

# Energía Solar Térmica

## Vol 1: Fundamentos (Caps. 1 a 3)

Gonzalo Abal

Instituto de Física  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República

7 de marzo 2013

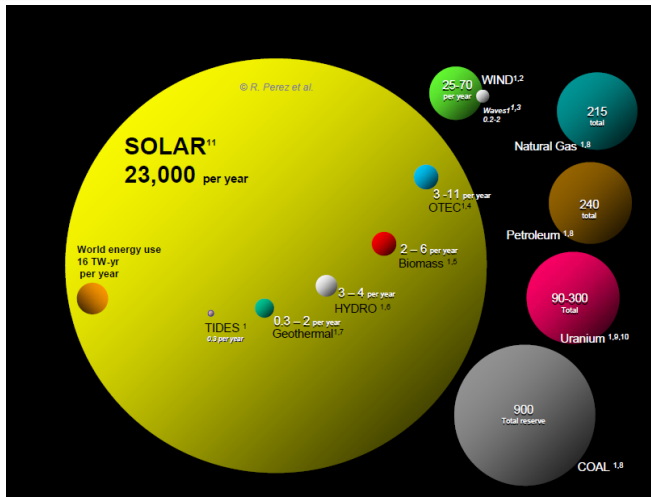


# Contenidos

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP



# Recursos energéticos disponibles (a modo de introducción)



## REFERENCIAS

1. S. Heckerth, Renewables.com, adapted from Christopher Swan (1986): Sun Cell, Sierra Club Press
2. C. Archer & M. Jacobson , Evaluation of Global Wind Power – Stanford University, Stanford, CA
3. World Energy Council
4. G. Nihous, An Order-of-Magnitude Estimate of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Resources, Journal of Energy Resources Technology – December 2005 – Volume 127, Issue 4, pp. 328-333
5. R. Whittaker (1975): The Biosphere and Man – in Primary Productivity of the Biosphere. Springer-Verlag, 305-328. ISBN 0-3870-7083-4.
6. Environmental Resources Group, LLC [http://www.erg.com.np/hydropower\\_global.php](http://www.erg.com.np/hydropower_global.php)
7. MIT/INEL The Future of Geothermal Energy– Impact of Enhanced Geothermal Systems [EGS] on the U.S. in the 21st Century  
[http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs\\_technology.html](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs_technology.html) – based on estimated energy recoverable economically in the next 50 years. Ultimate high depth potential would be much higher.
8. BP Statistical Review of World Energy 2007
9. <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stk03e>
10. R. Price, J.R. Blaise (2002): Nuclear fuel resources: Enough to last? NEA updates, NEA News 2002, 20
11. Solar energy received by emerged continents only, assuming 65 % losses by atmosphere and clouds.



# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP



## Notación, unidades

- **Irradiancia:**  $G$ , potencia incidente por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) en un instante dado, sobre un plano con orientación dada.
- **Irradiancia espectral:**  $G_\lambda$ , potencia incidente por unidad de área y longitud de onda ( $\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$ ) sobre un plano con orientación dada con longitud de onda  $\lambda$ .
- **Irradiación:**  $I, H$ , energía incidente por unidad de área ( $\text{kJ}/\text{m}^2$  o  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ) sobre un plano con orientación dada, en un intervalo de tiempo dado (hora, día, etc)  $\Delta t$ .

$$\text{Irradiación} = \text{Potencia media} \times \text{tiempo} = \bar{G} \times \Delta t$$

$$\text{por ejemplo: } 1 \text{ kWh}/\text{m}^2 = 3,6 \text{ MJ}/\text{m}^2$$



# Energía que llega del Sol

## Constante Solar

*irradiancia promedio que llega del Sol en incidencia normal sobre un plano en el exterior de la atmósfera, a una distancia igual a la distancia media Tierra-Sol (1 UA)*

es solo aproximadamente constante

valor convencional (WRC):  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$

con variaciones menores a 0.1 %



# Energía que llega del Sol

## Constante Solar

*irradiancia promedio que llega del Sol en incidencia normal sobre un plano en el exterior de la atmósfera, a una distancia igual a la distancia media Tierra-Sol (1 UA)*

es solo aproximadamente constante

valor convencional (WRC):  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$

con variaciones menores a 0.1 %

Límite superior para la irradiancia solar que llega a la superficie ?

