

TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE EN MERCADOS ELÉCTRICOS

CLASE 1: “INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”

JUAN MIGUEL MORALES
SALVADOR PINEDA

 **DTU Electrical Engineering**
Department of Electrical Engineering



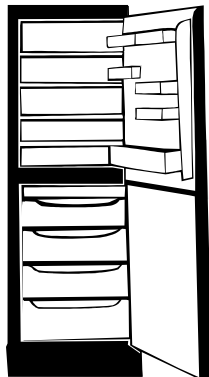
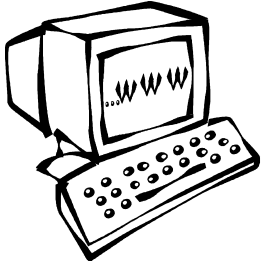
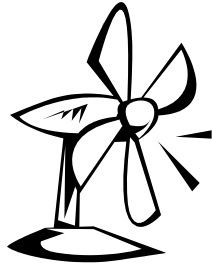
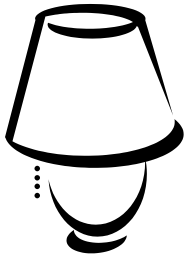
CONTENIDOS

1. Introducción
2. Consumo
3. Producción
4. Transporte, control y protección
5. Flujo de cargas
6. Impacto de la incertidumbre

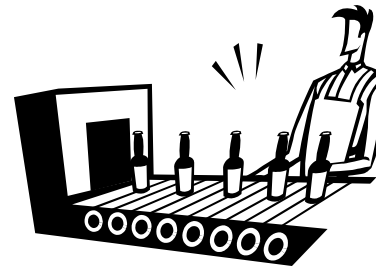
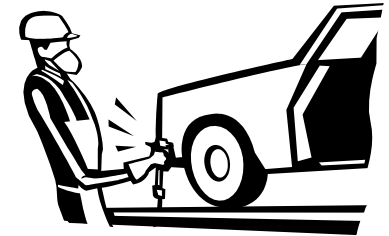
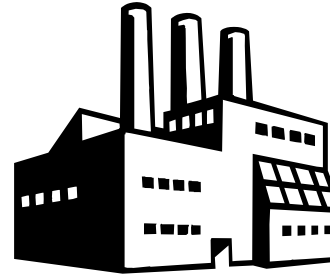
INTRODUCCIÓN

- Importancia de electricidad:
 - versatilidad, inmediatez y limpieza

Uso doméstico

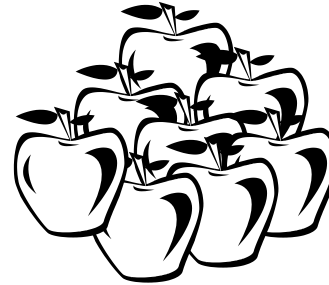
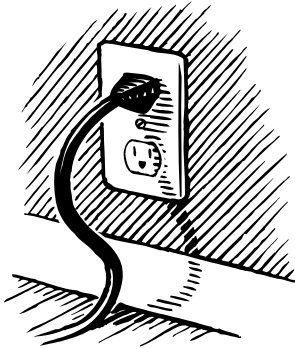


Uso industrial



INTRODUCCIÓN

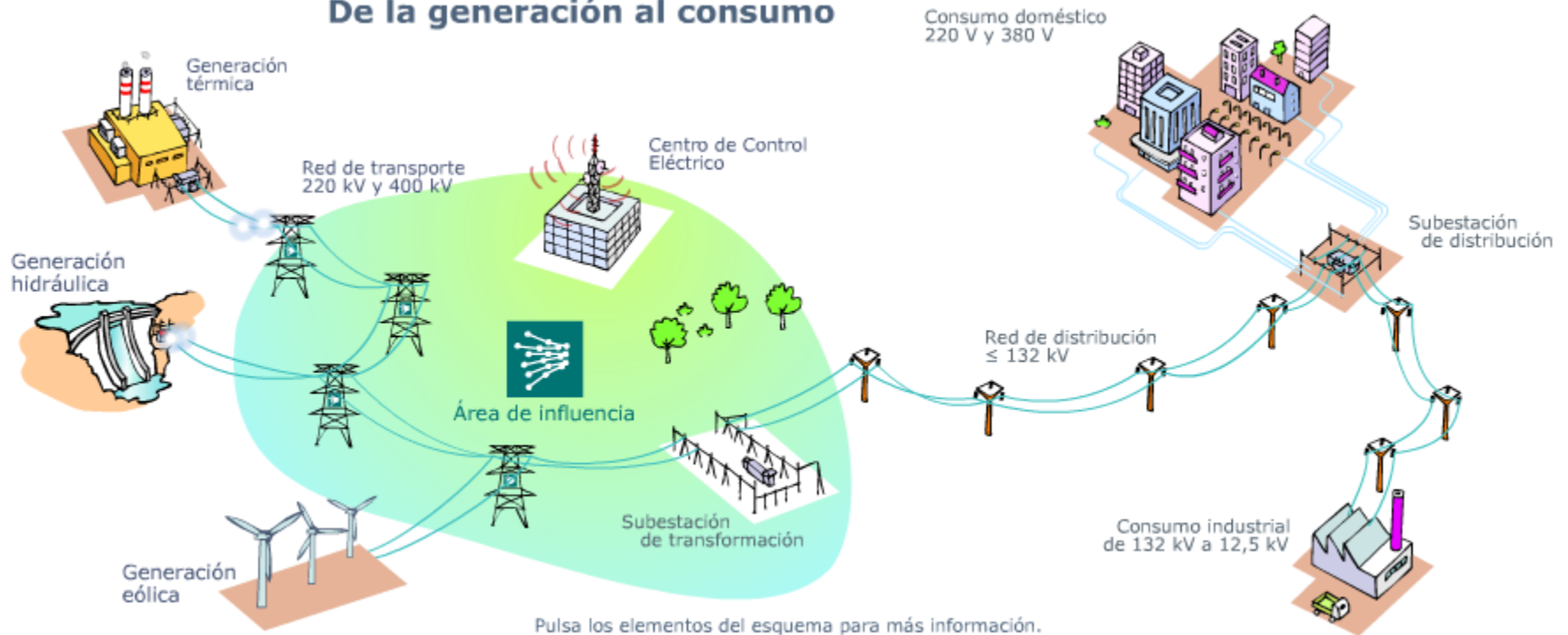
- Producto electricidad



- ✓ No es almacenable
- ✓ No se puede dirigir a través de caminos específicos
- ✓ Demanda no elástica

INTRODUCCIÓN

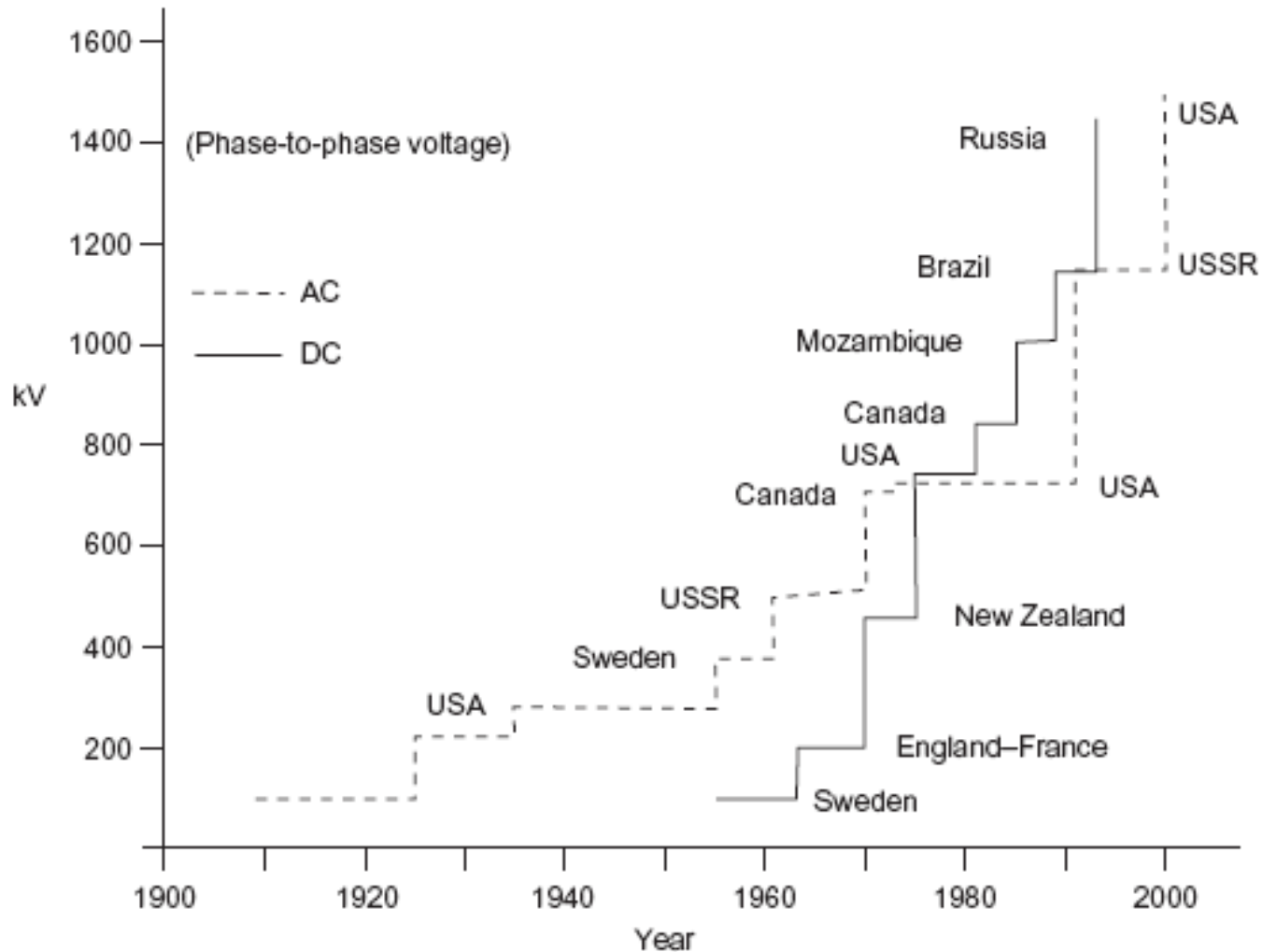
De la generación al consumo



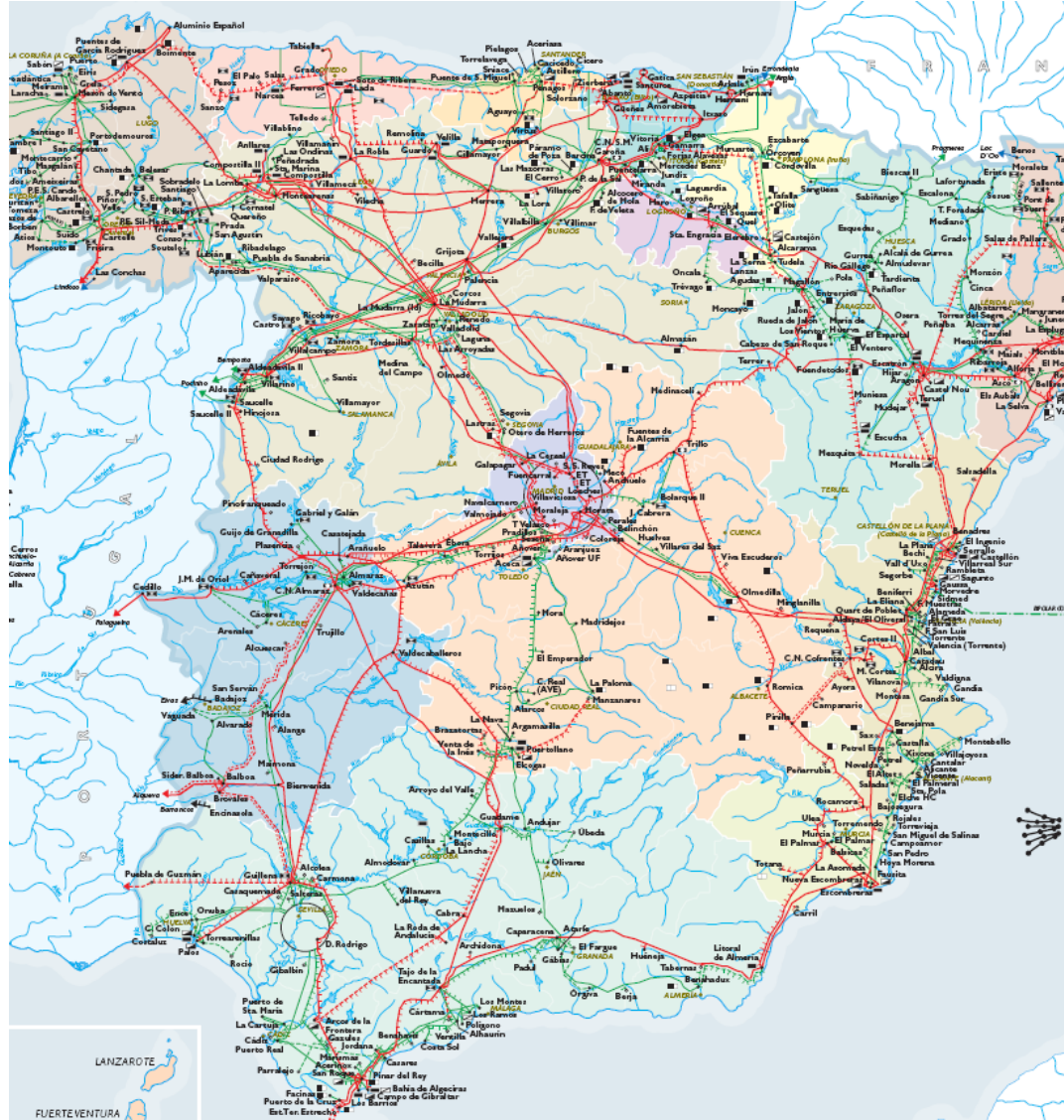
INTRODUCCIÓN

- 1870, primeros sistemas luz eléctrica (lámpara de arco)
- 1882, primer generador de Edison que alimentaba 400 lámparas (Manhattan, NY)
- 1884, invención del transformador en Francia
- 1891, primer transporte de corriente trifásica en Alemania.
- IEEE acordó fijar 24 agosto 1891 como el comienzo de la utilización industrial de la corriente alterna y de su transporte
- Incremento de la tensión de transporte
- Interconexión de sistemas eléctricos entre sí

