



Universidad de Chile

DIPLOMA DE POSTÍTULO
**DISEÑO DE EDIFICACIONES
ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

Energías Renovables



APUNTES DE ENERGÍA SOLAR

Prof. Roberto Román L.
Universidad de Chile

roroman@ing.uchile.cl
roroman@ecomaipo.cl
www.ecomaipo.cl

Temario Sesión

En esta sesión abordaremos:

- ▶ **Sistemas solares activos:** Conceptos básicos. Clasificación. Caso agua caliente sanitaria. Caso Calefacción.
- ▶ **Calentamiento solar de aire:** aspectos elementales.
- ▶ **Detalles de sistemas solares:** aspectos claves para tener un buen sistema solar en cuanto a diseño conceptual y aspectos de ejecución.
- ▶ **Calefacción con bomba de calor:** teoría básica de bomba de calor. El COP y como puede variar. Como operan. Sistemas de bomba de calor aire/aire.
- ▶ **Introducción a Retscreen y sus aplicaciones:** ventajas y limitaciones del programa. Uso en ejemplo de calefacción, agua caliente sanitaria y bomba de calor geotérmica.

Recurso Solar *en bruto*:

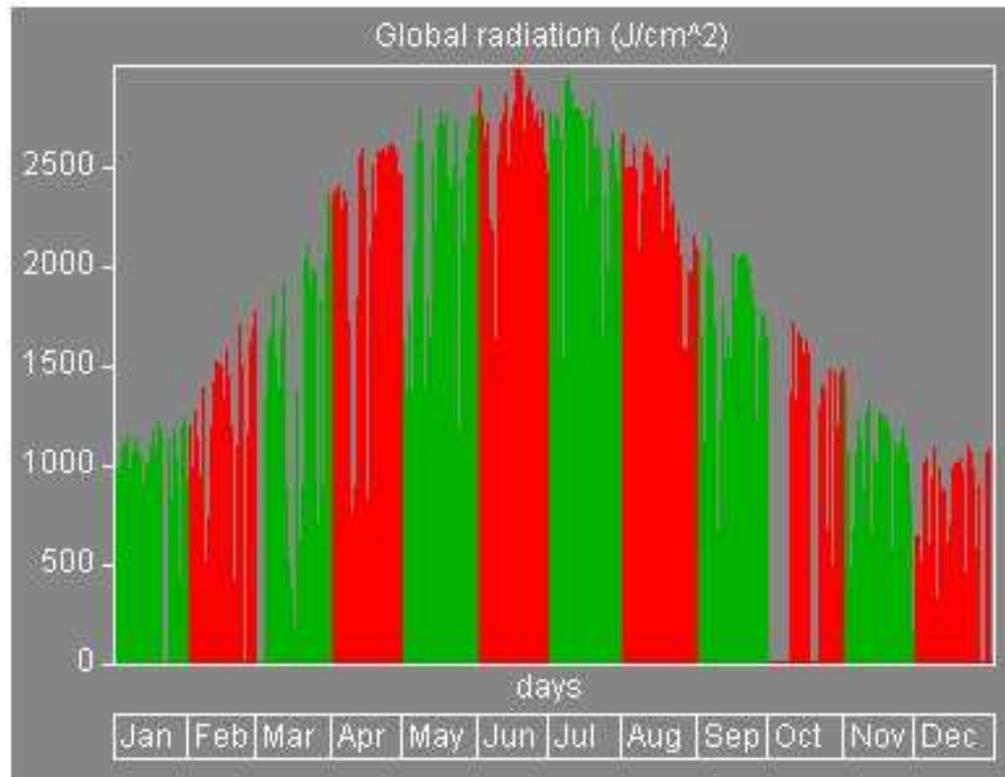
- ▶ Hoy día existe abundante información sobre radiación solar en plano horizontal. Por lo menos los valores medios mensuales. Las fuentes que existen son:
 - Datos de estaciones terrestres. Se sistematizan en el World Radiation Data Center que depende de la WMO (World Meteorological Organization).
 - Datos de mediciones satelitales, las que se corrigen a nivel del suelo con algoritmos. Disponibles en NASA.
 - Diversos programas que traen bases de datos. Por ejemplo *RetScreen*, *SAM*, *TRNSYS*, *Meteonorm*, etc.
- ▶ Siempre uno debe preguntarse sobre la calidad de los datos.
- ▶ En efecto, para sistemas térmicos, un error de datos de un 10% puede inducir a un error de dimensionamiento de 20% o más.
- ▶ A continuación veamos los datos “en bruto” de seis ciudades obtenidos de *Retscreen*.

Datos sobre recurso Solar:

Algunas fuentes en línea o fácilmente obtenibles de datos de radiación solar:

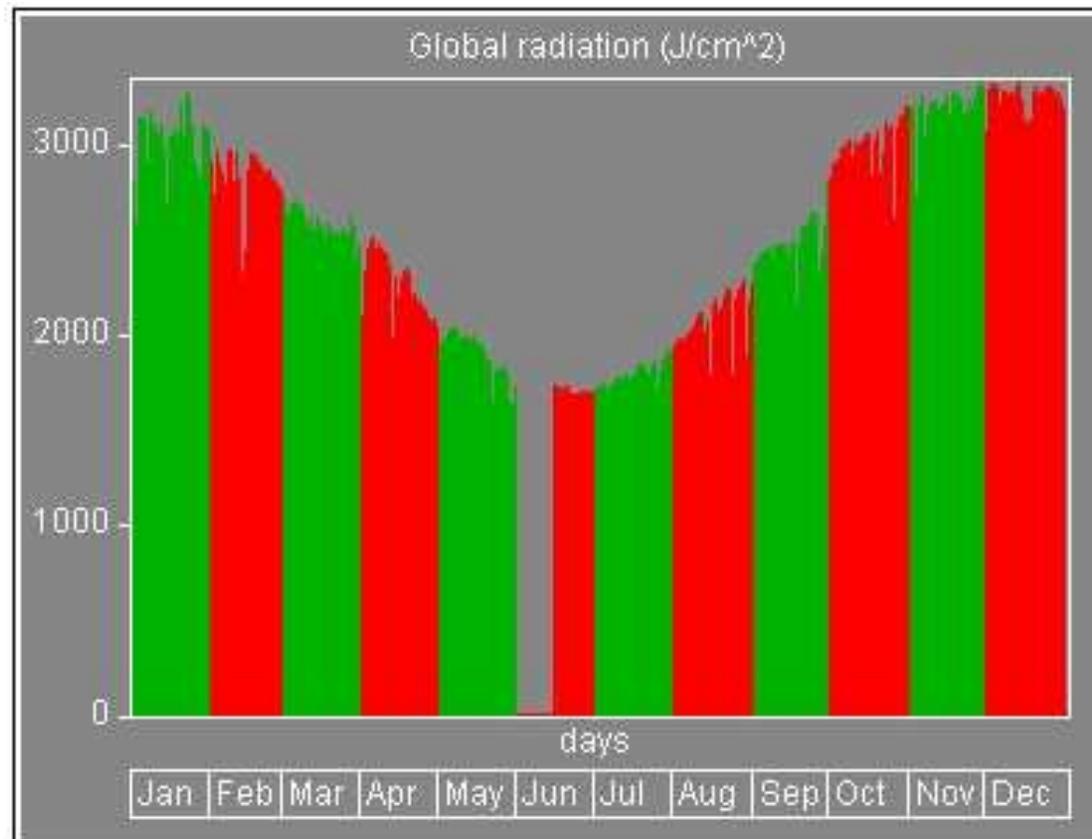
- ▶ **World Radiation Data Center:** datos en valores diarios para una buena cantidad de lugares del mundo. En coordinación con la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Hay que registrarse para tener acceso a datos: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>
- ▶ **NASA:** en coordinación con Retscreen. Son datos derivados de satélite y diseñados para operar con Retscreen. Valores promedio. Uno entra por sistema gráfico o coordenadas geográficas. Resolución de 1° x 1°: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- ▶ **Retscreen:** el programa en sí tiene una extensa base de datos para todo el mundo. En la ayuda se explican las fuentes y detalles.
- ▶ **Meteonorm:** base que da origen a TMY (Typical Meteorological Year). Son series de datos *horarias*. Se usan de manera extensa en los programas de simulación. Se venden.

Recurso Solar *en bruto*:



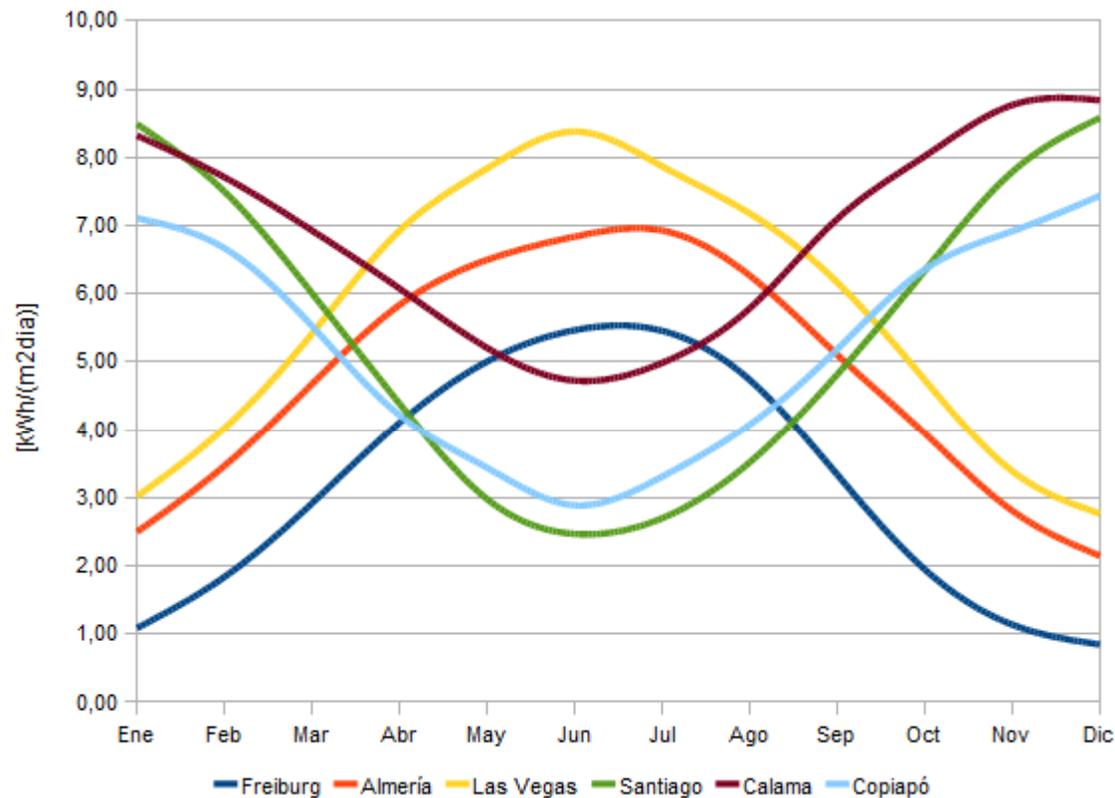
Estos son los datos diarios “en bruto” de Almería para el año 2004...

Recurso Solar *en bruto*:



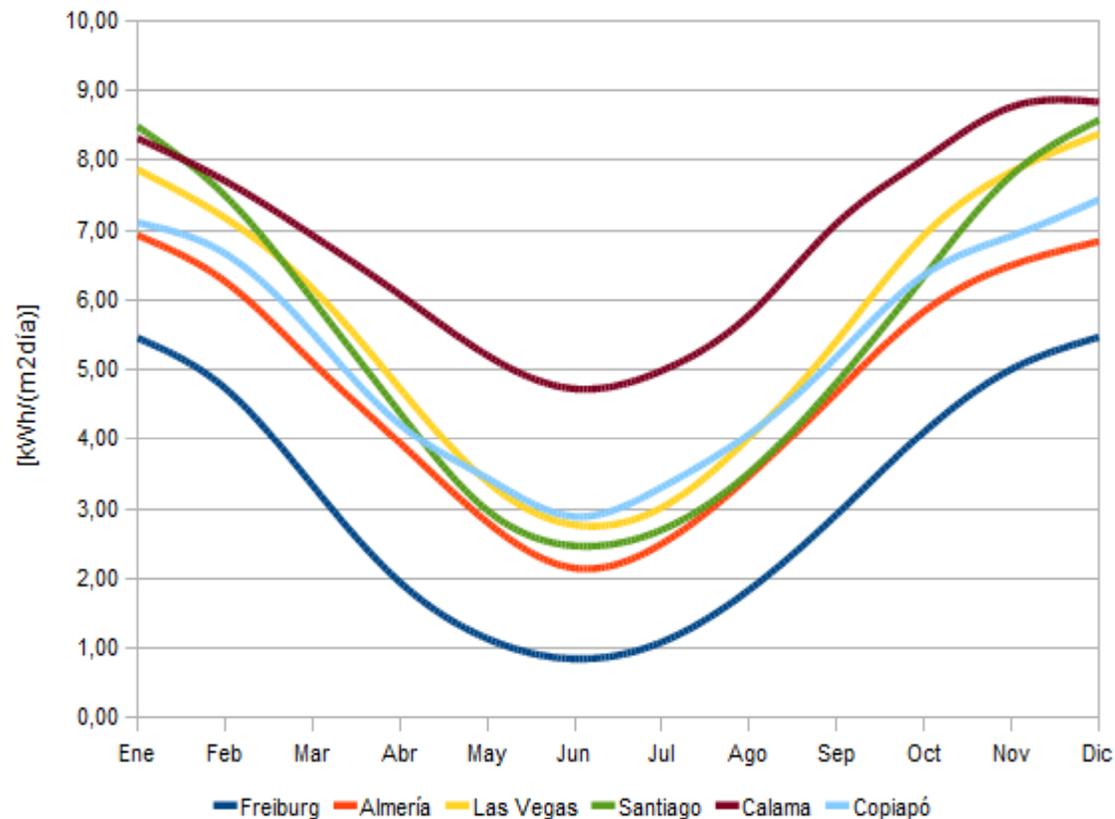
Y estos los de Calama para el año 2006...

Recurso Solar *en bruto*:



Tenemos tres ciudades del Hemisferio Norte y Tres del Hemisferios Sur. Es difícil comparar por las diferencias estacionales. Esto se arregla...

Recurso Solar corregido:



Aquí simplemente ponemos en fase las estaciones. Verano con verano, otoño con otoño. Las comparaciones son más sencillas. Pero necesitamos comparación más fina...