$$0,90 \times G_{GS} \approx 1230 \text{ W/m}^2 \quad \text{NO!!}$$

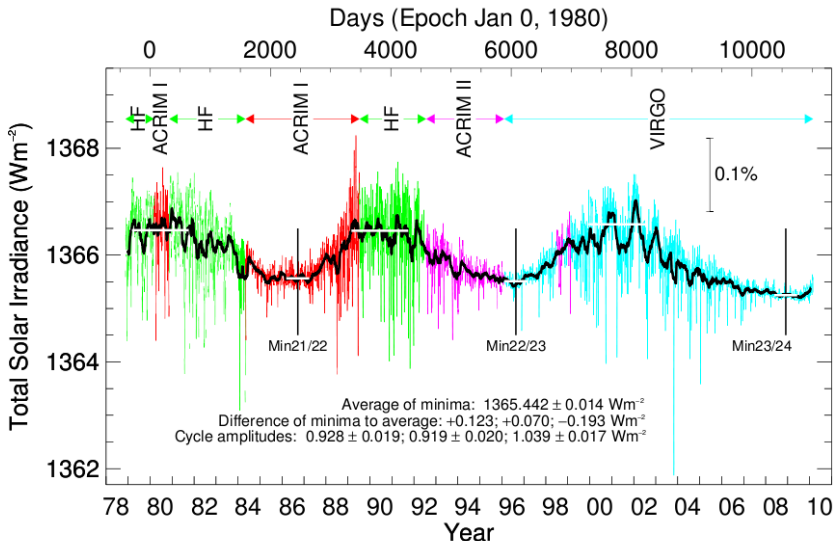
en condiciones ideales (lugar seco, alto, atmósfera muy limpia) ...

$G_{CS}$  no es fácil de medir...

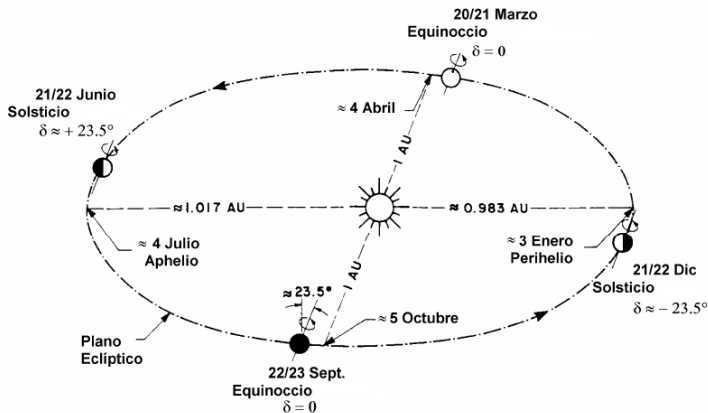




# medidas de $G_{CS}$



## variación estacional (distancia Tierra-Sol)



Esquema orbital de la tierra, mostrando los solsticios y los equinoccios.



## variación estacional

la irradiancia solar en incidencia normal,  $G_0$ , depende de la distancia Tierra-Sol  $r$

$$G_0 = G_{cs} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \simeq 1367 \text{ W/m}^2 \times \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi n}{365} \right) \right]$$

- variación diaria,  $F_n = (r_0/r)^2$   
con  $n = 1 \dots 365$  el **Ordinal día** (o día juliano)  
variación inferior a 3,3%  $\approx \pm 45 \text{ W/m}^2$

→ Tabla A1



## variación estacional

la irradiancia solar en incidencia normal,  $G_0$ , depende de la distancia Tierra-Sol  $r$

$$G_0 = G_{cs} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \simeq 1367 \text{ W/m}^2 \times \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi n}{365} \right) \right]$$

- variación diaria,  $F_n = (r_0/r)^2$  → Tabla A1  
con  $n = 1 \dots 365$  el **Ordinal día** (o día juliano)  
variación inferior a 3,3%  $\approx \pm 45 \text{ W/m}^2$
- H.S.:  $G_0 \simeq 1322 \text{ W/m}^2$  en invierno y  $G_0 \simeq 1412 \text{ W/m}^2$  en verano...  
en el H.N. el efecto es contrario ...



## variación estacional

la irradiancia solar en incidencia normal,  $G_0$ , depende de la distancia Tierra-Sol  $r$

$$G_0 = G_{cs} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \simeq 1367 \text{ W/m}^2 \times \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi n}{365} \right) \right]$$

- variación diaria,  $F_n = (r_0/r)^2$  → Tabla A1  
con  $n = 1 \dots 365$  el **Ordinal día** (o día juliano)  
variación inferior a 3,3%  $\approx \pm 45 \text{ W/m}^2$
- H.S.:  $G_0 \simeq 1322 \text{ W/m}^2$  en invierno y  $G_0 \simeq 1412 \text{ W/m}^2$  en verano...  
en el H.N. el efecto es contrario ...
- Límite superior en Uruguay ?

$$G_n \lesssim 0,87 \times 1412 \text{ W/m}^2 \approx 1230 \text{ W/m}^2$$

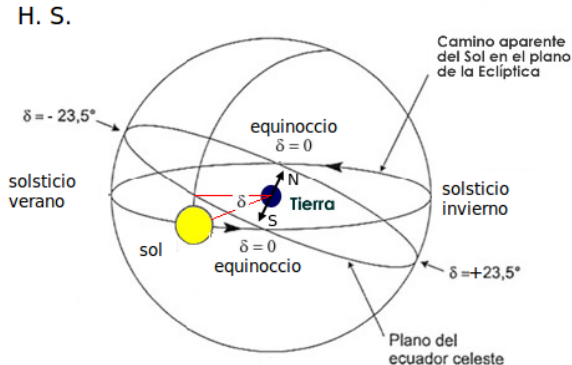
en verano, incidencia normal, día claro, atmósfera muy limpia ...



