Radiación Solar

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 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

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

1 Introducción

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

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

Movimiento terrestre

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

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*.

1 Introducción

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

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 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

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

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.

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.

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.

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.

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 cenital**, ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- γ_s, **ángulo altura solar**, ángulo complementario de θ_{zs}.
- Dependen 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: **azimut solar**, 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)

1 Introducción

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

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 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]

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.
- **Longitudes positivas** al **este del meridiano de Greenwich**.
- **Corrección**: $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$, con λ_L la longitud local y λ_H la longitud del huso horario. $\Delta\lambda$ *es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.*

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.

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.

Solución

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

- $\lambda_L = -8{,}38°$, $\lambda_H = 15°$ y $\Delta\lambda = -23{,}38°$.

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, $\mathrm{AO} = 1$.

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 $\mathrm{EoT} = 1{,}78\,\mathrm{min}$.

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.

Kahoot!

Ir a Kahoot de Geometría Solar

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- Radiación Extra-atmosférica
- Radiación solar en la superficie terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

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

Definición

- **Radiación extra-atmosférica**: radiación directa del Sol que alcanza la superficie de la atmósfera.
- **Constante solar** $B_0 = 1367\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en el límite superior de la atmósfera terrestre)

Ecuaciones

- **Irradiancia extra-atmosférica** ($\mathrm{W\,m^{-2}}$)

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

- Factor de corrección por excentricidad

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

- **Irradiación extra-atmosférica diaria** ($\mathrm{Wh\,m^{-2}}$)

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

(ω_s en radianes)

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

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- Radiación Extra-atmosférica
- Radiación solar en la superficie terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

$G_d(0)$
$B_{od}(0)$
K_T
F_D
$D_d(0)$
$B_d(0)$
$B_o(0)$
r_D
r_G
$D(0)$
$B(0)$
$G(0)$
$\cos(\theta_{zs})$
$\cos(\theta_s)$
$D(\beta,\alpha)$
$B(\beta,\alpha)$
$G(\beta,\alpha)$
Σ
$D_d(\beta,\alpha)$
$B_d(\beta,\alpha)$
$G_d(\beta,\alpha)$
$\frac{T_{\text{sucio}}(0)}{T_{\text{limpio}}(0)}$
FT_D
FT_B
$D_{ef}(\beta,\alpha)$
$B_{ef}(\beta,\alpha)$
$G_{ef}(\beta,\alpha)$
Σ
$D_{efd}(\beta,\alpha)$
$B_{efd}(\beta,\alpha)$
$G_{efd}(\beta,\alpha)$

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)

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:** $G = B + D + R$

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)

Cómo se escribe

Forma, tiempo, lugar

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

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

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

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

$$B(\beta)$$

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

$G_d(0)$
$B_{od}(0)$
K_T
F_D
$D_d(0)$
$B_d(0)$
$B_o(0)$
r_D
r_G
$D(0)$
$B(0)$
$G(0)$
$\cos(\theta_{zs})$
$\cos(\theta_s)$
$D(\beta,\alpha)$
$B(\beta,\alpha)$
$G(\beta,\alpha)$
Σ
$D_d(\beta,\alpha)$
$B_d(\beta,\alpha)$
$G_d(\beta,\alpha)$
$\frac{T_{\text{sucio}}(0)}{T_{\text{limpio}}(0)}$
FT_D
FT_B
$D_{ef}(\beta,\alpha)$
$B_{ef}(\beta,\alpha)$
$G_{ef}(\beta,\alpha)$
Σ
$D_{efd}(\beta,\alpha)$
$B_{efd}(\beta,\alpha)$
$G_{efd}(\beta,\alpha)$

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**.

$$K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)}$$

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. $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \ldots$

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)

Medias mensuales: 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, $F_{Dm} = 1 - 1{,}13 \cdot 0{,}73 = 0{,}175$
- $D_{d,m}(0) = 0{,}175 \cdot 3150 = 551{,}6\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$
- $B_{d,m}(0) = 3150 - 551{,}6 = 2598{,}4\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$

Valores Diarios: 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 $\phi = 40°\mathrm{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700\,\mathrm{Wh\,m^{-2}}$.

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

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

6 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

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

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

6 Radiación Solar en Generadores FV

Estaciones Meteorológicas

- Series temporales largas
- Alta resolución temporal (1 mín)
- 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

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

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

6 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

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):

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

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

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

Exactitud y Precisión

Fig. 1 Graphical illustration of bias and variance.

http://scott.fortmann-roe.com/docs/BiasVariance.html

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 Difference (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)

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

Kahoot!

Ir a Kahoot de Radiación Solar en el Plano Horizontal

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 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.