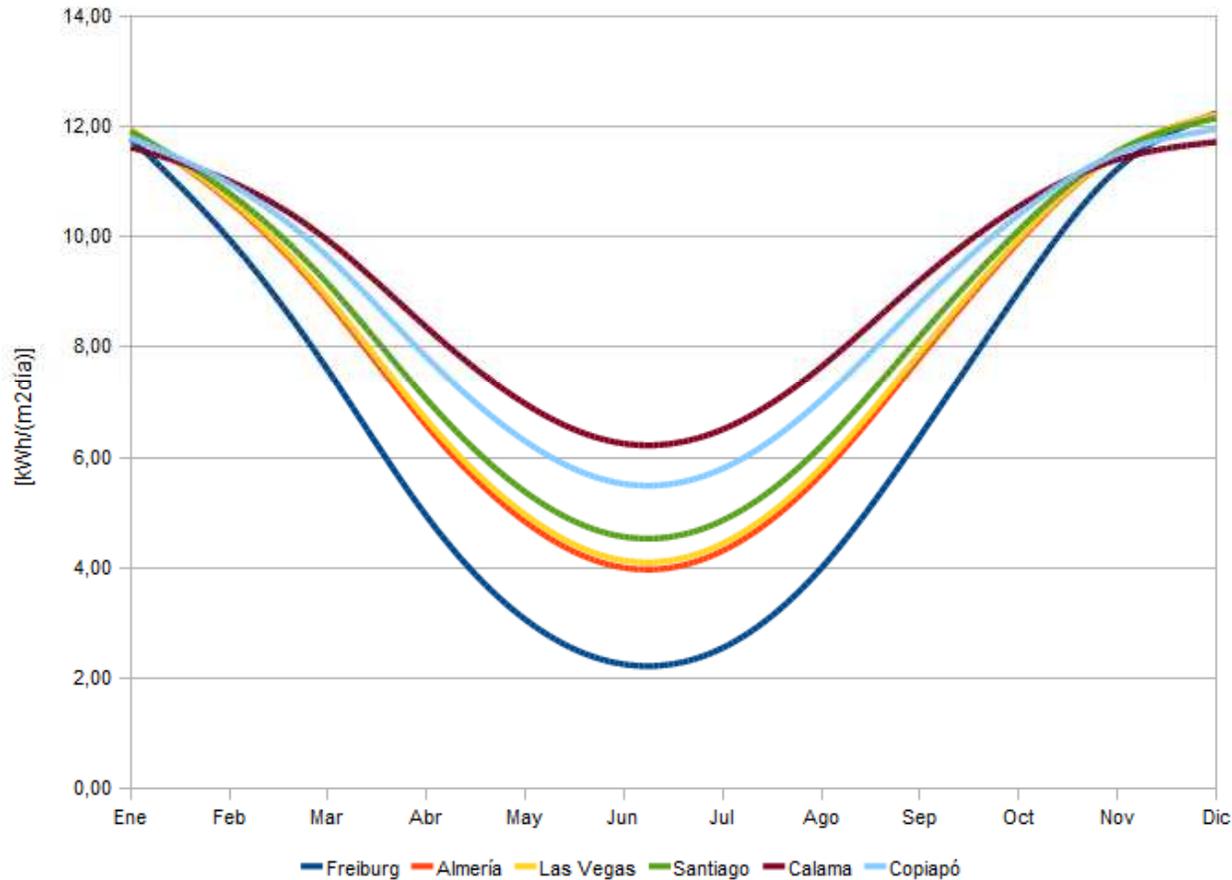
Recurso Solar comparativo:

- ▶ **Radiación Solar en ausencia de atmósfera:** se denomina H_0 y se puede calcular como:

$$H_0 = \frac{T}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365,24} \right) \right] \cdot (\cos \delta \cos \phi) (\operatorname{sen} \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)$$

- ▶ I_0 es la constante solar, el factor entre corchetes da cuenta de la excentricidad de la órbita terrestre y los otros dos factores dan cuenta de la latitud y declinación del sol.
- ▶ A continuación vemos como varía la radiación extraterrestre a lo largo del año para cinco localidades: Freiburg; Almería; Las Vegas; Santiago; Copiapó y Calama. Para facilitar la comprensión, hemos puesto “en fase” las estaciones en los lugares del Hemisferio Norte con el Sur.

Valores de H_o promedio para diversas localidades...



H_o y K_T :

- ▶ Es claro que los valores máximos varían poco según la latitud (salvo para casos muy extremos).
- ▶ También es claro que sí influye mucho la latitud para las épocas de menos radiación solar.
- ▶ Existe un factor clave que permite determinar la claridad media del cielo. Este valor se llama *Índice de Transparencia atmosférica*, K_T
- ▶ Si llamamos H_h la radiación solar media (diaria o mensual) a nivel del suelo y H_o la extraterrestre para el mismo período, entonces:

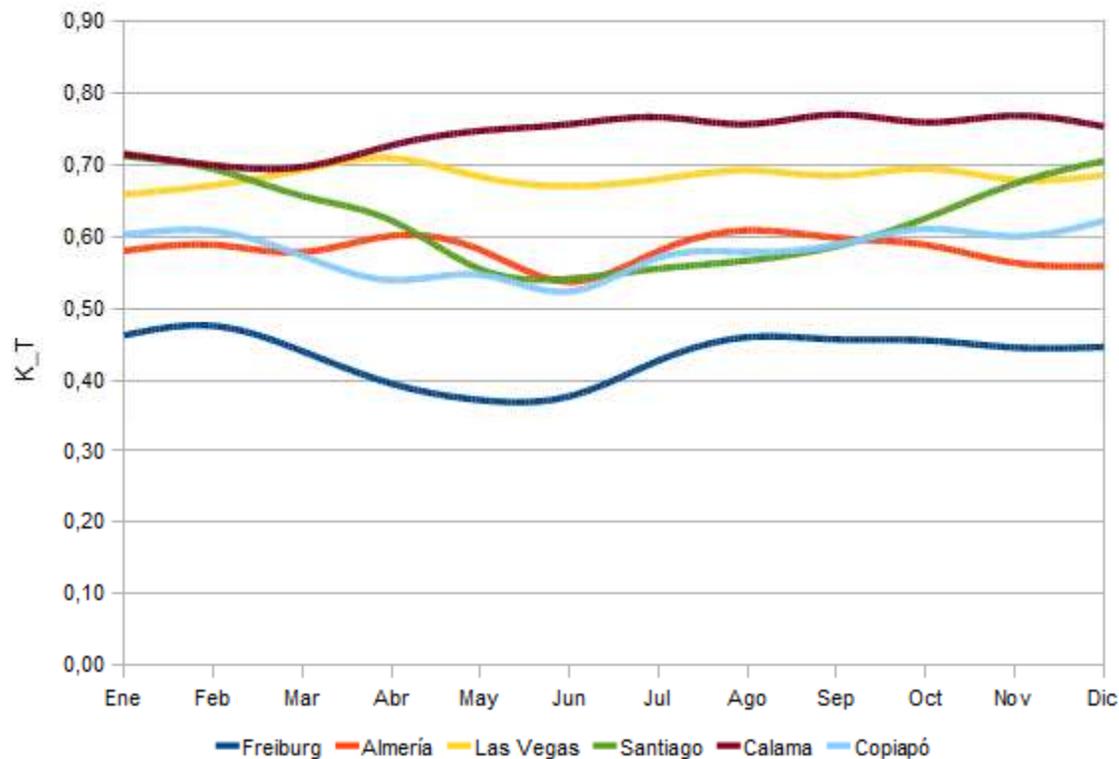
$$K_T = H_h / H_o$$

- ▶ Mientras más alto sea este valor, implica cielo más transparente y menos nubosidad.

Transparencia Atmosférica:

- ▶ Los lugares nubosos tienen transparencias promedio mensual del orden de 0,40.
- ▶ Lugares *muy* nubosos y lluviosos pueden tener valores en torno a 0,30.
- ▶ Valores más pequeños se observan solo en invierno en latitudes muy elevadas.
- ▶ Cuando K_T es mayor que 0,60, implica cielos muy claros.
- ▶ Valores de K_T mayores a 0,70 implica que casi no hay nubes.
- ▶ Comparemos los valores de K_T para las localidades que estamos analizando:

Transparencias comparadas de seis lugares...



Desde el punto de vista de *transparencia*, Santiago es similar a Copiapó. Y Santiago es superior a Almería. Claramente Calama (y todo el Norte Interior) tiene condiciones excepcionales.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

La radiación solar propiamente tal la podemos utilizar en forma directa solo como *iluminación*. Si queremos aprovecharla con otros fines, típicamente la misma se debe *convertir* en otra forma de energía. Los tres métodos de conversión de la energía solar son:

- **Conversión biológica:** es lo que hacen las plantas por medio de la fotosíntesis. Las hojas de las plantas (más bien su clorofila) captan los fotones de la radiación solar y aprovechan esta energía para “fabricar” productos químicos. Así absorben radiación y convierten Carbono e Hidrógeno (Carbono proveniente del CO₂ e Hidrógeno proveniente del agua) en Carbohidratos, azúcares y otros compuestos (por ejemplo celulosa). Como subproducto liberan oxígeno a la atmósfera.
- El proceso de conversión biológica es lo que permite la existencia de la vida en la tierra como la conocemos. Antes de que existieran las plantas fotosintéticas existía vida en la tierra (solo en los mares), pero la atmósfera no tenía oxígeno y el UV bombardeaba la superficie terrestre. La presencia de oxígeno en la atmósfera permite la existencia de los animales. En efecto, los animales absorben el oxígeno atmosférico, liberan CO₂ y se comen a las plantas (u otros animales), sacando de allí la energía para sobrevivir. Así que las plantas son verdaderas factorías energéticas.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

- **Conversión térmica:** en este caso la radiación solar simplemente se transforma en *calor*. Es el método de conversión más sencillo que existe. Está detrás del ciclo hidrológico y el ciclo de los vientos. Pero con tecnología podemos aumentar mucho su eficacia y además lograr temperaturas de trabajo muy elevadas.
- **Conversión Directa:** es el más reciente método de conversión de la energía solar. Consiste en transformar la misma *directamente* en energía eléctrica. También se conoce como *fenómeno fotoeléctrico*. Solo se descubrió a fines del Siglo XIX y su explicación física data de los trabajos de Albert Einstein a inicios del siglo XX (donde se introduce el concepto de fotón). La primera fotocelda *práctica* data recién de 1954 por el descubrimiento de los Laboratorios Bell de las celdas solares. Hoy es una real opción de generación eléctrica, con una producción mundial de celdas que supera las decenas de Megawatts de capacidad al año.

Conversión Térmica

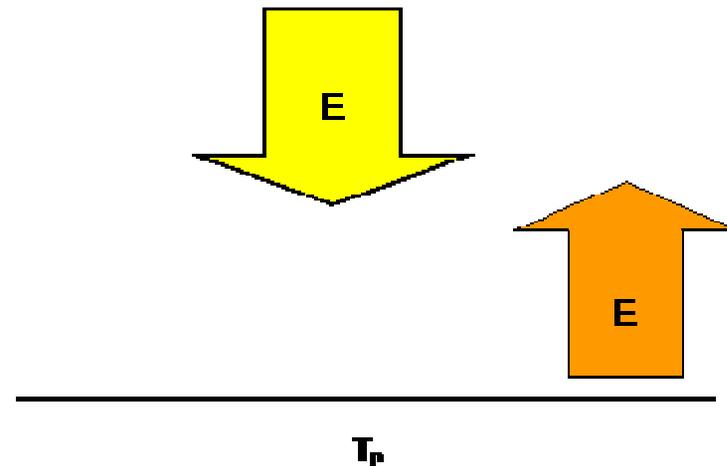
- El principio básico de funcionamiento de un sistema térmico de conversión de energía solar se basa en que existe una superficie receptora que *absorbe* la mayor parte del espectro solar incidente (la radiación solar en la práctica llega en longitudes de onda de 0,3 a 2,5 μm). El receptor, al calentarse, intercambia calor con el ambiente por medio de *radiación, convección y conducción*. Mientras mayor sea la diferencia de temperatura con el ambiente, mayores serán las pérdidas.
- Al equilibrio, se tiene que:
- $\alpha \cdot \tau \cdot E = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + E_{\text{util}}$

Conversión Térmica

- El término de la izquierda representa la radiación absorbida, siendo E la incidente y el término $\frac{E_a}{E_i}$ representa el cociente absorción-transmisión de la radiación solar entre cubierta transparente y superficie absorbente. Si además se usara un espejo (reflector) sería necesario incorporar el coeficiente de reflexión (ρ) del material reflectante.

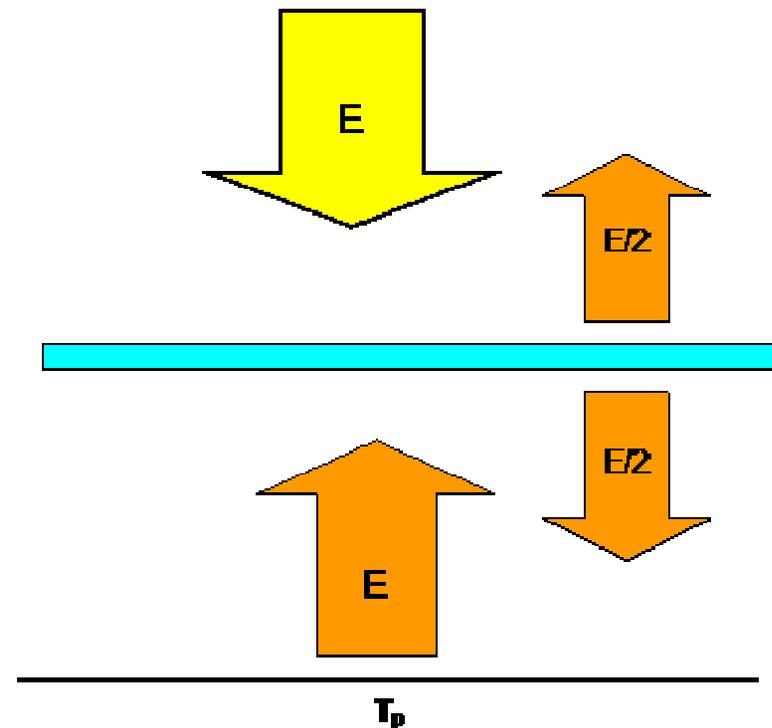
Colectores planos

- En el colector plano, se tiene una superficie captora que a la vez está recubierta de una superficie transparente para reducir las pérdidas térmicas por el frente. Esta típicamente aprovecha el *efecto invernadero*.
- Antes comprendamos como funciona una superficie negra expuesta al sol:



Colectores planos

- En el *efecto invernadero* la superficie de vidrio absorbe la radiación en onda larga que emite la placa absorbente y la vuelve a emitir por ambas caras.
- Lo que se reemite hacia el fondo se vuelve a absorber, con lo cual las pérdidas por radiación se reducen a la mitad.
- El efecto neto es que es posible alcanzar mayores temperaturas antes de que las pérdidas térmicas igualen la ganancia solar



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.

Transferencia básica

Cada una de estas pérdidas es aproximadamente igual a:

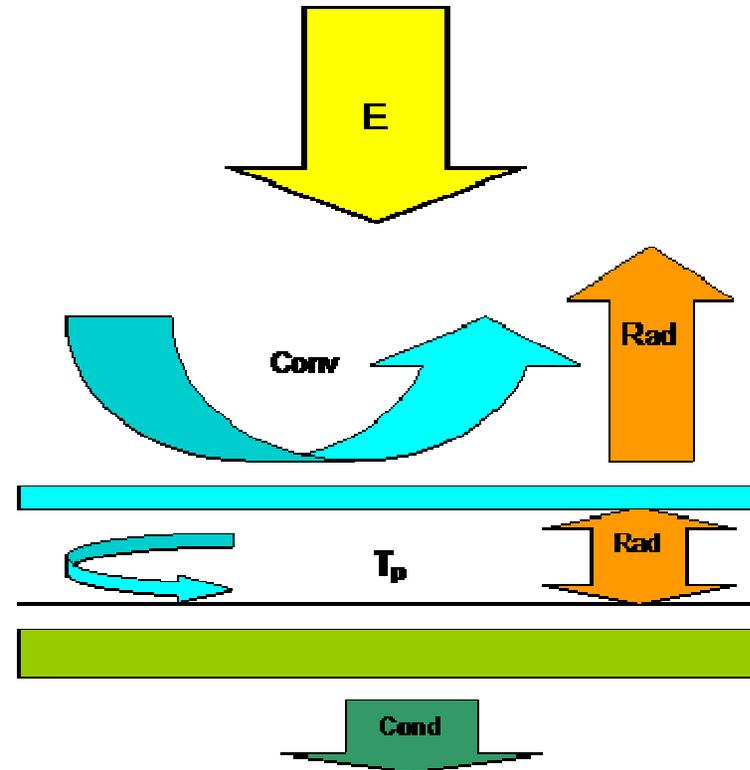
$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_a^4)$$

$$Q_{conv} = K(T_p - T_a)$$

$$Q_{cond} = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_p - T_a)$$

Colectores planos

- La cubierta transparente permite reducir las pérdidas por convección hacia el exterior y las pérdidas por radiación. Si aislamos el fondo y costados, además se reducen las pérdidas por conducción.
- En este caso el mecanismo dominante de pérdidas para temperaturas altas de receptor pasa a ser la *radiación*.



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 [W/m²] 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°C.

