

**Universidad Politécnica de Cartagena**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica**



Programa de doctorado de “Tecnologías Industriales”.  
Subprograma de “Neurotecnología, Control, Robótica y Gestión  
Energética”

**Análisis e Integración de Recursos  
Energéticos Distribuidos**

Cartagena, 2011

● **Lección 6**  
**Generación Distribuida (DG)**



## ● Introducción

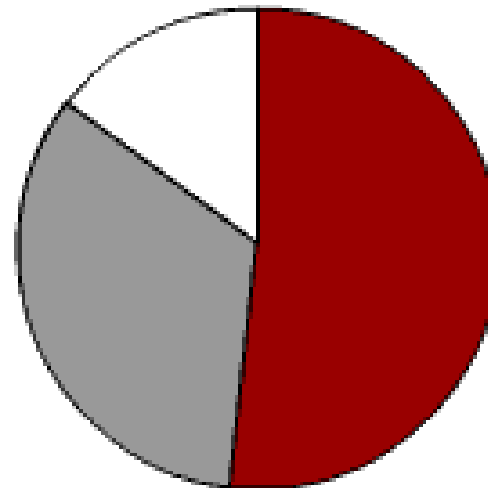
- Diferencias Generación Distribuida vs. Dispersa
- Generación Distribuida pequeñas unidades (15 a 10.000kW) difuminados en el SEE, propiedad del usuario o de una empresa eléctrica.
- Generación Dispersa: está en el lado de la demanda y se utilizan para abastecer pequeños consumos (unidades de 10 a 250kW).
- Tipos de generación
  - Convencional: diesel, gas, ciclo combinado, ¿hidráulica?
  - Alternativa: fuel-cells, solar, eólica, motores de combustión externa (stirling) ¿hidráulica?



## ● Concepto DER (Distributed Energy Resources)

- Generación (concepto más extendido, suele ser sinónimo de DG)
- No hay que olvidar: Respuesta de la Demanda (DR) y Almacenamiento de Energía (DS)

### US Commercial/Industrial Market Opportunity



- Current Potential DER Market
- Future Potential DER Market
- Market Portion Not Likely for DER



## ● Generación Distribuida y Centralizada (I)

- Tradicional: el grueso de la producción de energía eléctrica se realiza en grandes centrales (150-1000MW)
  - Alejar generación de la demanda
  - Reducir costes de operación, combustibles,.....
- La física y la economía están del lado de la generación convencional
  - Eficiencia: ej. Calderas e intercambiadores
    - Relación volumen/superficie = generación/pérdidas
    - Conversión de energía (DC/AC)
    - Protecciones
    - Mano de obra
    - Mantenimiento
    - Estaciones transformadoras.....



## ● Generación Distribuida y Centralizada (II)

### ● Ventajas de la GD

- Distribuida: los rendimientos de las tecnologías de GD son “escandalosamente” altos: hasta un 40-45%
- Rendimientos de plantas tradicionales 28-35%
- Proporcionan E de alta calidad (cargas sensibles)
- Zonas en las que no existe suministro convencional

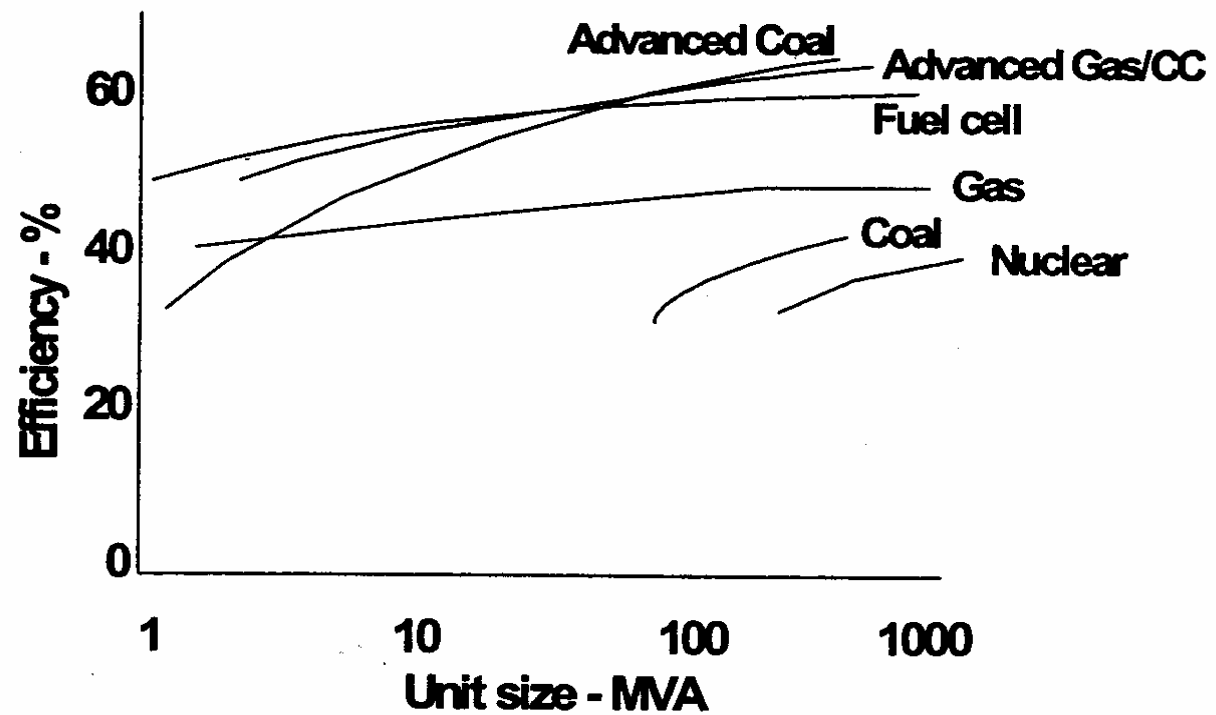
### ● Explicación:

- La tecnología de las centrales GD es más moderna (plantas convencionales tienen una vida media de 20 a 50 años)
- Se considera funcionamiento a plena carga (máximo  $\eta$ ) de las unidades GD



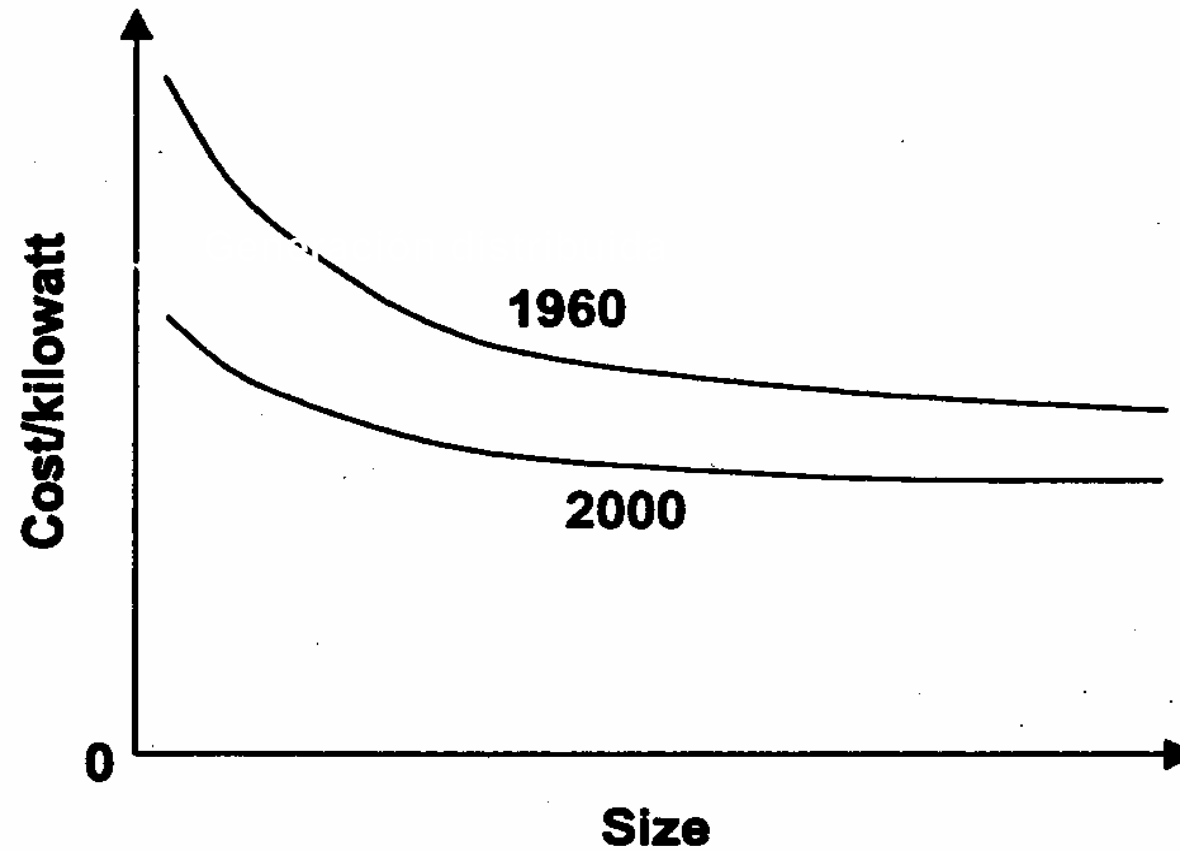
● **Generación Distribuida y Centralizada (III)**

