

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA –CURSO 2024

RECURSO SOLAR

Segunda Clase

Ing. Diego Oroño
Ing. Gonzalo Hermida



Temario



- Introducción
- Movimiento aparente solar
- Dimensionamiento
- Estimación de la irradiación solar incidente
- Medición



Irradiancia e Irradiación Solar

Irradiancia Solar: Potencia de origen solar por unidad de área W/m^2 incidente sobre una superficie con cierta orientación.

Irradiación Solar: Energía incidente por unidad de área Wh/m^2 sobre un plano con orientación dada, en un intervalo de tiempo dado.



Irradiancia Solar Extraterrestre

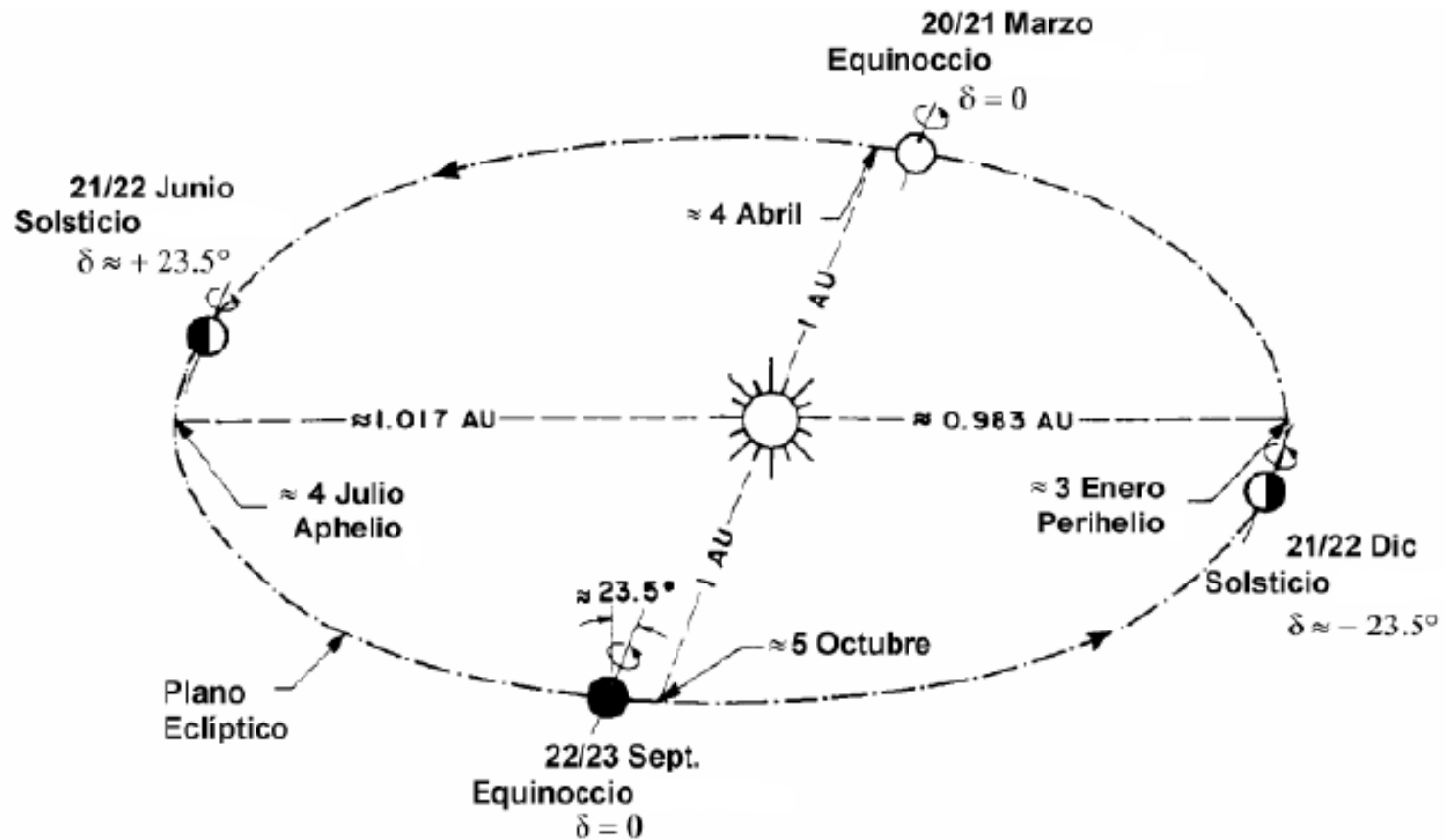
Constante Solar (G_{CS}):

Irradiancia media incidente sobre una **superficie normal** a la dirección Tierra-Sol en el exterior de la atmósfera.

$$G_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$$



Irradiancia Solar Extraterrestre



Irradiancia Solar Extraterrestre

Irradiancia en incidencia normal extraterrestre (G_0):

La distancia entre la Tierra y el Sol va variando a lo largo del año, y por ende la irradiancia también varía. Por este motivo, la **irradiancia en incidencia normal** presenta una variación estacional de aproximadamente $\pm 3\%$ en torno a G_{CS} debido a la excentricidad de la órbita terrestre. Es posible estimar esta irradiancia para cada día del año, mediante:

$$G_0 = G_{CS} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = G_{CS} F_n$$

Donde:

r : distancia Tierra - Sol

r_0 : valor medio de r a lo largo del año

G_{SC} : Constante Solar



Irradiancia Solar Extraterrestre

F_n se puede calcular sencillamente con la siguiente expresión:

$$F_n \equiv \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \simeq 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right)$$

Spencer propone la siguiente expresión para el calculo de F_n más precisa:

$$F_n = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) \\ + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma)$$

Donde:

$$\Gamma = 2\pi(n - 1)/365;$$

n: ordinal día



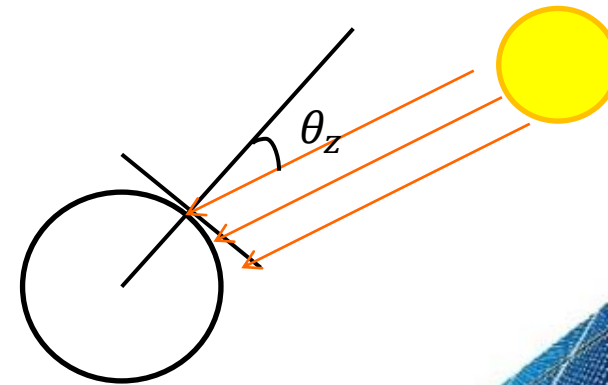
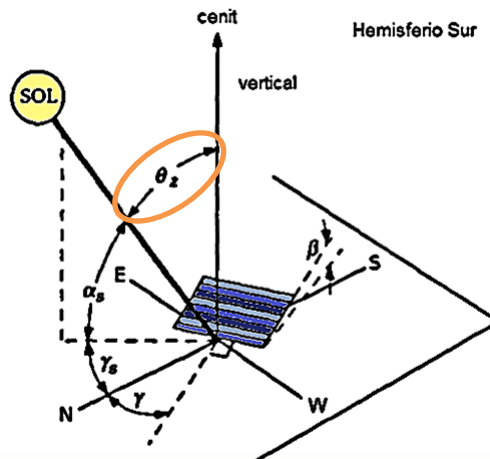
Irradiancia Solar Extraterrestre

