Radiación Solar

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

http://oscarperpinan.github.io

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Radiación Solar y Sistemas Fotovoltaicos

- La **energía producida** por un sistema fotovoltaico depende principalmente de la **radiación incidente** en el generador.
- Consecuentemente, la **estimación del comportamiento** de un sistema FV en un determinado lugar durante un período temporal exige **conocer la radiación solar disponible en el plano del generador**.

La radiación solar no se puede calcular analíticamente

- La radiación solar que alcanza la superficie terrestre es el resultado de complejas interacciones en la atmósfera.
- Para estimar la radiación se requiere medidas terrestres o imágenes de satélite.

Ángulo de Inclinación

- Los generadores FV tienen un **ángulo de inclinación positivo** para maximizar el rendimiento.
- Este ángulo depende de la **latitud** del lugar y de la **aplicación del sistema**.

Bases de Datos de Radiación Solar

- Por tanto, es inviable mantener una base de datos de radiación solar **incidente**.
- Las **bases de datos** registran radiación en el **plano horizontal**.
- La estimación de la radiación incidente en el plano inclinado requiere un **procedimiento de transposición**.

Del plano horizontal al plano inclinado

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra
- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Movimiento terrestre

- La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - Periodo aproximado: 24 horas.

Introducción
Geometría Sol y Tierra
Movimiento Sol-Tierra
Ángulos Solares
Hora solar y oficial
Geometría de los sistemas fotovoltaicos
Radiación Solar en la Superficie Terrestre
Bases de Datos
Radiación Solar en Generadores FV

Movimiento terrestre

- La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - Periodo aproximado: 24 horas.
- La Tierra se mueve **alrededor del Sol** siguiendo una elipse de baja excentricidad.
  - Periodo aproximado: 1 año.
  - Este movimiento está contenido en el llamado *plano de la eclíptica*

Movimiento terrestre

- Entre el eje polar y el plano de la eclíptica hay un ángulo constante de $23,45°$.
- Entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol hay un ángulo variable: *declinación*.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra
- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Ejes terrestres

- **Declinación**, δ: ángulo entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol.
- **Hora Solar**, w: diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ($w = 0$).

Declinación

Ecuación de Cooper

$$\delta = 23,45° \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (d_n + 284)}{365}\right)$$

Estaciones

- **Solsticio de junio**
  - 21-22 Junio, $d_n = 172 - 173$
  - Declinación máxima.
  - Días más largos en hemisferio Norte (verano)
  - El Sol amanece por el Noreste y anochece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Estaciones

- **Solsticio de junio**
  - 21-22 Junio, $d_n = 172 - 173$
  - Declinación máxima.
  - Días más largos en hemisferio Norte (verano)
  - El Sol amanece por el Noreste y anochece por el Noroeste en el hemisferio Norte.
- **Solsticio de diciembre**
  - 21-22 Diciembre, $d_n = 355 - 356$
  - Declinación mínima.
  - Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
  - El Sol amanece por el Sureste y anochece por el Suroeste en el hemisferio Norte.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Estaciones

- **Solsticio de junio**
  - 21-22 Junio, $d_n = 172 - 173$
  - Declinación máxima.
  - Días más largos en hemisferio Norte (verano)
  - El Sol amanece por el Noreste y anochece por el Noroeste en el hemisferio Norte.
- **Solsticio de diciembre**
  - 21-22 Diciembre, $d_n = 355 - 356$
  - Declinación mínima.
  - Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
  - El Sol amanece por el Sureste y anochece por el Suroeste en el hemisferio Norte.
- **Equinoccios**
  - 21-22 Marzo ($d_n = 80 - 81$)
  - 22-23 Septiembre ($d_n = 265 - 266$)
  - Declinación nula
  - La duración de noche y día coinciden.
  - El Sol amanece por el Este y anochece por el Oeste.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Hora Solar

- w, diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ($w = 0$, $\psi_s = 0$).
- Criterio de signos: $w < 0$ antes del mediodía.
- 1h = 15º (24h $= 2\pi$ radians $= 360$)
- (Horas) $-12, -11, -10, \ldots, -1, \mathbf{0}, 1, \ldots, 10, 11, 12$

Amanecer ($\gamma_s = 0$)

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

La longitud del día, $|2 \cdot \omega_s|$, depende de ϕ y d_n.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Duración del día

Ejes locales

- **Cenit Solar**, θ_{zs}: ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- **Azimut Solar**, ψ_s: ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- Dependen de d_n, ω, y ϕ.

