



Tecnologías nucleares

Antonio González Fernández
Departamento de Física Aplicada III
Universidad de Sevilla

Producción de energía nuclear

Contenidos del tema

Panorámica de la producción de energía nuclear

Elementos básicos de un reactor nuclear

Principios de producción de la energía nuclear

El núcleo de un reactor nuclear

Reactores nucleares PWR y BWR

Otros tipos de reactores

Reactores de nueva generación

Principales accidentes en reactores nucleares

Otros usos de la energía nuclear

Tecnologías nucleares

Antonio González Fernández
Departamento de Física Aplicada III
Universidad de Sevilla

**Parte 1: Aspectos generales
de la energía nuclear**

¿Qué es una central nuclear?

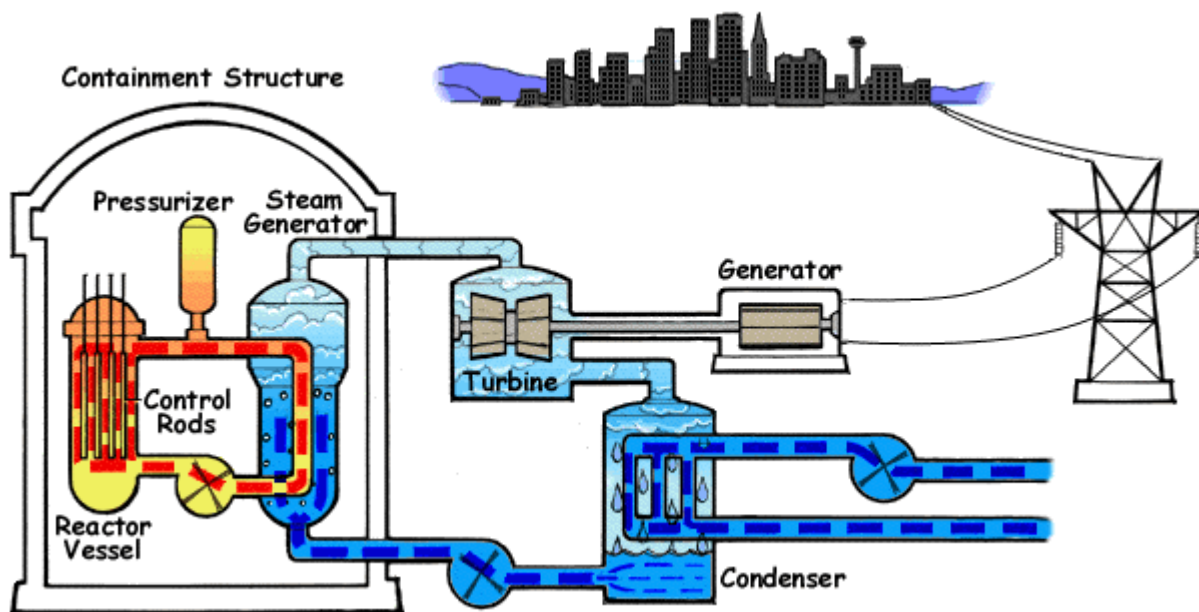
Una central nuclear es una central térmica

Emplea el calor producido en las fisiones de reacciones en cadena

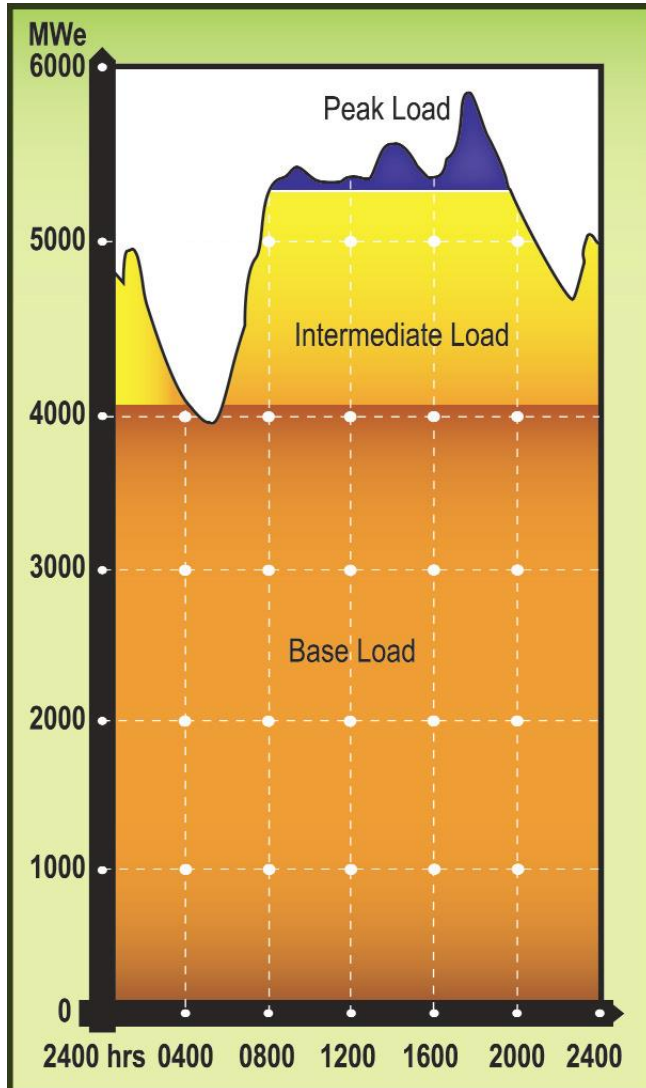
Utiliza como combustible uranio enriquecido o natural

Las potencias están en el rango 500MWe a 1000MWe

Rendimiento ~33%



Consumo de energía: varía a lo largo del tiempo



El consumo presenta fluctuaciones:

Diarias

Semanales

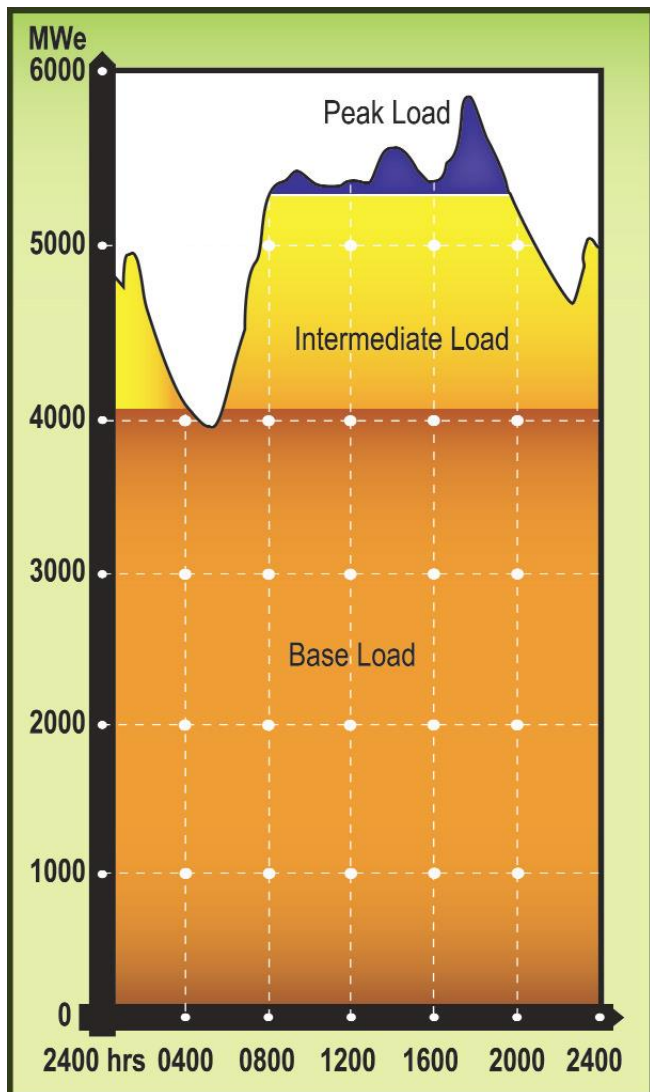
Estacionales

La producción (esp. renovables) también fluctúa

Es difícil almacenar energía

Se necesita un *mix* de fuentes de energía

Base load y peak load requieren diferentes fuentes de energía



Para la carga base

Producción continua

Carbón

Nucleares

Costes:

Combustible



Capital



Para el pico de carga

Fácil desconexión

Hidroeléctrica

Renovables

Ciclo combinado

Combustible



Capital



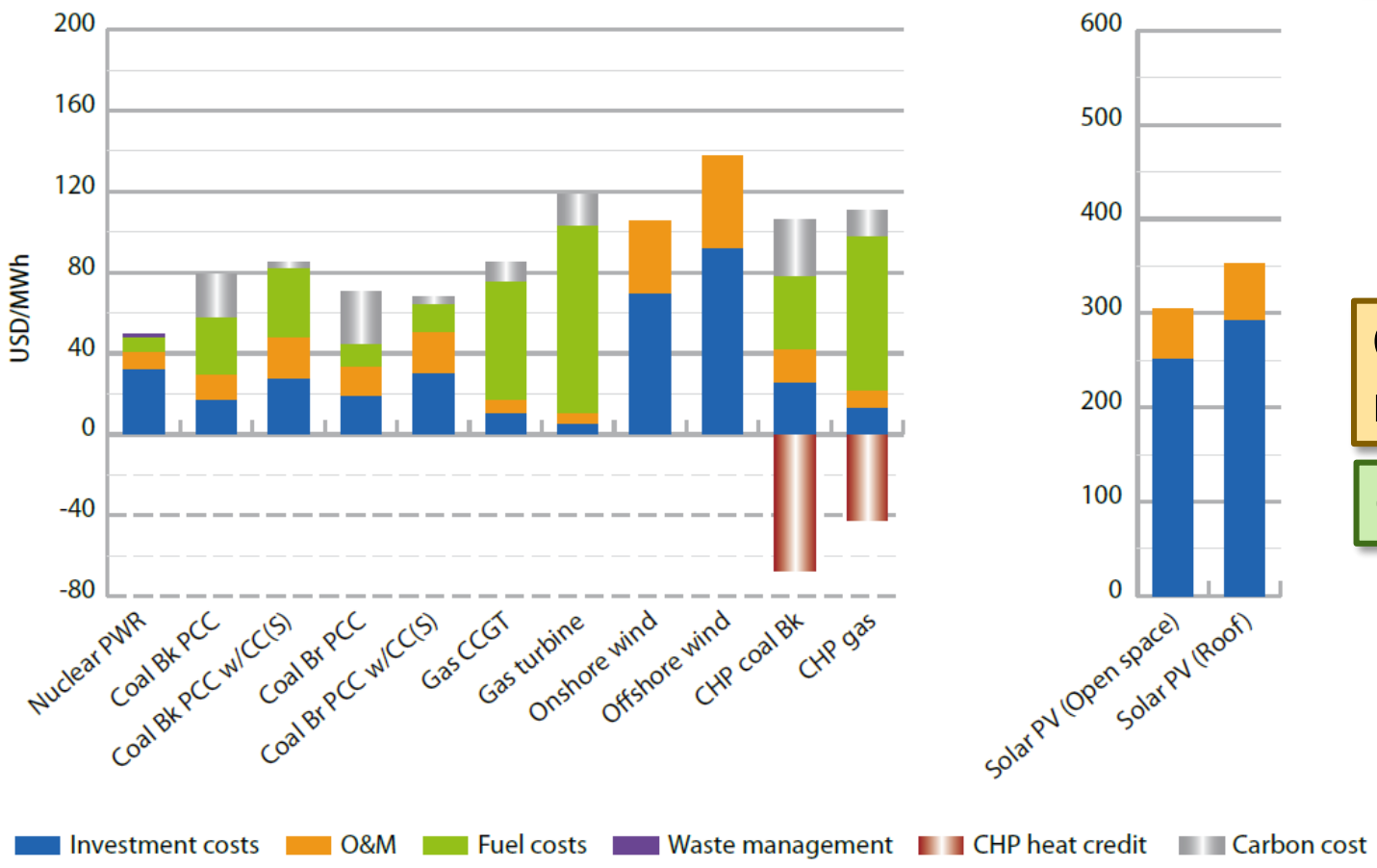
Comparación del poder calorífico de diferentes combustibles

