

# Tecnología nuclear

**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



# Tecnología nuclear

**Antonio González Fernández**  
Departamento de Física Aplicada III  
Universidad de Sevilla

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

# ¿Qué es una central nuclear?

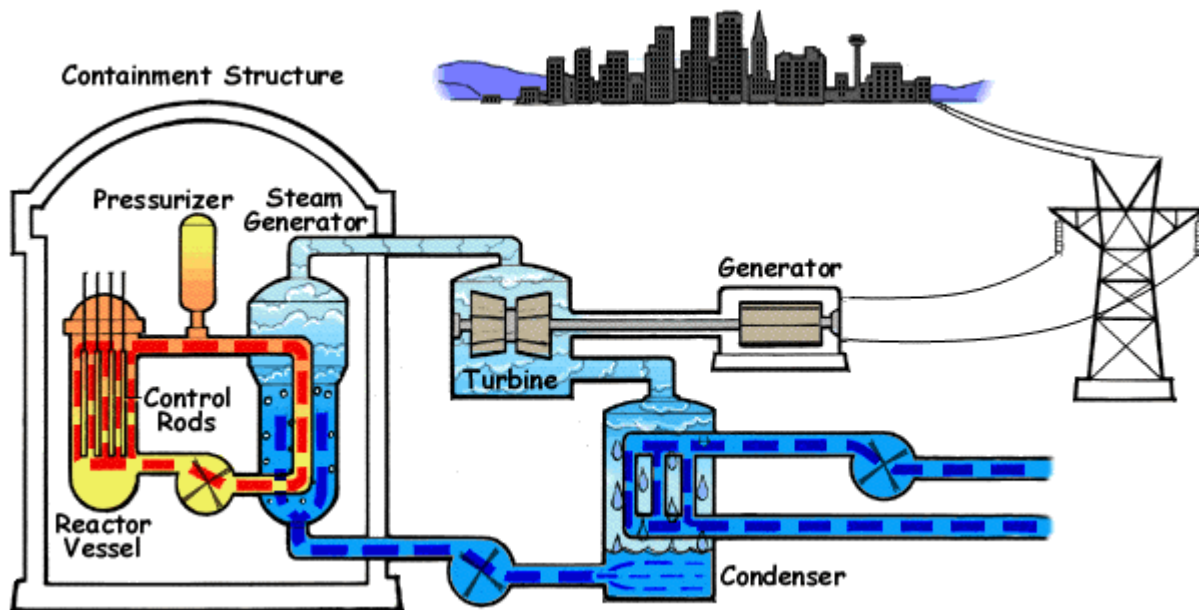
Una central nuclear es una central térmica

Emplea el calor producido en las fisiones de reacciones en cadena

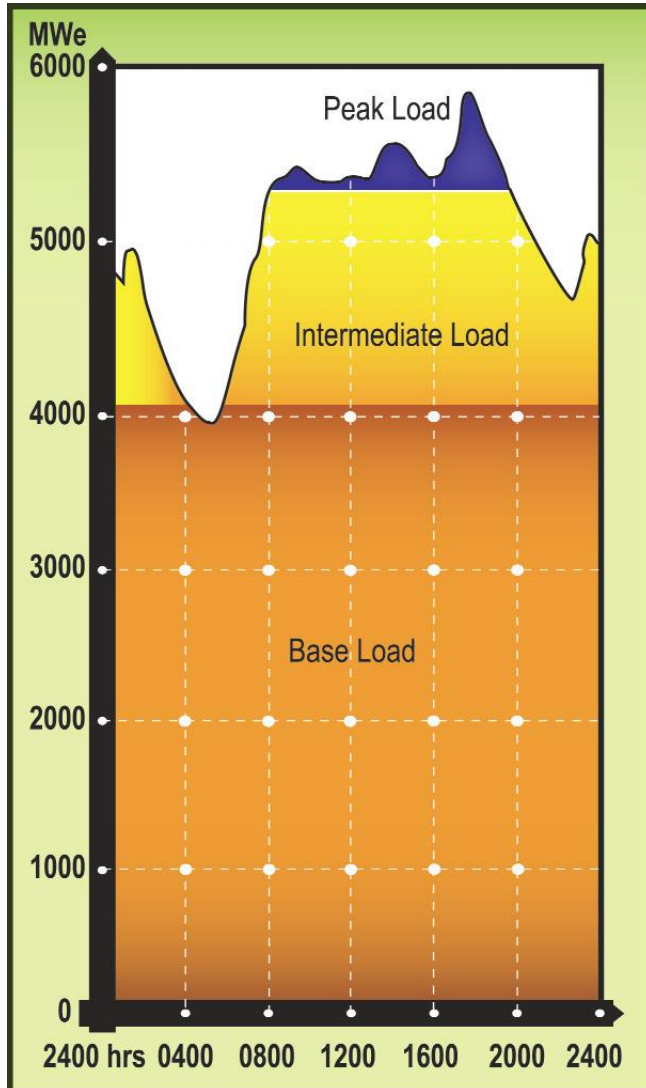
Utiliza como combustible uranio enriquecido o natural

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

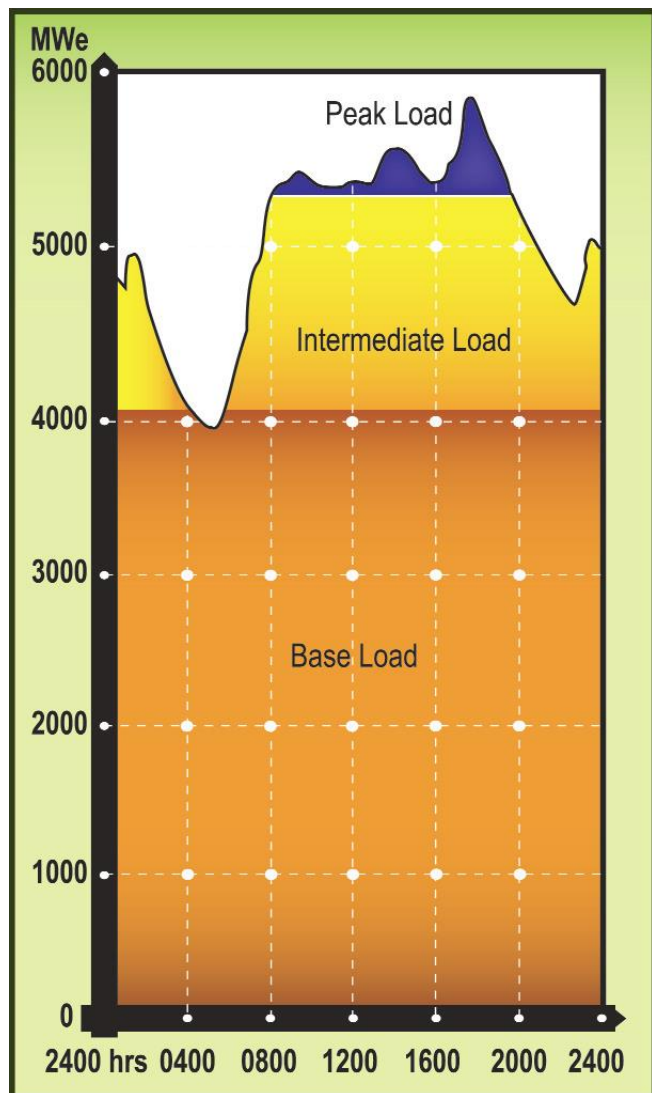
Puede verse en [REE](#)