Irradiancia extraterrestre horizontal (G_{0h}) :

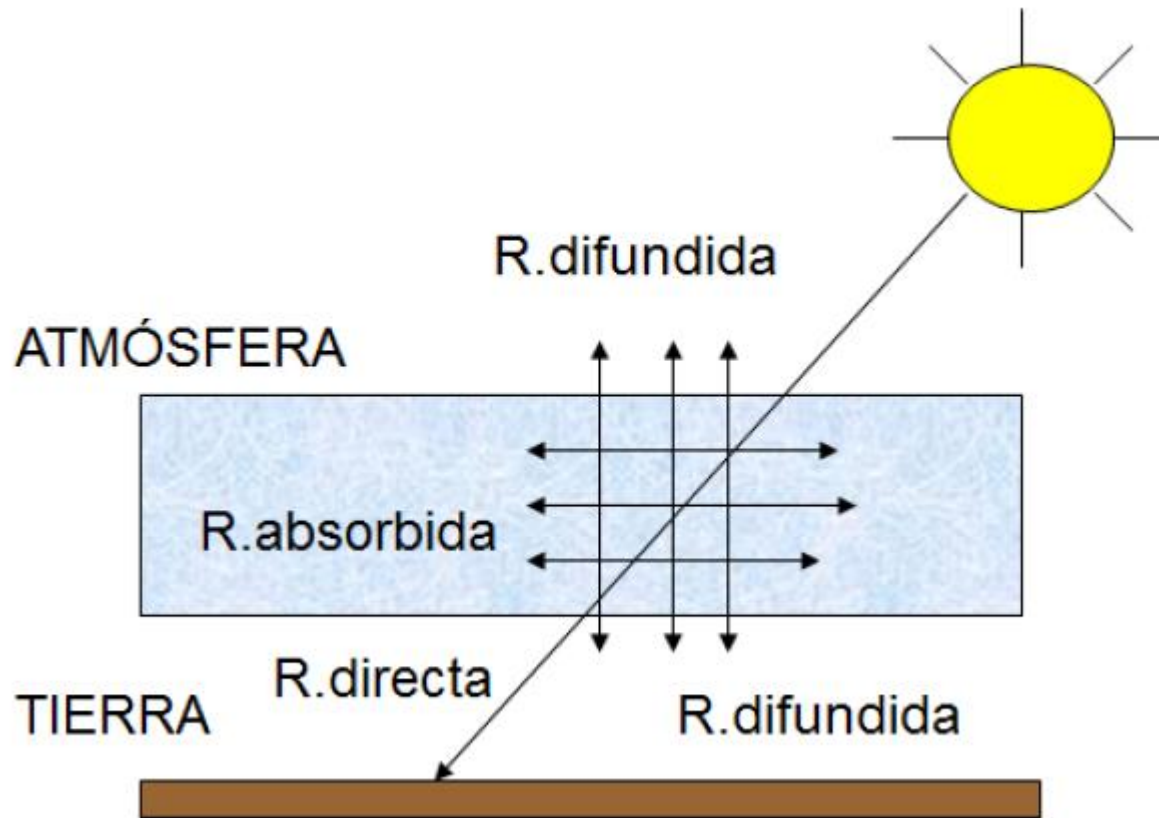
Para calcular la irradiancia extraterrestre sobre un plano horizontal, basta con multiplicar G_0 por el coseno del ángulo Cenital:

$$G_{0h} = G_0 \cos \theta_z = G_{cs} F_n \cos \theta_z$$

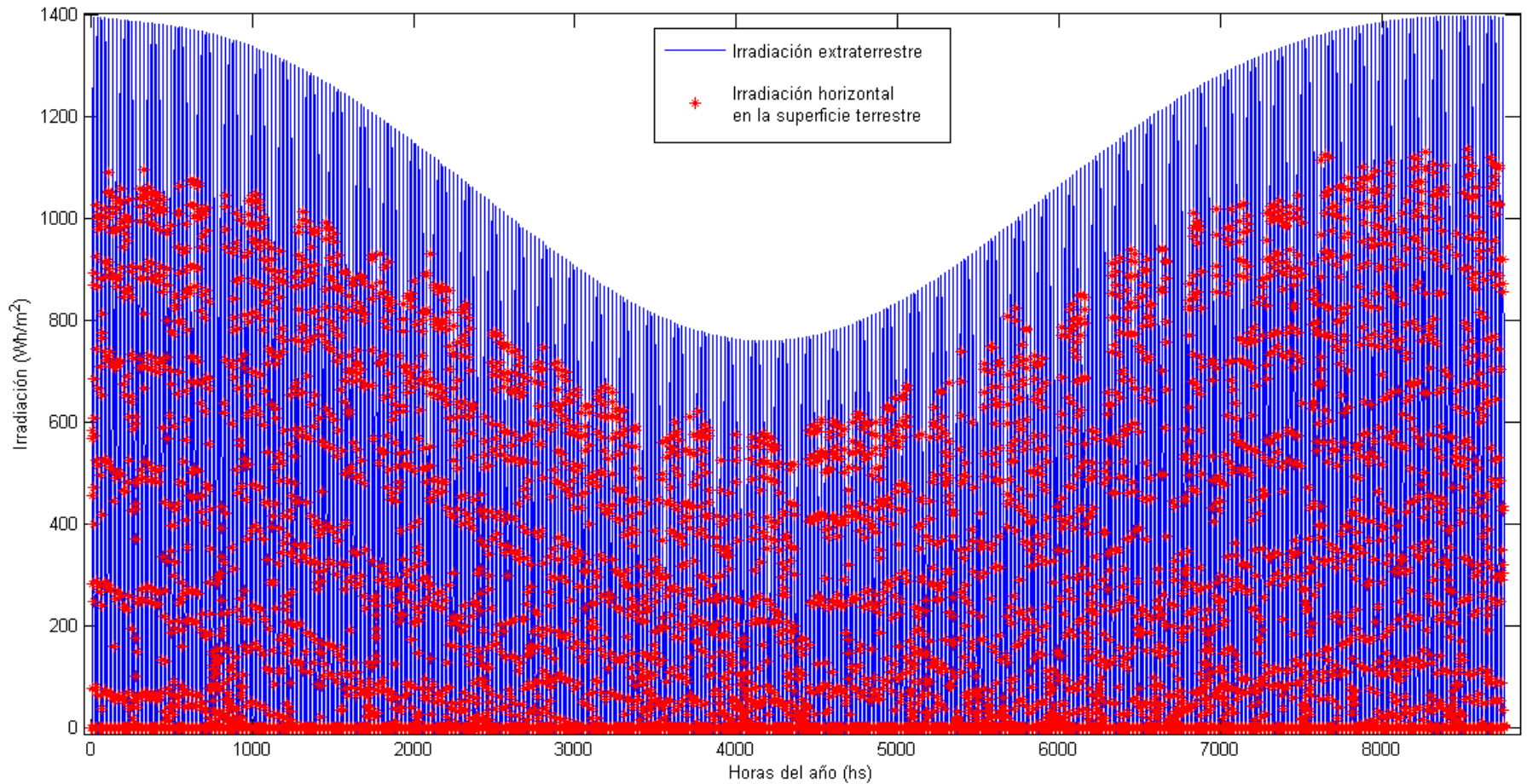
donde el $\cos \theta_z$ corresponde al producto escalar entre la dirección Tierra-Sol y la vertical del observador.