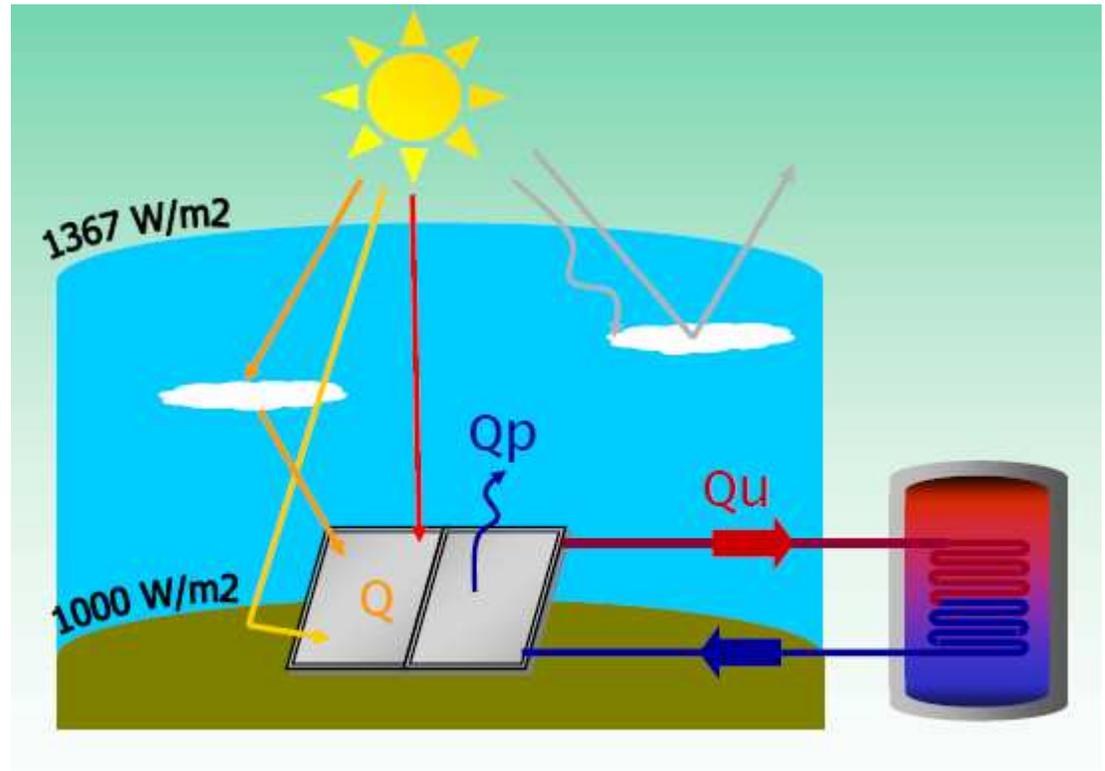
Colector Solar Plano

Cualquier objeto que se exponga a la radiación solar en la superficie terrestre, recibirá un flujo energético, Q , elevando su temperatura.

Pérdidas por Conducción, Convección y Radiación.

Extracción de la energía útil.

$$Q = Q_p + Q_u$$



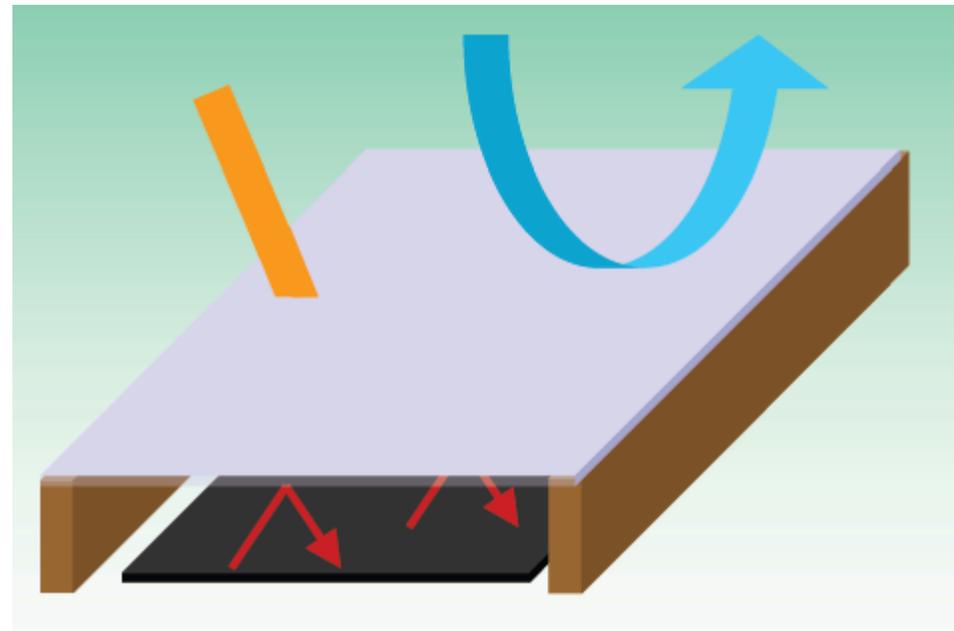
Colector Solar Plano

La utilización de una cubierta transparente sobre una superficie absorbedora permite el efecto invernadero disminuyendo las pérdidas por radiación.

La radiación solar atraviesa la cubierta de vidrio.

Radiación y bloqueada por el vidrio.

La cubierta constituye una barrera de agentes externos, además disminuye las pérdidas por convección.

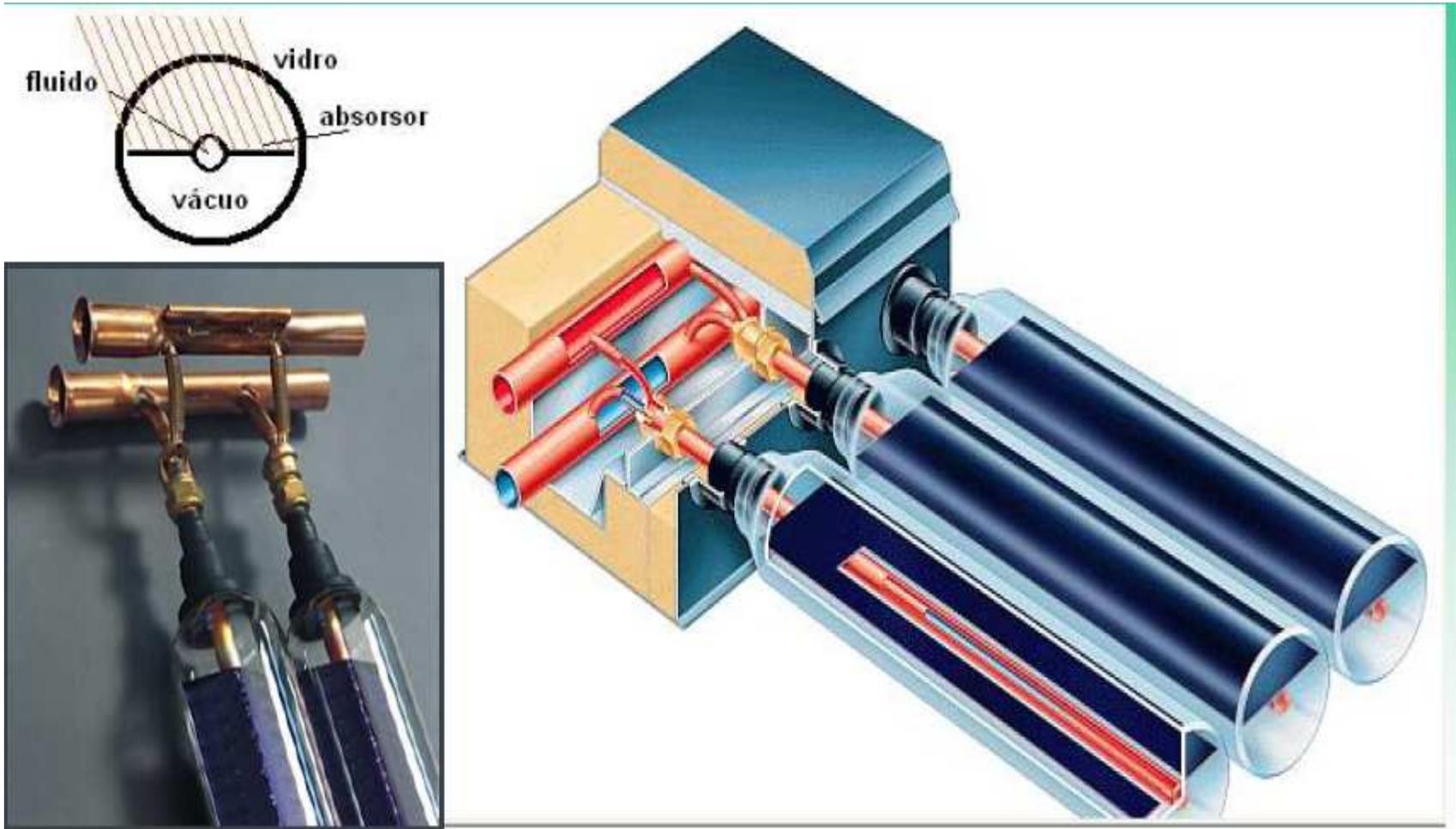


Colector Solar – Tubos al Vacío

El efecto invernadero puede ser mejorado de forma significativa, si entre el absorbedor y el vidrio existe el vacío. De esta forma se anulan las pérdidas por conducción y convección.



Colector Solar – Tubos al Vacío

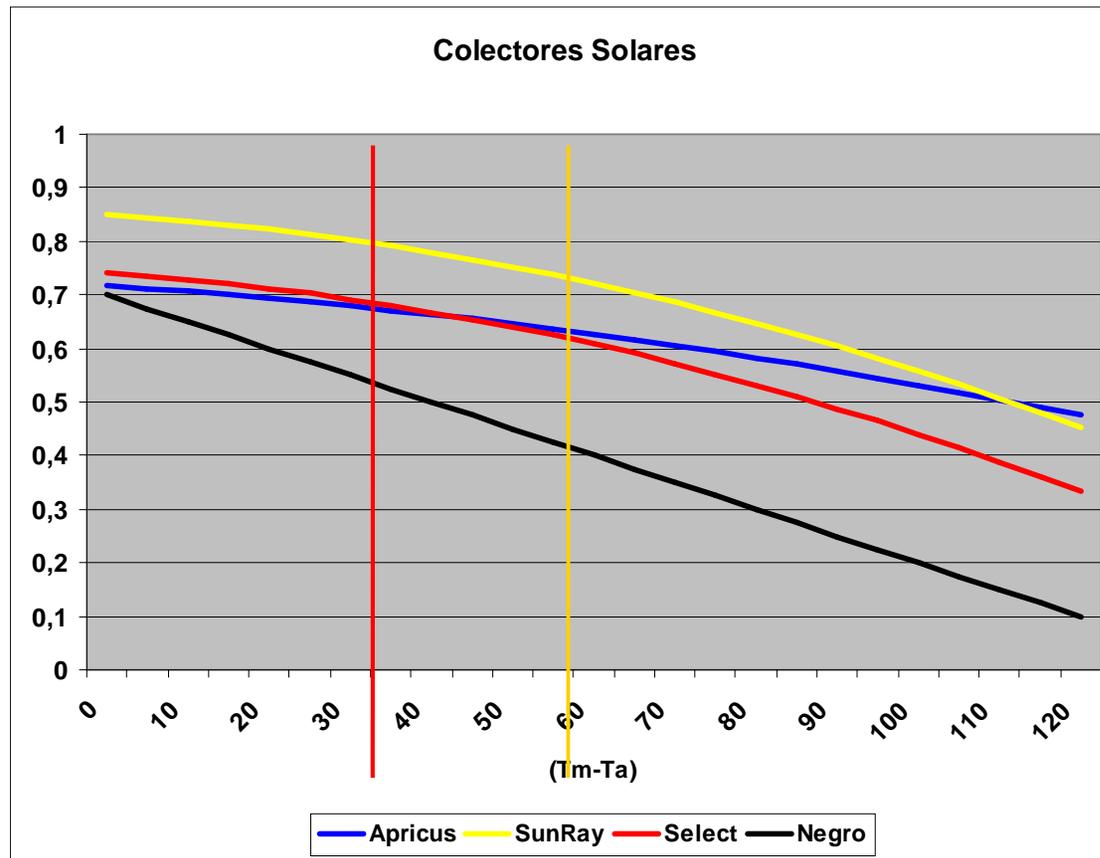


Colectores planos

- Es muy diferente calentar agua (que se usa a 45°C) a calentar agua para calefacción (que se usa a 60 a 65°C).
- En el caso del agua caliente sirve toda la energía captada por sobre la temperatura del agua de la red.
- En cambio para calefacción, solo sirve el calor captado sobre unos 50°C.
- Además las *magnitudes* son muy diferentes. Para agua caliente se necesitan unos 20 kWh/día, pero para calefacción se necesita unas 10 veces más para la típica construcción en Chile...

Colectores planos

- El colector plano se caracteriza por una *curva* de rendimiento que se obtiene para condiciones standard. Aquí con 1000 W/m² de insolación.



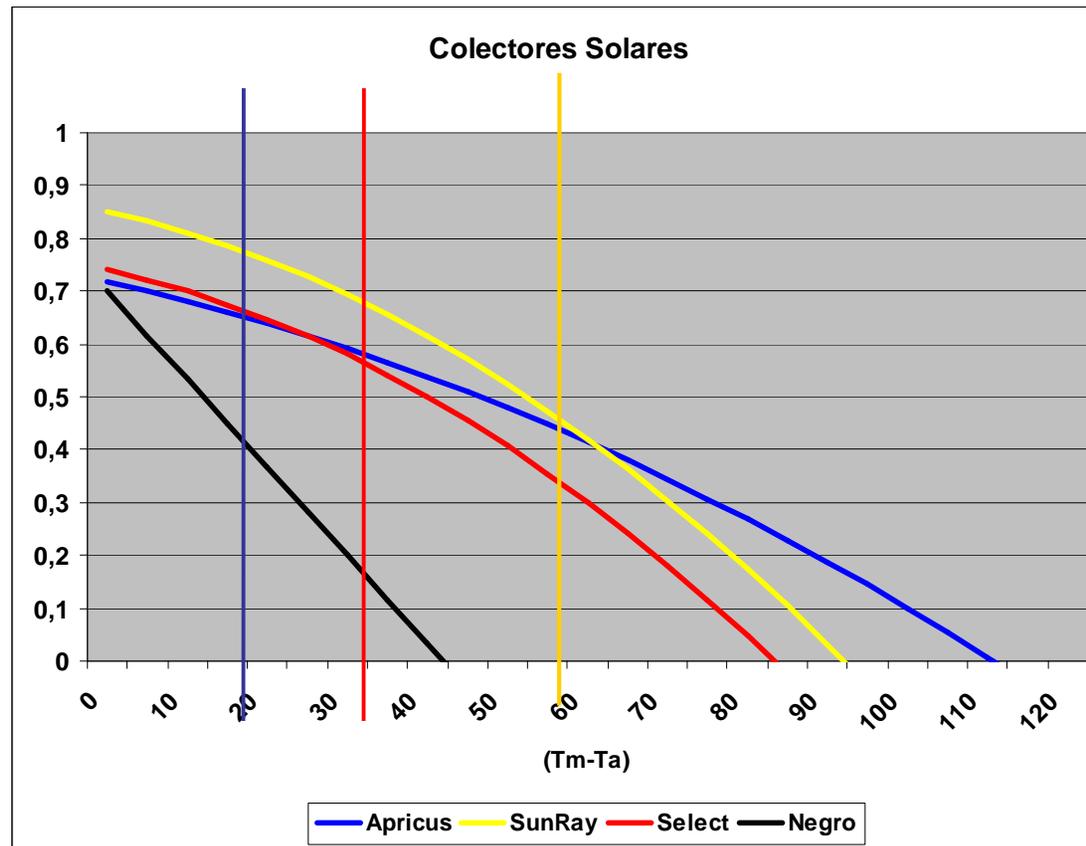
Colectores planos

- El colector plano se caracteriza por una *curva* de rendimiento que se obtiene para condiciones standard. Ahora con 600 W/m² de insolación.