INTRODUCCIÓN

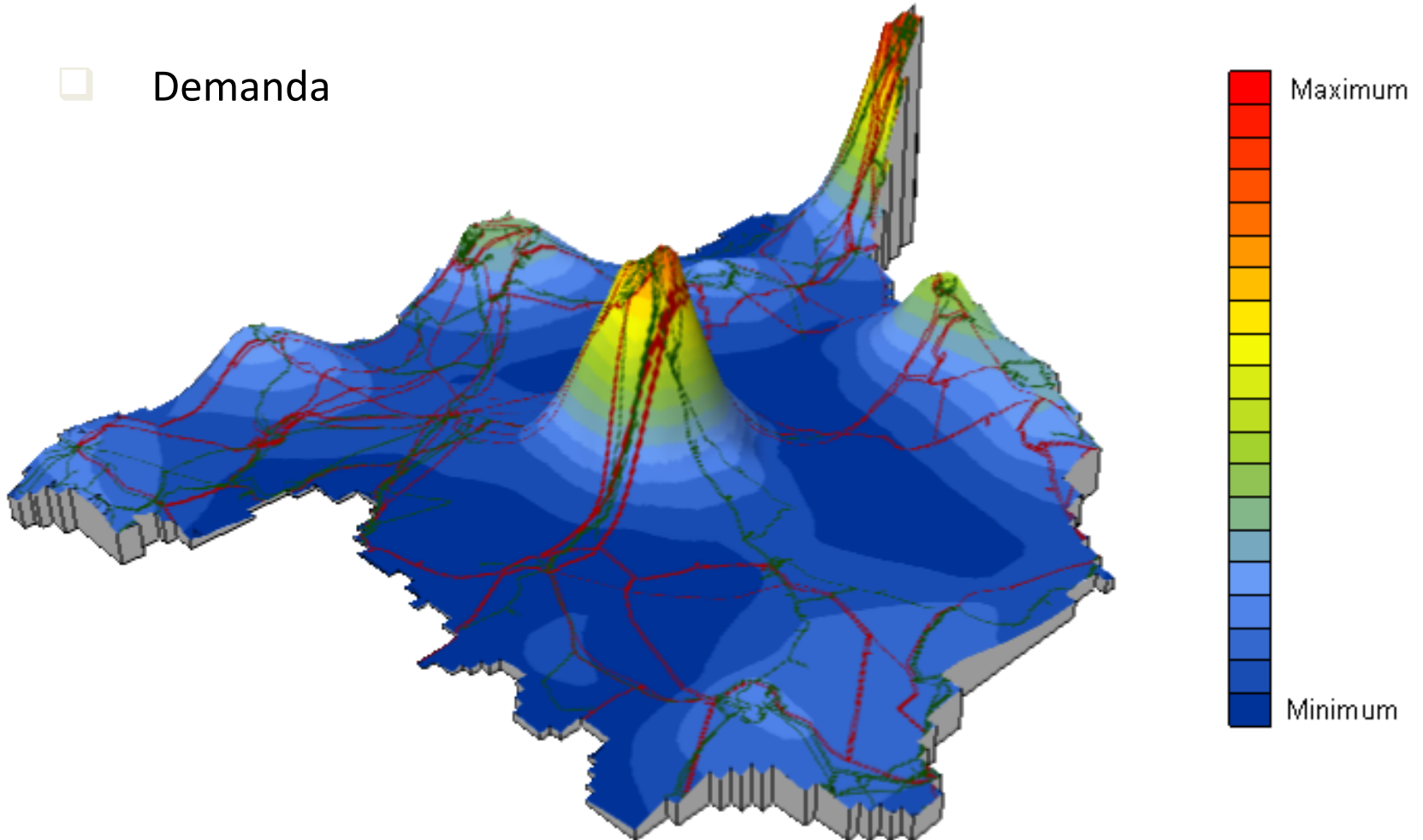


INTRODUCCIÓN

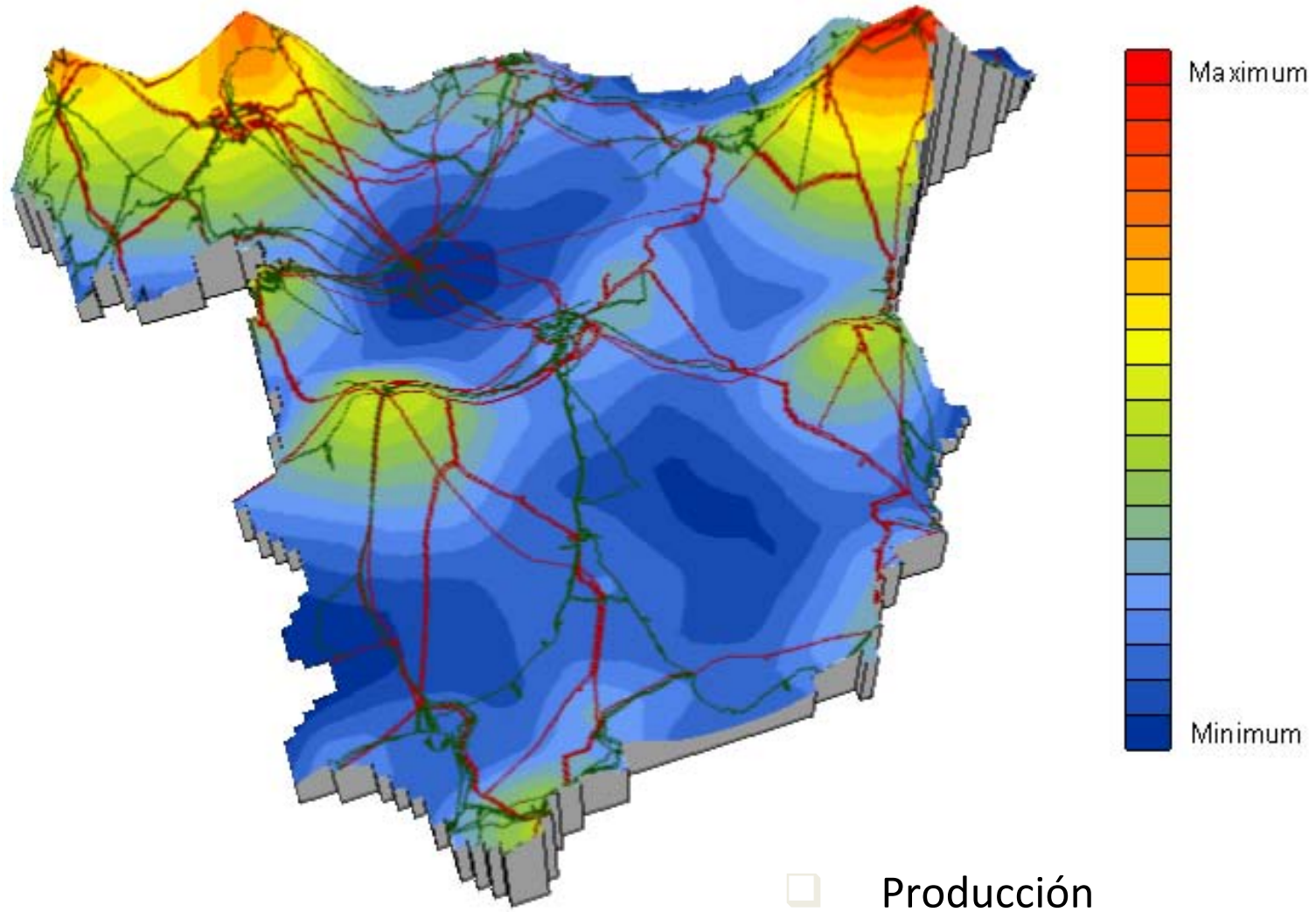


INTRODUCCIÓN

 Demanda

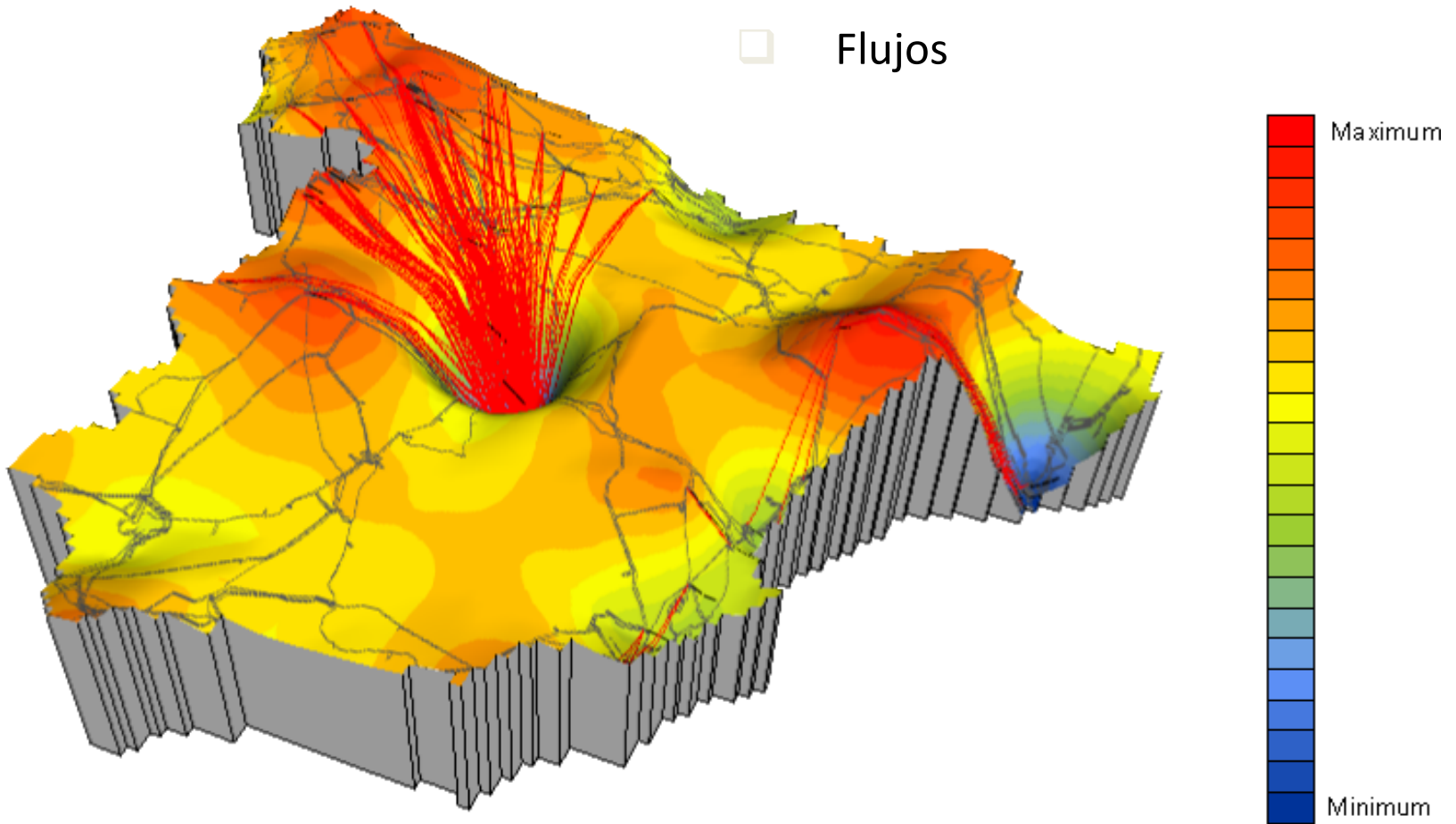


INTRODUCCIÓN

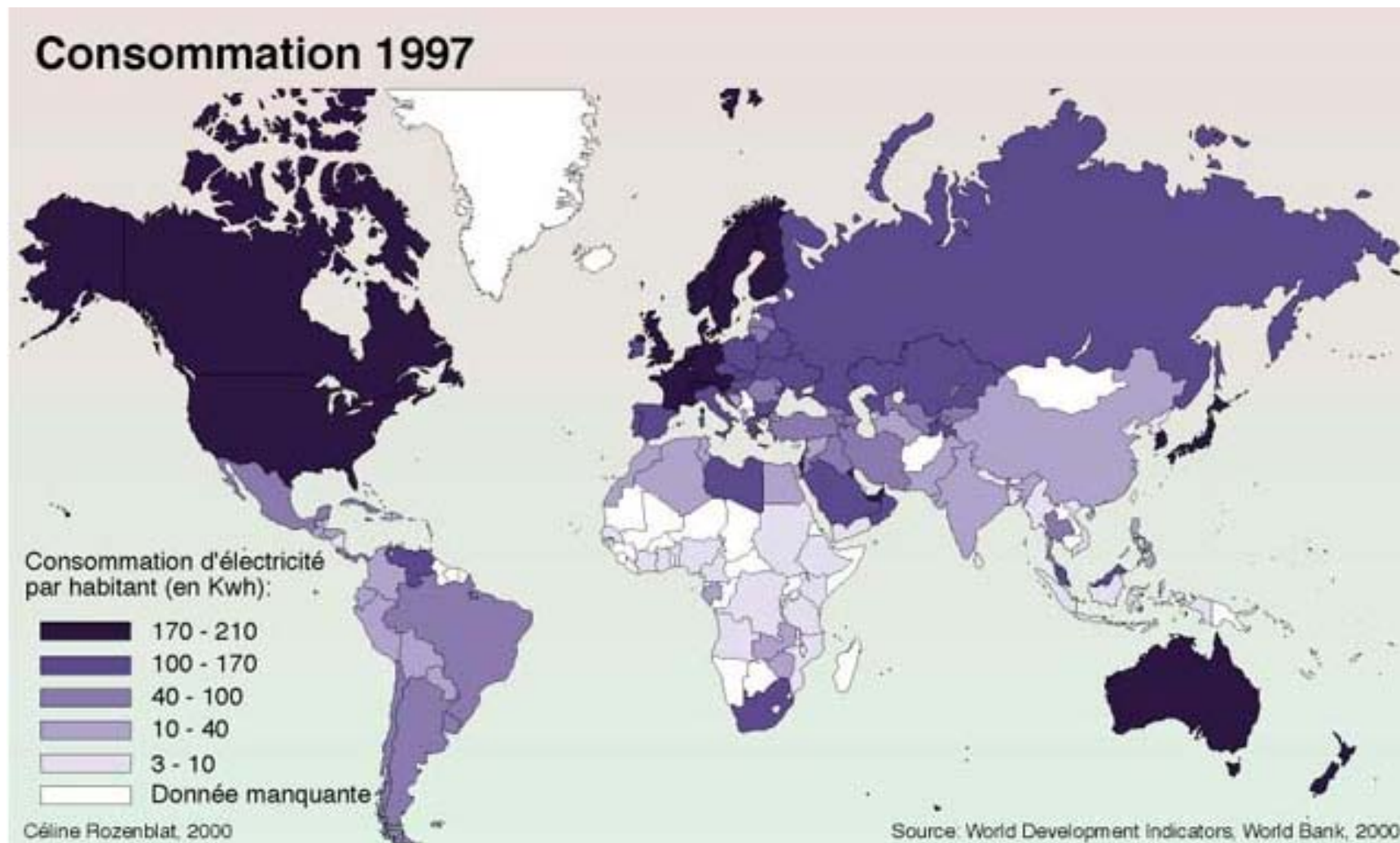


INTRODUCCIÓN

☐ Flujos

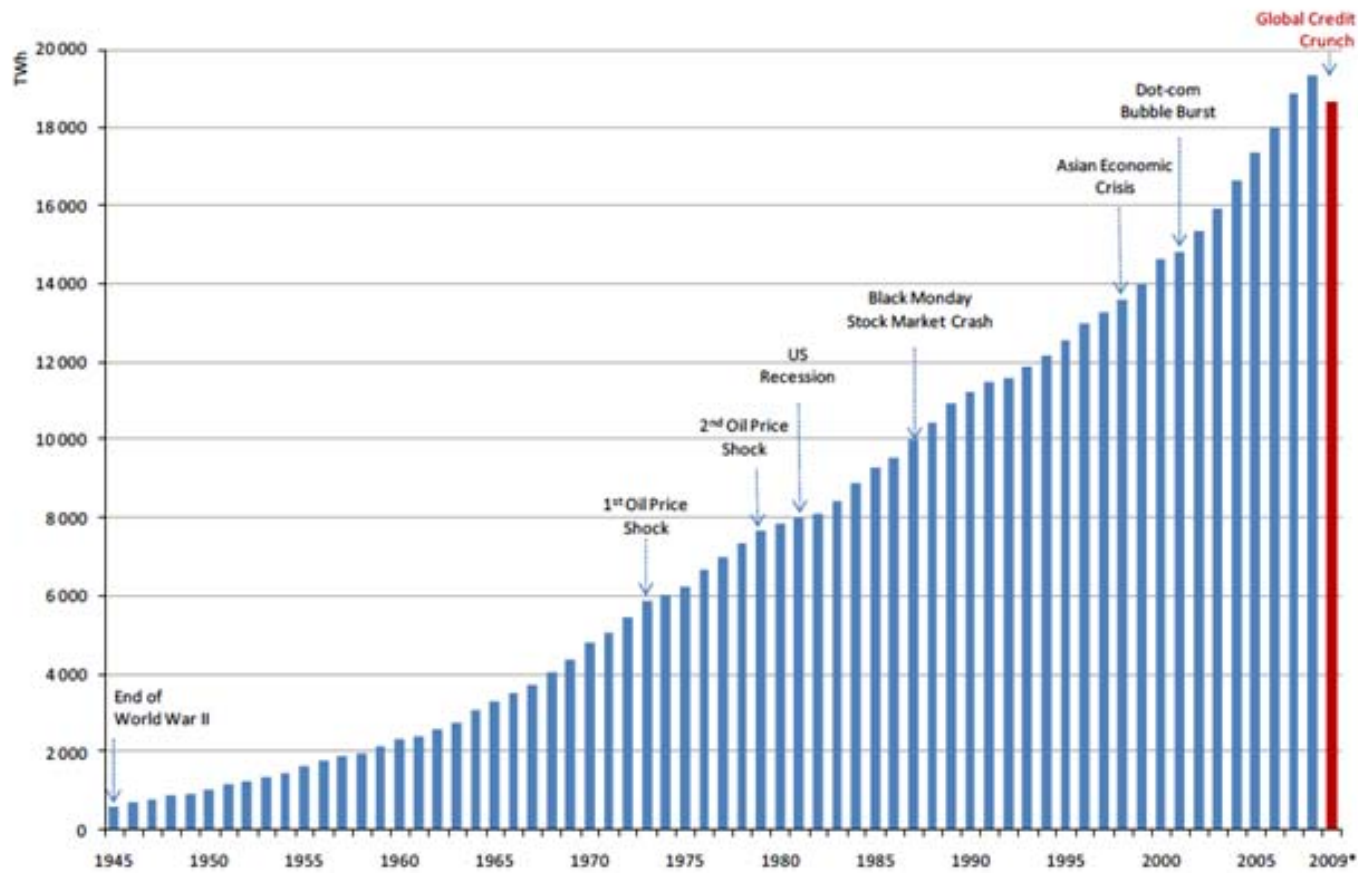


CONSUMO



CONSUMO

Figure 10: Historical world electricity consumption

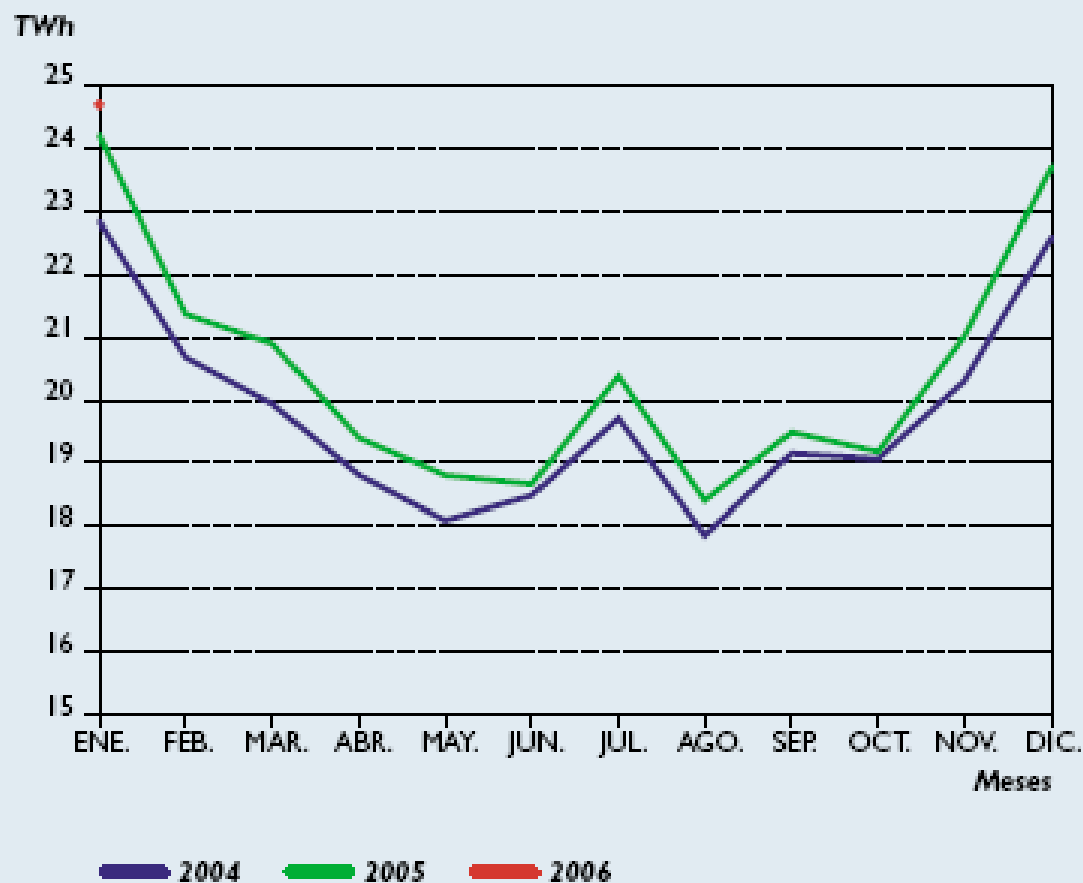


* IEA estimate

Source: IEA databases and analysis.