Fuel	Heat value	% carbon	CO2
Hydrogen	121 MJ/kg		0
Petrol/gasoline	44-46 MJ/kg 32 MJ/l		
Diesel fuel	45 MJ/kg 39 MJ/l		
Crude oil	42-44 MJ/kg 37-39 MJ/l		89 70-73 g/MJ
Methanol	20 MJ/kg 18 MJ/L		37
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	49 MJ/kg		81 59 g/MJ
Natural gas (UK, USA, Australia)	38-39 MJ/m3		76 51 g/MJ
Natural gas (Canada)	37 MJ/m3		
Natural gas (Russia)	34 MJ/m3		
Natural gas as LNG (Australia)	55 MJ/kg		
Hard black coal (IEA definition)	>23.9 MJ/kg		
Hard black coal (Australia & Canada)	c 25.5 MJ/kg		67 90 g/MJ
Sub-bituminous coal (IEA definition)	17.4-23.9 MJ/kg		
Sub-bituminous coal (Australia & Canada)	c 18 MJ/kg		
Lignite/brown coal (IEA definition)	<17.4 MJ/kg		
Lignite/brown coal (Australia, electricity)	c 10 MJ/kg		25 1.25 kg/kWh
Firewood (dry)	16 MJ/kg		42 94 g/MJ
Natural uranium, in LWR (normal reactor)	500 GJ/kg		0
Natural uranium, in LWR with U & Pu recycle	650 GJ/kg		0
Natural uranium, in FNR	28,000 GJ/kg		0
Uranium enriched to 3.5%, in LWR	3900 GJ/kg		0

Fuente:
[World Nuclear Association](#)

Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (Alemania)

Figure 4.6a: Germany – levelised costs of electricity (at 5% discount rate)



Costes de capital

Créditos

Propiedad

Construcción

Operación y mantenimiento

Combustible

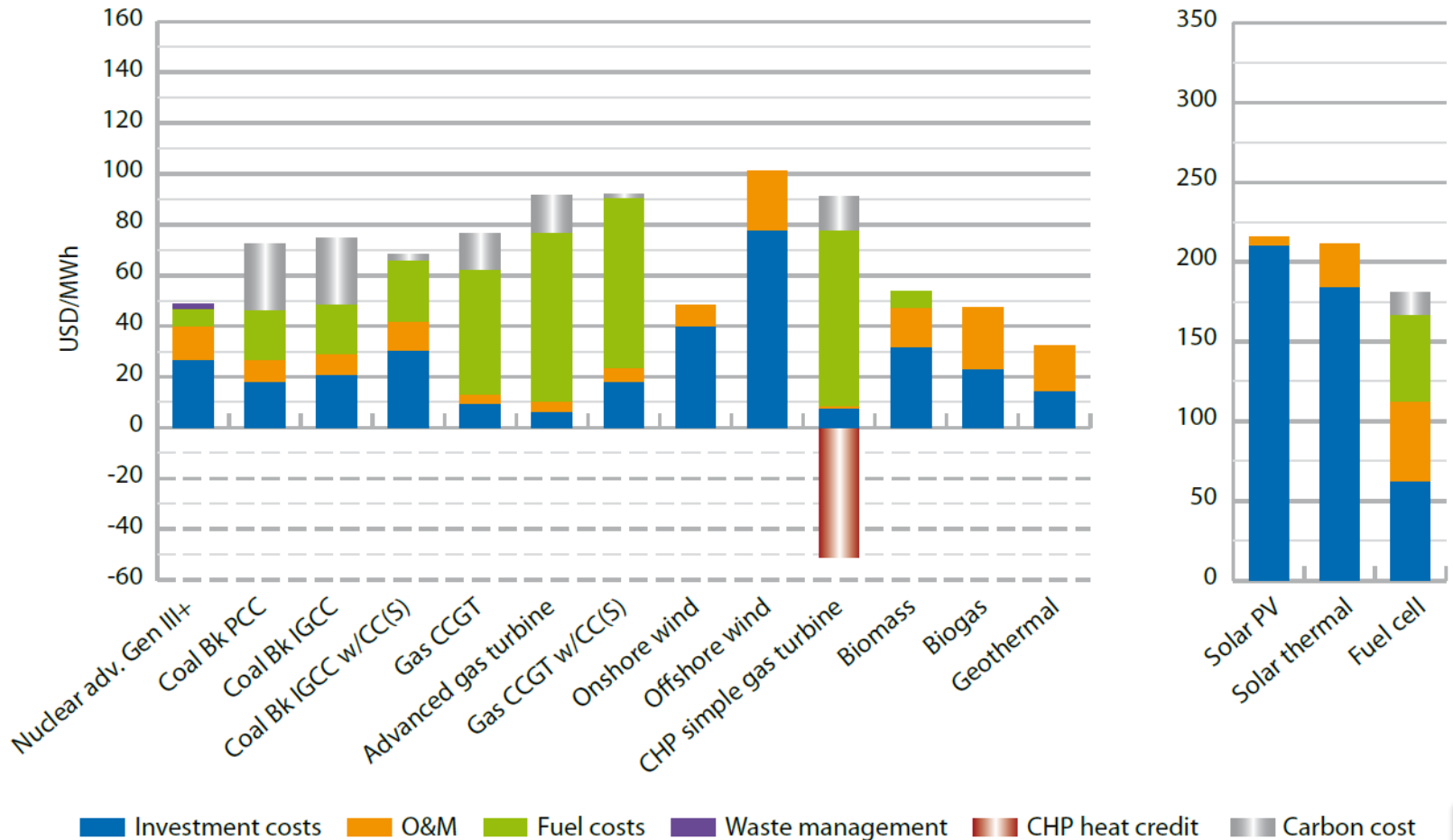
Fuente: IEA

2010

2015

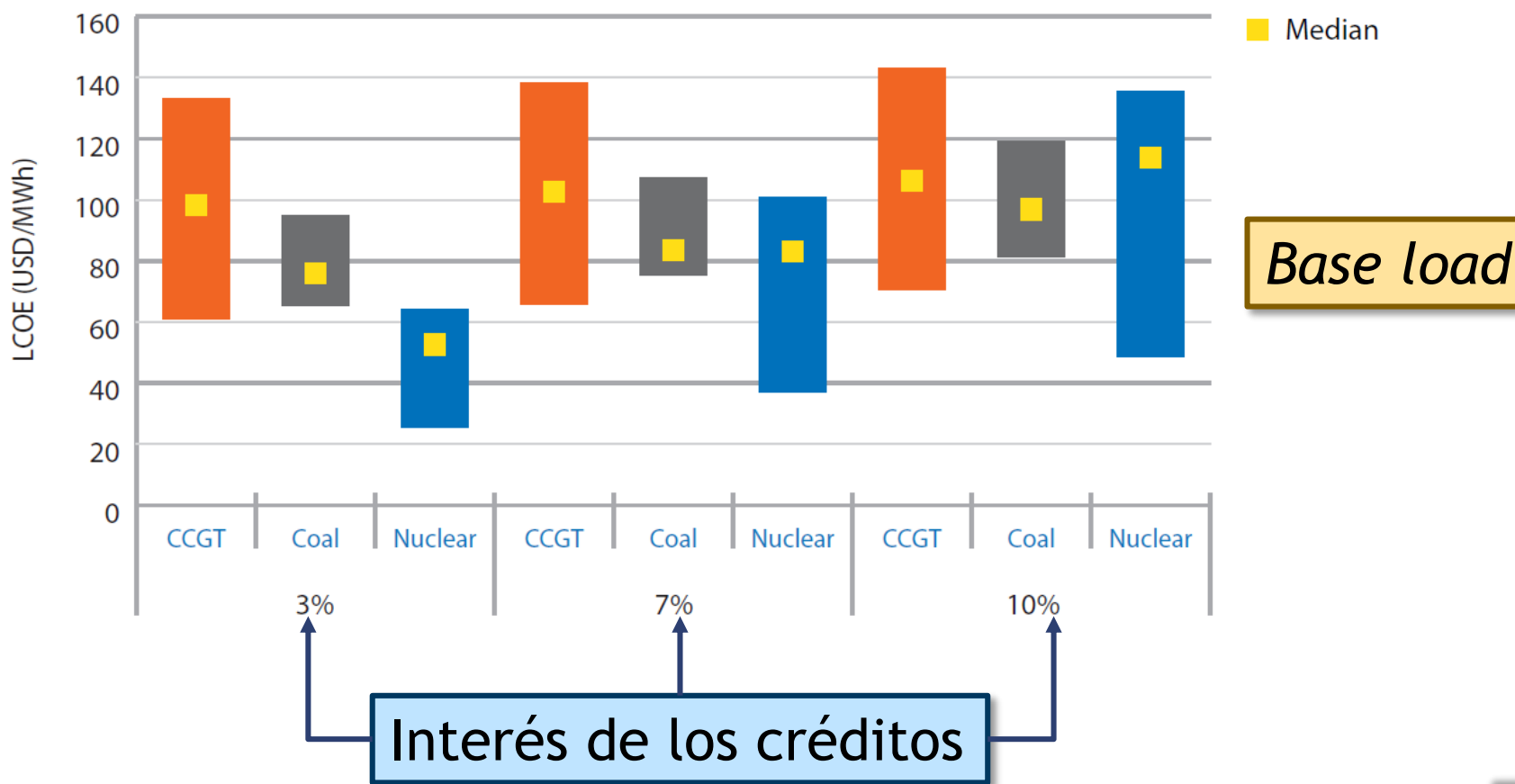
Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (Estados Unidos)

Figure 4.16a: United States – levelised costs of electricity
(at 5% discount rate)