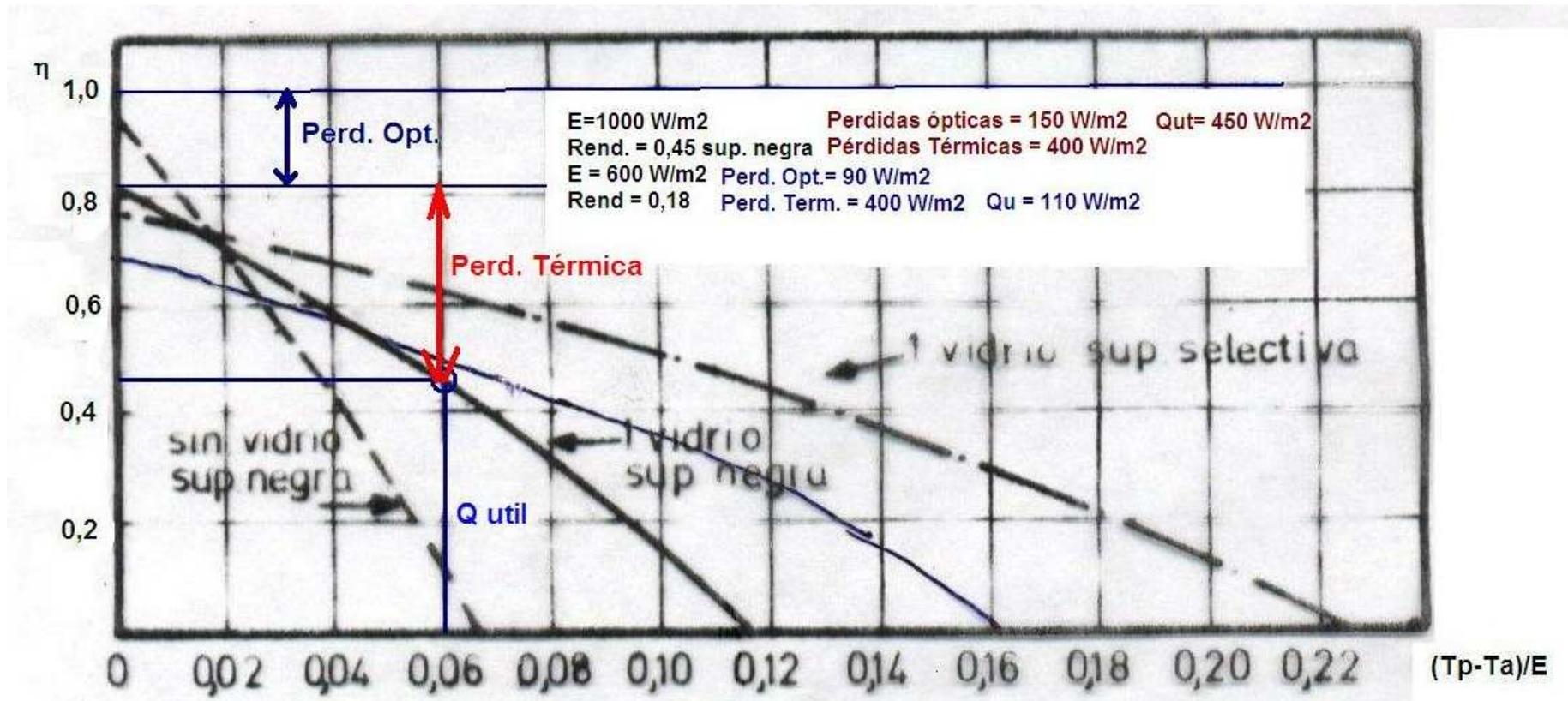
Colectores planos

- Y en este caso, tenemos los mismos colectores, pero con insolación de solo 300 W/m²



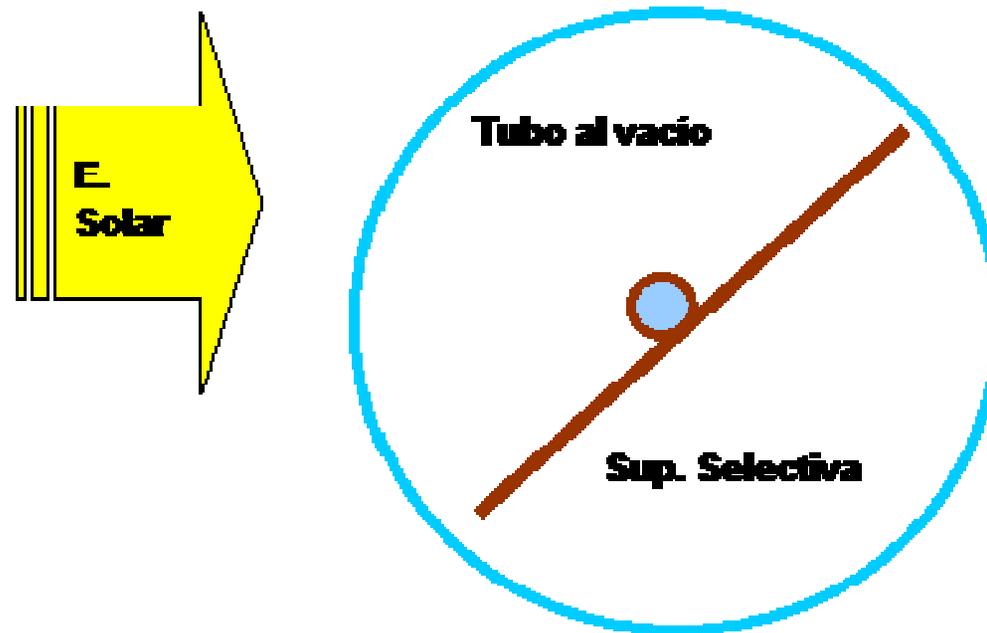
Colectores planos

- Aquí se ilustra la variación de rendimiento con la intensidad de la radiación.



Colectores planos (rendimiento)

- El caso mejor es con receptor de tubo evacuado y superficie selectiva:



Tipos de sistemas estáticos:

- **Sistemas Estáticos:**
- **Colectores planos:** estáticos, con superficie absorbente negra o selectiva. Tamaños de 1 a 2,5 m² por módulo. Es la tecnología más madura. Amplia variedad de productos y calidades en el mercado.
- **Colectores de tubo evacuado:** una serie de tubos en paralelo que tienen vacío dentro del envoltorio y una superficie absorbente selectiva. No toda la periferia del tubo es activa. La industria China hoy fabrica los de menor precio, pero no los de mejor calidad. Mucho fabricante europeo integra tubos evacuados Chinos a sistemas europeos.
- **Colectores CPC:** con Concentradores Parabólicos Compuestos. La superficie absorbente son aletas que reciben radiación por ambas caras. Buena eficiencia óptica. Siempre usan superficies selectivas. Muy buenos resultados, tecnología madura y a precios competitivos con los colectores planos.

Tipos de colectores



Colector plano y colectores de tubo evacuado

Tipos de colectores



Colectores cilindro parabólicos para generar calor industrial

Tipos de colectores



Colector-estanco. Muy barato, pero no acumula agua caliente de un día a otro.

Sistema Termosifón:



Se separa la función acumulador del colector. Se guarda agua de un día a otro. Mayor costo

Ventajas y desventajas de Termosifón:

Si uno separa el colector del estanque y monta el estanque más alto que el colector, puede tener un sistema que opera por *termocirculación*. Es simple y efectivo. Tiene, eso sí, algunos inconvenientes:

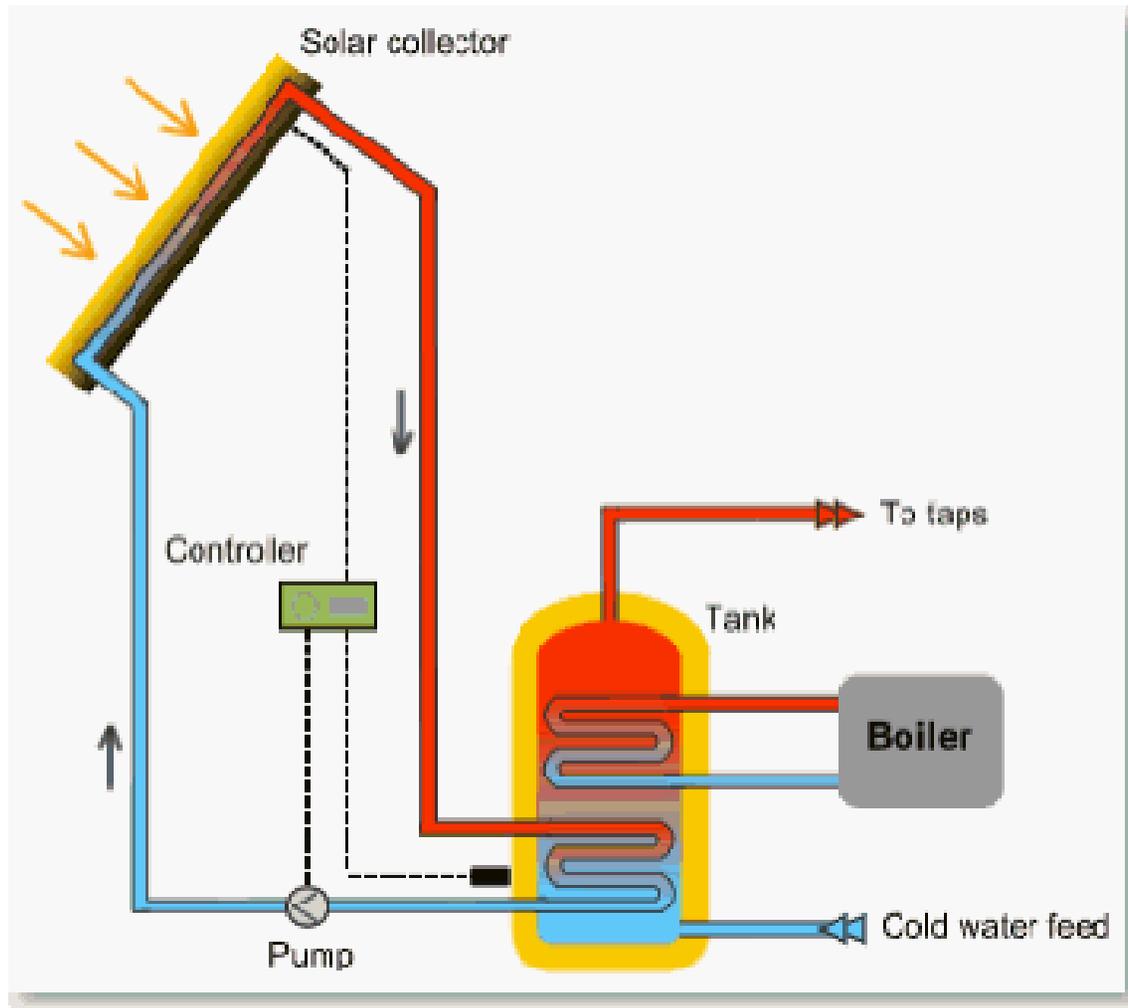
- Al hacer circular el agua de servicio directamente por el colector, pueden ocurrir incrustaciones, corrosión y otro tipo de fallas en los colectores.
- El sistema está más expuesto al riesgo de congelamiento.
- La mantención debe ser más cuidadosa.
- Pero para climas benignos, con buena calidad de agua, es sin duda una opción viable.

Ventajas y desventajas de Termosifón:



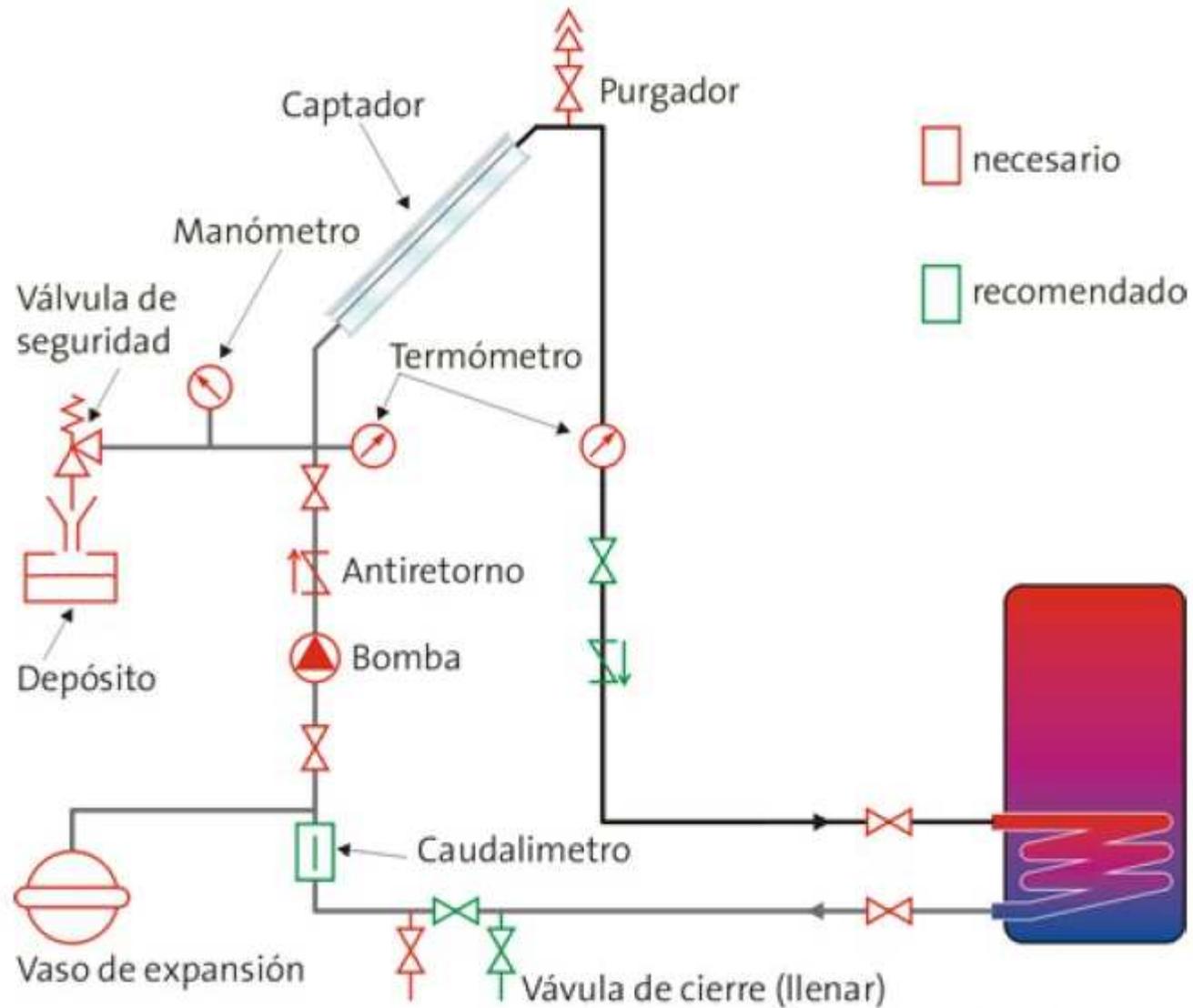
Sistema de termosifón con 2000 litros de acumulación

Esquema de sistema indirecto



Mejores características. Mayor costo.

Detalles de sistema indirecto



Aquí se ilustran detalles

Posibles Aplicaciones

Para sistemas térmicos:

- Mientras menor sea temperatura de ingreso de fluido al sistema, mejor será la eficiencia de conversión.
- Mientras más grande es el ΔT utilizable, mejor es la eficiencia de conversión.
- Mientras más ahorro de acumulación, menor será la inversión.
- El criterio básico es que sistema se amortice lo más rápido posible.
- Un buen sistema de control es clave. En caso de error se puede desperdiciar el 50% de la energía recibida.

Algunas consideraciones básicas de un buen sistema solar térmico

Para sistemas térmicos de ACS:

- El fluido que circula por los colectores no debe ser el agua de la red.
- El circuito de colección debe tener protección contra congelamiento y altas temperaturas.
- Todo el sistema debe tener protección contra altas temperaturas y corrosión.
- El sistema de acumulación debe ser capaz de soportar la presión de la red como presión de trabajo.
- Para sistemas pequeños, el acumulador debe tener calentador *indirecto*. Idealmente de serpentín sumergido, También puede ser de camisa (menos eficiente). En ambos casos debe existir escotilla de inspección.
- Tiene que tomarse especial consideración contra la corrosión. Esto implica ánodos de sacrificio, evitar el uso de acero galvanizado en el estanque de acumulación.

Algunas consideraciones básicas de un buen sistema solar térmico

Para sistemas térmicos de ACS:

- En sistemas de mayor tamaño se debe usar intercambiador de placa externo al estanque de acumulación. (sobre 3000 lts).
- Cuando se utilizan bancos de colectores, es esencial equilibrarlos hidráulicamente, tener las tuberías de alimentación y retorno aisladas y tener suficientes elementos de purga de aire y venteo, así como estanques de expansión.
- Idealmente el acceso al sistema debe ser sencillo.
- Como anticongelante usar mezclas de agua y propilenglicol. Nunca utilizar etilen-glicol.
- Idealmente utilizar un controlador con bomba de circulación de frecuencia variable.