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

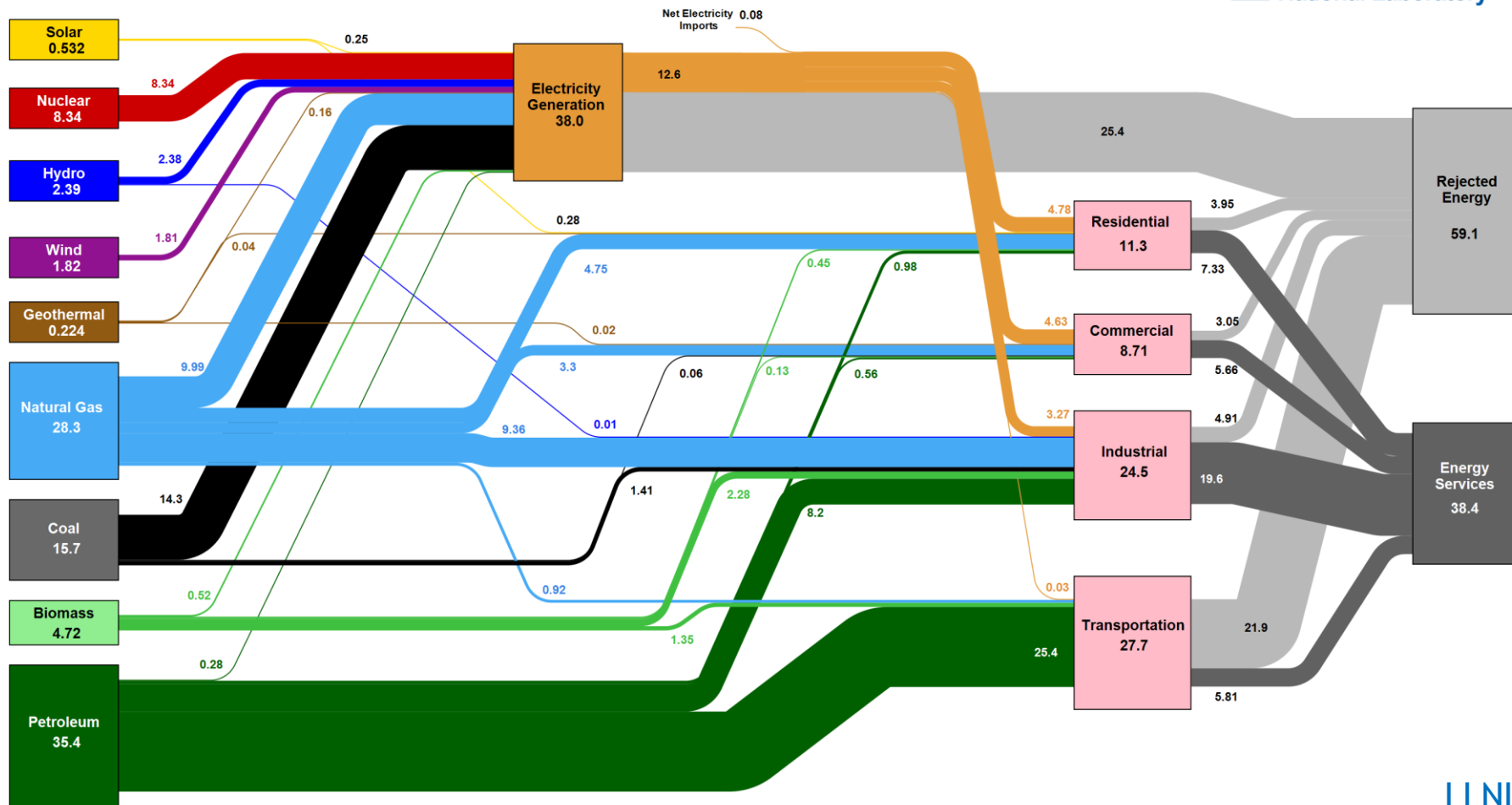
Ciclo combinado

Combustible

Capital

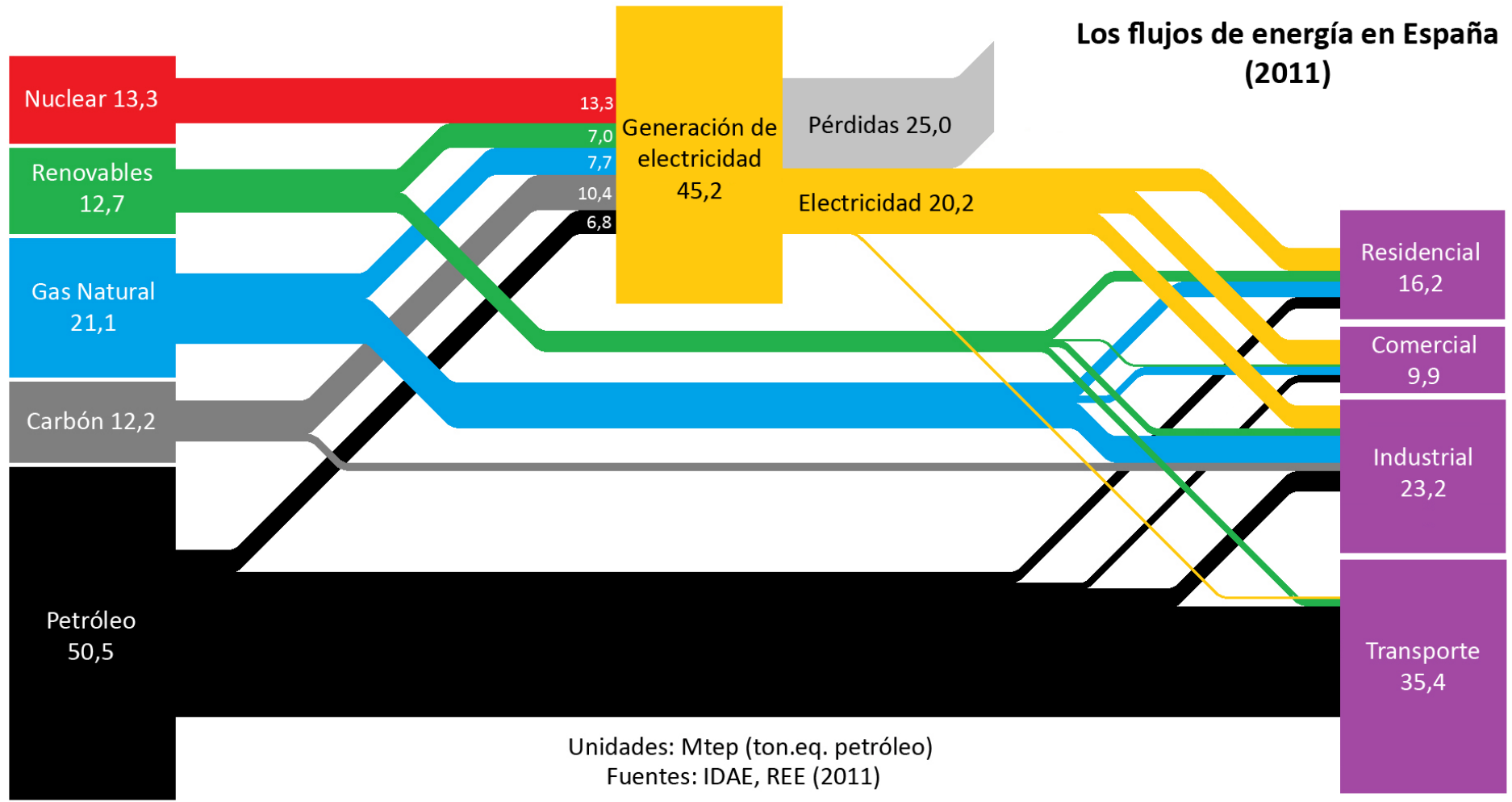
# El mix energético en los Estados Unidos

Estimated U.S. Energy Consumption in 2015: 97.5 Quads



Source: LLNL March, 2016. Data is based on DOE/EIA MER (2015). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the Department of Energy, under whose auspices the work was performed. Distributed electricity represents only retail electricity sales and does not include self-generation. EIA reports consumption of renewable resources (i.e., hydro, wind, geothermal and solar) for electricity in BTU-equivalent values by assuming a typical fossil plant heat rate. The efficiency of electricity production is calculated as the total retail electricity delivered divided by the primary energy input into electricity generation. End use efficiency is estimated as 65% for the residential sector, 65% for the commercial sector, 80% for the industrial sector, and 21% for the transportation sector. Totals may not equal sum of components due to independent Rounding. LLNL-MI-410527

# El mix energético en España



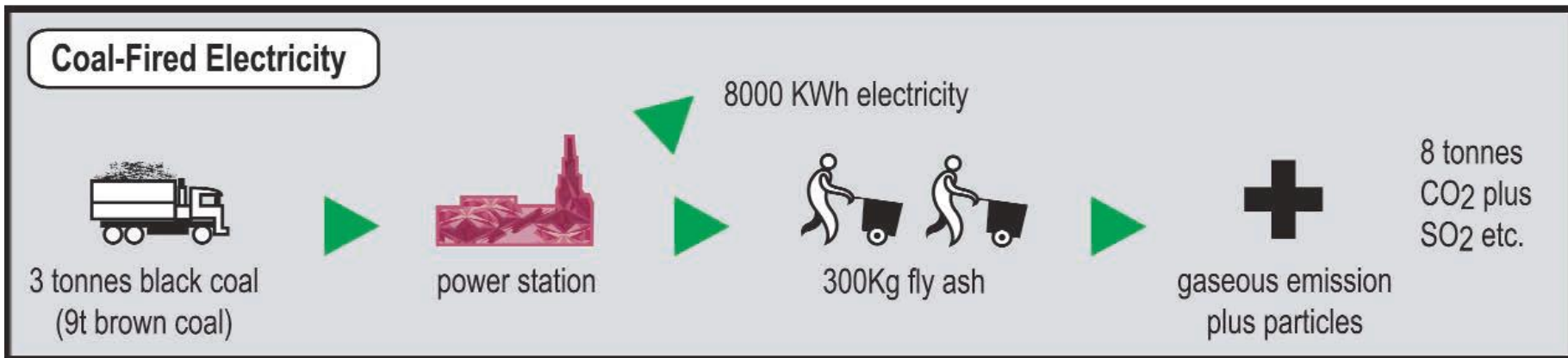
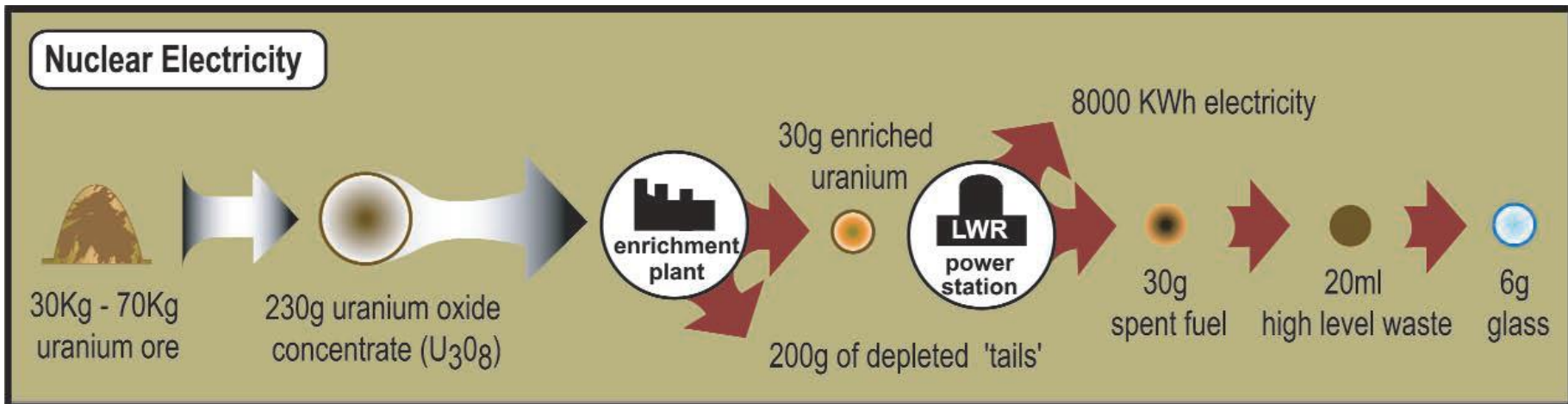
Unidades: Mtep (ton.eq. petróleo)  
 Fuentes: IDAE, REE (2011)  
<http://fstdp.wordpress.com/>



# 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

# Comparación entre una central de carbón y una central nuclear



Consumo anual de una central de 1000MWe

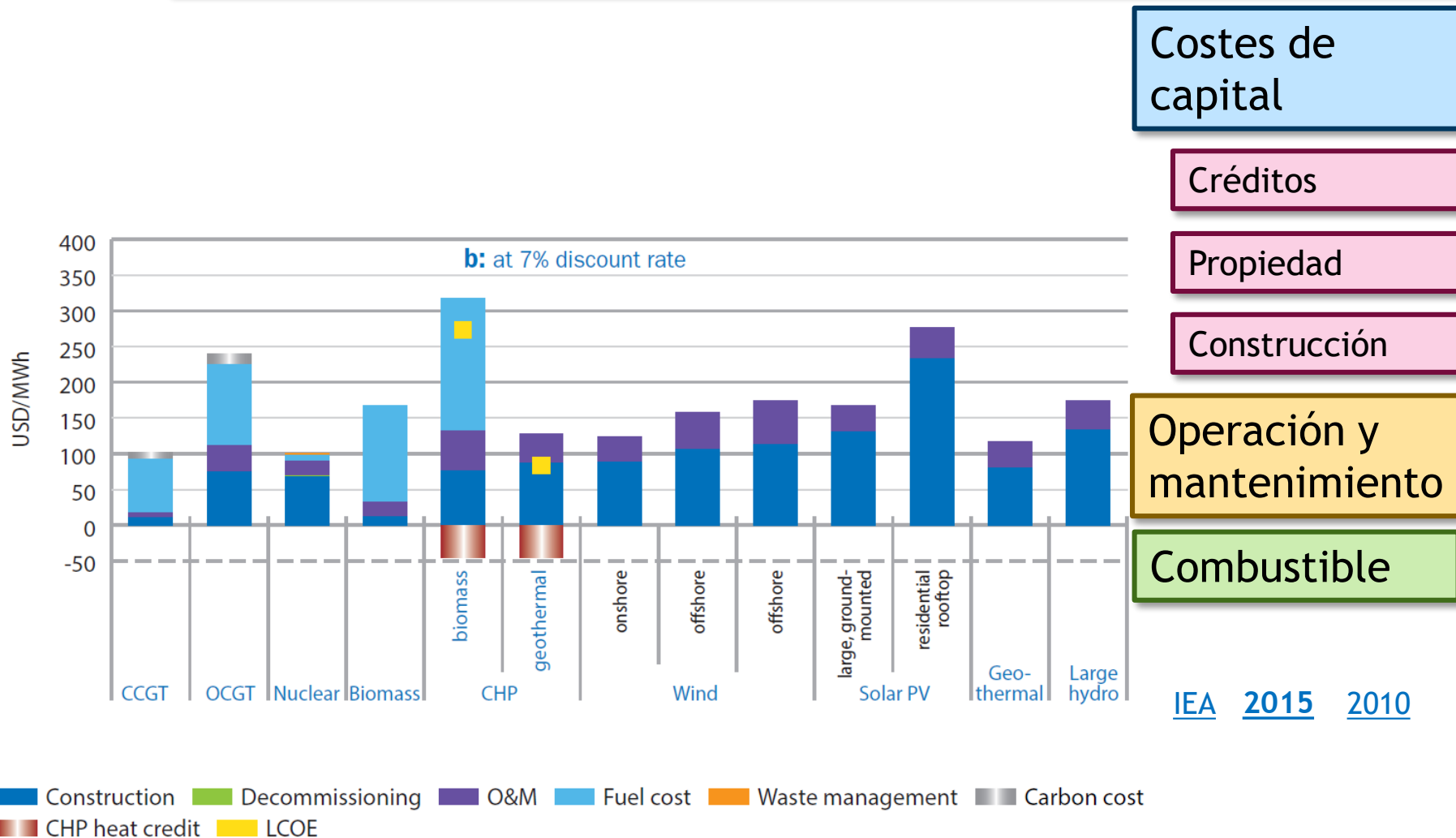
Carbón:

3 MTm/año

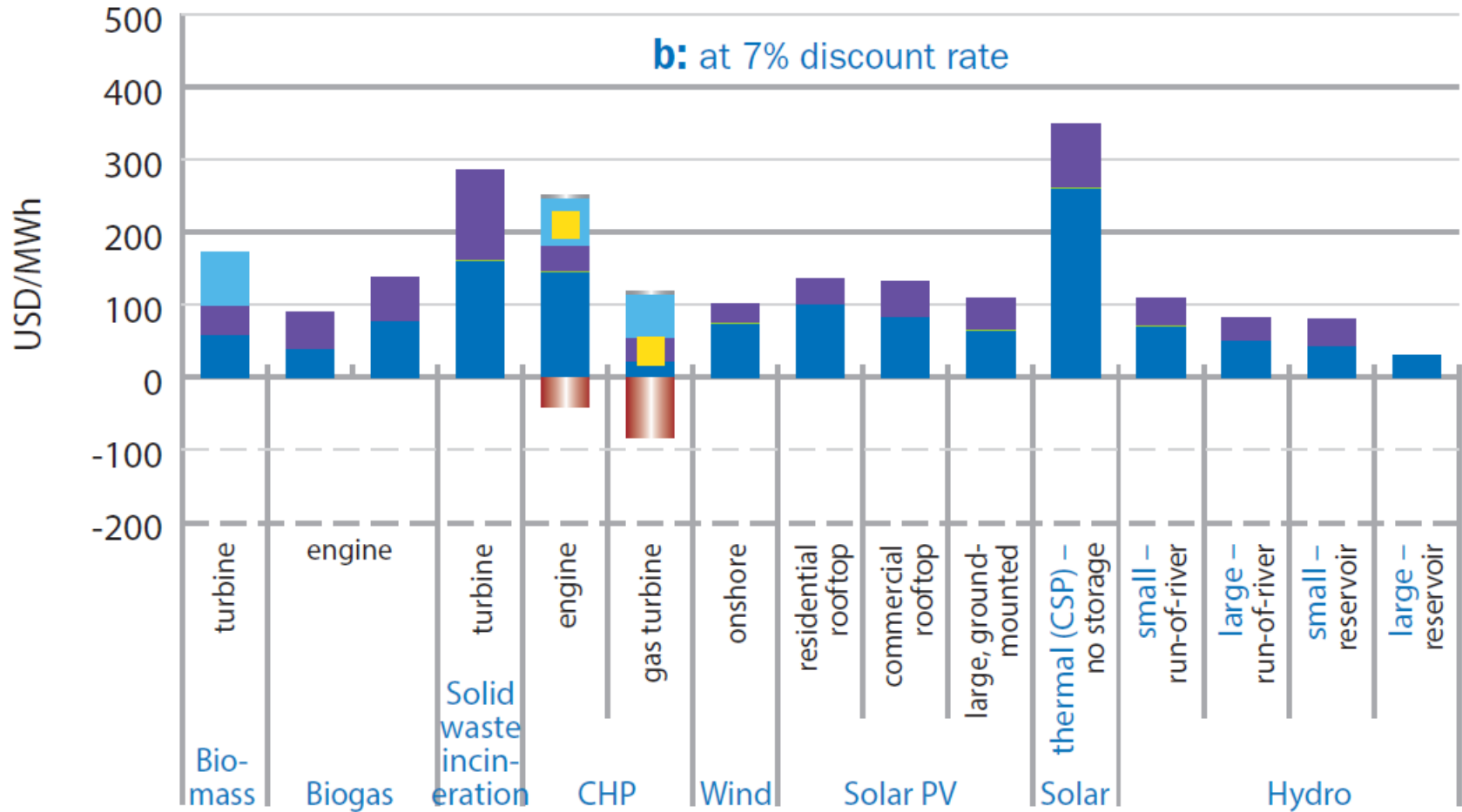
Uranio:

180Tm/año

# Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (Reino Unido)