# Movimiento aparente del Sol

## declinación solar $\delta$

ángulo que forma la línea Tierra–Sol con el plano ecuatorial terrestre.



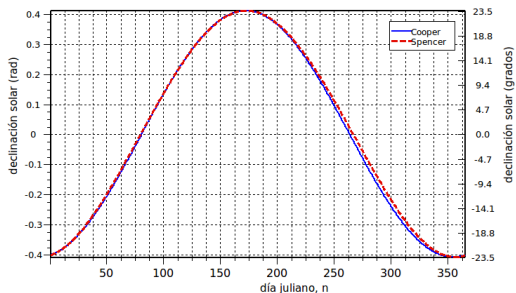
# declinación

Tabulada en Cuadro A.2  
[Spencer]

convención signos:

$\delta > 0$ : Sol sobre el ecuador

$\delta < 0$ : Sol bajo el ecuador

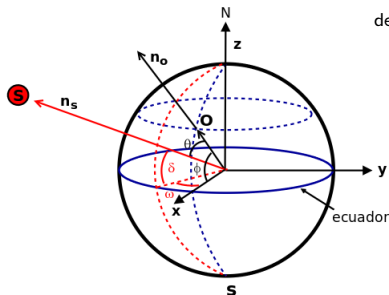


$$\delta \simeq 23.45^\circ \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (\text{Cooper}) \quad \text{error: } \lesssim 1,6^\circ$$



# ángulo cenital

dirección Tierra-Sol con la vertical local



depende de:

- latitud  $\phi$ :  
convención:  $\phi > 0$  en el H.N.
- declinación  $\delta$ :  
 $\delta > 0$  si el Sol está al Norte del Ecuador  
(invierno en H.S.)
- ángulo horario  $\omega$ :  
nulo al mediodía solar,  
 $\omega < 0$  en la mañana,  
aumenta  $15^\circ/\text{h}$  ( $\pi/12$  rads/h) por rotación  
terrestre.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

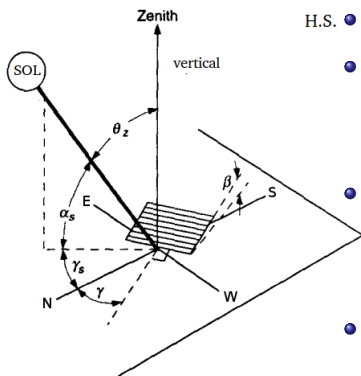
es el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre plano horizontal...





# ángulos solares locales

## Mov. aparente del Sol



H.S. •  $\theta_z$  ángulo cenital,  $0 \leq \theta_z \leq 90^\circ$

•  $\alpha_s$  altura solar,  $\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$

$$\cos \theta_z = \sin \alpha_s$$

•  $\gamma_s$  azimut solar,  
 $\gamma_s = 0$  referido al N (H. S.)  
 $\gamma_s < 0$  en la mañana  
depende de lugar, día, hora...

• **orientación de una superficie:**  
 $\beta =$  inclinación,  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$   
 $\gamma =$  azimut,  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$



## Como calcular $\gamma_s$ ?

Dos relaciones de  $\gamma_s$  con los otros ángulos

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s}$$

no se recomienda, hay que elegir el cuadrante correcto “a mano”



## Como calcular $\gamma_s$ ?

Dos relaciones de  $\gamma_s$  con los otros ángulos

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s}$$

no se recomienda, hay que elegir el cuadrante correcto "a mano"

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha_s}$$

como  $\gamma_s$  y  $\omega$  tienen el mismo signo se usa

$$\gamma_s = s \times \left| \arccos \left[ \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha_s} \right] \right|$$

donde  $s = -1$  de mañana,  $s = 1$  de tarde,  $s = 0$  a mediodía solar.



# Horas de Sol

- A la puesta/salida del sol ( $\theta_z = 90^\circ$ )

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = 0$$

- $\omega$  a la puesta de sol es

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$$



# Horas de Sol

- A la puesta/salida del sol ( $\theta_z = 90^\circ$ )

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = 0$$

- $\omega$  a la puesta de sol es

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$$

- Horas de sol en el día  $n$  ( $\omega_s$  en radianes)

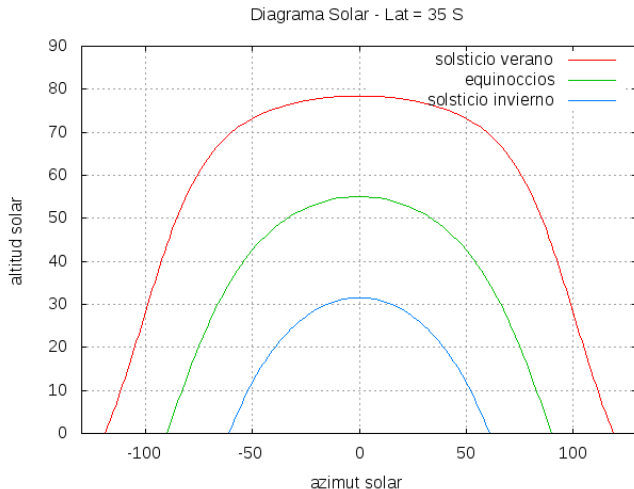
$$N_0 = \frac{2\omega_s \text{ rad}}{(\pi/12)\text{rad/hora}} = \frac{24 \text{ horas}}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta),$$

depende de latitud  $\phi$ .





