

# CONVERSIÓN TÉRMICA DE ENERGÍA SOLAR

Sistemas Concentradores con Imagen  
Buenos Aires – Abril 2005



Roberto Román L.  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad de Chile  
Casilla 2777 – Santiago – Chile  
[roroman@ing.uchile.cl](mailto:roroman@ing.uchile.cl)

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Estructura Presentación

- ◆ Energía y Desarrollo
- ◆ Energías no renovables
- ◆ Consumo energía en Chile
- ◆ Las energías renovables en Chile
- ◆ El por qué de sistemas de concentración

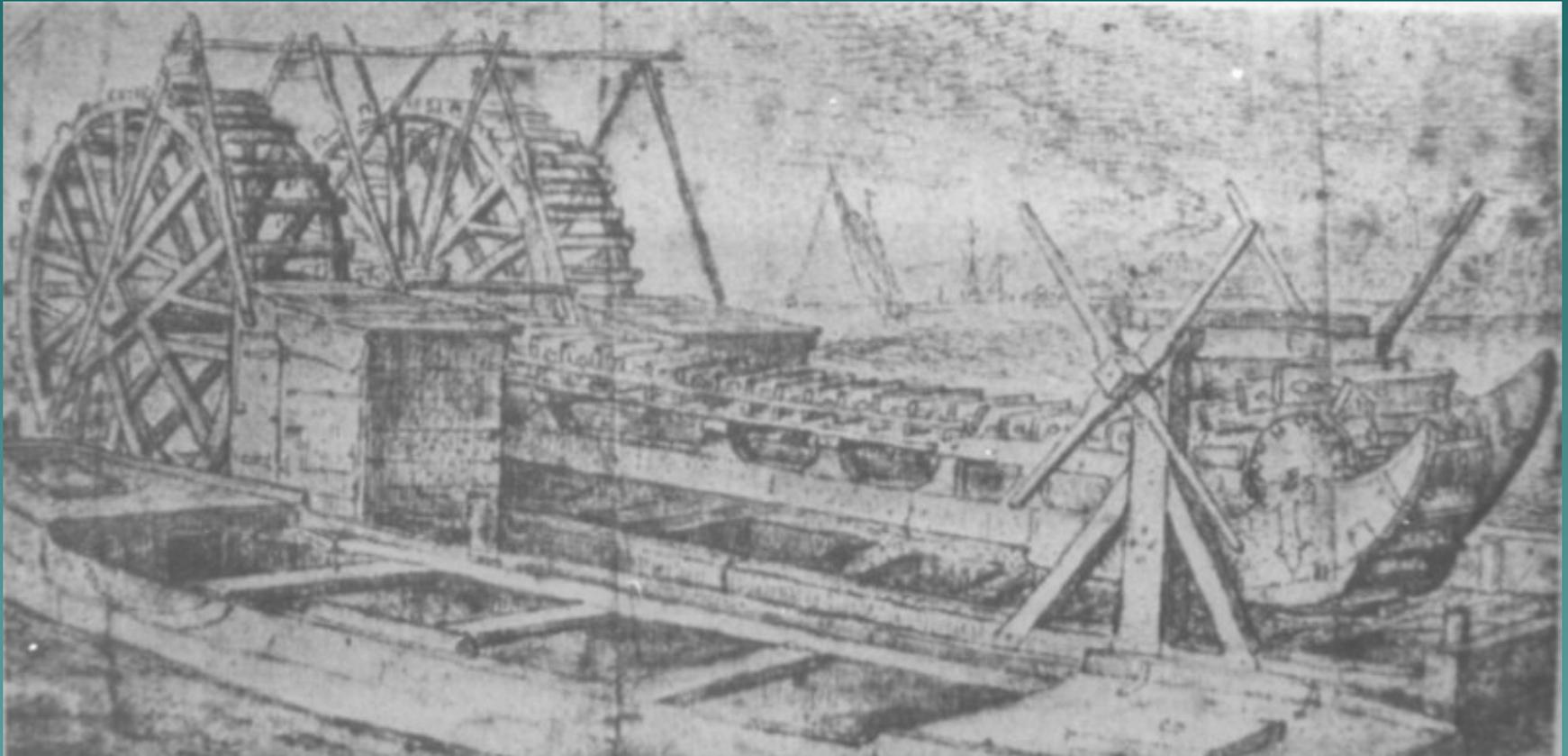
# Energía y Desarrollo

- ◆ El hombre necesita energía para subsistir, manejar su entorno y producir bienes. En su nivel más primitivo necesitaremos al menos energía para no morirnos de hambre.
- ◆ Hasta la Revolución Industrial las fuentes de energía con las que contó el ser humano eran muy limitadas.
- ◆ Estas eran: *Energía muscular; energía térmica; energía hidráulica; energía eólica.*

# Energía y Desarrollo

- ◆ Al disponer de tan pocas fuentes, el *desarrollo* estaba limitado y esto a su vez limitó la población del planeta. A comienzos de la Revolución Industrial la población del planeta estaba por debajo de los 800 millones de habitantes.
- ◆ La *máquina* surge como respuesta a fuertes limitantes de combustibles “tradicionales” (leña) los que habían sido depredados como consecuencia del descubrimiento de América.
- ◆ Este mismo descubrimiento llevó a un aumento poblacional al mejorar opciones de dieta en Europa.

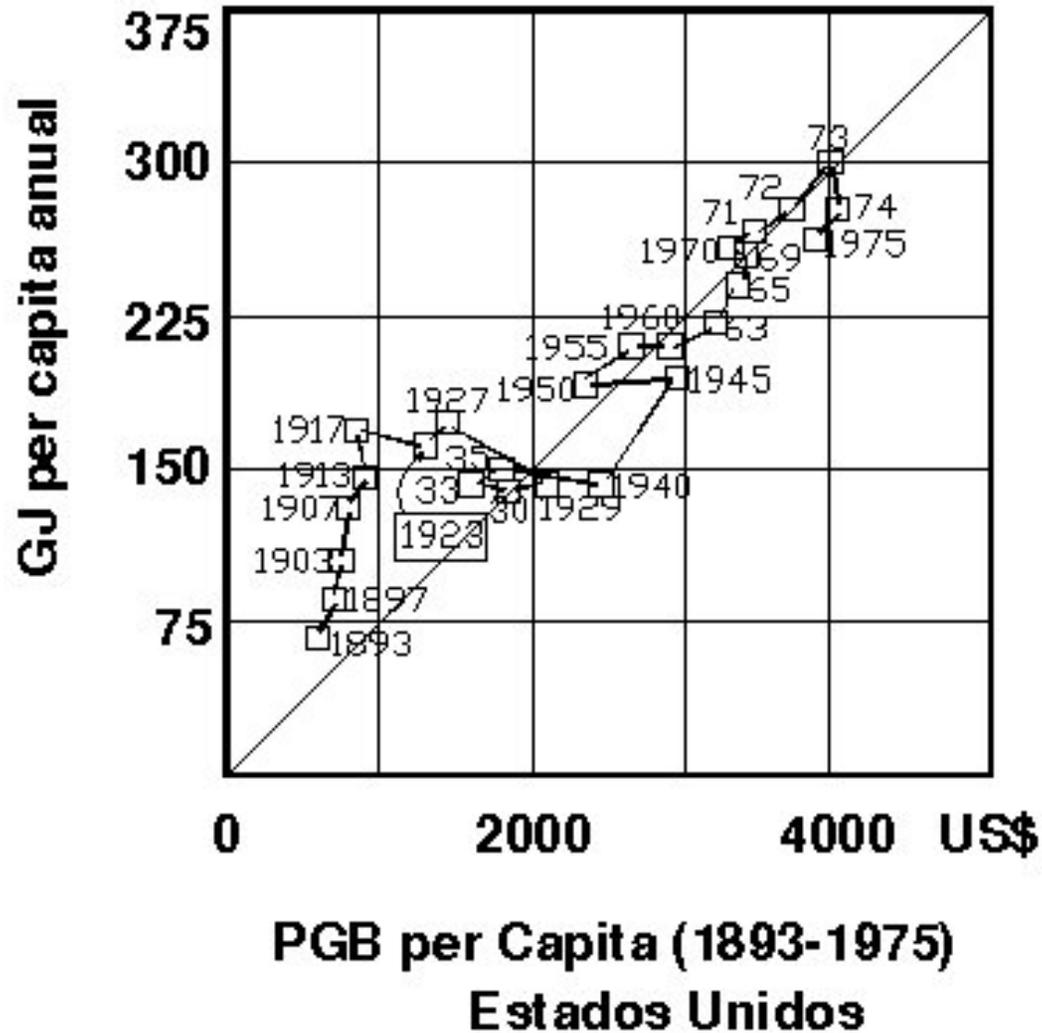
# Energía y Desarrollo



# Energía y Desarrollo

- ◆ Existe una *correlación* entre el consumo bruto de energía de una sociedad y su nivel de desarrollo (expresado por ejemplo a través de PNB).
- ◆ Esta correlación tiene que ver con *consumo bruto, estado de desarrollo y tecnología*.

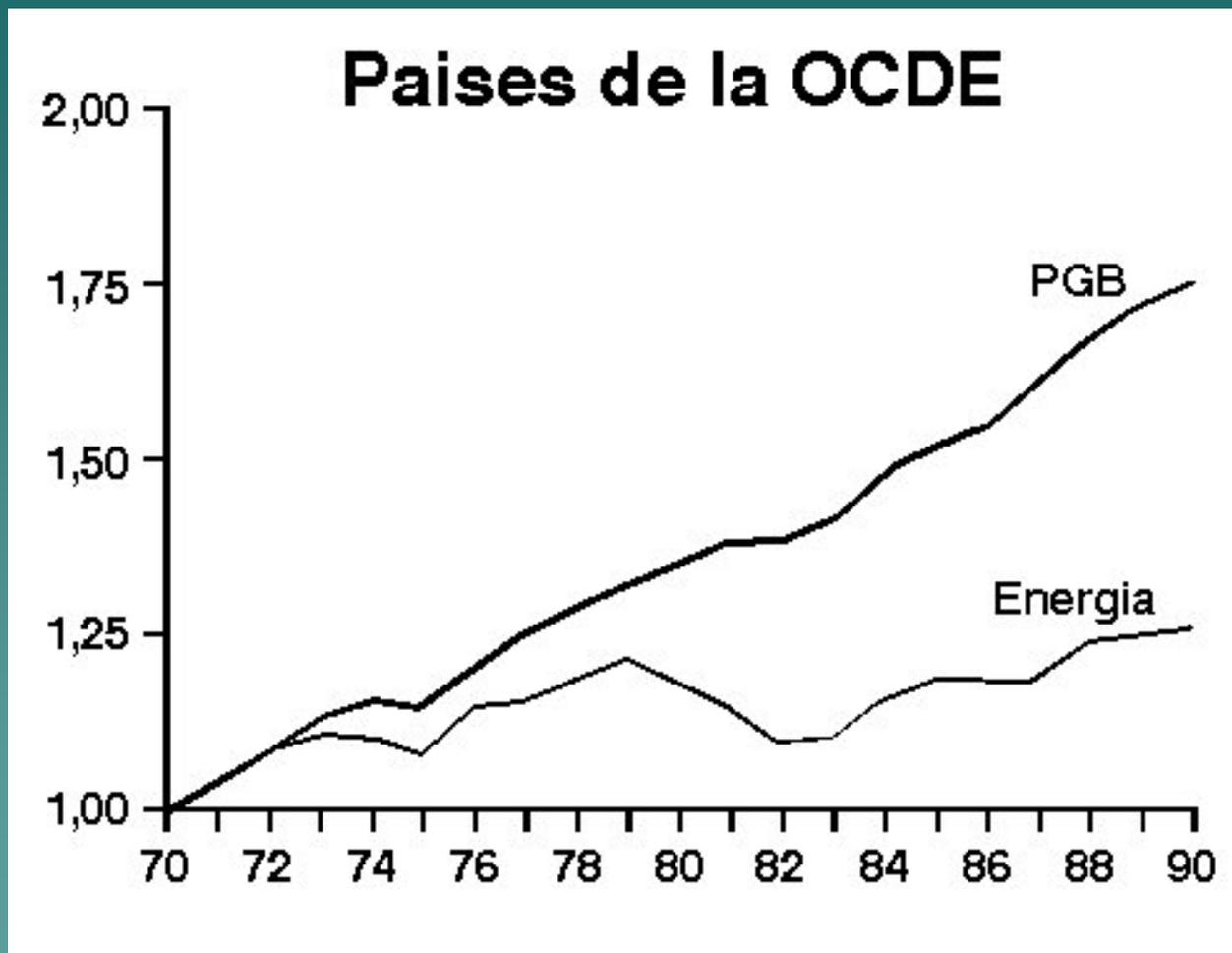
# Energía y Desarrollo



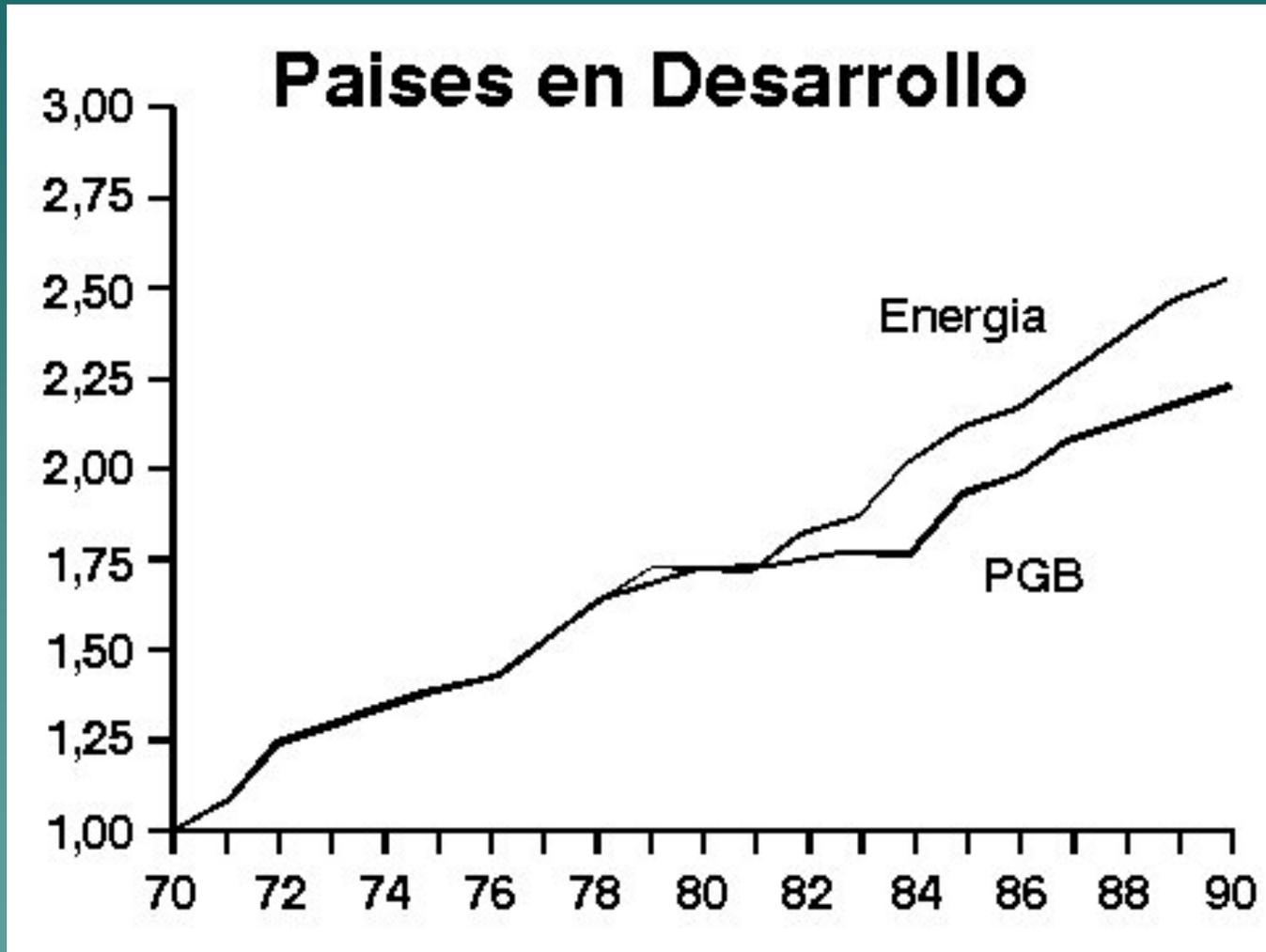
# Energía y Desarrollo

- ◆ Un primer gran *quiebre* de las tendencias de que *“todo está bien”* se produce en 1973.
- ◆ Además se comienza a incorporar al proceso países que no estaban desarrollados
- ◆ Para los países ya desarrollados se comienza a producir un *cambio* en cuanto a modelo de desarrollo.