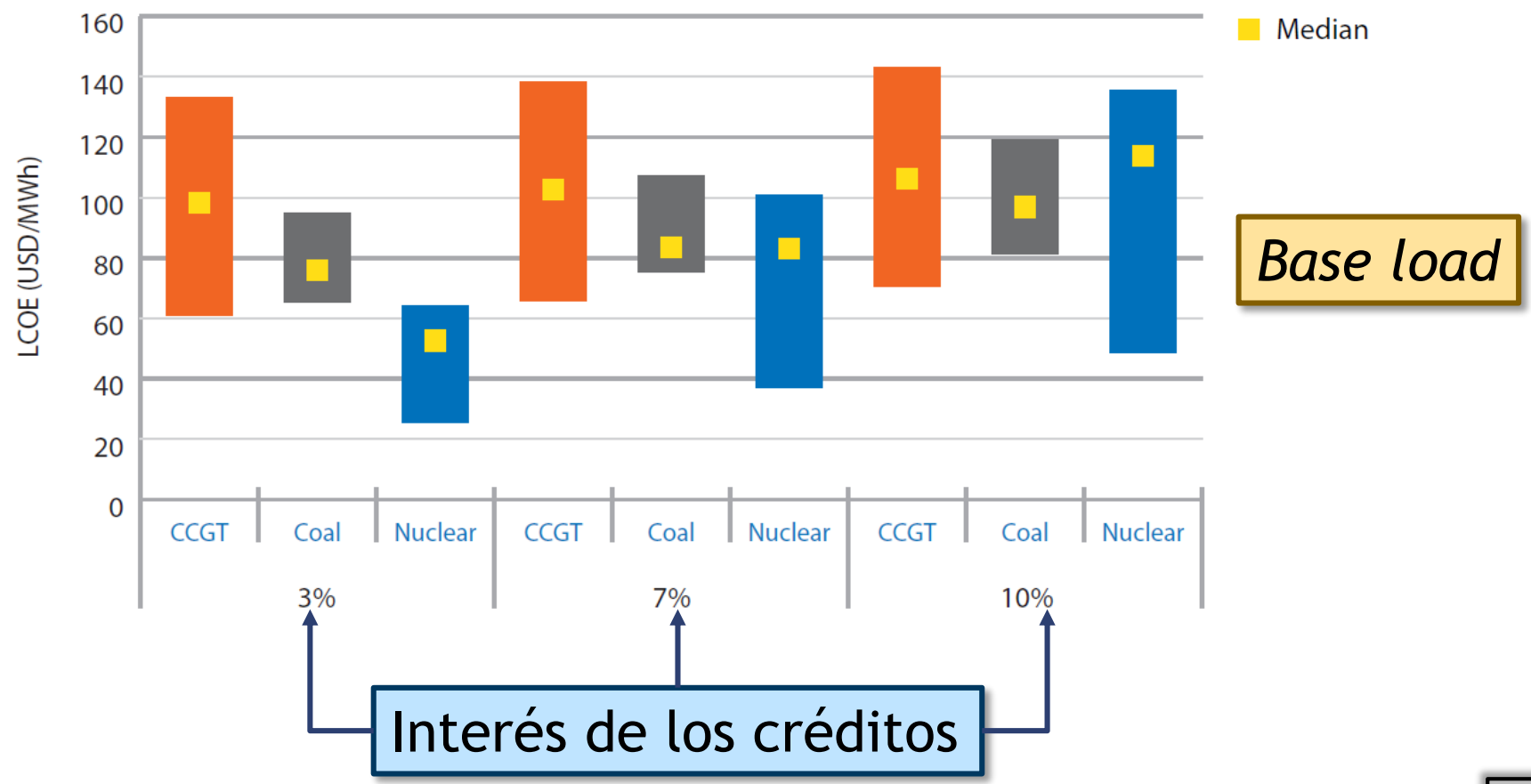


# Comparación de los costos de diferentes fuentes de energía (España)

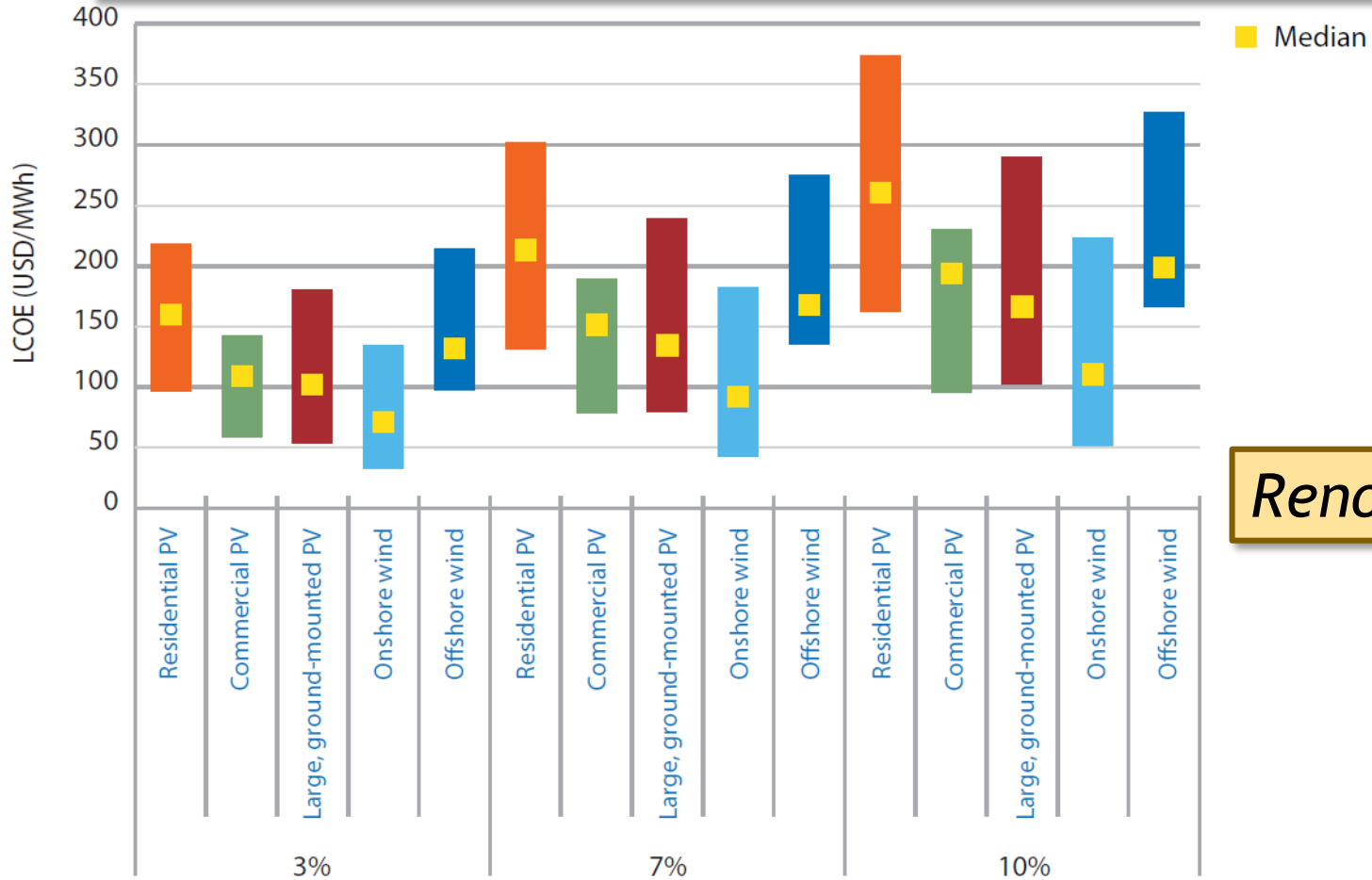


IEA 2015

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



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

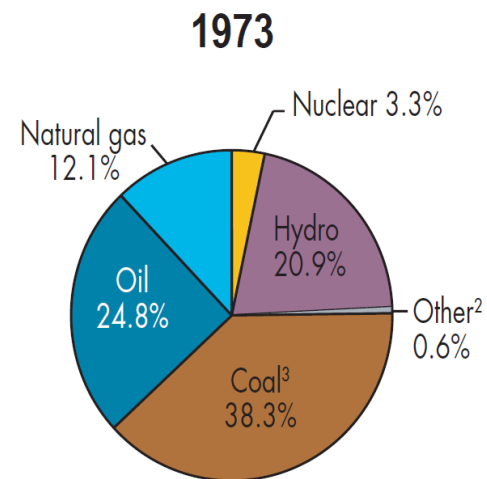
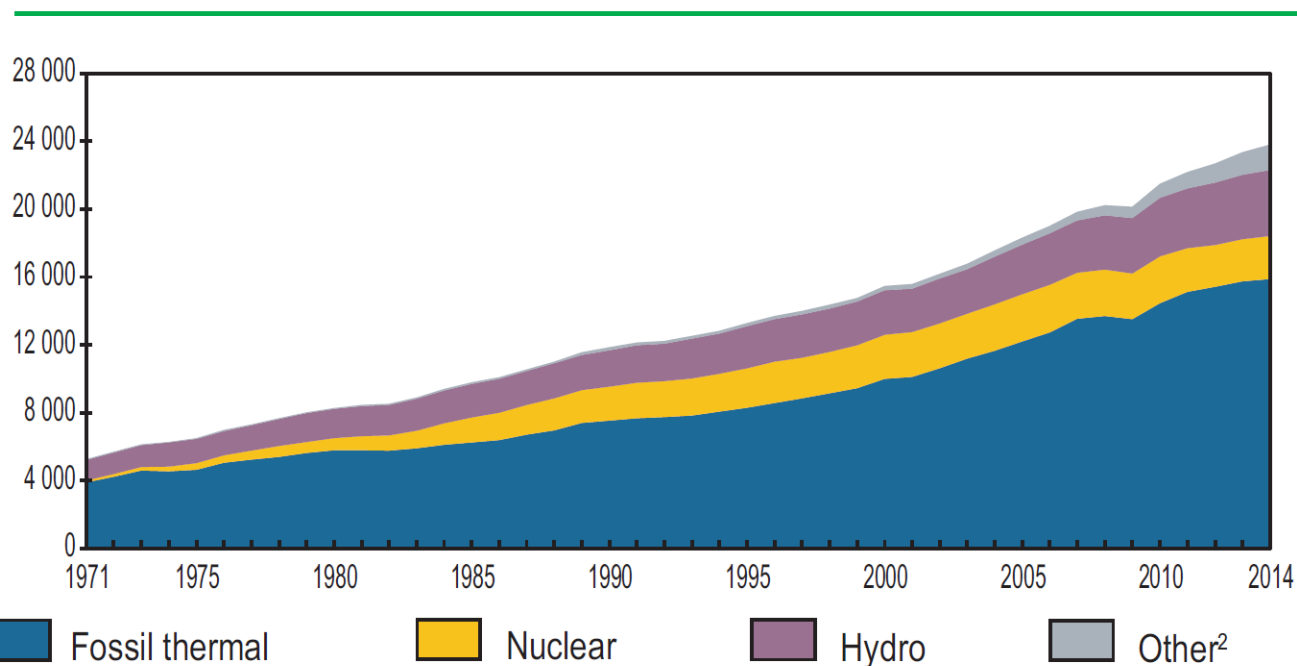


*Renovables*

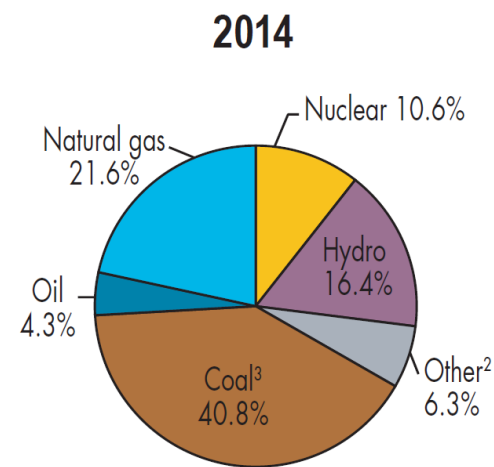
Interés de los créditos

# Evolución de la producción mundial de electricidad

World electricity generation<sup>1</sup> from 1971 to 2014 by fuel (TWh)



**6 131 TWh**

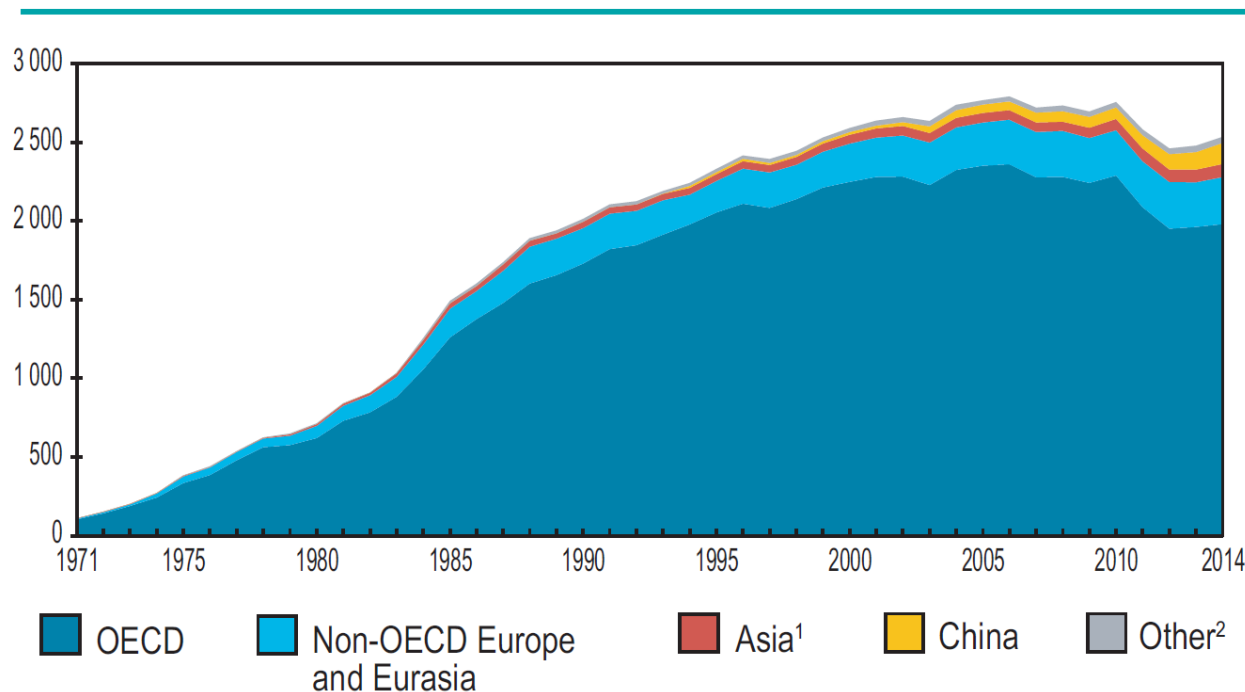


**23 816 TWh**

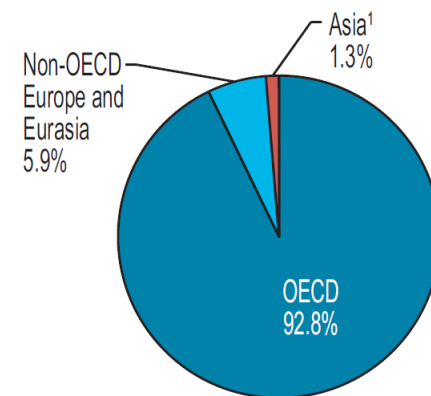
[IEA](http://www.iea.org)

# Evolución de la producción de energía nuclear

Nuclear production from 1971 to 2014  
by region (TWh)

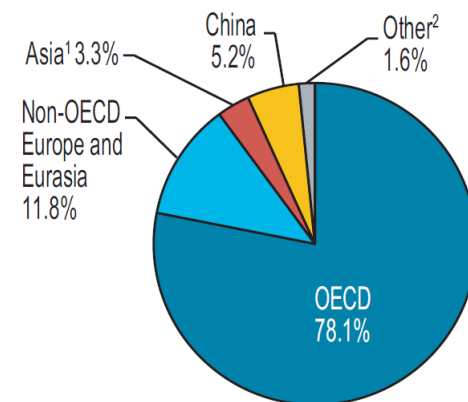


1973



203 TWh

2014



2 535 TWh

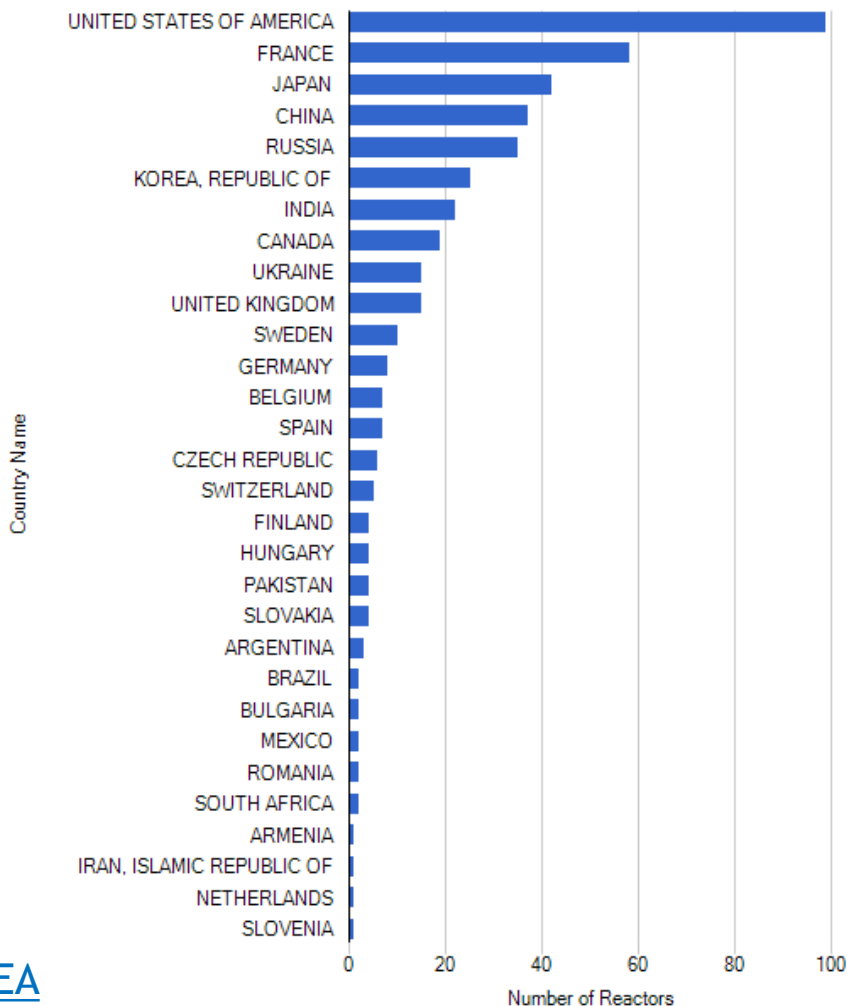
1. Asia excludes China and OECD countries of Asia.

