

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

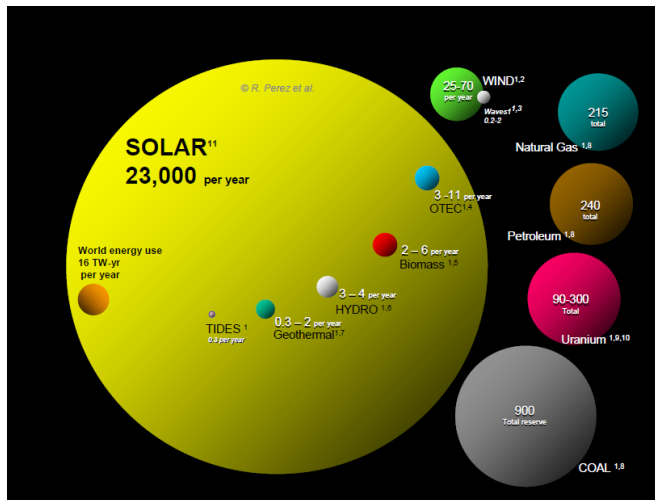


Contenidos

- 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



Recursos energéticos disponibles (a modo de introducción)



Richard Pérez, NY University, International Energy Agency (IEA), Solar Update 2009

1 TW = 10^{12} W



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
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 – 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



Notación, unidades

- **Irradiancia:** G , potencia incidente por unidad de área (W/m^2) en un instante dado, sobre un plano con orientación dada.
- **Irradiancia espectral:** G_λ , 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 λ .
- **Irradiación:** I, H , energía incidente por unidad de área (kJ/m^2 o kJ/m^2) sobre un plano con orientación dada, en un intervalo de tiempo dado (hora, día, etc) Δt .

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

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



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 ?

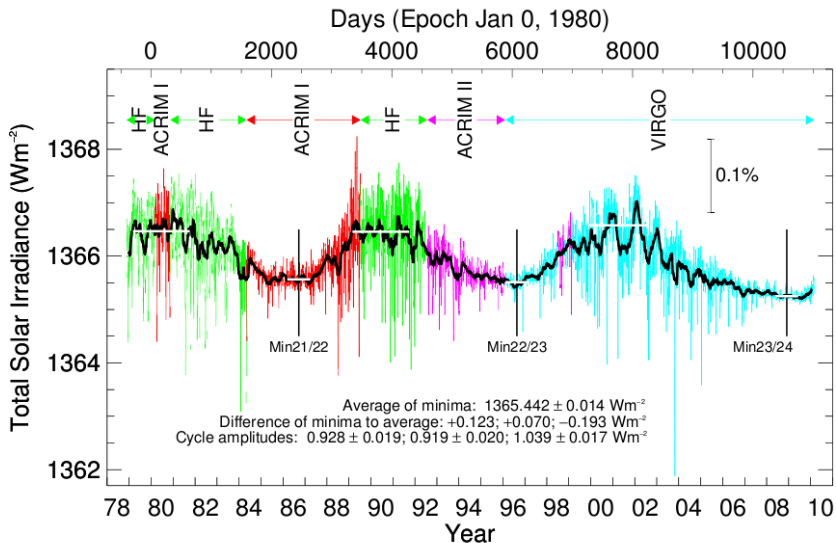
$$0,90 \times G_{GS} \approx 1230 \text{ W/m}^2 \quad \text{NO!!}$$

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

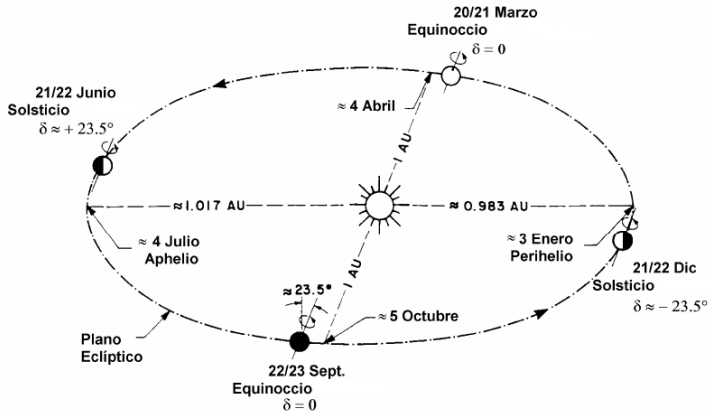
G_{CS} no es fácil de medir...