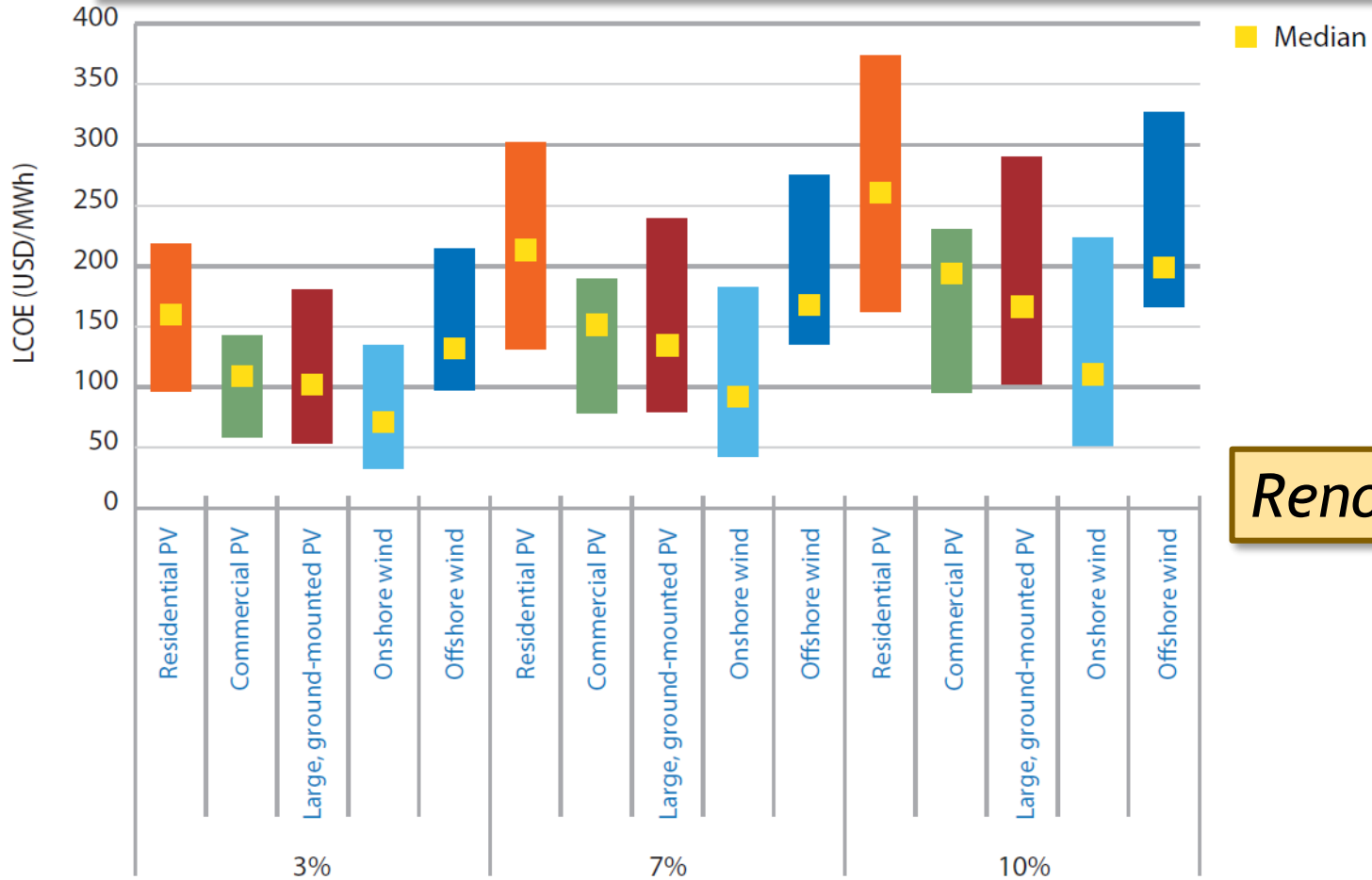


Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (2015)

En 2015 la IEA/NEA ha elaborado un [nuevo informe](#)



Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (2015)

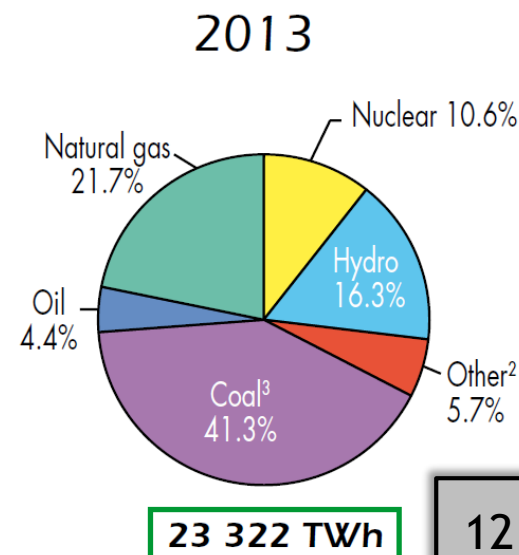
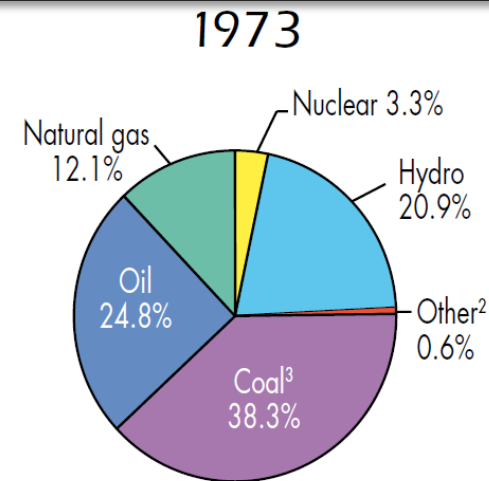
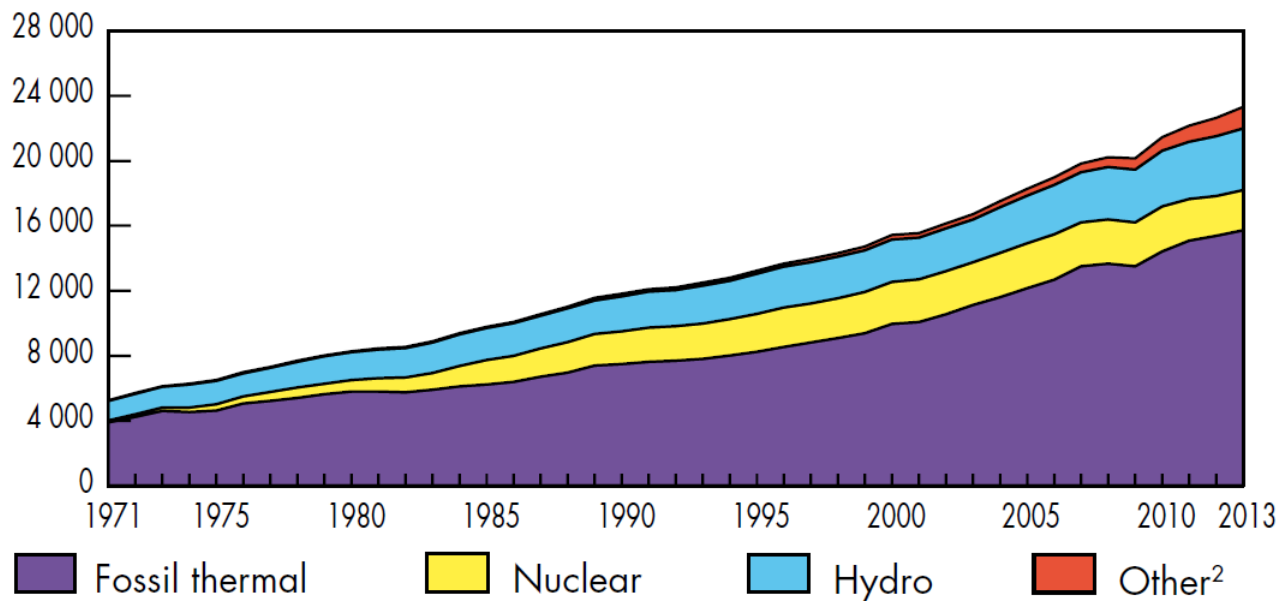


Renovables

Interés de los créditos

Evolución de la producción mundial de electricidad

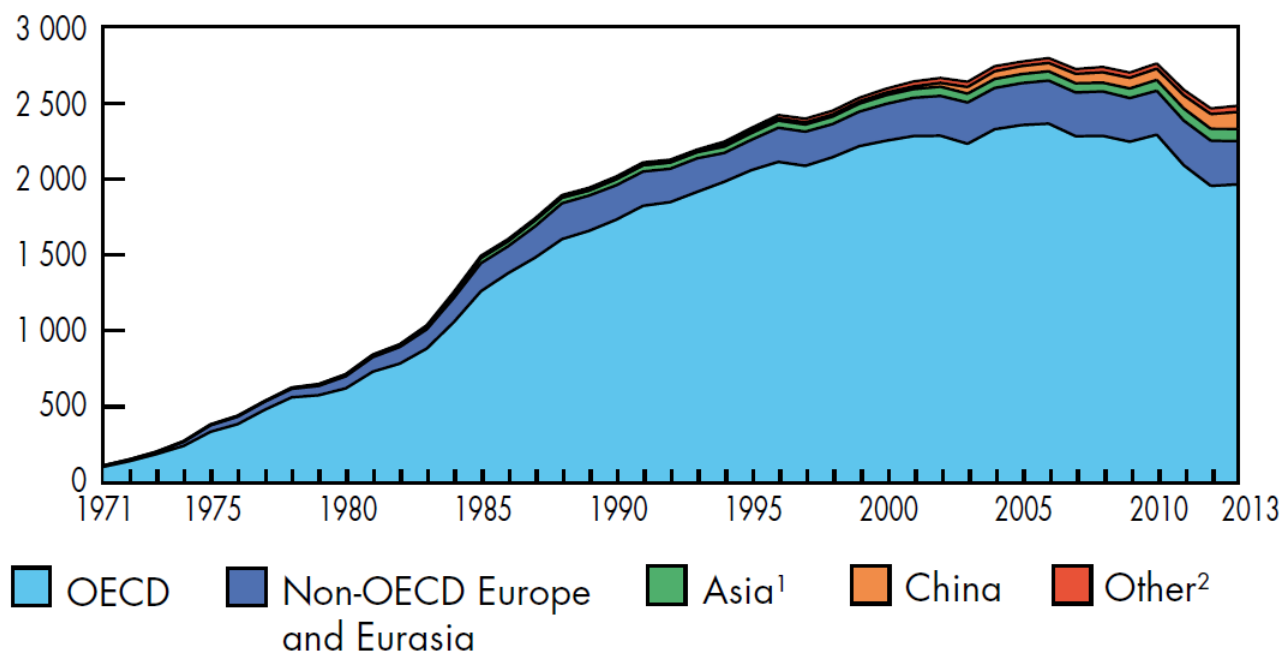
World electricity generation¹ from 1971 to 2013
by fuel (TWh)



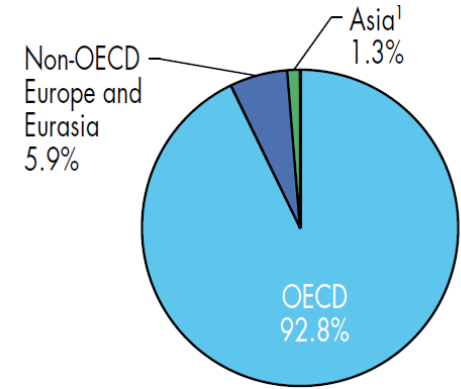
Fuente: [IEA](http://www.iea.org) (Agencia internacional de la energía)

Evolución de la producción de energía nuclear

Nuclear production from 1971 to 2013 by region (TWh)