2. Other includes Africa, Non-OECD Americas and the Middle East.



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

Total Number of Reactors: 449



Country	No R.	Net Capacity [MW]
UNITED STATES OF AMERICA	99	99869
FRANCE	58	63130
JAPAN	42	39752
CHINA	37	32402
RUSSIA	35	26172
KOREA, REPUBLIC OF	25	23077
INDIA	22	6225
CANADA	19	13554
UKRAINE	15	13107
UNITED KINGDOM	15	8918
SWEDEN	10	9740
GERMANY	8	10799
BELGIUM	7	5913
<b>SPAIN</b>	<b>7</b>	<b>7121</b>
CZECH REPUBLIC	6	3930
TAIWAN	6	5052
SWITZERLAND	5	3333
FINLAND	4	2752
HUNGARY	4	1889
PAKISTAN	4	1005
SLOVAKIA	4	1814
ARGENTINA	3	1632
BRAZIL	2	1884
BULGARIA	2	1926
MEXICO	2	1552
ROMANIA	2	1300
SOUTH AFRICA	2	1860
ARMENIA	1	375
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915
NETHERLANDS	1	482
SLOVENIA	1	688
<b>Total</b>	<b>449</b>	<b>392168</b>

# ¿Qué ha pasado en el último año?

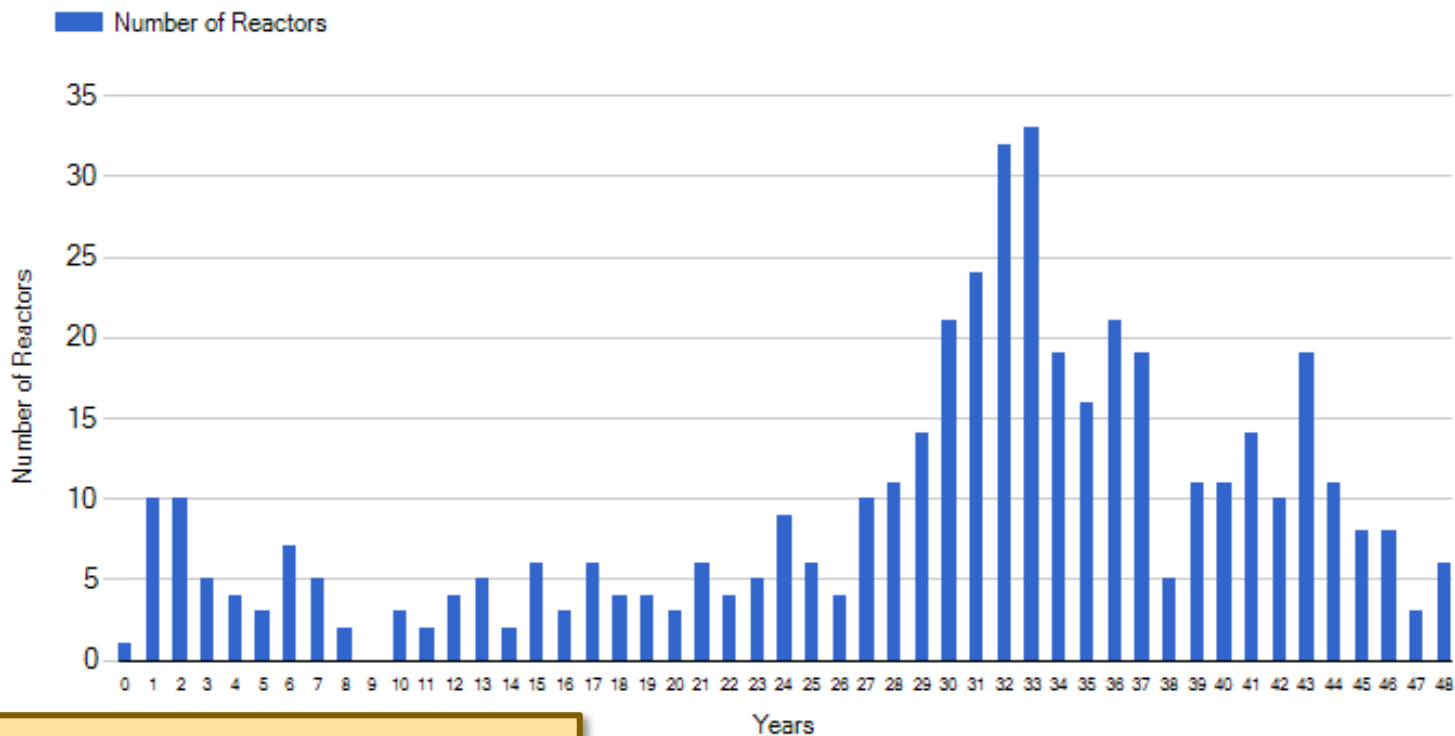
## Cambios desde 2015: +7

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

Country	No R.	Net Capacity [MW]
UNITED STATES OF AMERICA	99	99869
FRANCE	58	63130
JAPAN	42	39752
CHINA	37	32402
RUSSIA	35	26172
KOREA, REPUBLIC OF	25	23077
INDIA	22	6225
CANADA	19	13554
UKRAINE	15	13107
UNITED KINGDOM	15	8918
SWEDEN	10	9740
GERMANY	8	10799
BELGIUM	7	5913
SPAIN	7	7121
CZECH REPUBLIC	6	3930
TAIWAN	6	5052
SWITZERLAND	5	3333
FINLAND	4	2752
HUNGARY	4	1889
PAKISTAN	4	1005
SLOVAKIA	4	1814
ARGENTINA	3	1632
BRAZIL	2	1884
BULGARIA	2	1926
MEXICO	2	1552
ROMANIA	2	1300
SOUTH AFRICA	2	1860
ARMENIA	1	375
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915
NETHERLANDS	1	482
SLOVENIA	1	688
Total	449	392168

# Edad de los reactores en funcionamiento

Total Number of Reactors: 449



## Causas del parón nuclear

Crisis del petróleo



Reducción del consumo

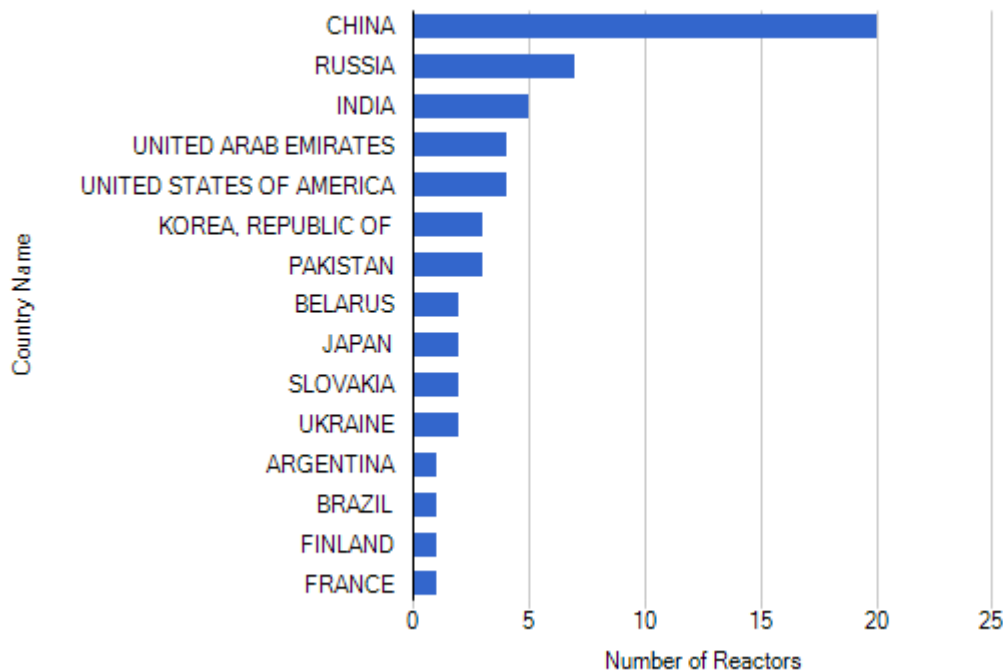
Movimientos ecologistas



Moratoria nuclear

# Reactores en construcción

Total Number of Reactors: 60

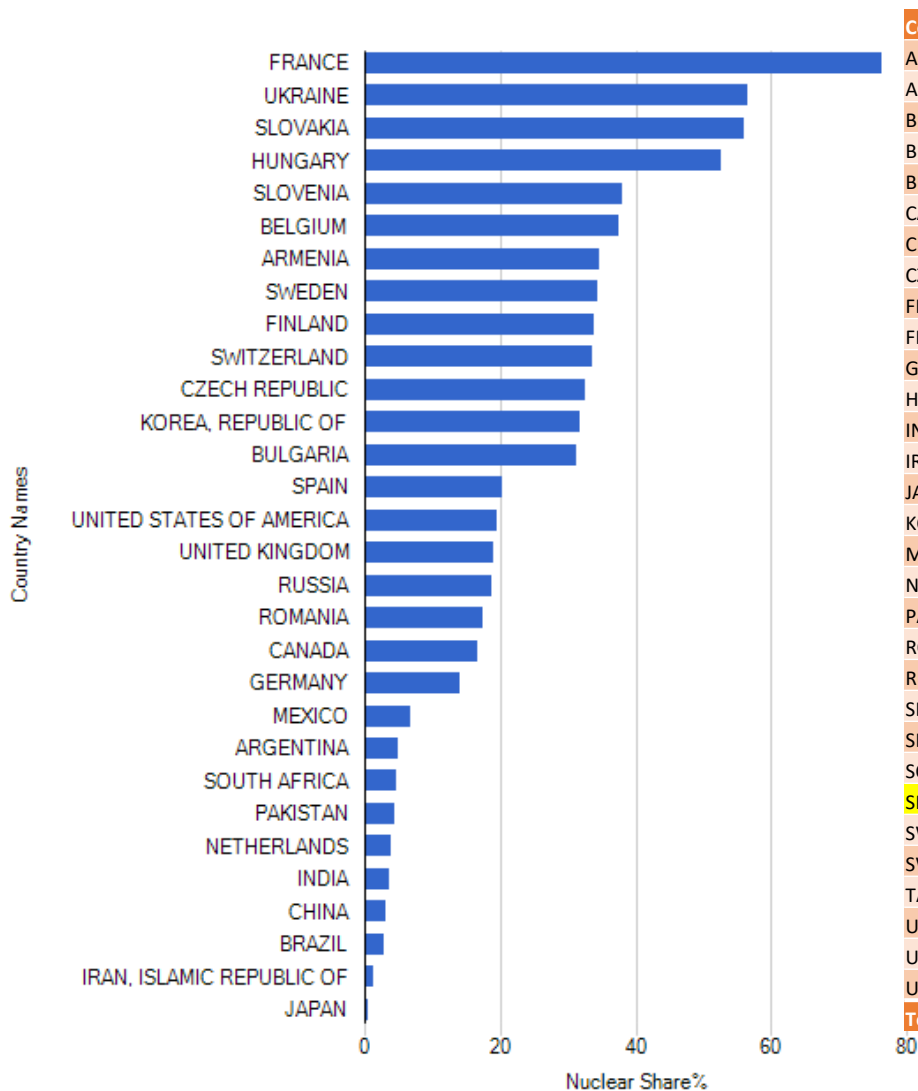


Number of Reactors

Country	No. R	Net Capacity [MW]
ARGENTINA	1	25
BELARUS	2	2218
BRAZIL	1	1245
CHINA	20	20500
FINLAND	1	1600
FRANCE	1	1630
INDIA	5	2990
JAPAN	2	2653
KOREA, REPUBLIC OF	3	4020
PAKISTAN	3	2343
RUSSIA	7	5520
SLOVAKIA	2	880
TAIWAN, CHINA	2	2600
UKRAINE	2	2068
UNITED ARAB EMIRATES	4	5380
UNITED STATES OF AMERICA	4	4468
Total		60140