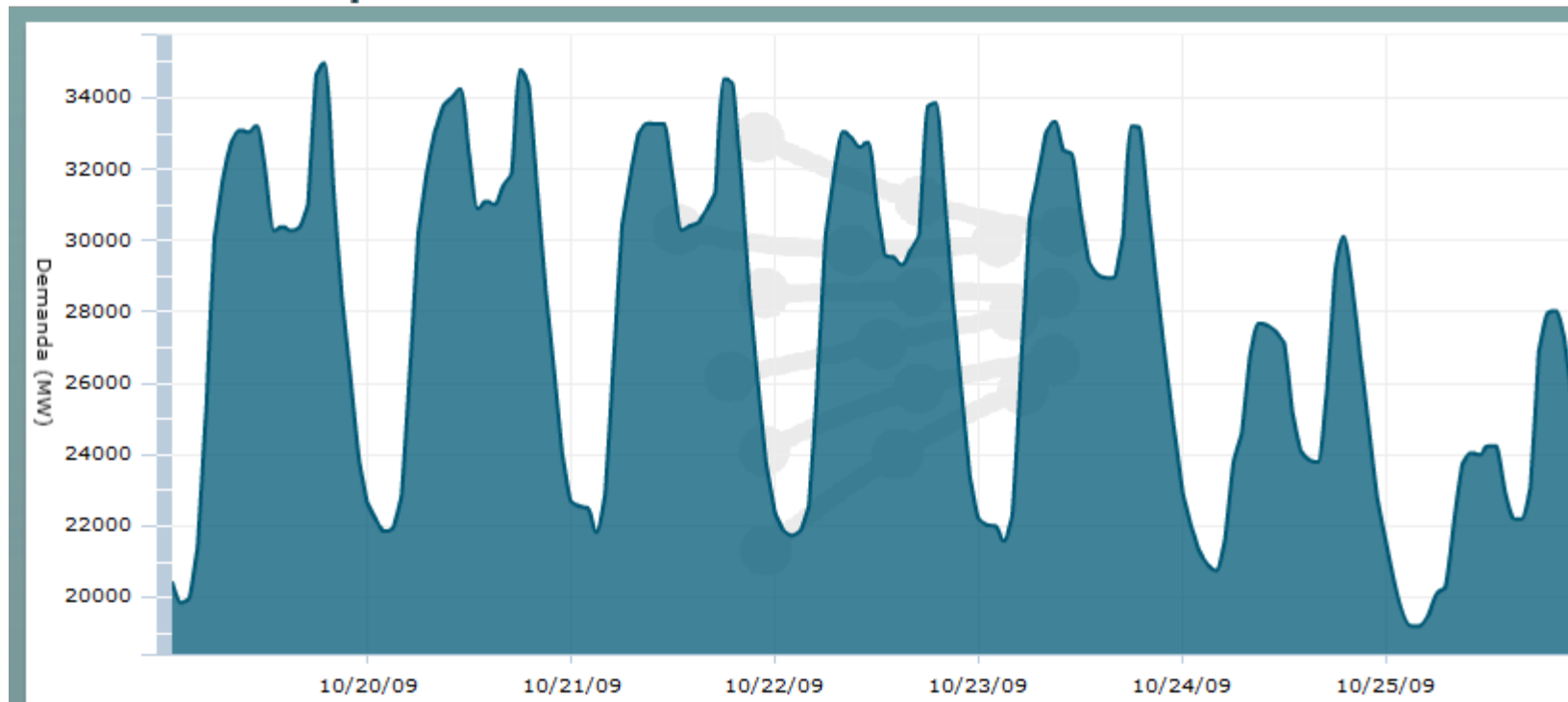
CONSUMO

DEMANDA CORREGIDA LABORALIDAD Y TEMPERATURA (I)



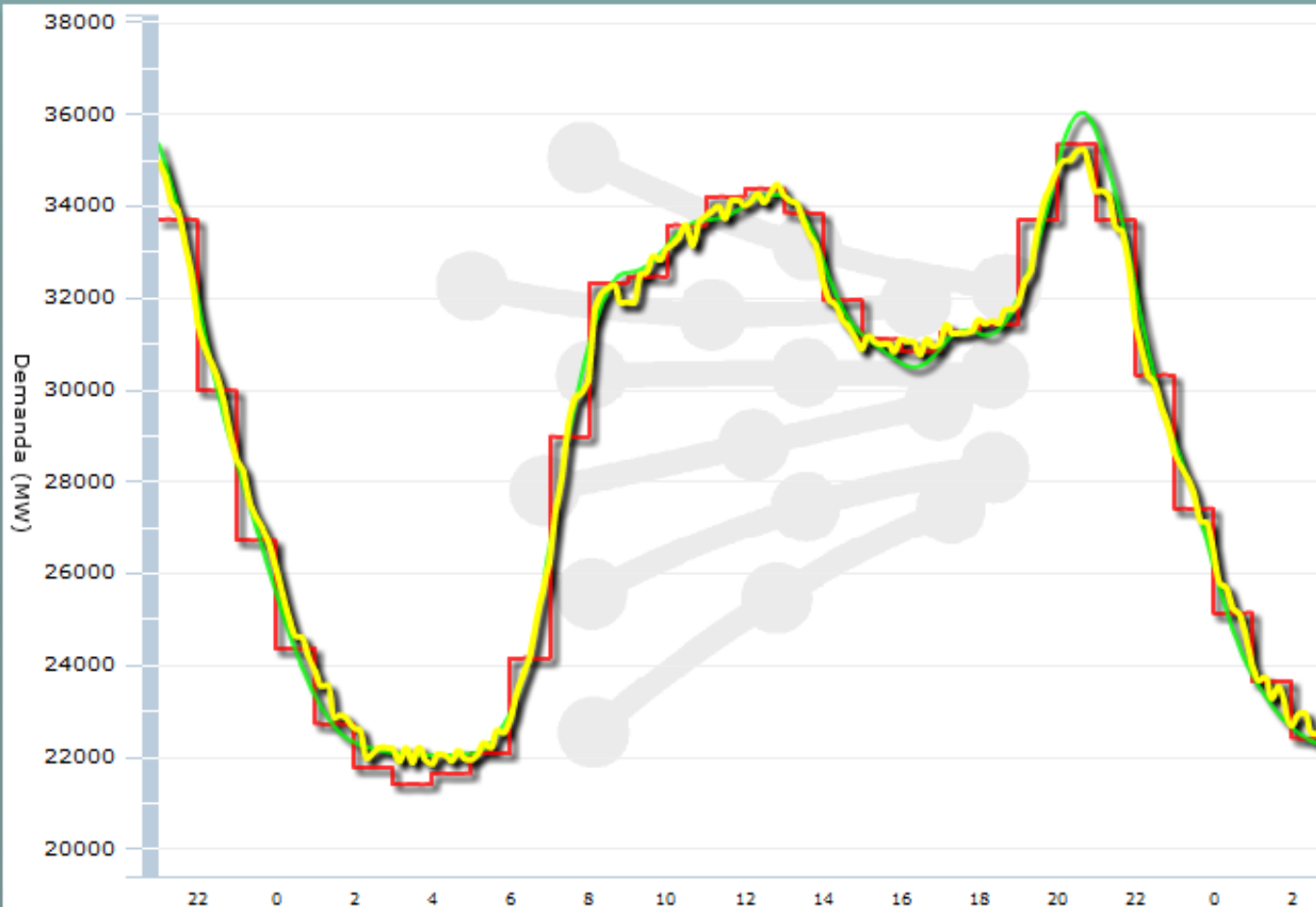
CONSUMO

Demanda de electricidad por intervalos



CONSUMO

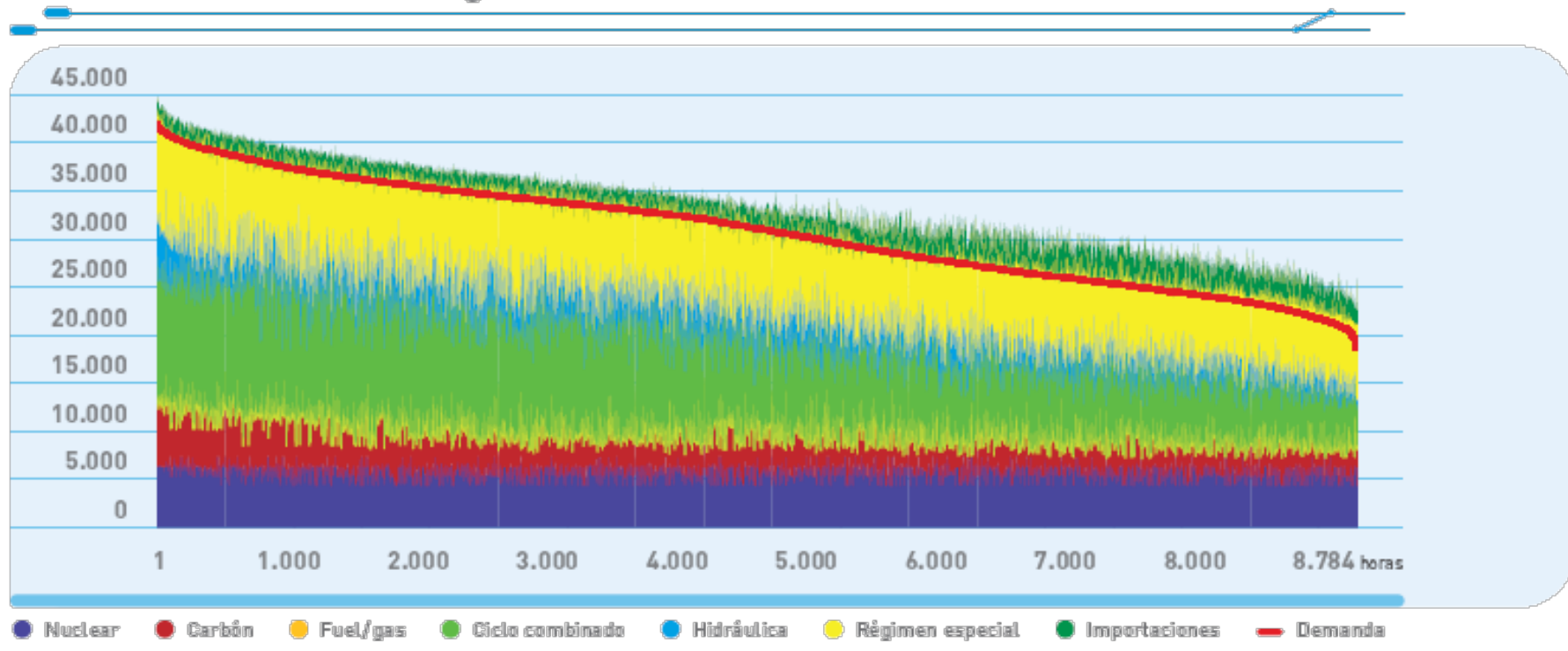
Demanda de energía eléctrica en tiempo real, estructura de generación y emisiones de CO2



20 Octubre 2009

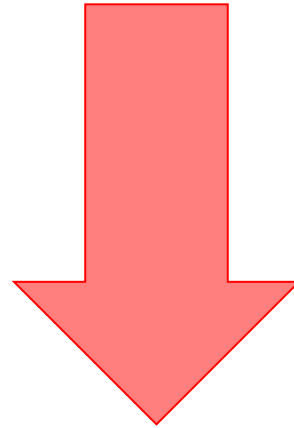
CONSUMO

Curva monótona de carga [MW]



PRODUCCIÓN

Fuente primaria de energía



Centrales
eléctrica

Energía eléctrica

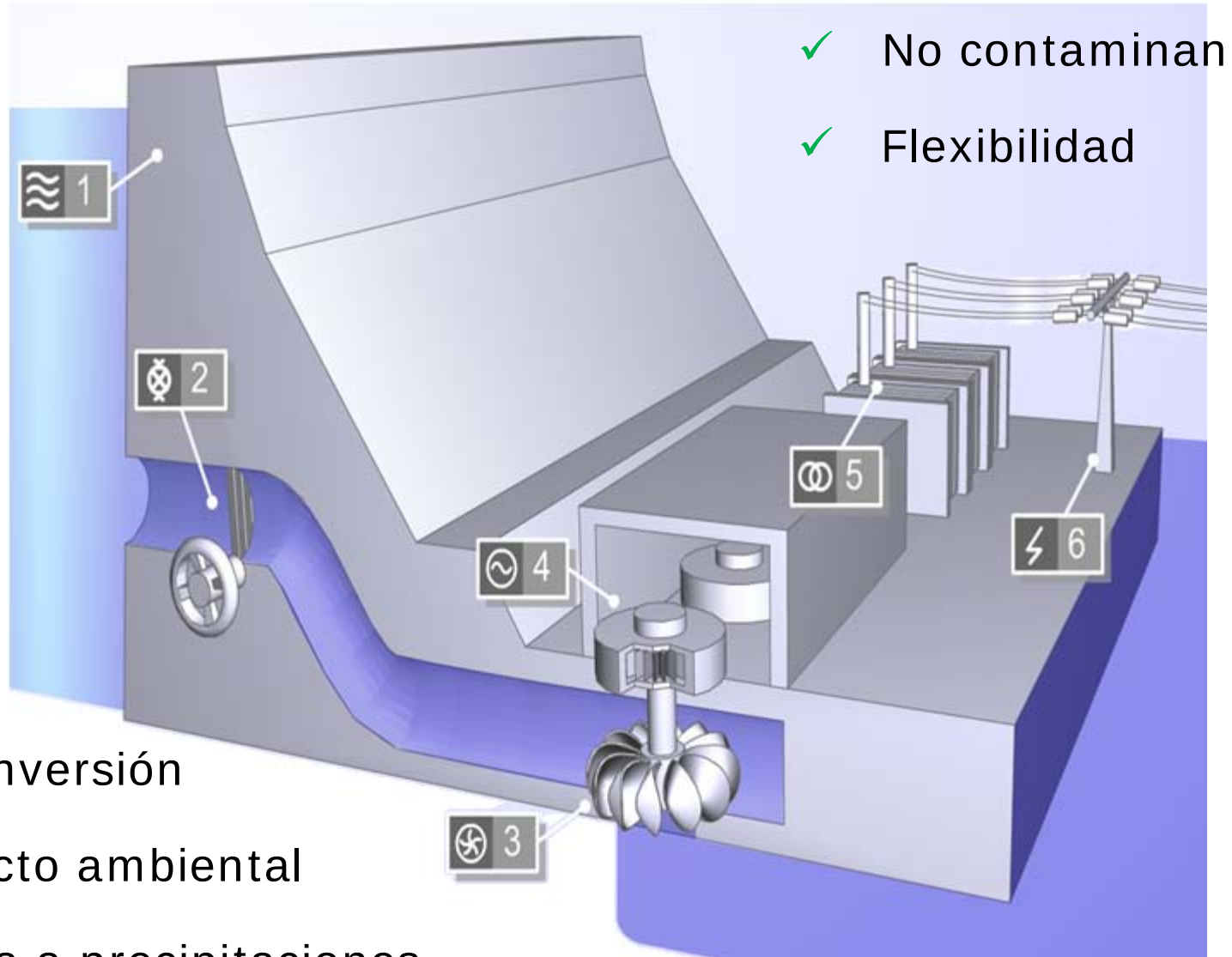
☐ Centrales convencionales:

- ✓ Centrales hidráulicas
- ✓ Centrales térmicas
- ✓ Centrales nucleares

☐ Centrales alternativas:

- ✓ Centrales eólicas
- ✓ Centrales fotovoltaicas
- ✓ Biomasa
- ✓ Cogeneración

PRODUCCIÓN



PRODUCCIÓN

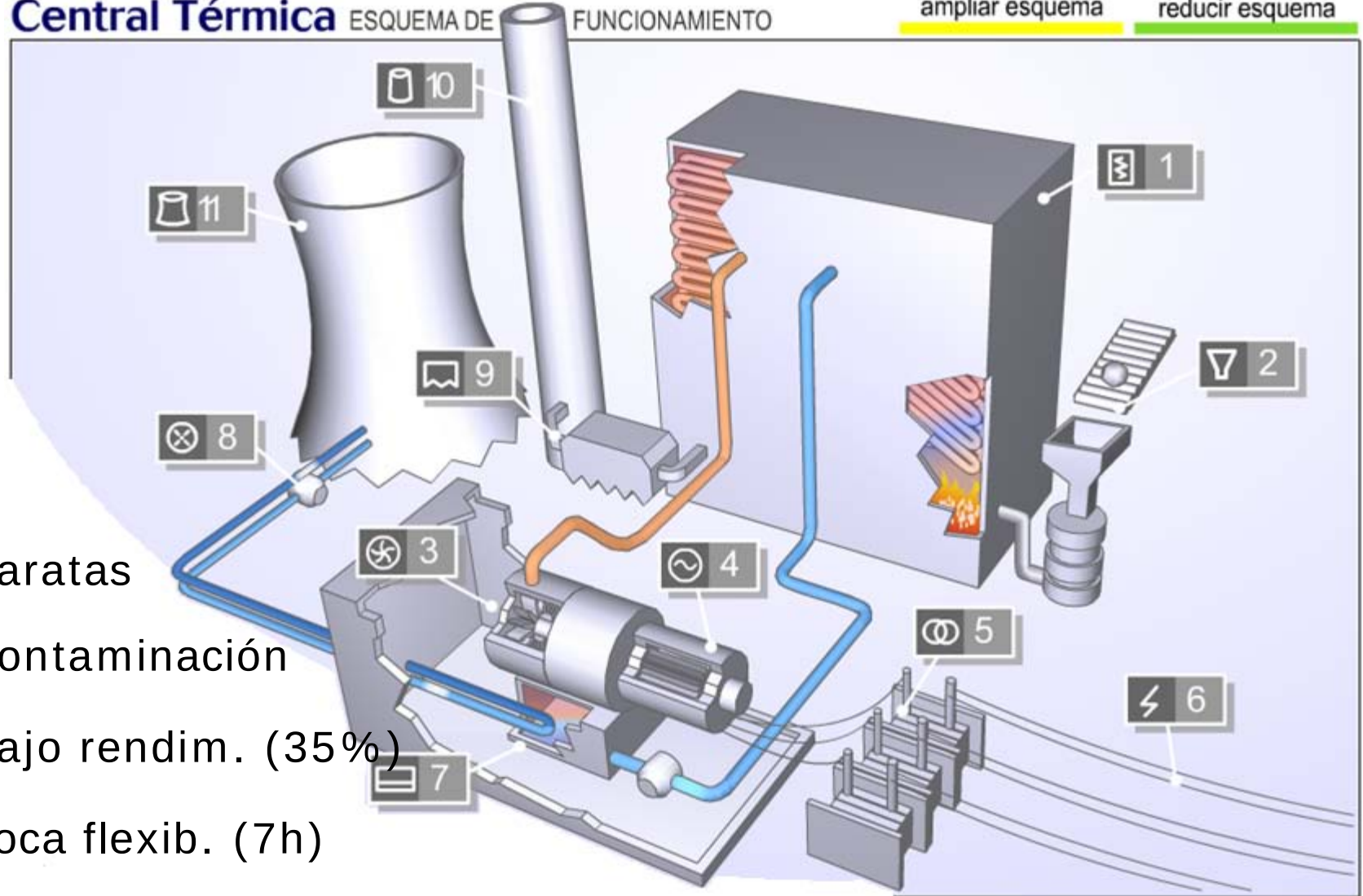
Central Térmica

ESQUEMA DE

FUNCIONAMIENTO

ampliar esquema

reducir esquema

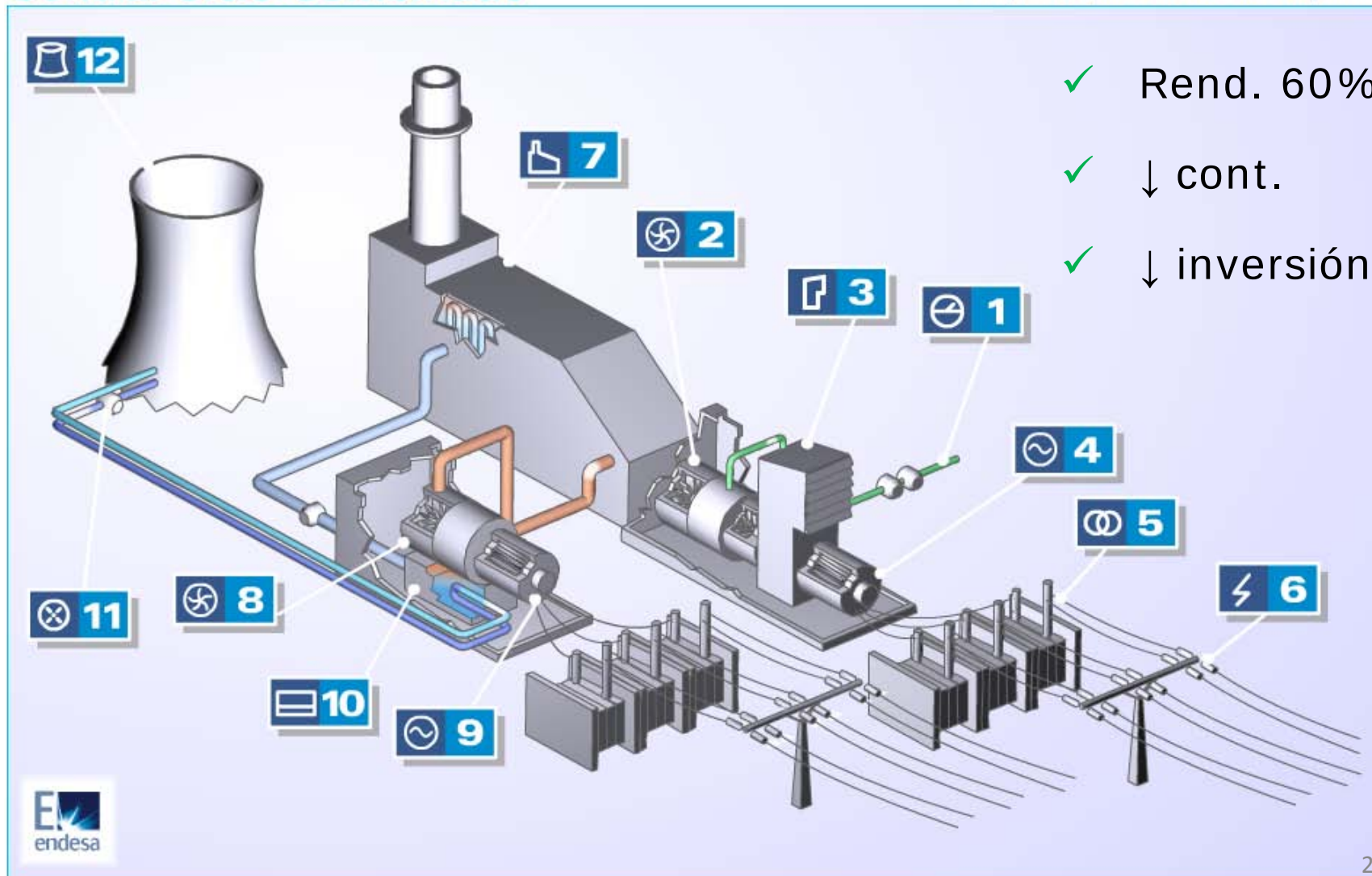


- ✓ Baratas
- ✗ Contaminación
- ✗ Bajo rendim. (35%)
- ✗ Poca flexib. (7h)
- ✗ Variabilidad precio combustible

