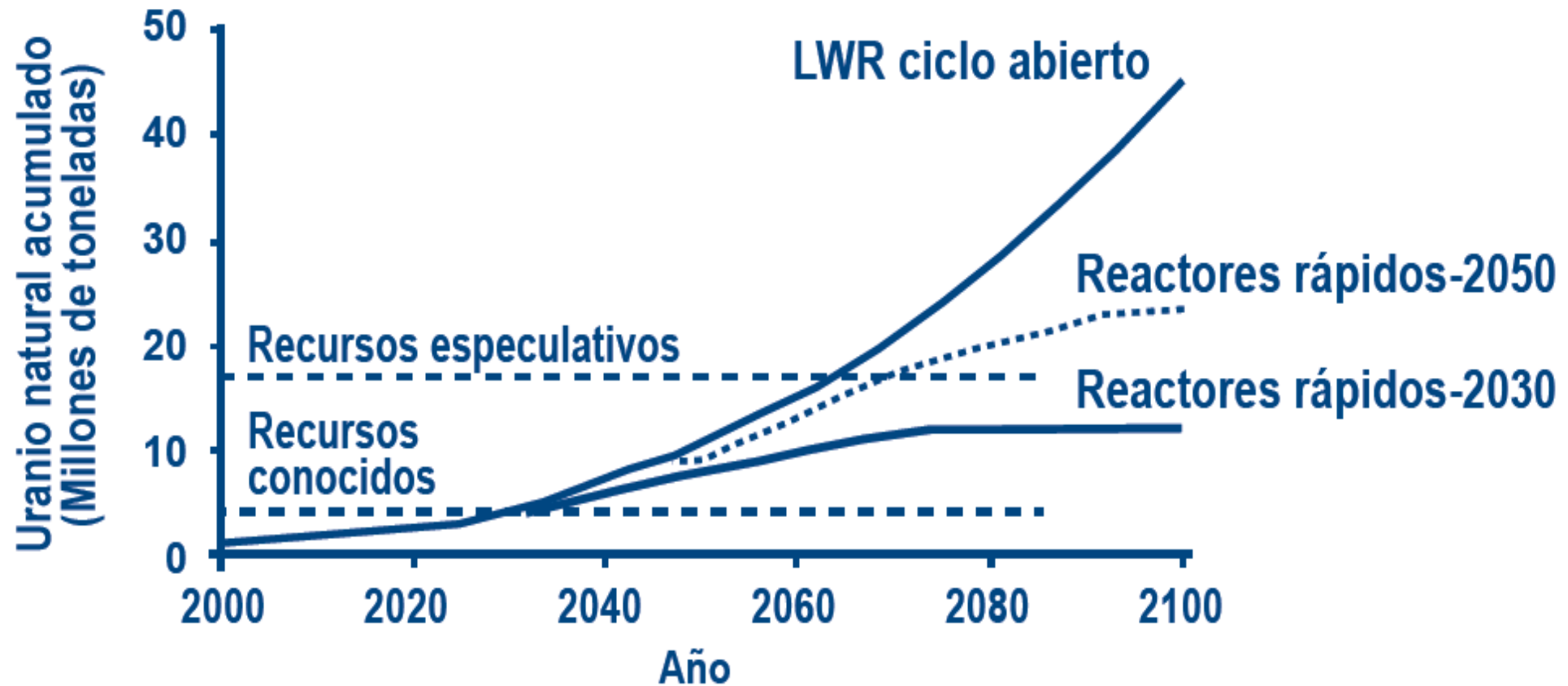


The strongest argument for reprocessing and recycling is the improved utilization of the natural uranium resource.