# Diagrama solar



# Diagrama solar

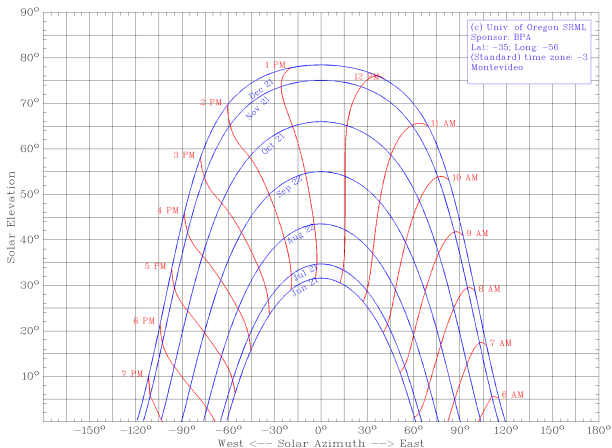


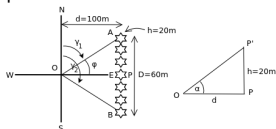
Figura: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>





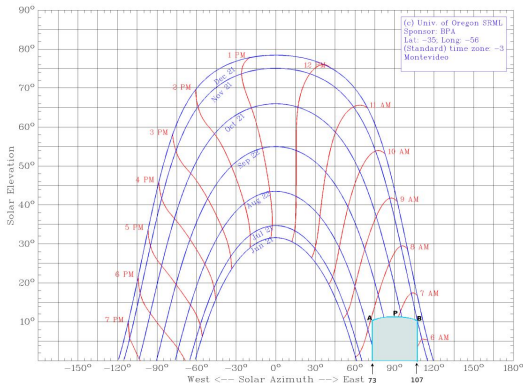
# Diagrama solar - representación de obstáculos

Ejemplo 1.4:  
 calcular  $\gamma$  y  $\alpha$   
 para los obstáculos

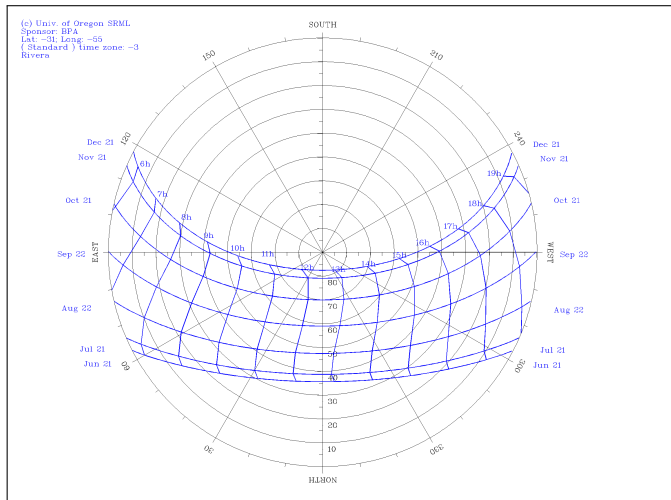


y representarlos en el DS

Cuidado:  
 Norte geográfico  $\gamma = 0$



# Diagrama solar polar



# ángulo de incidencia en superficie

El flujo incidente en una superficie depende de su orientación

irradiancia ET sobre plano horizontal

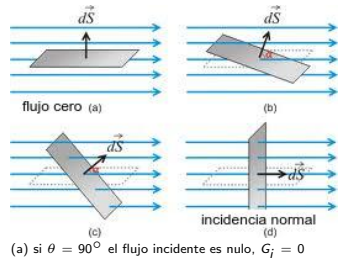
$$G_{0h} = G_0 \cos \theta_z = 1367 \text{ W/m}^2 \times F_n \times \cos \theta_z$$

Al proyectar sobre plano horizontal pasa a depender de ubicación, día y hora.

En general, la irradiancia incidente sobre una superficie es

$$G_i = G_n \cos \theta$$

con  $\theta$  el ángulo de incidencia



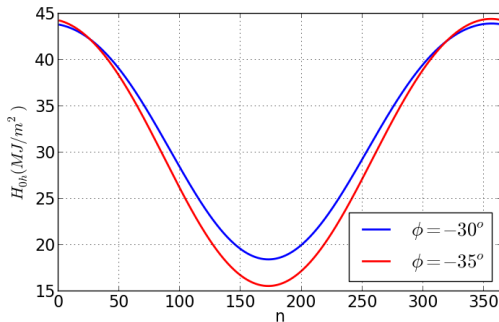
## Irradiación diaria ET en plano horizontal

Sumando contribuciones de  $G_{0h}$  en el día, se llega a la Ec. (1.24)

$$H_{0h} = 37.6 \text{ MJ/m}^2 \times F_n \times (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

depende de día  $n$  y latitud.

Tabulada en Cuadro A.2



fuerte variación invierno-verano...