PRODUCCIÓN

Central Ciclo Combinado

► ampliar esquema ► reducir esquema

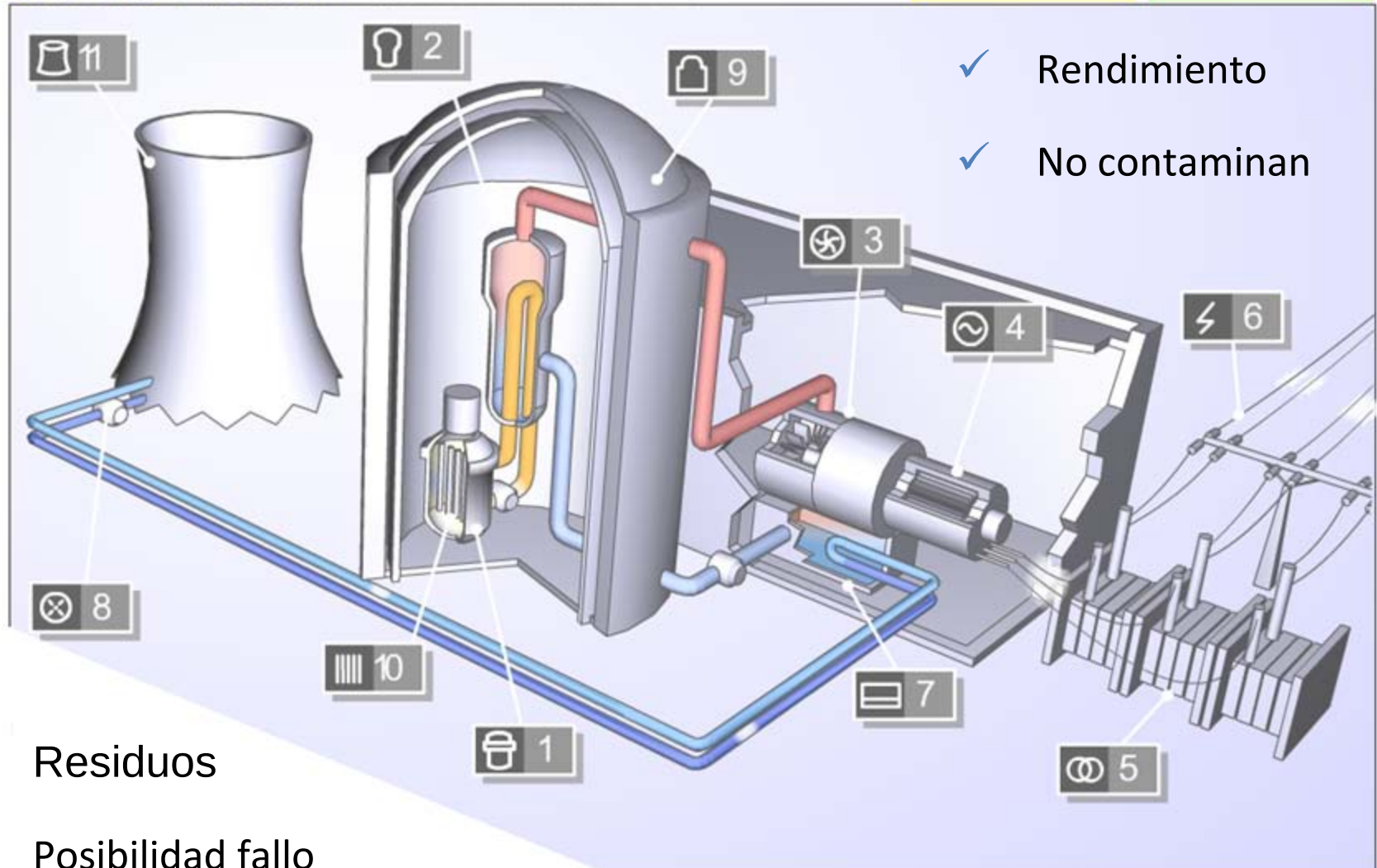


PRODUCCIÓN

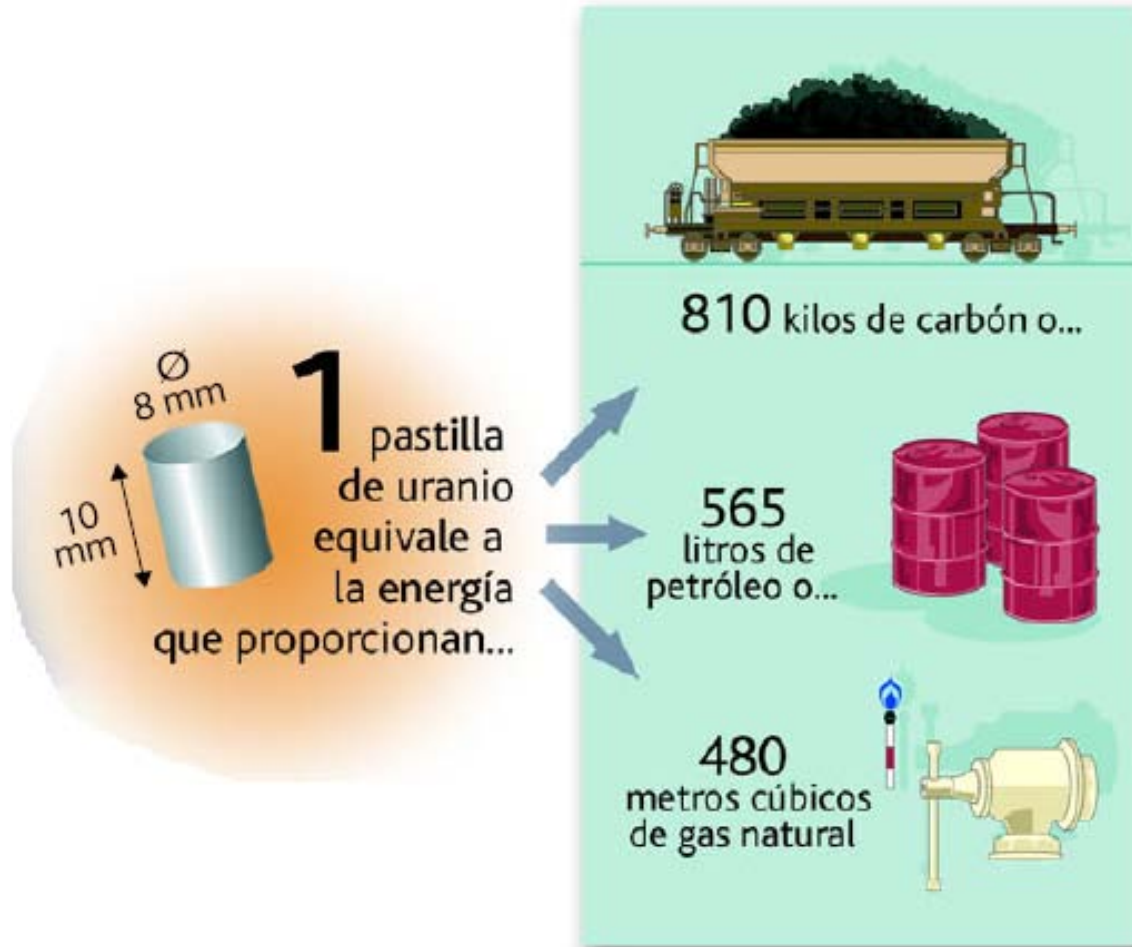
Central Nuclear ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

ampliar esquema

reducir esquema



PRODUCCIÓN



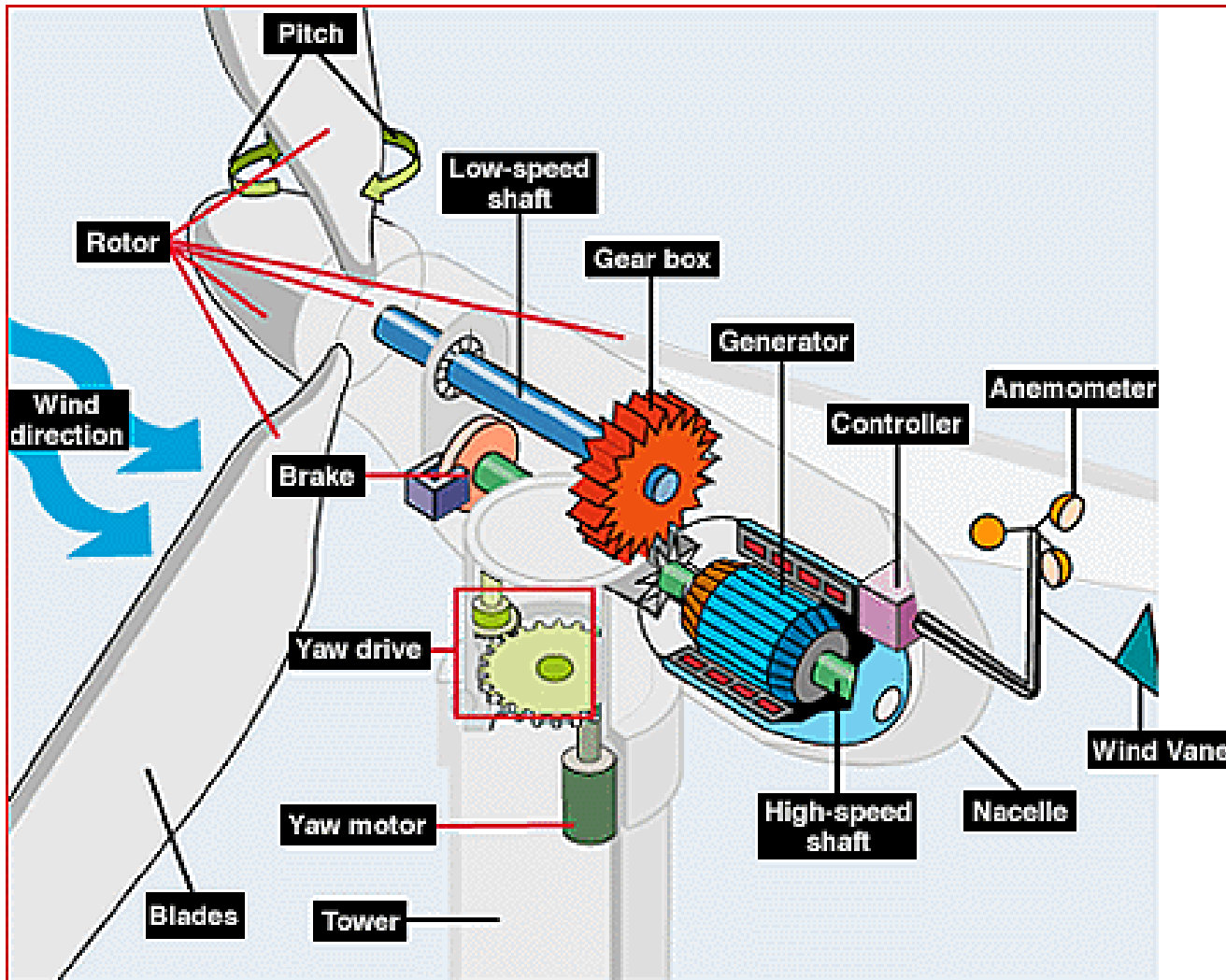
☐ Centrales convencionales:

- ✓ Centrales hidráulicas
- ✓ Centrales térmicas
- ✓ Centrales nucleares

☐ Centrales alternativas:

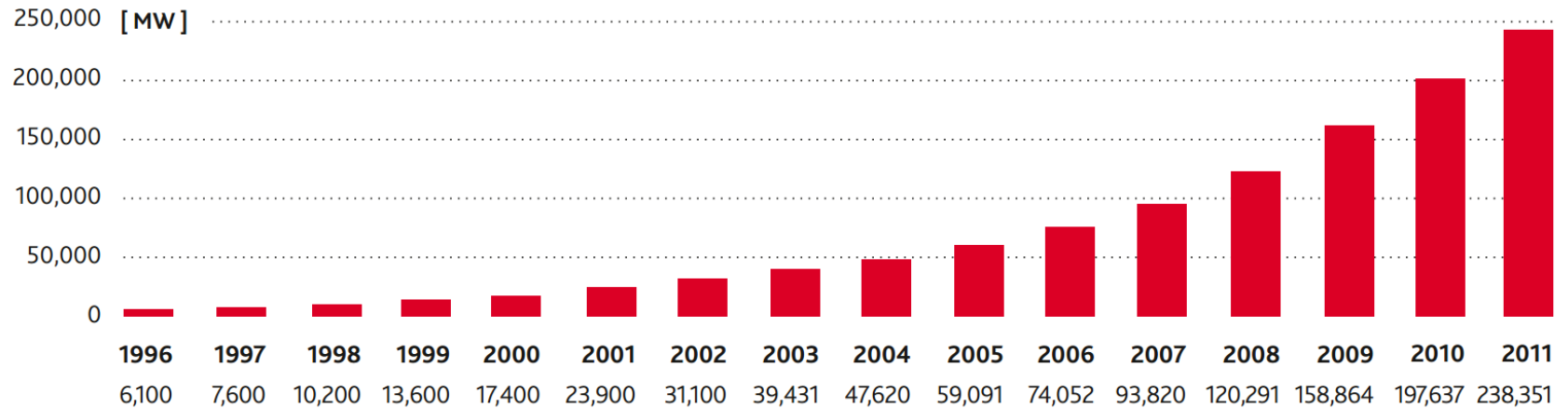
- ✓ Centrales eólicas
- ✓ Centrales fotovoltaicas
- ✓ Biomasa
- ✓ Cogeneración

PRODUCCIÓN



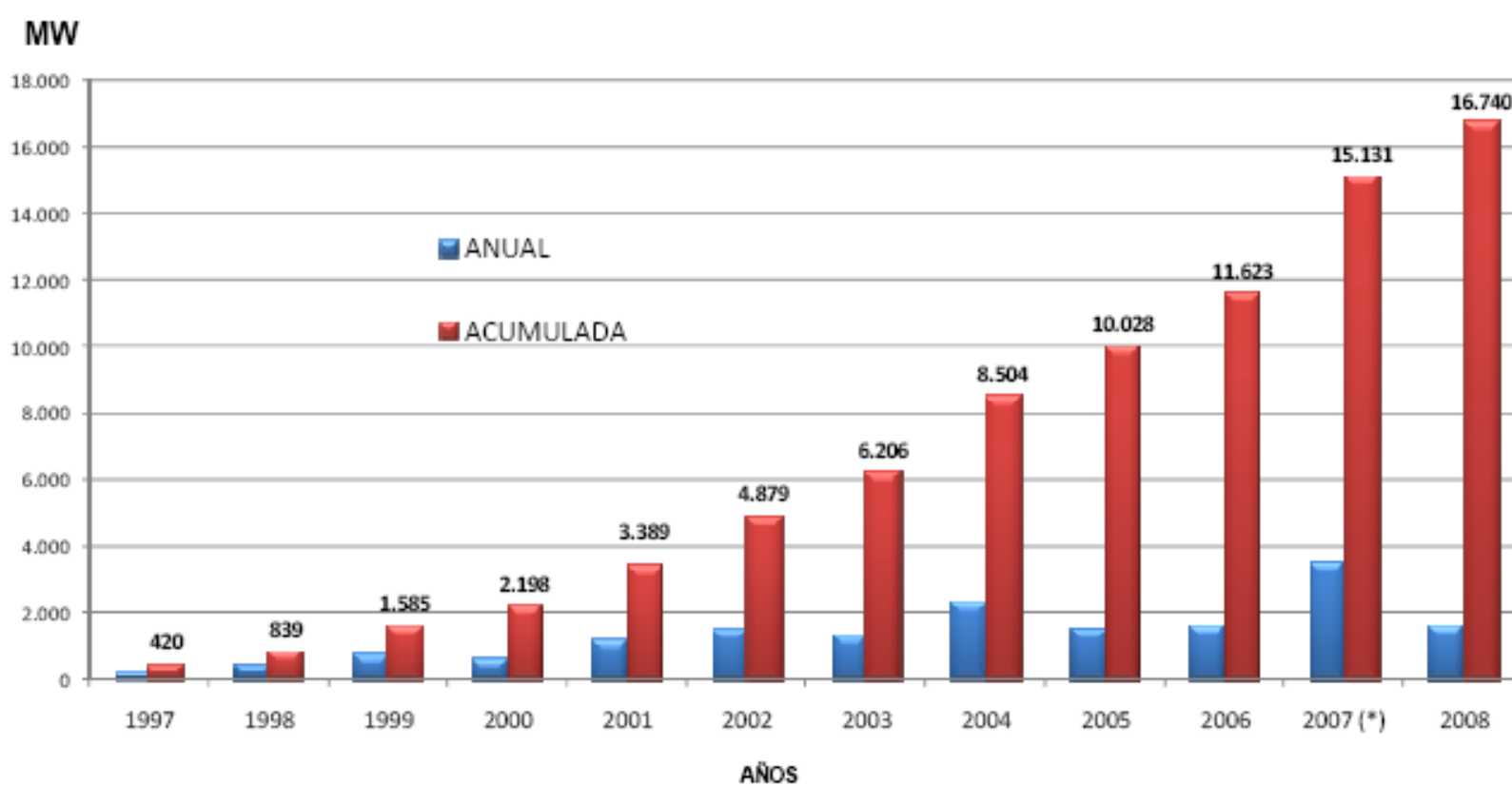
- ✓ Limpia
- ✗ Variable
- ✗ Impacto

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 1996-2011



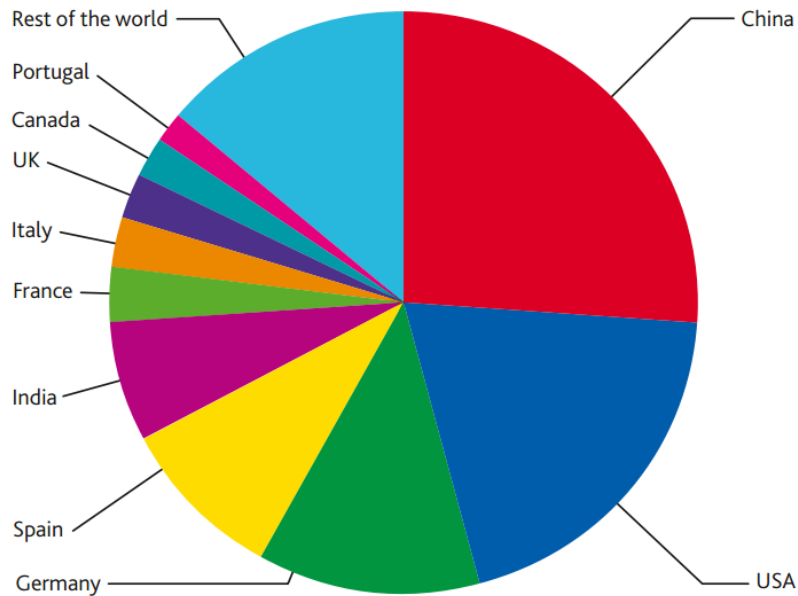
Source: Global Wind Energy Council (2011)