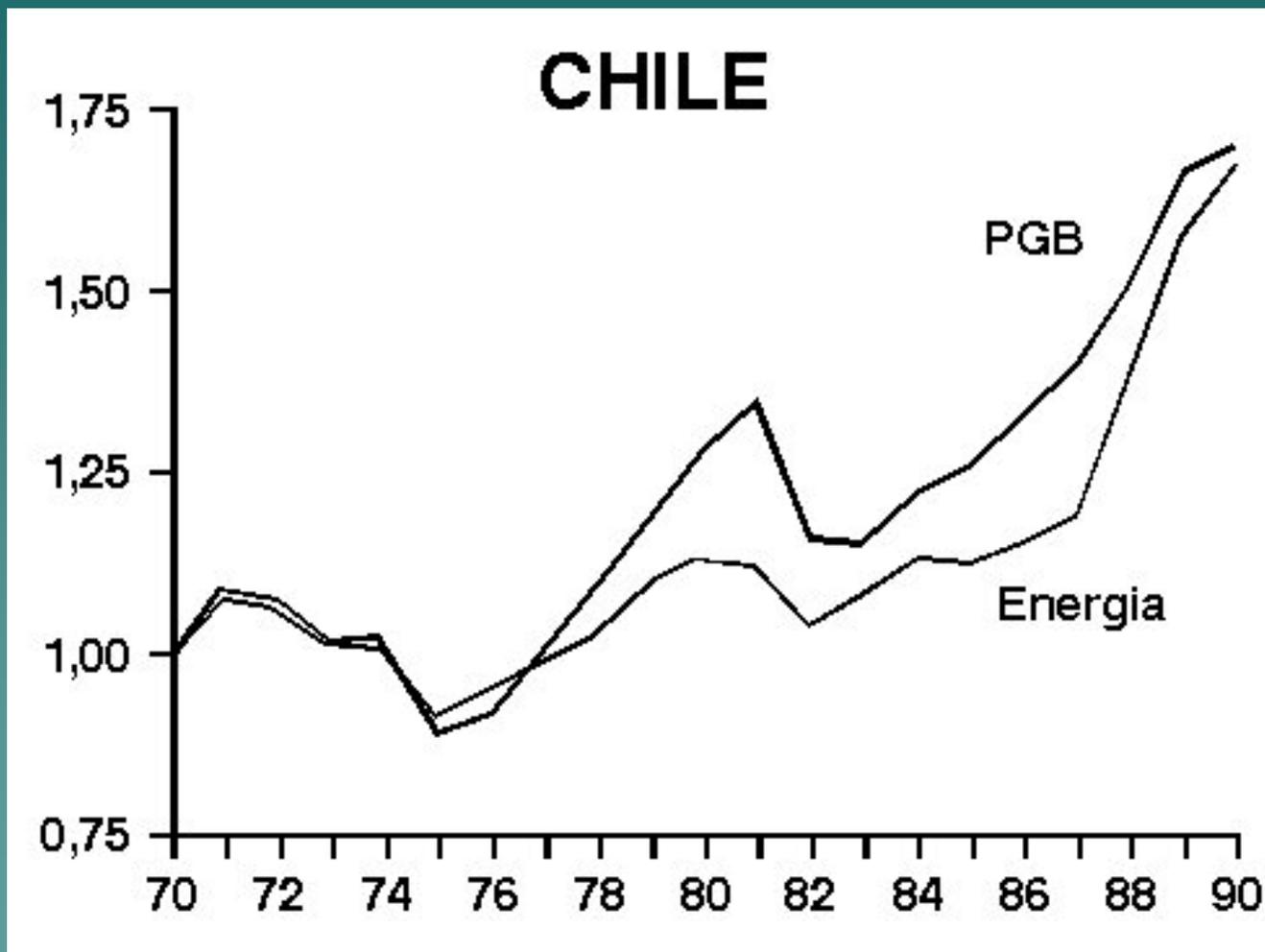
# Energía y Desarrollo



# Energía y Desarrollo



# Energía y Desarrollo



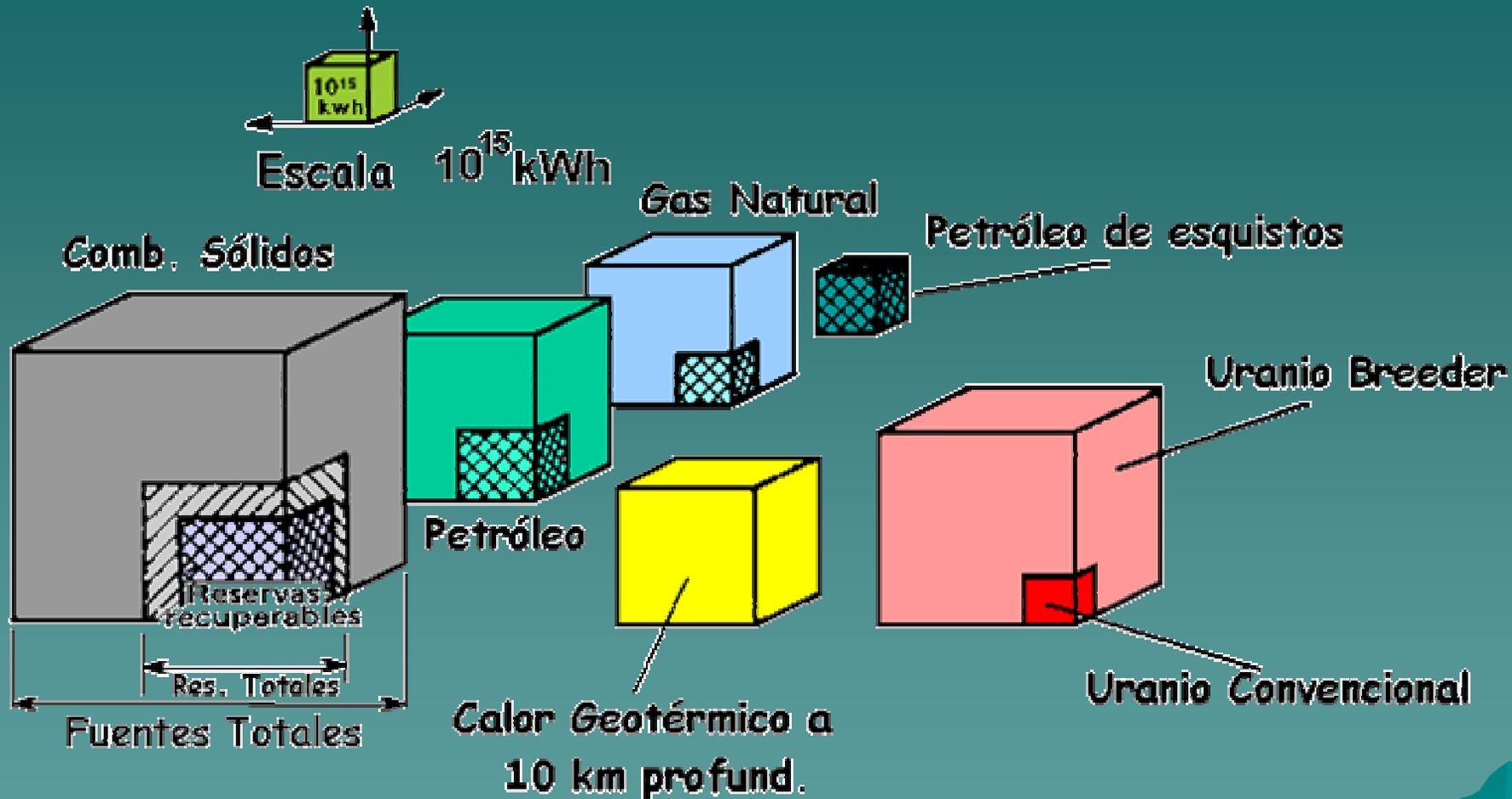
# Situación de Recursos no Renovables

Hoy día dependemos fundamentalmente de las fuentes no renovables de energía: petróleo, gas natural, energía nuclear.

Veamos órdenes de magnitud relativos de las reservas totales estimadas:

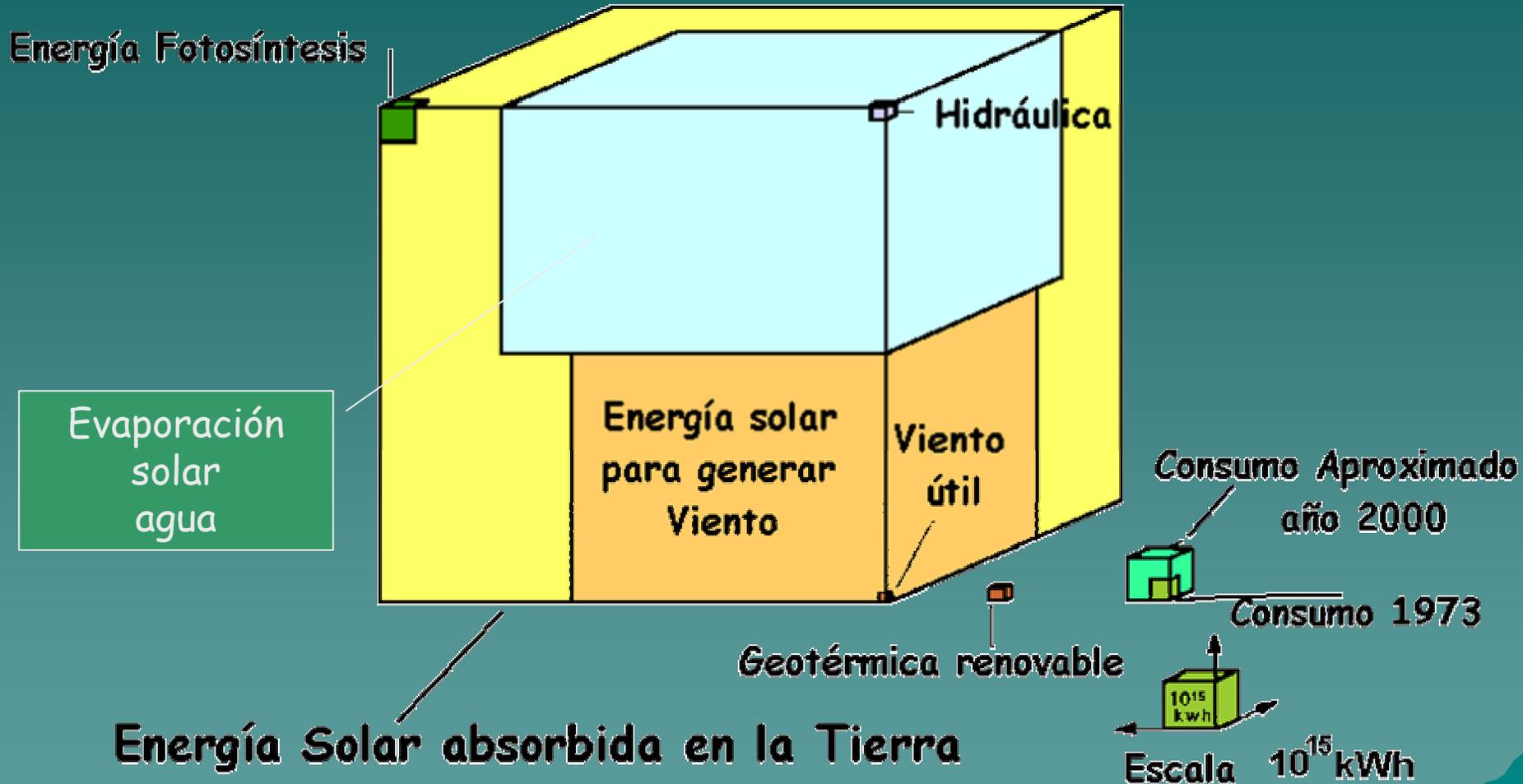
- ◆ Carbón:  $8,65 \times 10^{16}$  kWh
- ◆ Petróleo:  $2,14 \times 10^{16}$  kWh
- ◆ Gas Natural:  $1,23 \times 10^{17}$  kWh
- ◆ Fisión Nuclear (LWR):  $5,18 \times 10^{14}$  kWh
- ◆ Fisión (breeder):  $3,2 \times 10^{16}$  kWh