Relación entre sistemas de coordenadas

- **Latitud (ϕ) con signo**: Positivo para Hemisferio Norte, Negativo para Hemisferio Sur.

Cenit Solar

$$\cos(\theta_{zs}) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\phi) + \sin(\delta)\sin(\phi)$$

- θ_{zs}, ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- γ_s, altura solar, ángulo complementario de θ_{zs}.
- Depende de d_n, ω, y ϕ.

Azimut solar

$$\cos(\psi_s) = \text{sign}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta)\cos(\omega)\sin(\phi) - \cos(\phi)\sin(\delta)}{\sin(\theta_z)}$$

- ψ_s, ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- Depende de d_n, ω, y ϕ.
- Criterio de Signos: negativo antes del mediodía.

Trayectoria Solar (60°N)

Trayectoria Solar (40°S)

Cálculo Ángulos Solares

- Azimut, Ángulo Cenital y Altura Solar, Duración del Dia para el:
  - Día del Año: 120, 2 horas después del mediodía, Latitud: 37.2N
  - Día del Año: 340, 2 horas después del amanecer, Latitud: 15S
- Duración del día 261 del año en las latitudes 10N, 40N, 70N, 10S, 40S, 70S.
- Altura solar en el mediodía del día 25 del año en las latitudes 10N, 40N, 10S, 40S.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra
- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Hora solar

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

- ω: hora solar real o aparente[º]
- TO: hora oficial [h]
- AO: adelanto oficial por horario de verano [h]
- $\Delta\lambda$ corrección por huso horario [º]
- EoT: Ecuación del tiempo (dia solar real y dia solar medio) [min]

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Hora oficial

- **La hora oficial** es una medida del tiempo **ligada a un meridiano** que sirve de referencia para una zona determinada.
- La hora oficial de la España peninsular se rige por el huso horario de Centroeuropa. Este huso horario está situado en 15°E.
- **Corrección**: $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$, con λ_L la longitud local y λ_H la longitud del huso horario.
- Longitudes *positivas* al *este* del meridiano de Greenwich. $\Delta\lambda$ es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.

Introducción
Geometría Sol y Tierra
Movimiento Sol-Tierra
Ángulos Solares
Hora solar y oficial
Geometría de los sistemas fotovoltaicos
Radiación Solar en la Superficie Terrestre
Bases de Datos
Radiación Solar en Generadores FV

Tiempo solar medio

- **La duración del día solar real**, definido como el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano local, **varía a lo largo del año**.
- El promedio anual de esta variación es nulo: *día solar medio*, cuya duración es constante a lo largo del año e igual al valor medio de la duración del día solar real.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Ecuación del Tiempo

$$\mathrm{EoT} = 229.18 \cdot \left(-0.0334 \cdot \sin(M) + 0.04184 \cdot \sin\left(2 \cdot M + 3.5884\right)\right)$$

$$M = \frac{2\pi}{365.24} \cdot d_n$$

Ejemplo de cálculo

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

Calcule la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 (EoT = 1,78 min) a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia. Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud 8.38°W y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Solución

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

- $\lambda_L = -8.38°$, $\lambda_H = 15°$ y $\Delta\lambda = -23.38°$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Solución

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

- $\lambda_L = -8.38°$, $\lambda_H = 15°$ y $\Delta\lambda = -23.38°$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\mathrm{AO} = 1$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Solución

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

- $\lambda_L = -8.38°$, $\lambda_H = 15°$ y $\Delta\lambda = -23.38°$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\mathrm{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\mathrm{EoT} = 1{,}78\,\mathrm{min}$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Solución

$$\omega = 15 \cdot (\mathrm{TO} - \mathrm{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\mathrm{EoT}}{4}$$

- $\lambda_L = -8.38°$, $\lambda_H = 15°$ y $\Delta\lambda = -23.38°$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\mathrm{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\mathrm{EoT} = 1{,}78\,\mathrm{min}$.
- Así $\omega = -37.94°$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:31, hora oficial.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Definiciones

- θ_s, ángulo de incidencia (AOI), ángulo entre los rayos solares y la perpendicular al plano del generador.
- α: orientación del generador (0° cuando está orientado al mediodía solar)
- β: inclinación del generador (respecto de la superficie horizontal)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Sistema Estático
- Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Sistema Estático

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Ángulo de Incidencia

- Si $\alpha = 0$

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\beta - |\phi|) - \text{sign}(\phi) \cdot \sin(\delta)\sin(\beta - |\phi|)$$

- Inclinación Óptima $\beta_{opt} \simeq |\phi| - 10$.