Efecto de la atmósfera



Efecto de la atmósfera



Índice de claridad

Este índice sirve para cuantificar la atenuación de la atmosfera en la irradiancia . El **índice de claridad** (k_T) representa la relación existente entre la irradiancia sobre el plano horizontal y la irradiancia extraterrestre horizontal.

$$k_T = \frac{G_h}{G_{0h}}$$

El índice de claridad es una variable adimensionada, varía entre 0 y 0.85 aprox, dependiendo de la nubosidad.

Si existe mucha nubosidad $\Rightarrow k_T$ cercano a 0

Nubosidad nula (día claro) $\Rightarrow k_T \sim 0.85$



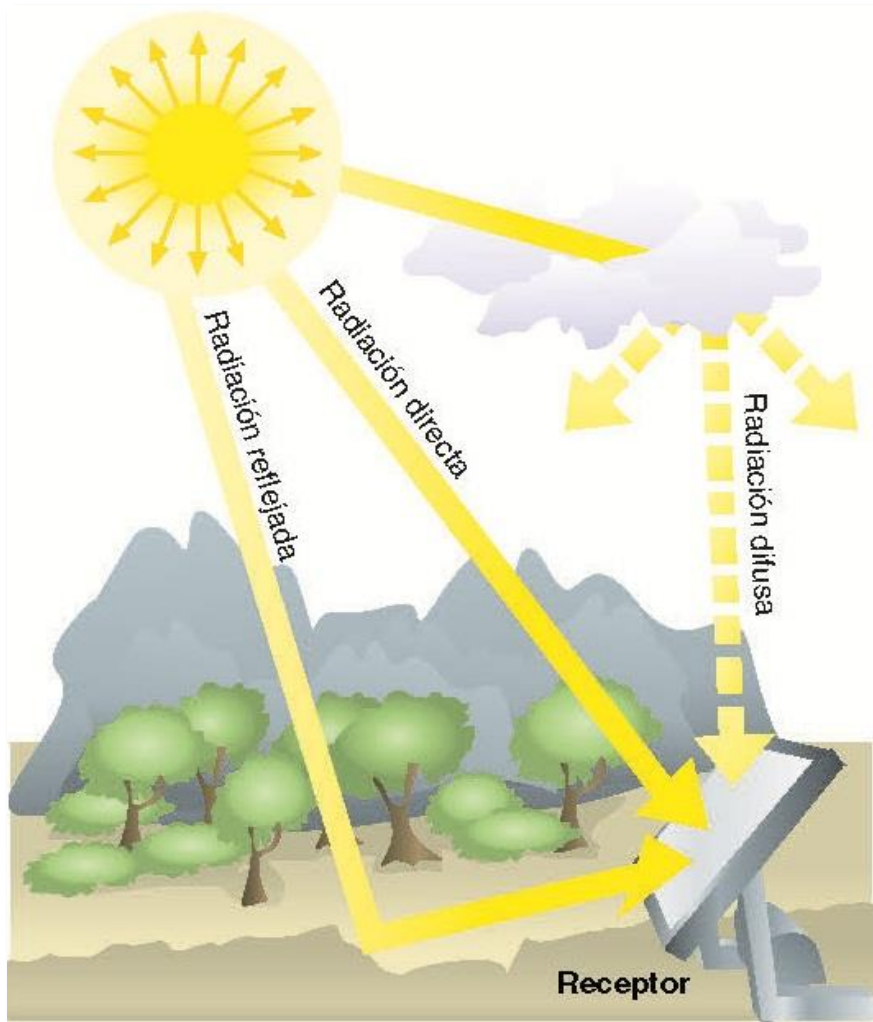
Irradiancia sobre un plano horizontal

- Directa en el plano horizontal(G_{bh}):
Colineal a Tierra-Sol
- Difusa en el plano horizontal(G_{dh}):
Todas las direcciones