PRODUCCIÓN



Fuente: Observatorio Eólico AEE

TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2011



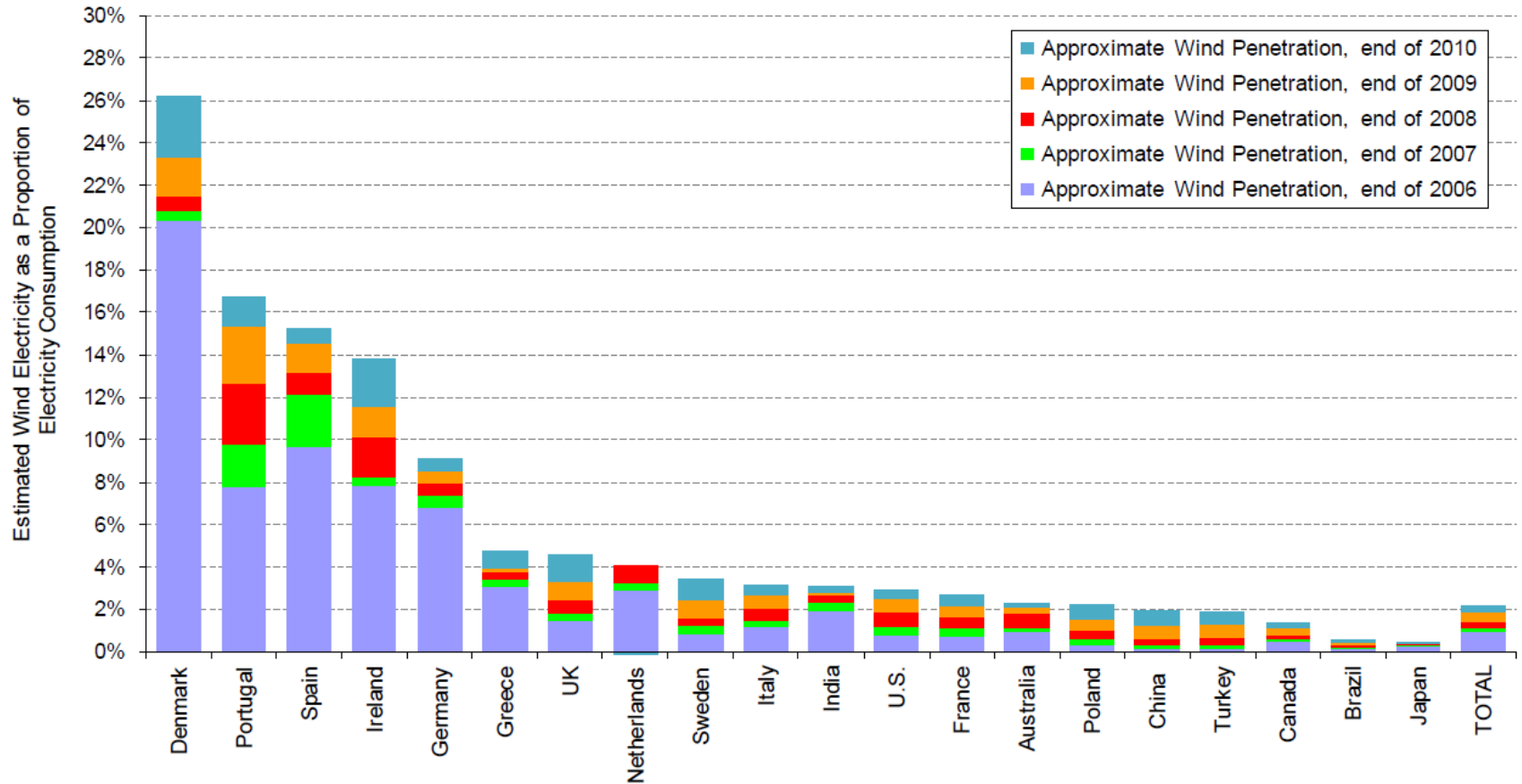
Country	MW	% SHARE
China**	62,733	26.3
USA	46,919	19.7
Germany	29,060	12.2
Spain	21,674	9.1
India	16,084	6.7
France**	6,800	2.9
Italy	6,747	2.8

Source: Global Wind Energy Council (2011)

PRODUCCIÓN

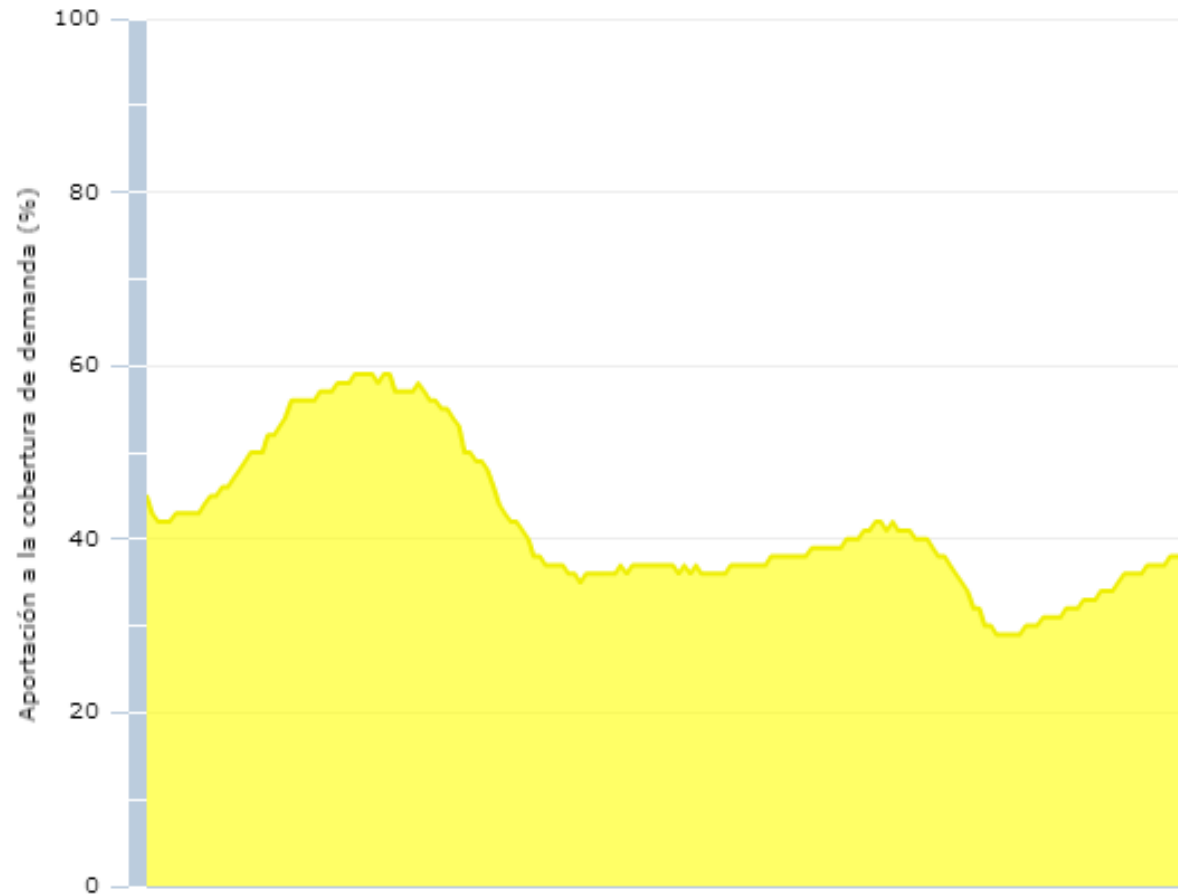
COMUNIDAD AUTÓNOMA	POTENCIA TOTAL A 31/12/2010 (MW)	NUEVA POTENCIA (MW)	TASA DE VARIACIÓN 2010/2009 (%)	Nº TOTAL DE PARQUES
Castilla y León	4.803,82	917,02	23,59%	204
Castilla-La Mancha	3.709,19	6,00	0,16%	121
Galicia	3.289,33	54,80	1,69%	150
Andalucía	2.979,33	139,41	4,91%	130
Aragón	1.764,01	10,20	0,58%	76
Comunidad Valenciana	986,99	0,00	0,00%	30
Navarra	968,37	6,60	0,69%	45
Cataluña	851,41	326,87	62,32%	33
La Rioja	446,62	0,00	0,00%	14
Asturias	355,95	0,00	0,00%	15
País Vasco	153,25	0,00	0,00%	7
Murcia	189,91	37,60	24,69%	11
Canarias	138,92	0,00	0,00%	47
Cantabria	35,30	17,45	97,76%	3
Baleares	3,65	0,00	0,00%	3