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 ?

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

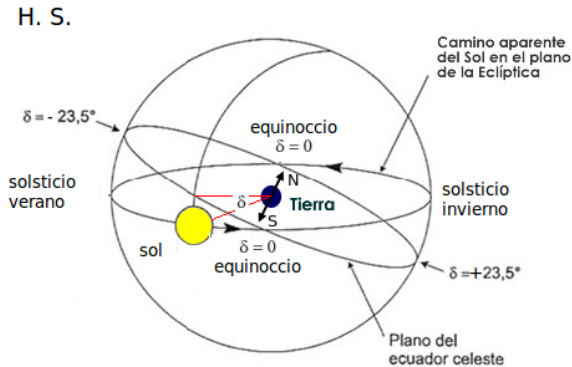
en verano, incidencia normal, día claro, atmósfera muy limpia ...



Movimiento aparente del Sol

declinación solar δ

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



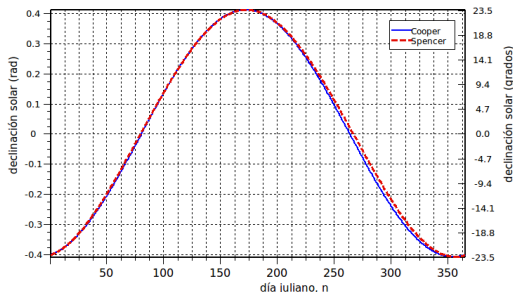
declinación

Tabulada en Cuadro A.2
[Spencer]

convención signos:

$\delta > 0$: Sol sobre el ecuador

$\delta < 0$: Sol bajo el ecuador

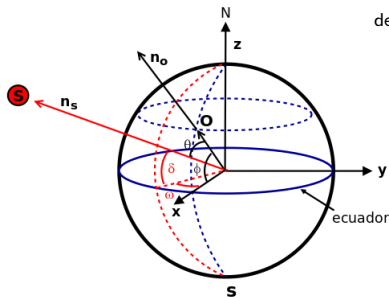


$$\delta \simeq 23.45^\circ \sin \left[2\pi \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (\text{Cooper}) \quad \text{error: } \lesssim 1,6^\circ$$



ángulo cenital

dirección Tierra-Sol con la vertical local



depende de:

- latitud ϕ :
convención: $\phi > 0$ en el H.N.
- declinación δ :
 $\delta > 0$ si el Sol está al Norte del Ecuador
(invierno en H.S.)
- ángulo horario ω :
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. • θ_z ángulo cenital, $0 \leq \theta_z \leq 90^\circ$

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

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

• γ_s azimut solar,

$\gamma_s = 0$ referido al N (H. S.)

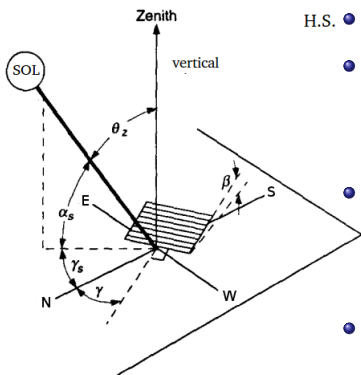
$\gamma_s < 0$ en la mañana

depende de lugar, día, hora...

• **orientación de una superficie:**

β = inclinación, $0 \leq \beta \leq 90^\circ$

γ = azimut, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$



Como calcular γ_s ?

Dos relaciones de γ_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 γ_s ?

Dos relaciones de γ_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 γ_s y ω 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 ($\theta_z = 90^\circ$)

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

- ω a la puesta de sol es

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



Horas de Sol

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

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

- ω a la puesta de sol es

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

- Horas de sol en el día n (ω_s en radianes)

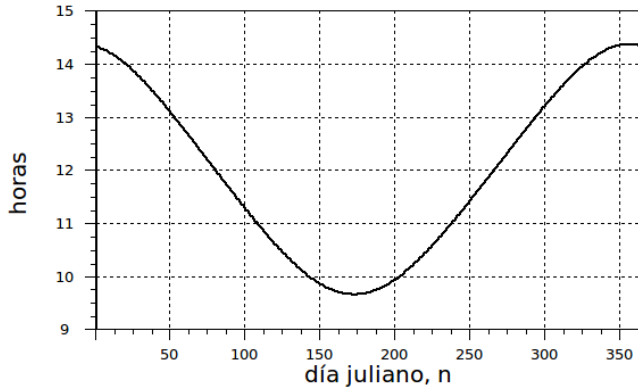
$$N_0 = \frac{2\omega_s \text{ rad}}{(\pi/12)\text{rad/hora}} = \frac{24 \text{ horas}}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta),$$

depende de latitud ϕ .