$$G_h = G_{bh} + G_{dh}$$



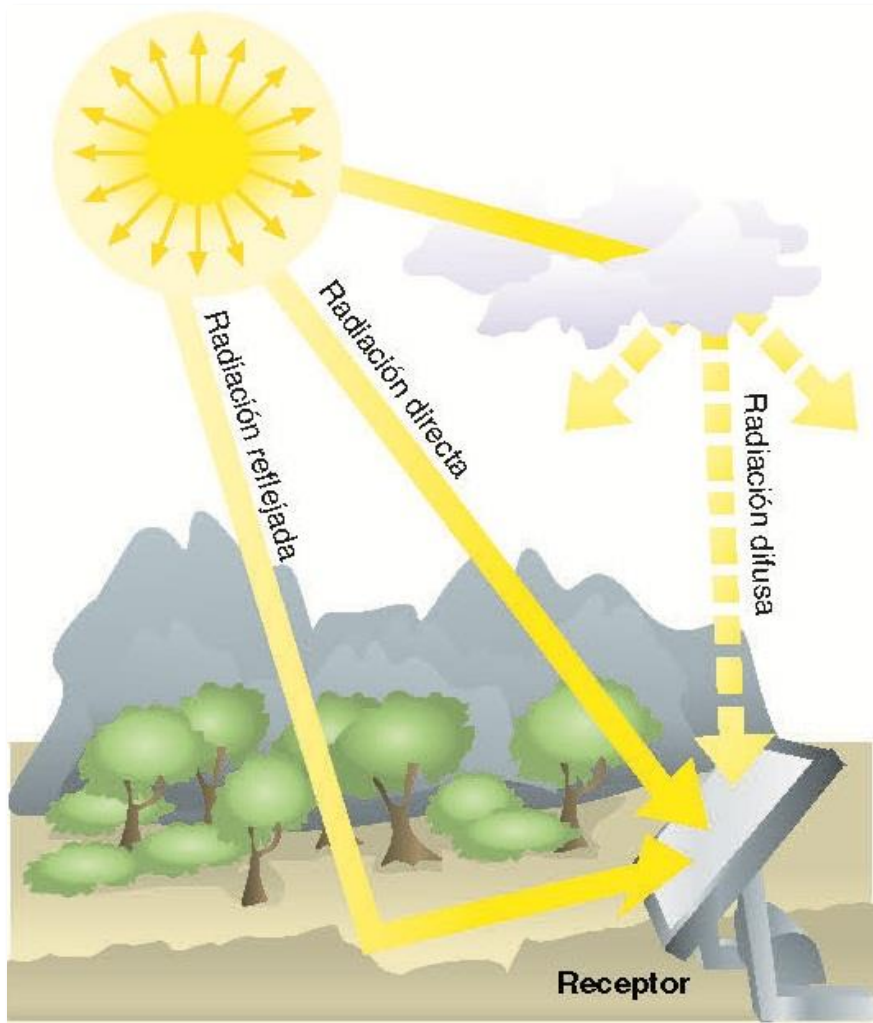
Irradiación directa, difusa y reflejada



fuelle: <http://calculationsolar.com/>

- Directa:
Colineal a Tierra-Sol
- Difusa:
Todas las direcciones
- Reflejada:
Reflejada por superficies
- Global:
suma de las anteriores

Irradiación directa, difusa y reflejada



La irradiancia incidente sobre una superficie inclinada se puede calcular como la suma de tres componentes:

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}$$

fuelle: <http://calculationsolar.com/>

Estimación de la Irradiación incidente en un Plano Inclinado a partir de valores en el Plano Horizontal

Motivación:

- Las medidas más comunes de irradiación son valores de irradiación global sobre el plano horizontal.
- Pero la irradiación de interés es la que incide en la superficie de los paneles fotovoltaicos que son superficies inclinadas.
- Por lo tanto, es necesario utilizar algún método para poder estimar la irradiación incidente sobre el plano inclinado.

HORARIO – DIARIO – MENSUAL - ANUAL



Estimación de la Irradiación incidente en un Plano Inclinado a partir de valores en el Plano Horizontal

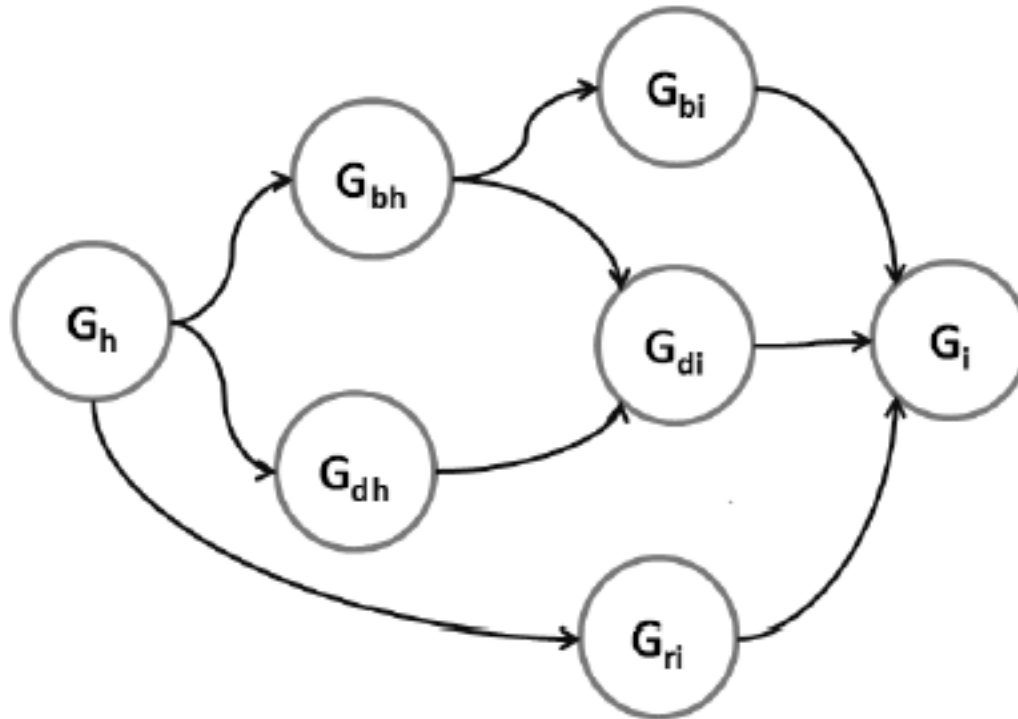
1. Primero, se calculan todos los ángulos de interés, como son:
 - declinación solar
 - ángulo horario
 - ángulo cenital
 - altitud solar
 - acimut solar
2. Luego, se calcula la irradiación extraterrestre sobre el plano horizontal, para posteriormente poder compararla con las medidas de irradiación en la superficie terrestre.
3. Utilizando algún tipo de correlación, se calcula la proporción de irradiación difusa que posee la irradiación global, y utilizando ese valor se calculan las componentes de irradiación difusa (G_{dh}) y directa (G_{bh}) sobre el plano horizontal.

Estimación de la Irradiación incidente en un Plano Inclinado a partir de valores en el Plano Horizontal