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)

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

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

Sistemas con seguimiento

- **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**.

Algunos tipos de seguimiento solar

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

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.

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.

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

Sistema de Seguimiento (2x ejes)

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

$G_d(0)$
$B_{od}(0)$
K_T
F_D
$D_d(0)$
$B_d(0)$
$B_o(0)$
r_D
r_G
$D(0)$
$B(0)$
$G(0)$
$\cos(\theta_{zs})$
$\cos(\theta_s)$
$D(\beta,\alpha)$
$B(\beta,\alpha)$
$G(\beta,\alpha)$
Σ
$D_d(\beta,\alpha)$
$B_d(\beta,\alpha)$
$G_d(\beta,\alpha)$
$\frac{T_{\text{sucio}}(0)}{T_{\text{limpio}}(0)}$
FT_D
FT_B
$D_{ef}(\beta,\alpha)$
$B_{ef}(\beta,\alpha)$
$G_{ef}(\beta,\alpha)$
Σ
$D_{efd}(\beta,\alpha)$
$B_{efd}(\beta,\alpha)$
$G_{efd}(\beta,\alpha)$

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:

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

Perfil

Ecuaciones del perfil

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

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

$$a = 0{,}409 - 0{,}5016 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

$$b = 0{,}6609 + 0{,}4767 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

$G_d(0)$
$B_{od}(0)$
K_T
F_D
$D_d(0)$
$B_d(0)$
$B_o(0)$
r_D
r_G
$D(0)$
$B(0)$
$G(0)$
$\cos(\theta_{zs})$
$\cos(\theta_s)$
$D(\beta,\alpha)$
$B(\beta,\alpha)$
$G(\beta,\alpha)$
Σ
$D_d(\beta,\alpha)$
$B_d(\beta,\alpha)$
$G_d(\beta,\alpha)$
$\frac{T_{\text{sucio}}(0)}{T_{\text{limpio}}(0)}$
FT_D
FT_B
$D_{ef}(\beta,\alpha)$
$B_{ef}(\beta,\alpha)$
$G_{ef}(\beta,\alpha)$
Σ
$D_{efd}(\beta,\alpha)$
$B_{efd}(\beta,\alpha)$
$G_{efd}(\beta,\alpha)$

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.

Irradiancia Directa

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

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

Irradiancia Difusa

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

Irradiancia Difusa Isotrópica

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

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

Irradiancia Difusa Anisotrópica

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

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

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

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

Irradiancia de Albedo

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

$$\rho = 0{,}2$$

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Ángulo de Incidencia Sistema Estático

- Si $\alpha = 0$

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

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

Sistema Estático: Ángulo de Incidencia

- $40°N$

Ángulo de Incidencia Seguidor 1x NS

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

Ángulo de Inclinación Seguidor 1x NS

- $40°N$

Ángulo de Incidencia Seguidor 1x NS

- $40°N$

Ángulo de Incidencia Seguidor 2x

$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

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

Inclinación Seguidor 2x

- $40°N$

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

$G_d(0)$
$B_{od}(0)$
K_T
F_D
$D_d(0)$
$B_d(0)$
$B_o(0)$
r_D
r_G
$D(0)$
$B(0)$
$G(0)$
$\cos(\theta_{zs})$
$\cos(\theta_s)$
$D(\beta,\alpha)$
$B(\beta,\alpha)$
$G(\beta,\alpha)$
Σ
$D_d(\beta,\alpha)$
$B_d(\beta,\alpha)$
$G_d(\beta,\alpha)$
$\frac{T_{\text{sucio}}(0)}{T_{\text{limpio}}(0)}$
FT_D
FT_B
$D_{ef}(\beta,\alpha)$
$B_{ef}(\beta,\alpha)$
$G_{ef}(\beta,\alpha)$
Σ
$D_{efd}(\beta,\alpha)$
$B_{efd}(\beta,\alpha)$
$G_{efd}(\beta,\alpha)$

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

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

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

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

Pérdidas anuales

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

3 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

4 Cálculo de componentes de radiación solar

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV
- Introducción
- Tipos de Sistemas
- Irradiancia a partir de irradiación diaria
- Transformación al plano del generador
- Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- Pérdidas angulares y por suciedad
- Radiación Efectiva según tipologías

Radiación en Sistema estático

Radiación en Seguimiento Eje Horizontal

Radiación en Seguimiento Doble Eje

Comparación Doble Eje-Estática

Comparación Doble Eje - Horizontal

Comparación Eje Horizontal - Estática

Comparación entre Sistemas

Comparación entre Sistemas

Kahoot!

Ir a Kahoot de Radiación Solar en un Generador