Balance Térmico en Edificación

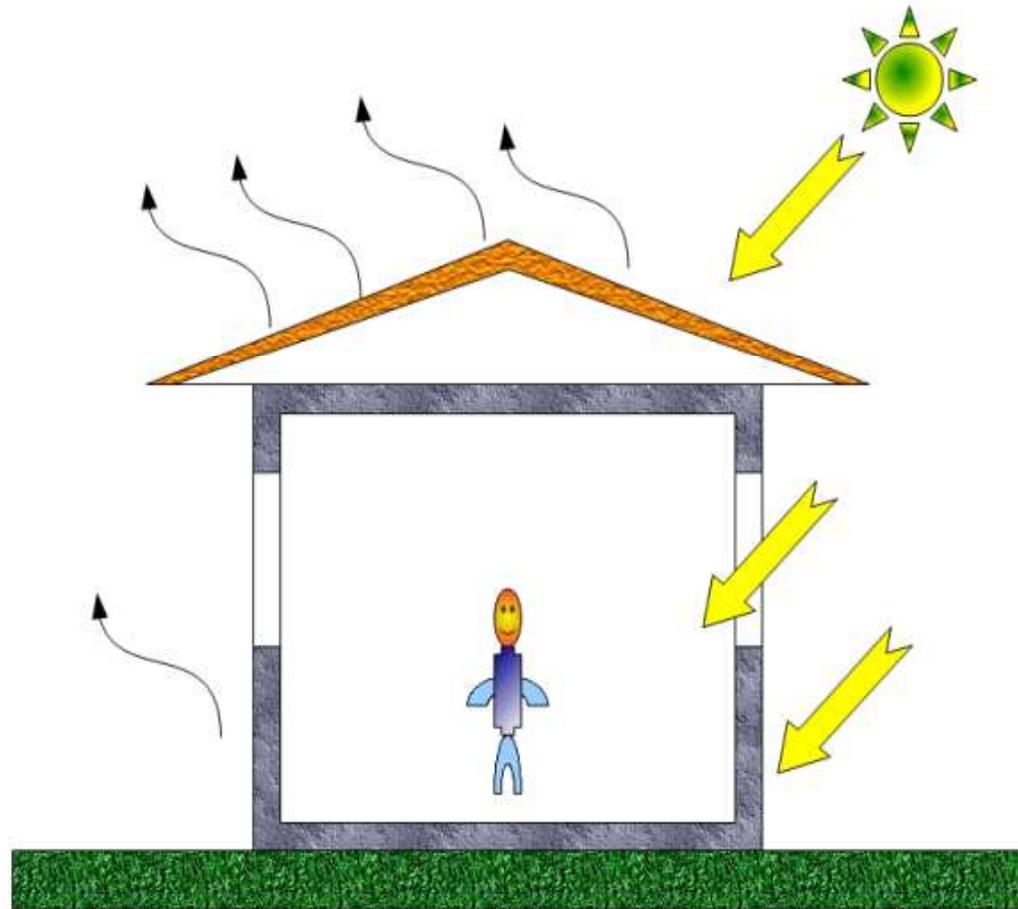
Las construcciones interactúan con el medio ambiente exterior. Sus características propias definen como reaccionan en este intercambio.

- ▶ **La piel:** de la construcción es el medio que ayuda a definir el intercambio con el exterior.
- ▶ **Las ganancias internas:** definen cargas térmicas que, según sea el caso, pueden ayudar a mantener un clima interno agradable o bien hacer la situación más compleja de manejar.
- ▶ **Las condiciones externas:** definen las fuerzas que van a tender a sacar la construcción de su situación de equilibrio.
- ▶ **La inercia térmica:** ayuda a amortiguar las oscilaciones en el interior.

Balance Térmico en Edificación

- ▶ **Intercambios por la piel:** Son de los siguientes tipos:
 - ▶ **Intercambios conductivos de calor:** a través de muros, techo, ventanas, pisos. Se producen por la diferencia de temperatura entre interior y exterior.
 - ▶ **Intercambios convectivos de calor:** producto de movimiento de aire entre interior y exterior. Hay una cantidad mínima que se requiere por razones fisiológicas para reponer aire viciado por aire fresco. Un exceso de convección implica pérdidas térmicas.
 - ▶ **Intercambios radiativos de calor:** producto de radiación de onda larga (infrarojo térmico) y onda corta (radiación solar). La radiación de onda larga está entre los 2,5 y 80 μm y la de onda corta de los 0,3 a 2,5 μm .
 - ▶ **Intercambios evaporativos (o latentes):** producto del calor necesario para evaporar o condensar agua. Lo más típico es la energía necesaria para deshumectar o humectar aire, pero también puede haber evaporación necesaria para secar (por ejemplo) muros o techos.

Balance Térmico en Edificación



Balance Térmico en Edificación

- ▶ **Las ganancias internas:** definen cargas térmicas que, según sea el caso, pueden ayudar a mantener un clima interno agradable o bien hacer la situación más compleja de manejar. En este acápite manejar los siguientes valores:

Iluminación: los Watts gastados es ganancia interna. Los Watts multiplicados por las horas de uso da los Wh de energía disipada.

Equipos eléctricos: estos disipan en función de su potencia nominal de consumo (Watts) multiplicados por horas de uso. Por ejemplo, un refrigerador consume de 200 a 300 Watts y funciona m/m un 30% del tiempo.

Personas: si la persona está sedentaria, disipa unos 100 Watts por persona. Con trabajo liviano sube a 200 Watts y con ejercicio pesado sube a 300 Watts de potencia disipada.

Balance Térmico en Edificación

- ▶ **Las condiciones externas:** definen las fuerzas que van a tender a sacar la construcción de su situación de equilibrio.
 - ▶ Debemos distinguir entre aquellos lugares donde la temperatura (condiciones) externas están permanentemente fuera de la zona de confort de aquellos lugares donde solo en ciertas horas se cae fuera de la zona de confort.
 - ▶ También es clave en las condiciones externas el balance radiativo. Esto significa que tanto mucha radiación solar como cielos muy puros y transparentes alteran de manera fundamental el balance térmico.
 - ▶ Entonces, dadas las condiciones externas variables, ocurrirá a lo largo del día momentos de *Ganancias* y momentos de *Pérdidas térmicas*. También es posible que de forma simultánea se de condiciones de ganancia y pérdida térmica en una construcción. Pueden existir *zonas* donde hay ganancias y otras *zonas* donde existan pérdidas de manera simultánea.

Balance Térmico en Edificación

- ▶ **Un ejemplo:** Un día frío de invierno. Adentro se desea mantener un nivel de confort de unos 18 a 20°C. Afuera hay 5°C.
 - ▶ Entonces existen pérdidas térmicas desde la casi totalidad del envoltorio al exterior.
 - ▶ Pero si hay un ventanal que mira al norte y sobre él incide radiación solar a una intensidad de unos 600 [W/m²], entonces penetrarán unos 500 Watts por cada metro cuadrado de ventana.
 - ▶ También puede darse el caso de que ciertas zonas de la *piel* (muro, techumbre) se calienten por efecto de la radiación solar (va a depender del color de la piel) y las pérdidas hacia el exterior se reduzcan, anulen o incluso inviertan en esas zonas.
 - ▶ En la *noche* el efecto de la radiación infraroja hará que la *piel* se enfríe por debajo de la temperatura ambiente. En lugares desérticos y de altura, esto puede llegar a significar alcanzar temperaturas de 8 a 10°C por debajo de la temperatura ambiente.

Balance Térmico en Edificación

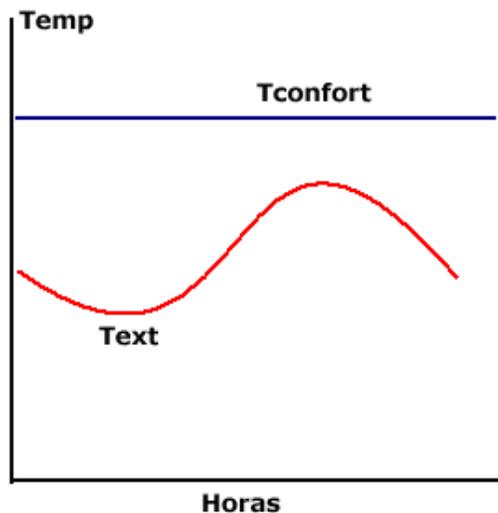
- ▶ **Balance Térmico:** nos dice que en un período de tiempo (usualmente un día, a veces más de un día) se tiene que producir un equilibrio entre todos los flujos térmicos. Es decir:

$$\sum_1^n G_{ext} + \sum_1^n G_{int} + \sum_1^n Pérdidas = 0$$

El Caso de la Arquitectura...

Una casa o edificio es un sistema que *interactúa* y *modula* el clima exterior.

Lo primero que debemos tener claro es cuales son nuestras características climáticas.
Y en que se distingue de otros lugares del mundo.



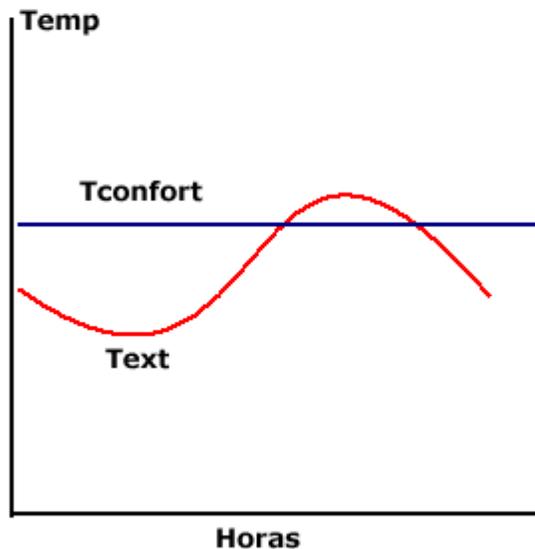
En gran parte del mundo desarrollado, en invierno las temperaturas externas están *muy* por debajo de la temperatura de confort durante el día y la noche.

En ese caso, el rol principal del edificio es *aislar* del clima exterior.

En casos excepcionales se pueden aprovechar los flujos existentes.

El Caso de la Arquitectura...

En el caso de Chile, para gran parte del país, nos encontramos que las temperaturas externas diurnas están cerca o en la zona de confort.



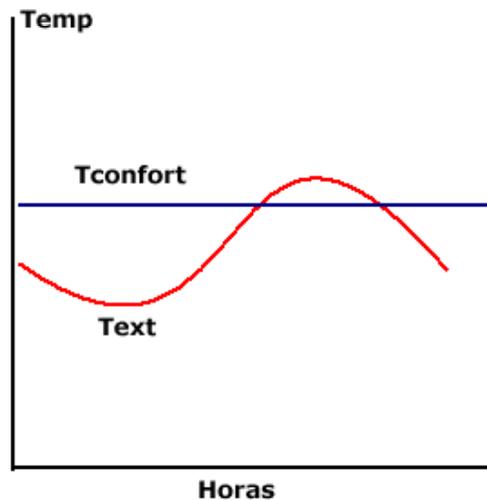
En este caso, el rol principal del edificio será *modular* las condiciones externas para mantenernos en la zona de confort.

También conviene aprovechar al máximo los flujos naturales de energía.

El Caso de la Arquitectura...

Cuando un sistema solo busca *aislar*, es relativamente poco importante *almacenar* energía.

En cambio cuando en un sistema se busca *modular*, es clave el rol del almacenamiento térmico, especialmente en el propio edificio.



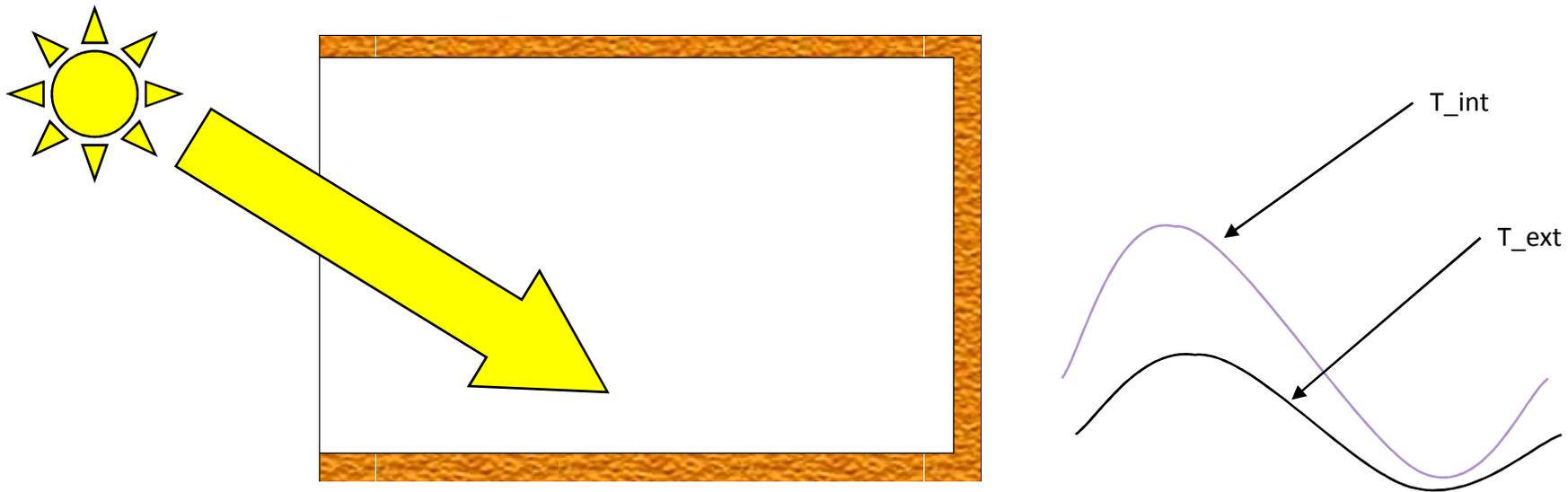
Al *modular*, conviene que las temperaturas internas oscilen, para maximizar aprovechamiento en masa térmica de estructura.

Inercia Térmica y Capacidad Térmica

- ▶ En este párrafo abordaremos el tema de inercia térmica, oscilación térmica exterior y como la masa térmica tiene influencia en el comportamiento de las viviendas y edificios.
- ▶ Lo dividiremos en los siguientes puntos:
 - ▶ **Capacidad térmica de materiales:** en particular de los más usuales en construcción. Hormigón, albañilerías, agua y otros.
 - ▶ **Oscilación térmica exterior:** como varía la temperatura ambiente externa.
 - ▶ **Grados día:** y el comportamiento de la estructura.
 - ▶ **Capacidad térmica y retardo térmico:** como la capacidad térmica influye en el comportamiento del recinto.
 - ▶ **Ganancias solares:** como se pueden aprovechar.
 - ▶ **Conclusiones:** generales del párrafo.