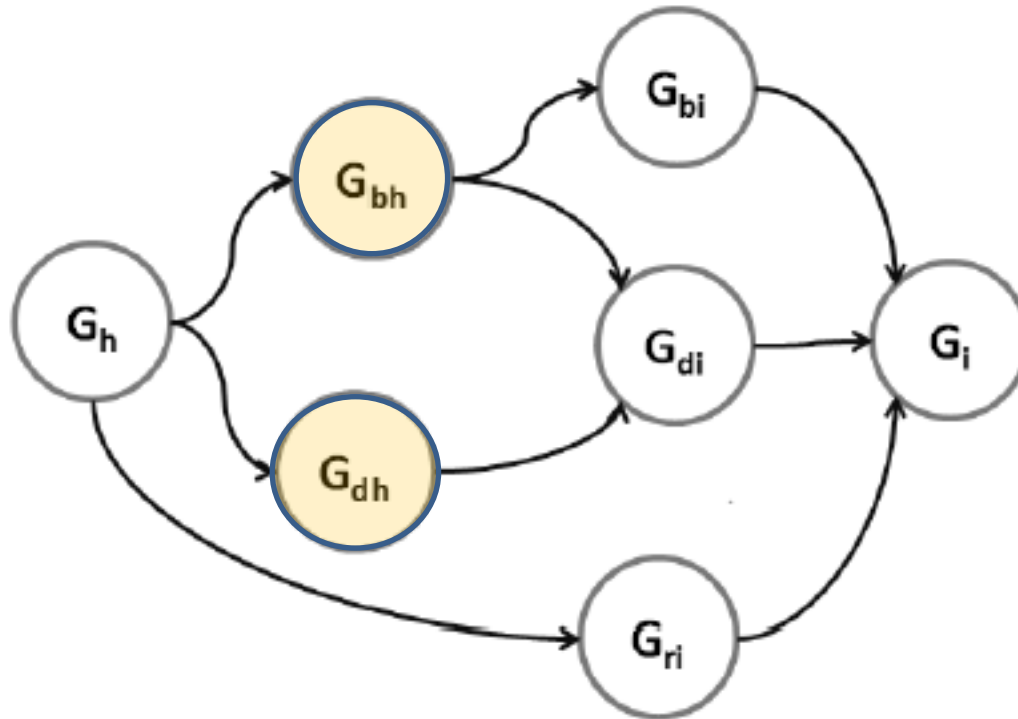
4. Dependiendo del tipo de configuración de planta, se calcula el ángulo de incidencia sobre la normal a la superficie (θ).
5. Finalmente se calcula la irradiación total incidente sobre la superficie inclinada (G_i) como la suma de la irradiación directa (G_{bi}), difusa (G_{di}) y reflejada (G_{ri}).



Estimación de la Irradiación incidente en un Plano Inclinado a partir de valores en el Plano Horizontal



Correlaciones para separar las componentes directa y difusa



Correlaciones para separar las componentes directa y difusa

Se define la **fracción difusa** como:

$$f_d = \frac{G_{dh}}{G_h}$$

Los modelos utilizados se basan en la hipótesis de que la fracción difusa (f_d), depende del índice de claridad (k_T).

$$f_d = f(k_T)$$

Entonces se busca la correlación de estas dos variables. Para encontrar esta correlación se necesita recabar datos de radiación difusa y global, para distintos niveles de claridad del cielo.

Correlaciones para separar las componentes directa y difusa

Una vez que se escoge la correlación a utilizar , se puede estimar la componente difusa de una medida cualquiera, conociendo sólo la componente global, la hora y el día del año.

Los pasos a seguir son:

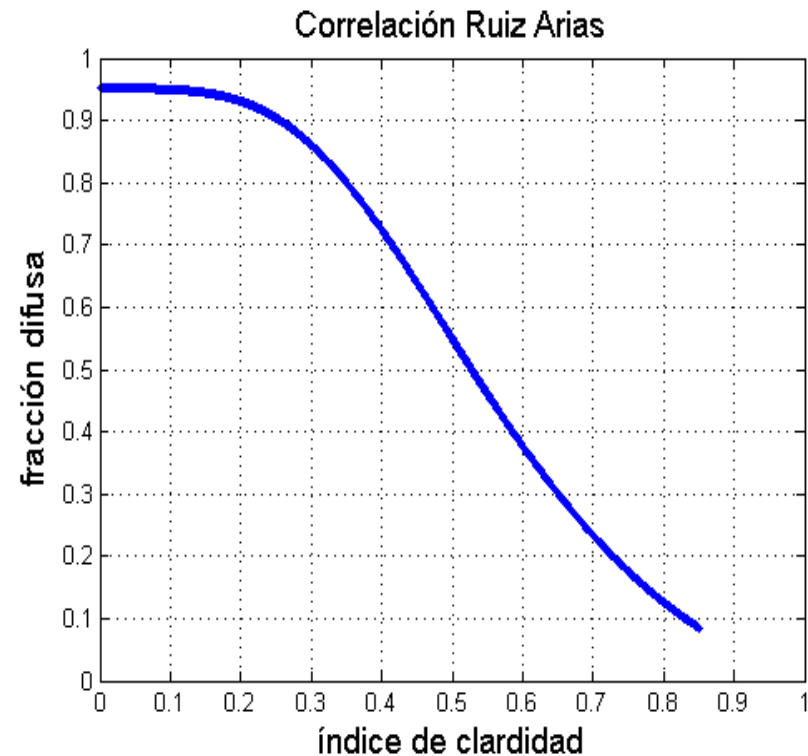
- 1) Irradiancia Global Extraterrestre: G_{0h}
- 2) Índice de claridad : $k_T = \frac{G_h}{G_{0h}}$
- 3) Fracción difusa según la correlación elegida: f_d
- 4) Irradiación difusa en el plano horizontal: $G_{dh} = f_d G_h$

Correlaciones para separar las componentes directa y difusa

Correlación de Ruiz Arias:

$$f_d = a_0 + a_1 e^{-e^{(a_2 + a_3 k_T)}}$$

Coef	Original	Local
a_0	0.95	0.97
a_1	-1.04	-1.01
a_2	2.30	3.07
a_3	-4.70	-6.17

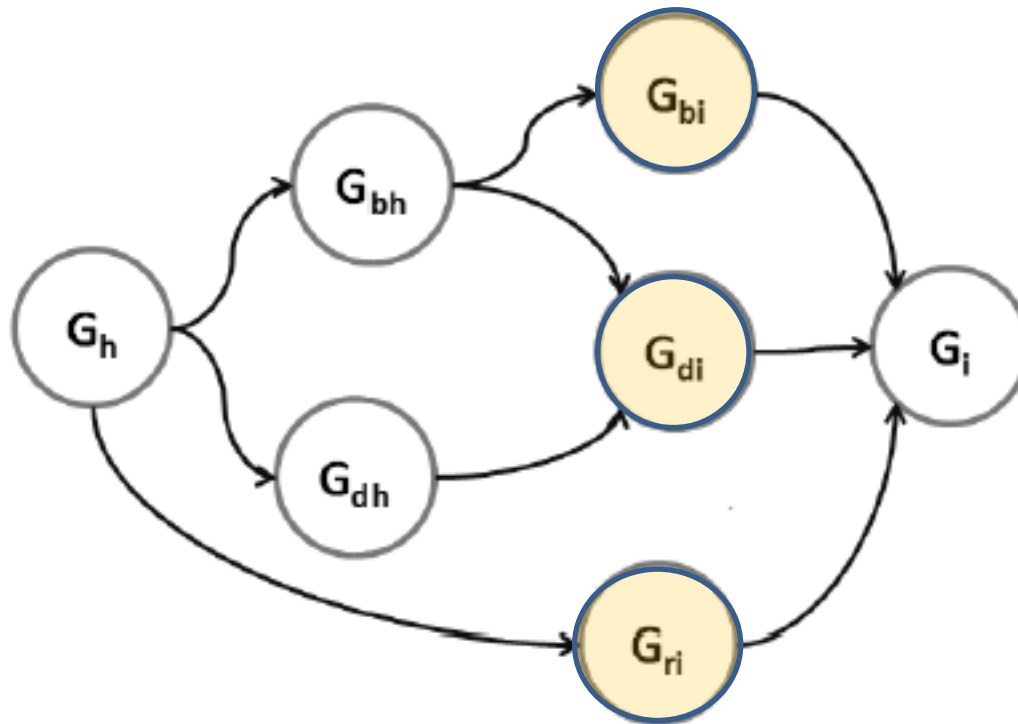


“Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions”

J.A. Ruiz-Arias, H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez

Abal et al. SE141 2017 166

Irradiación directa, difusa y reflejada



Irradiación directa, difusa y reflejada

- Directa:

Es la irradiación que proviene directamente del Sol. Su dirección es colineal a la de la línea Tierra-Sol.

Para el cálculo de la irradiación directa horaria, se define la **razón directa (r_b)** como la relación entre la irradiación directa horaria sobre la superficie inclinada y una superficie horizontal.

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

El valor de r_b termina siendo un factor geométrico que vincula los ángulos de incidencia.

Irradiación directa, difusa y reflejada

- Difusa (Modelo Liu y Jordan):

La irradiación difusa es **isotrópica** (constante en todas las direcciones).

$$G_{di}^{LJ} = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) G_{dh}$$

Donde:

$\frac{1 + \cos \beta}{2}$ corresponde al **factor de vista** con que la superficie inclinada "ve" a la bóveda celeste

G_{dh} es el valor de irradiación difusa sobre la superficie horizontal.

Irradiación directa, difusa y reflejada

- Difusa (Modelo Hay y Davies):

La irradiación difusa posee una componente **isotrópica** y una componente **circunsolar**.

Se utiliza la **transmitancia atmosférica** T_b (cociente entre la irradiación directa y la extraterrestre) como un indicador de anisotropicidad:

$$T_b = \frac{G_{bn}}{G_{0n}} = \frac{G_{bh}}{G_{0h}} = (1 - f_d) k_T$$

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} \quad f_d = \frac{G_{dh}}{G_h} \quad k_T = \frac{G_h}{G_{0h}}$$

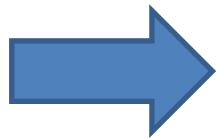


Irradiación directa, difusa y reflejada

- Difusa (Modelo Hay y Davies):

Circunsolar: $G_{di-cs}^{HD} = G_{dh} T_b r_b$

Isotrópica: $G_{di-iso}^{HD} = G_{dh} (1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$



$$G_{di}^{HD} = G_{di-cs}^{HD} + G_{di-iso}^{HD} = G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + T_b r_b \right]$$



Irradiación directa, difusa y reflejada

- Difusa (Modelo Hay-Davies-Klucher-Reindl):

Se modifica al modelo anterior (Modelo Hay y Davies) agregando un factor de corrección, que corresponde a incorporar el “**brillo del horizonte**”. En los días claros, el cielo suele ser más brillante en cercanías del horizonte. A este fenómeno se lo denomina “brillo de horizonte”, y es otro de los componentes que aporta a la irradiación difusa .

$$G_{di}^{HDKR} = G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) + T_b r_b \right]$$

Irradiación directa, difusa y reflejada

- Reflejada:

Corresponde a la irradiación reflejada por las superficies que se encuentren cercanas a la de interés, dependen directamente de los términos de reflectancia de estas superficies.

$$G_{ri} = \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho_g G_h$$

Hipótesis: la única superficie que refleja irradiación hacia los paneles fotovoltaicos es el suelo, y se asume como una superficie horizontal con coeficiente de reflexión .

Bajo esta hipótesis las superficies que están dispuestas horizontalmente no reciben ninguna irradiación reflejada. En cambio, las que están dispuestas verticalmente son las que más reciben este tipo de irradiación.



Irradiación directa, difusa y reflejada

Distintos valores de reflexión según las superficies:

Tipo de superficie	ρ_g	Tipo de superficie	ρ_g
Hierba	0,25	Asfalto	0,15
Césped	0,18 - 0,23	Bosques	0,05 - 0,18
Hierba seca	0,28 - 0,32	Zonas áridas	0,10 - 0,25
Campo de siembra	0,26	Sup. de agua ($T > 45\text{ °C}$)	0,05
Suelo estéril	0,17	Sup. de agua ($45\text{ °C} > T > 30\text{ °C}$)	0,08
Grava	0,18	Sup. de agua ($30\text{ °C} > T > 20\text{ °C}$)	0,12
Concreto limpio	0,3	Sup. de agua ($T < 20\text{ °C}$)	0,22
Hormigón desgastado	0,2	Capa fresca de nieve	0,80 - 0,90
Cemento limpio	0,55	Capa vieja de nieve	0,45 - 0,70



Modelo de irradiación incidente sobre una superficie inclinada (HDKR)

Una vez definidas las tres componentes de sobre una superficie inclinada con el modelo HDKR, se puede calcular la irradiación en plano inclinado como la suma de las mismas:

$$G_i^{HDKR} = G_{bi} + G_{di}^{HDKR} + G_{ri}$$



Hay Davis Klucher Reindl

$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$



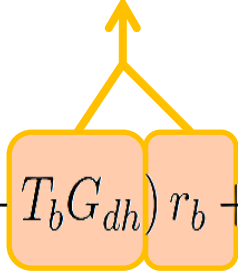
Hay Davis Klucher Reindl

Directa

$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$

Hay Davis Klucher Reindl

Difusa circunsolar


$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \\ + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$