# Día típico del mes

Día típico  $n^*$ :

irradiación diaria ET  $\approx$  irradiación diaria ET **promedio del mes** (Klein)

mes $\rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
día típico	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
$n^*$	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
$\delta$ ( $^\circ$ )	-20,9	-12,6	-2,0	9,5	18,7	23,0	21,3	14,0	3,3	-8,2	-18,0	-22,8
$H_{0h}$	43,3	38,8	32,3	24,8	18,7	15,8	16,9	21,6	28,5	35,7	41,4	44,1

**Cuadro:** 1.3; Día típico para cada mes del año. Para estos días se indica el ordinal-día  $n^*$ , la declinación en grados y la irradiación extraterrestre diaria en MJ/m<sup>2</sup>, son para latitud  $\phi = -35^\circ$ .

**MUY ÚTIL:** Calculando la irradiación incidente sobre una superficie en el día típico nos aproximarnos al comportamiento medio para ese mes, con poco esfuerzo.



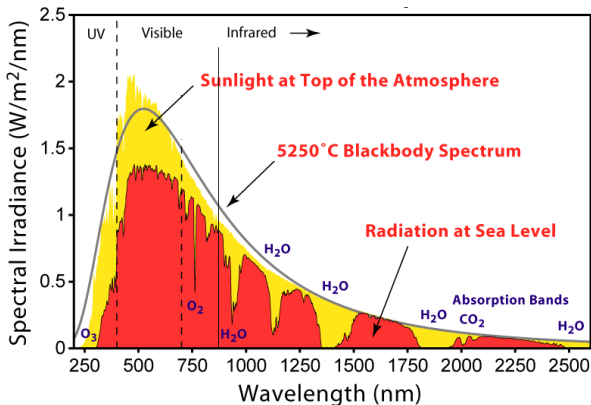
# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP





# Espectro Solar

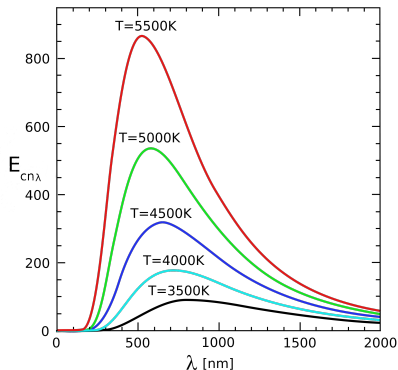


**Figura:** En amarillo, la irradiancia en el exterior de la atmósfera. En negro, el espectro de un cuerpo negro (radiador ideal) a  $T = 5523$  K. En rojo, la irradiancia que llega al suelo en un día claro, luego de la acción de la atmósfera. También se indican las bandas de absorción más relevantes. Figura de <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>





# Ley de Planck



emisión térmica

- más frío  $\rightarrow$  emite a mayor  $\lambda$
- el área bajo la curva ( $W/m^2$ ) es menor...



# Ley de Planck

- Radiancia espectral  $W/m^2\mu m$  de un **cuerpo negro** (radiador/absorbedor ideal):

$$E_{\lambda}^{cn} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad \text{Ley de Planck}$$

depende de su temperatura (absoluta)  $T$ .

$$C_1 = 3,743 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}/\text{m}^2 \quad C_2 = 1,4387 \times 10^4 \mu\text{mK}$$



# Ley de Planck

- Radiancia espectral  $W/m^2\mu m$  de un **cuerpo negro** (radiador/absorbedor ideal):

$$E_{\lambda}^{cn} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad \text{Ley de Planck}$$

depende de su temperatura (absoluta)  $T$ .

$$C_1 = 3,743 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}/\text{m}^2 \quad C_2 = 1,4387 \times 10^4 \mu\text{mK}$$

- Ley de Stefan-Boltzmann (suma de  $E_{\lambda}^{cn}$ )

$$E_{total}^{cn} = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$$

- máximo de radiancia espectral ocurre a  $\lambda_p$  (Ley de Wien)

$$\lambda_p T = 2897,6 \mu\text{m K}$$

con  $\lambda_p$  en  $\mu\text{m}$  y  $T$  en Kelvin



## radiación térmica

- **Sol:** con  $T \approx 5800$  K resulta

$$\lambda_p = \frac{2897,6}{5800} \approx 0,5 \mu\text{m} \quad \text{En el visible...}$$

- Un **objeto caliente**, con  $T < 700$  °C irradia en el infrarrojo cercano con  $\lambda_p \gtrsim 3 \mu\text{m}$ .

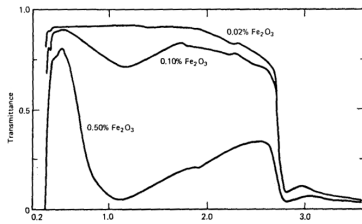


## radiación térmica

- **Sol:** con  $T \approx 5800$  K resulta

$$\lambda_p = \frac{2897,6}{5800} \approx 0,5 \mu\text{m} \quad \text{En el visible...}$$

- Un **objeto caliente**, con  $T < 700^\circ\text{C}$  irradia en el infrarrojo cercano con  $\lambda_p \gtrsim 3 \mu\text{m}$ .
- el **absorbedor de un panel** con  $T \approx 90^\circ$  irradia con  $\lambda_p \gtrsim 8 \mu\text{m}$ .



transmitancia selectiva del vidrio ... deja pasar el visible y bloquea la emisión IR reduciendo pérdidas por radiación !