Horas de Sol

horas de sol (lat 35 S)



tiempo durante el cual el Sol esta sobre el horizonte del observador



Diagrama solar

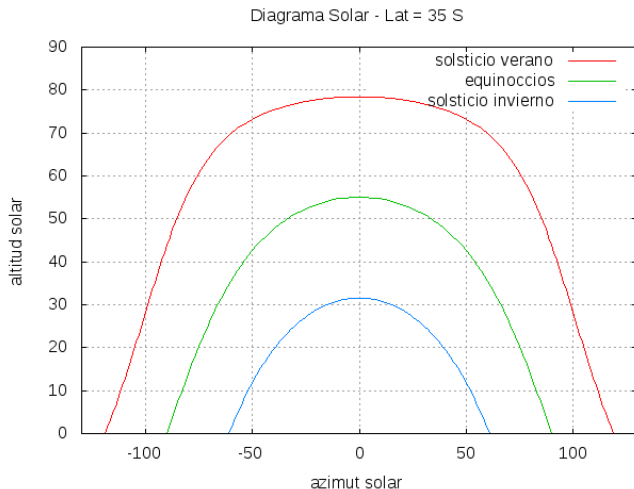


Diagrama solar

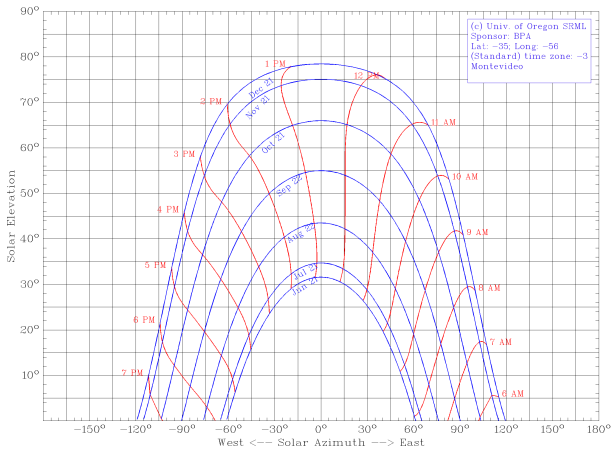
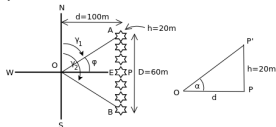


Figura: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>.



Diagrama solar - representación de obstáculos

Ejemplo 1.4:
 calcular γ y α
 para los obstáculos



y representarlos en el DS

Cuidado:
 Norte geográfico $\gamma = 0$

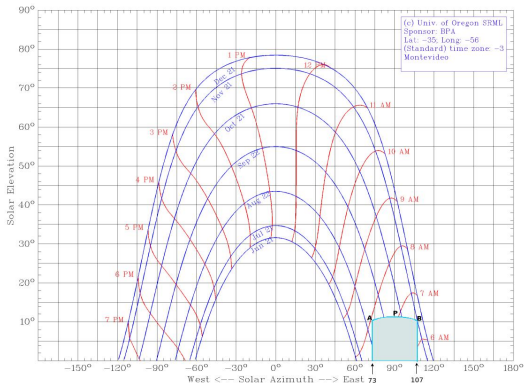
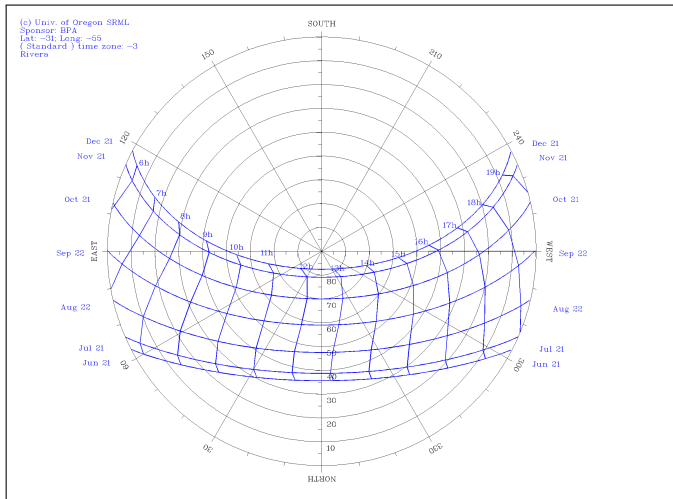