Hay Davis Klucher Reindl

$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$

Difusa isotrópica

Hay Davis Klucher Reindl

$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$

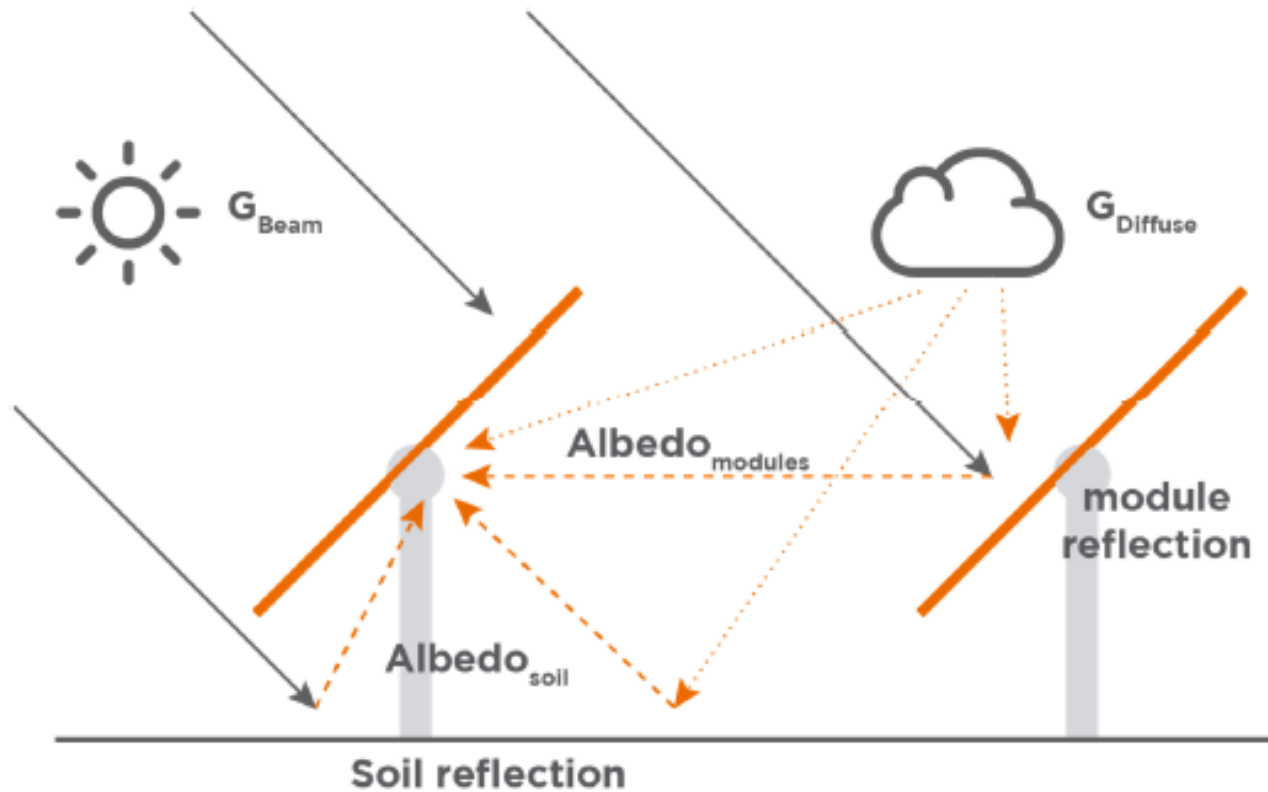
Difusa “brillo de horizonte”

Hay Davis Klucher Reindl

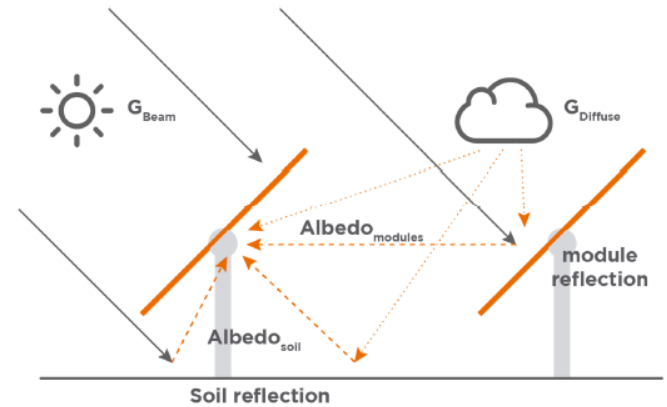
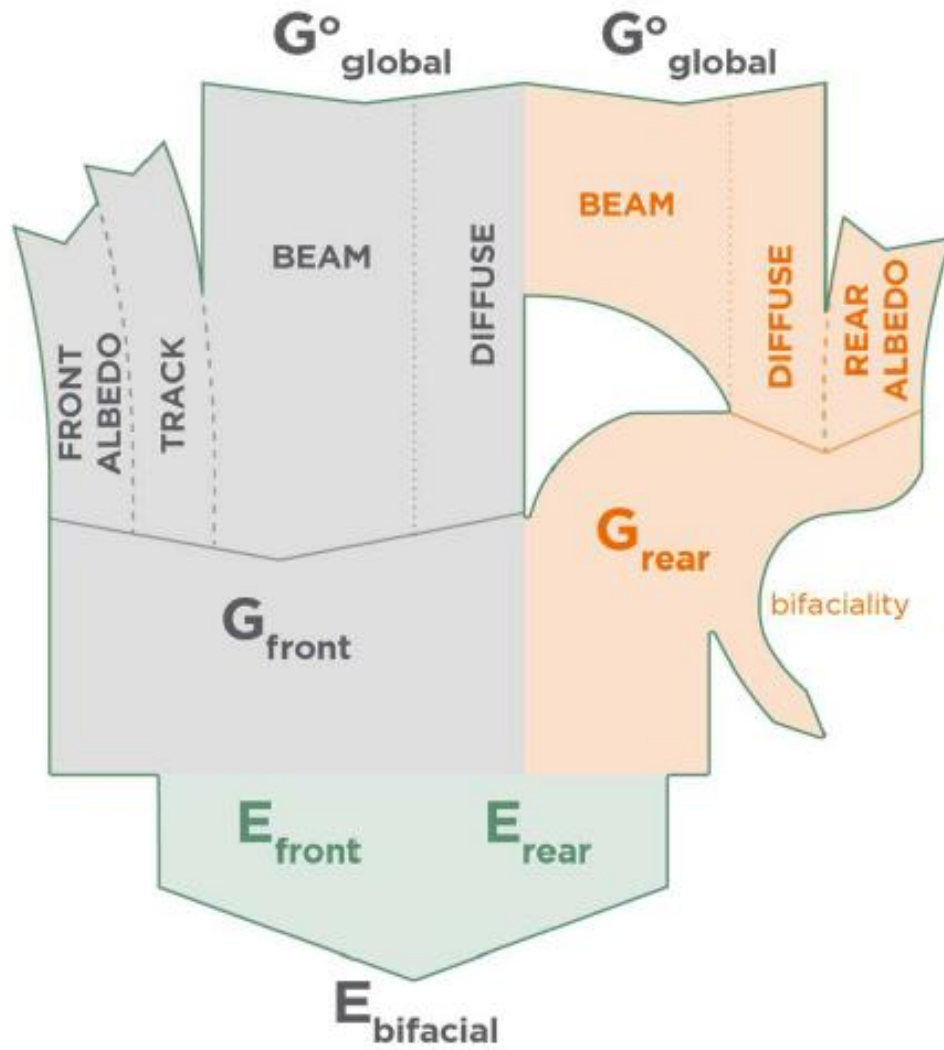
Reflejada

$$G_i^{HDKR} = (G_{bh} + T_b G_{dh}) r_b + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + G_{dh} \left[(1 - T_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sqrt{(1 - f_d) \sin^3(\beta/2)} \right) \right]$$