# emisividad y absorptancia

- emisividad:  $\varepsilon$ :  
la fracción de radiancia emitida en relación a un cuerpo negro a igual  $T$  (puede ser espectral)
- absorptividad:  $\alpha$ :  
la fracción absorbida en relación a la irradiancia incidente (puede ser espectral)

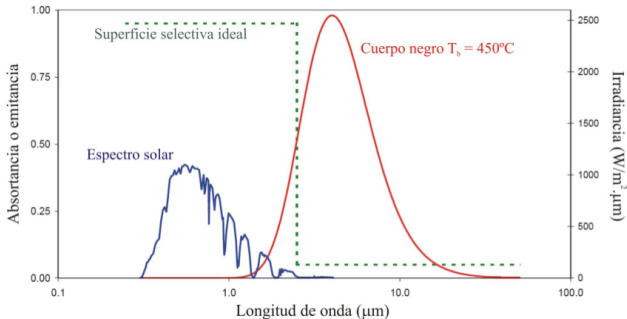
Ley de Kirchoff:  $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$

a cierta longitud de onda, un buen emisor es también un buen absorbedor de radiación.



## Selectividad del absorbedor

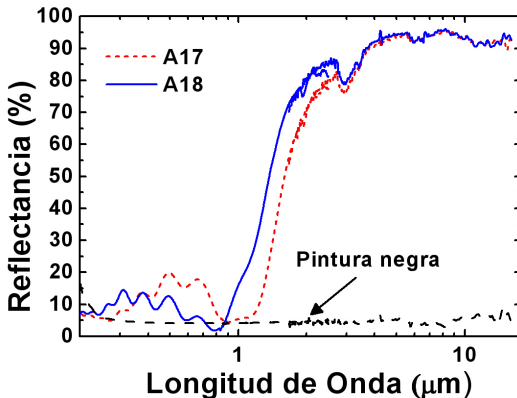
El absorbedor de un colector solar debería ser buen absorbedor en el visible (más ganancia) y un mal emisor en el IR (menos pérdidas por radiación)



mejora bastante la eficiencia del colector.



# Superficie selectiva real



Superficie selectiva real desarrollada en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería en 2012 (Dr. R. Marotti). (% Absortancia = 100 - % Reflectancia).





# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP



# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 **Medidas de irradiación solar**
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP



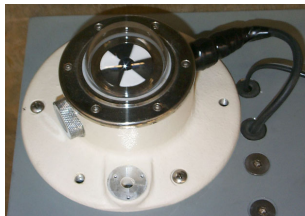
## medidas usuales de irradiación solar

- **irradiación global, P.H. o P.I.:**  
piranómetro o sensor fotovoltaico (celdas de Si)
- **irradiación difusa, P.H.:**  
piranómetro con banda o esfera de sombra,  
piranómetro “inteligente” (sin partes móviles)
- **irradiación directa:**  
pirheliómetro + seguimiento automático
- **heliofanía** (tiempo diario en que  $G > 120 \text{ W/m}^2$ ):  
heliógrafo Campbell-Stokes, fotodiodo



# Piranómetros

- termopila de juntas bimetálicas (efecto Seebeck)
- Eppley Black and White
- regulación de temperatura
- doble cúpula
- no requieren alimentación externa
- salida en mV (sensibilidad típica:  $10 \mu\text{V}/\text{W}$ )
- error diario:  $\sim 1\%$  a  $8\%$
- respuesta espectral: 300 a 2800 nm
- muy robustos !



Kipp & Zonen CMP 6



# Clasificación de Piranómetros

Máximo error RMS diario (horario)

- Estándar secundario < 2 %, (3 %)
- Primera clase < 5 %, (8 %)
- Segunda clase < 10 %, (20 %)

**equipos de campo:** se calibran en forma periódica contra un estándar secundario  
**estándar secundario** se calibra (idealmente) contra un radiómetro de cavidad (estándar primario) mantenido en el WRC en Davos <http://www.pmodwrc.ch>  
 en Uruguay se cuenta (GMARS) desde 2011 con dos estándar secundario Kipp & Zonen CMP22