Diagrama solar polar



ángulo de incidencia en superficie

El flujo incidente en una superficie depende de su orientación
irradiancia ET sobre plano horizontal

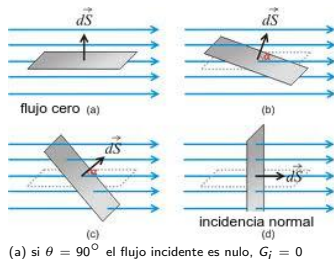
$$G_{0h} = G_0 \cos \theta_z = 1367 \text{ W/m}^2 \times F_n \times \cos \theta_z$$

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 θ el ángulo de incidencia



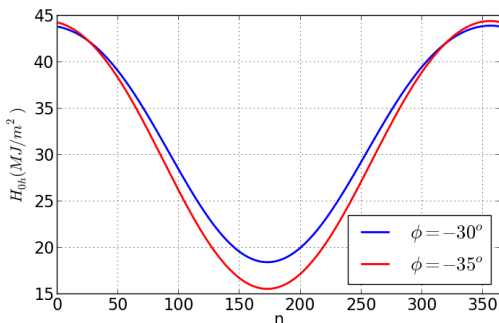
Irradiación diaria ET en plano horizontal

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
δ ($^\circ$)	-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/m², 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



Espectro Solar

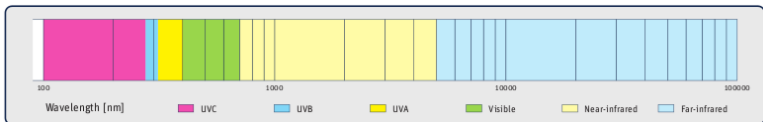


Figura: Regiones espectrales relevantes para la radiación solar.

banda	sigla	longitud de onda (μm)
ultravioleta C	UVC	0.100-0.280
ultravioleta B	UVB	0.280-0.315
ultravioleta A	UVA	0.315-0.400
visible	VIS	0.390-0.770
infrarrojo cercano	NIR	0.770-25
infrarrojo lejano	FIR	25-1000



Espectro Solar

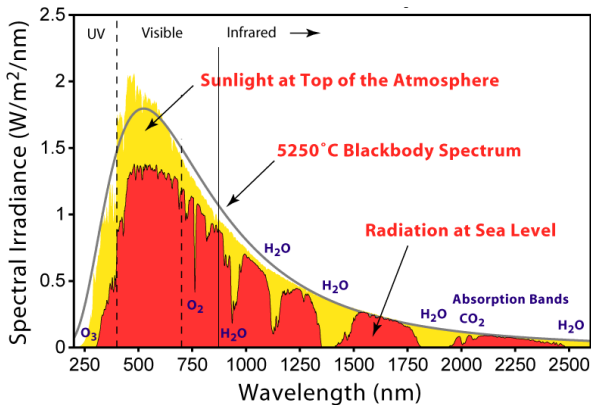
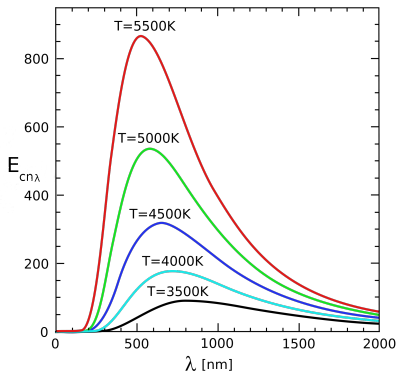


Figura: En amarillo, la irradiación en el exterior de la atmósfera. En negro, el espectro de un cuerpo negro (radiador ideal) a $T = 5523 \text{ K}$. En rojo, la irradiación que llega al suelo en un día claro, luego de la acción de la atmósfera. También se indican las bandas de absorción más relevantes.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