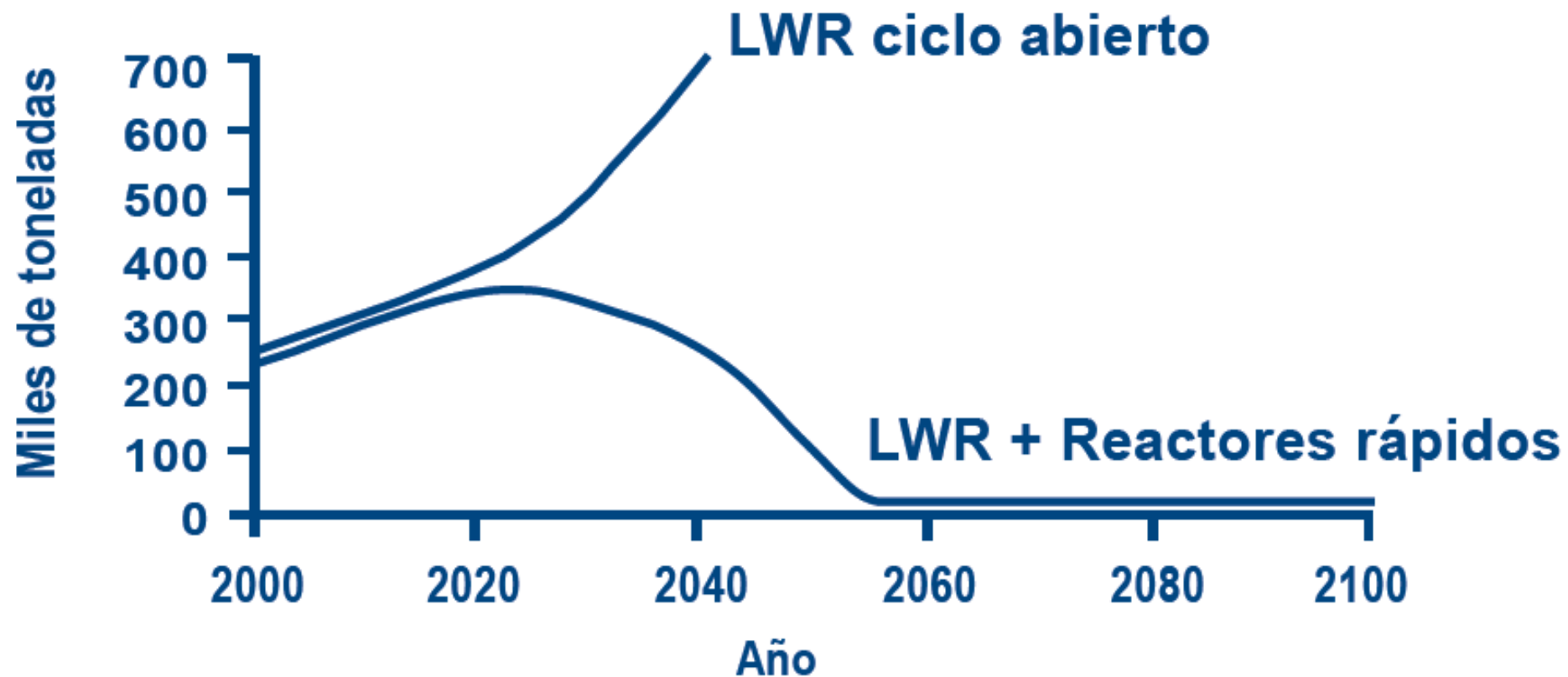
REDUCTION IN URANIUM DEMAND

Without recycling	0%
Recycling in light water reactors	25%
Multiple recycling in fast reactors	95%

Utilización de uranio



Masa de combustible gastado acumulado



J.L. François. El ciclo de combustible y la sostenibilidad de la energía nuclear. Revista Eficiencia Energética, Año 10, Número 35, Diciembre, 2022.



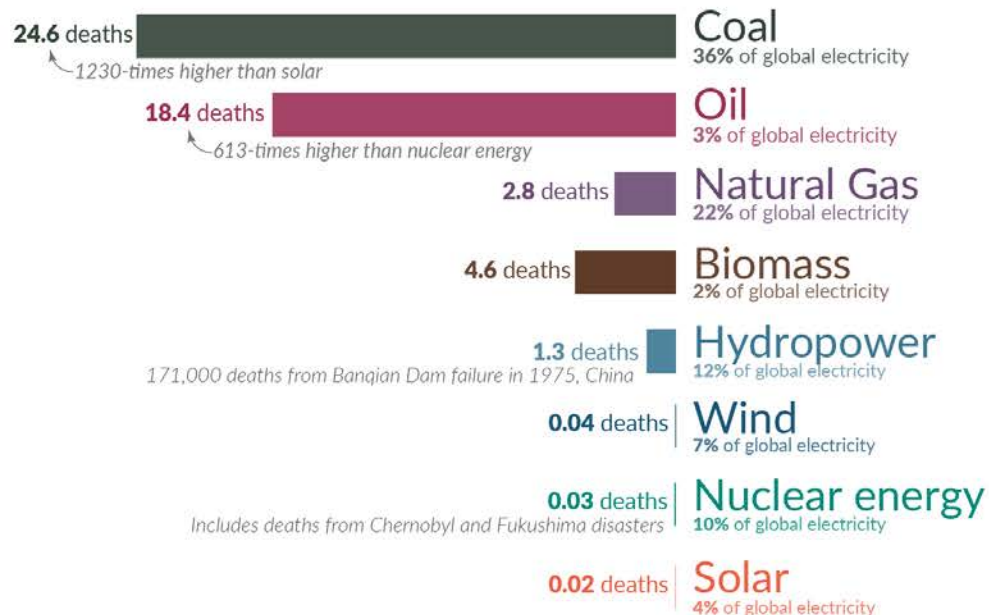
Dimensión Social

- Aceptación pública – Seguridad, Política, Conocimiento
- Marco regulatorio
- Cadenas de suministro
- Capital humano
- Nuevos conocimientos y habilidades