PRODUCCIÓN



PRODUCCIÓN

16/04/12

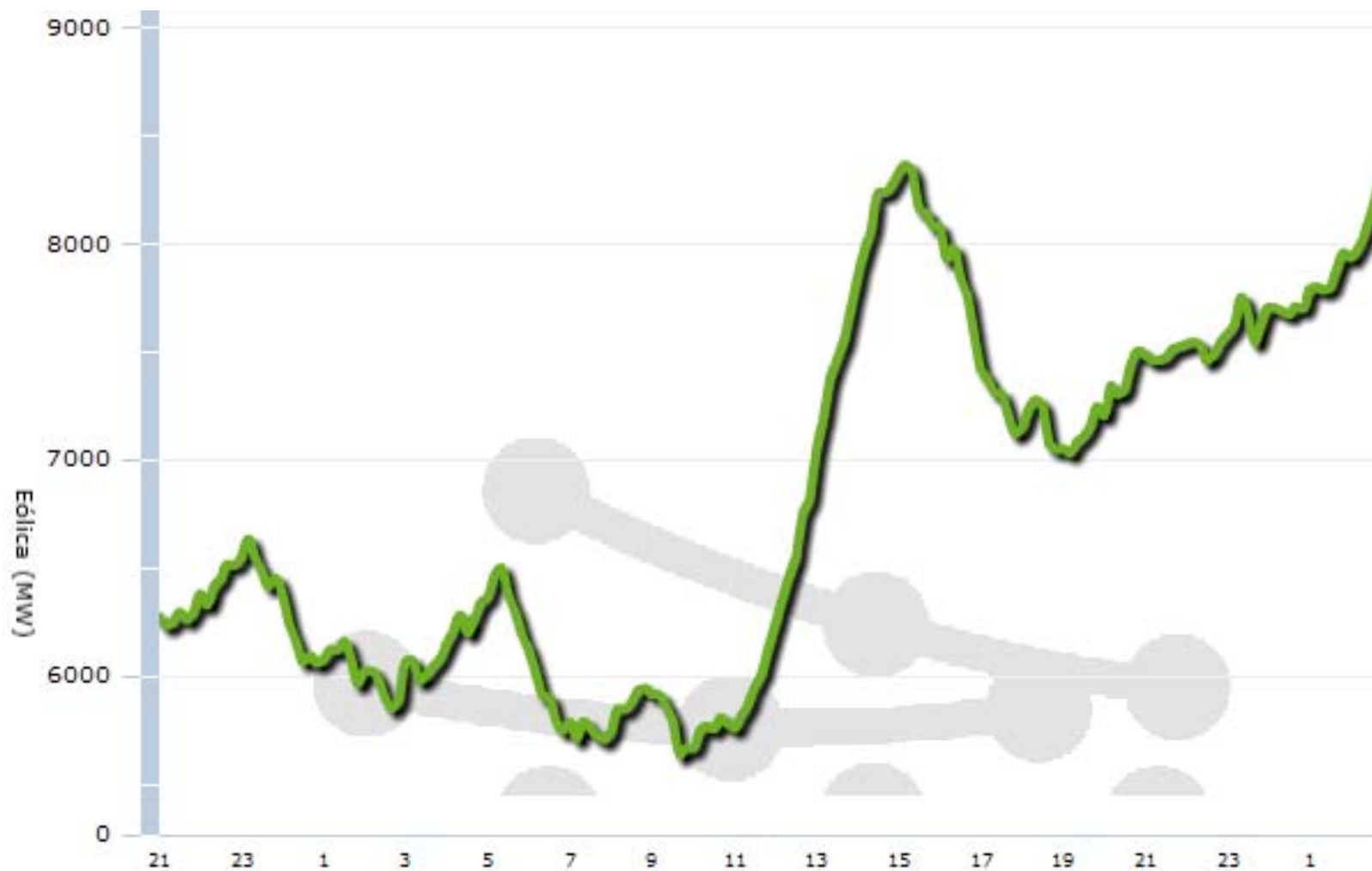


PRODUCCIÓN



22 Enero 2009

PRODUCCIÓN



21 Enero 2009

PRODUCCIÓN



① Cultivo y recolección de madera

② Transporte de madera

③ Almacenamiento y procesamiento de biomasa

④ Almacenamiento de combustible de apoyo

⑤ Caldera

⑥ Recuperación de calor

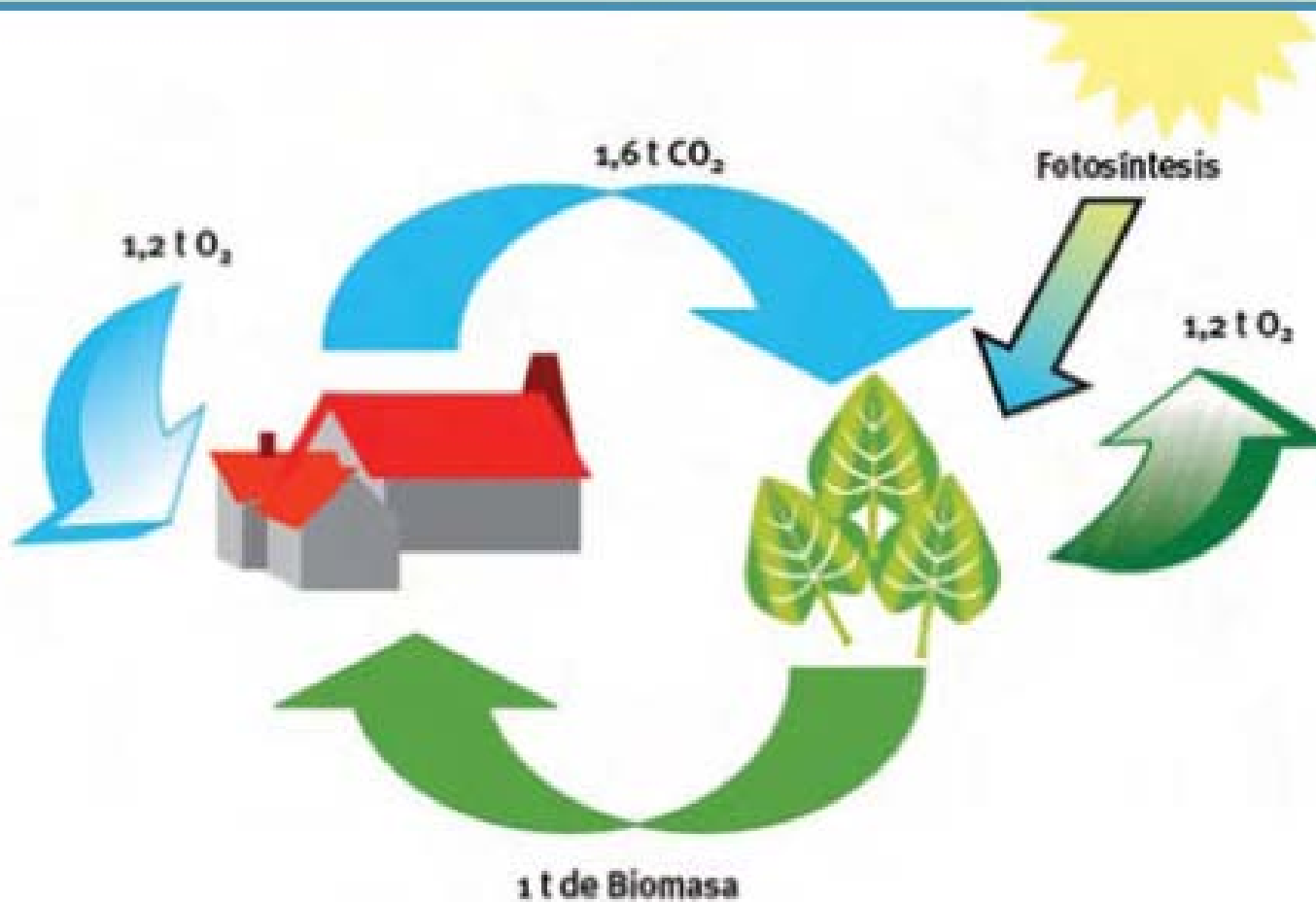
⑦ Condensador y generador

⑧ Transformadores

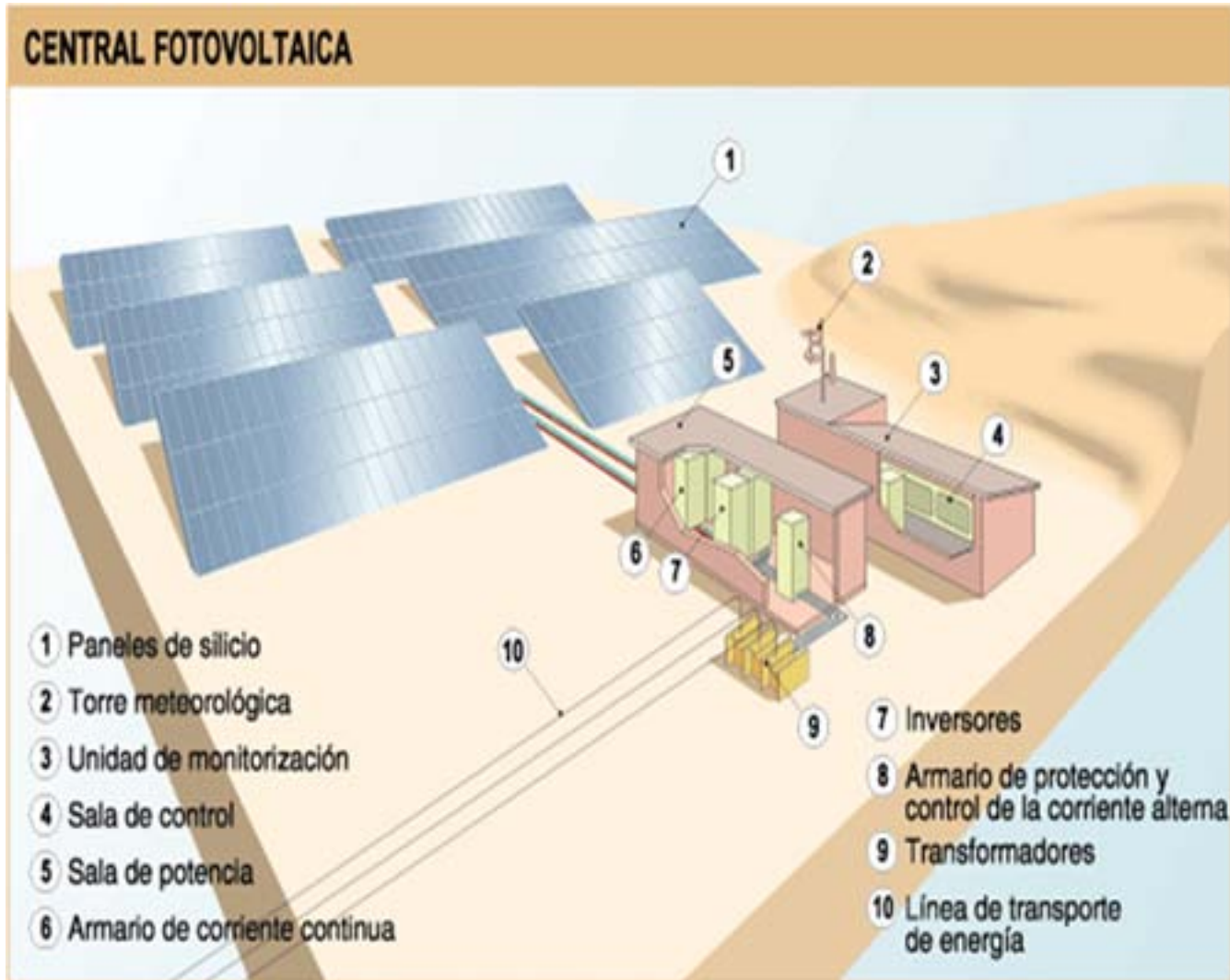
⑨ Líneas de transporte

- ✓ Leña
- ✓ Corteza
- ✓ Restos poda

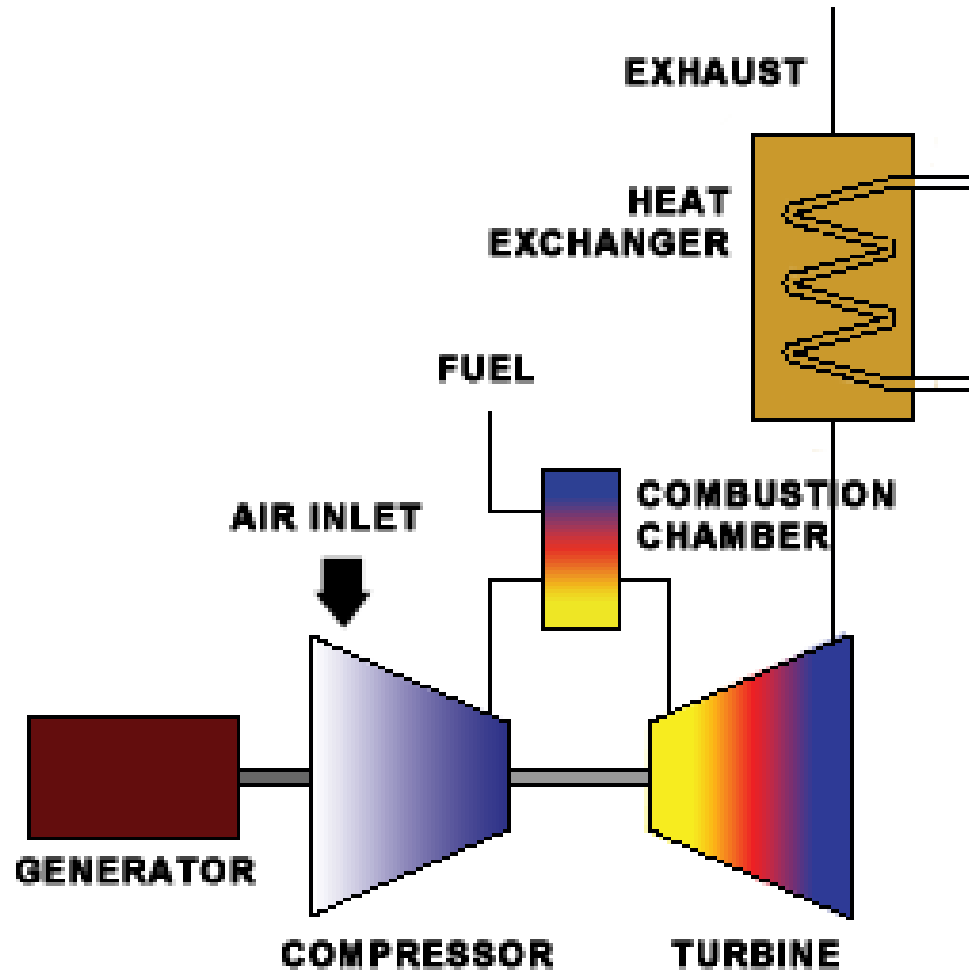
El ciclo del CO₂



PRODUCCIÓN



PRODUCCIÓN



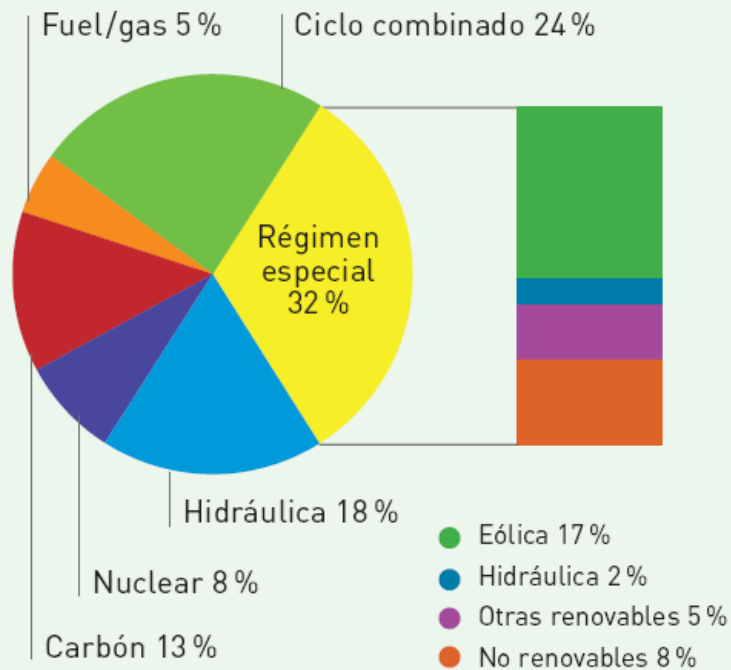
CONGENERATION SCHEMATIC

PRODUCCIÓN

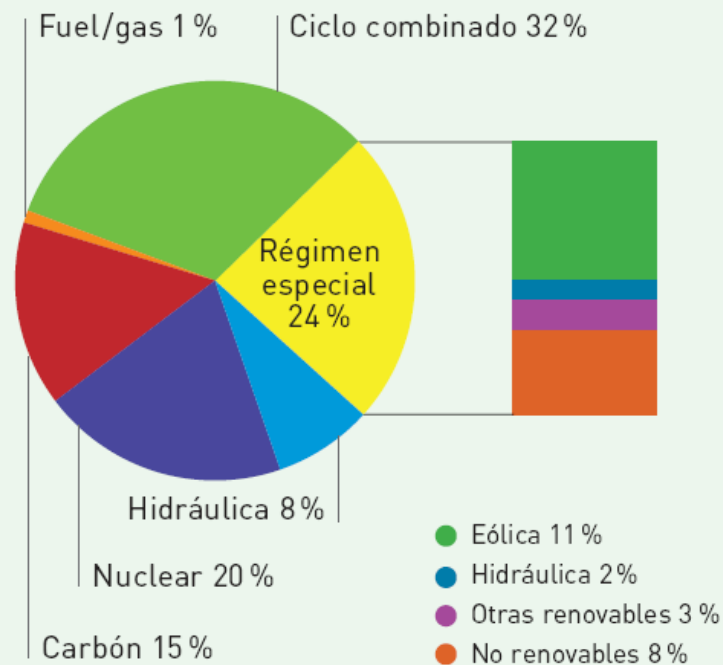
- ❑ Diversidad de tecnología:
 - ✓ Motivos económicos: costes instalación vs. costes operación
 - ✓ Motivos políticos (no depender precio petróleo)
 - ✓ Medioambientales.

PRODUCCIÓN

Potencia instalada a 31.12.2008.
Sistema eléctrico peninsular

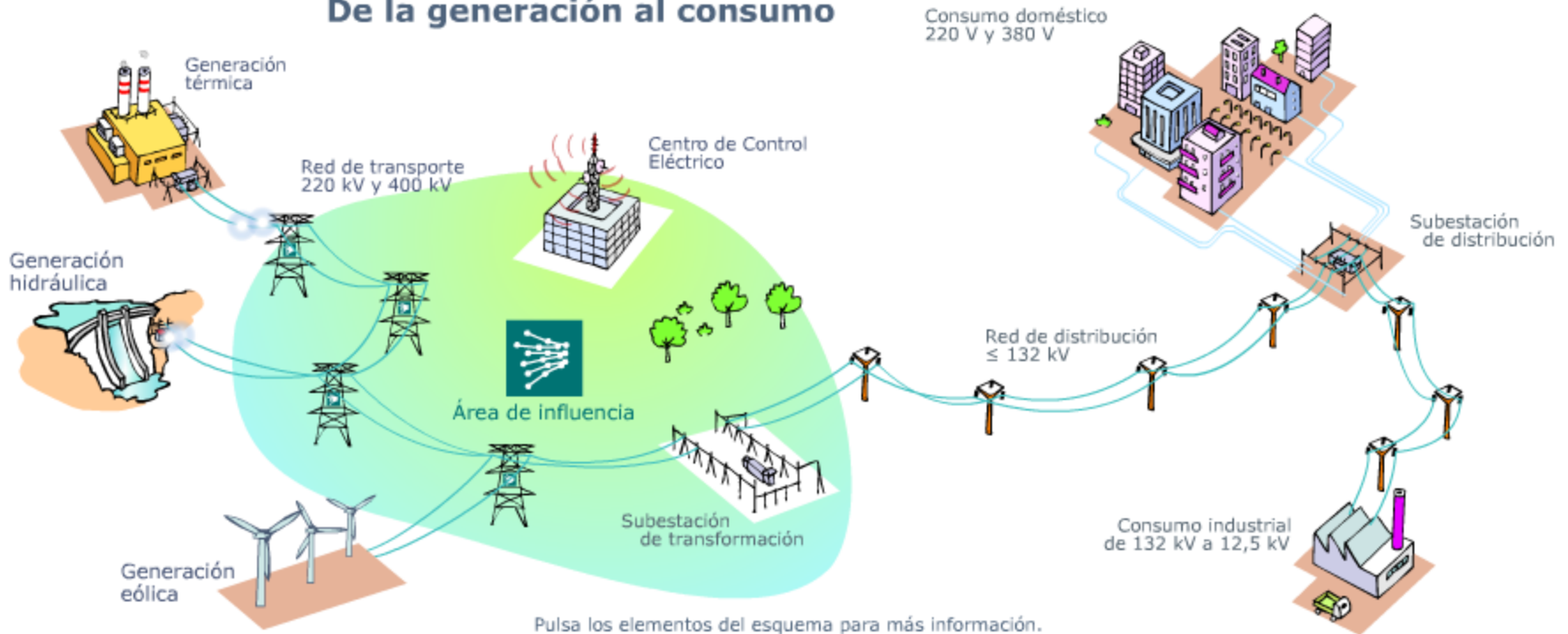


Cobertura de la demanda anual
de energía eléctrica



TRANSPORTE

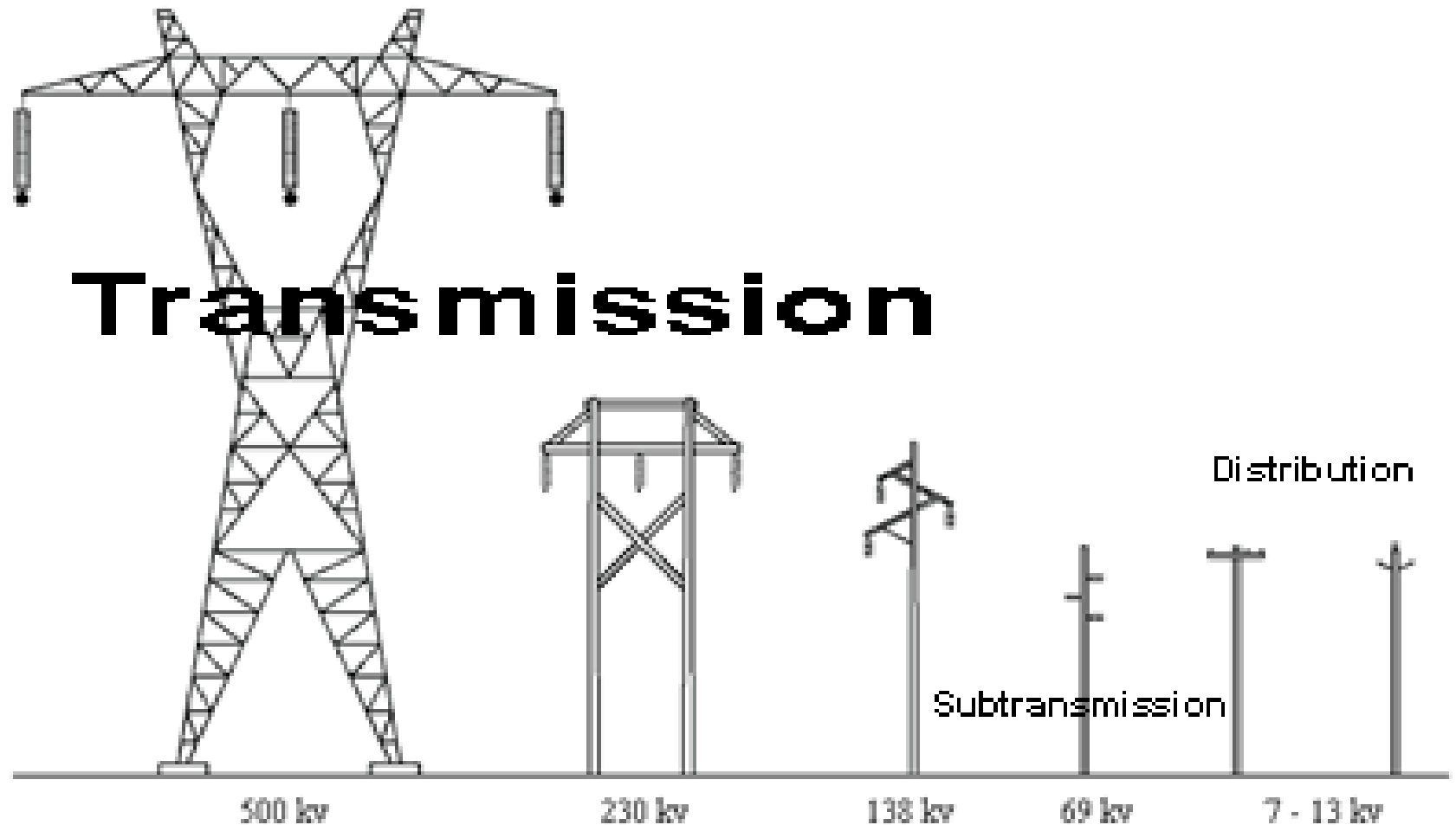
De la generación al consumo



- ✓ Equilibrio producción y demanda
- ✓ Sincronismo (mallada)
- ✓ Relevancia (mercados competitivos)

TRANSPORTE

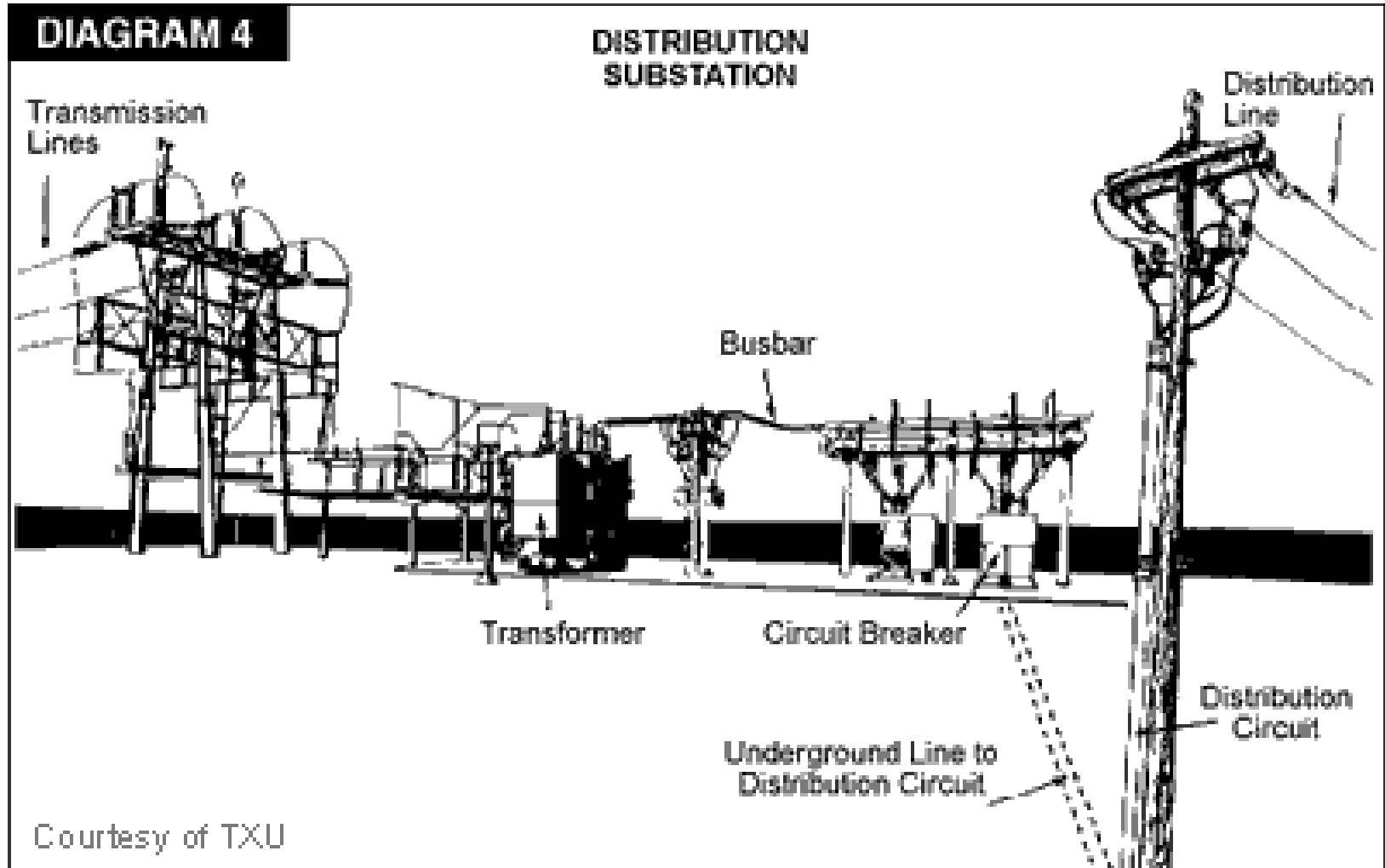
- ❑ Elementos fundamentales:
 - ✓ Líneas de transporte
 - ✓ Subestaciones