Ángulo de Incidencia

- $40°N$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Sistema Estático
- Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

- **Fundamento:**
  - Radiación incidente aumenta al seguir al sol
  - Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

- **Fundamento:**
  - Radiación incidente aumenta al seguir al sol
  - Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora
- Las diferentes técnicas de seguimiento son un **compromiso** entre
  - un **apuntamiento perfecto**
  - **sistemas estructurales más económicos**
  - mejores **aprovechamientos del terreno**.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Algunos tipos de seguimiento solar

- **Doble eje**
  - Apuntamiento «perfecto»
  - Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Algunos tipos de seguimiento solar

- **Doble eje**
  - Apuntamiento «perfecto»
  - Mejor productividad, peor ocupación de terreno.
- **Seguimento acimutal**
  - Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Algunos tipos de seguimiento solar

- **Doble eje**
  - Apuntamiento «perfecto»
  - Mejor productividad, peor ocupación de terreno.
- **Seguimento acimutal**
  - Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.
- **Seguimiento horizontal con eje Norte-Sur**
  - Sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios),
  - Facilidad de motorización,
  - Buen aprovechamiento del terreno.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Sistema de Seguimiento(1 eje, horizontal N-S)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Ángulo de Incidencia (1x eje, horizontal N-S)

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta)\sqrt{\sin^2(\omega) + (\cos(\omega)\cos(\phi) + \tan(\delta)\sin(\phi))^2}$$

Inclinación de Eje Horizontal N-S

- $40°N$

Ángulo de Incidencia de Eje Horizontal N-S

- $40°N$

Sistema de Seguimiento (2x ejes)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Ángulo de Incidencia (seguidor 2x)

$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

$$\cos(\theta_s) = 1$$

Inclinación (seguidor 2x)

- $40°N$

Ejercicio: cálculo de ángulo de incidencia

Para:
- Un sistema estático orientado al Sur y con inclinación de 30;
- Un sistema de seguimiento horizontal N-S;
- Un sistema de seguimiento acimutal con inclinación a 35;
- Un sistema de seguimiento a doble eje,

Calcular el ángulo de incidencia para el:
- Día del Año: 120, 2 horas después del mediodía, Latitud: 37.2N;
- Día del Año: 340, 2 horas después del amanecer, Latitud: 15S;

Introducción
Geometría Sol y Tierra
Geometría de los sistemas fotovoltaicos
Sistema Estático
Sistemas con seguimiento
Radiación Solar en la Superficie Terrestre
Bases de Datos
Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Irradiancia e Irradiación

Irradiancia es la densidad de *potencia* de radiacion solar incidente en una superficie.

- Unidades: $\mathrm{W\,m^{-2}}$, $\mathrm{kW\,m^{-2}}$

Irradiación es la densidad de *energía* de radiación solar incidente en una superficie.

- Unidades: $\mathrm{Wh\,m^{-2}}$, $\mathrm{kWh\,m^{-2}}$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- Radiación Extra-atmosférica
- Radiación solar en la superficie terrestre
- Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Definición

- La radiación que alcanza la superficie de la atmósfera es radiación directa del Sol.

Introducción
Geometría Sol y Tierra
Geometría de los sistemas fotovoltaicos
Radiación Solar en la Superficie Terrestre
Radiación Extra-atmosférica
Radiación solar en la superficie terrestre
Cálculo de componentes de radiación solar
Bases de Datos
Radiación Solar en Generadores FV

Ecuaciones

- **Constante solar** $B_0 = 1367\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en límite superior de la atmósfera terrestre)
- **Irradiancia extra-atmosférica**

$$B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos\theta_{zs}$$

- **Irradiación extra-atmosférica diaria** (ω_s en radianes)

$$B_{0d}(0) = -\frac{24}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\delta \cos\phi \sin\omega_s)$$

- Factor de corrección por excentricidad

$$\epsilon_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos(2\pi d_n / 365)$$

Introducción
Geometría Sol y Tierra
Geometría de los sistemas fotovoltaicos
Radiación Solar en la Superficie Terrestre
Radiación Extra-atmosférica
Radiación solar en la superficie terrestre
Cálculo de componentes de radiación solar
Bases de Datos
Radiación Solar en Generadores FV