# Panorama Energético Mundial



Comparación relativa entre fuentes no renovables

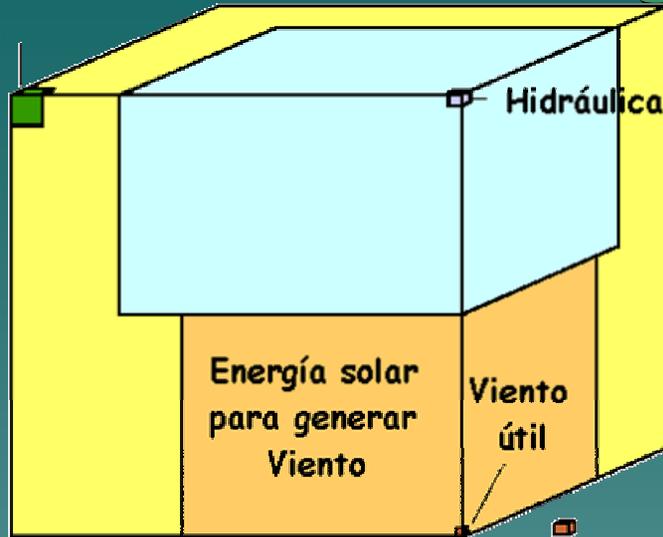
# Panorama Energético Mundial



## Comparación con fuentes renovables

# Panorama Energético Mundial

Energía Fotosíntesis



Consumo Aproximado año 2000

Consumo 1973



Geotérmica renovable

Energía Solar absorbida en la Tierra

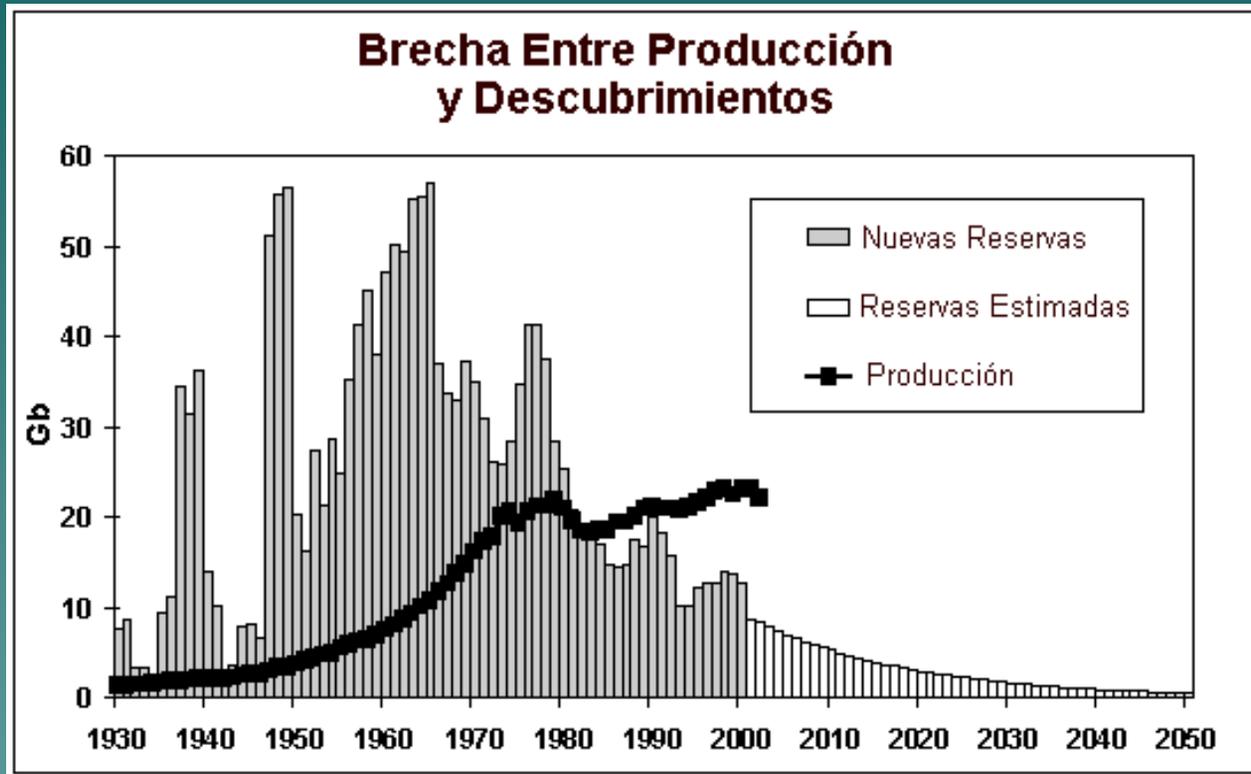


Comparación todas las fuentes

Fuentes Totales  
Primera Escuela Argentina de Energías Renovables

Calor Geotérmico a 10 km profund.

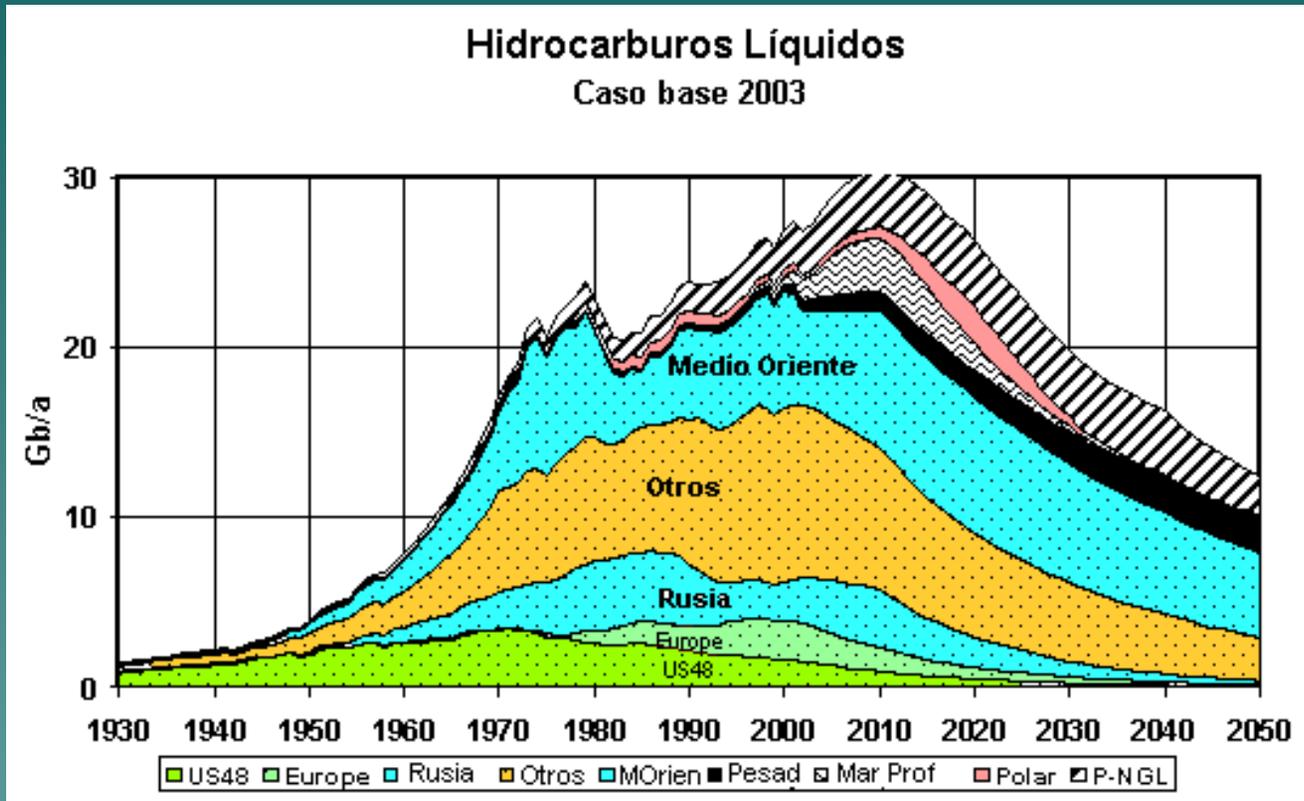
# Desafío Energético en el Siglo XXI



Esta brecha indica que nuevas reservas de hidrocarburos son cada vez más escasas.

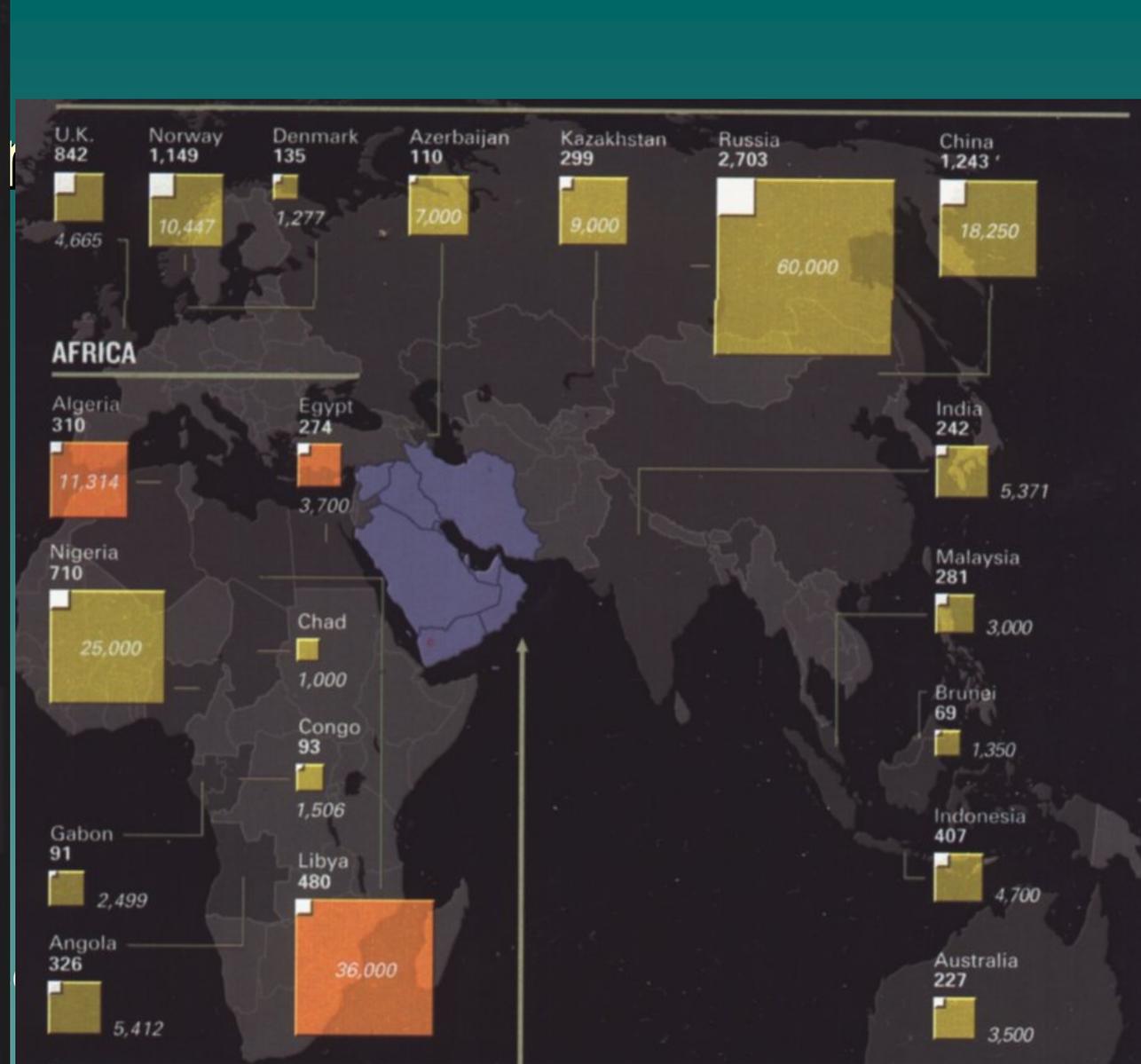
Fuente: [www.aspo.net](http://www.aspo.net)

# Desafío Energético en el Siglo XXI

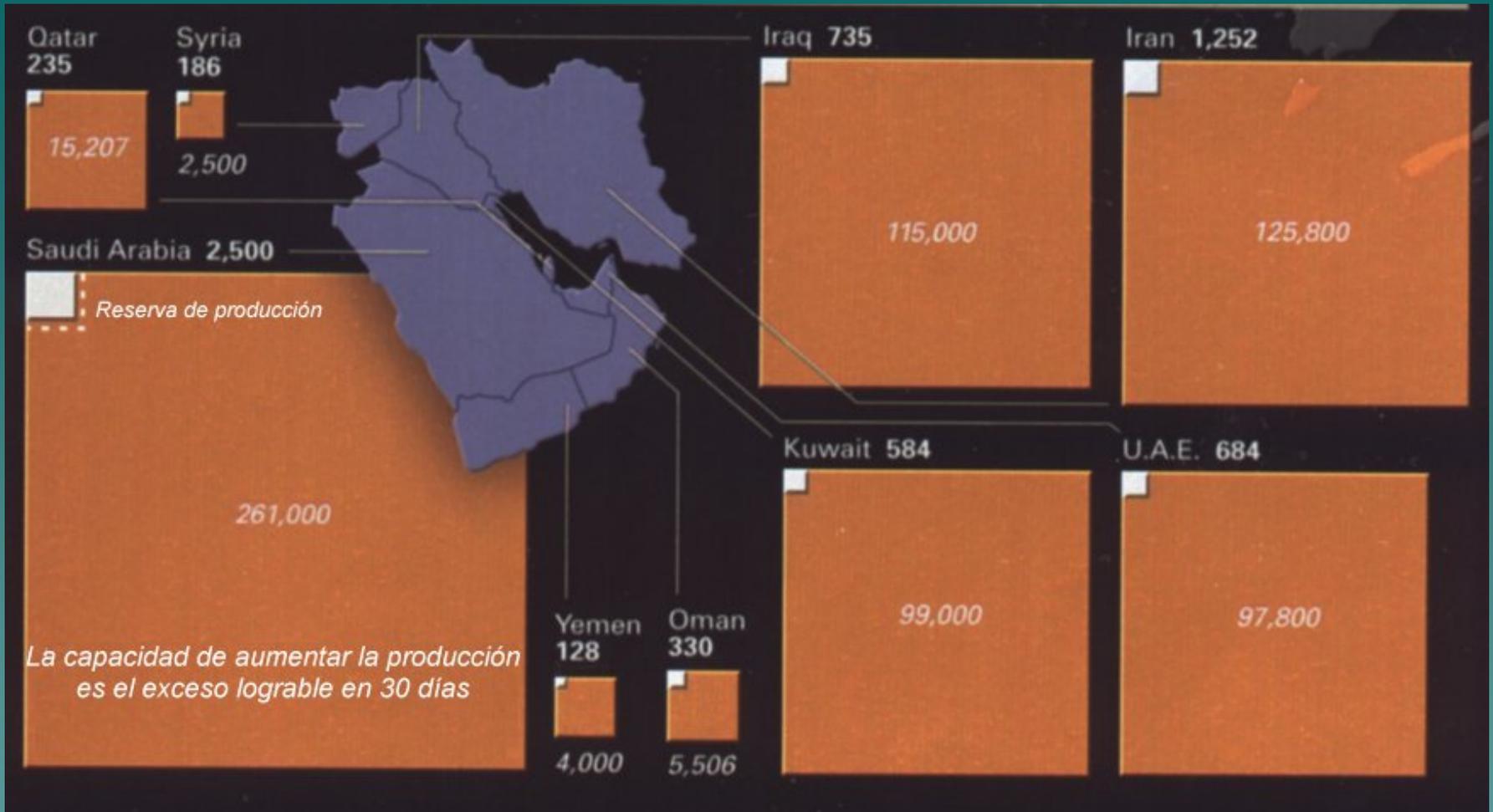


La mayor parte de los analistas coincide que, todo el planeta salvo Medio Oriente ha entrado en fase de producción decreciente ya o esto ocurrirá hacia el 2006