TRANSPORTE

- ❑ Elementos fundamentales:
 - ✓ Líneas de transporte
 - ✓ Subestaciones
 - Interconexión entre líneas
 - Transformación de tensión
 - Protección y corte

TRANSPORTE

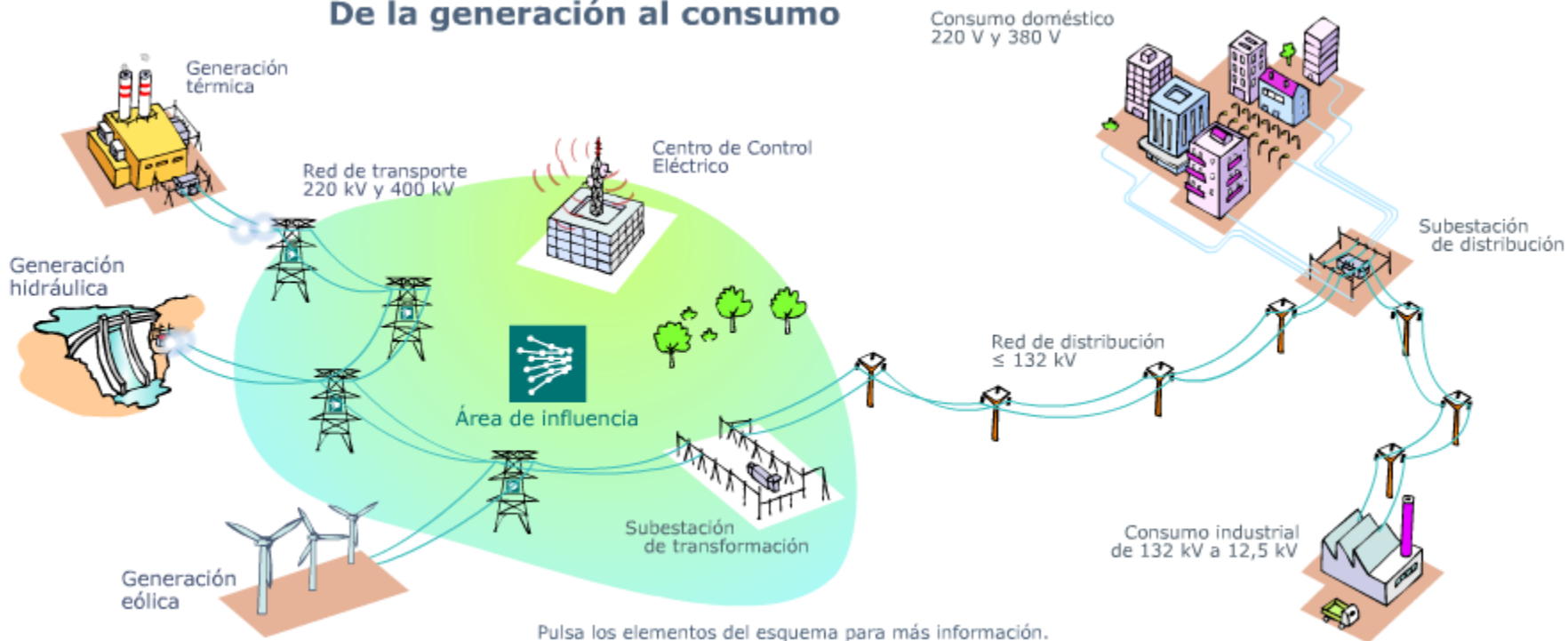


TRANSPORTE



TRANSPORTE

De la generación al consumo



TRANSPORTE

- ☐ Niveles:
 - ✓ Red de reparto mallada (132 a 45 kV)
 - ✓ Red de media tensión radial (20 a 6,6 kV)
 - ✓ Red de baja tensión (320 y 220 V)
- ☐ Mismos componentes: líneas, subestaciones, transformadores, etc.
- ☐ Menos redundante (más fallos)

CONTROL

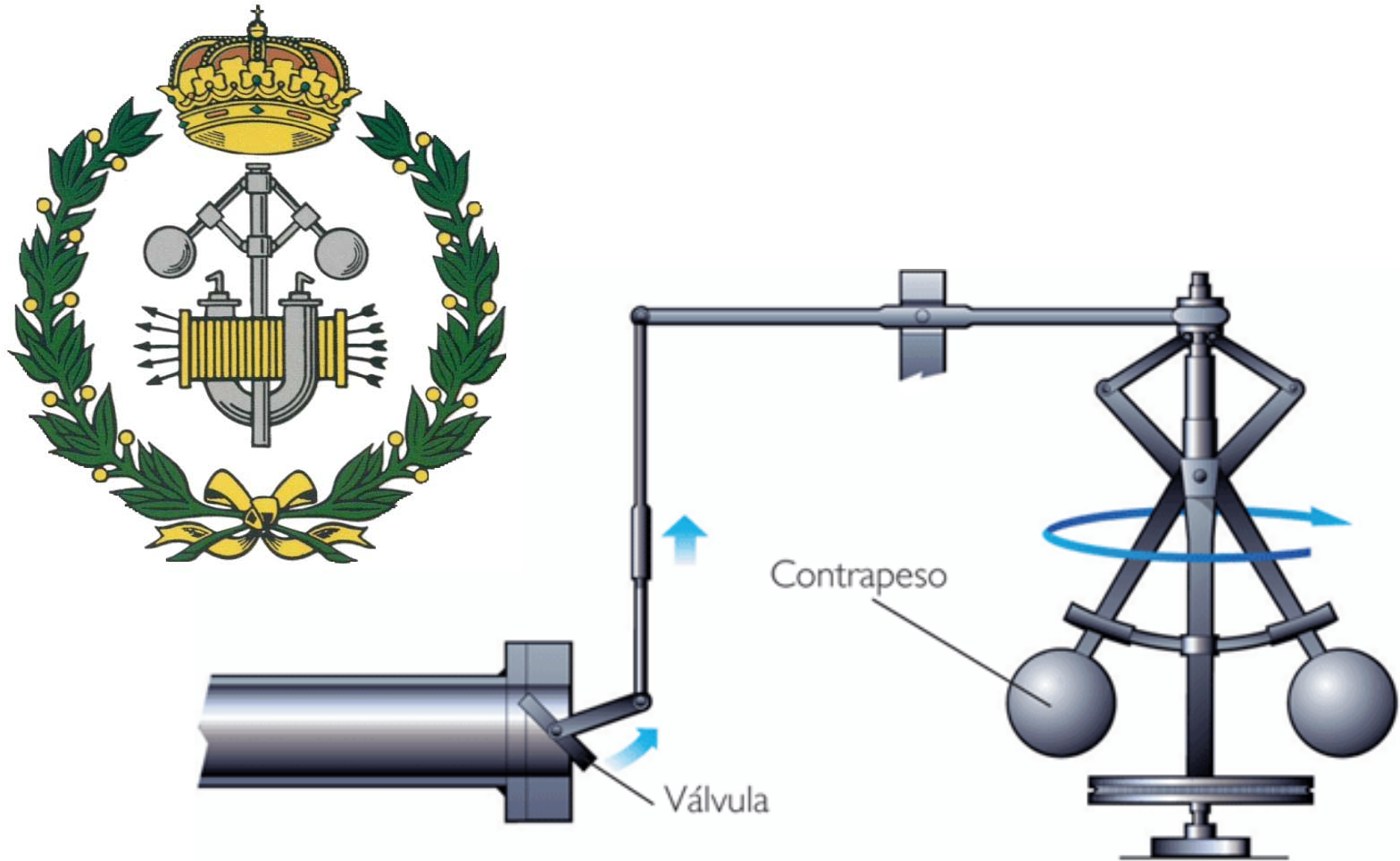
- ❑ Centro de control:
- ✓ Seguridad del sistema



CONTROL

- ❑ Centro de control:
 - ✓ Seguridad del sistema
- ❑ Centrales de producción:
 - ✓ Regulador de velocidad
 - ✓ Regulador de tensión

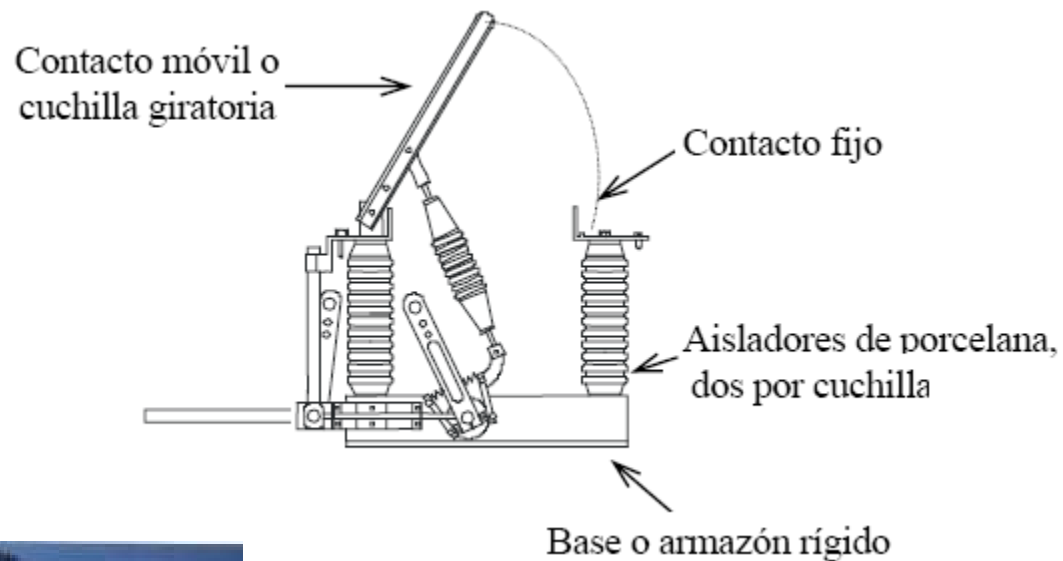
CONTROL



CONTROL

- ❑ Centro de control:
 - ✓ Seguridad del sistema
- ❑ Centrales de producción:
 - ✓ Regulador de velocidad
 - ✓ Regulador de tensión
- ❑ Red:
 - ✓ Interruptores automáticos (cortocircuitos)
 - ✓ Seccionadores (sin intensidad)
 - ✓ Interruptores intensidad nominal.

CONTROL

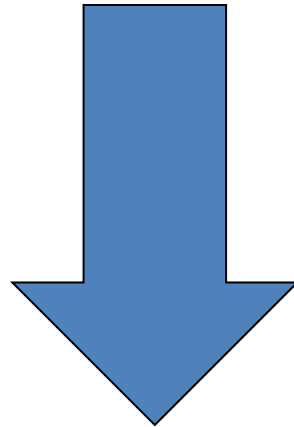


FLUJO DE CARGAS

- ❑ Flujo de cargas (*Power Flow*): Obtener las condiciones de operación en régimen permanente de un sistema de energía eléctrica.
- ✓ “Foto del sistema”
- ✓ Una de las rutinas más empleadas (estabilidad transitoria, colapso de tensiones, problemas optimización, etc.)
- ✓ Seguridad del sistema

FLUJO DE CARGAS

Potencias generadas y
demandadas



Tensiones (nudos) y
flujos (líneas)

FLUJO DE CARGAS

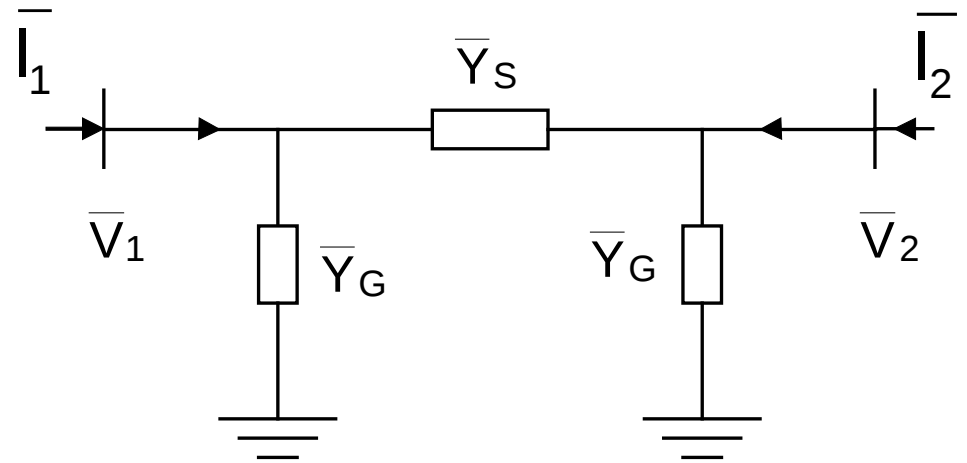
- ❑ Matemáticamente:
 - ✓ 2 etapas
 - ✓ Sistema de ecuaciones no lineales
 - ✓ Métodos iterativos (exactitud vs. tiempo)

FLUJO DE CARGAS

Leyes de Kirchhoff :

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_1 \bar{Y}_G + (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) \bar{Y}_S$$

$$\bar{I}_2 = \bar{V}_2 \bar{Y}_G + (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \bar{Y}_S$$



$$P_i = V_i \times \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik})$$

$$Q_i = V_i \times \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik})$$

FLUJO DE CARGAS

❑ Flujo de cargas DC:

- ✓ Resistencia despreciable ($r \simeq 0$)
- ✓ Tensiones nominales ($V \simeq 1$)
- ✓ Pequeña diferencia de ángulos ($\cos \delta \simeq 1, \sin \delta \simeq \delta$)

AC



$$P_i = V_i \times \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik})$$

$$Q_i = V_i \times \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik})$$

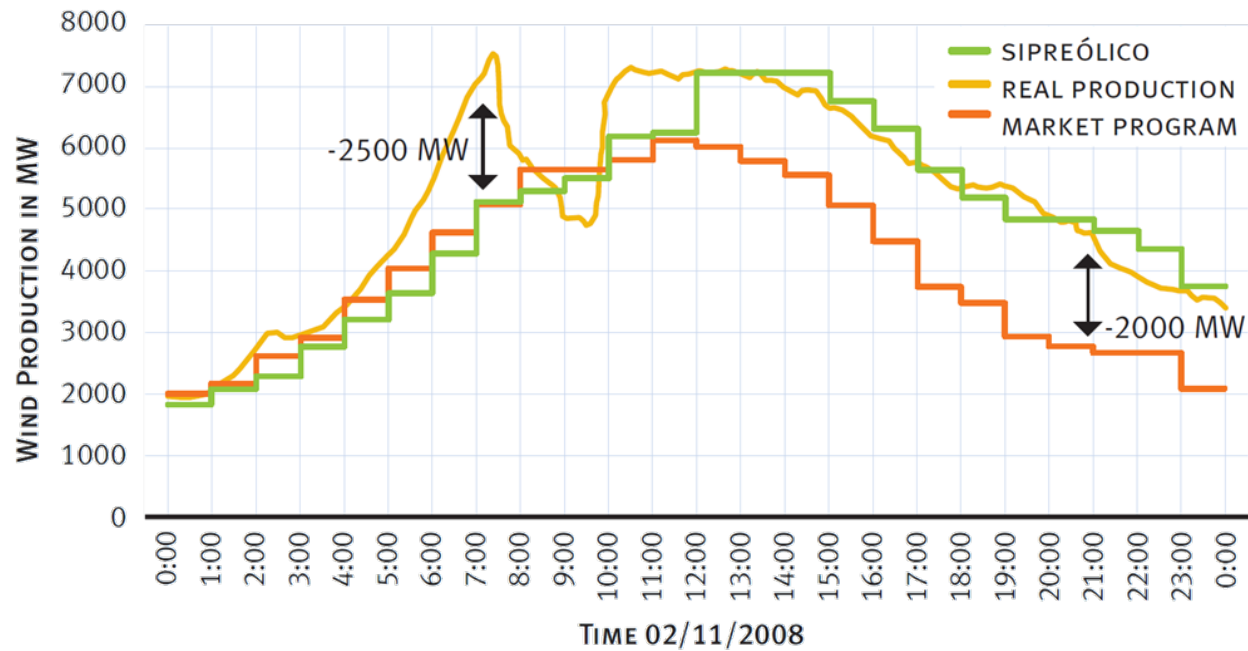
DC



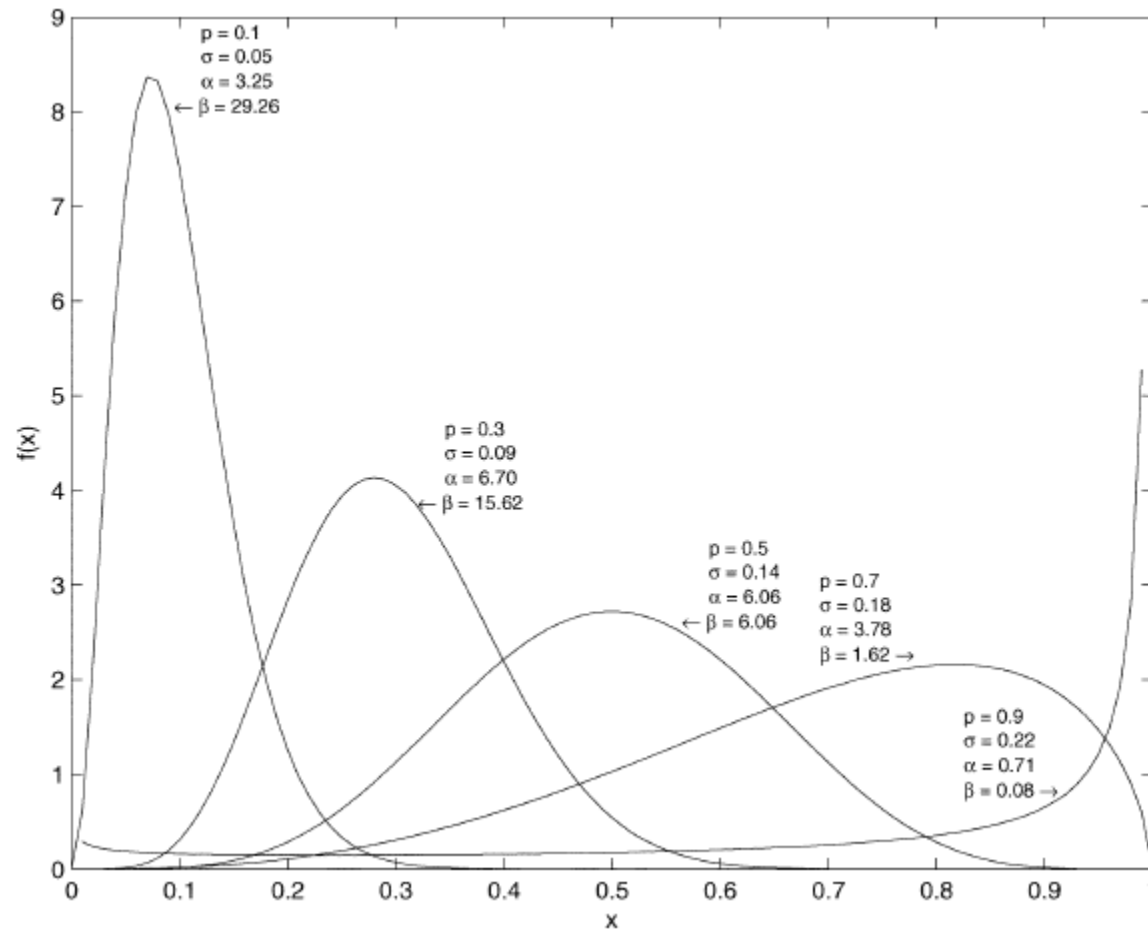
$$P_i = \sum_{k=1}^n B_{ik} (\delta_i - \delta_k)$$

- ❑ ¿Problema de la producción eólica?