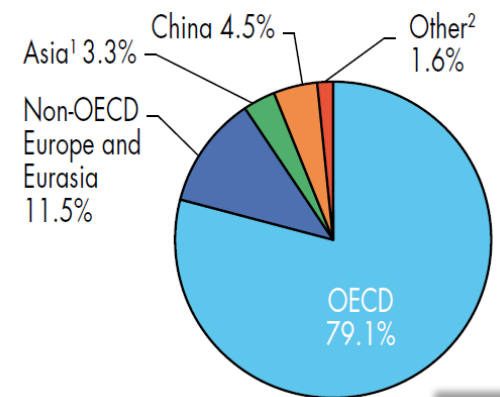


1973



203 TWh

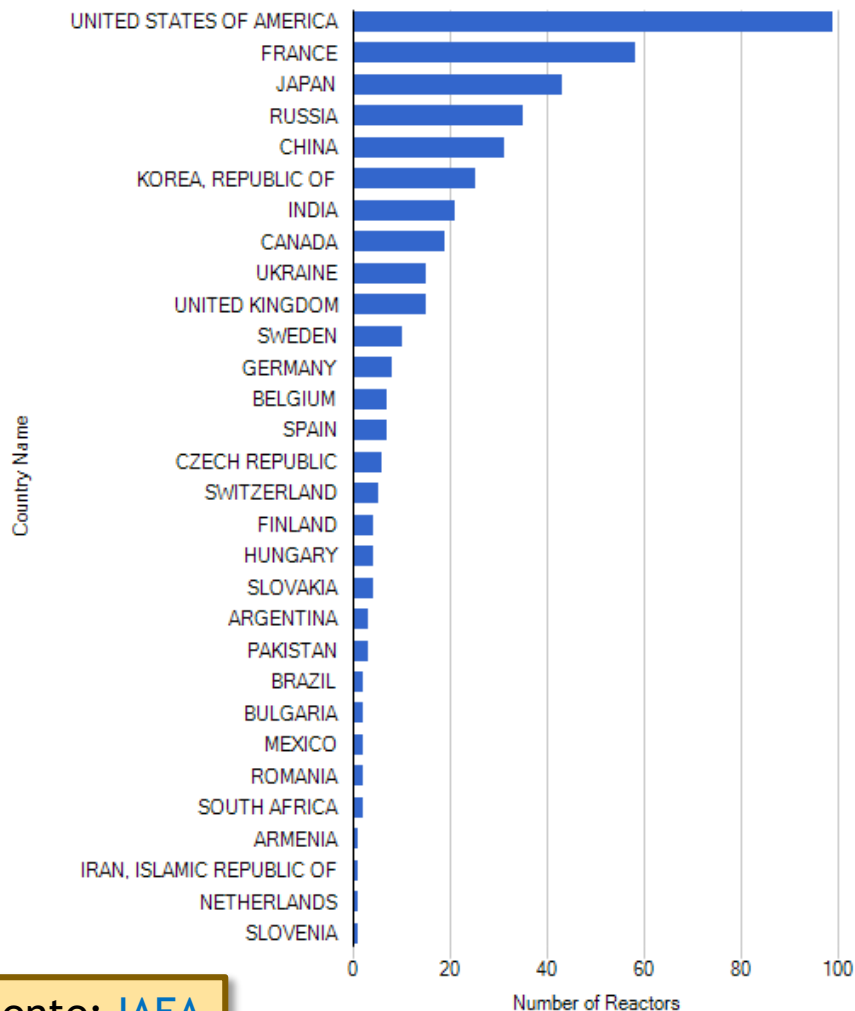
2013



2 478 TWh

La energía nuclear en el mundo: Número de reactores en operación

Total Number of Reactors: 442



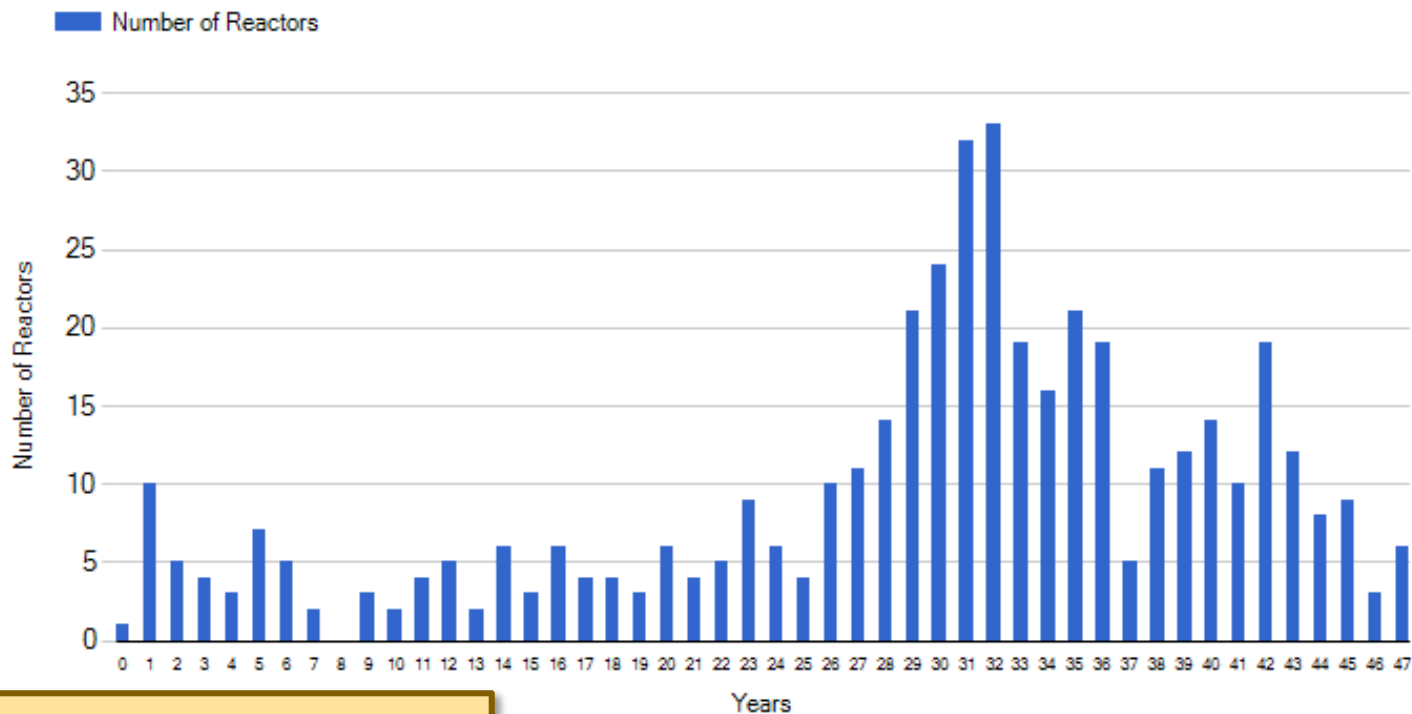
Cambios desde 2015: +3

Country	Nr R.	Net capacity [MW]
UNITED STATES OF AMERICA	99	98708
FRANCE	58	63130
JAPAN	43	40290
RUSSIA	35	25443
CHINA	31	26635
KOREA, REPUBLIC OF	25	23114
INDIA	21	5308
CANADA	19	13500
UKRAINE	15	13107
UNITED KINGDOM	15	8883
SWEDEN	10	9648
GERMANY	8	10799
BELGIUM	7	5913
SPAIN	7	7121
CZECH REPUBLIC	6	3930
TAIWAN	6	5042
SWITZERLAND	5	3333
FINLAND	4	2752
HUNGARY	4	1889
SLOVAKIA	4	1814
ARGENTINA	3	1627
PAKISTAN	3	690
BRAZIL	2	1884
BULGARIA	2	1926
MEXICO	2	1440
ROMANIA	2	1300
SOUTH AFRICA	2	1860
ARMENIA	1	375
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915
NETHERLANDS	1	482
SLOVENIA	1	688
Total	442	383546

Fuente: [IAEA](http://www.iaea.org)

Edad de los reactores en funcionamiento

Total Number of Reactors: 442



Causas del parón nuclear

Crisis del petróleo



Reducción del consumo

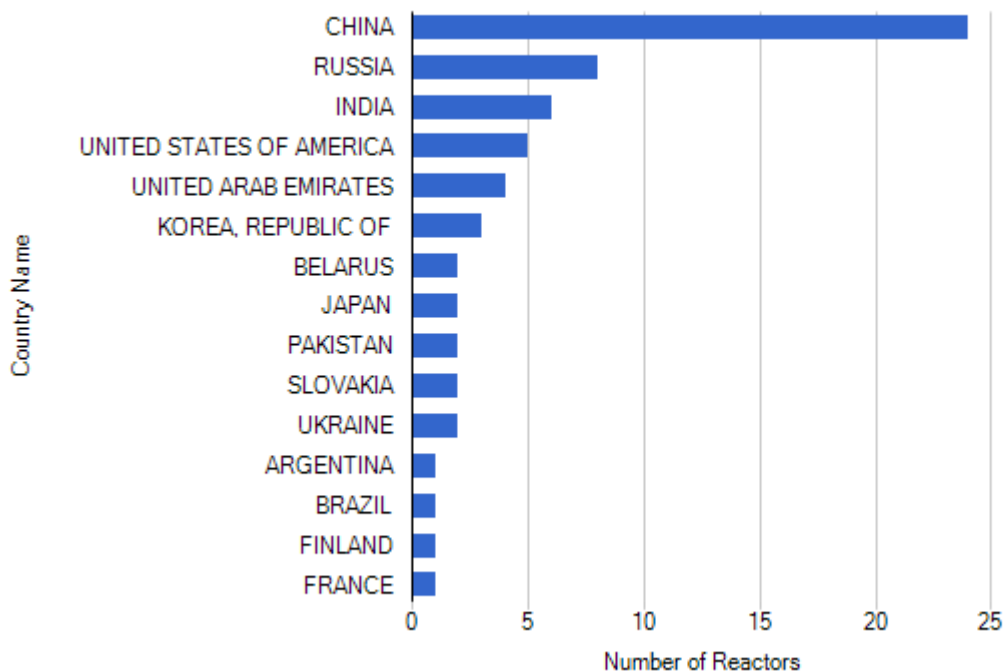
Movimientos ecologistas



Moratoria nuclear

Reactores en construcción

Total Number of Reactors: 66

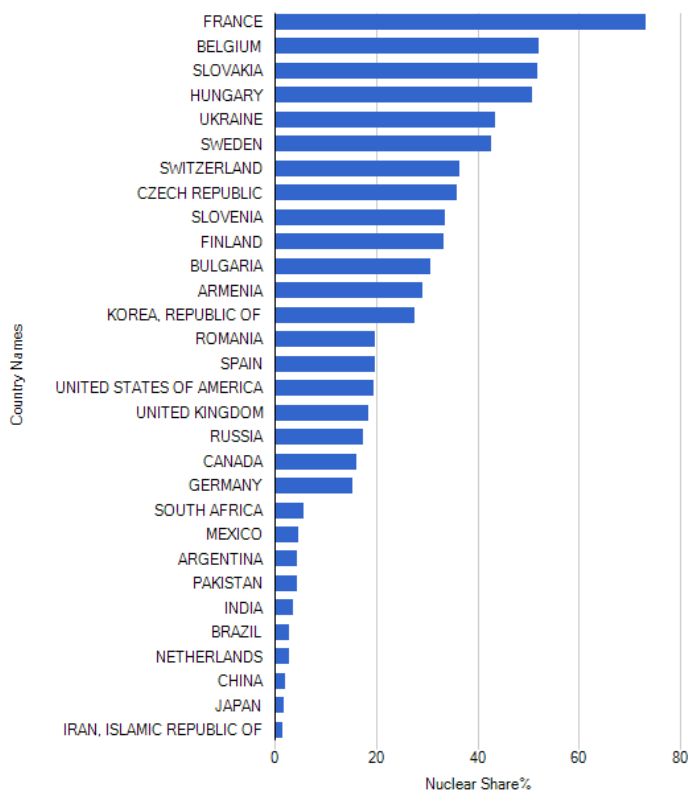


Number of Reactors

Country	Nr of Reactors	Total Net El.
ARGENTINA	1	25
BELARUS	2	2218
BRAZIL	1	1245
CHINA	24	24128
FINLAND	1	1600
FRANCE	1	1630
INDIA	6	3907
JAPAN	2	1325
KOREA, REPUBLIC OF	3	4020
PAKISTAN	2	630
RUSSIA	8	6582
SLOVAKIA	2	880
TAIWAN	2	2600
UKRAINE	2	1900
UNITED ARAB EMIRATES	4	5380
UNITED STATES OF AMERICA	5	5633
Total	66	63703

Cambios desde 2015: -3

Cuota de producción de energía nuclear



Country	Nr Reactors	El Cap. (MW)	Electricity Supp. (GWh)	Share (%)
FRANCE	58	63130	418001.4	76.9
SLOVAKIA	4	1814	14420.33	56.8
HUNGARY	4	1889	14777.73	53.6
UKRAINE	15	13107	83122.78	49.4
BELGIUM	7	5927	32093.74	47.5
SWEDEN	10	9470	62270.05	41.5
SWITZERLAND	5	3333	26467.9	37.9
SLOVENIA	1	688	6060.82	37.2
CZECH REPUBLIC	6	3904	28636.78	35.8
FINLAND	4	2752	22645.96	34.6
BULGARIA	2	1926	15013.99	33.6
ARMENIA	1	375	2265.64	30.7
KOREA, REPUBLIC OF	23	20717	149199.23	30.4
SPAIN	7	7121	54860.38	20.4
UNITED STATES OF AMERICA	100	99313	798616.22	19.5
TAIWAN, CHINA	6	5032	40801.06	18.9
RUSSIA	34	24654	169064.84	18.6
ROMANIA	2	1300	10753.68	18.5
UNITED KINGDOM	16	9373	57918.48	17.2
CANADA	19	13500	98588.12	16.8
GERMANY	9	12074	91783.7	15.8
SOUTH AFRICA	2	1860	14762.7	6.2
MEXICO	2	1330	9311.6	5.6
PAKISTAN	3	690	4577.53	4.3
ARGENTINA	3	1627	5258.17	4.0
NETHERLANDS	1	482	3873.51	4.0
INDIA	21	5308	33231.87	3.5
BRAZIL	2	1884	14463.39	2.9
CHINA	23	19007	123807.69	2.4
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915	3723.6	1.5
JAPAN	48	42388	0	0.0
Total	439	376890	2410372.89	14.7%