Cambios desde 2016: -6

# Cuota de producción de energía nuclear



Country	Nº R	Capacity [MW]	Supplied [GWh]	Share
ARGENTINA	3	1632	6518.63	4.8
ARMENIA	1	375	2571.1	34.5
BELGIUM	7	5913	24825.24	37.5
BRAZIL	2	1884	13891.62	2.8
BULGARIA	2	1926	14700.98	31.3
CANADA	19	13524	95636.53	16.6
CHINA	31	26774	161202.45	3
CZECH REPUBLIC	6	3930	25337.33	32.5
FINLAND	4	2752	22325.97	33.7
FRANCE	58	63130	419022.15	76.3
GERMANY	9	12074	86810.34	14.1
HUNGARY	4	1889	14959.77	52.7
INDIA	21	5308	34644.45	3.5
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915	3198.24	1.3
JAPAN	48	42388	4346.48	0.5
KOREA, REPUBLIC OF	24	21733	157198.95	31.7
MEXICO	2	1440	11184.73	6.8
NETHERLANDS	1	482	3861.63	3.7
PAKISTAN	3	690	4332.7	4.4
ROMANIA	2	1300	10709.67	17.3
RUSSIA	35	25443	182807.13	18.6
SLOVAKIA	4	1814	14083.68	55.9
SLOVENIA	1	688	5371.66	38
SOUTH AFRICA	2	1860	10965.14	4.7
<b>SPAIN</b>	<b>7</b>	<b>7121</b>	<b>54758.77</b>	<b>20.3</b>
SWEDEN	10	9648	54455.05	34.3
SWITZERLAND	5	3333	22155.8	33.5
TAIWAN, CHINA	6	5052	35143.03	16.3
UKRAINE	15	13107	82405.16	56.5
UNITED KINGDOM	16	9408	63894.54	18.9
UNITED STATES OF AMERICA	99	99185	798012.34	19.5
<b>Total</b>	<b>448</b>	<b>386718</b>	<b>2441331.26</b>	<b>13.86%</b>

# Cuota y centrales nucleares en España

 Spain

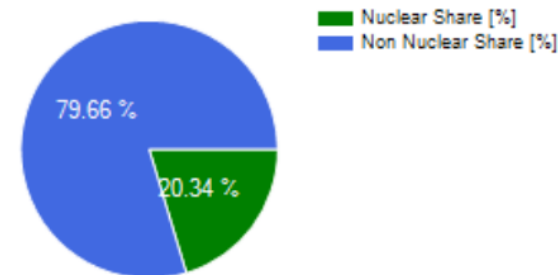
## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

Under Construction	Operational	Long-Term Shutdown	Permanent Shutdown
<b>0</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

### Electricity Production Share in 2015

Trend



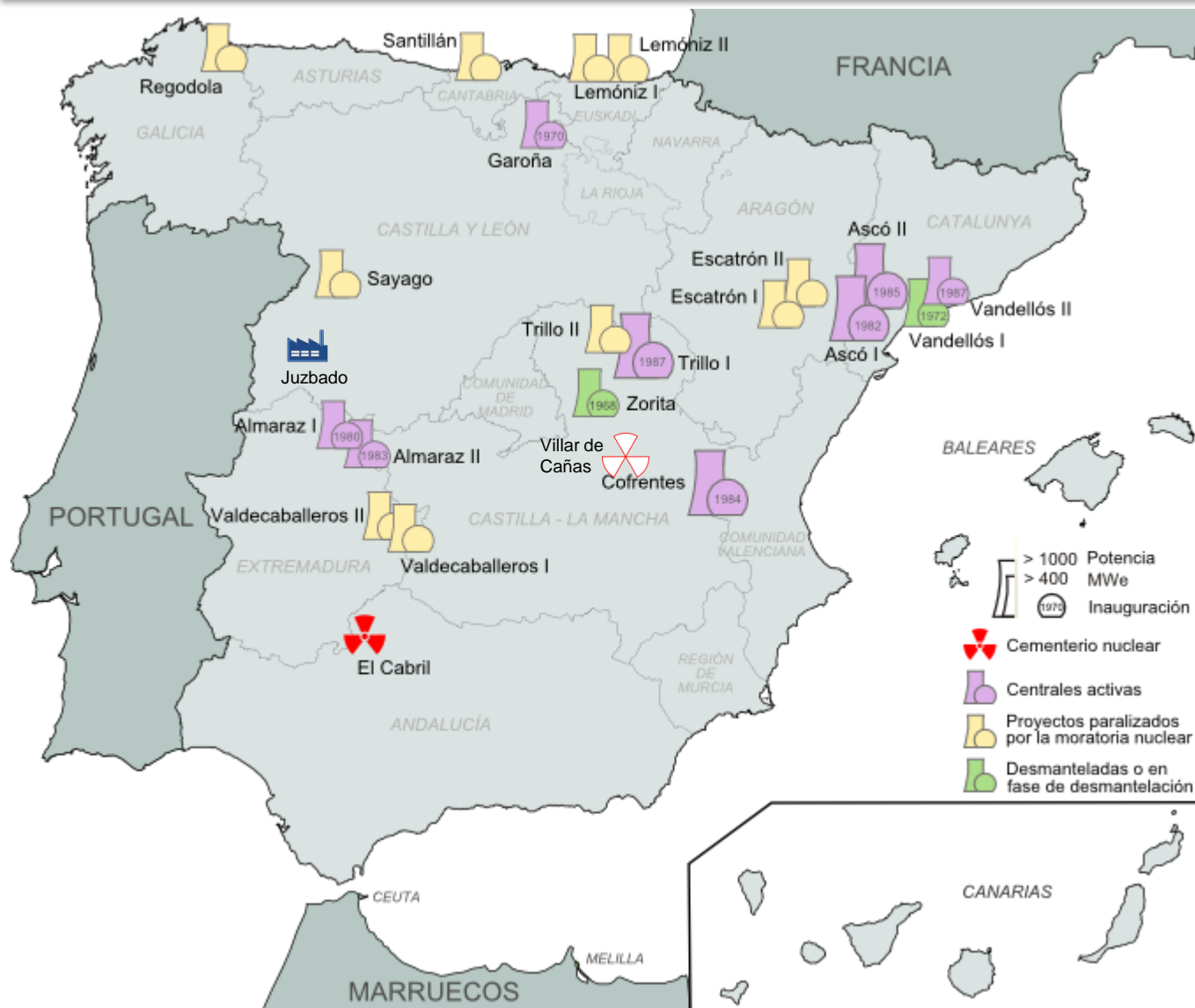
### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)  
**269143.00 GW.h**  
 (Net, 2015)

Nuclear Electricity Production  
**54740.00 GW.h**  
 (Net, 2015)

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
<b>Total</b>				<b>8188</b>	<b>8532</b>	

# Instalaciones nucleares en España



# Industria nuclear en España (2015)

Del [Libro de la energía 2015](#)

Tipo	Prod. (GWh)	% del total	Combustible
Nuclear	57305	20.52%	1350 Tm
Carbón	43011	19.46%	18130 kTm
Eólica	52013	18.79%	

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

ENUSA ha fabricado 854 elementos combustibles (62% para exportación)

Continúan los trámites del ATC

ATIs en Garoña y Almaraz (en proyecto)

Uranio Almacenado (kg)

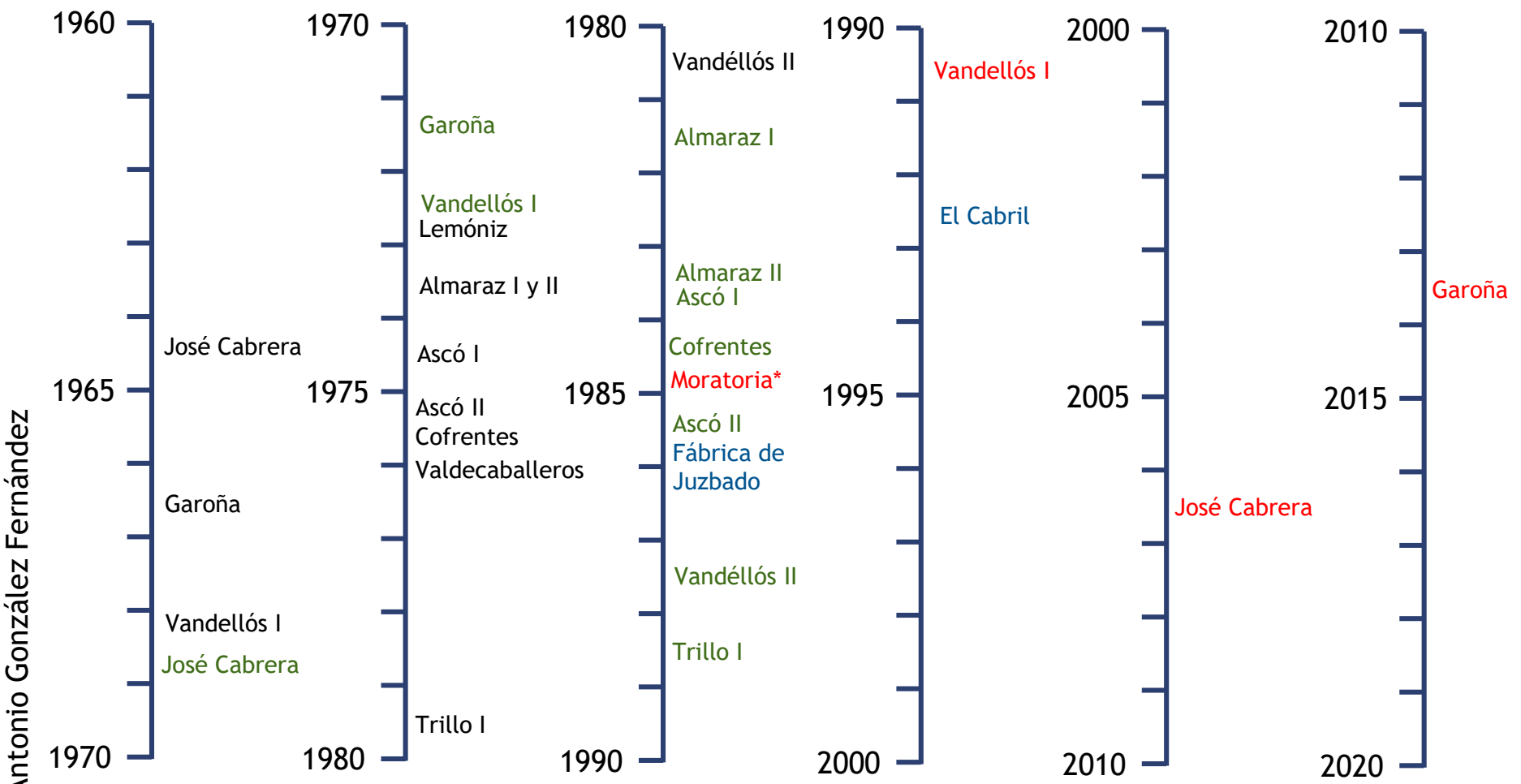
Central	Piscinas	ATI
José Cabrera		95750
Sta. M <sup>a</sup> de Garoña	420243	
Almaraz I	608026	
Almaraz II	602390	
Ascó I	527335	55142
Ascó II	476497	67773
Cofrentes	723053	
Vandellós II	491437	
Trillo	224023	280944