FIGURE 16: WIND FORECAST ERROR IN SPAIN



□ ¿Problema de la producción eólica?



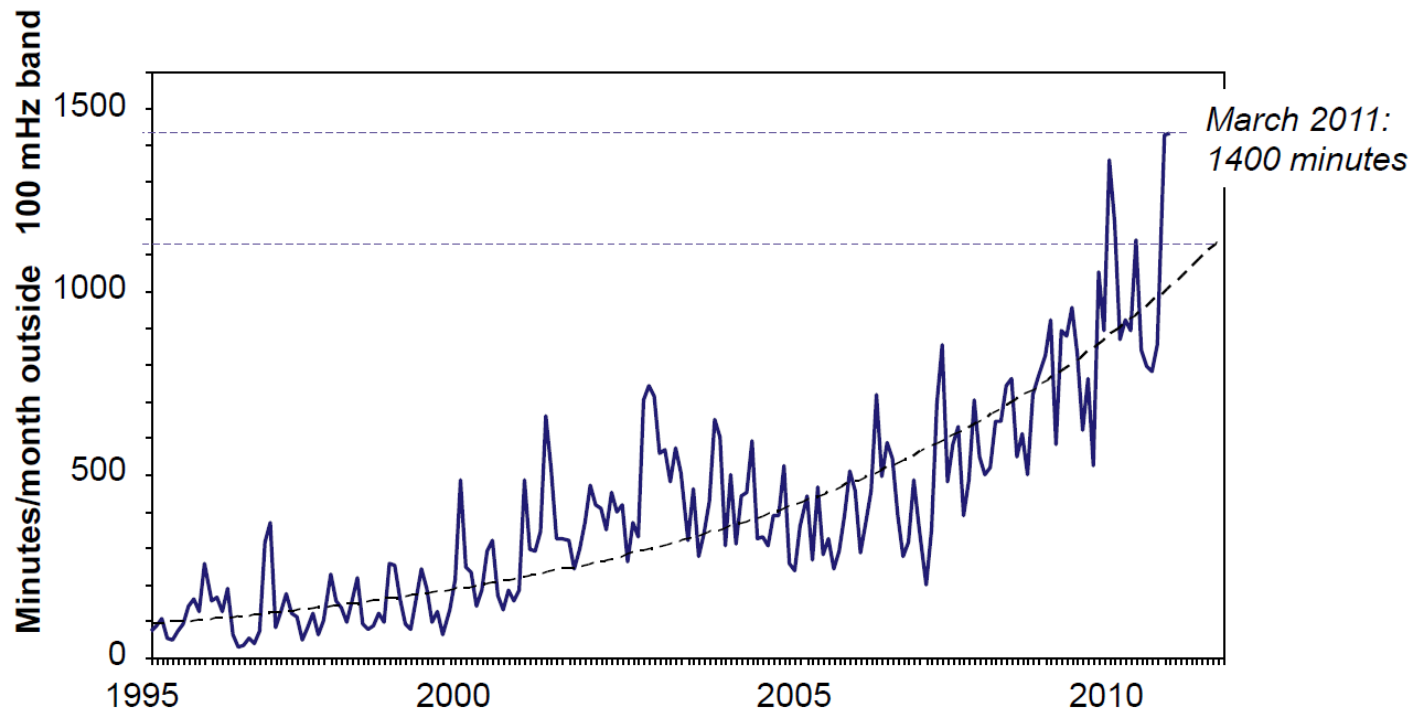
IMPACTO INCERTIDUMBRE

❏ ¿Consecuencias para los participantes?

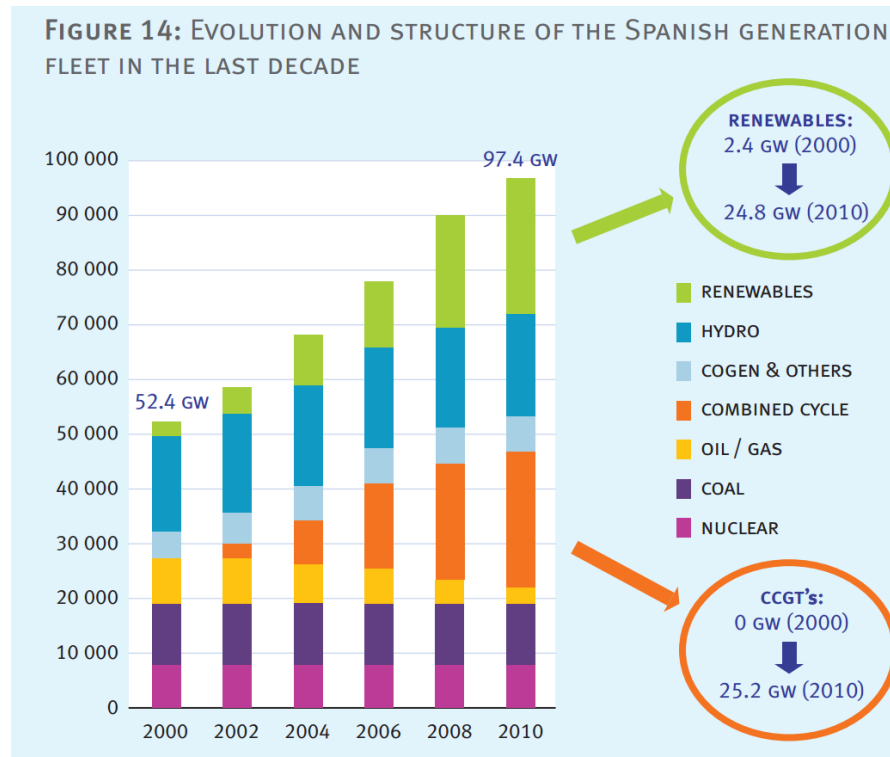
- ✓ Operador del sistema
- ✓ Productores eólicos
- ✓ Productores convencionales

IMPACTO INCERTIDUMBRE

- ❑ ¿Consecuencias para el operador del sistema?



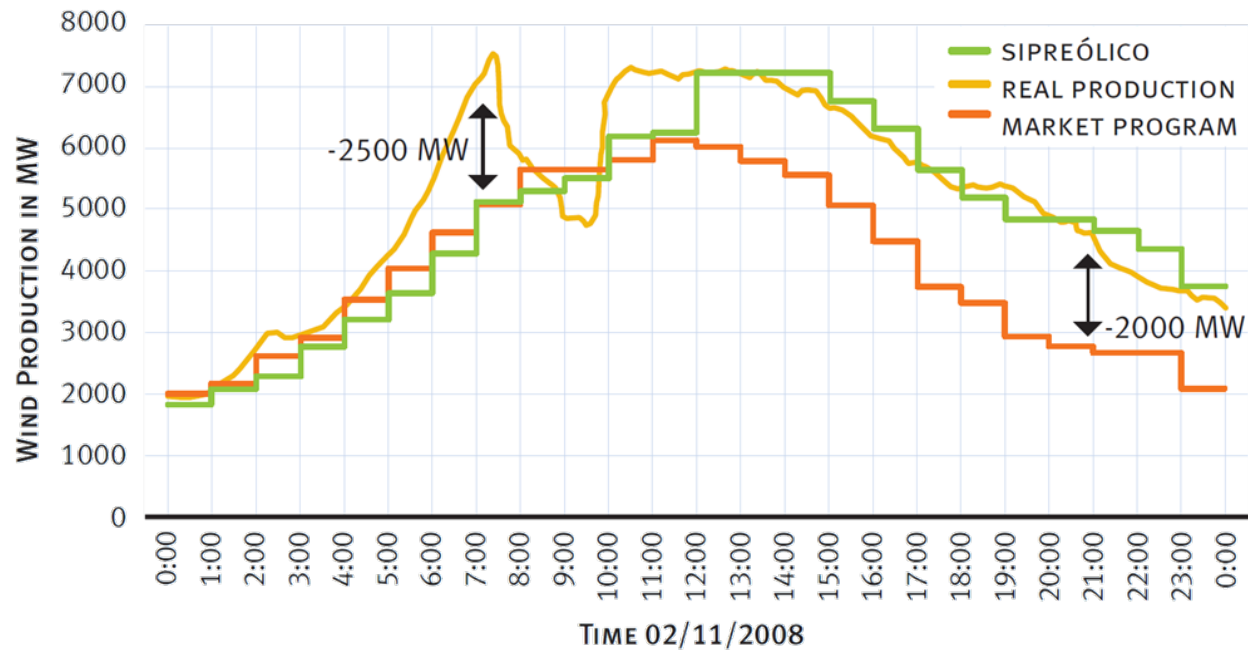
❏ ¿Consecuencias para el operador del sistema?



IMPACTO INCERTIDUMBRE

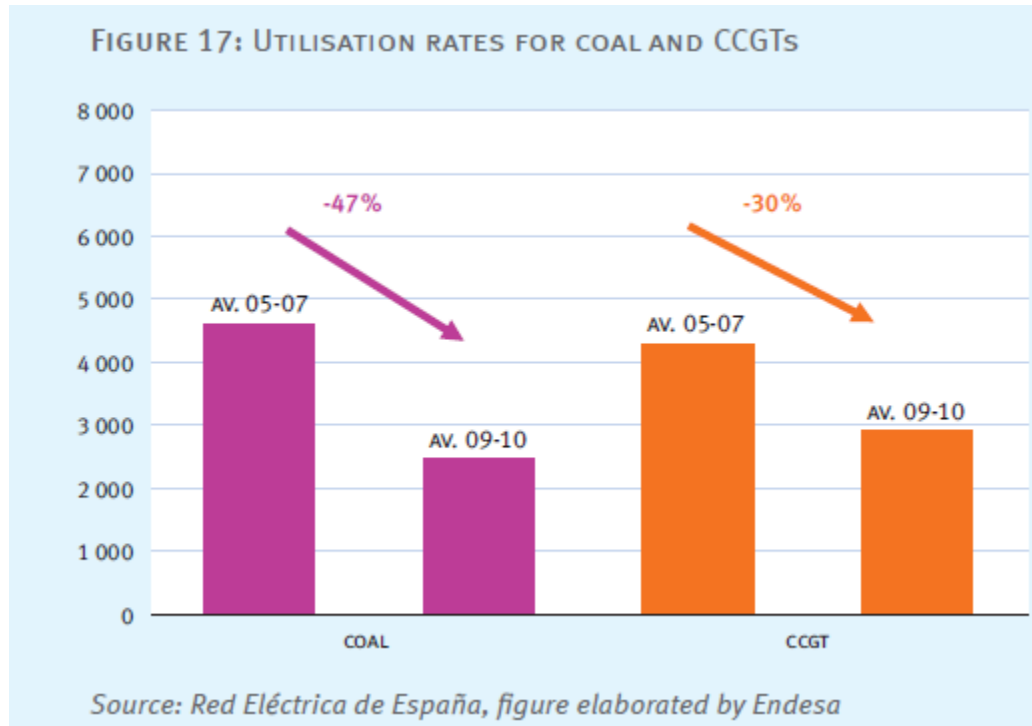
- ❑ ¿Consecuencias para los productores eólicos?

FIGURE 16: WIND FORECAST ERROR IN SPAIN



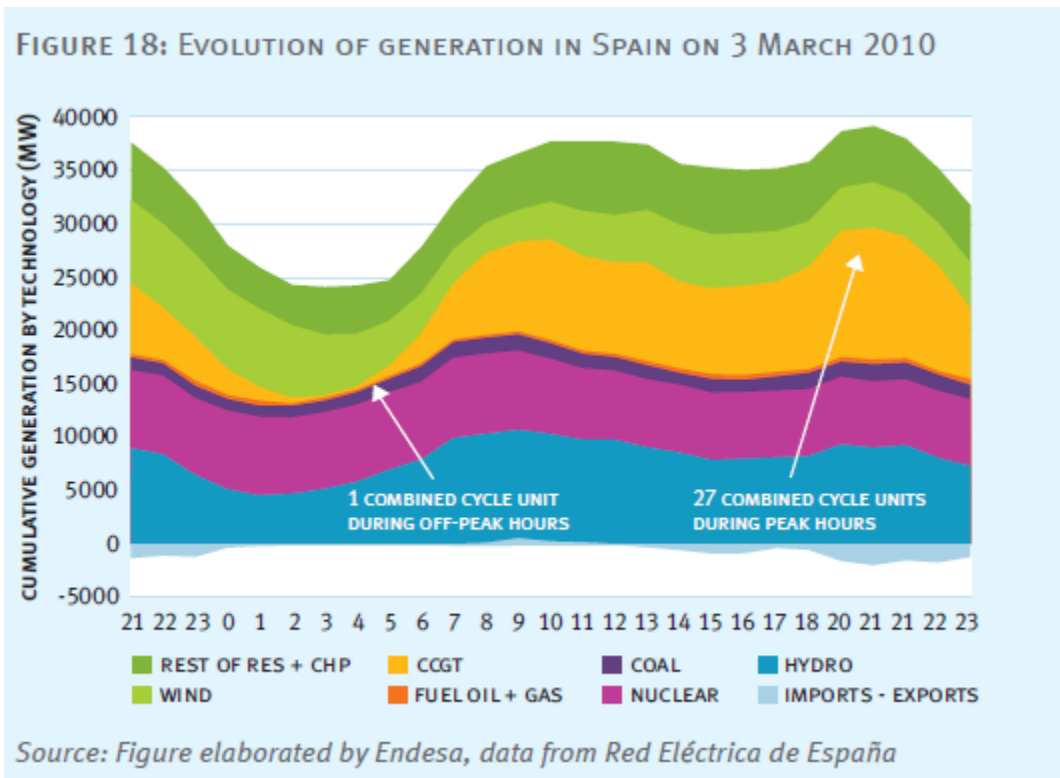
IMPACTO INCERTIDUMBRE

- ❑ ¿Consecuencias para productores convencionales?



IMPACTO INCERTIDUMBRE

- ❑ ¿Consecuencias para productores convencionales?



❑ ¿Consecuencias para los participantes?

✓ Operador del sistema

- Planificar la expansión de la generación
- Determinar la cantidad óptima de reservas
- Proponer nuevas herramientas de mercado

✓ Productores eólicos

- Determinar la estrategia óptima para vender su producción

✓ Productores convencionales

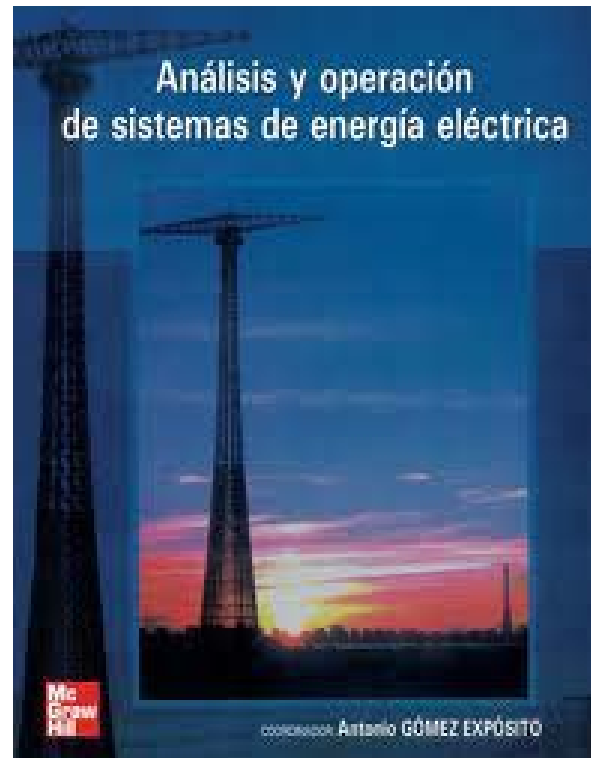
- Determinar la estrategia óptima para vender su producción

IMPACTO INCERTIDUMBRE

07/03/13 (16.00h-19.00h)	Presentación del curso. Introducción a los sistemas eléctricos de potencia Presentación de los contenidos, los objetivos y la dinámica de trabajo del curso. Introducción a los principales componentes de los sistemas eléctricos de potencia. Discusión sobre el impacto de la incertidumbre en la planificación y operación de los sistemas de energía eléctrica.
08/03/13 (16.00h-19.00h)	Introducción a los mercados eléctricos Introducción de conceptos básicos de los mercados eléctricos (ofertas, cierre de mercado, beneficio social, coste marginal, etc.). Introducción a los diferentes mercados eléctricos (mercado a plazo, diario, intradiario, etc.). Discusión sobre el mercado eléctrico actual en España.
11/03/13 (16.00h-19.00h)	Programación estocástica: teoría y conceptos fundamentales Introducción a la toma de decisiones bajo incertidumbre. Presentación de la programación estocástica como una herramienta matemática para la toma de decisiones bajo incertidumbre: fundamentos y aplicación.
12/03/13 (16.00h-19.00h)	Cierre de mercados eléctricos con incertidumbre Importancia de la incertidumbre en los cierres de mercado eléctricos. Algoritmos de cierre de mercado basados en programación estocástica.
13/03/13 (16.00h-19.00h)	Incertidumbre y productores eléctricos Introducción a la toma de decisiones de productores eléctricos que participan en un mercado eléctrico. Presentación de modelos estocásticos para la toma de decisiones de diferentes productores eléctricos (térmico, hidráulico, eólico, etc.)
14/03/13 (16.00h-19.00h)	Gestión de riesgos en los mercados eléctricos Definición de riesgo y principales medidas de riesgo. Presentación de instrumentos financieros para reducir el riesgo de los participantes de un mercado eléctrico. Uso de la programación estocástica para gestionar el riesgo.

BIBLIOGRAFIA

- ❑ **Capítulos 1, 3 y 4:** Antonio Gómez Expósito “Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica”. McGraw-Hill.





¿PREGUNTAS?