Cuota y centrales nucleares en España

 Spain

SUMMARY

Nuclear Power Reactors

Under Construction: **0** Operational: **7** Long-Term Shutdown: **1** Permanent Shutdown: **2**

Electricity Production Share in 2014

Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)

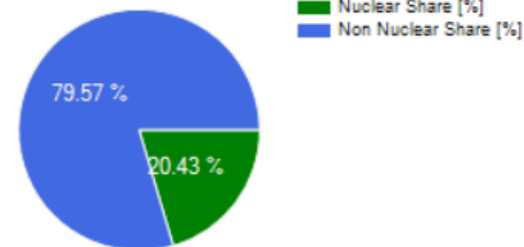
268400.00 GW.h

(Net, 2014)

Nuclear Electricity Production

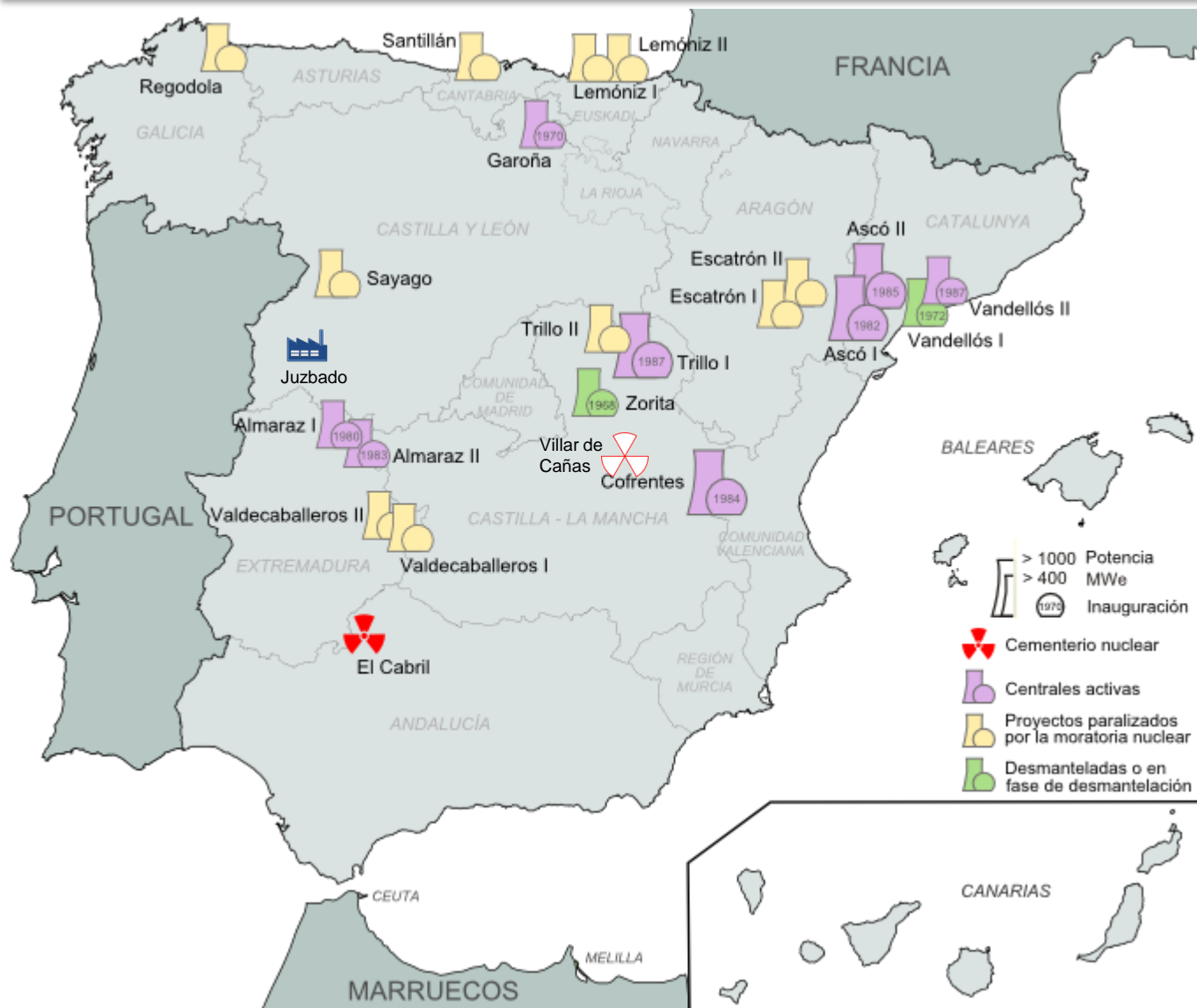
54832.00 GW.h

(Net, 2014)



Name	Type	Status	Location	Ref. Unit Power (MW)	Gross El. Cap. (MW)	Connection
JOSE CABRERA-1	PWR	Permanent Shutdown	ALMONACID DE ZORITA	141	150	14/07/1968
SANTA MARIA DE GARONA	BWR	Long-term Shutdown	SANTA MARIA DE GARONA	446	466	02/03/1971
VANDELLOS-1	GCR	Permanent Shutdown	VANDELLOS	480	500	06/05/1972
ALMARAZ-1	PWR	Operational	ALMARAZ	1011	1049	01/05/1981
ASCO-1	PWR	Operational	ASCO	995	1033	13/08/1983
ALMARAZ-2	PWR	Operational	ALMARAZ	1006	1044	08/10/1983
COFRENTES	BWR	Operational	COFRENTES	1064	1102	14/10/1984
ASCO-2	PWR	Operational	ASCO	997	1035	23/10/1985
VANDELLOS-2	PWR	Operational	VANDELLOS	1045	1087	12/12/1987
TRILLO-1	PWR	Operational	TRILLO	1003	1066	23/05/1988
Total				8188	8532	

Instalaciones nucleares en España



Industria nuclear en España (2014)

Fuente: [Ministerio de Industria, Energía y Turismo](#)

Tipo	Prod. (GWh)	% del total	Combustible
Nuclear	57299	20.62%	1350 Tm
Carbón	43011	14.58%	18130 kTm
Eólica	52207	18.79%	

Se ha renovado la licencia de Trillo

ENUSA ha fabricado 856 elementos combustibles (72% para exportación)

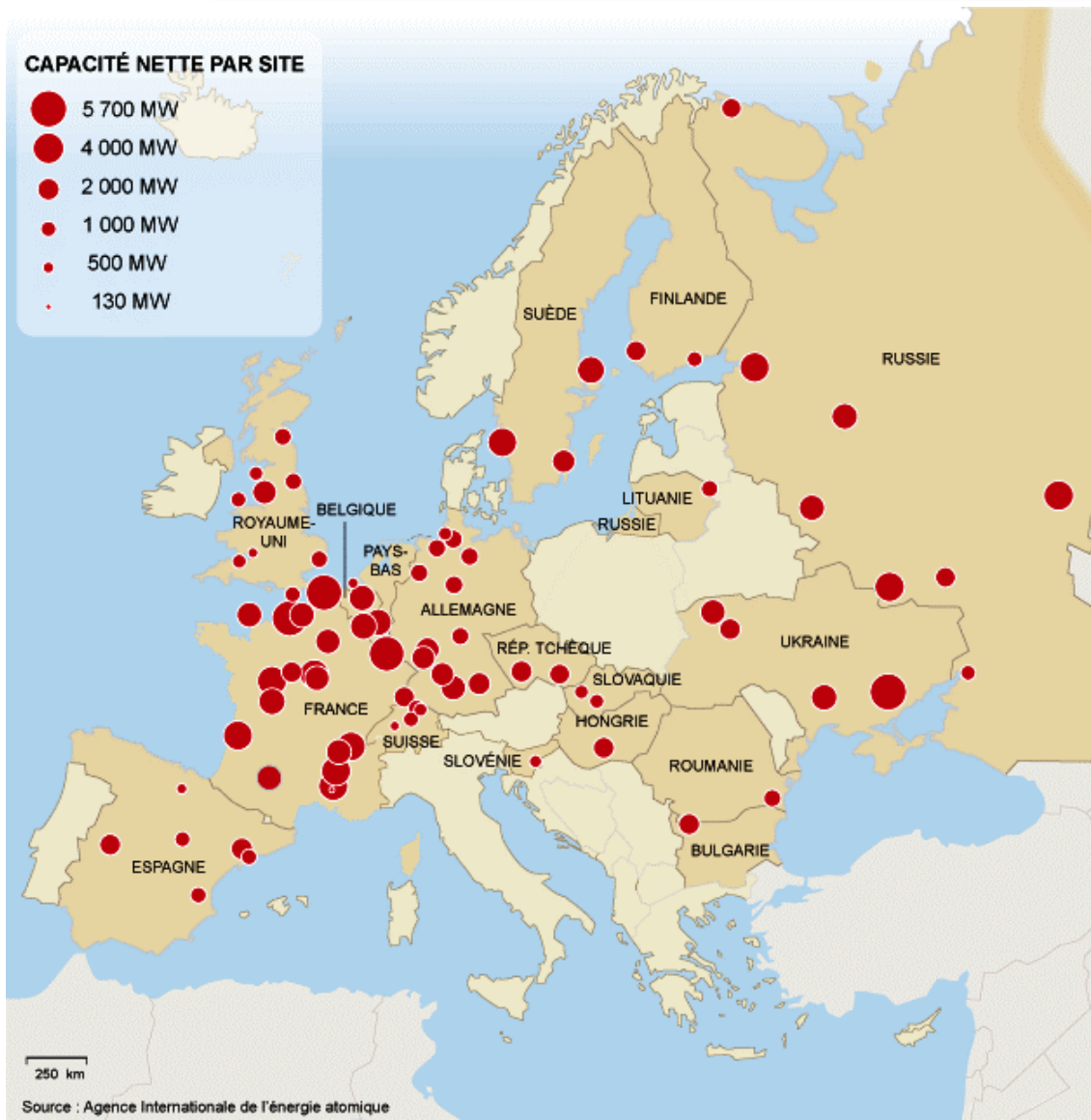
En trámite la renovación de la licencia de Sta María de Garoña

Continúan los trámites del ATC en Villar de Cañas

Uranio Almacenado (kg)

Central	Piscinas	ATI
José Cabrera		95750
Sta. M ^a de Garoña	420243	
Almaraz I	608026	
Almaraz II	574755	
Ascó I	526867	27975
Ascó II	503255	41014
Cofrentes	680139	
Vandellós II	463706	
Trillo	224977	262268