What are the **safest** and **cleanest** sources of energy? Our World in Data

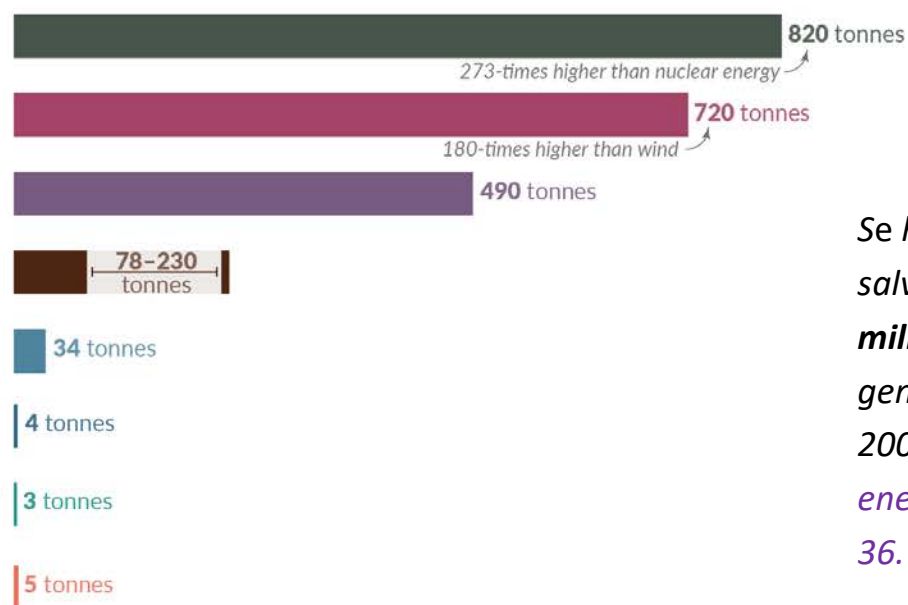
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of electricity production.
1 terawatt-hour is the annual electricity consumption of 150,000 people in the EU.



Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO₂-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 150 people in the EU.