Fuente: National Geographic y ASPO



Fuente: National Geographic



Solamente en Oriente Medio existe la posibilidad de aumentar la producción de manera significativa

Fuente: National Geographic

# Desafío Energético en el Siglo XXI

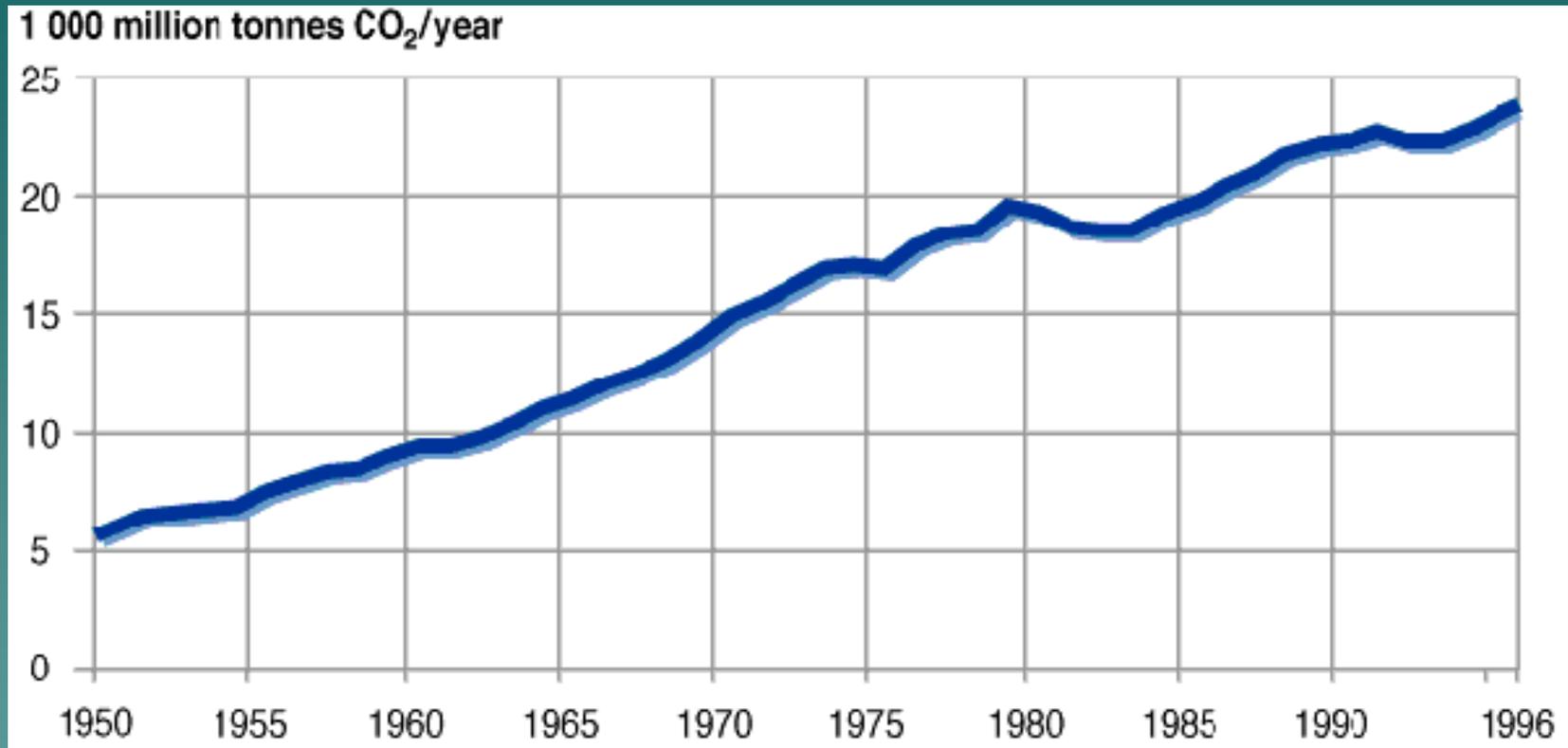
En el caso del Gas Natural la situación ha cambiado enormemente. Hasta 1985 su consumo era modesto. Desde ese momento se comienza a utilizar masivamente para generación eléctrica (plantas de Ciclo Combinado) y el consumo se ha multiplicado en factores que van de 10 a 30 veces el antiguo.

Además se ha transformado en “commodity”, susceptible de ser comercializado como GNL (Gas Natural Licuado).

Solamente el carbón tiene posibilidades de aumentar fuertemente su producción. Pero los problemas ambientales ligados a su uso son bien conocidos...

Fuente: National Geographic y ASPO

# Desafío Energético en el Siglo XXI



La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es hoy la más alta en más de 260.000 años.

# Desarrollo y Medio Ambiente:



Manquehue

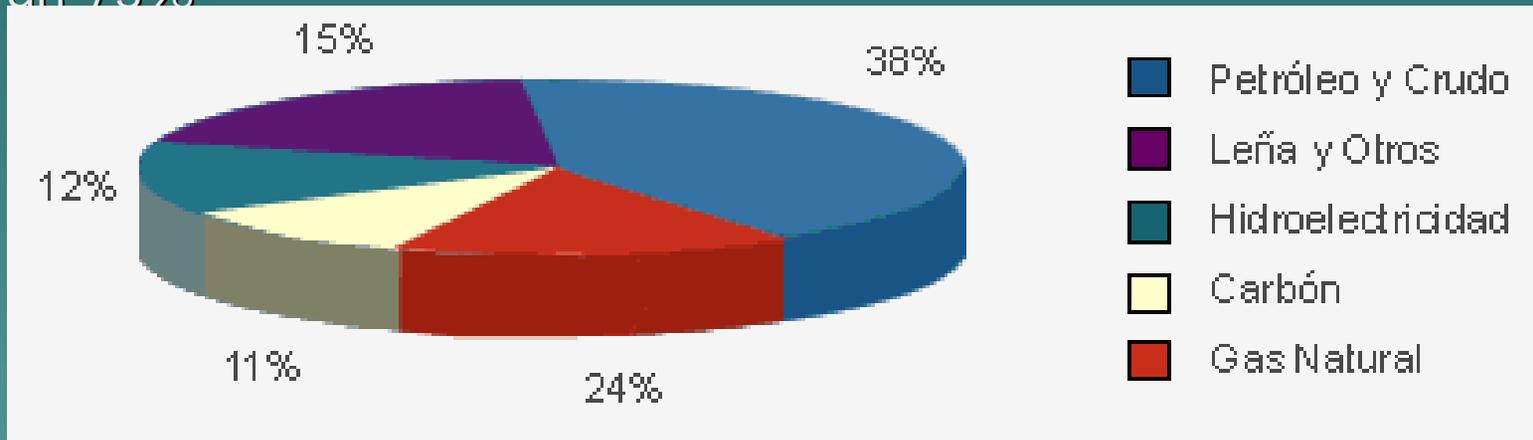
Cerro El Plomo

Santiago está entre las 10 ciudades más contaminadas del mundo (aunque mejorando).

# Sistema Energético Chileno

Chile ha tenido una política energética basada en un mercado abierto y que depende fundamentalmente de los combustibles fósiles.

A nivel de energía secundaria la dependencia en los fósiles es de un 73%



El Gas Natural, que era marginal antes de 1997, hoy representa el 24% de la energía secundaria.

# Sistema Energético

- ◆ El 27% del consumo de energía secundaria del país proviene de fuentes renovables.
- ◆ Si a lo anterior se suma que otro 24% viene de gas natural, el más "limpio" de los combustibles fósiles, tenemos una matriz energética bastante limpia.
- ◆ En comparación con otros países, nuestras emisiones de CO2 son relativamente bajas.
- ◆ El gasto anual en importación de hidrocarburos ya supera los US\$ 2.500 millones (cifras 2003, ahora estamos sobre los 4.000 millones).
- ◆ Esto es más de 167 dólares al año por habitante del país.

# Sistema Energético

En lo referente a **consumos** de energía, los podemos dividir en los siguientes subsectores:

- ◆ **Sector Industrial:** depende esencialmente de un abastecimiento eléctrico seguro y oportuno, además, hay subsectores que dependen de otros combustibles energéticos tales como los derivados del petróleo, gas natural o carbón.
- ◆ **Sector Comercial:** incluye el área de comercio y servicios. Para su desarrollo es esencial el abastecimiento seguro en energía eléctrica.
- ◆ **Sector Transporte:** el consumo de energía primaria en transporte se reparte en forma más o menos equivalente entre el transporte comercial y particular. El primero depende sobre todo, del petróleo diesel y el segundo, de las gasolinas.
- ◆ **Sector Residencial:** depende fundamentalmente de la energía eléctrica, y también ocupa energía térmica (gas y leña) tanto para calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos.

# Sistema Energético

En cuanto a ***abastecimiento*** de energía, este se logra a partir de:

- ◆ **Energía Eléctrica:** Abastecido por los Sistemas Interconectado Norte Grande (SING) y Sistema Interconectado Central (SIC) que cubren más del 80% de la demanda total de energía eléctrica del país, la cual se genera principalmente con hidroelectricidad, gas natural y carbón. A ellos se suman el Sistema de Aysén y el Sistema de Magallanes, los cuales son bastante menores desde el punto de vista de la matriz global.
- ◆ **Hidrocarburos:** Suministrados principalmente mediante petróleo diesel, gasolinas y en menor escala, gas natural. Los primeros son usados fundamentalmente en transporte mientras que el gas natural se destina para la generación de calor a nivel industrial, comercial y residencial.

A estos vectores, que tienen asociados sistemas de distribución bien establecidos, se suma la leña y otros recursos energéticos, los cuales constituyen cerca del 15% de la energía secundaria consumida en el país.

# Sistema Energético

La energía eléctrica es vector esencial.

- ◆ A diferencia de los otros sistemas, una falla produce una reacción en cadena con graves efectos productivos.
- ◆ El no disponer de energía eléctrica limita las posibilidades de desarrollo de una zona o sector.
- ◆ Una *falla* tiene costos mucho mayores de la simple pérdida de energía. El último apagón motivó una multa de US\$ 7,5 millones.

Además de ser vital, es vulnerable.

# Sistema Eléctrico Chileno

El sistema de abastecimiento eléctrico en Chile consta de cuatro subsistemas: El Sistema Interconectado Norte Grande (SING); el Sistema Interconectado Central (SIC); Sistema Aysén y Sistema Magallanes.

El proceso de expansión del SING se consolidó a fines de los '90, cuando varias centrales de ciclo combinado con gas natural comenzaron a competir con las centrales térmicas a carbón. A ello se sumó una línea de alta tensión desde Salta a Antofagasta y la construcción de dos gasoductos para abastecer las centrales de ciclo combinado.



# Sistema Eléctrico Chileno

Por su parte, el **SIC** cubre desde la III región hasta Chiloé y posee la mayor capacidad de generación y consumo a nivel nacional. Al igual que en el SING, la introducción del gas natural y el uso de centrales termoeléctricas de ciclo combinado cambiaron fuertemente este sistema en 1997.

Como veremos, es el sistema más vulnerable, pues su capacidad de generación está peligrosamente cercana a su consumo.



# Sistema Eléctrico Chileno

La zona central del SIC es la más reforzada. Su diseño es para abastecer, sobre todo, las necesidades de la Región Metropolitana y la V<sup>a</sup> Región

Un segundo nudo de importancia es en la 8<sup>a</sup> Región

Desde la 8<sup>a</sup> Región al sur el abastecimiento local es mucho más precario, con porcentajes de cobertura alto, pero de capacidad muy limitada.



# Sistema Eléctrico Chileno

Hacia el sur de la 8ª el sistema se torna menos robusto y redundante. Los ramales de las distribuidoras para abastecer necesidades locales son mucho más precarias.

Es precisamente en estas zonas extremas de las redes locales donde hay buenas oportunidades de generación por pequeños proyectos de mini hidro, biomasa, eólica y otras fuentes.

Finalmente, en cuanto a los sistemas Aysén y Magallanes, vemos que éstos tienen una generación de energía mucho menor. También los costos de la energía son mucho mayores para el usuario final. Sin embargo, su ampliación sustentable es necesaria para brindar oportunidades de desarrollo a estas regiones.