Centrales nucleares en Europa

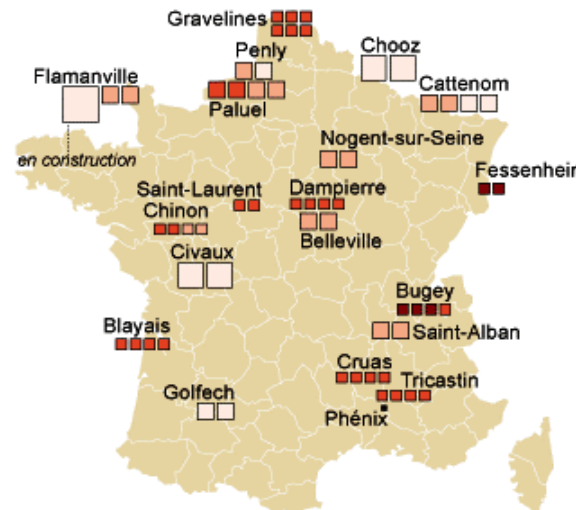


PUISSANCE DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

130 MW □ 900 MW □ 1 300 MW □ 1 500 MW □ 1 600 MW □

PRÉVISION D'ARRÊT DÉFINITIF

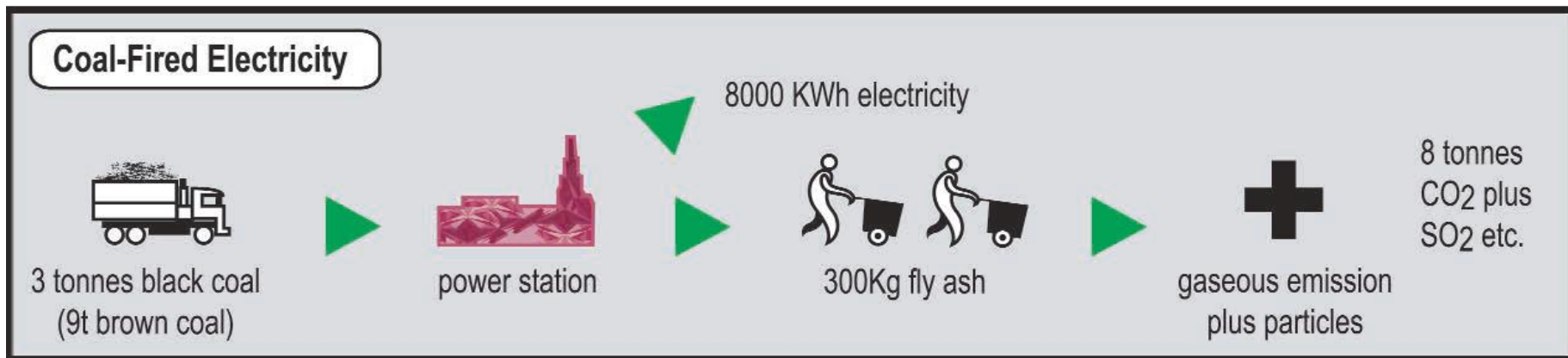
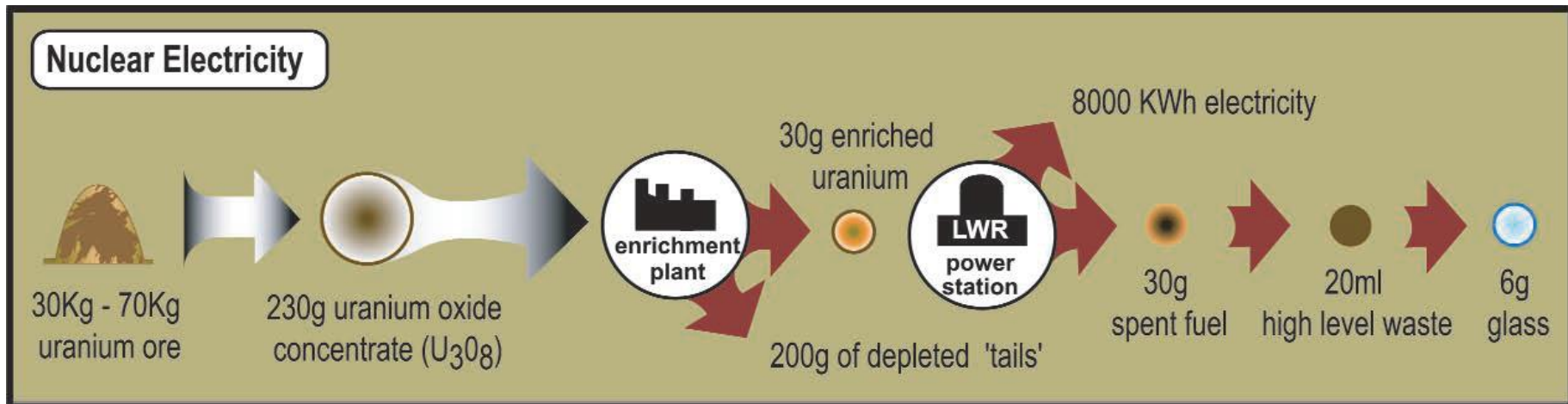
■ avant 2010 ■ 2010-2020 ■ 2020-2025 ■ 2025-2030 □ après 2030



PART DU NUCLÉAIRE DANS LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ, en %

France	76,9
Lituanie	64,4
Slovaquie	54,3
Belgique	54,1
Ukraine	48,1
Suède	46,1
Arménie	43,5
Slovénie	41,6
Suisse	40,0
Hongrie	36,8
Bulgarie	32,1
Rép. tchèque	30,3
Finlande	28,9
Allemagne	25,9

Comparación entre una central de carbón y una central nuclear



Consumo anual de una central de 1000MWe

Carbón:

3 MTm/año

Uranio:

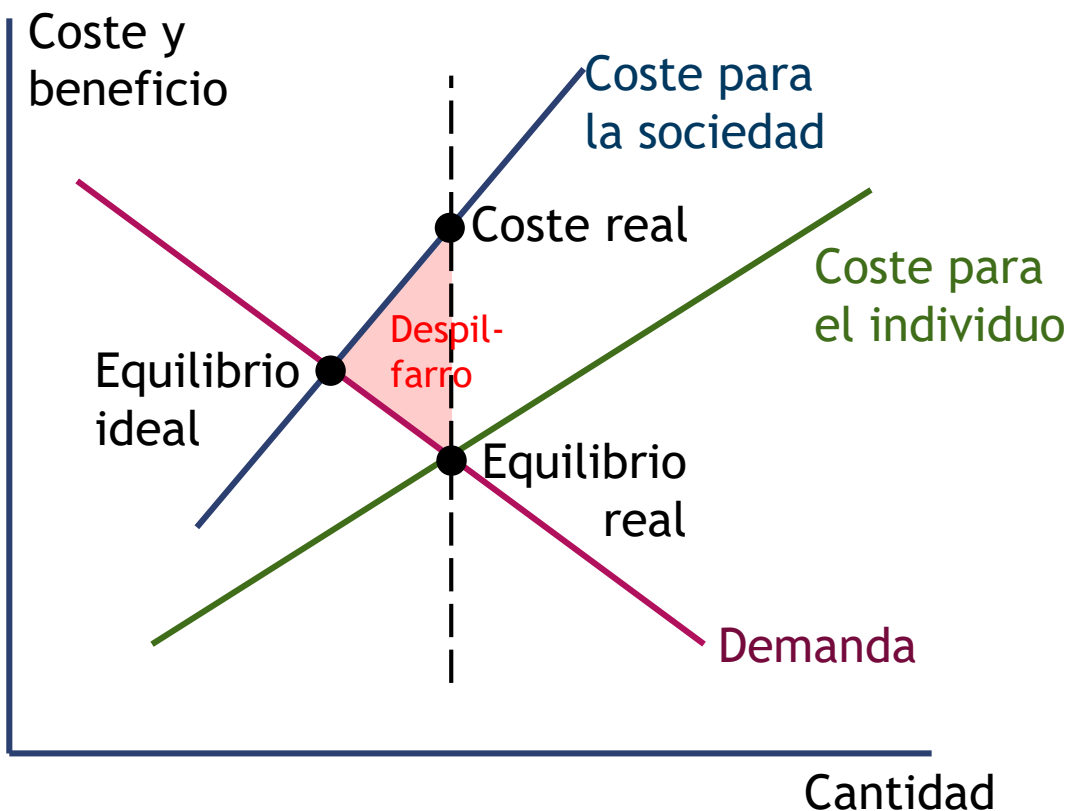
180Tm/año

Externalidades

Una externalidad es un coste no considerado en el precio de un bien

negativas (p.ej. contaminación)

positivas (p.ej. infraestructuras)



Se internalizan mediante:

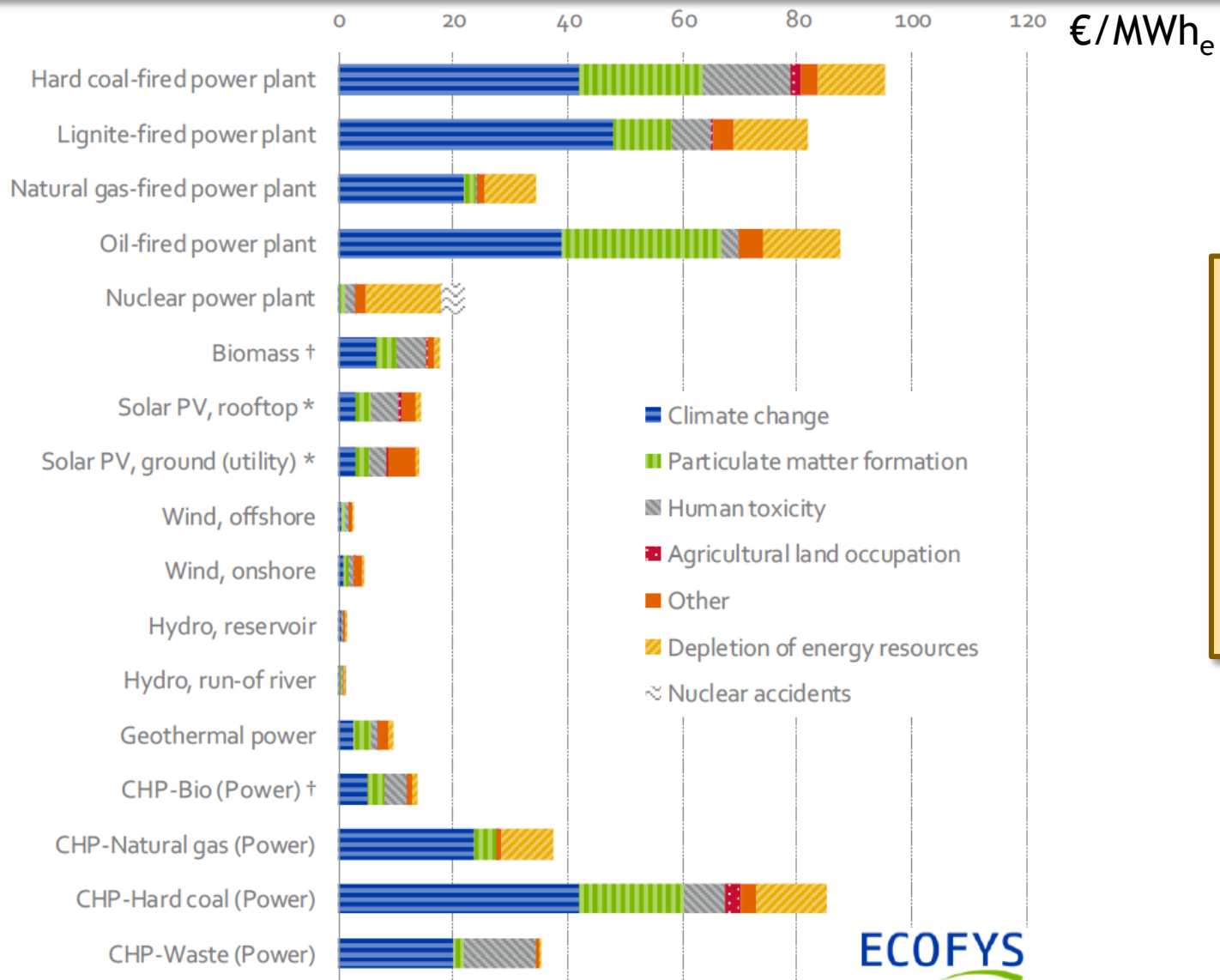
Multas

Tasas

Subvenciones

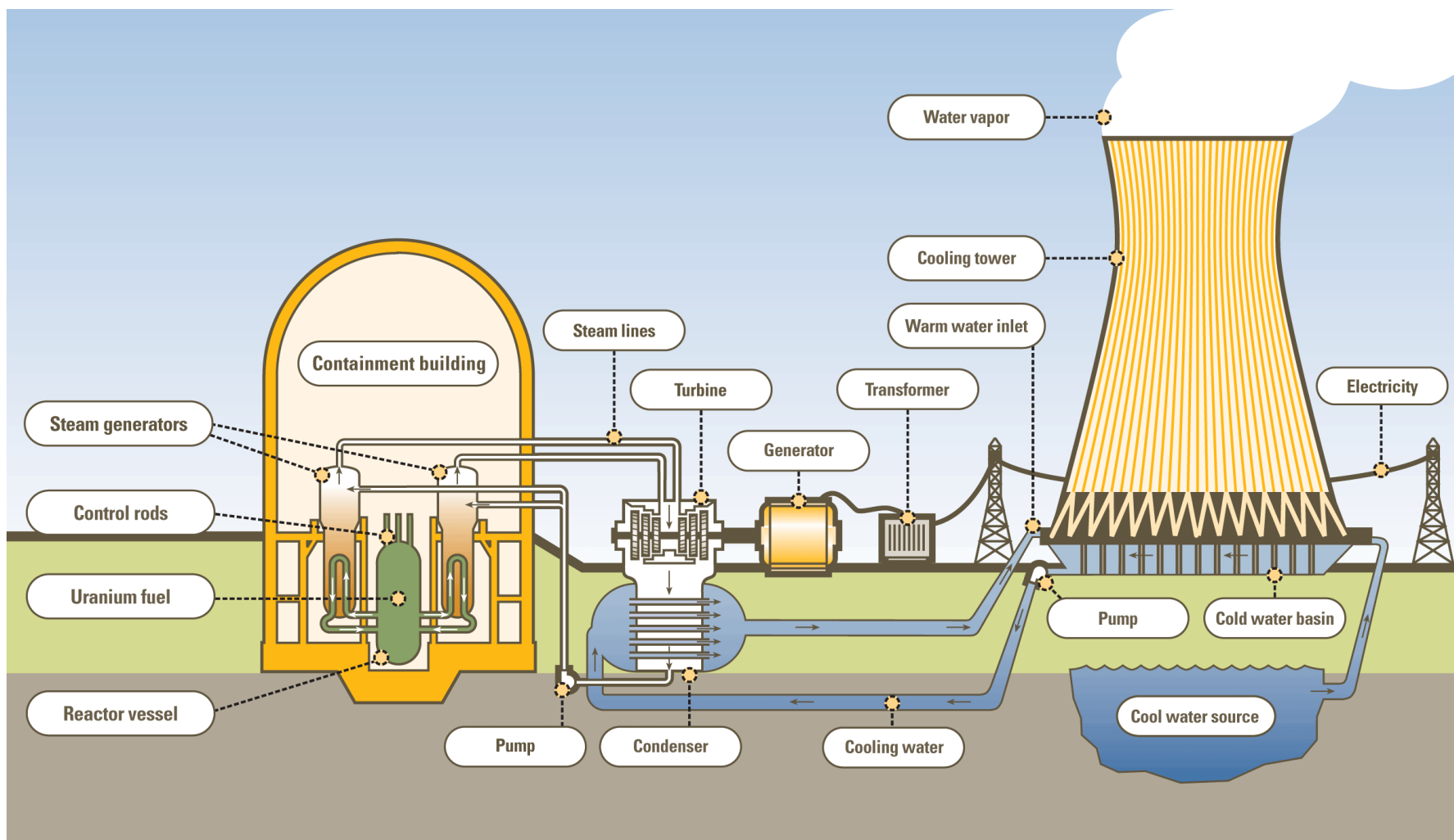
Cuotas de producción

Costes de operación para el medio ambiente y otras externalidades



Fuente: [Ecofys](http://ecofys.com)

Elementos de una central nuclear



Edificios auxiliares:

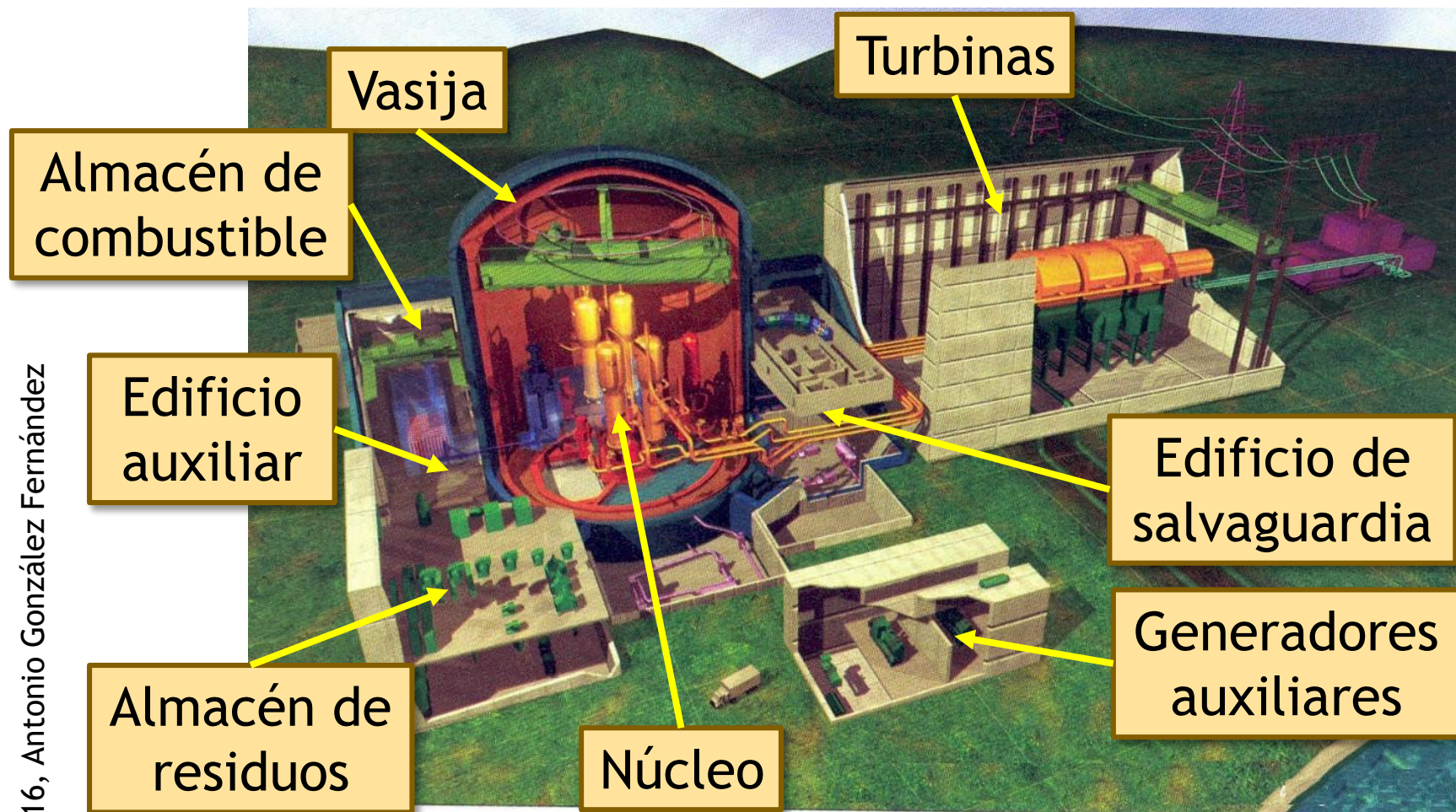
Generadores

Combustible

Residuos

Control

Elementos de una central nuclear. El EPR (European Pressurized Reactor)

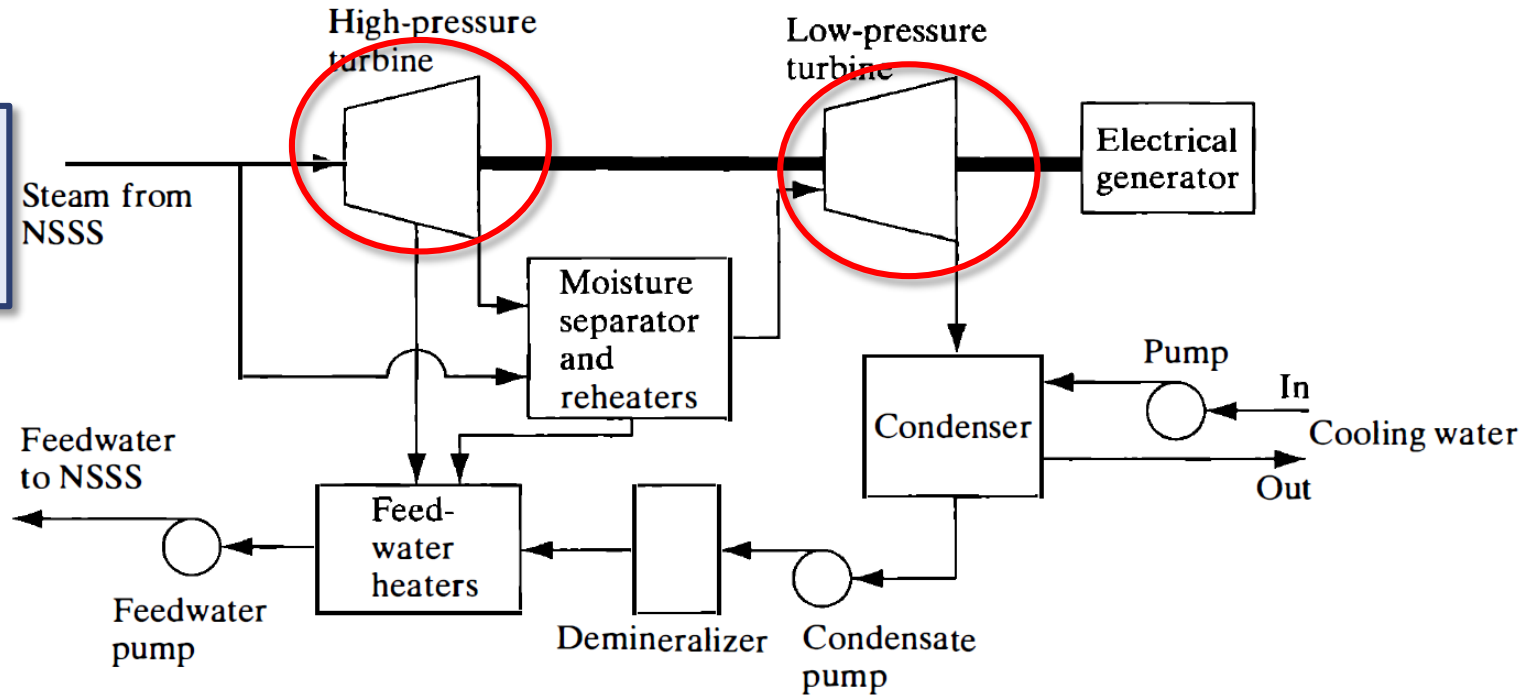




Visita (virtual) a una central nuclear

<http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-virtual-tour/>

Partes no nucleares de una central nuclear: Turbinas



El fluido (*coolant*) es calentado y conducido a una serie de turbinas

El vapor entra a T y p inferiores a una de carbón

N

$T \approx 550\text{K}$

$p \approx 7.5\text{MPa}$

C

$T \approx 800\text{K}$

$p \approx 22\text{MPa}$

Partes no nucleares de una central nuclear: Condensador

Al ser menor la T

$$\eta_{\text{nuclear}} < \eta_{\text{carbon}}$$

33%

40%



A igualdad de potencia,
más calor de desecho

Produce polución térmica

$$P = 1000\text{MWe}$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = 3000\text{MWt}$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = 2500\text{MWt}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = 2000\text{MWt}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = 1500\text{MWt}$$