[MINETAD](#)





# Cronología de la industria nuclear española

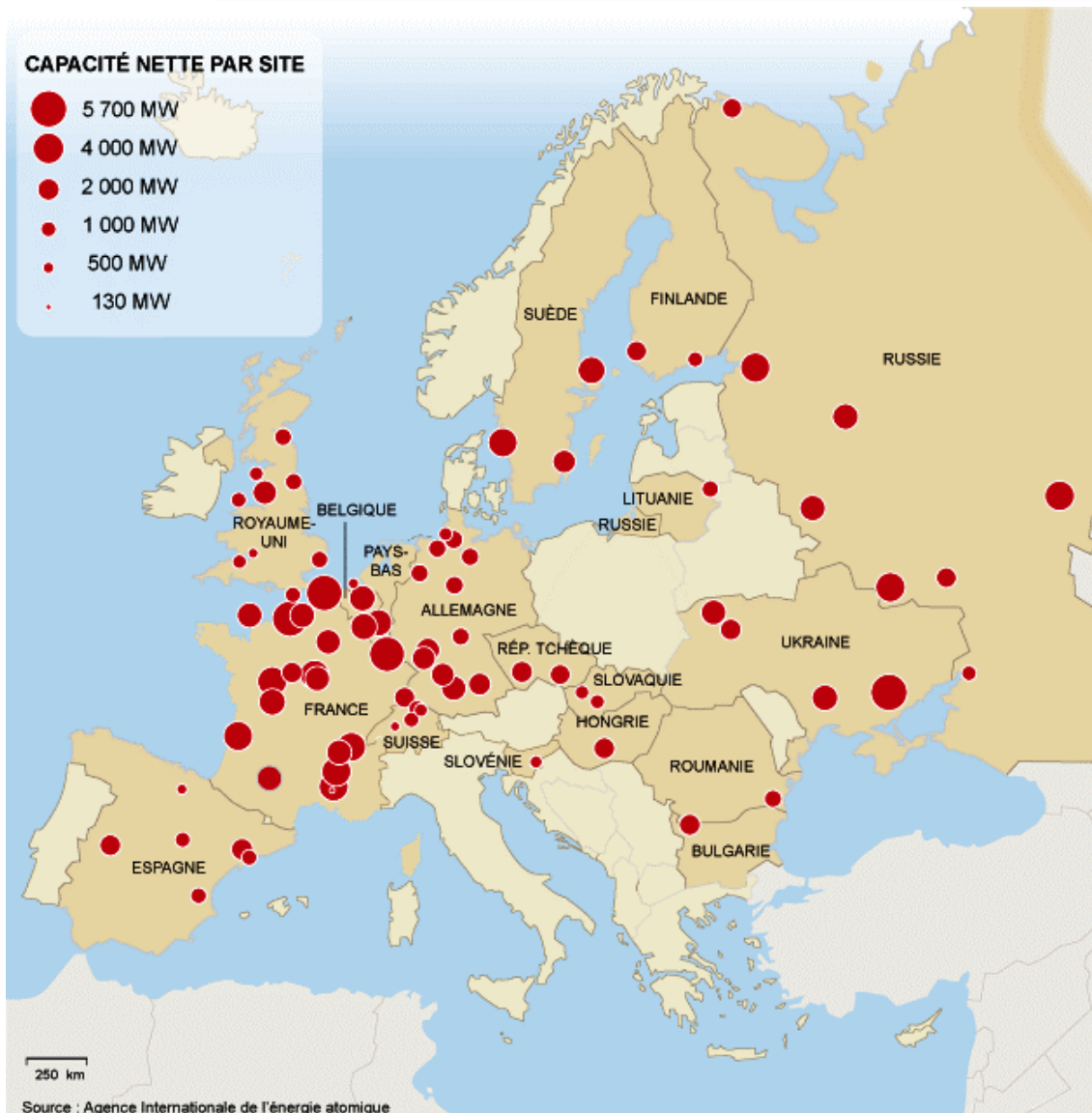


© 2017, Antonio González Fernández

Inicio de la construcción  
 Puesta en red  
 Parada de la central

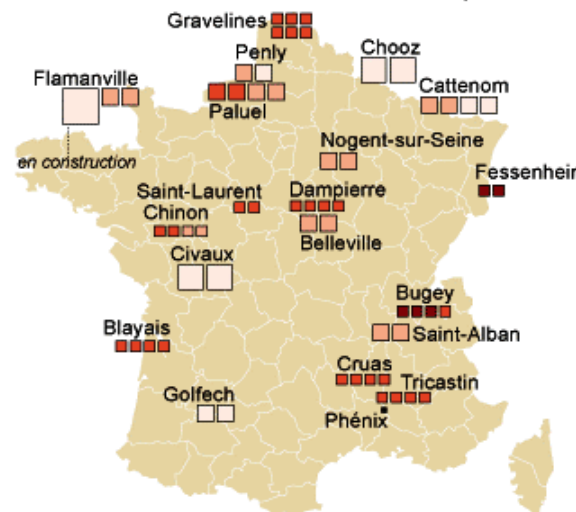
Moratoria: Lemóniz I y II, Valdecaballeros I y II, Trillo II

# 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 %**

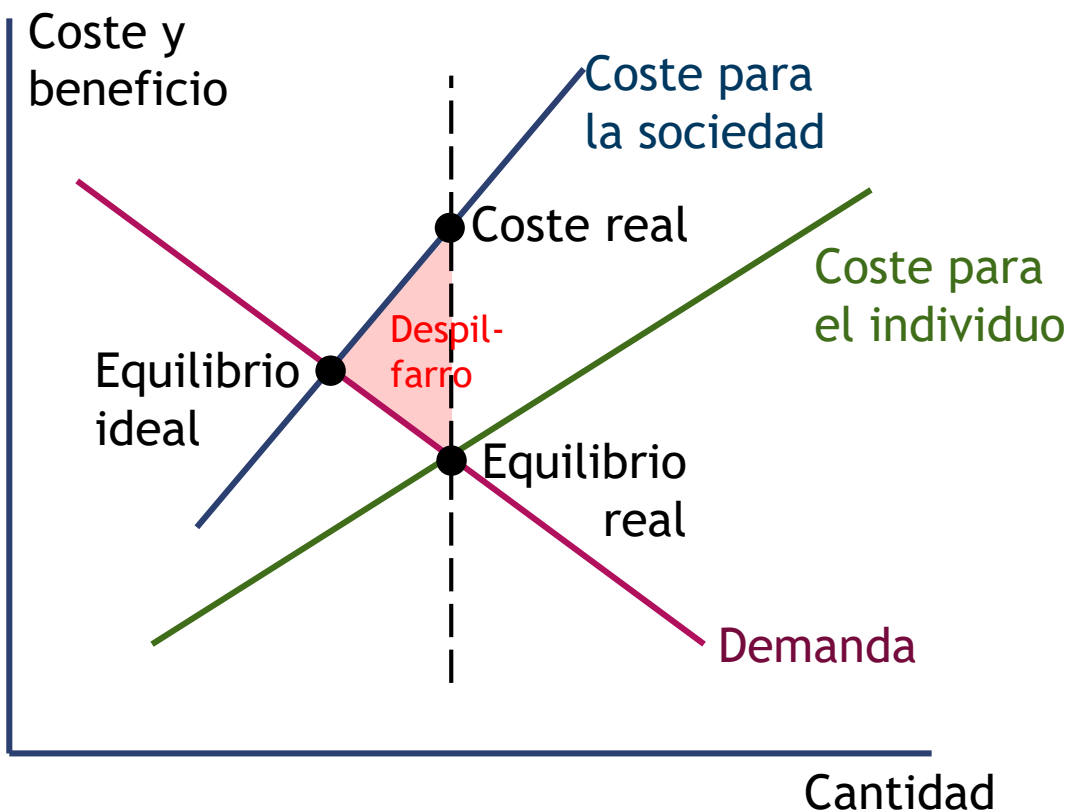
France	76,9
Lituanie	64,4
Slovaquie	54,3
Belgique	54,1
Ukraine	48,1
Suède	46,1
Arménie	43,5
Slovénie	41,6
Suisse	40,0
Hongrie	36,8
Bulgarie	32,1
Rép. tchèque	30,3
Finlande	28,9
Allemagne	25,9