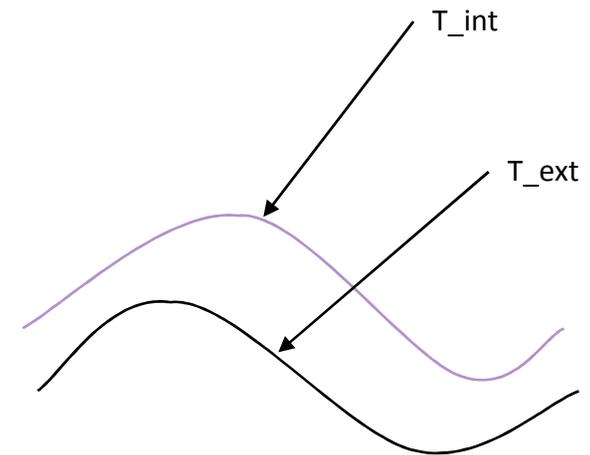
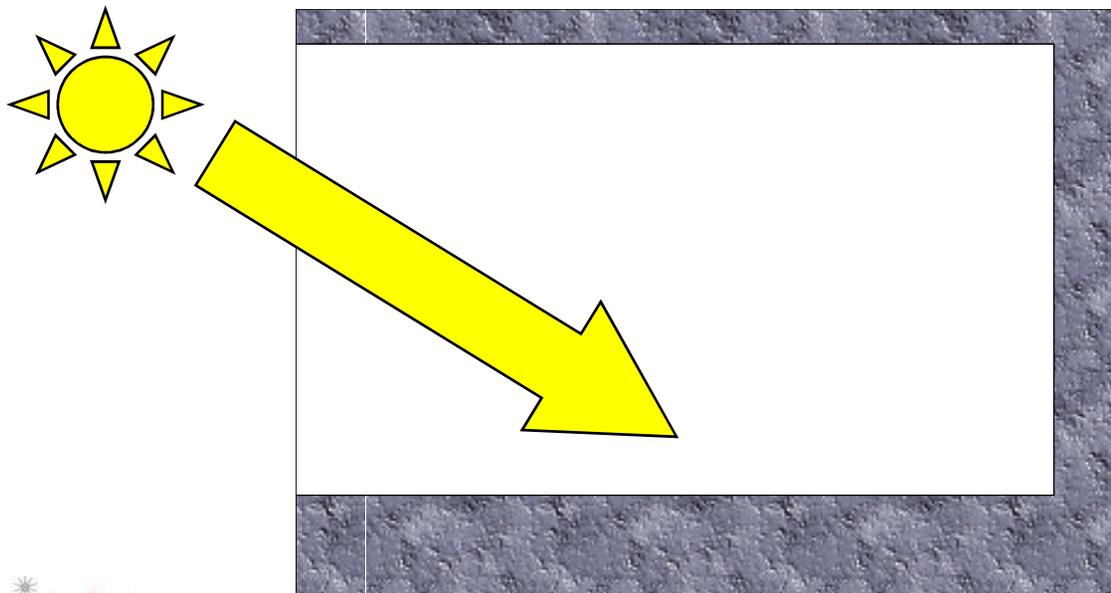
Inercia Térmica

- ▶ El efecto de la inercia térmica en las estructuras es que *amortiguan y retardan* la oscilación térmica exterior.
- ▶ Además si hay ganancias internas, también las mismas son amortiguadas por efecto de la inercia térmica.



Inercia Térmica

- ▶ Una estructura con alta inercia, va a amortiguar y retardar la ganancia interna y amortiguar la oscilación térmica exterior.



Capacidad Térmica de Materiales

- ▶ Hay dos valores básicos:
 - ▶ **Capacidad térmica:** cantidad de calor que pueden almacenar o ceder en función de un ΔT fijo.
 - ▶ **Difusividad térmica:** facilidad para conducir el calor.

En la siguiente Tabla se entregan algunos valores de materiales usuales. Están expresados por unidad de masa y por unidad de volumen.

Valores de Capacidad Térmica

Material	Densidad	Conductividad	Cap.Term	Cap.Term
	[kg/m ³]	[W/(m°C)]	kJ/(kg°C)	kJ/(dm ³ °C)
Tablero Yeso	800	0,12	1,21	0,97
Acero	7600	45,3	0,5	3,80
Acero Inox	7680	15,6	0,46	3,53
Estuco Cemento	1860	0,72	0,84	1,56
Piedras	2600	4	0,84	2,18
Ladrillo barro cocido	1920	0,9	0,79	1,52
Concretos con grava o piedra	2400	2,6	0,84	2,02
Maderas blandas	500	0,12	1,63	0,82
Agua	1000	0,58	4,187	4,19

Capacidad Térmica

- ▶ Para entender como aplicar esto de manera simple, primero hay que tener en cuenta órdenes de magnitud de energía necesaria para calefaccionar vivienda y los grados día.
- ▶ Esto se explicará a continuación:
- ▶ El Factor de pérdida volumétrico es G (incluyendo ventilación).
- ▶ Supongamos un caso de vivienda con $G=1,5$ [W/m³°C] y volumen de 250 [m³].
- ▶ La pérdida total será de:

$$P=1,5 \times 250 = 375 \text{ [W/°C]}$$

Capacidad Térmica

- ▶ Suponer ahora que se desea mantener 18°C como media interior y afuera la temperatura media sea de 8°C.
- ▶ La **energía** necesaria para calefacción sería:

$$E = 375 \times (18-8) \text{ [W/°C]} \times \text{[°C]} \times \text{[día]}$$

$$1 \text{ día} = 86.400 \text{ [s]}$$

$$\Rightarrow E = 375 \times 10 \times 86.400 = 324.000.000 \text{ [J]}$$

$$E = 324 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$E = 90 \text{ kWh}$$

Solo para ese día. Si en el lugar, durante el mes se acumularan unos 150 °C-día, la energía requerida sería:

$$E = 375 \times 150 \text{ [W/°C]} \times \text{[°C-día]}$$

$$E = 56.250 \text{ [W-día]}$$

$$E = 4.860 \text{ [MJ]} = 1.350 \text{ [kWh]}$$

Esto es un promedio de 45 kWh cada día.

Capacidad Térmica

- ▶ Si el piso fuera una losa de 12 cm de espesor y pudiéramos hacer que la temperatura de la misma oscile 6°C en total, la capacidad de acumulación de calor de 100 m² de losa sería:

$$E = 100 \times 0,12 \times 2,02 \times 1000 \times 6 \text{ [kJ]}$$

$$E = 145.440 \text{ kJ} = 40,4 \text{ kWh}$$

Esto significa que en la estructura misma de la construcción hay capacidad suficiente para absorber gran parte de la demanda diaria de energía. Siempre que la construcción tenga suficiente masa. En caso contrario:

- ▶ O se agrega capacidad de acumulación adicional.
- ▶ O se supe la demanda por calefacción.
- ▶ O se mejora la aislación.

Capacidad Térmica

- ▶ Si no existe la capacidad de acumulación de calor (construcción liviana):
 - ▶ O se suple la demanda por calefacción.
 - ▶ O se mejora la aislación.

En cualquier caso la capacidad térmica amortigua las oscilaciones de temperatura y permite aprovechar al máximo los flujos naturales de energía.

Pero no es trivial aprovecharla bien.

Capacidad Térmica

- ▶ Este mismo análisis de la capacidad térmica muestra también por qué conviene dejar la aislación térmica por *fuera* de la estructura. Así la masa o capacidad térmica queda *dentro* y podemos aprovechar su oscilación térmica internamente.
- ▶ En cambio si la aislación queda por dentro:
 - ▶ Se pierde la ventaja de la oscilación térmica de esa masa.
 - ▶ Se corre el riesgo de que exista condensación entre aislación y muro.

Recuerden: siempre existe mayor cantidad de vapor de agua donde hay más temperatura.

Calentamiento de Aire

El aire tiene baja densidad (1,2 kg/m³ approx) y baja capacidad térmica. Así que se puede calentar y enfriar rápidamente.

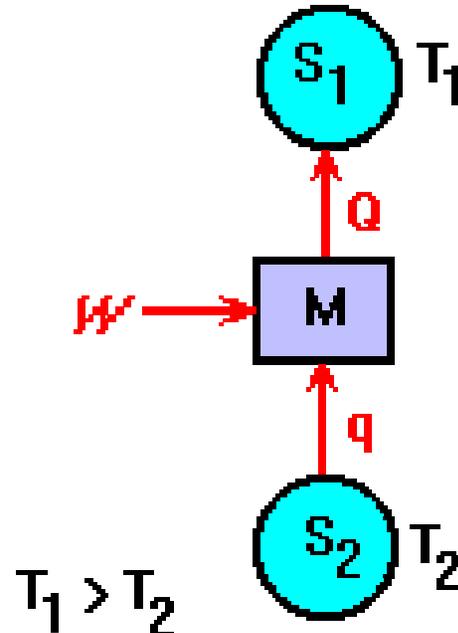
Su capacidad térmica es de 1,005 [kJ/(kg°C)].

Esto significa que para aumentar la temperatura de 1m³ aire en 10°C bastan:

$$E = 1,005 \times 1,2 \times 10 = 12,06 \text{ kJ} = 0,00335 \text{ kWh} = 2,88 \text{ kcal}$$

Refrigeración

Una máquina de frío lo que hace es *elevantar* calor de menor potencial (temperatura) a mayor temperatura.



Refrigeración

Para máquinas que absorben trabajo, también hay eficiencias máximas. Estas las podemos expresar por:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{q_{frio}}{W_{el}}$$
$$\varepsilon_{ref} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Válido en el caso de refrigeradores

Refrigeración

Para bombas de calor, la eficiencia teórica es simplemente el inverso de Carnot:

$$\varepsilon_{bc} = \frac{Q_{cal}}{W_{el}}$$
$$\varepsilon_{bc} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \geq 1$$

Válido en el caso de bombas de calor. Siempre es mayor o igual que 1.

Coeficiente de Performance

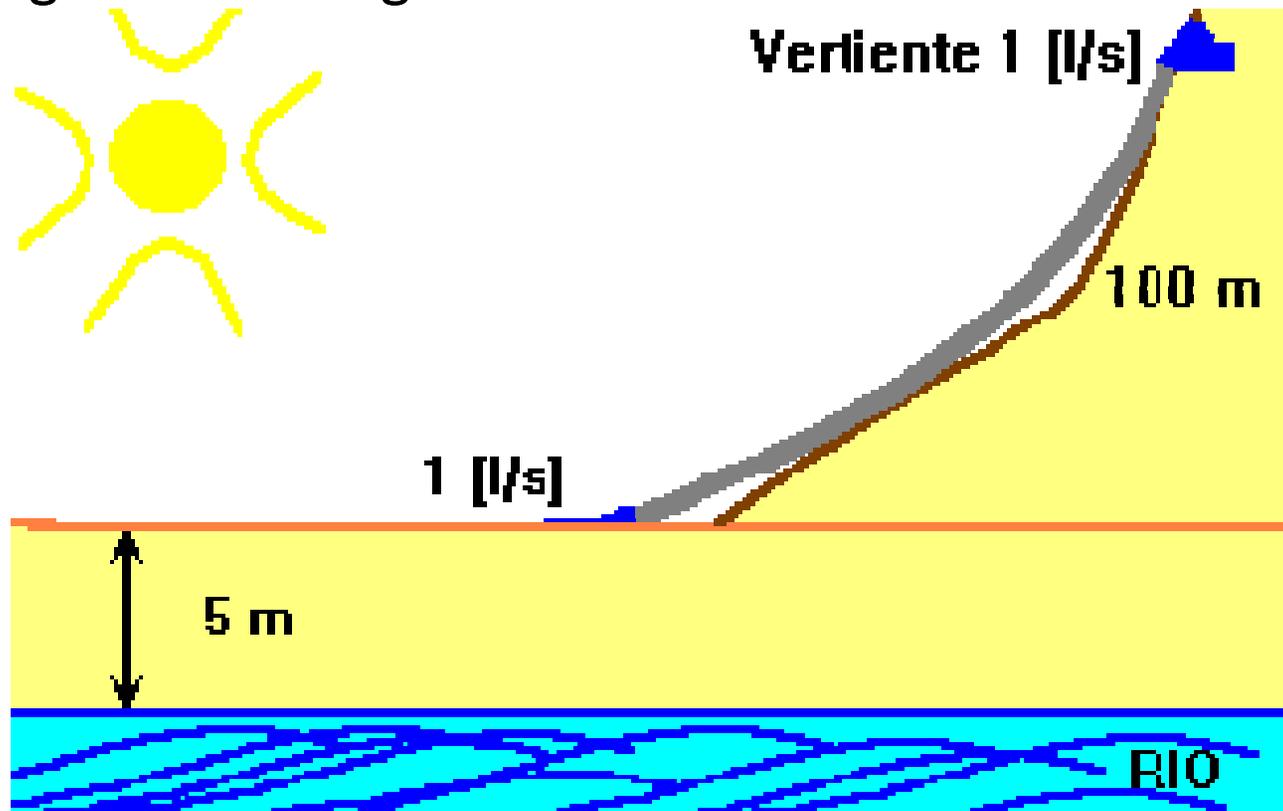
Tanto para bombas de calor, como equipos de refrigeración, se define el *Coeficiente de Performance, COP*, como:

$$\varepsilon = COP = \frac{Q_{util}}{W_{el}}$$

Este es un concepto en el que vamos a insistir en el próximo módulo.

Como opera el ciclo?

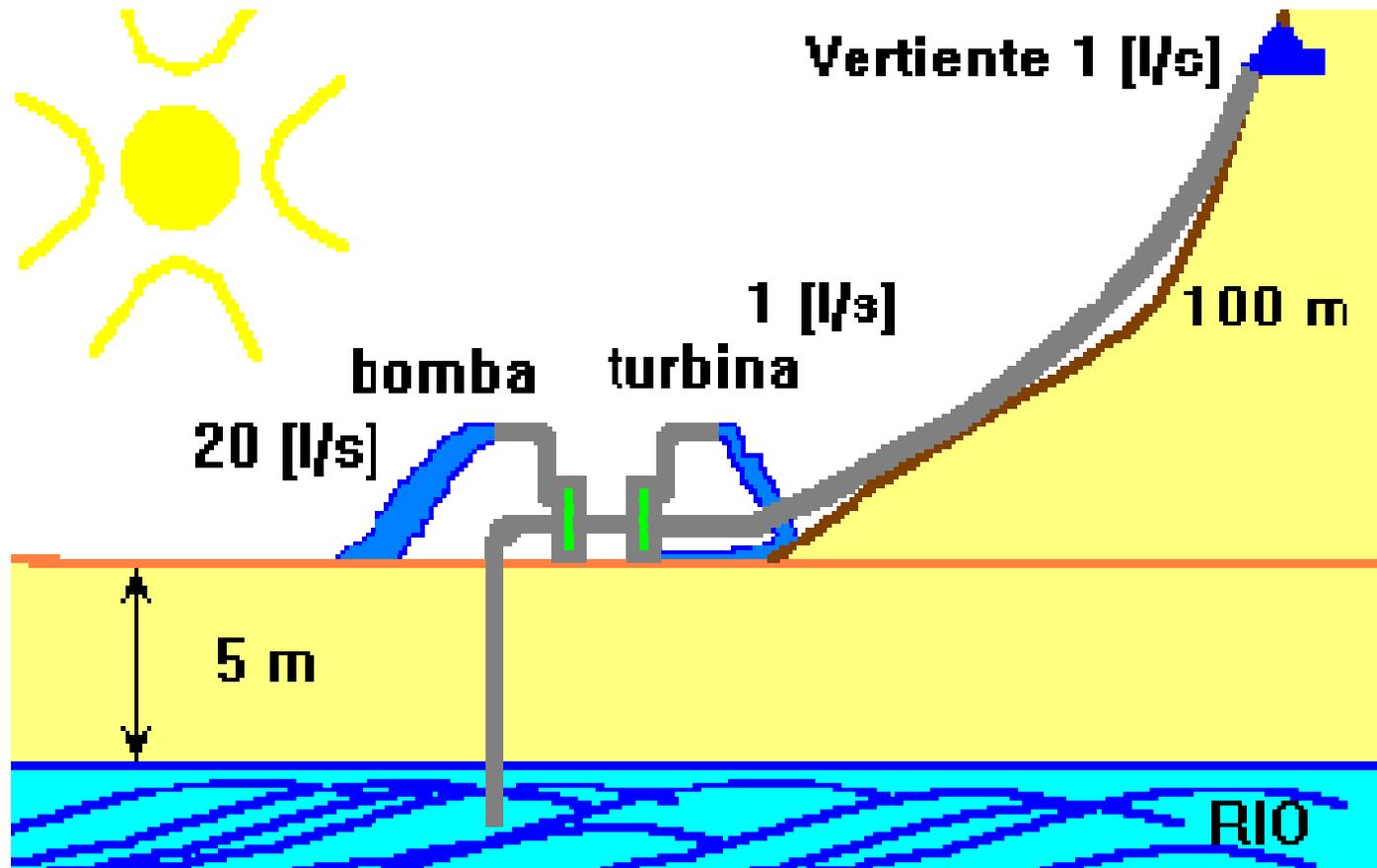
En cierta forma, el ciclo de refrigeración uno lo puede explicar con la siguiente analogía:



El agua de la vertiente es de “alto potencial”

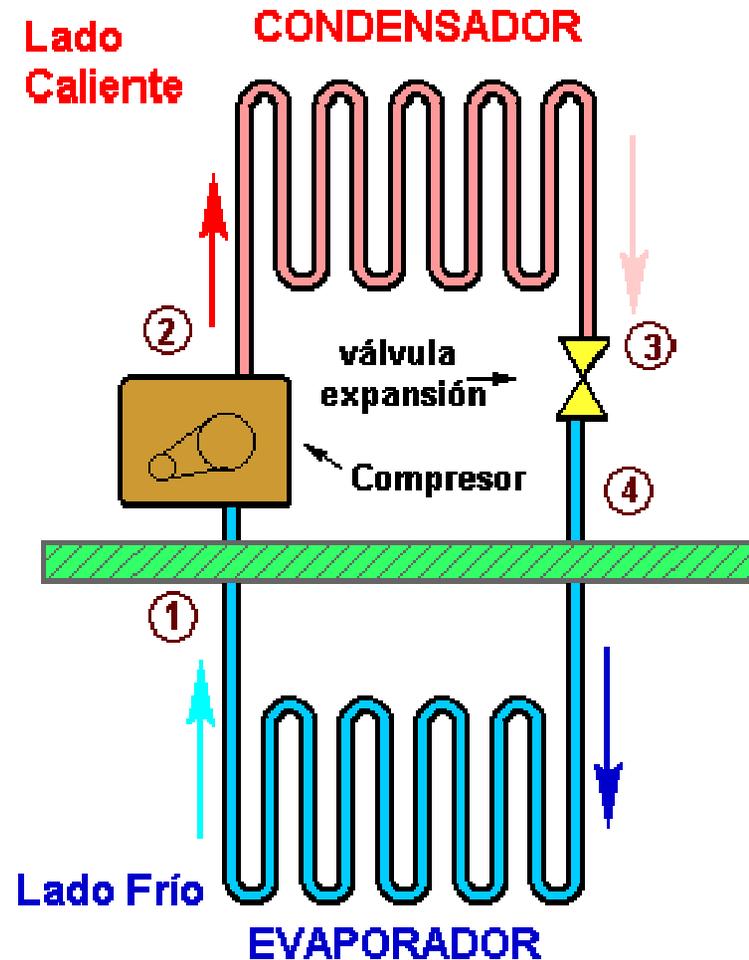
Como opera el ciclo?