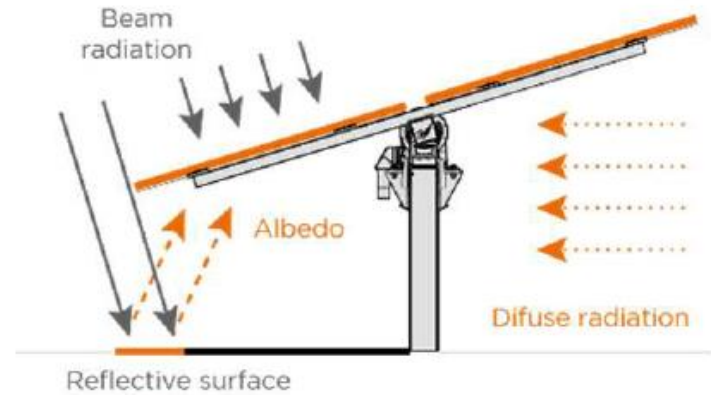
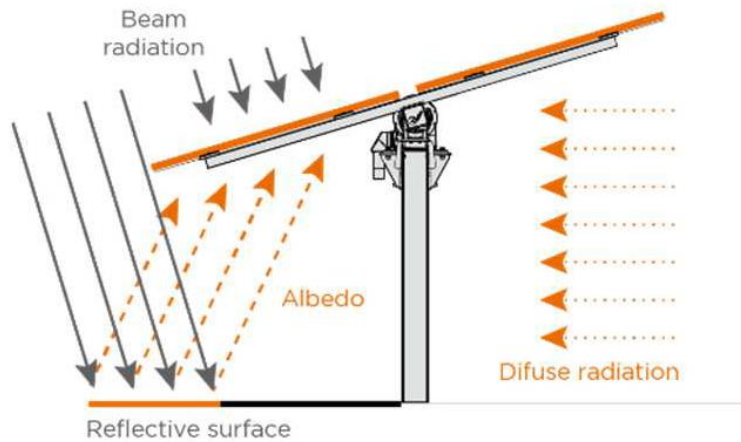
Caso Paneles Bifaciales



Caso Paneles Bifaciales



Caso Paneles Bifaciales



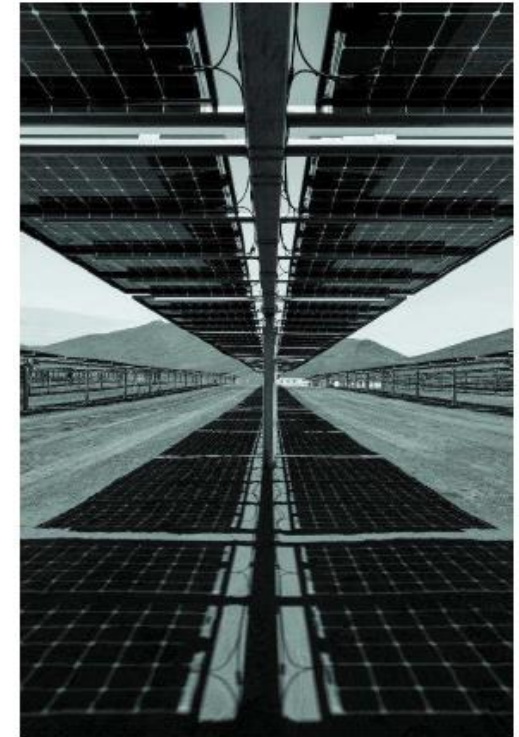
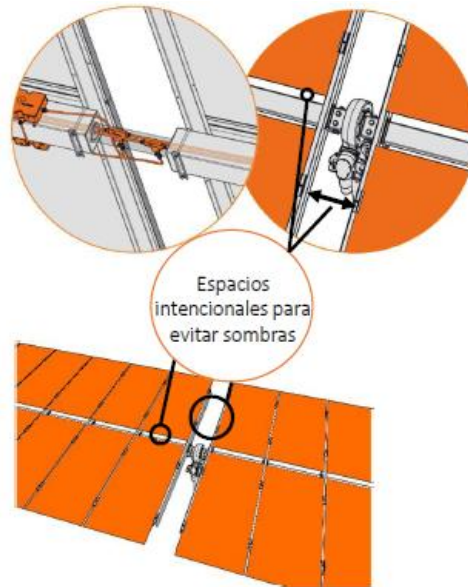
Caso Paneles Bifaciales

Sombreado = interferencias

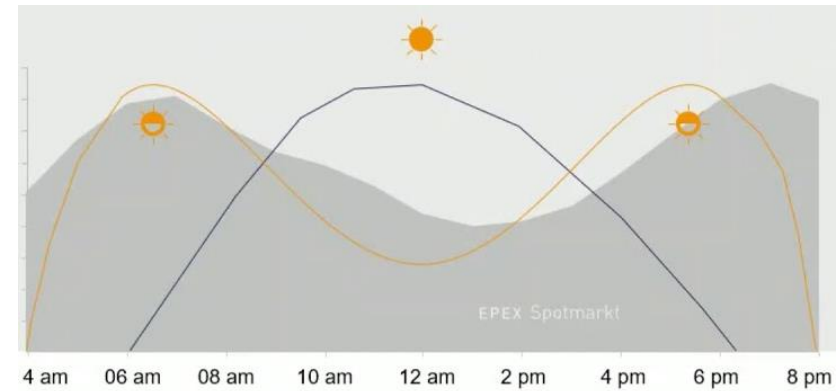
Bifacial = nuevo concepto
Todos los objetos sombrea
Sombra = pérdida de energía

Minimizar el número de objetos que pueden sombrear:

- ✓ El tubo de eje no causa sombra → 5% menos de interferencias
- ✓ 7 hincas/90 módulos → 46% menos de hincas/MW
- ✓ Sin cables colgantes → 81% menos de cableado → StringRunner
- ✓ Sin amortiguadores



Caso Paneles Bifaciales



Referencias

- Notas del curso “Fundamentos de Energía Solar” – Recurso Solar
- Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman
- Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. J.A Ruiz-Arias, H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez, Energy Conversion and Management 2010;