# 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:

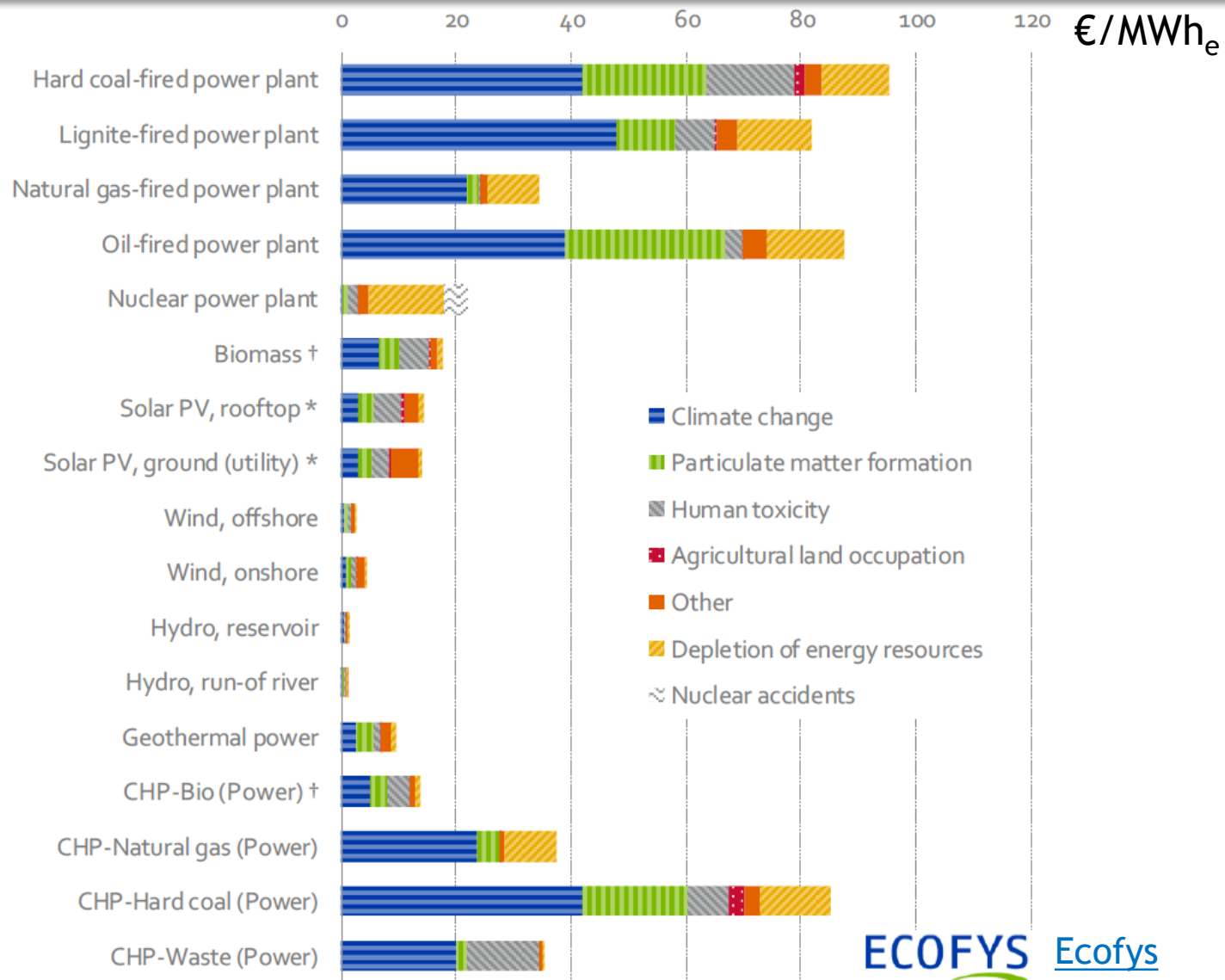
Multas

Tasas

Subvenciones

Cuotas de producción

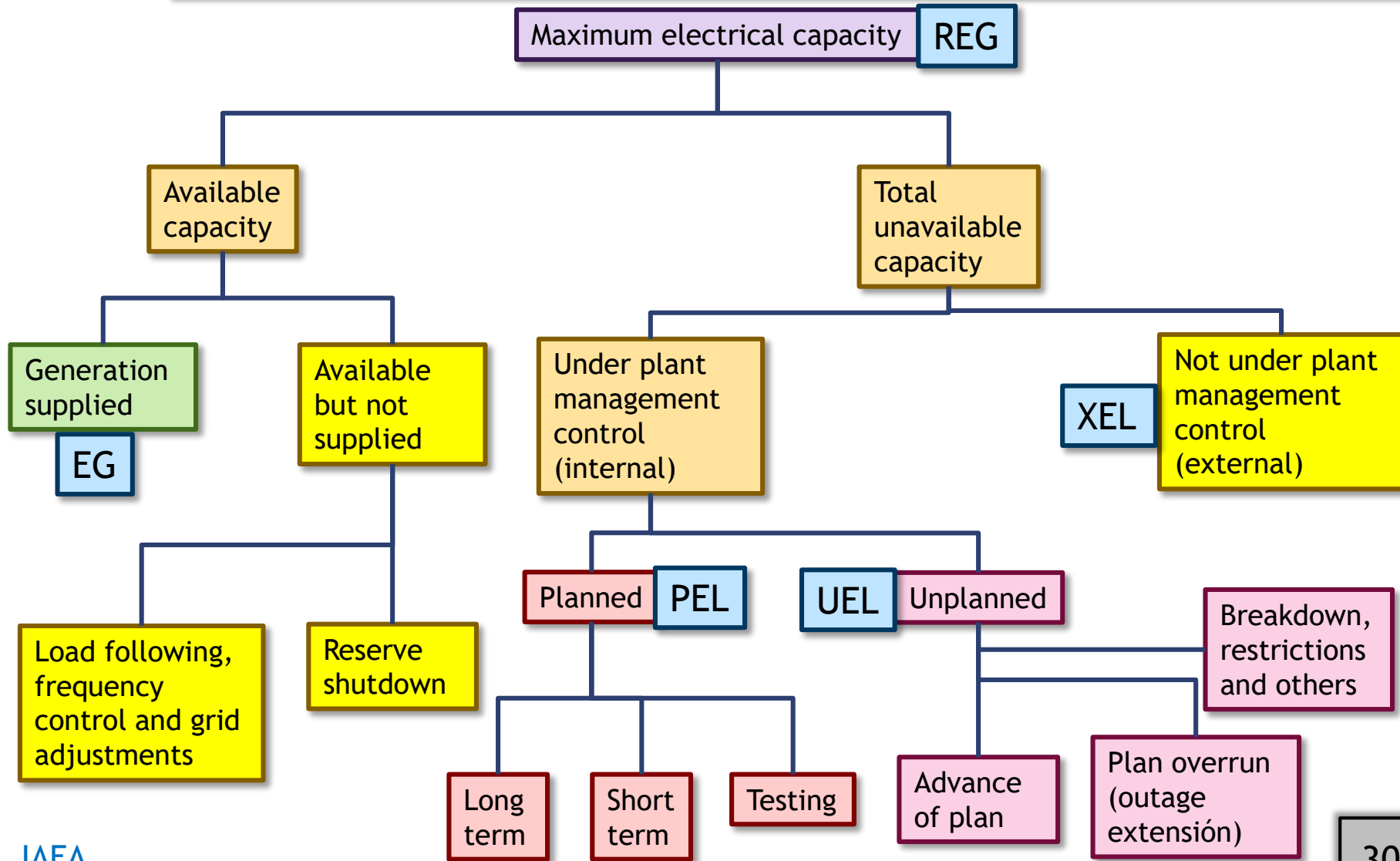
# Costes de operación para el medio ambiente y otras externalidades



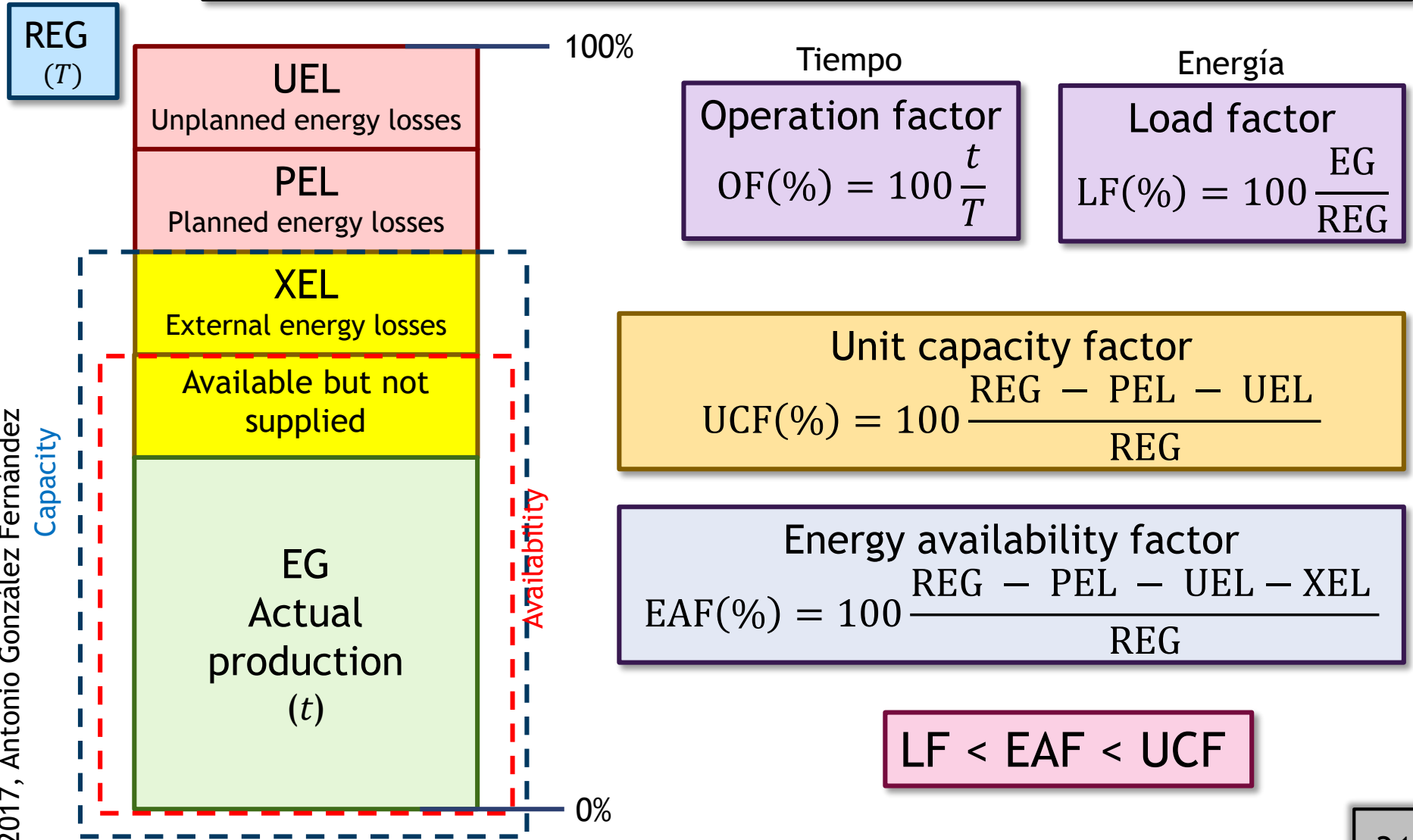
# La mortalidad de las diferentes fuentes de energía

Energy Source	Mortality Rate (deaths/trillionkWhr)
Coal – global average	100000 (50% global electricity)
Coal – China	170000 (75% China's electricity)
Coal – U.S.	10000 (44% U.S. electricity)
Oil	36000 (36% of energy, 8% of electricity)
Natural Gas	4000 (20% global electricity)
Biofuel/Biomass	24000 (21% global energy)
Solar (rooftop)	440 (< 1% global electricity)
Wind	150 (~ 1% global electricity)
Hydro – global average	1400 (15% global electricity)
Hydro – U.S.	0.01 (7% U.S. electricity)
Nuclear – global average	90 (17% global electricity w/Chern&Fukush)
Nuclear – U.S.	0.01 (19% U.S. electricity)

# Disponibilidad y capacidad de una central eléctrica



# Disponibilidad y capacidad de una central nuclear



# La capacidad de las centrales nucleares en España (2016)

Reactor	Tipo	Suministro (GWh)	Potencia Nominal (MW)	Tiempo anual (h)	OF (%)	EAF (%)		LF (%)	
						Anual	Acumulado	Anual	Acumulado
Almaraz I	PWR	7447.79	1011	7622	86.8	84.1	85.7	83.9	85.8
Almaraz II	PWR	7726.48	1006	7827	89.1	87.9	87.0	87.4	87.2
Ascó I	PWR	8439.8	995	8560	97.4	95.9	85.0	96.6	84.3
Ascó II	PWR	7646.24	997	7852	89.4	87.1	87.0	87.3	86.1
Cofrentes	BWR	9187.25	1064	8784	100	98.3	87.2	98.3	87.2
Trillo I	PWR	8004.55	1003	8111	92.3	91.4	87.0	90.8	86.6
Vandellós II	PWR	7650.33	1045	7568	86.2	83.9	82.2	83.3	82.2



# Comparación de varias capacidades

## Central nuclear de Palo Verde (USA).

Capacidad nominal: 3942MW. Producción en 2010: 31.2TWh  
3120000MWh

$$\frac{3120000\text{MWh}}{365\text{d} \times (24\text{h/d}) \times 3942\text{MW}} = 0.904\% = 90.4\%$$

## Parque eólico Horns Rev 2 (Dinamarca).

Capacidad nominal: 209.3MW. Producción media anual: 875GWh  
875000MWh

$$\frac{875000\text{MWh}}{365\text{d} \times (24\text{h/d}) \times 209.3\text{MW}} = 0.477\% = 47.7\%$$

## Parque solar Agua Caliente (USA).

Capacidad nominal: 290MW. Producción media anual: 740GWh  
740000MWh

$$\frac{740000\text{MWh}}{365\text{d} \times (24\text{h/d}) \times 290\text{MW}} = 0.291\% = 29.1\%$$

# Comparación entre diferentes tipos de centrales

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