Si uno aprovecha el potencial, puede “multiplicar los panes”:



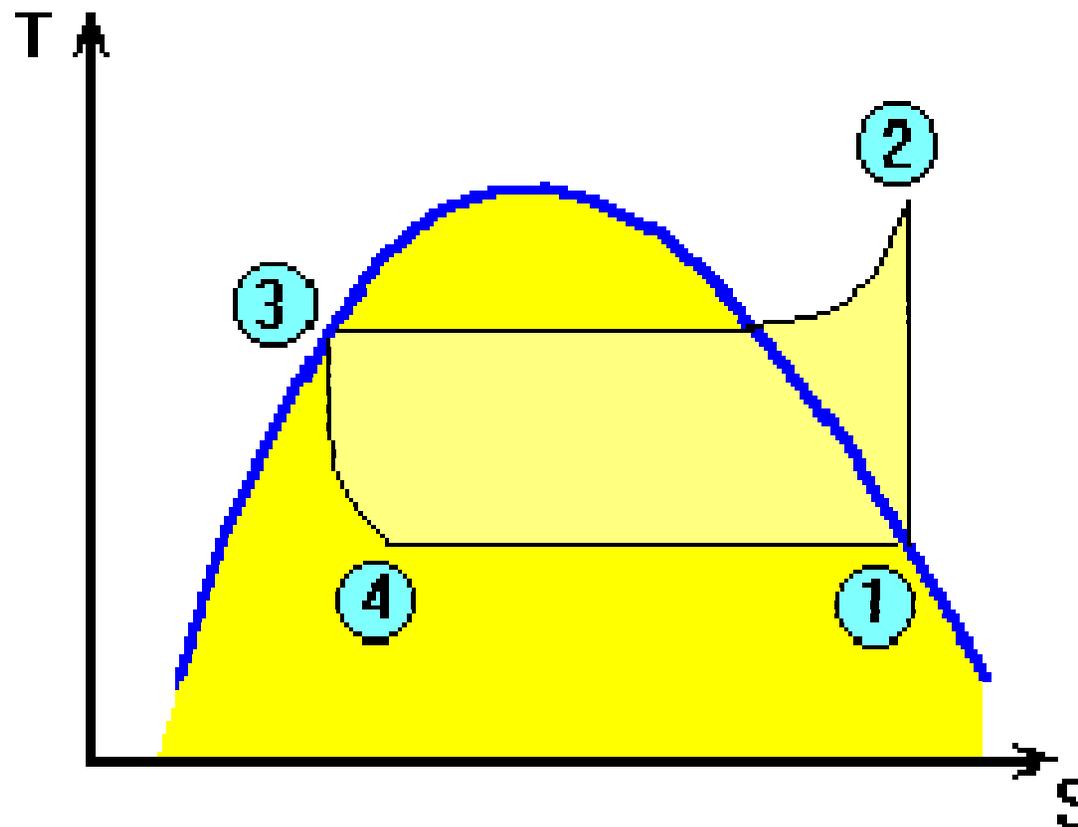
Refrigeración por compresión

Es el sistema más “clásico”:



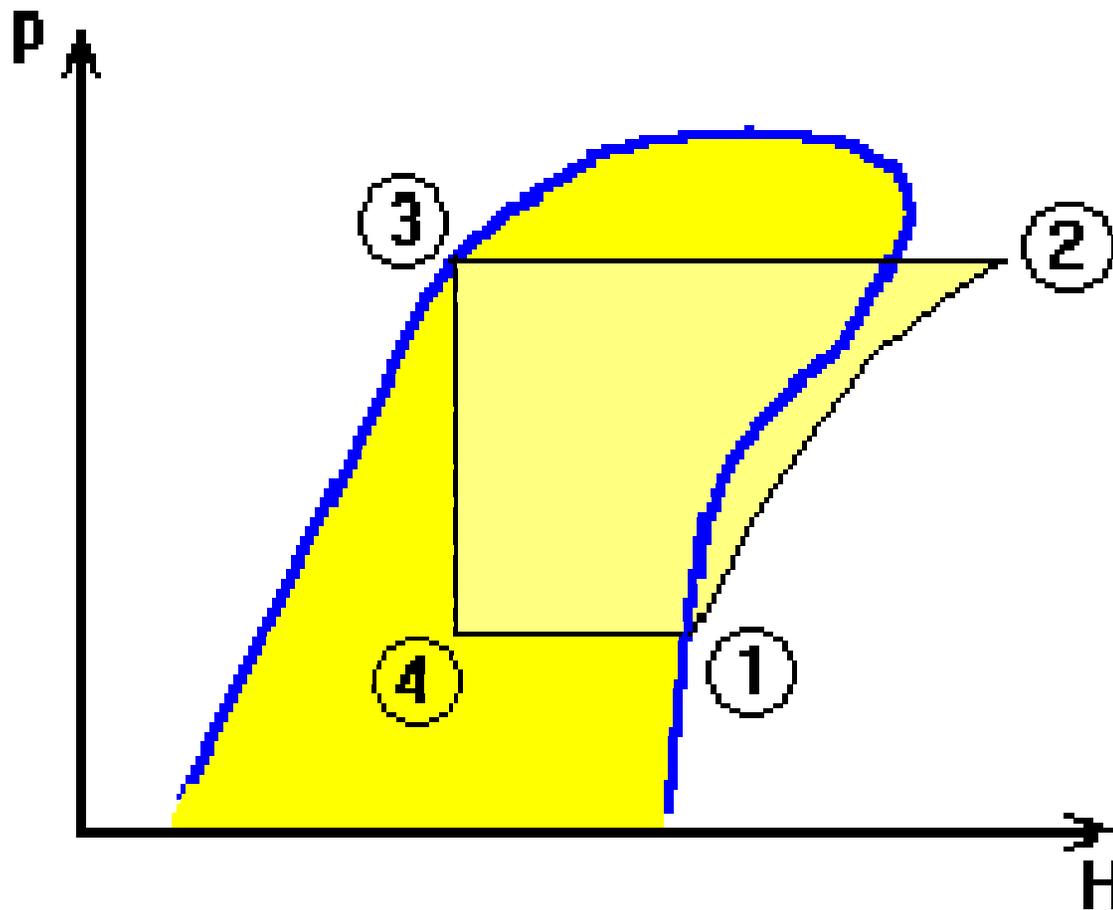
Refrigeración por compresión

Es un ciclo de Hirn inverso, parecido a lo que ocurre en las centrales térmicas:

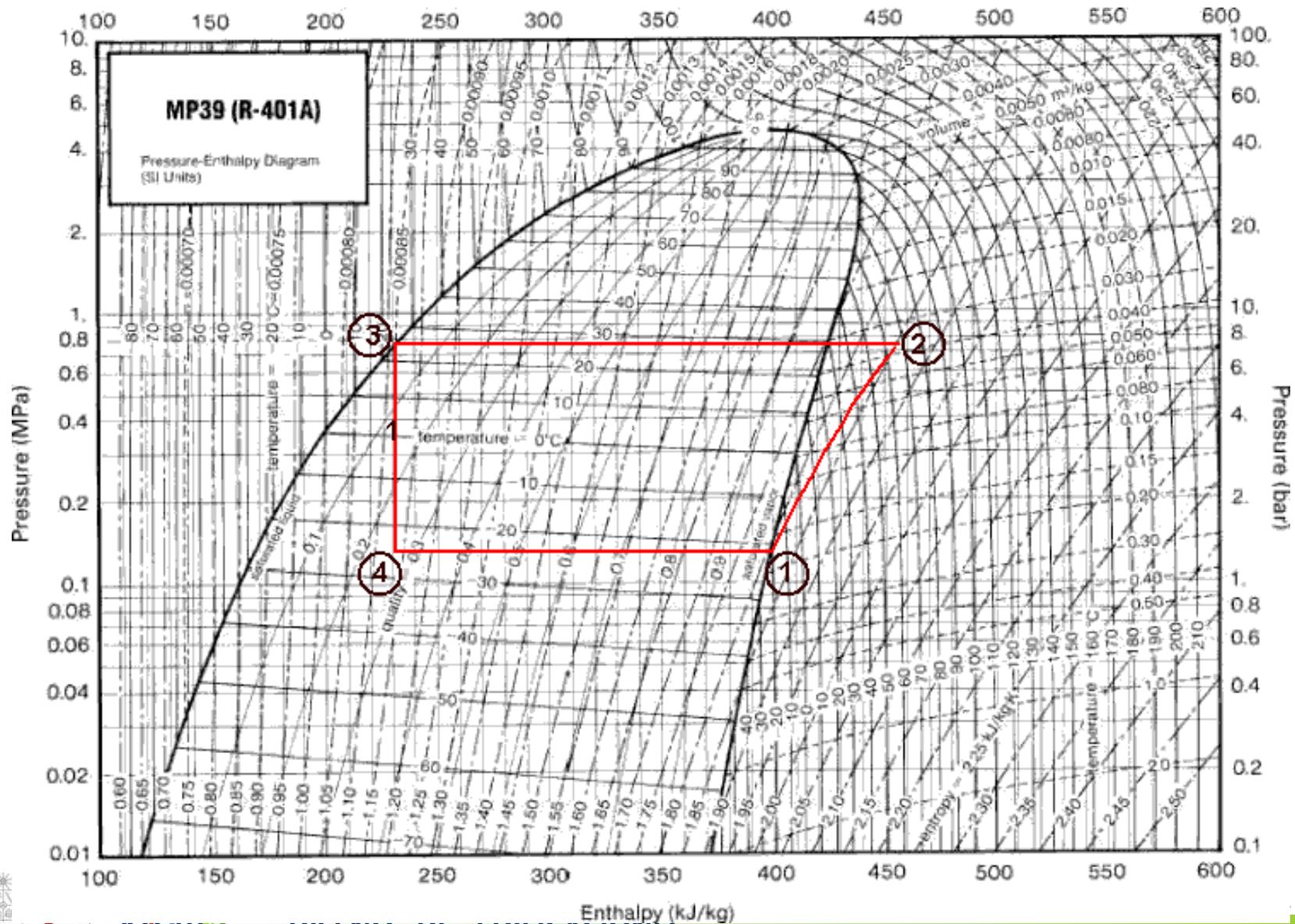


Refrigeración por compresión

Es muy usual trabajar los datos en un diagrama $p-H$:



Ciclo real



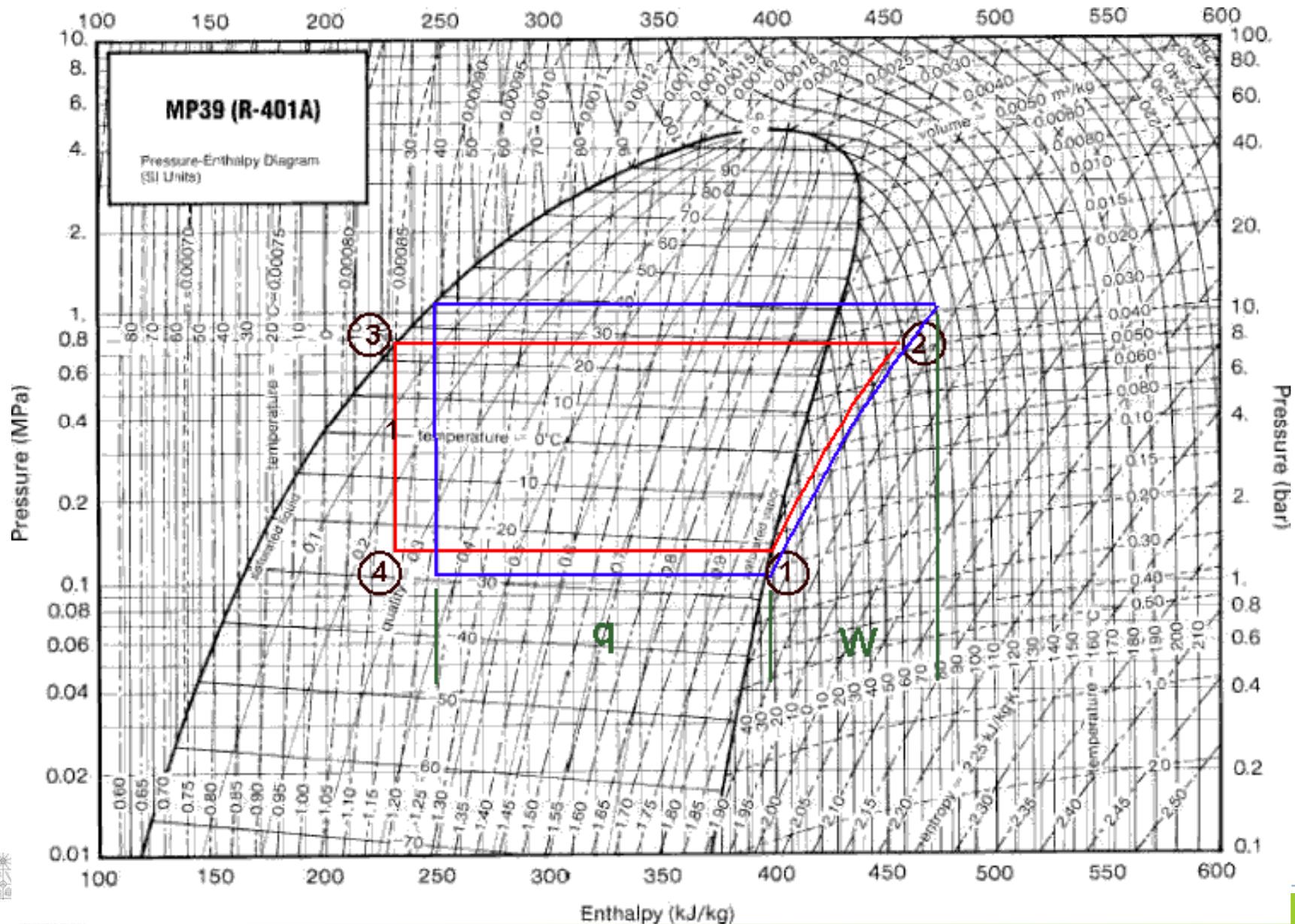
Diferencias de Ciclo real a teórico

Hay muchas razones por las cuales el proceso real difiere del proceso teórico. En particular:

- Se necesita un ΔT de temperatura tanto en evaporador como condensador.
- La compresión no es isentrópica (sin roce) sino que tiene roce, por lo tanto las temperaturas reales a la salida del compresor son mayores.
- Existe proceso de subenfriamiento en la condensación .
- Hay pérdidas mecánicas y eléctricas en el compresor.