Specification	Specification list		
	Secondary Standard	First Class	Second Class
Response time – 95% response	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Zero offset Response to 200 Wm <sup>-2</sup> net thermal radiation (ventilated) Response to 5 Kh <sup>-1</sup> change in ambient temperature	+ 7 Wm <sup>-2</sup> ± 2 Wm <sup>-2</sup>	+ 15 Wm <sup>-2</sup> ± 4 Wm <sup>-2</sup>	+ 30 Wm <sup>-2</sup> ± 8 Wm <sup>-2</sup>
Resolution – smallest detectable change	± 1 Wm <sup>-2</sup>	± 5 Wm <sup>-2</sup>	± 10 Wm <sup>-2</sup>
Stability – percentage change in responsivity per year	± 0.8%	± 1.6%	± 2%
Nonlinearity – percentage deviation from the responsivity at 500 W/m <sup>2</sup> due to change in irradiance within 100 Wm <sup>-2</sup> to 1000 Wm <sup>-2</sup>	± 0.2%	± 0.5%	± 2%
Directional response for beam radiation (the range of errors caused by assuming that the normal incidence responsivity is valid for all directions when measuring, from any direction, a beam radiation whose normal incidence irradiance is 1000 Wm <sup>-2</sup> )	± 10 Wm <sup>-2</sup>	± 20 Wm <sup>-2</sup>	± 30 Wm <sup>-2</sup>
Spectral selectivity – percentage deviation of the product of the spectral absorptance and the spectral transmittance from the corresponding mean within 0.3 µm and 3.0 µm	± 2%	± 5%	± 10%
Temperature response – total percentage deviation due to change in ambient temperature within an interval of 50 K	2%	4%	8%
Tilt response – percentage deviation from the responsivity at 0 degrees tilt (horizontal) due to change in tilt from 0 degrees to 90 degrees at 1000 Wm <sup>-2</sup> irradiance	± 0.5%	± 2%	± 5%

\* The highest category for pyranometers is the secondary standard, because the most accurate determination of G<sub>h</sub> has been suggested to be the sum of the DNI as measured by an absolute cavity radiometer and the DHI as measured by a secondary standard pyranometer shaded from the DN by a disk.

norma ISO9060



# Pirheliómetros



medidas de irradiación directa

- termopila, con tubo colimador
- apertura angular:  $\sim 1^\circ$
- medida continua requiere mecanismo de seguimiento...

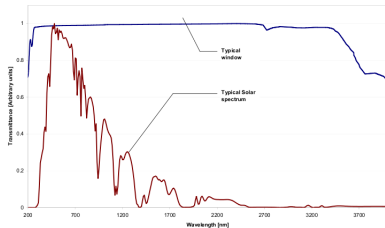
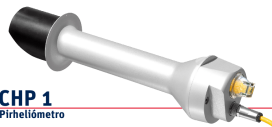


Figura 3: Espectro de irradiación solar en la superficie de la Tierra y respuesta del pirheliómetro





# Piranómetro inteligente

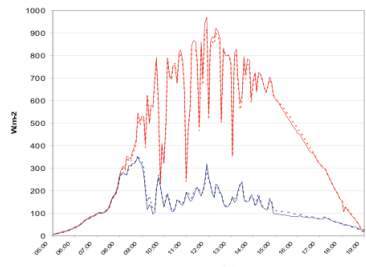
## Irradiancia difusa sin partes móviles

- irradiancia global sobre P.H
- irradiancia difusa sobre P.H.
- heliofanía (horas de sol)
- Calidad: Clase 1

usa 7 sensores de termopila y una máscara especial.

algoritmo interno calcula difusa por diferencia Sol-Sombra

## Delta-T Devices - SPN1

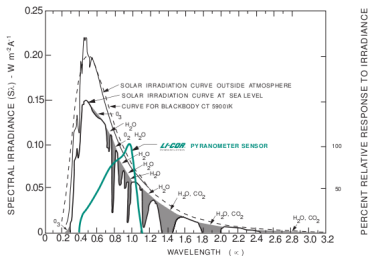




# Sensores fotovoltaicos

Ventajas: bajo costo, sin mantenimiento.

Licor Li200



## Otras bandas espectrales

Ultravioleta

UVA: 315 a 400 nm

UVB: 280 to 315 nm

UVE: Eritema, índice UV



Infrarrojo: Pirgeómetro  
mide radiancia térmica del  
suelo o de la bóveda  
celeste

FIR: 4.5 a 42  $\mu\text{m}$



# Red de Medidas FING

operativa desde 2010

Ubicación	Cod.	LON	LAT	equipo	medida
Treinta y Tres/INIA	TT	-54.25	-33.23	KZ-CMP6	global horizontal
Salto/INIA	SA	-57.88	-31.27	KZ-CMP6	global horizontal
Las Brujas/INIA	LB	-56.30	-34.67	KZ-CMP6	global horizontal
Artigas/DNM	AR	-56.51	-30.40	KZ-CMP11	global horizontal
Rocha/DNM	RO	-54.31	-34.49	KZ-CM6	global horizontal
FING	FI	-56.17	-34.92	KZ-CMP22	global horizontal (calibración)
FING	FI	-56.17	-34.92	Delta-T SPN1	global y difusa horizontal
FING	FI	-56.17	-34.92	KZ-CMP6	global en plano inclinado 35°
FING	FI	-56.17	-34.92	KZ-UVAB	UVA, UVB, índice UV



# Medidas GMARS

- Se mide irradiancia solar desde 2010, se agregan puntos continuamente
- Actualmente se mide irradiancia global horizontal en 12 ubicaciones en todo el territorio
- Todos los puntos usan sensores fotovoltaicos Licor 200
- FING provee soporte para mantener los equipos calibrados
- en las estaciones (INIA, DNM) se miden variables complementarias (temperatura, velocidad y dirección del viento, etc).
- **Datos diarios [2010-2012] disponibles en web del GMARS [ursolar.org](http://ursolar.org) en breve...**