Ley de Planck



emisión térmica

- más frío \rightarrow emite a mayor λ
- 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_{λ}^{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 λ_p (Ley de Wien)

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

con λ_p en μm y T en Kelvin



radiación térmica

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

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

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

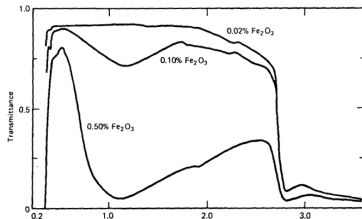


radiación térmica

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

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

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



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



emisividad y absorptancia

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

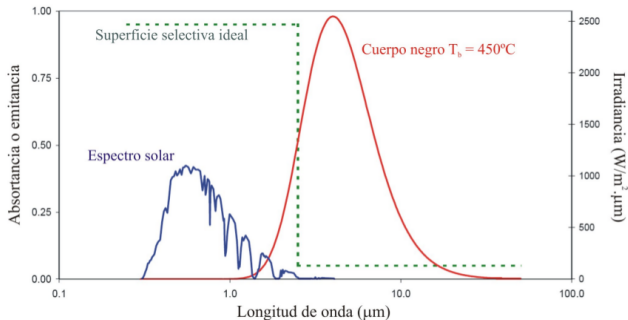
Ley de Kirchoff: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$

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



Selectividad del absorbedor

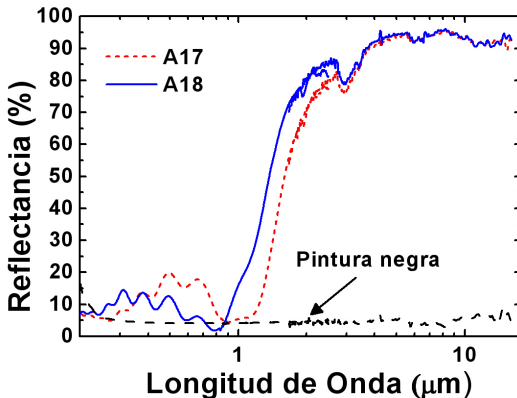
El absorbedor de un colector solar debería ser buen absorbedor en el visible (más ganancia) y un mal emisor en el IR (menos pérdidas por radiación)



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



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



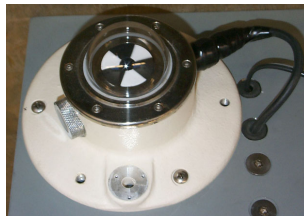
medidas usuales de irradiación solar

- 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		
	Class		
	Secondary Standard	First Class	Second Class
Response time – 95% response	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Zero offset Response to 200 W/m ² net thermal radiation (ventilated) Response to 5 K/h ¹ change in ambient temperature	+ 7 W/m ² ± 2 W/m ²	+ 15 W/m ² ± 4 W/m ²	+ 30 W/m ² ± 8 W/m ²
Resolution – smallest detectable change	± 1 W/m ²	± 5 W/m ²	± 10 W/m ²
Stability – percentage change in responsivity per year	± 0.8%	± 1.6%	± 2%
Nonlinearity – percentage deviation from the responsivity at 500 W/m ² due to change in irradiance within 100 W/m ² to 1000 W/m ²	± 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 W/m ²)	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²	± 30 W/m ²
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 W/m ² irradiance	± 0.5%	± 2%	± 5%

* The highest category for pyranometers is the secondary standard, because the most accurate determination of GHI 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 DNI 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...

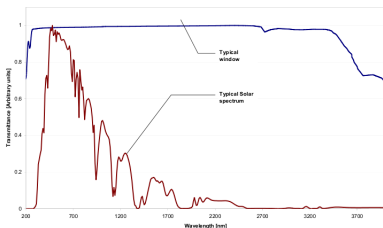
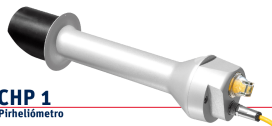
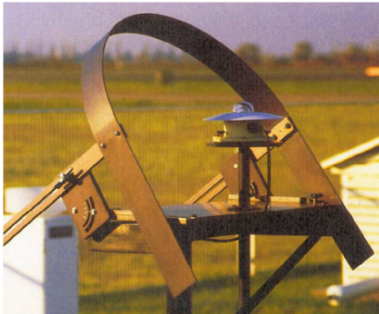