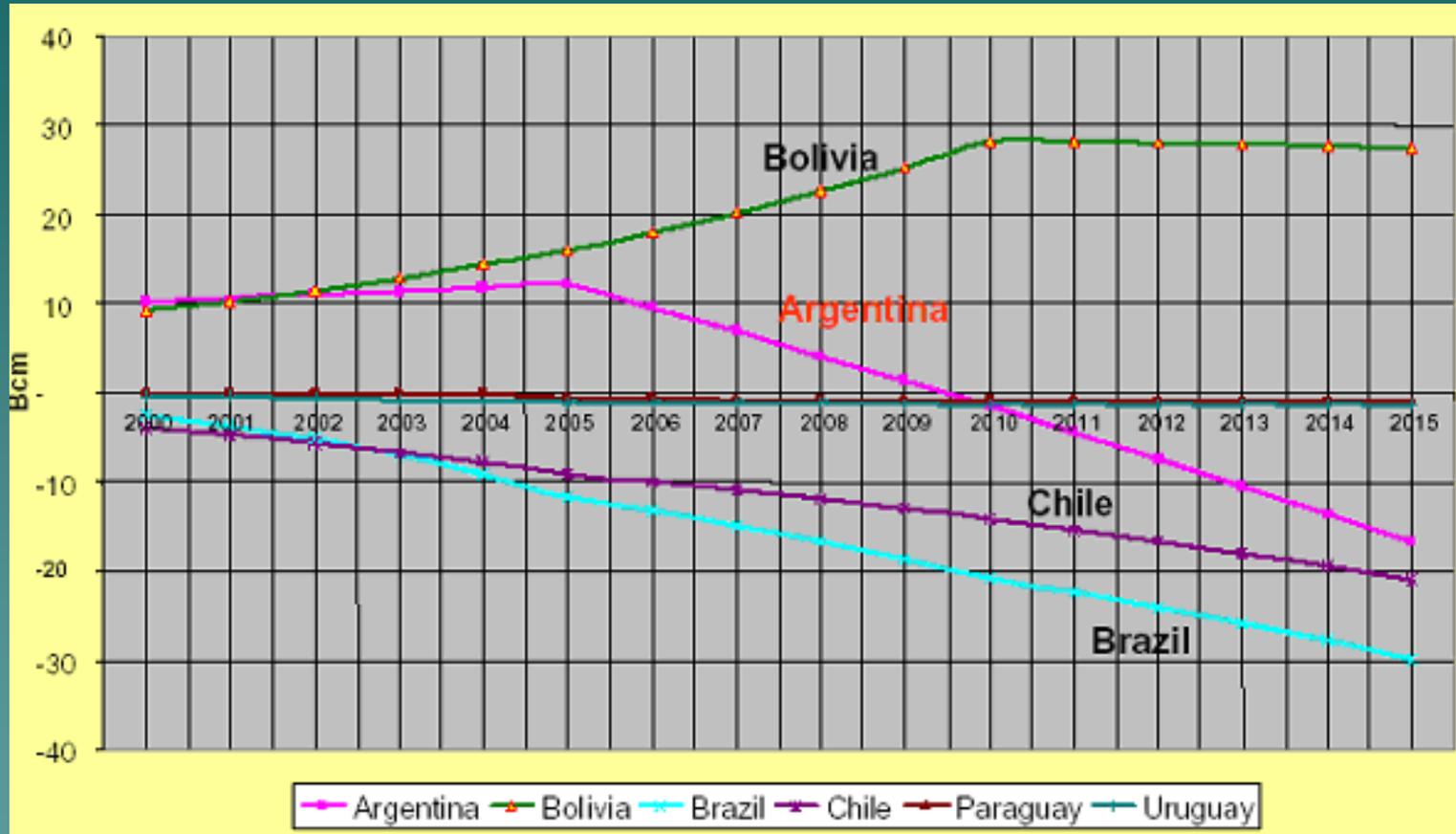


# Vulnerabilidad Sistema Eléctrico Chileno

Un análisis más detallado del sector eléctrico da cuenta de la gran vulnerabilidad del mismo debido a la fuerte demanda de energía y a la dependencia cada vez mayor de hidrocarburos, esencialmente gas natural. En el caso del SIC, más del 60% de la generación termoeléctrica se basa en gas natural. La expansión de la oferta de energía contemplada en el Plan de Obras de la CNE, también se basa en nuevas centrales termoeléctricas que operan con dicho combustible. Solo en el último par de meses este plan de obras contempla tres unidades geotérmicas.

Nuestro abastecimiento de gas natural depende en casi un 100% de yacimientos argentinos. En el caso de la zona central, dependemos de dos gasoductos de la zona de Neuquén. Pero la cuenca de Neuquén es la cuenca gasífera con más años de explotación en Argentina y sus reservas son escasas, no superando los 12 a 14 años de vida útil. Una proyección realizada por Lahsen indica que es muy probable que el abastecimiento de esta cuenca entre en crisis entre el año 2007 y 2010.

# Situación Oferta-Demanda Gas Cono Sur



Fuente: Seminario Gas Latinoamérica 2002

# Hacia una política de Sustentabilidad Energética

Por ende, el objetivo básico de una política hacia la seguridad y sustentabilidad energética es:

- **Diversificar** las fuentes de energía para la generación eléctrica promoviendo la utilización de la energía geotérmica, mini hidráulica, eólica, solar y otras de enorme potencial en nuestro territorio..
- **Acelerar** esta diversificación para tener un abastecimiento más seguro.

Tenemos el profundo convencimiento de que las señales de mercado son insuficientes como guías para enfrentar los problemas energéticos.

Tal como lo ha hecho el país en otros sectores, es necesario crear verdaderos incentivos que permitan superar la curva de aprendizaje de tecnologías y promover la diversificación de actores.

# Política Activa en el Sector Energético

- **Diversificar fuentes:** aumentar la cantidad de fuentes de energía primaria disponibles para el sector energético, de manera de asegurar un abastecimiento confiable y menos sujeto a los vaivenes internacionales.
- **Promover energías renovables:** se hace necesario tener una política activa en el uso de energías renovables. Por un lado esto asegura la sustentabilidad del sistema en el largo plazo y por otra parte ayuda en forma efectiva a disminuir las emisiones de carbono a la atmósfera.
- **Política activa de ahorro energético:** el uso eficiente de energía es la forma más económica de ampliar la disponibilidad del recurso. Las técnicas van desde el desfase temporal de consumos, hasta cogeneración y otros métodos más sofisticados.

# Tecnología y Desarrollo:

La Tecnología brinda oportunidades de lograr un mejor desarrollo:

Conociendo mejor los recursos, de manera de manejarlos en forma más sustentable.

Mejorando los procesos, para disminuir impactos y mejorar eficiencia.

Introduciendo nuevos métodos o procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente.

Mejorando la eficiencia de los sistemas, de manera de minimizar pérdidas.

Abriendo nuevas oportunidades de trabajo.

# Tecnología y Desarrollo:

En Chile tenemos recursos energéticos renovables muy abundantes y casi inexplorados. En particular:

**Energía Solar:** con las mejores condiciones de radiación solar del mundo en nuestro Norte. La radiación solar del mejor lugar de Alemania equivale a la de Punta Arenas.

**Energía Eólica:** excelente recurso en el Norte y Sur de Chile. Casi inexplorado.

**Geotermia:** los expertos estiman un potencial de al menos unos 8.000 MW eléctricos.

**Hidráulica:** gran potencial inexplorado en potencias medianas y pequeñas.

**Biomasa:** la posibilidad de utilizar procesos biológicos para generar energía es enorme. Esto abarca desde las tecnologías conocidas hasta, en un futuro próximo, desarrollar los *biocombustibles*.

# Ejemplo uso Energía Solar:



Planta SEGS en California: híbrido solar-gas natural

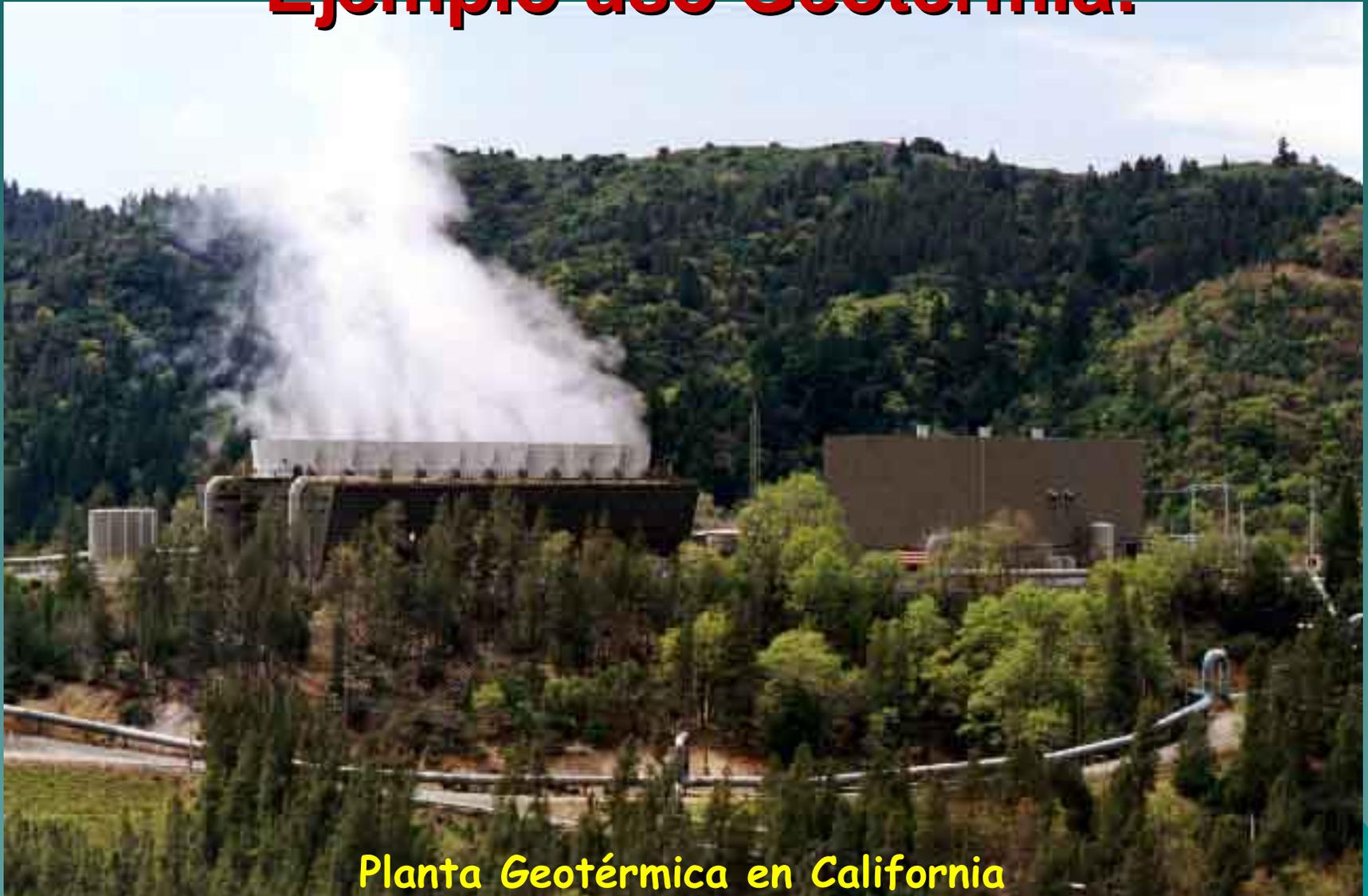
Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Ejemplo uso Energía Solar:



Planta Solar 2 en California: potencial de hasta 100 MW

# Ejemplo uso Geotermia:



**Planta Geotérmica en California**

# Ejemplo uso Geotermia:



## Geysers del Tatio

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Ejemplo uso Energía Eólica:



**Granja Eólica**

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Transporte Avanzado

El sector transporte es uno de los más intensivos en utilización de energía y, a la vez, que más contaminación origina.

Por lo tanto es un sector que brinda enormes oportunidades de desarrollo y trabajo para mejorar su eficiencia y bajar su impacto ambiental.

En el corto plazo:

- ◆ **Vehículos híbridos.**

En el mediano plazo:

- ◆ **Vehículos a celdas de combustible.**
- ◆ **Vehículos 100% eléctricos**

# Transporte Avanzado



**Bus híbrido para transporte de pasajeros**

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Transporte Avanzado



**Bus híbrido para transporte de pasajeros**

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Biomasa

- **Ventajas:** recurso que ya existe. Lo más sencillo es aprovechar desecho forestal. Costos atractivos si se integra con cogeneración. Brasil la utiliza en forma rutinaria. Disminuyen emisiones de CO<sub>2</sub>. Permite fabricar combustibles líquidos.
  - **Desventajas:** debe cuidarse mucho el manejo ambiental. Costos aún un poco elevados en muchos casos.
  - **Tendencias tecnológicas:** es tecnología que abre espacio a *biocombustibles*. Estos son seguramente la mejor opción tecnológica para el desarrollo en el corto y mediano plazo.
  - **Posibilidades a corto plazo:** tecnologías de manejo de desecho forestal están maduras. Biocombustibles aún deben desarrollarse más.
  - **Efectos sobre empleo o desarrollo:** medianos a altos en operación. Más energía implica más desarrollo.
- En Chile las mejores opciones de desarrollo están en: zona central y sur. Posiblemente en el norte aprovechando algas para generación energética.

# Biocombustibles



Planta Alemana de fabricación de biodiesel en etapa final de construcción.

# Mini Hidro

- Ventajas:** bajo impacto ambiental. Tecnología muy conocida. Costos atractivos de generación.
- Desventajas:** Mucho cuidado en elegir emplazamiento. Sujeto a hidrología.
- Tendencias tecnológicas:** es tecnología madura. Se han desarrollado sistemas con control electrónico aptos para generación aislada.
- Posibilidades a corto plazo:** muy aprovechables.
- Efectos sobre empleo o desarrollo:** medianos en puesta en construcción y puesta en marcha. Mayor efecto está por el lado de beneficios secundarios de energizar lugares que hoy no tienen. Mejoras en calidad de redes extremas.
- En Chile las mejores opciones de desarrollo están en:** zona central y sur.

# Mini Hidro



Hay excelentes oportunidades de implementación en Chile,  
además de mejoras de control

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Solar

- Ventajas:** muy amigable desde el punto de vista ambiental. Se adapta desde generación térmica hasta generación eléctrica. Valorado positivamente por usuarios.
  - Desventajas:** densidad energética baja. Costos elevados para generación eléctrica. Fluctuación diaria y estacional. Se requiere mantención “personalizada”.
  - Tendencias tecnológicas:** es tecnología con fuerte potencial de desarrollo. Sistemas fotovoltaicos van a bajar bastante más en costo. Sistemas térmicos están maduros.
  - Posibilidades a corto plazo:** en tecnologías para uso térmico se puede aprovechar desde ya. En fotovoltaico, aplicable en condiciones determinadas (no uso general).
  - Efectos sobre empleo o desarrollo:** excelente energía para proveer nuevas pequeñas empresas de fabricación, instalación y mantención. Mejora sustantiva en calidad de vida .
- El norte de Chile es reconocido como el lugar en el mundo como el que tiene la mejor radiación solar del planeta. Además excelente desde el Norte hasta la VIII Región interior.