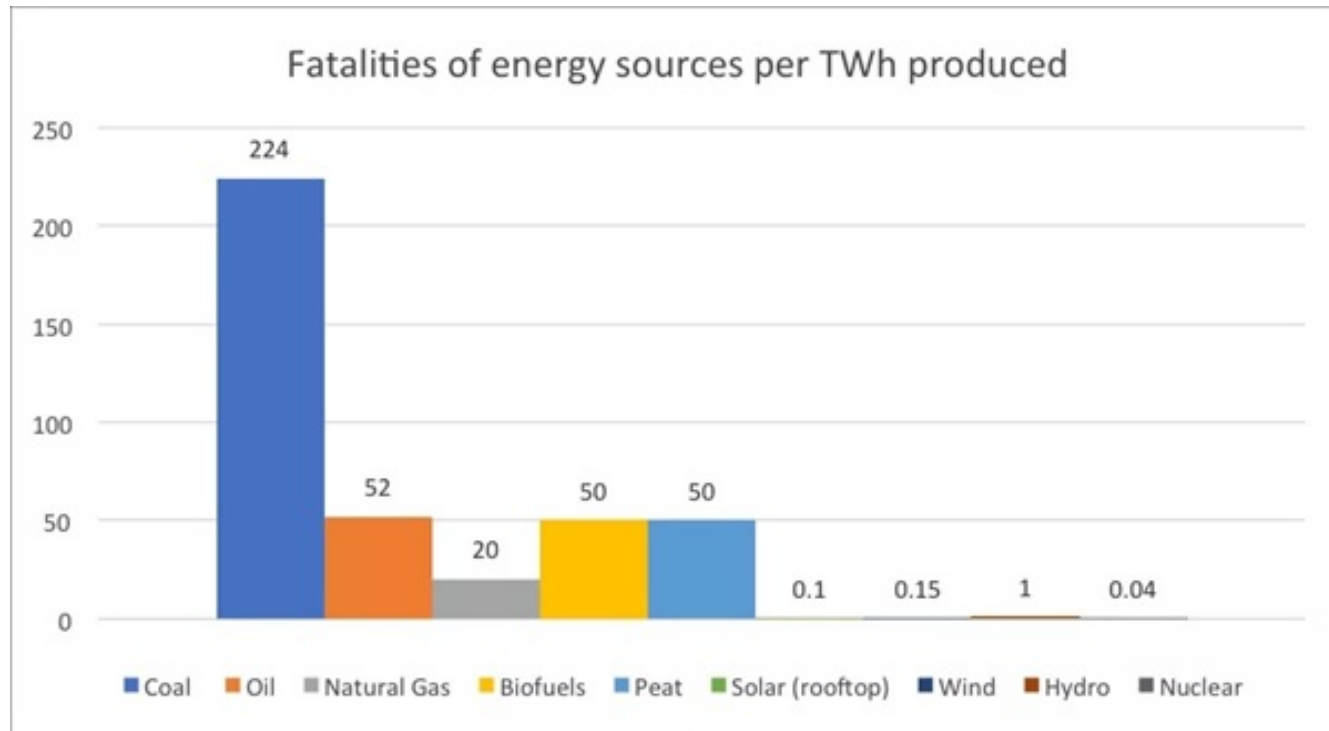


*Se ha calculado que la energía nuclear salvó globalmente alrededor de **dos millones de vidas** al reemplazar generación de origen fósil durante 1971-2009. van der Merwe, A. (2019). Nuclear energy saves lives. Nature, 570(7759), 36.*

Death rates from fossil fuels and biomass are based on state-of-the-art plants with pollution controls in Europe, and are based on older models of the impacts of air pollution on health. This means these death rates are likely to be very conservative. For further discussion, see our article: [OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy](https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy). Electricity shares are given for 2021. Data sources: Markandya & Wilkinson (2007); UNSCEAR (2008; 2018); Sovacool et al. (2016); IPCC AR5 (2014); Pehl et al. (2017); Ember Energy (2021).

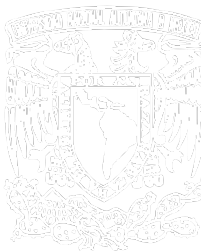
La seguridad de la energía nuclear es un tema **controversial** por su aplicación en las bombas atómicas y posteriormente por los accidentes que han ocurrido, que han sido sólo dos, y que a su vez han cambiado el panorama de desarrollo tecnológico hacia un **incremento de la seguridad**.

La información estadística demuestra que la energía nuclear tiene el menor número de muertes causadas por unidad de energía producida, tomando en cuenta la cadena energética completa.



Tasa de muertes por energía producida (TWh) medida con base en muertes por accidentes y por contaminación del aire.

En nuclear se incluyen 4,000 muertes por el desastre de Chernobyl (según estimaciones de la OMS); 574 muertes en Fukushima (la muerte de un trabajador y 573 muertes indirectas por el estrés de la evacuación); y muertes ocupacionales estimadas (principalmente por minería y molienda), según lo proporcionado por Markandya y Wilkinson (2007).