De todos estos efectos, el ΔT de temperatura es el más importante.

Diferencias de Ciclo real a teórico



Diferencias de Ciclo real a teórico

Supongamos que queremos un equipo de refrigeración para mantener una cámara fría a -20°C con un ambiente a 30°C . La eficiencia teórica máxima será:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{253}{303 - 253} = 5,06$$

Diferencias de Ciclo real a teórico

Ahora bien, si por razones de buena transferencia de calor se necesita que el refrigerante del evaporador esté a -25°C y en el condensador a 36°C , entonces la eficiencia teórica caerá a:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{248}{309 - 248} = 4,07$$

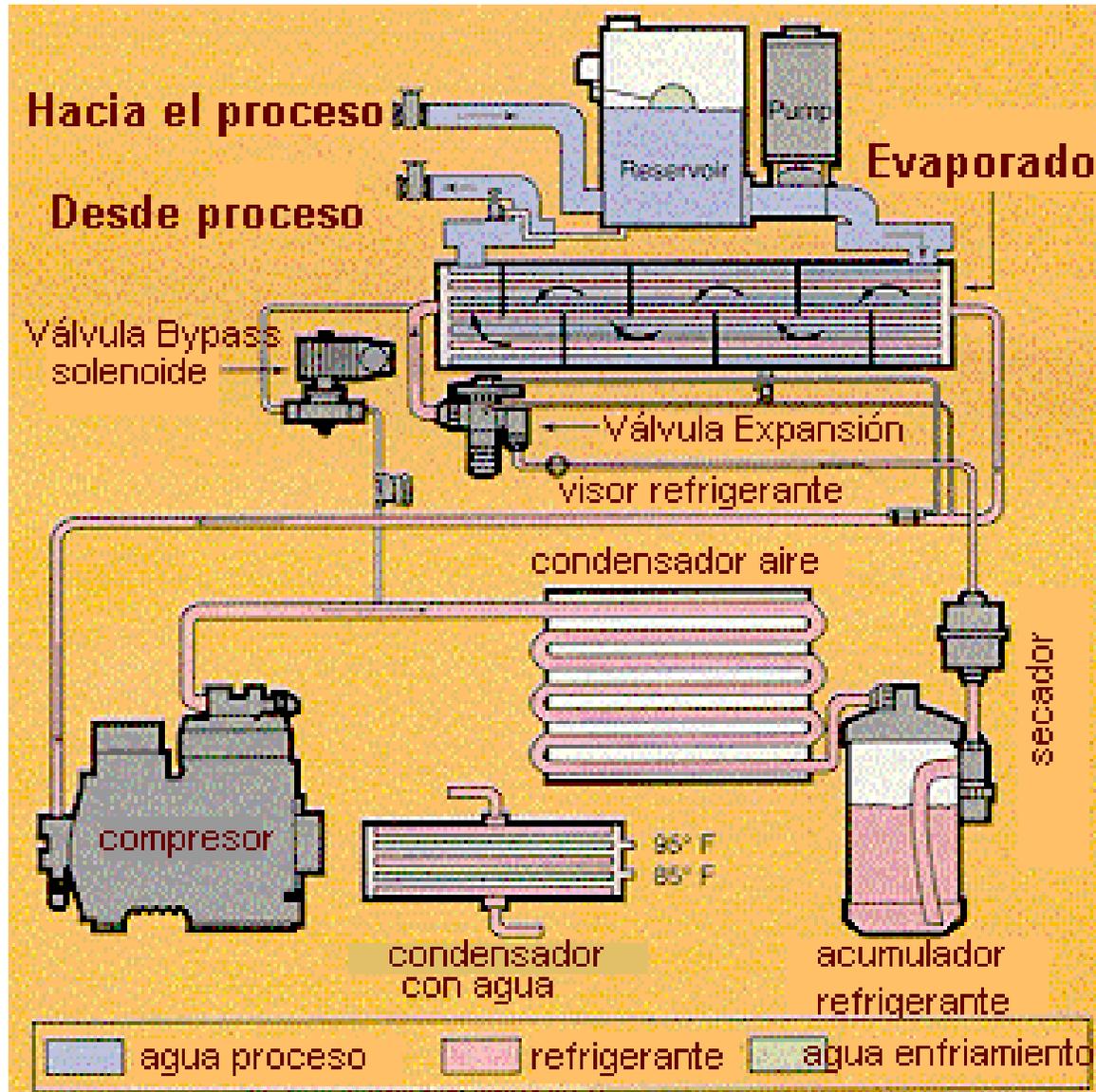
Si a esto sumamos los otros factores de pérdida, es probable que en realidad la eficiencia no supere un valor entre 3,5 a 3,8.

Chillers:

A menudo sistemas de mayor tamaño utilizan intercambiadores de calor refrigerante-líquido. Esto reemplaza el intercambiador de calor refrigerante-aire. Esto tiene la gran ventaja de que hace el intercambio térmico mucho más eficiente. Además permite acumular agua fría (o incluso agua con anticongelante más fría aún), lo cual permite cubrir demandas de frío (o calor) en horas de punta, lo cual acarrea ventajas desde el punto de vista de administración energética.

En general es mejor la transferencia de calor refrigerante líquido que refrigerante aire. Un esquema de este sistema se ve en la siguiente figura.

Chillers:



Refrigerantes:

Los refrigerantes utilizados en sistemas de compresión son a menudo de la familia de los *CFC's (Cloro fluorocarbonos)*, más conocidos como *freones*. Debido al problema asociado a la capa de ozono, el protocolo de Montreal ha fijado un calendario para que los más antiguos sean reemplazados por refrigerantes más modernos que causen menor daño a la capa de ozono. Los más utilizados hoy son:

- R12:** en desuso.
- R16:** en desuso.
- R22:** aceptado su utilización
- R134a:** aceptado
- R407c:** aceptado

Refrigerantes:

Las propiedades termodinámicas de estos refrigerantes se encuentran en literatura de especialidad. Lo que no debe olvidarse es que no son tan buenos (desde el punto de vista termodinámico) como los más antiguos. Por lo tanto:

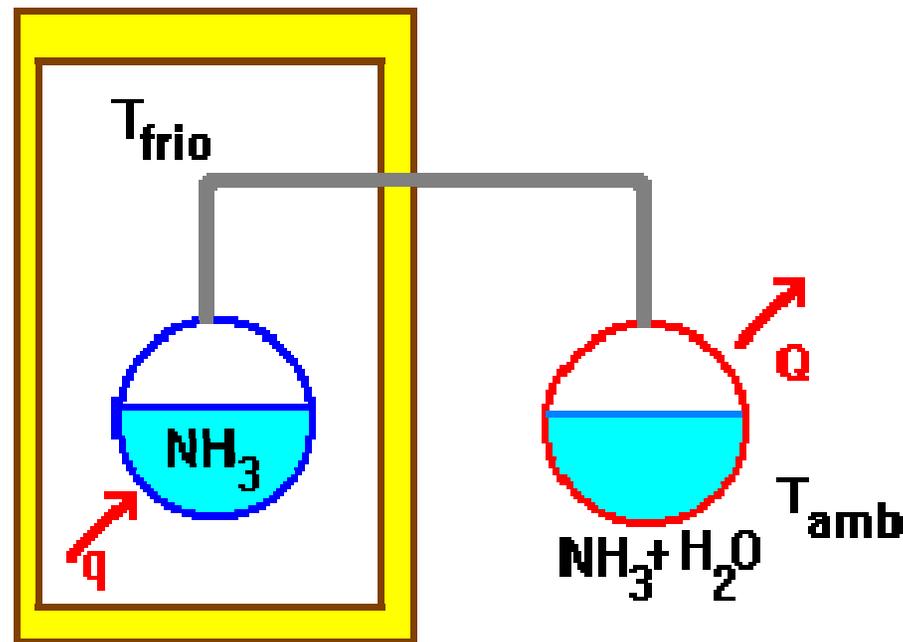
- Si un sistema se especificó con un refrigerante antiguo y este se recarga con refrigerante nuevo ("ecológico"), el sistema perderá capacidad de refrigeración.
- Al especificar equipos con refrigerantes nuevos, el tamaño del evaporador y el condensador crecerá.

Más información específica se puede encontrar en:

<http://www.refrigerants.com>

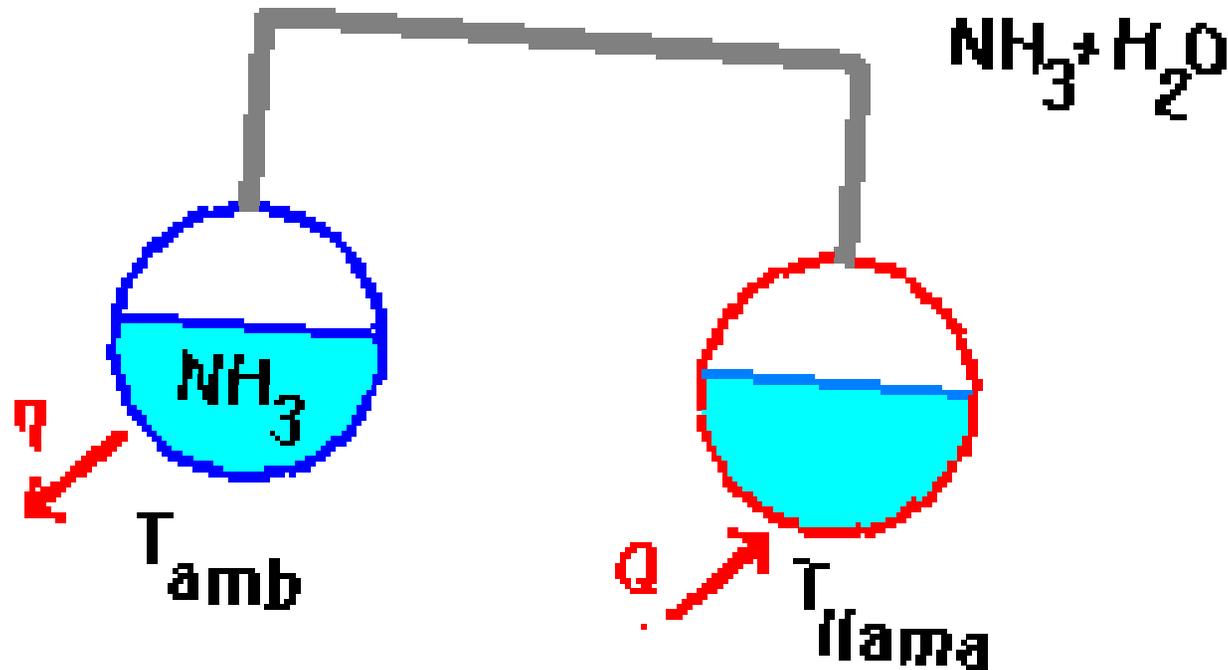
Refrigeración por Absorción:

Un sistema bastante diferente en cuanto a refrigeración es la *refrigeración por absorción*. Esto es un sistema que en el fondo utiliza *calor para enfriar*. De hecho las primeras máquinas de frío utilizaban la absorción.



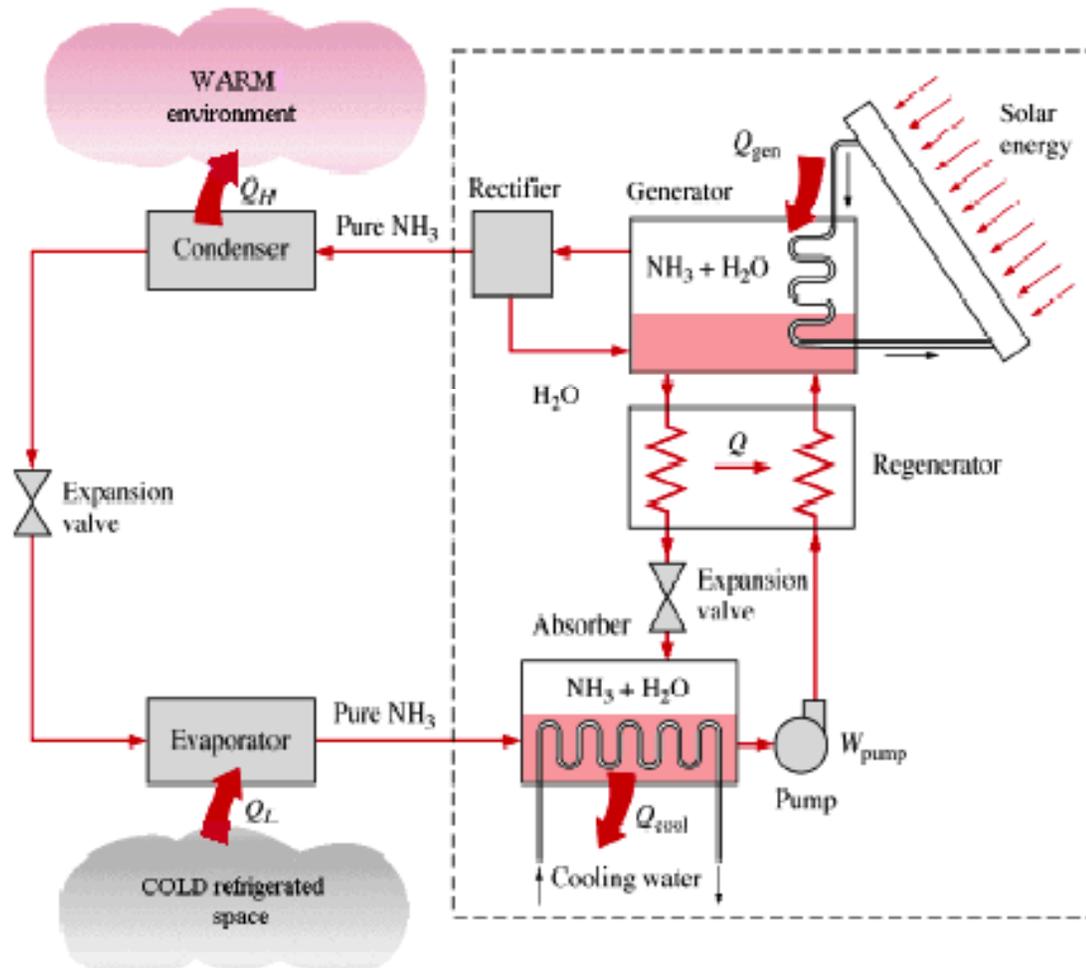
Refrigeración por Absorción:

Una vez saturada el agua con amoníaco, se puede *regenerar* con aplicación de calor externo:



Refrigeración por Absorción:

Un desafío es hacer el sistema continuo:



Refrigeración por Absorción:

La refrigeración por absorción tiene la ventaja de:

- Producir frío, aprovechando el calor.
- Consumo específico de energía eléctrica muy baja.
- Silencioso.
- Puede aprovechar calor de desecho si se dispone de fuentes a 140 a 200°C.

Las desventajas son:

- Tecnología menos conocida.
- **COP** siempre inferior a 1

Otros sistemas:

Existen múltiples otros métodos para refrigerar además de los dos ya citados (y que son los más conocidos). Entre otros podemos mencionar:

- Refrigeración por ciclo Stirling.
- Refrigeración por adsorción.
- Refrigeración por compresión sin cambio de fase.
- Refrigeración por efecto Seebeck.

De todos los métodos mencionados, el sistema Stirling, que se utiliza mucho en criogénesis, tiene gran atractivo para refrigeración doméstica e industrial.

Disminución Cargas Térmicas:

Ya vimos que la eficiencia de estos sistemas mejora en la medida que la transferencia de calor hacia y desde el fluido caloportador mejora. Esto implica que se debe tratar de evitar la utilización del intercambio térmico fluido-aire. Sin embargo es precisamente esta opción la más común. Pero tiene numerosas desventajas. En particular:

- Baja eficiencia de intercambio térmico, lo que conlleva menores eficiencias (COP's).
- En bombas de calor existe el muy frecuente problema de formación de hielo en el evaporador e incluso aspas del ventilador.
- No hay capacidad de diferir utilización de energía.

Ejemplo de formación de hielo



Ejemplo de formación de hielo