- Las economías de escala seguirán dominando el futuro.....



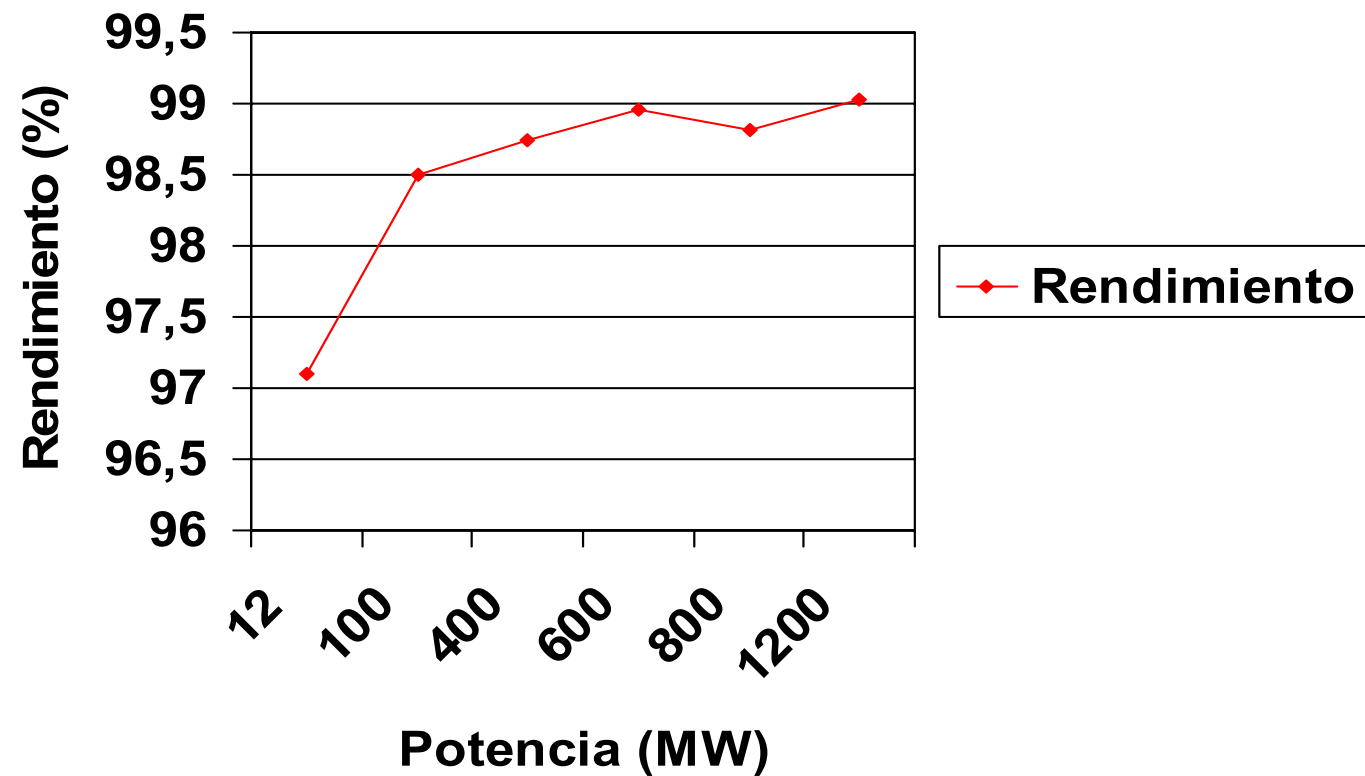
## ● Generación Distribuida vs. Centralizada

- .... Pero no tanto como en el pasado (en 40 años se ha reducido la economía de escala en un 30%)



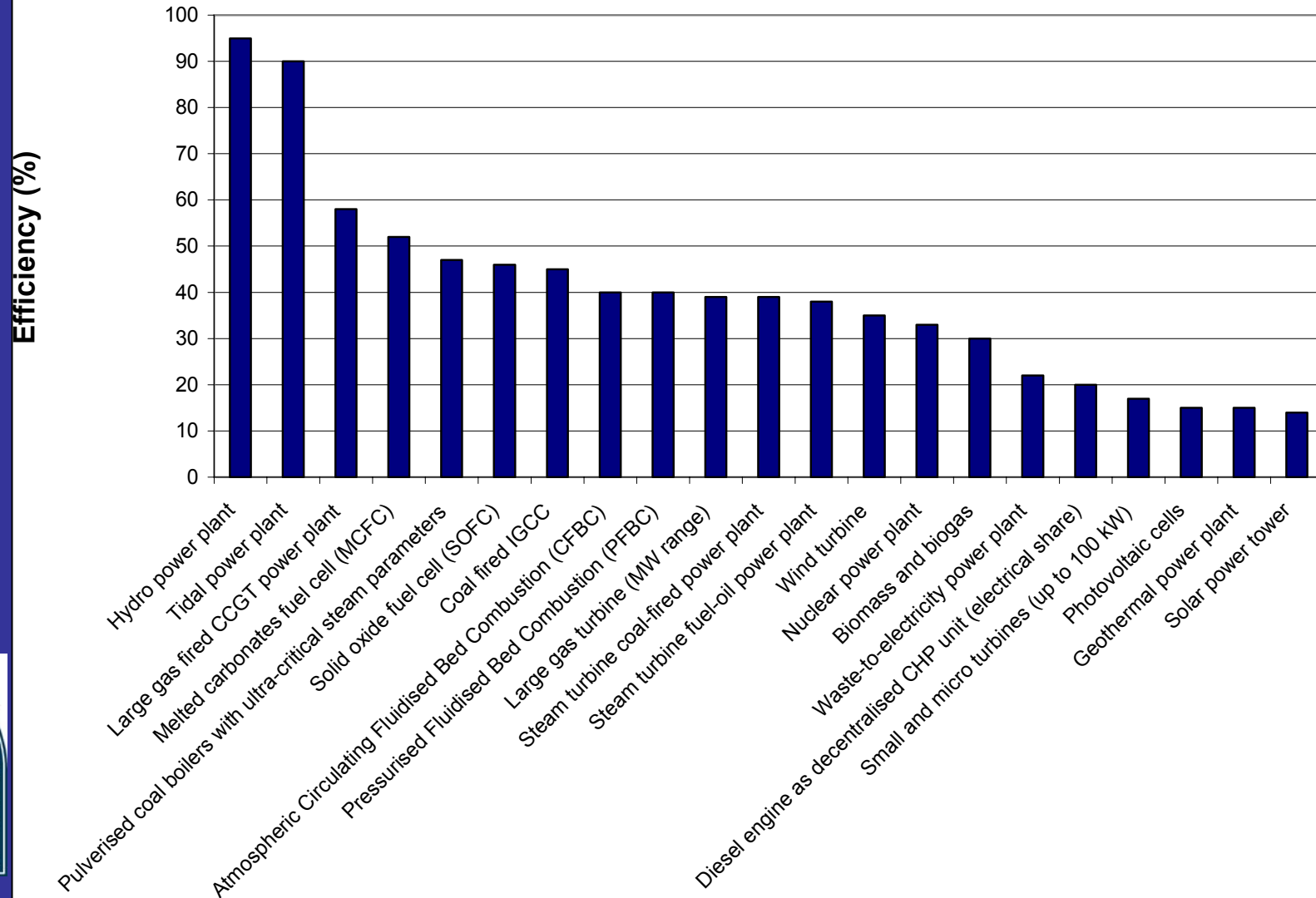


- No olvidemos la eficiencia de los generadores sincrónicos en función de su potencia de salida
  - Por ejemplo los turbogeneradores (rótór liso)