Seguridad

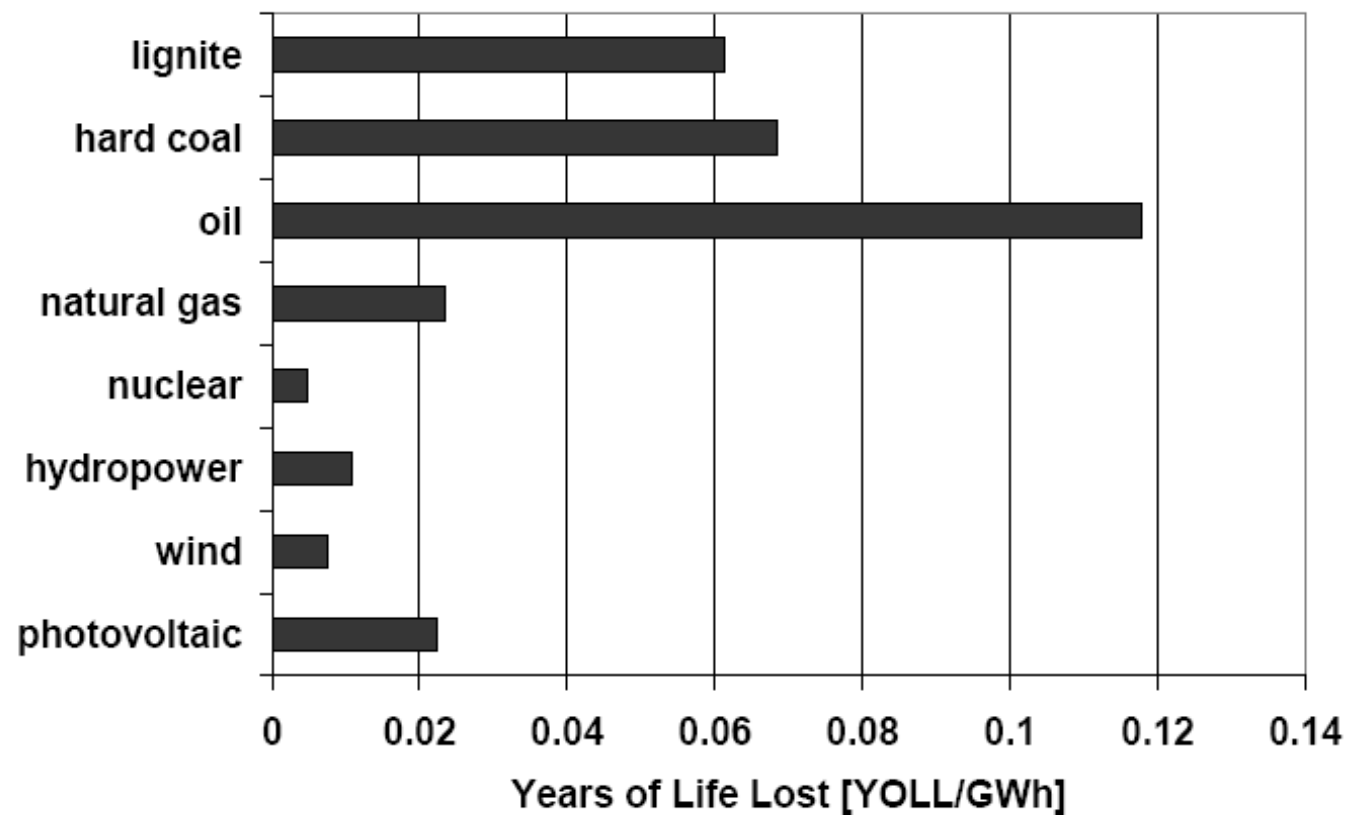


Fig. 14 Mortality associated with normal operation of German energy chains in the year 2000.

S. Hirschberg et al. Sustainability of Electricity Supply, Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation. Paul Scherrer Institute. December 2005.

¿CUÁNTOS EMPLEOS GENERA LA ENERGÍA NUCLEAR?



VIENTO

GAS

CARBÓN

HIDRO

SOLAR

NUCLEAR



Empleos por cada 1,000 MWe de Capacidad

¿En verdad?