Figura 3: Espectro de irradiación solar en la superficie de la Tierra y respuesta del pirheliómetro



medidas de radiación difusa

métodos convencionales:
bloquear la directa sobre un piranómetro



piranómetro con banda de sombra de ajuste manual



sistema redundante de medidas de alta calidad:
piranómetros con puntos de sombra y
mecanismo de seguimiento + pirheliómetros



Piranómetro inteligente

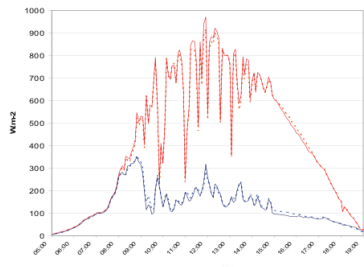
Irradiancia difusa sin partes móviles

- 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

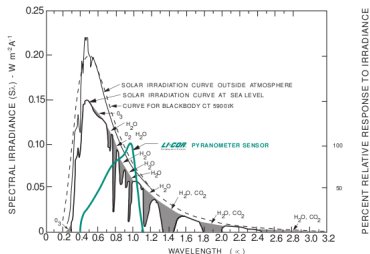
Delta-T Devices - SPN1



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 μm



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 en breve...**



estaciones GMARS



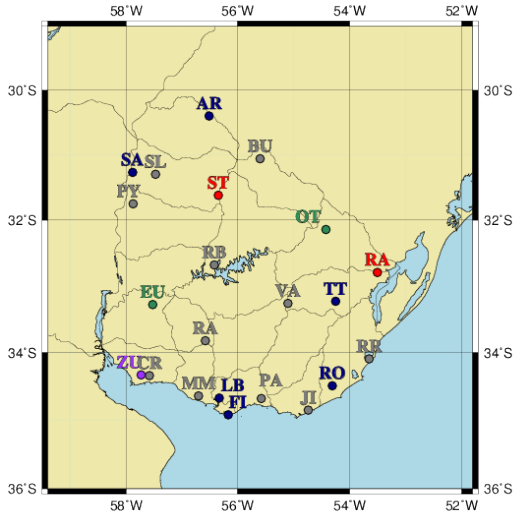
Montevideo - FING



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



Motivación

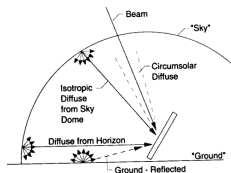
¿Porqué es importante la separación entre radiación directa y difusa?

- 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.



Diferentes tipos de radiación difusa

aparte de la radiación directa



se distinguen varias formas de radiación difusa

- difusa de cielo isotrópica
- difusa circumsolar (anisotrópica)
- difusa de horizonte o brillo de horizonte
- difusa reflejada del suelo y superficies cercanas

en plano horizontal ($G_{bh} = G_b \cos \theta_z$)

$$G_h = G_b \cos \theta_z + G_{dh}$$

en plano inclinado ($G_{bi} = G_b \cos \theta$)

$$G_i = G_b \cos \theta + G_{di}$$

se define la **razón directa**

$$r_b = \frac{G_{bi}}{G_{bh}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

que se puede calcular para lugar, día y hora dadas.

Para la directa:

el problema es geométrico (sencillo)



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 ω'_s es el ángulo de puesta de Sol para la sup. inclinada.

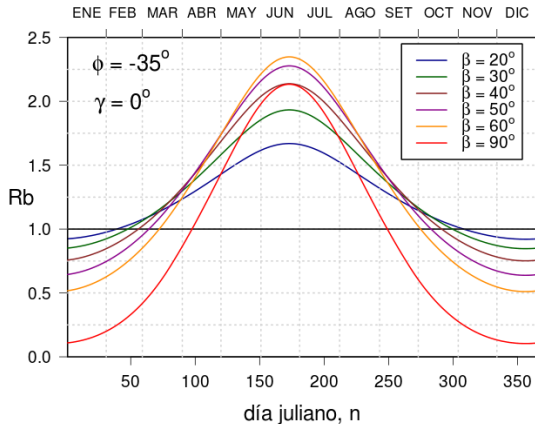
$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \arccos [-\tan \phi \tan \delta] \\ \arccos [-\tan(\beta - |\phi|) \tan \delta] \end{array} \right. \quad (\text{H.S.}) \quad (1)$$

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

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.