# Solar



Sistema solar con motor Stirling para generación eléctrica. 50 kW potencia

# Solar



Sistema de Torre Central 10 MW potencia

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Solar



Sistemas de calentamiento de agua solar en China. Hoy existen varios millones en operación

# Solar



Banco Fotovoltaico en USP. Tienen sistema integrado a la red

# Solar



Casa con sistema de calefacción solar en base a Muro Trombe

# Solar



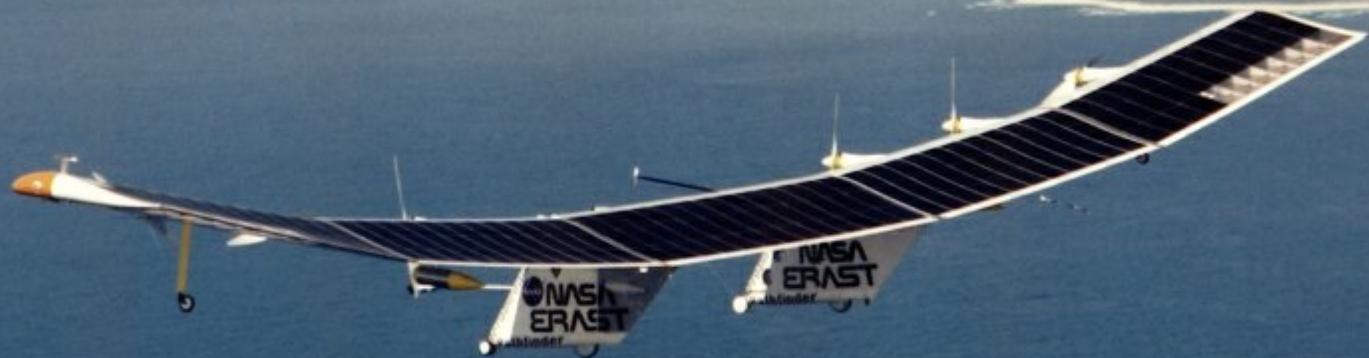
Sistema Stirling de Motores de 50 kW (Euro dish)

# Solar



Cocinas Solares en operación

# Solar



Avión Helios sobre Hawaii

# Solar



<http://www.wsc.org.au/2005/competition/> el Solar Challenge

<http://www.aurorasolarcar.com/>

# ¿Y el Futuro?



El futuro está abierto a las buenas elecciones, muchas gracias...

# Sistemas Solares con Concentración

El como y el por qué  
utilizarlos

# Estructura de esta parte...

- ◆ Ecuaciones básicas en colector térmico.
- ◆ Por que conviene utilizar concentración.
- ◆ Ejemplos históricos hasta el Siglo XX.
- ◆ Teoría básica de la concentración.
- ◆ Ejemplos de aplicaciones.
- ◆ Perspectivas de corto y mediano plazo

# Transferencia básica

En otra parte de este curso se vio que en un sistema solar térmico, en régimen permanente, se produce un balance de energía entre la que incide sobre el sistema captor y la que este mismo sistema aprovecha y pierde hacia el medio ambiente. Esto lo podemos plantear desde el punto de vista matemático como:

$$\alpha \cdot \tau \cdot E = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{util}$$

Esta ecuación simplemente nos dice que la energía que absorbe el sistema captor (y por lo tanto está afecta a las pérdidas ópticas de transmisión y absorción), debe ser igual a las pérdidas por convección, conducción y radiación, más la energía útil.

# Colectores planos

- ◆ En los típicos sistemas planos, uno actúa sobre la parte *derecha* de la ecuación, es decir todas las mejoras técnicas buscan reducir las pérdidas térmicas de manera de maximizar la energía útil. Es así como se han desarrollado colectores con cubierta plana, mejores superficies absorbentes, superficies selectivas y muchas otras estrategias para reducir las pérdidas de energía.
- ◆ Pero en cualquier sistema plano no podemos desmarcarnos del hecho de que la radiación incidente sobre el sistema captor será, en el mejor de los casos, del orden de  $1.000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  y que por cada metro cuadrado de sistema captor vamos a tener un metro cuadrado de sistema receptor.
- ◆ Con las técnicas más sofisticadas de reducción de pérdidas térmicas, en la práctica no podremos fabricar sistemas que operen con rendimiento aceptable a temperaturas muy superiores a los  $100^\circ\text{C}$ .

# La opción de la Concentración

Por ejemplo: para ambiente a 20°C y si el receptor está a 100°C las pérdidas por radiación serán de:

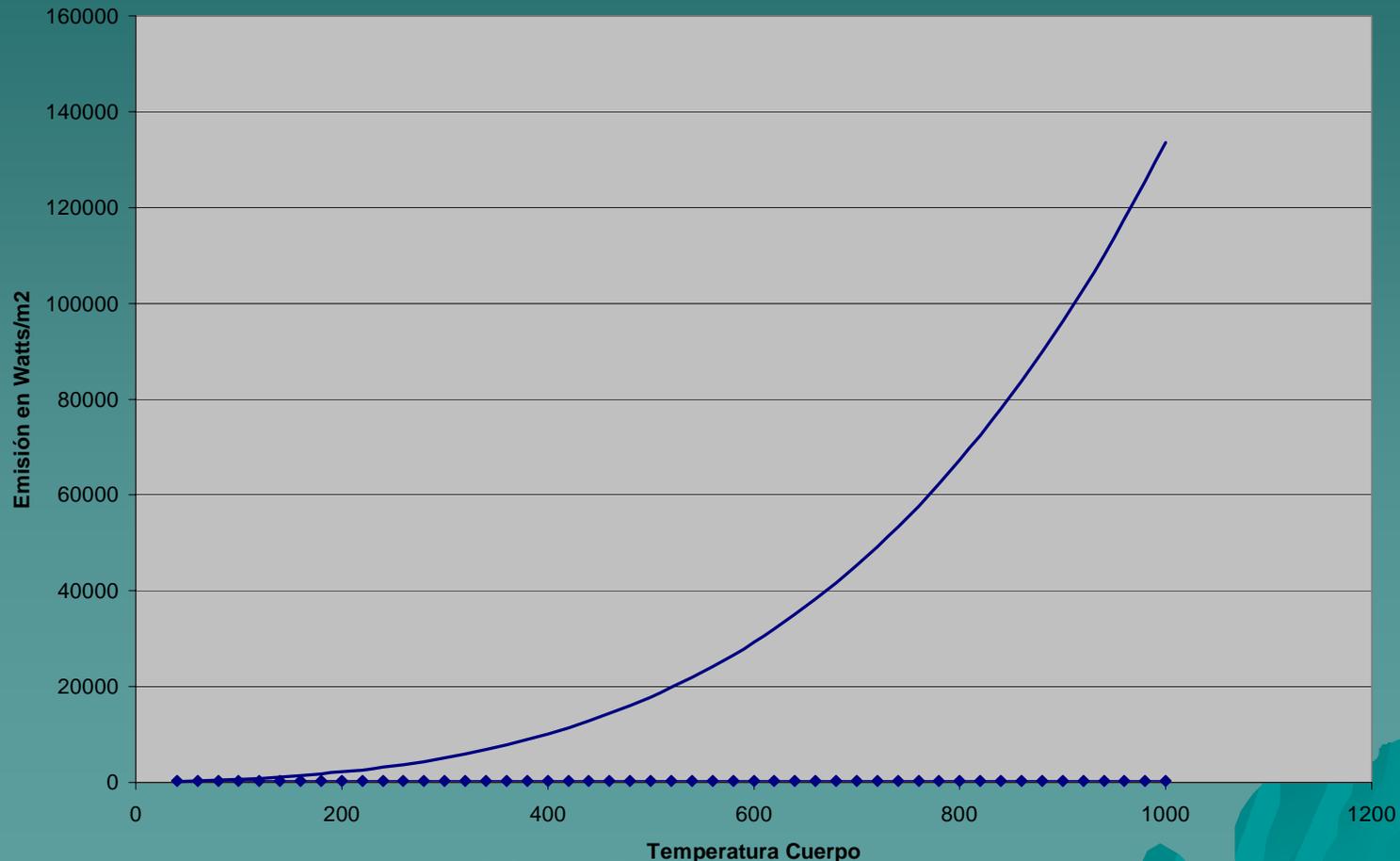
$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_a^4) =$$

$$E = 0,9 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (373^4 - 293^4) =$$

$$E = 612 [W / m^2]$$

# ¿Que pasa a temperaturas mayores?

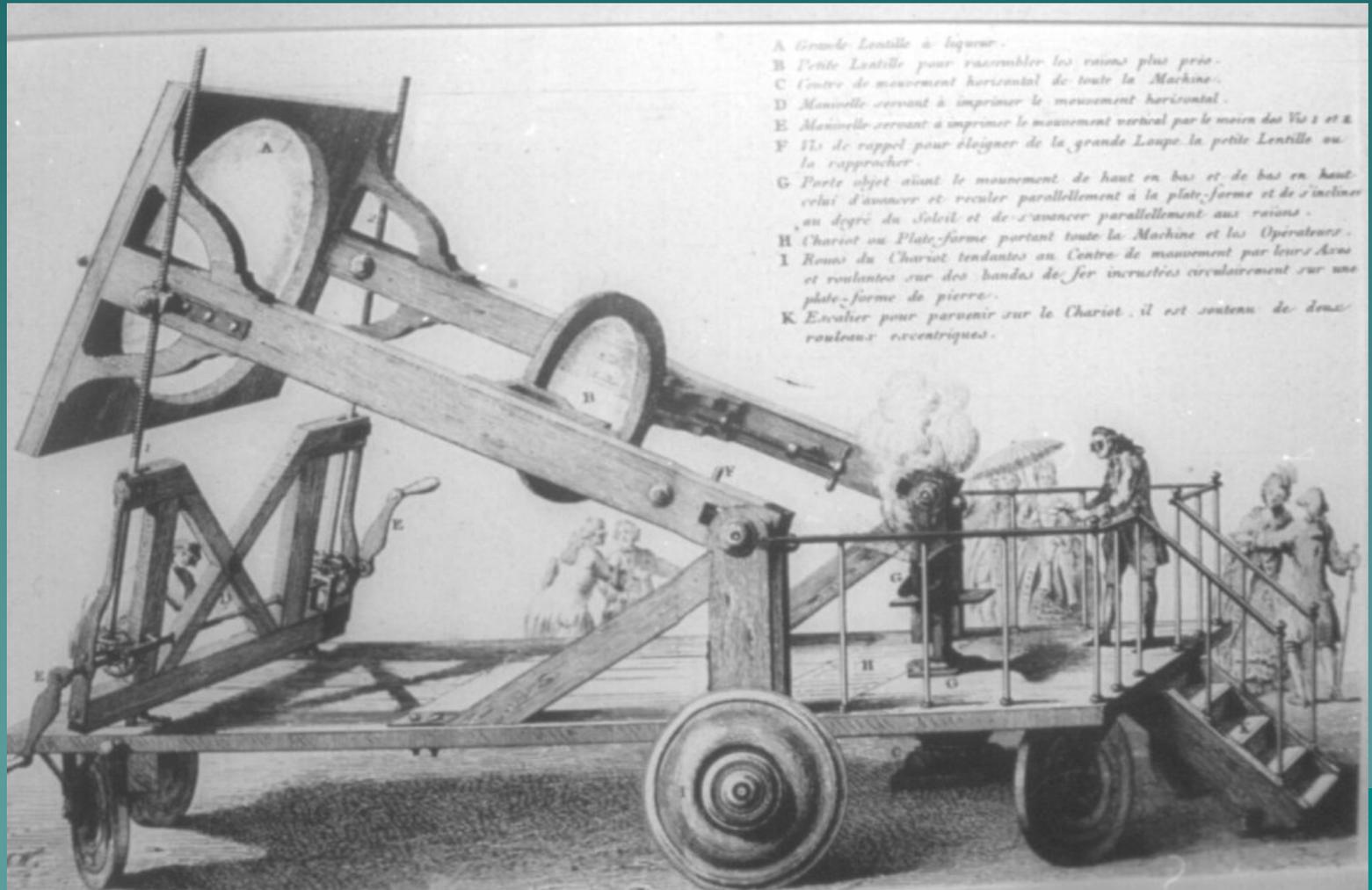
Emisión de Cuerpo Negro



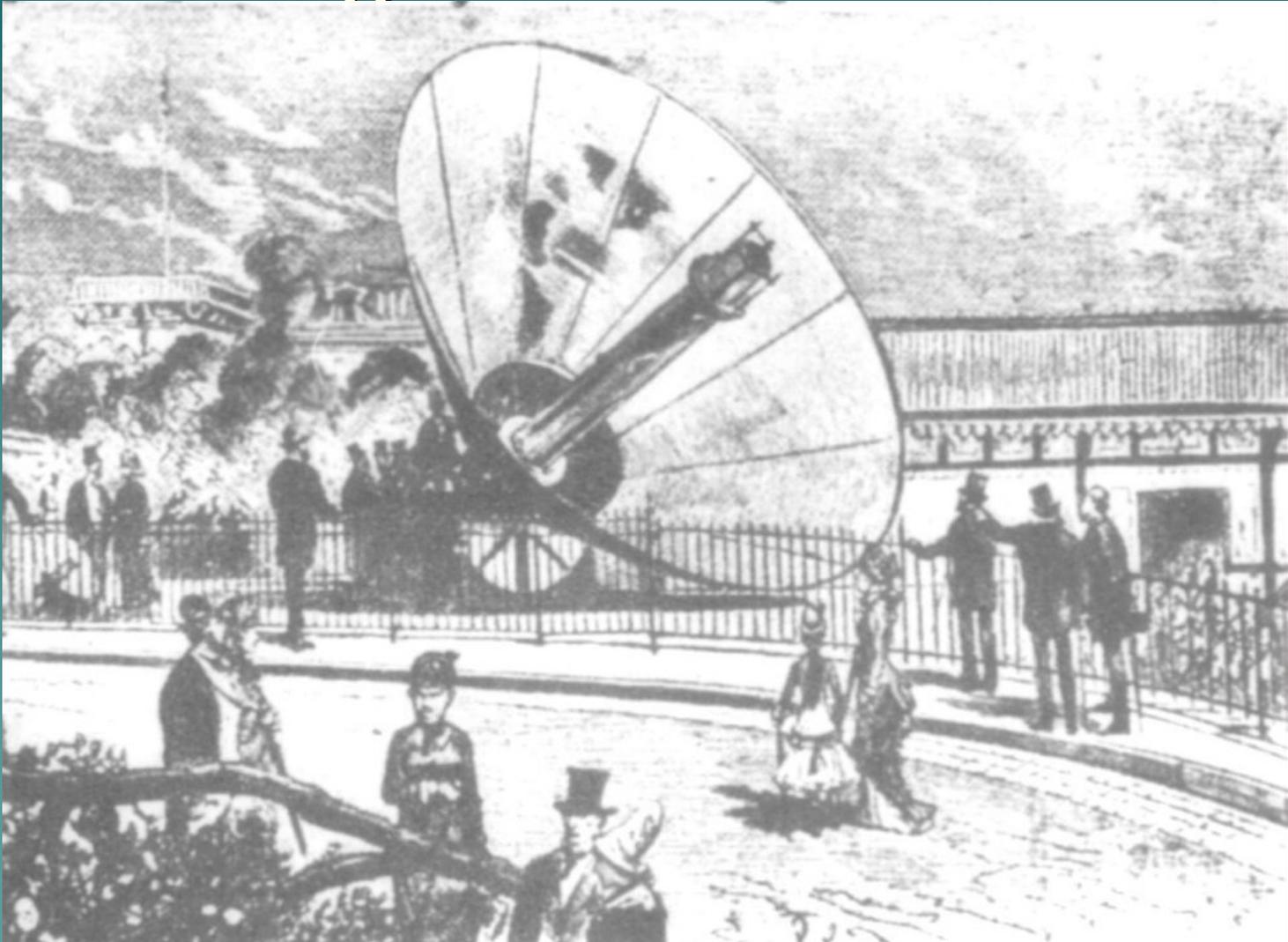
# Hasta el Siglo XX

- ◆ La historia menciona el caso de Arquímedes y como quemó a la flota Romana con “espejos ardientes”
- ◆ En las postrimerías del Siglo XVIII y en el Siglo XIX existieron aplicaciones significativas de energía solar.
- ◆ Esto porque era alternativa competitiva con carbón.
- ◆ Además daba opciones muy interesantes de investigación.