Días promedio

- Es posible demostrar que el **promedio mensual** de esta irradiación diaria **coincide numericamente** con el valor de irradiación diaria correspondiente a los denominados **días promedios**, días en los que la declinación correspondiente coincide con el promedio mensual
- Por tanto, podemos calcular el valor medio mensual de la irradiación diaria extra-atmosférica con el valor de la declinación de uno de los doce días promedio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
d_n	17	45	74	105	135	161

Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
d_n	199	230	261	292	322	347

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- Radiación Extra-atmosférica
- Radiación solar en la superficie terrestre
- Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Interacción de la radiación con la atmósfera

- **Disminución** de la radiación incidente en la superficie terrestre (reflexión en nubes)
- **Modificación de las características espectrales** de la radiación (absorción por vapor de agua, ozono y CO2)
- **Modificación de la distribución espacial** (dispersión por partículas)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Caracterización de la atmósfera

- **Masa de aire**:
  - Relación entre camino recorrido por rayos directos del Sol a través de la atmósfera hasta la superficie receptora y el que recorrerían en caso de incidencia vertical (AM=1)
  - $AM \simeq 1/\cos\theta_{zs}$
- **Índice de claridad**
  - Relación entre la radiación en la superficie terrestre y la radiación extra-atmosférica, ambas en el plano horizontal
  - El índice de claridad **no depende de las variaciones debidas al movimiento aparente del sol**.
  - $K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)}$ (mensual)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Índice de claridad

K_T: índice de claridad instantáneo. $K_T = G/B_0$

K_{Td}: índice de claridad diario. $K_{Td} = G_d/B_{0d}$

K_{Tm}: índice de claridad mensual.
$K_{Tm} = G_m/B_{0m} = G_{d,m}/B_{0d,m}$

K_{Ta}: índice de claridad anual. $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \ldots$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Componentes de la radiación solar

- **Radiación Directa**. (B)
  - Linea recta con el Sol.
- **Radiación Difusa**. (D)
  - Procedente de todo el cielo salvo el Sol
  - Rayos dispersados por la atmósfera.
  - Anisotrópica, proceso estocástico.
- **Radiación del albedo**. (R, AL)
  - Procedente del suelo (reflejada)
- **Radiación Global:** $G = B + D + R$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Cómo se escribe

Forma, tiempo, lugar

Forma+Tiempo+Lugar: Irradiancia directa (forma) horaria (tiempo) en el plano del generador (lugar)

Promedios: Media mensual (periodo) de la irradiación global (forma) diaria (tiempo)

Lugar: (Orientación, Inclinación)
(0=Horizontal)
(n=Normal)
(I=Plano del generador)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Cómo se escribe

Forma, tiempo, lugar

$$Forma_{tiempo,promedio}(lugar)$$

$$G_{d,m}(0)$$

$$D_h(\alpha, \beta)$$

$$B_{0d}(n)$$

$$B(\beta)$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- Radiación Extra-atmosférica
- Radiación solar en la superficie terrestre
- Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Estimación de Directa y Difusa

- Objetivo: Establecer una **relación entre la fracción difusa** de la radiación horizontal ($F_D = \frac{D(0)}{G(0)}$) y **el índice de claridad**.
- **Correlación negativa** (a mayor índice de claridad, menor componente difusa)
- **Correlación independiente de la latitud** (validez cuasi-universal)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Correlaciones F_D y K_T: Ecuación de Page

$$F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot K_{Tm}$$

Correlaciones F_D y K_T

Ejemplo: en un lugar con $G_{d,m}(0) = 3150\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$ en un mes con $B_{o,dm}(0) = 4320\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$ será:

- $K_{Tm} = \frac{3150}{4320} = 0.73$
- Según la correlación de Page, $F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot 0.73 = 0.175$
- $D_{d,m}(0) = 0.175 \cdot 3150 = 551{,}6\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$
- $B_{d,m}(0) = 3150 - 551.6 = 2598{,}4\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$

Correlaciones F_D y K_T: Collares-Pereira y Rabl

$$F_{Dd} = \begin{cases} 0.99 & K_{Td} \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 \cdot K_{Td} + 9.473 \cdot K_{Td}^2 - 21.856 \cdot K_{Td}^3 + 14.648 \cdot K_{Td}^4 & K_{Td} > 0.17 \end{cases}$$