SI

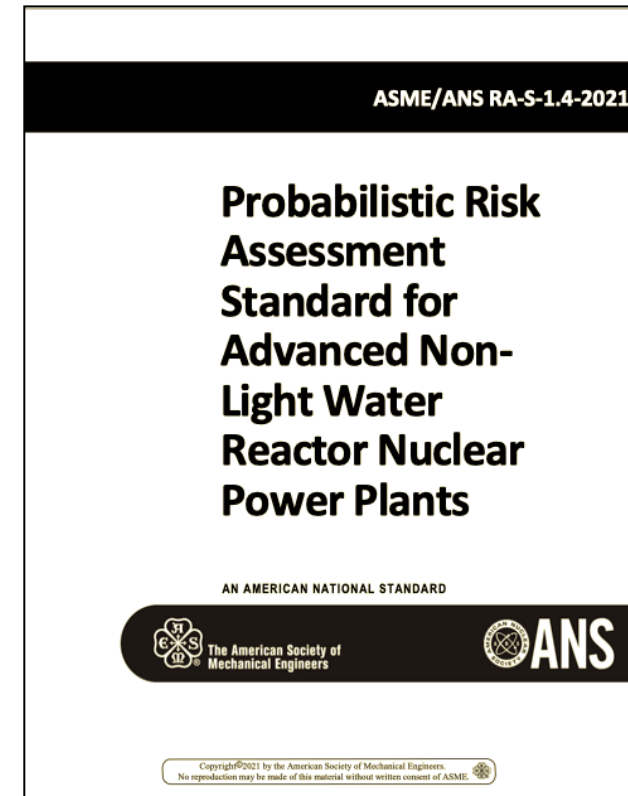
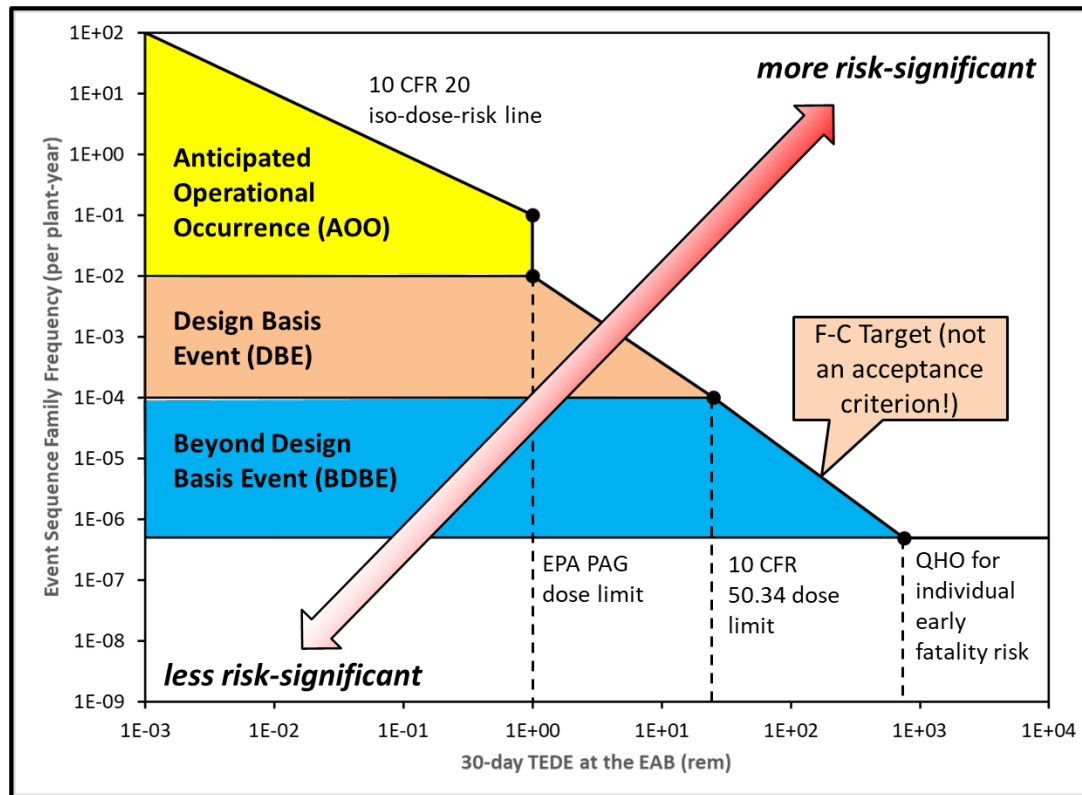
→ Cada central nuclear emplea aproximadamente 530 empleados

→ Por cada 100 empleos directos en una planta nuclear, la economía local produce adicionalmente 66 empleos y 726 más en todo el país*.

*Datos para Estados Unidos, Fuente: Nuclear Energy Institute

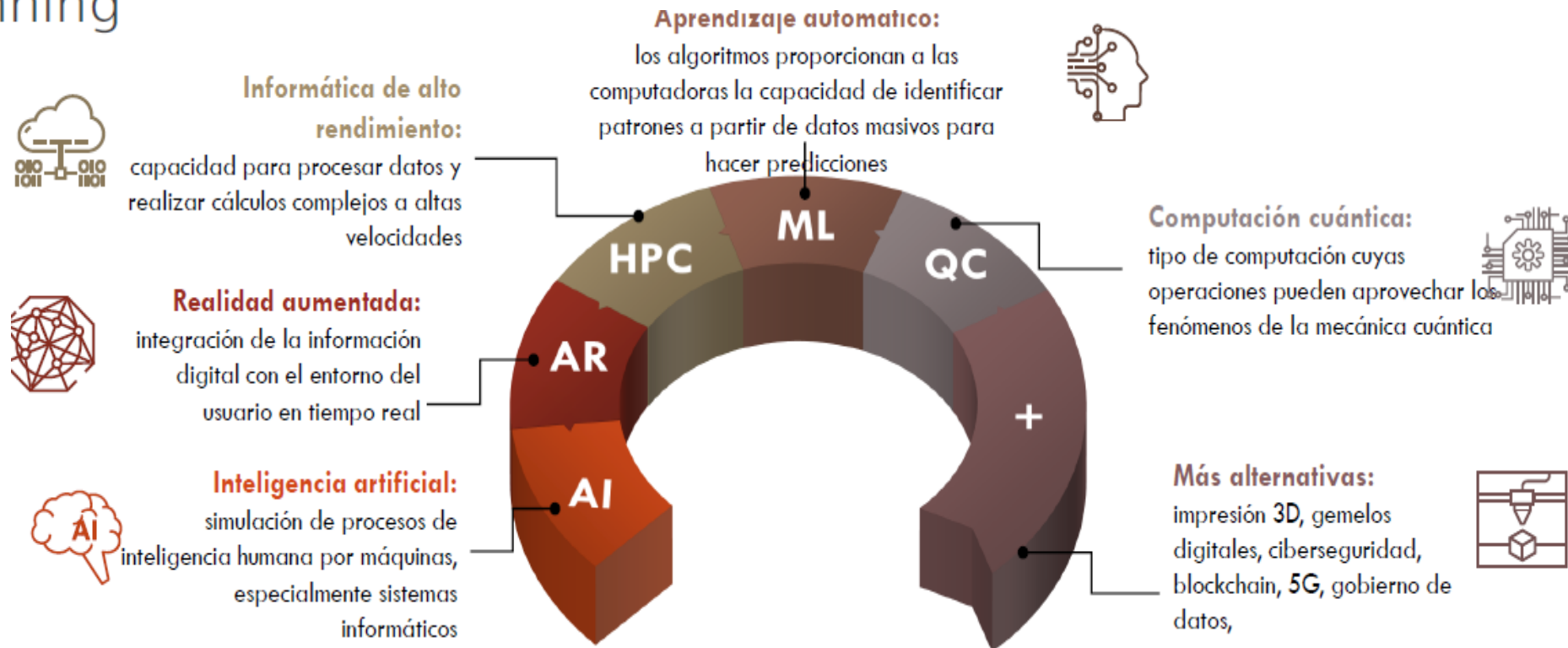
Alcance Regulatorio – armonización, estandarización

Advanced Reactor Licensing Frequency-Consequence Approach



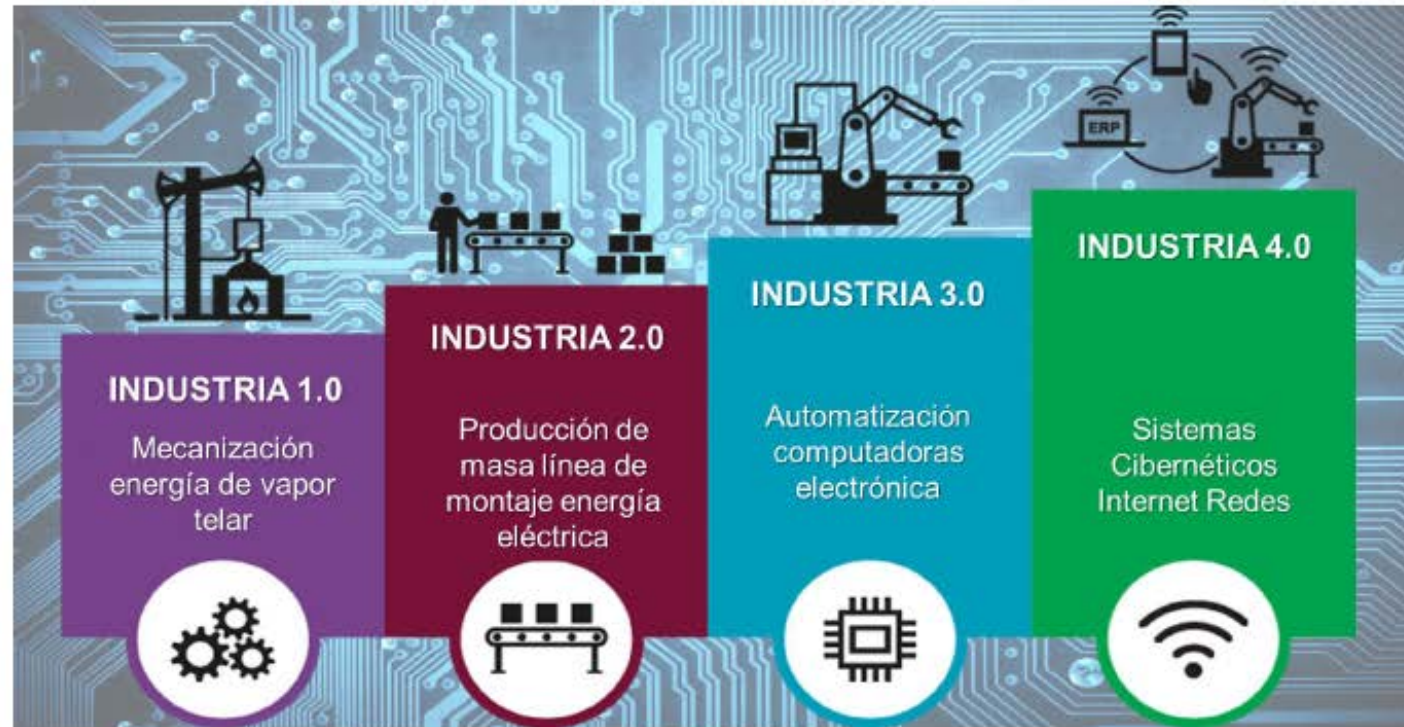
SMR Supply Chain Capacities and Future Resource Planning

- Cadenas de suministro
- Capital humano
- Nuevos conocimientos y habilidades



Nuclear en la cuarta revolución industrial

- La industria de la energía nuclear está adoptando las últimas tecnologías para mejorar la forma en que los trabajadores operan y completan las actividades de mantenimiento para respaldar la flota actual de reactores



Hacia un “plan nuclear”

Actores importantes y roles:

- **Secretaría de Energía**

- Definición de planes de expansión del sector eléctrico con energía nuclear.
- Definición de políticas nacionales:

Ciclo abierto o ciclo cerrado de combustible.

Gestión de desechos radioactivos y desmantelamiento de instalaciones nucleares:

Modelo de empresa pública, tipo ENRESA en España y ANDRA en Francia.

Prospección, exploración y explotación de minerales nucleares, uranio y torio:
empresa pública URAMEX.



- **Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS)**
 - Actualización de normatividad y regulación.
 - Licenciamiento de nuevos reactores.
 - Capacitación de capital humano.
- **Comisión Federal de Electricidad**
 - Realización de estudios de factibilidad de instalación de reactores nuevos.
 - Capacitación de capital humano.
 - Preparación de licitaciones.
- **Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)**
 - Emitir opinión como ente encargado del Control Operativo del Sistema Eléctrico Nacional, la operación del Mercado Eléctrico Mayorista y del acceso a la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución.




- **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología**
 - Financiamiento de proyectos de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico.
- **Institutos de investigación: ININ, INEEL**
 - Proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico.
 - Apoyo en la formación y capacitación de capital humano.
- **Instituciones de Educación Superior (IES): IPN, UAM, UNAM, UAZ, UV**
 - Formación de capital humano.
 - Proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico (I+D).
- **Empresas privadas nacionales**
 - Inversión en proyectos de ingeniería, construcción, fabricación de equipos y componentes (sí y sólo sí SENER define un plan concreto de construcción de reactores al 2050).
 - Alianzas con empresas internacionales (P. ej. ICA-Fluor).



- **Organizaciones internacionales: OIEA, NEA-OECD**
 - Guías y documentos técnicos.
 - Participación de profesores-investigadores mexicanos en proyectos de II+D.
 - Asesoría y visitas de expertos.
 - Becas a estudiantes y suministro de equipos y herramientas.

- **Empresas de base tecnológica proveedores de reactores: GE-Hitachi, Westinghouse, Framatome, KHNP, NuScale, Rosatom.**
 - Propuesta técnico-económica de su tecnología de reactores.
 - Capacidad de financiamiento.
 - Transferencia de tecnología.



Un plan de despliegue de reactores nucleares en México será posible si el Gobierno federal, a través de la Secretaría de Energía:

- Define un plan de expansión del sector eléctrico realista con la incorporación de reactores nucleares (horizonte al 2050). Hay estudios realizados por la UNAM.
- Coordina la participación de los diferentes actores: CFE, CENACE, CNSNS, ININ, INEEL, IES.
- Demuestra que el plan de expansión es real y realista para motivar el involucramiento de la industria privada nacional, y para obtener ofertas favorables de los proveedores de la tecnología.
- A través de la CFE, con la opinión del CENACE, inicia los estudios de factibilidad, para determinar ubicación y capacidad de los reactores a instalar.
- Fortalece a la CNSNS, que tendrá un rol muy importante para el licenciamiento de los reactores nuevos.



- Define y pone en acción una política de gestión de desechos radioactivos y desmantelamiento de instalaciones nucleares.
- Define y pone en acción una política exploración y explotación de minerales nucleares.
- Con la Secretaría de Hacienda determina y aporta los fondos necesarios para llevar a cabo el “plan nuclear”.

¿SÁBES TODO LOS QUE NOS APORTA LA ENERGÍA NUCLEAR ?



Gracias por su atención



juan.luis.francois@gmail.com

<http://www.facebook.com/GRINUNAM>