# Antoine de Lavoisier

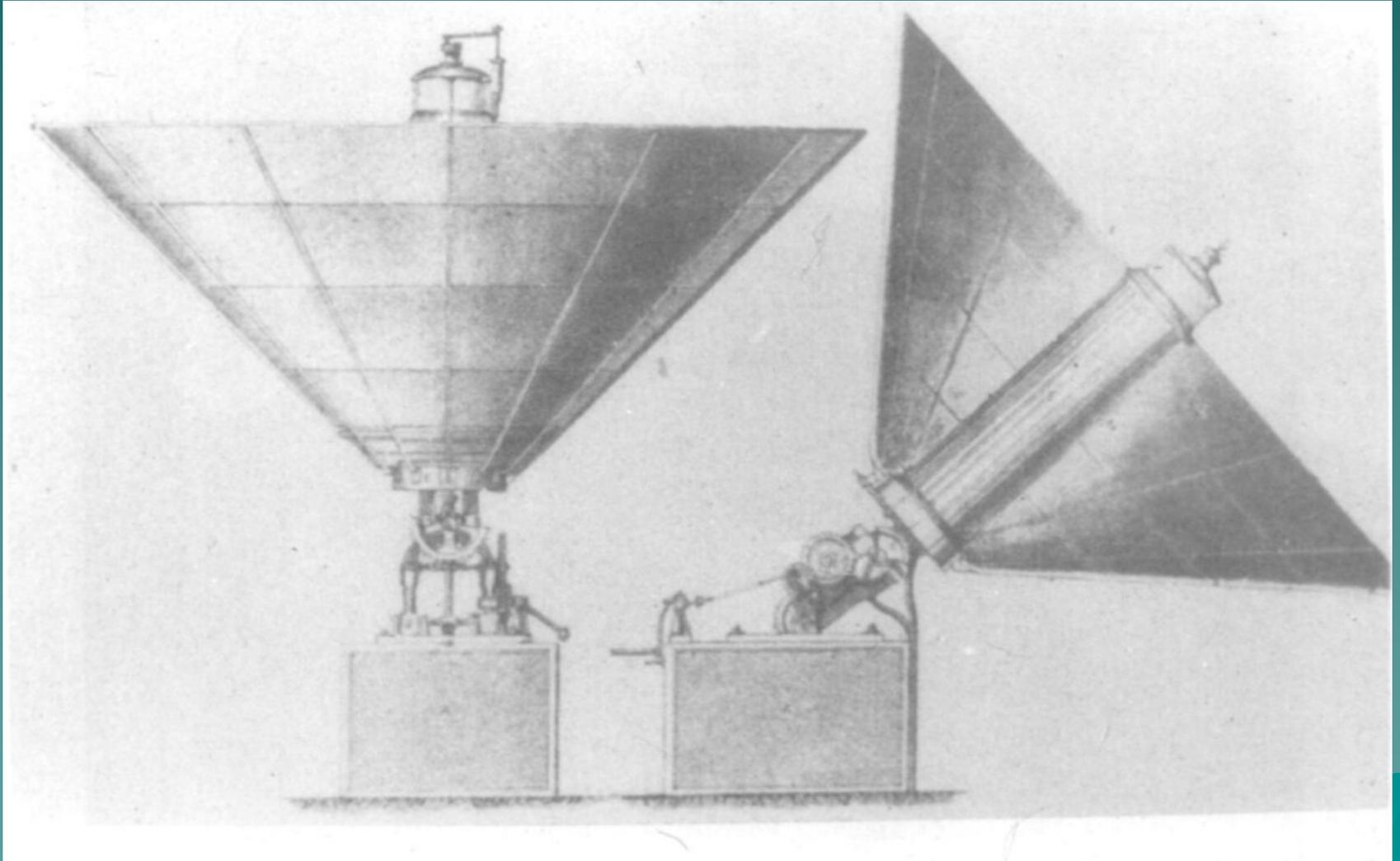


# Auguste Mouchot



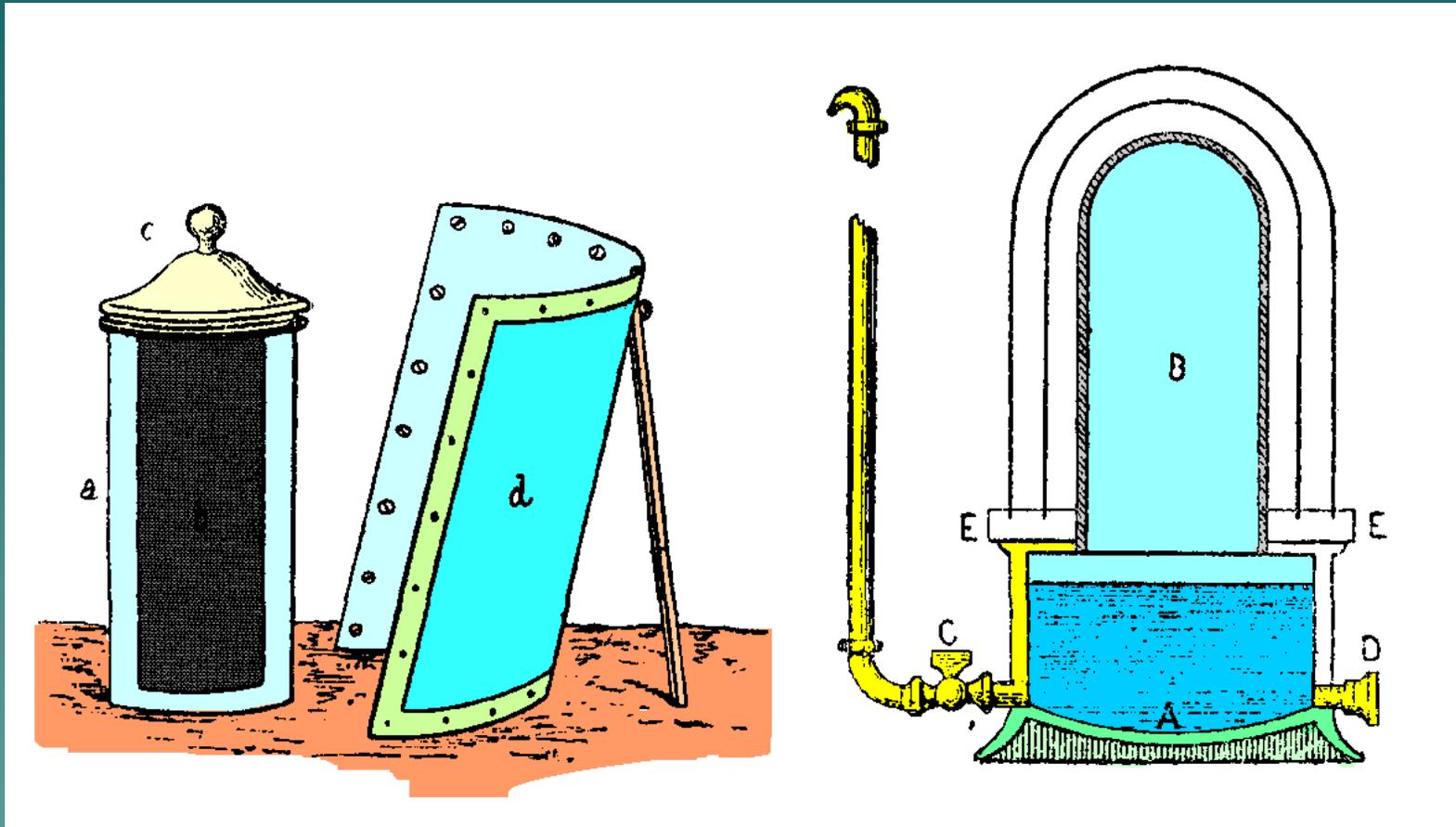
Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Auguste Mouchot



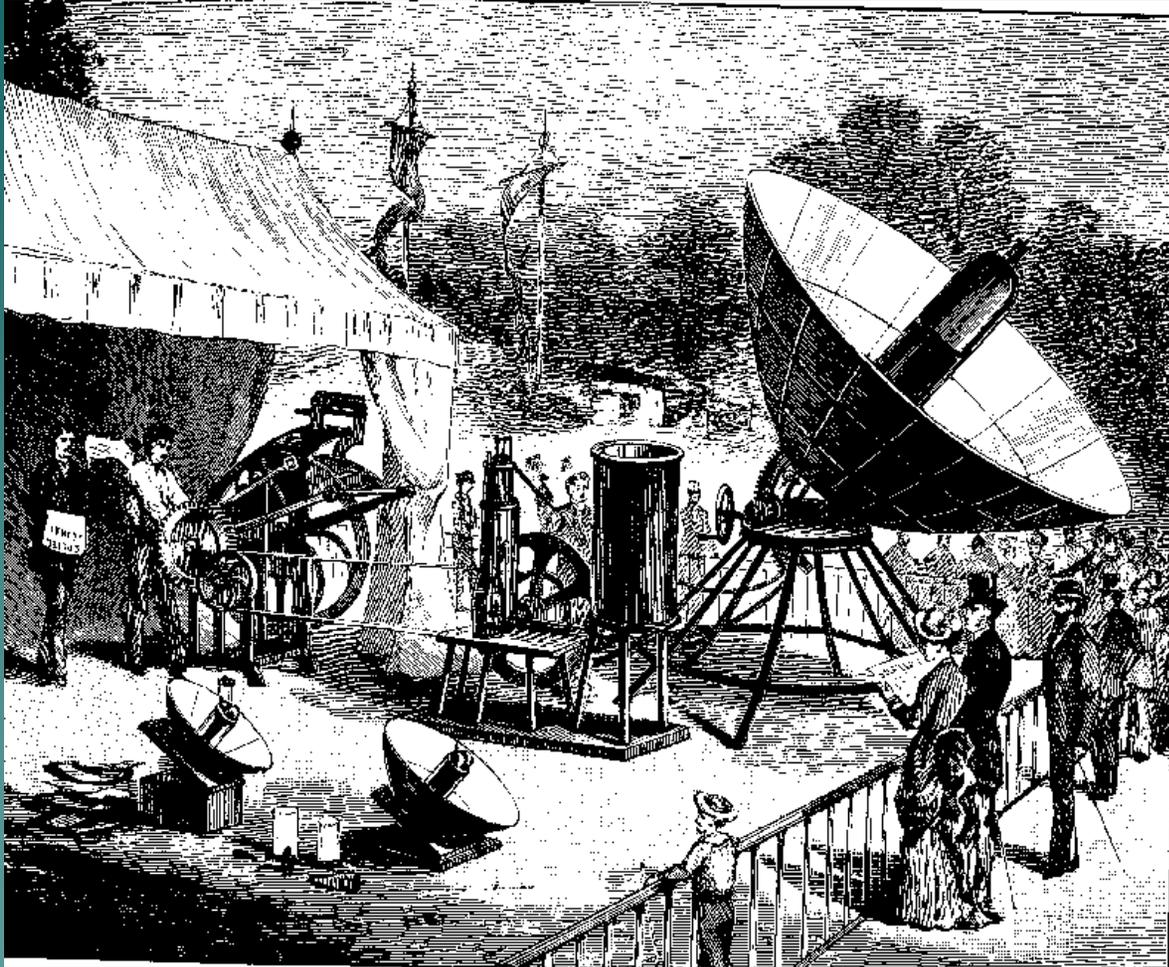
Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Siglo XIX: Cocinas Solares, Mouchot



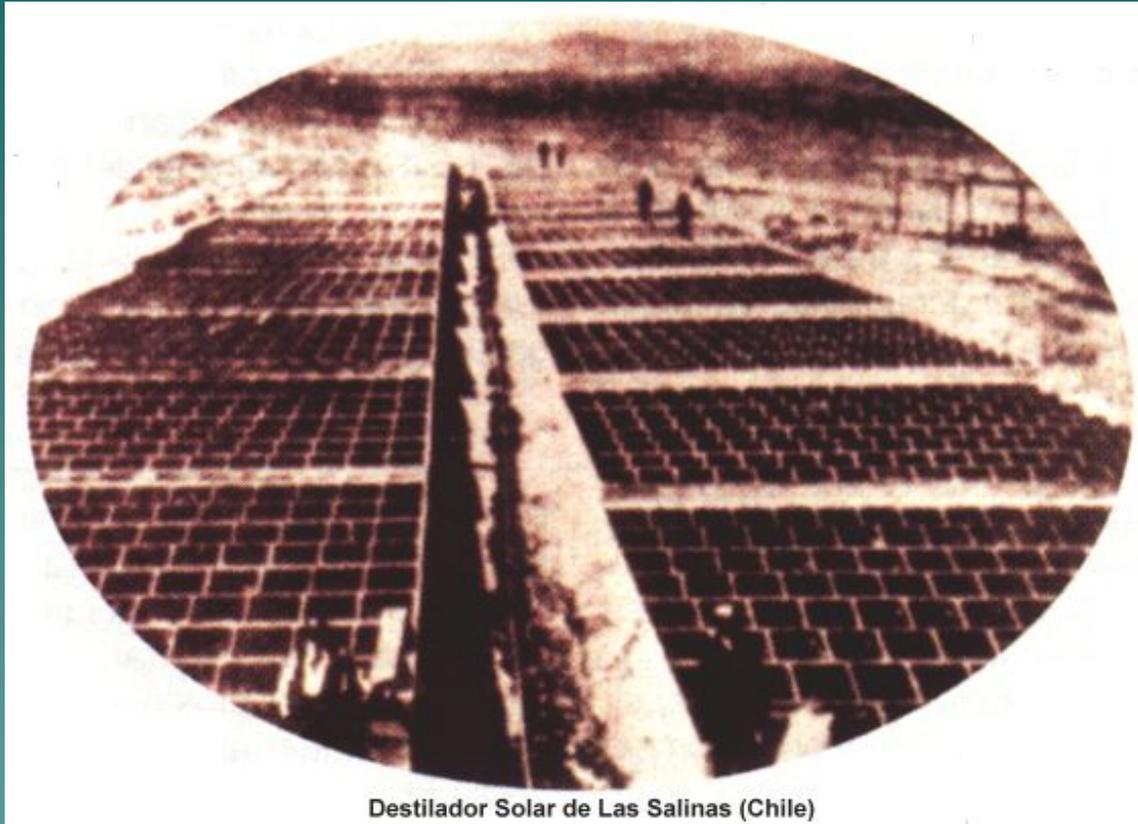
Además construyó cocinas solares y destiló brandy con energía solar.