Ejemplo

Calcular las componentes directa y difusa de la radiación solar del:

- Mes de Septiembre (día 261) en un lugar con latitud $\phi = 40°\text{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700\,\text{Wh}\,\text{m}^{-2}$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos
- Introducción
- Fuentes de Datos
- Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Variabilidad Solar

- La **radiación extra-atmosférica** se puede expresar de forma **analítica** en función del día, hora y latitud.
- La **radiación en la superficie terrestre** es un **proceso estocástico** (aleatorio) debido a la interacción con la atmósfera.
  - Variabilidad Temporal
  - Variabilidad Espacial

Estimaciones a Largo Plazo

- Nos interesan **estimaciones a largo plazo** del funcionamiento de los sistemas FV en una localización concreta.
- Las fuentes de datos de radiación solar deben:
  - **capturar el comportamiento a largo plazo** (variabilidad interanual)
  - y ser **representativas de la localización** (variabilidad espacial).

Variabilidad Temporal

- La variabilidad temporal **incrementa con la resolución temporal** (ej. mayor para valores diarios que para medias mensuales).
- Las fluctuaciones son **más altas en invierno que en verano**.
- Reproducir **tendencias a largo plazo** requiere **series temporales largas** (recomendado 10 años).

Variabilidad Espacial

- La variabilidad espacial depende de la **climatología local**.
- La variabilidad espacial es **mayor en invierno que en verano** para una misma localización.
- Las medidas son representativas de las localizaciones cercanas en una distancia limitada (aprox. 10 kms.)

Resumen

Requerimientos

Una estimación de la productividad de un SFV confiable y representativa en el largo plazo requiere:

- **Medidas Cercanas**: $\leq 10\,\mathrm{km}$
- **Series Temporales Largas**: $\simeq 10$ años

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos
- Introducción
- Fuentes de Datos
- Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Estaciones Meteorológicas

- Series temporales largas
- Alta resolución temporal (1 min)
- Baja resolución espacial.
- Los errores se deben al medidor (no se emplean modelos).

Piranómetro

Imágenes de Satelite

- Baja resolución temporal (1 hora).
- Alta resolución espacial (15 km).
- La radiación global se estima mediante el procesado de las imágenes obtenidas por los radiómetros de los satélites.
- Los errores se deben a los modelos.

Métodos Híbridos

- Las medidas terrestres se mezclan con las estimaciones de satélite para mejorar la resolución espacial.
- Interpolación Espacial.
  - **Inverse Distance Weighting (IDW)** (d es la distancia entre los puntos x_0 y x_i)

$$\widehat{G}_d(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i G_d(x_i)}{\sum_{i=1}^{N} w_i}$$

$$w_i = 1/d^2(x_0, x_i)$$

  - **Kriging Ordinario**
  - **Kriging with External Drift (KED)**

Fuentes de Datos

https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki

- Estaciones Meteorológicas: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/stations
- Satélite
  - NASA: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/nasa
  - CM SAF: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/cmsaf
  - LSA SAF: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/lsasaf
- Métodos Híbridos
  - PVGIS: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/pvgis
  - ADRASE: https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/adrase

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos
- Introducción
- Fuentes de Datos
- Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

- Es necesario filtrar y corregir las medidas para eliminar datos erróneos y valores extremos.
  - Límites Físicos
  - Coherencia Espacial
  - Análisis Estadístico de las Desviaciones

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Límites Físicos

- El índice de claridad no puede ser mayor que 1 (la irradiación global diaria no puede superar la extra-atmosférica).

$$K_{dT} \leq 1$$

$$G_d(0) \leq B_{0d}(0)$$

- El índice de claridad debe ser al menos 0.03

$$K_t = \frac{G_d(0)}{B_{0d}(0)} \geq 0.03$$

Coherencia Espacial

- Las medidas de una estación se deben comparar con **estaciones cercanas** (por ejemplo, mediante interpolación espacial).
- La comparación se debe realizar con **valores agregados** (medias diarias o mensuales).