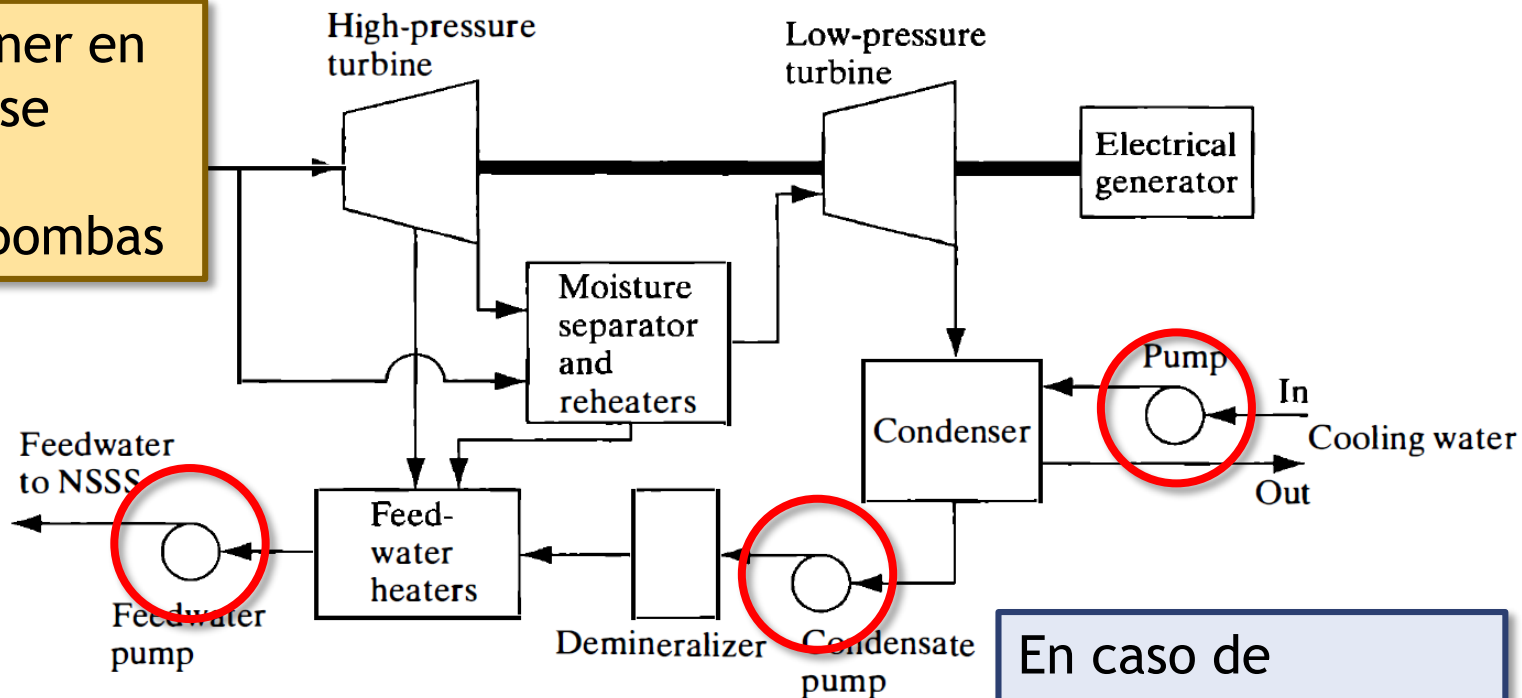
33% más

Esto obliga a instalar las centrales
en costas, lagos o ríos caudalosos



Bombas (no de las que explotan, normalmente)

Para mantener en circulación se requieren diferentes bombas

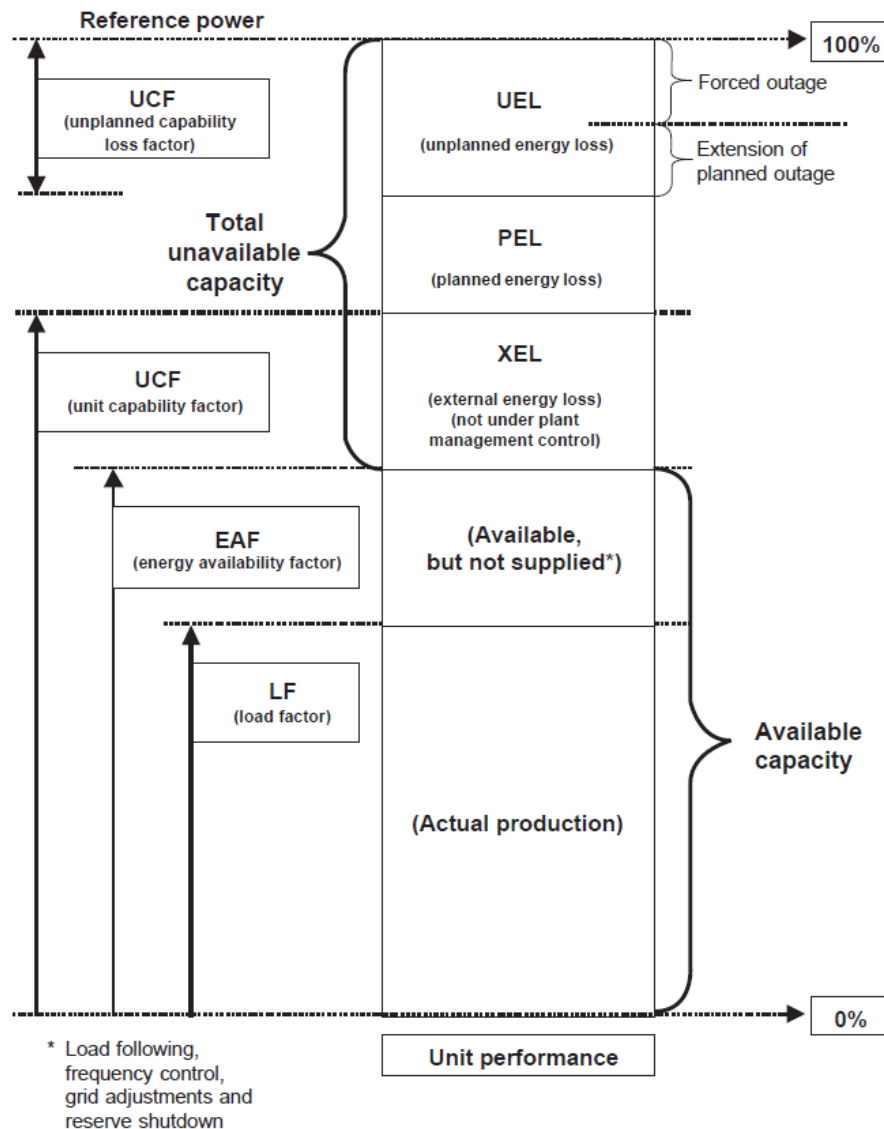
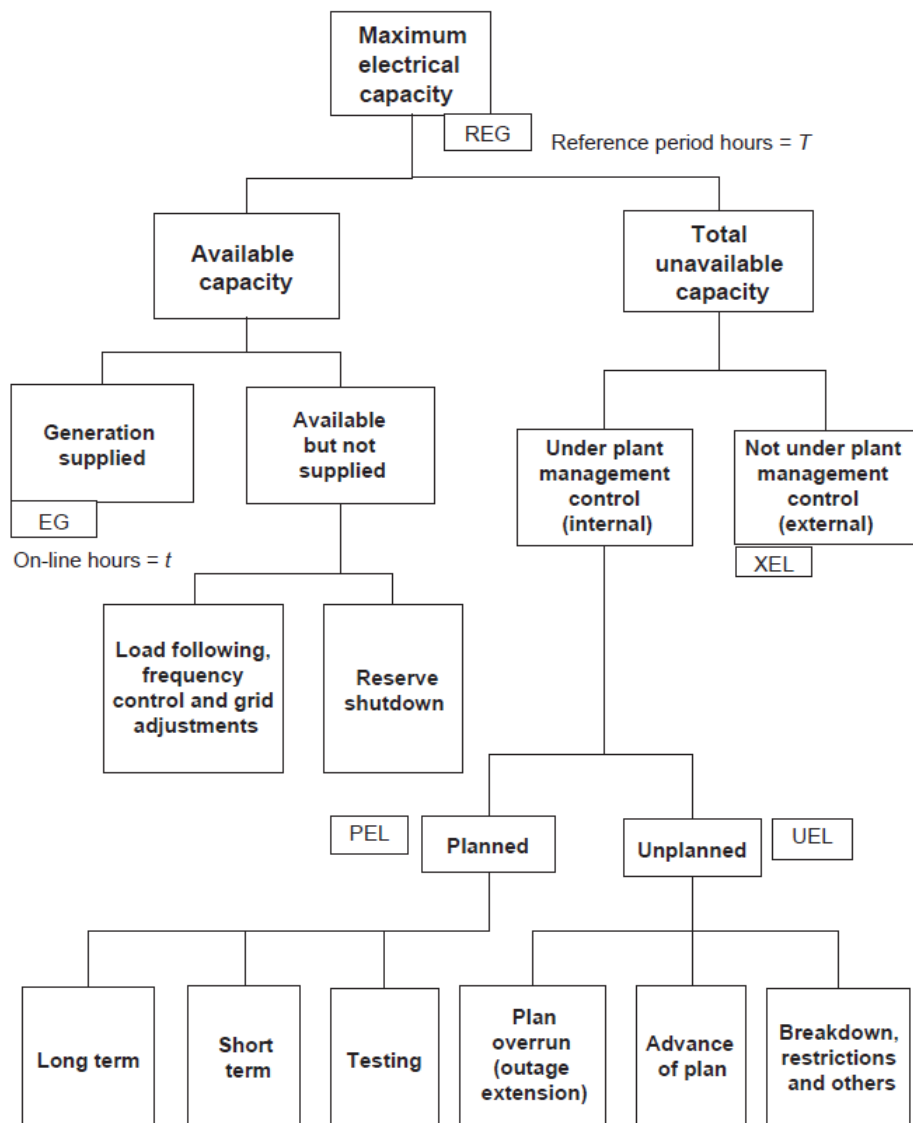


Son alimentadas externamente (no directamente por la central)

En caso de emergencia intervienen generadores diésel

Si no funcionan (Three Mile Island, Fukushima) se producen accidentes LOCA (*loss of coolant accident*)

Disponibilidad y capacidad de una central nuclear



Disponibilidad y capacidad de una central nuclear (II)

Disponibilidad
(*availability*)

% de tiempo que la central está operativa

$$EAF(\%) = 100 \frac{REG - PEL - UEL}{REG}$$

- REG: energía generada teóricamente
- PEL: pérdidas de energía planificadas
- UEL: pérdidas de energía no planificadas

Capacidad:
(*capacity factor*)

$$UCF(\%) = 100 \frac{REG - PEL - UEL - XEL}{REG}$$

- XEL: pérdidas no controladas de energía

Capacidad < Disponibilidad

España:

84.1%

84.9%

Comparación entre diferentes tipos de centrales

	Carbón	Nuclear	Gas	Eólica
Combustible	Barato	Barato	Caro	Gratis
Gastos de capital	Elevados	Elevados	Moderados	Elevados
Eficiencia	Media-alta	Media	Alta	Baja
CO2	Sí	No	Sí	No
Polución térmica	Media	Alta	Media	Baja
Residuos	Ceniza+gases	Residuos nucleares	Gases	Ninguno
Riesgos potenciales	Medios	Altos	Medios	Bajos
Alarma social	Media	Alta	Baja	Baja