# Siglo XIX: Motor Solar, Abel Pifre



Un discípulo de Mouchot fue Abel Pifre, quién editó un periódico ("Le Soleil") en la feria mundial de Paris donde se inauguró la Torre Eiffel.

# Siglo XIX: Destilador Solar: Charles Wilson



Otro pionero de gran importancia fue Charles Wilson. En 1872 construyó un gran destilador solar en Las Salinas (cerca de Chacabuco), Chile. Producía más de 20.000 litros de agua dulce al día y se utilizó al menos hasta 1912.

Primera Escuela Argentina de  
Energías Renovables

# Shuman y Boys



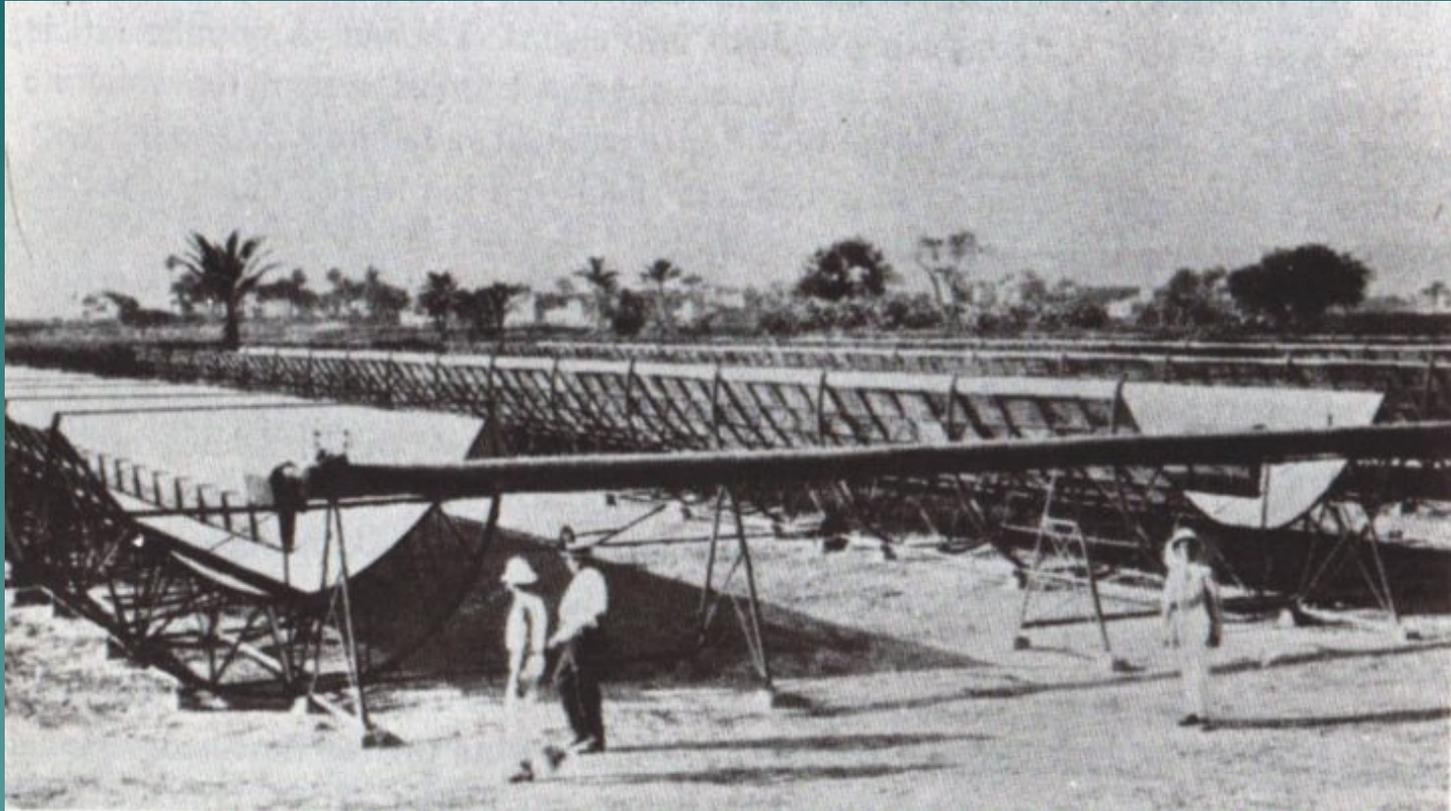
# Shuman y Boys



# Shuman y Boys

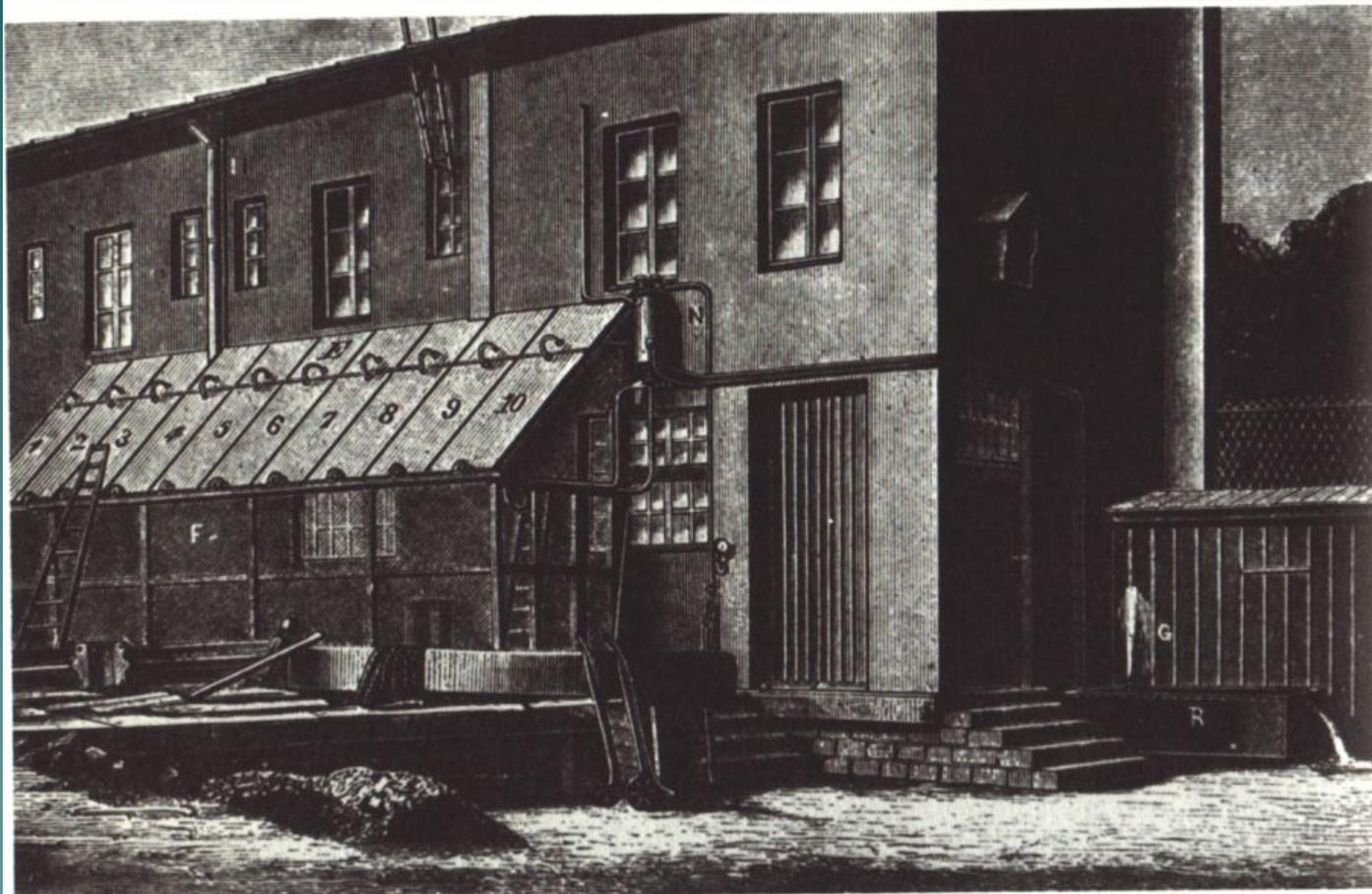


# Siglo XIX y XX: Motores Solares: Shuman y Boys



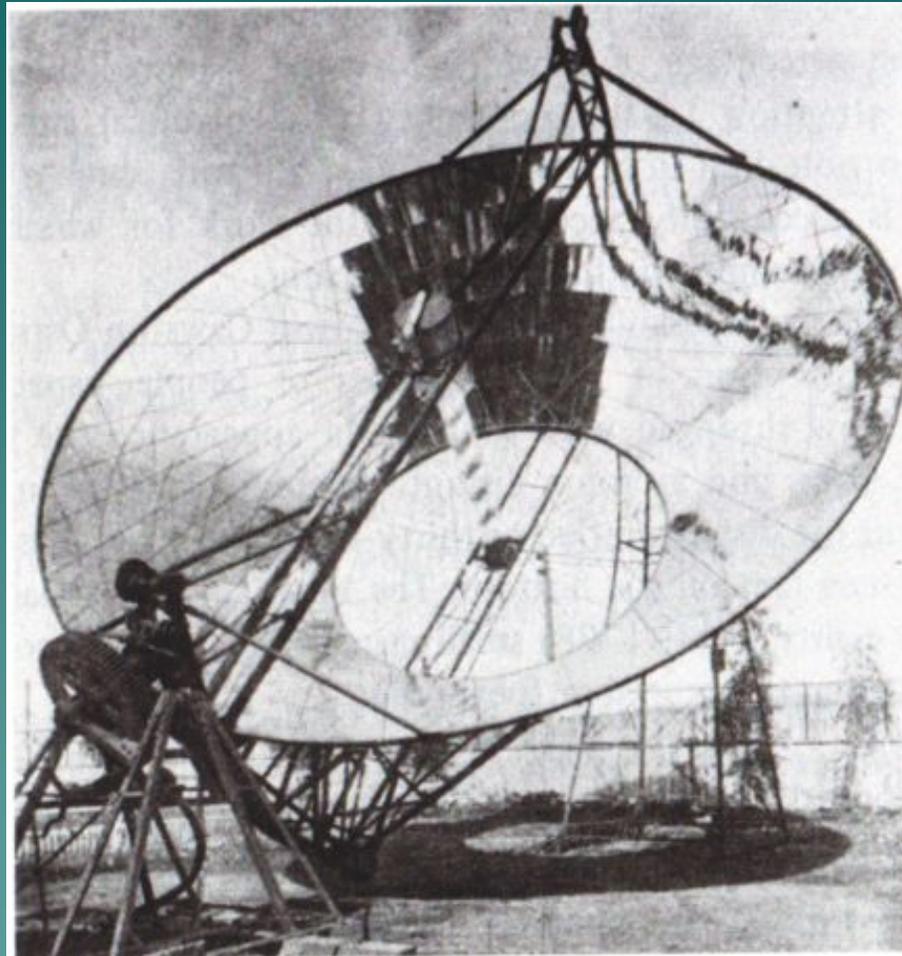
Una vista de la planta de Meadi (Cairo, Egipto). Los concentradores eran cilindro parabólicos, orientación este oeste. Siguen el sol en altura. 50 HP de potencia, para irrigación.

# Siglo XX: Motores Solares: Tellier



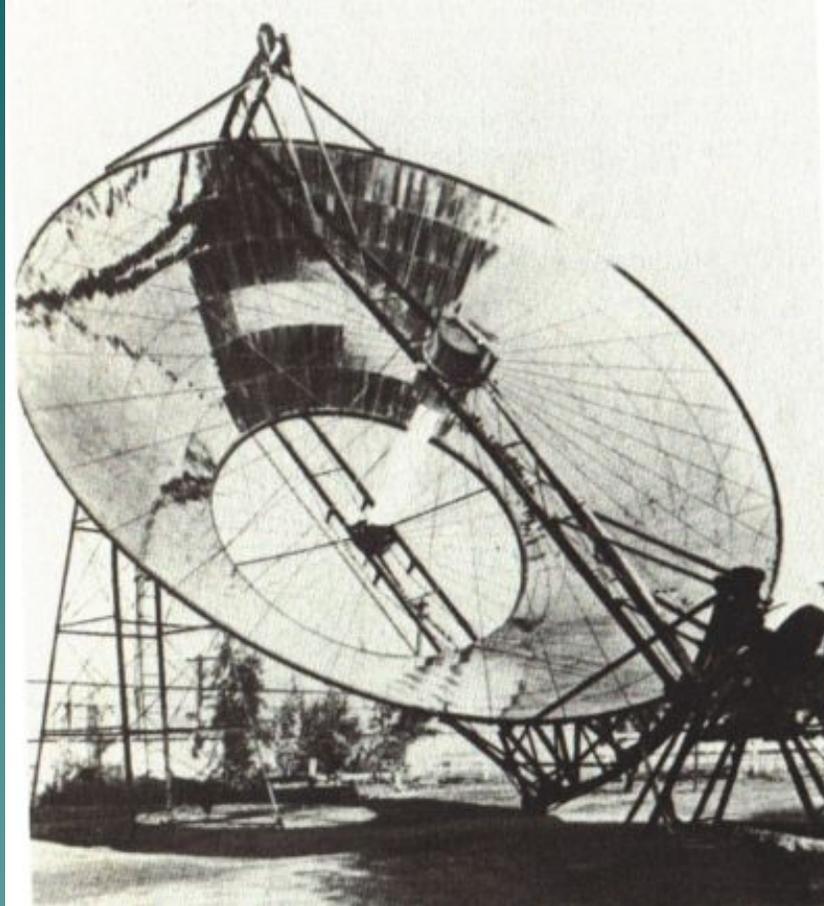
El concepto fue utilizar colectores planos y costos muy bajos (bajo gradiente térmico).

# Siglo XX: Motores Solares: Eneas



Aparece aquí nuevamente el concentrador cónico. Es motor para bombear agua, de aproximadamente 5 HP de potencia. Se fabricaron bastantes unidades.

# Siglo XX: Motores Solares: Eneas



Aparece aquí nuevamente el concentrador cónico. Es motor para bombear agua, de aproximadamente 5 HP de potencia. Se fabricaron bastantes unidades.