## Resumen de la eficiencia de diferentes tipos de generación eléctrica

Source: F. van Aart, KEMA



## ● Generación Distribuida y Centralizada (IV)

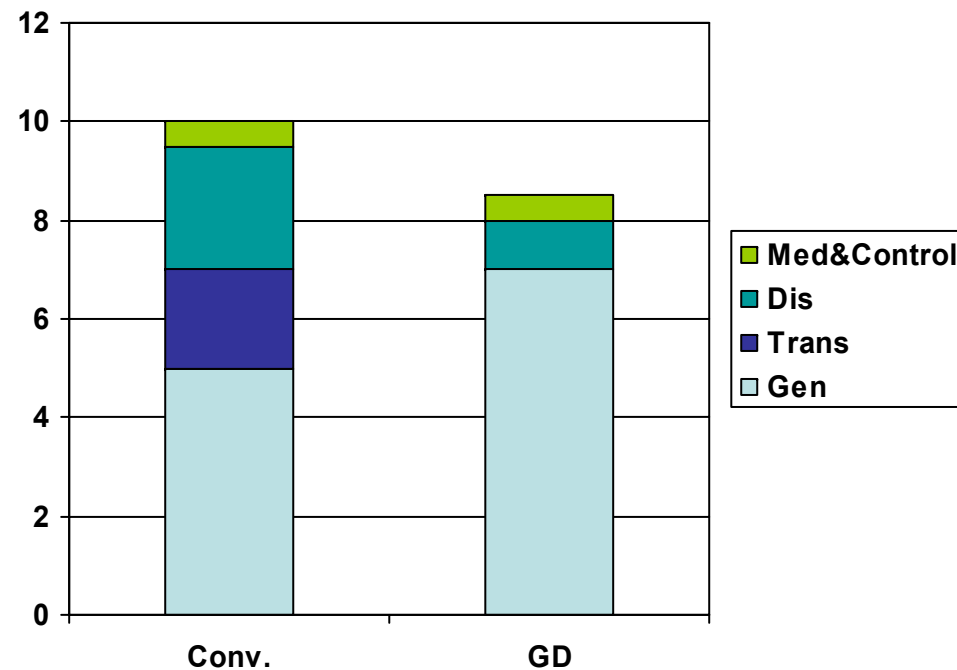
### ● Razones del crecimiento de la GD:

- Avances en la conversión de la energía: p.e. mejora en las turbinas de gas
  - 30% de rendimiento en pequeñas turbinas (¡bueno!)
  - 40% en turbinas de ciclo Cheng
  - Mejoras en aislamientos y recuperación de calor impensables en la década de los 60.
- Cambios en el coste de fuel/coste total
  - 1960/70: 80% del coste total
  - 2000: 40-55% (aumentan costes laborales, control de emisiones,.....)
- Automatización y control: cada vez se necesita una menor intervención humana
  - 1960: planta 60kW necesitaba 2 ó 3 personas
  - 2000: ningún operario, automatización total



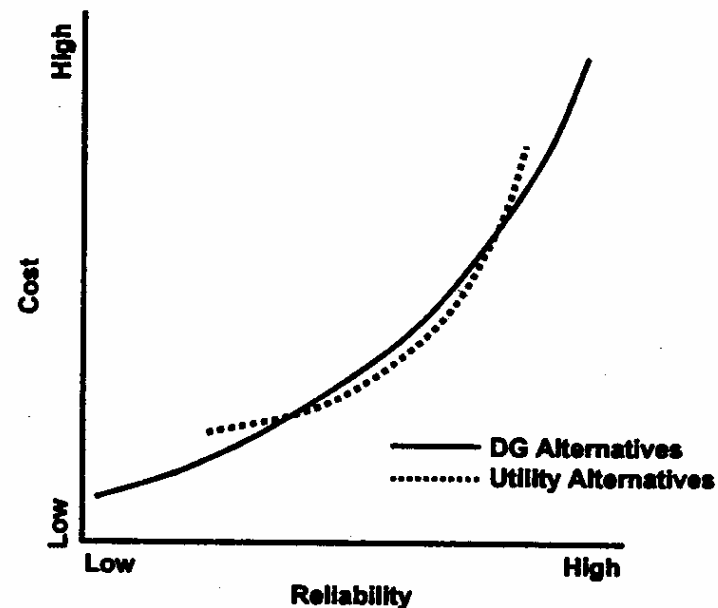
## ● La clave: los costes del Transporte y Distribución

- La generación está más próxima al usuario, lo que supone una
  - Disminución de las inversiones (nuevas líneas)
  - Disminución de mano de obra y mantenimiento
  - Disminución de las pérdidas/peajes T&D
- Ejemplo: riego en una explotación agrícola (2000) con GD diesel (3000h/año, 250kW)



## ● Fiabilidad de los sistemas eléctricos y G.D.

- Sistemas Convencionales (interrupciones)
  - Estándar de 1960: 8 h/año de interrupción
  - Estándar de 2000: 2 horas/año (99,95%)
- Oportunidad de la GD: configurar nuestras necesidades de calidad en unos márgenes de costes muy interesantes.
  - Desde un 95 al 98% (estándar de 2000)
  - Hasta 100% (imposible con gen convencional) si se une GD + Convencional + DS



## ● Otras ventajas e inconvenientes de la G.D.

- ✓ Modulares: las centrales de GD se fabrican en serie (las convencionales son “artesanas”)
  - Simplifica la ingeniería e instalación
- ✓ Medioambientales: tecnologías limpias (la mayoría) sin necesidad de una estructura complicada de T&D
- ✗ Propiedad y operación: ¿quién es el responsable de la central? Es complicado para el propietario
- ✗ Suministro de combustible: a veces no es fácil de suministrar el combustible ¿hay red de gas? El suministro de gas (transporte) puede elevar hasta un 25% costes
- ✗ Tecnologías no validadas: en general las nuevas tecnologías suponen un riesgo



## ● Tecnologías de G.D.

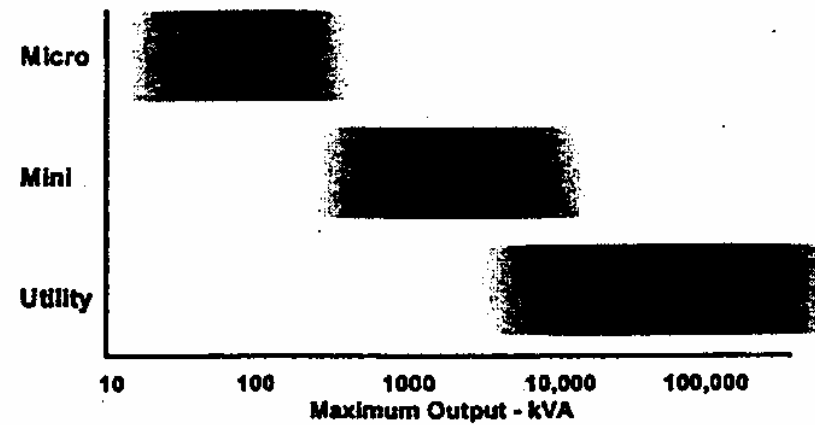
Tecnologías GD	Disponibles	Emergentes
Microturbinas	✓	✓
Turbinas	✓	
Mot. C.I. Alternativos	✓	
Motores Stirling	≈	✓
Fuel Cells	✓	✓
Fotovoltaica	✓	
Eólica	✓	
Sistemas híbridos	≈	✓



● Turbinas de gas (I)



● Rango de uso





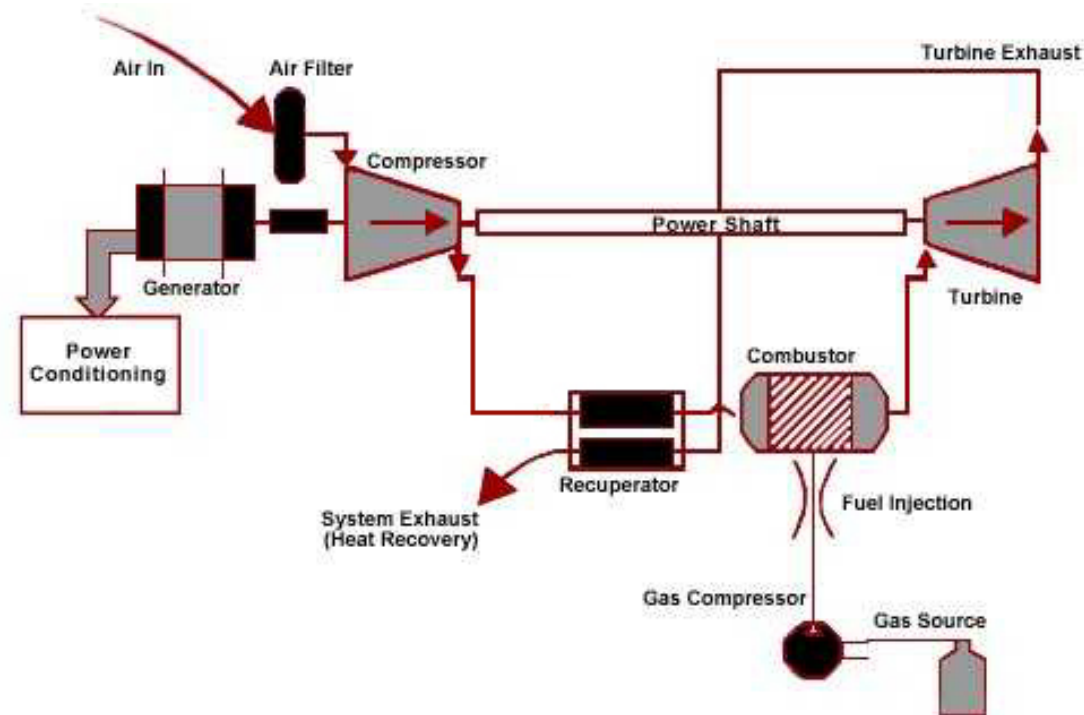
## ● Turbinas de gas (II)

- Han sido utilizadas para la generación de electricidad desde finales de los 40 (EEUU) o principios de los 70 (Francia) en FFCC
- Problema: altos costes de fuel tras la crisis del petróleo de los años 70 (son turbinas adaptadas de la industria aeronáutica)



## ● MicroTurbinas

- Hay una disponibilidad comercial limitada (producción)
- Rango de potencia: 25-500kW
- Combustible: GN, H<sub>2</sub>, propano, gasoil,...
- Rendimiento: 20-30%
- Emisiones: bajas (9-50 ppm de NO<sub>x</sub>)
- Otras posibilidades: cogeneración (agua caliente 50-80C)



● **Turbinas de gas (II): generalidades**

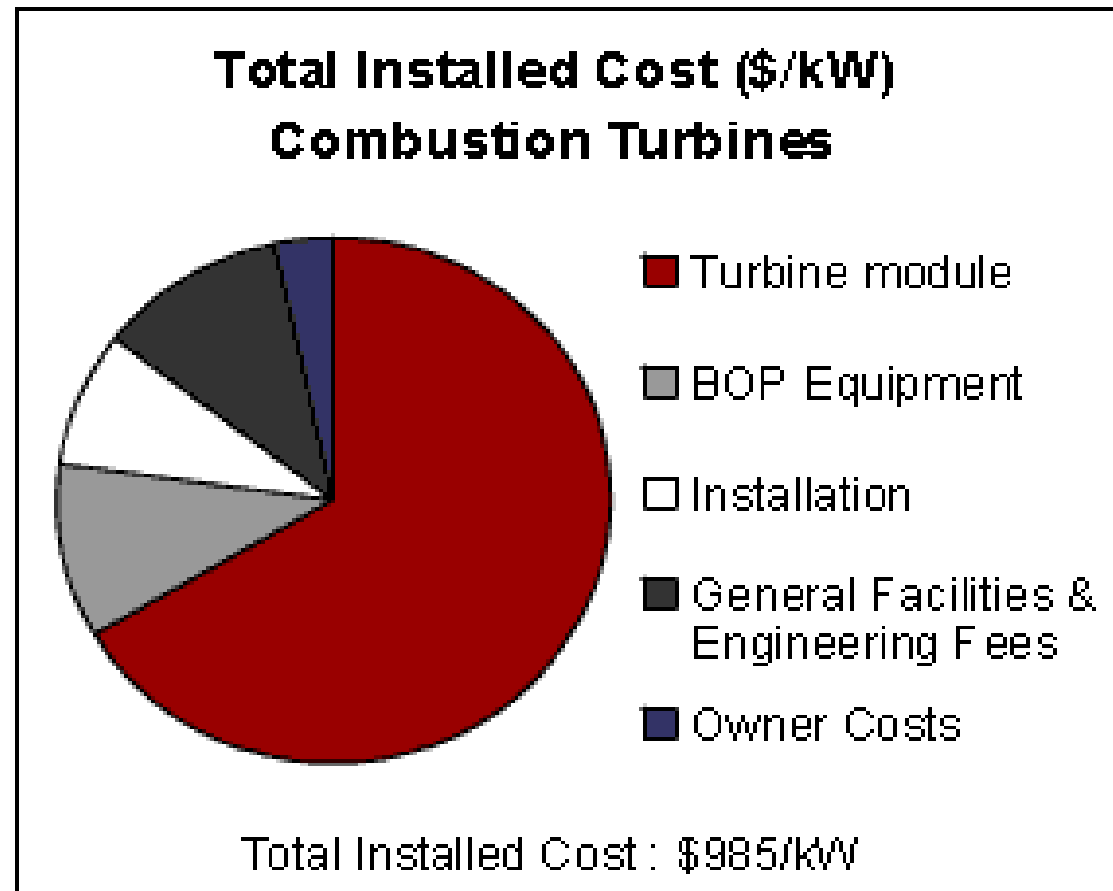
- Fabricantes: Alstom, General Electric (PS), Siemens, Rolls-Royce, Capstone, Bowman.
- Pueden llegar al 45% de rendimiento (a plena carga)

Characteristic	Micro	Mini	Utility
Available range – kVA	20 – 500	650 – 10,000	12,500 – 265,000
About the size of . .	a refrigerator	a large truck	a building
Original design based on . . .	bus, truck engines	aircraft engines	utility needs
Most typical fuels are . . .	nat. gas, diesel	nat. gas, diesel	nat. gas, fuel oil
Makes about as much noise as	a car at 40 mph	3-4 leaf blowers	a jet plane
Out of service once every . . .	Two years	Eight months	Year and a half
Turbine generator usually is	single-shaft	two-shaft	two or three shaft
Turbine spins at about	70,000 RPM	15,000 RPM	1,800 RPM
Generator type used is	DC with AC conv.	AC sync.	AC sync.
Generator turns at about	70,000 RPM	3,600 RPM	1,800 RPM
Turbine & generator run at	Variable speed	Constant speed	Constant speed
Best fuel efficiency is about . . .	32%	30%	37%
Can be bought and installed in	a week	two months	a year or two
Typical cost/kW is . . .	\$700/kW	\$450/kW	\$300/kW



### ● Turbinas de gas (III): costes

- Costes iniciales (de 700 a 1110\$/kW) : hay costes externos que aumentan el precio de la turbina de un 30-50%
- Mantenimiento: cada 5000-8000h de funcionamiento ( $\approx$  MCI)



- BOP: condensadores, intercambiadores, bombas,...



## ● Turbinas de gas: ventajas e inconvenientes

### ● Ventajas:

- Aprovechamiento de calor residual
- Red de servicio y mantenimiento
- Gran relación peso/potencia
- Fiables
- Bajo nivel de emisiones
- Pueden aprovechar combustibles residuales
- Tiempos de arranque: de 2 a 5 minutos

### ● Inconvenientes

- Poca eficiencia a cargas parciales (puede reducirse el rendimiento un 25% a ½ carga). El rendimiento exclusivamente eléctrico es bajo
- Sensible a condiciones ambientales (altas temperaturas y altitud)
- A menor potencia peores prestaciones
- Ruido (> 60dB)



### ● Motores de c.i. alternativos (MCI)

- Son la tecnología más común y más madura de GD
- Están disponibles en tamaños variados (5kW a 10MW)
- Combustibles: gasolina, fuel-oil, gas natural, gasoil,...
- Rendimiento: 25 a 45% (a carga total)
- Representan 80-90% de la GD
- Tiempos de arranque de 30s a 15min



● **Tipos de motores de c.i. alternativos (II)**

- Unidades de alta velocidad: más parecidos a los utilizados en automoción (1200 a 3600 rpm).
  - Mayor potencia (peores rendimientos)
  - Más baratos
- Unidades de media velocidad (275 a 1000 rpm)
  - Unidades de FFCC/pequeños barcos
  - Más caros, mejor rendimiento
- Unidades de baja velocidad (58 a 275 rpm)
  - Utilizan combustibles residuales de baja calidad
  - Nivel de emisiones más alto

Pe (kW)	Rend-el (%)	Pterm (kW)	Rend-term (%)
22	28,4	45,5	58,8
100	32,8	161	52,8
1030	37,4	1395	50,6
3884	41	4312	45,6



● **Tipos de motores de c.i. alternativos (II)**

- Existe otra clasificación:
  - Ciclo simple: motores que no aprovechan la capacidad de cogeneración (tiempos de arranque < 1min), ej generadores de backup o generadores de pico.
  - CHP: aprovechan el calor residual para generar vapor (<50% de la energía térmica, i.e. peor que cualquier turbina) o agua caliente
- Aprovechamiento de la energía
  - 30% energía mecánica
  - 30% refrigerante
  - 15% en los gases de salida
  - Resto en pérdidas: radiación, gases,.....

Tipo de MCI	Rango de Eficiencia (%)
Gas Natural	28-42%
Gasoil	30-50%
CHP	80-85%





### ● Motores de c.i. alternativos (III): costes

- Coste total instalado (puede suponer entre un 50-100% de aumento respecto al precio del motor, i.e de 700 a 1200\$/kW)
- Mantenimiento: cada 700-1000h de uso (0,005-0,01\$/kWh), siendo más baratos los que utilizan GN

Potencia (kW)	Combustible	Coste capital (€/kW)	O y Mant. (€/kW)
50	Gasolina	350	40
250	Diesel	436	16
1000	Diesel	352	1,4
1100	Gas Nat.	438	2,0



## ● Motores de c.i. alternativos (IV)

Ventajas	Inconvenientes
Baja inversión de capital	Nivel alto de emisiones
Buenas eficiencias en conversión de Energía	Nivel excesivo de ruido (>70dB)
Fácil arranque	Mantenimiento frecuente
Flexibilidad combustible	
Alta fiabilidad	
Baja presión del combustible (en el caso de GN)	



## ● Fabricantes de motores MCI

- DTE energy technologies
- Power Plus Technologies GmbH
- Cummins
- Generac Power Systems
- Honda Power Equipment
- Kohler Generators

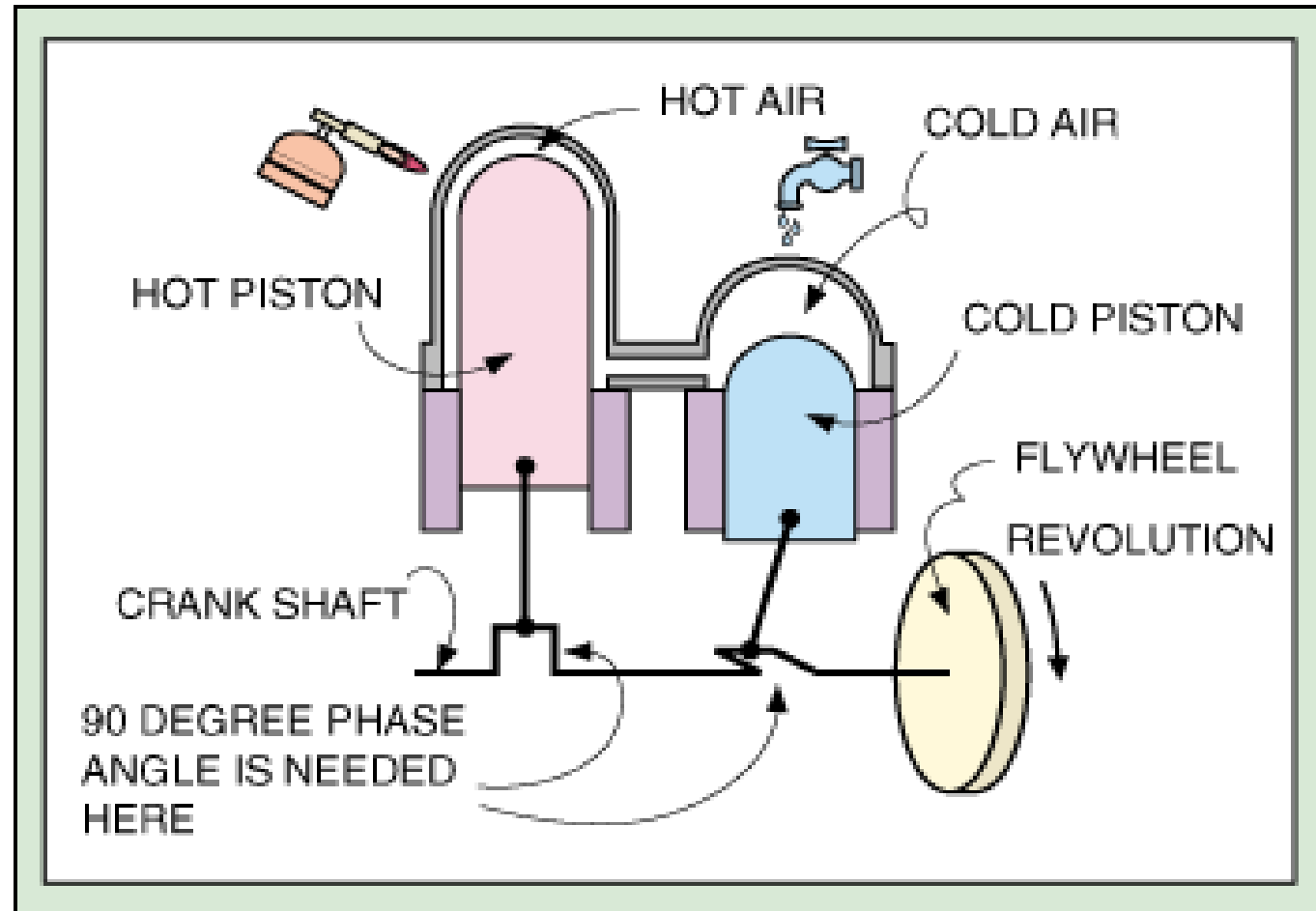


## ● Motores Stirling (I)

- Combustión externa (sistema sellado)
- Fluido de trabajo: He, H
- Pequeño tamaño 1-25kW
- Disponibles 2005-2010
- 12-30% eficiencia
- Bajas emisiones



## Motores Stirling (II)



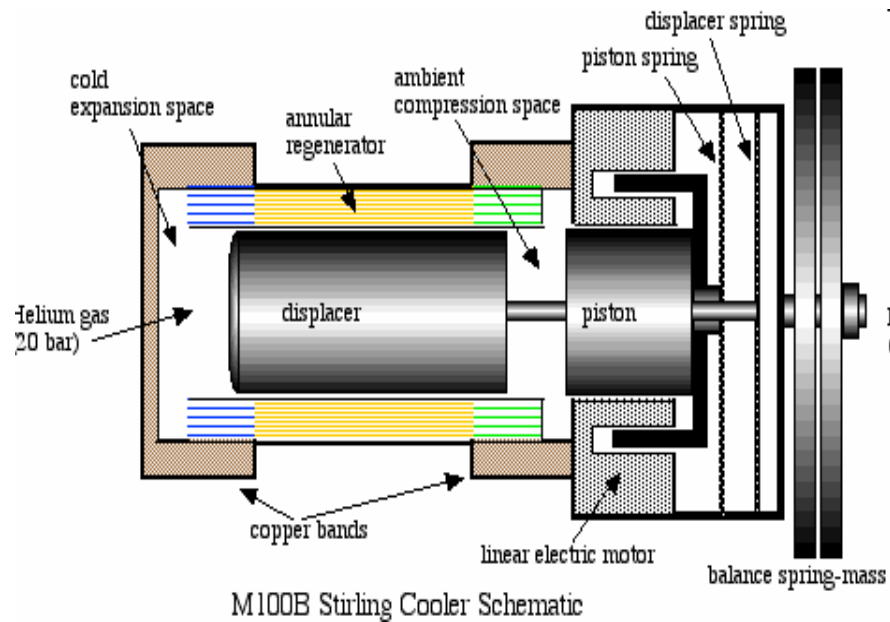
## ● Proyectos piloto y desarrollos comerciales

- SunCatcher (25kW). Source: Stirling Energy Systems
- Sandia Lab: evalúa 5 “SunCatcher” desde 2005
- Planta Maricopa, Arizona, 2010, EEUU (1.5MW, 60 und.)



### ● Motores Stirling (III): más aplicaciones

- Concentrador solar de 100kW en la University of California(Boeing)
- Diferentes tipos de vehículos
- Producción de frío (source: ProCooling)



## ● Motores Stirling (IV)

Ventajas	Inconvenientes
Sin vibraciones	Alto coste (10000 a 50000€/kW)
Bajas emisiones	Baja eficiencia (¿30% en el futuro?)
Pocas partes móviles: simplicidad mecánica	No puede cambiar su potencia con rapidez
Gran cantidad de combustibles primarios	
Vida útil elevada (6 años en “continua”)	





## ● Pilas de combustible (Fuel-cells) (I)

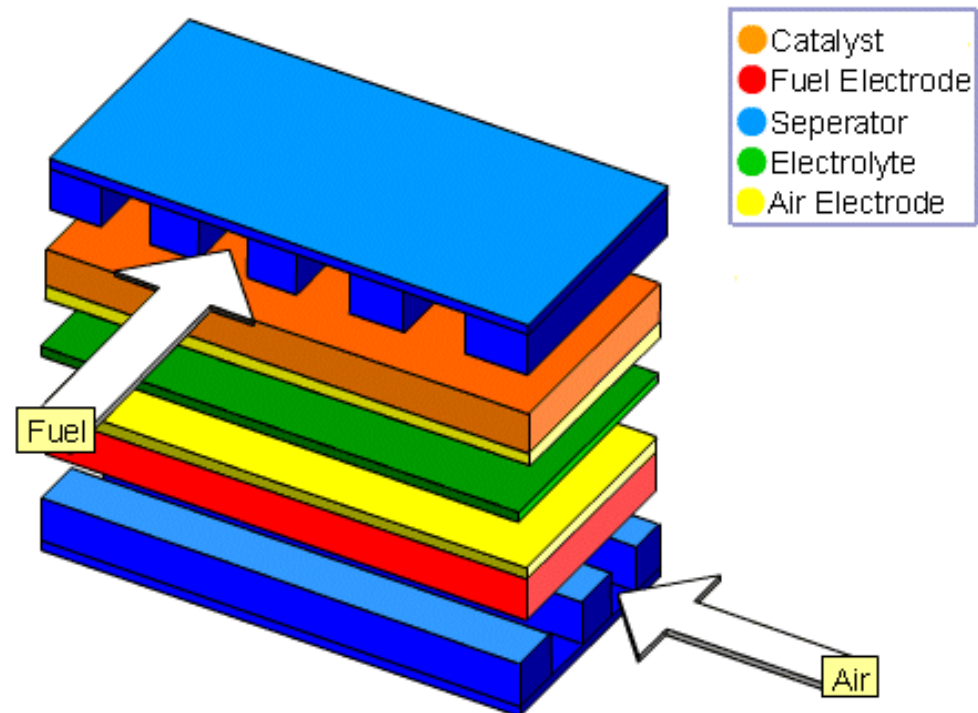
- No son un nuevo concepto (100 años)
- Las primeras aplicaciones: programa espacial Apolo
- Aplicaciones espaciales y militares
- Futuro: prometedor..., que nunca acaba de llegar



## ● Pilas de combustible (Fuel-cells) (II)

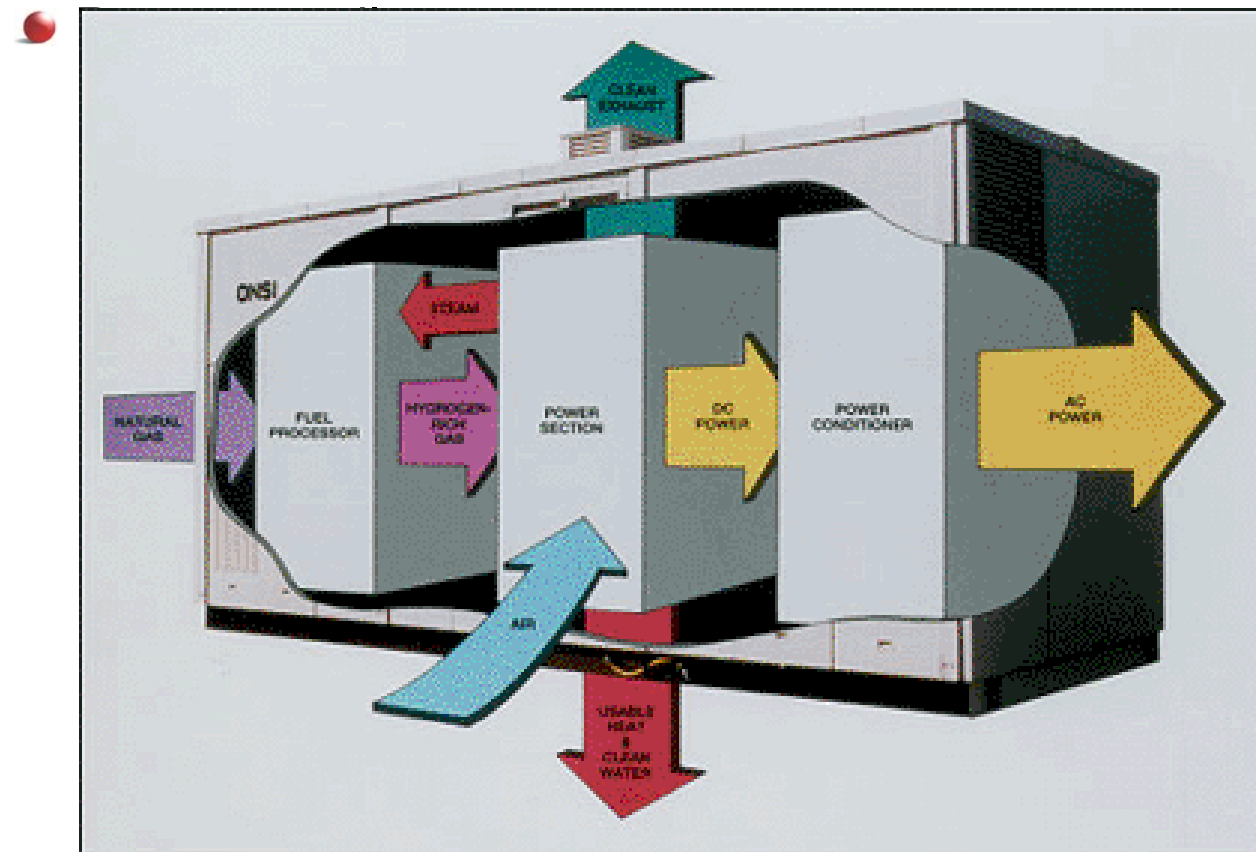
- Funcionamiento similar a una batería (reacción electroquímica sin combustión)
- Los reactantes son gases (hidrógeno/aire)
- El combustible es preprocesado para obtener  $H_2$

Generic Fuel Cell



## ● Pilas de combustible (Fuel-cells) (III): tipos

- PAFC (phosphoric acid), PEM (proton exchange membrane); AFC (alkaline); MCFC (Molten carbonate); SOFC (Solid Oxide)
- Eficiencia: del 35-55%; Potencia: 1 a 250kW



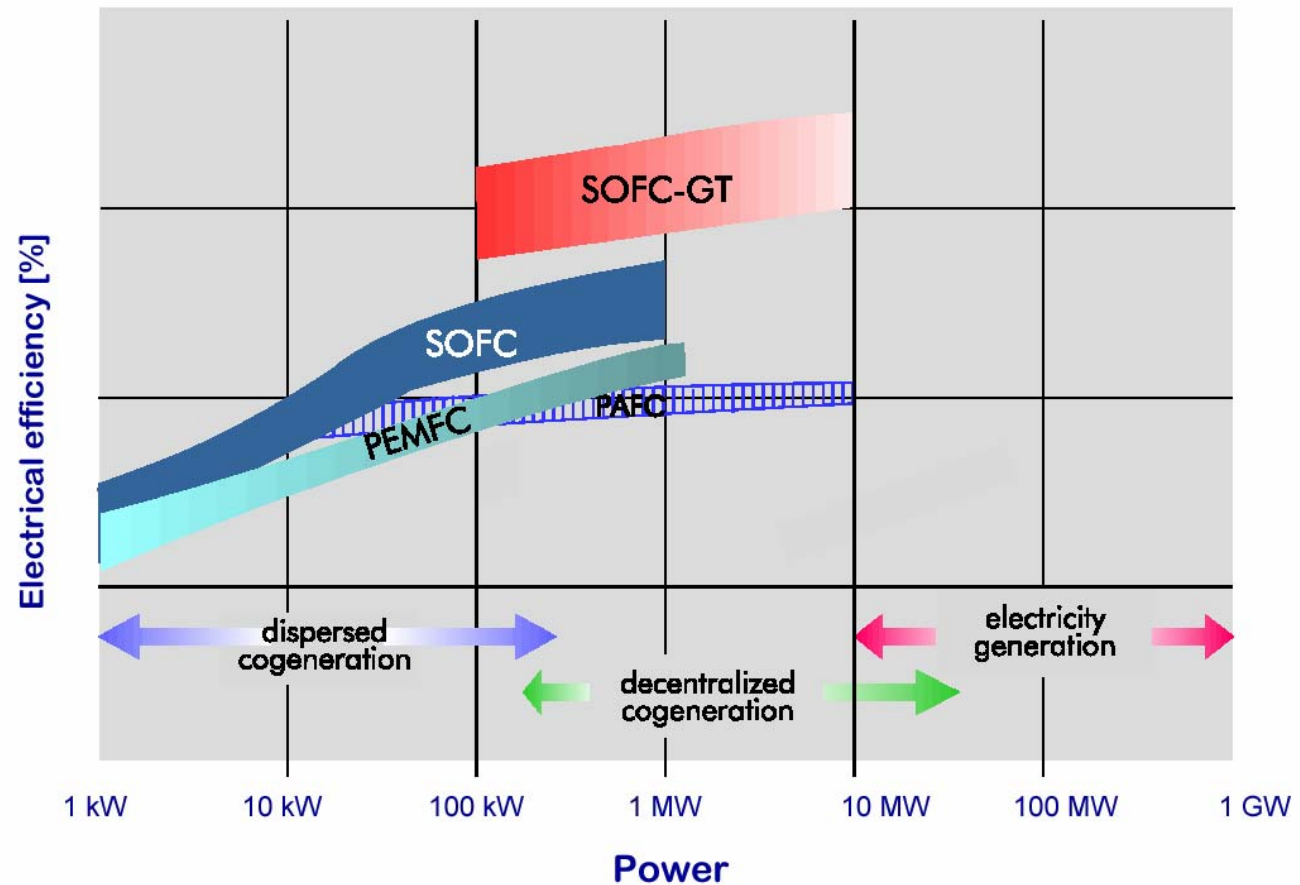
● Pilas de combustible (Fuel-cells) (IV): tipos

Tipo	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
P(kW)	1-10 (R)/ 75-250 (C)	25-100	200	250	3-10 R/ 250 (C)
T <sup>a</sup> (C)	80-100	80-100	200-400	600-700	600-1100
η (%)	35-50	50-60	40	45-65	50-70
Nivel comercial	Inicial	bajo	Bajo	Bajo	Inicial
Aplicaciones	Vehículos, R, C, DG, Portátil G	Vehículos, R, C; DG	R, C, DG	R, C, DG	R, C, DG

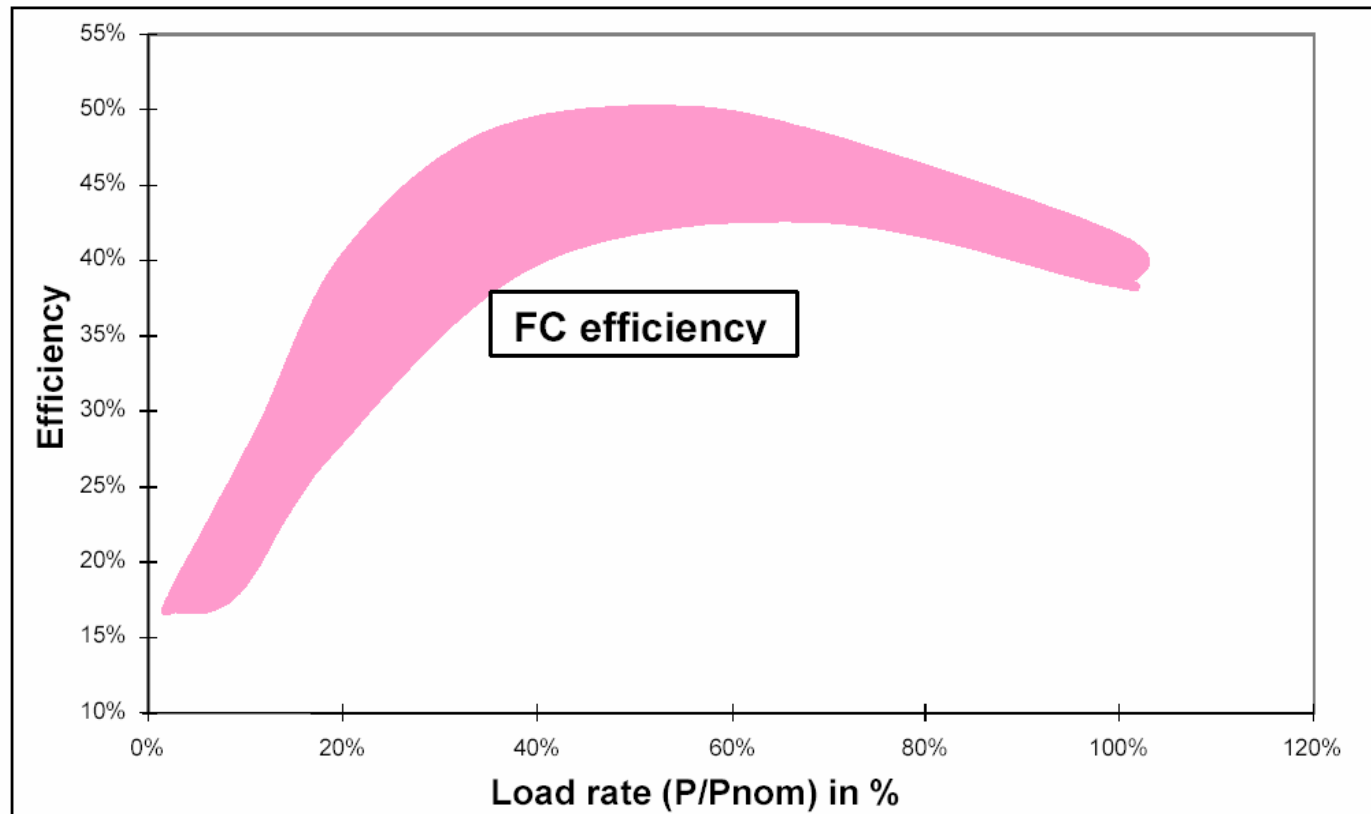
● Edificios: R: Residencial; C: Comercial



● Pilas de combustible: eficiencia y rango de uso por tecnología (Fte. Alstom)



- **Pilas de combustible: eficiencia en función de la carga (¡interesante en aplicaciones!)**



## ● Pilas de combustible (V): fabricantes

- PEMFC: Teledyne, Plug Power, General Motors
  - Amplio rango de aplicaciones (portátiles, automóviles, residencial, comercial, iluminación industrial)
  - Bajas temperaturas ► rápido arranque
  - Madurez de la tecnología: ¿2010?
- PAFC: UTC Fuel Cells
- MCFC: Fuel Cell Energy
  - Algunas comercialmente disponibles
- AFC: Apollo Energy Systems
- SOFC: Ceramic Fuel Cells, ZTEK Corporation
  - Amplio rango: residencial, comercial e instalaciones industriales (5-250kW)
  - Altas temperaturas (1000C) ► arranque lento (5-10h en algunos momentos)
  - Madurez de la tecnología: ¿2015?



## ● Pilas de combustible (V): resumen

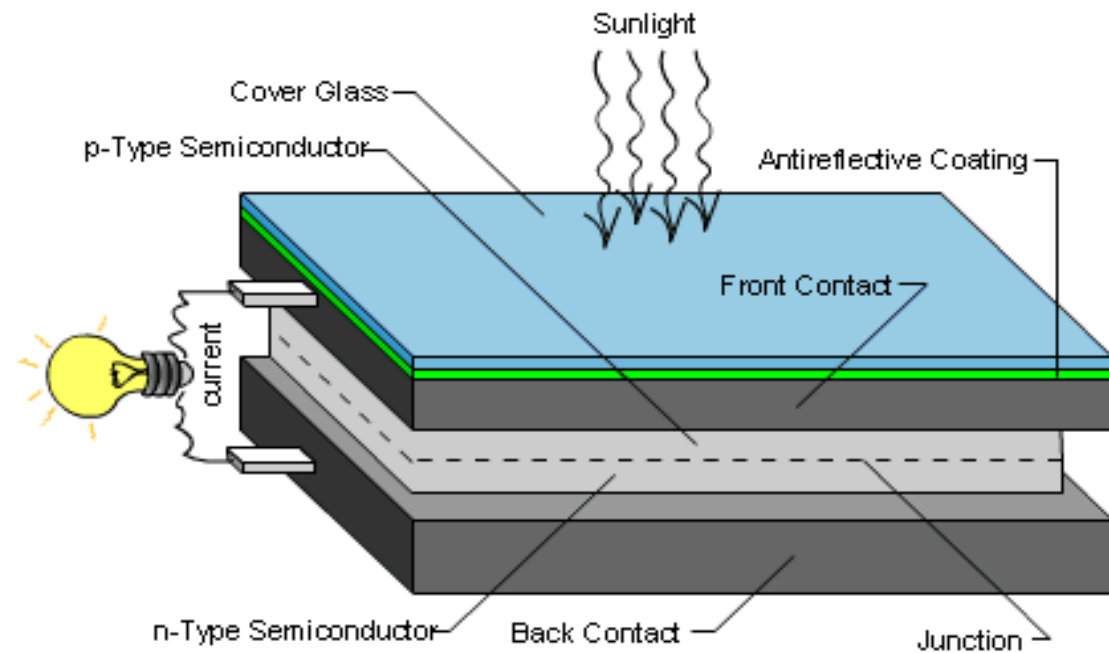
Ventajas	Inconvenientes
Vida útil elevada (PAFC y SOFC > 20000h)	Vida útil muy escasa (PEMFC, MCFC, a veces < 3000h)
Silenciosas	Costes
Bajas emisiones	Experiencia práctica: muy reducida salvo en algunas tecnologías (PAFC)





## ● Sistemas fotovoltaicos (I)

- Disponibles comercialmente
- Rango de potencias: 1kW a 100kW
- Eficiencia: 5-15%
- No tienen emisiones
- Disponibles comercialmente (sistemas avanzados en fase de desarrollo)



● **Sistemas fotovoltaicos (II)**

● ¿¿¿Futuro??? Concentradores solares

Ventajas	Inconvenientes
Bajas emisiones	Condiciones ambientales afectan al bajo rendimiento
Simplicidad	Costes: 4€/W (4000€/kW)
Gran cantidad de combustibles primarios	Costes adicionales: control de los paneles, soporte, baterías, dispositivos de conversión (BOS: balance of system): 6000 a 10000€/kW instalado
Vida útil elevada	



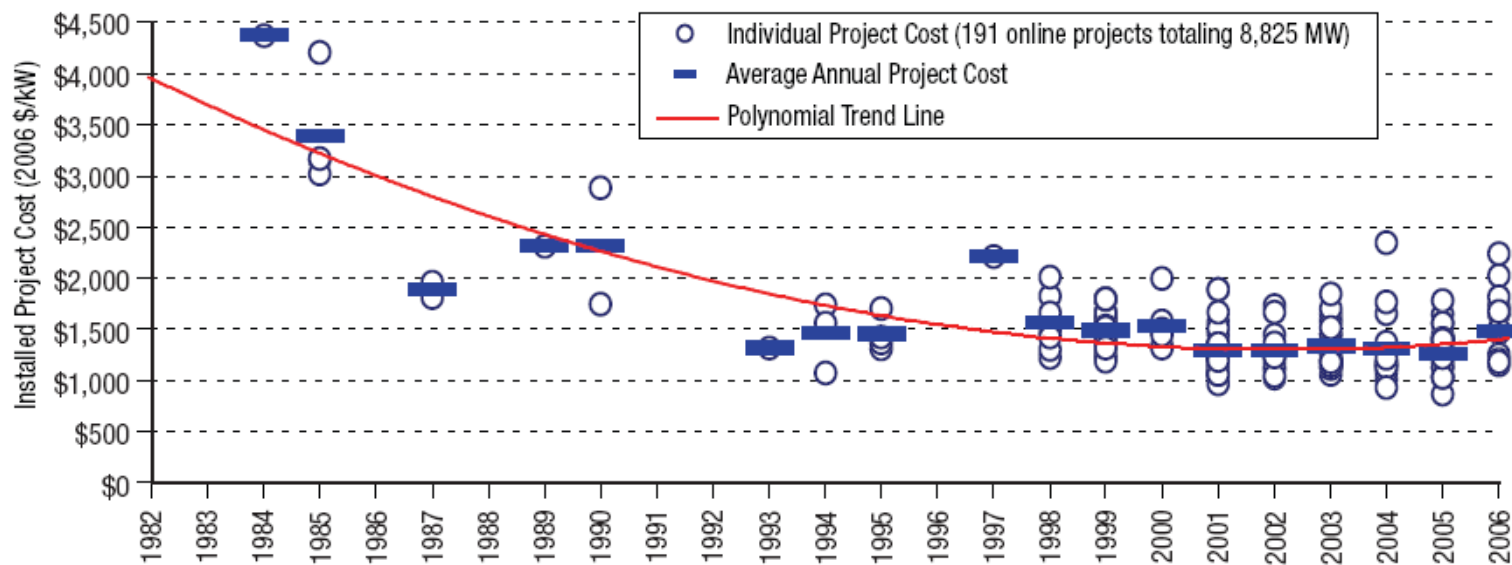
## ● Sistemas eólicos (I)

- Probablemente la mejor energía renovable
- Potencias: algunos kW a 5MW
- Eficiencia: 20-40%
- Varios tamaños, sistemas, velocidades,.....



## ● Hay una reducción de costes evidentes en nuevos proyectos eólicos

● Source: Informes, Lawrence Berkeley Nat. Lab, USA & US DoE



## ● Sistemas eólicos (II)

- Los grandes aerogeneradores están en el umbral de la rentabilidad. Coste de instalación 1000€/kW
- Coste de producción: 3 a 6 cent. €/kWh

Ventajas	Inconvenientes
Bajas emisiones y coste de la energía	La generación de potencia es variable
Mínimo uso de terreno	Localización
	Impacto visual: imposibles de ubicar en zonas habitadas
	Mortalidad de aves