## estaciones GMARS



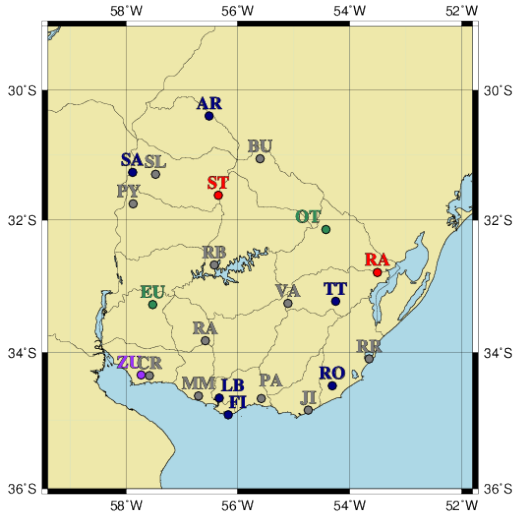
Montevideo - FING



Artigas - DNM



# Mapa



ubicación puntos de medida  
redes FING y UTE

- Azul: Red FING instalada
- Violeta: FING proyectado
- Gris: Red UTE instalada
- Verde: UTE a instalar en breve
- Rojo: UTE sin plazo aún.



# Más información sobre medidas: WMO

- clasificación
- metodología para inter-calibración
- medidas con banda de sombra
- medidas con pirheliómetro
- factores de corrección
- medidas sobre plano inclinado

<http://www.wmo.int/>

Guide to Meteorological Instruments  
and Methods of Observation

WMO-No. 8

Seventh edition  
2008



# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 **Irradiación sobre plano inclinado**
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP





# Motivación

¿Porqué es importante la separación entre radiación directa y difusa?

- 1 la mayoría de las medidas de irradiación son de global horizontal. Es difícil medir la componente difusa, por lo que estas medidas son escasas.
- 2 los métodos para estimar irradiación global sobre un plano inclinado tratan en forma diferente a la componente directa y a la difusa.
- 3 los dispositivos con concentración solo utilizan la radiación directa en incidencia normal.





## Razón directa diaria

En el caso diario se define

$$R_b = \frac{H_{bi}}{H_{bh}} \simeq \frac{\omega'_s \sin \delta \sin(\beta - |\phi|) + \cos \delta \cos(\beta - |\phi|) \sin \omega'_s}{\omega'_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega'_s}$$

donde  $\omega'_s$  es el ángulo de puesta de Sol para la sup. inclinada.

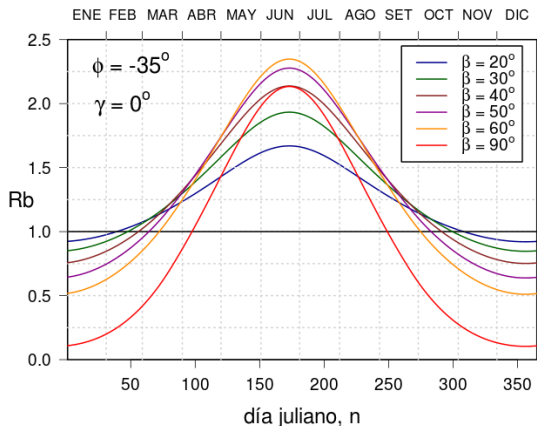
$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{arc cos} [-\tan \phi \tan \delta] \\ \text{arc cos} [-\tan(\beta - |\phi|) \tan \delta] \end{array} \right. \quad (\text{H.S.}) \quad (1)$$

no puede salir antes que en plano horizontal, pero si **después...**

$R_b$  tabulado en el Cuadro A.3 para varias latitudes e inclinaciones.



# Razón diaria



$R_b$  diario (Fig. 1.24)



## Componentes de difusa

plano horizontal:  $I_{di} = I_{dh,c} + I_{dh,cs} + I_{dh,r}$

y en plano inclinado  $I_{di} = I_{di,c} + I_{di,cs} + I_{di,r}$

¿Como se relacionan?

Si fuese isotrópico: ( $I_{dh,cs} = I_{dh,hz} = 0$ )

$$I_{di,c} = I_{dh} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{modelo isotrópico, horario})$$

PERO NO LO ES...

se corrige con un factor de anisotropía (modelo Hay y Davies)... Por otro lado, la componente reflejada

$$I_{d,r} = I_h \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

(solo del suelo) como reflector difuso.



# Outline

- 1 Radiación solar Extraterrestre
  - Constante solar
  - Movimiento aparente del Sol
  - Irradiancia extraterrestre sobre plano horizontal
- 2 Efecto de la atmósfera
  - Distribución espectral de la Radiación Solar
- 3 Medidas del recurso solar en Uruguay
- 4 Medidas de irradiación solar
- 5 Irradiación sobre plano inclinado
  - Separación de componentes de irradiación directa y difusa
- 6 Eficiencia de CPP