Análisis Estadístico de las Desviaciones

- Desviaciones, **D**, entre observaciones, **O**, y un modelo, **M** (u otro conjunto de observaciones):

$$\mathbf{O} = \{o_1 \dots o_n\}$$

$$\mathbf{M} = \{m_1 \dots m_n\}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{M} - \mathbf{O} = \{(m_1 - o_1) \dots (m_n - o_n)\} = \{d_1 \dots d_n\}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

Radiación Solar en Generadores FV

Métricas

- Mean Bias Difference (MBD), diferencia media (indica si el modelo sobreestima o subestima):

$$MBD = \overline{\mathbf{D}} = \overline{\mathbf{M}} - \overline{\mathbf{O}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - o_i)$$

- Root Mean Square Error (RMSD), diferencia cuadrático media:

$$RMSD = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i^2\right)^{1/2} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - o_i)^2\right)^{1/2}$$

- Mean Absolute Deviation (MAD) (El RMSD no es robusto, un error puntual puede distorsionar el estimador, y depende del número de muestras)

$$MAD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|d_i| = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|m_i - o_i|$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Ángulo de Inclinación

- Los generadores FV tienen un ángulo de inclinación positivo para maximizar el rendimiento.
- Este ángulo depende de la latitud del lugar y de la aplicación del sistema.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Planteamiento

- **Objetivo**: construir un perfil diario promedio de irradiancia global e irradiancia difusa (*cielo claro*)
- **Puntos clave**:
  - La variación solar durante una hora es baja: irradiación horaria equivale al valor medio de la irradiancia durante esa hora.
  - Relación entre irradiancia e irradiación extra-terrestre deducible teóricamente:

$$\frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\omega_s \cdot \cos(\omega_s) - \sin(\omega_s)}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Perfil

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Ecuaciones del perfil

$$r_D = \frac{D(0)}{D_d(0)} = \frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)}$$

$$r_G = \frac{G(0)}{G_d(0)} = r_D \cdot (a + b \cdot \cos(\omega))$$

$$a = 0.409 - 0.5016 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Ejercicio

Calcular la irradiancia global y la irradiancia difusa en el plano horizontal

- 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud $\phi = 40°\mathrm{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Planteamiento

- **Irradiancia Directa**: ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).
- **Irradiancia Difusa**: modelos del estado de cielo, modelo isotrópico o anisotrópico.
- **Irradiancia de Albedo**: modelo isotrópico con coeficiente de reflexión típico.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Irradiancia Directa

Irradiancia Directa: ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).

$$B(\beta, \alpha) = B(0) \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Irradiancia Difusa

$$D(\beta,\alpha) = \int_{\Omega} L(\theta_z,\psi)\cdot\cos(\theta_z^{'})d\Omega$$

Irradiancia Difusa Isotrópica

$$L(\theta_z, \psi) = cte.$$

$$D(\beta, \alpha) = D(0) \cdot \frac{1+\cos(\beta)}{2}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Irradiancia Difusa Anisotrópica

$$D(\beta,\alpha) = D^I(\beta,\alpha) + D^C(\beta,\alpha)$$

$$D^I(\beta,\alpha) = D(0)\cdot(1-k_1)\cdot\frac{1+\cos(\beta)}{2}$$

$$D^C(\beta,\alpha) = D(0)\cdot k_1\cdot\frac{\max(0,\cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

$$k_1 = \frac{B(0)}{B_0(0)}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Irradiancia de Albedo

$$R(\beta,\alpha) = \rho \cdot G(0) \cdot \frac{1-\cos(\beta)}{2}$$

$$\rho = 0.2$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Ejercicio

Calcular la irradiancia difusa, directa, de albedo y global, en

- Un generador inclinado 30° y orientado al Sur, 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud $\phi = 40°\mathrm{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Radiación directa

$$B_{ef}(\beta,\alpha) = B(\beta,\alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}\right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$

Difusa y Albedo

$$D_{ef}^{iso}(\beta,\alpha) = D^{iso}(\beta,\alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}\right] \cdot (1 - FT_D(\beta))$$

$$D_{ef}^{cir}(\beta,\alpha) = D^{cir}(\beta,\alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}\right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$

$$R_{ef}(\beta,\alpha) = R(\beta,\alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}\right] \cdot (1 - FT_R(\beta))$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Pérdidas anuales

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Radiación en Sistema estático

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Radiación en Seguimiento Eje Horizontal

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Radiación en Seguimiento Doble Eje

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Comparación Doble Eje-Estática

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Comparación Doble Eje - Horizontal

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Comparación Eje Horizontal - Estática

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Comparación entre Sistemas

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Comparación entre Sistemas

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Bases de Datos

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías