

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: GEOMETRÍA SOLAR

OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO

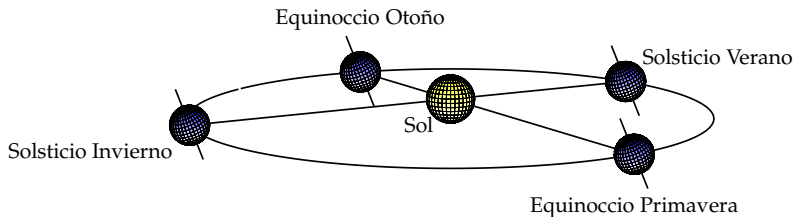
1 MOVIMIENTO SOL Y TIERRA

2 GEOMETRÍA DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

MOVIMIENTO SOL-TIERRA

- 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*
- La Tierra gira sobre si misma alrededor de su eje polar.
 - Entre el eje polar y el plano de la eclíptica hay un ángulo constante de $23,45^\circ$.
 - Entre el plano ecuatorial y la línea que une Tierra-Sol hay un ángulo variable: *declinación*.

MOVIMIENTO SOL-TIERRA



DISTANCIA SOL-TIERRA

Distancia Sol-Tierra

$$r = r_0 \left\{ 1 + 0,017 \sin \left[\frac{2\pi \cdot (d_n - 93)}{365} \right] \right\}$$

Distancia promedio

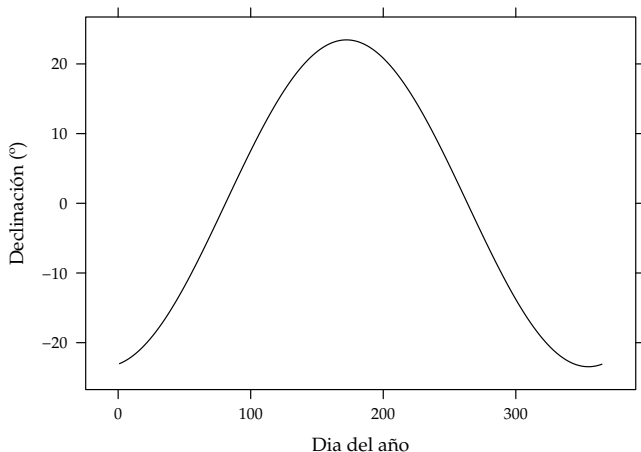
$$r_0 = 1,496 \times 10^8 \text{ km} = 1 \text{ UA}$$

Excentricidad

$$\epsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right)$$

DECLINACIÓN

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



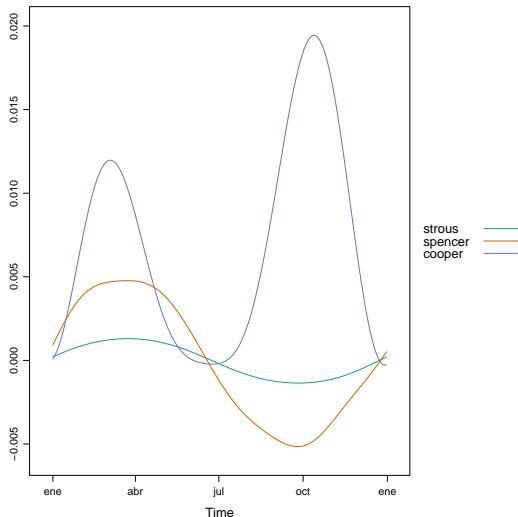
OTRAS ECUACIONES

$$X = 2\pi \cdot (d_n - 1) / 365$$

$$\begin{aligned}\delta = & 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(X) + 0,070257 \cdot \sin(X) \\ & - 0,006758 \cdot \cos(2X) + 0,000907 \cdot \sin(2X) \\ & - 0,002697 \cdot \cos(3X) + 0,001480 \cdot \sin(3X)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_0 = & 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(X) + 0,001280 \cdot \sin(X) \\ & + 0,000719 \cdot \cos(2X) + 0,000077 \cdot \sin(2X)\end{aligned}$$

OTRAS ECUACIONES



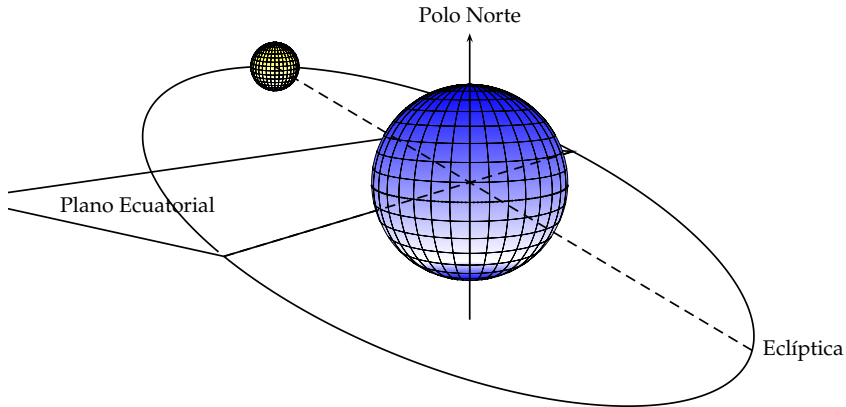
DECLINACIÓN

- **Equinoccio de primavera:**
 - 21-22 Marzo (Día del Año 80-81)
- **Equinoccio de otoño:**
 - 22-23 Septiembre (Día del Año 265-266)
- **Solsticio de Verano:**
 - 21-22 Junio (Día del Año 172-173)
- **Solsticio de Invierno:**
 - 21-22 Diciembre (Día del Año 355-356)

DECLINACIÓN

- Las estaciones se deben al ángulo entre plano ecuatorial y plano de la eclíptica
- **Solsticio de verano**
 - Declinación máxima.
 - Días más largos en hemisferio Norte.
 - El Sol amanece por el Noreste y anochece por el Noroeste en el hemisferio Norte.
- **Solsticio de invierno**
 - Declinación mínima.
 - Días más cortos en hemisferio Norte.
 - El Sol amanece por el Sureste y anochece por el Suroeste en el hemisferio Norte.
- **Equinoccios**
 - Declinación nula
 - La duración de noche y día coincide.
 - El Sol amanece por el Este y anochece por el Oeste.

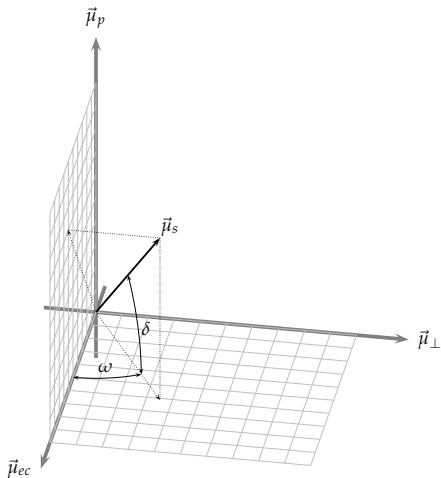
EJES TERRESTRES

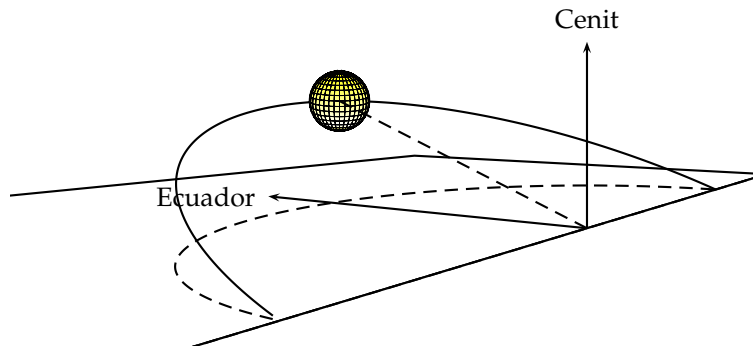


$$\vec{\mu}_s = [\cos(\delta) \cos(\omega)] \cdot \vec{\mu}_{ec} + [\cos(\delta) \sin(\omega)] \cdot \vec{\mu}_{\perp} + \sin(\delta) \cdot \vec{\mu}_p$$

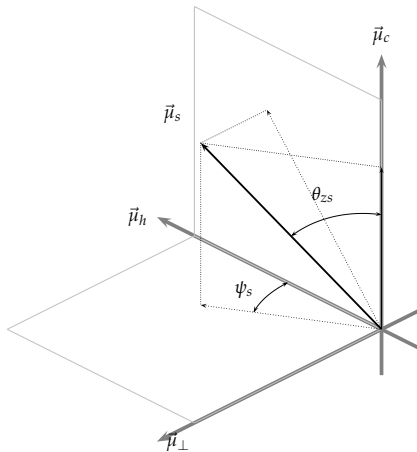
EJES TERRESTRES

$$\vec{\mu}_s = [\cos(\delta) \cos(\omega)] \cdot \vec{\mu}_{ec} + [\cos(\delta) \sin(\omega)] \cdot \vec{\mu}_{\perp} + \sin(\delta) \cdot \vec{\mu}_p$$



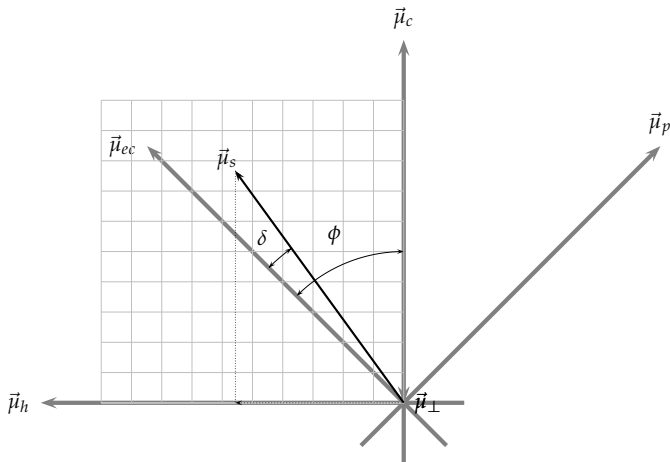


$$\vec{\mu}_s = [\cos(\psi_s) \sin(\theta_z)] \cdot \vec{\mu}_h + [\sin(\psi_s) \sin(\theta_z)] \cdot \vec{\mu}_\perp + \cos(\theta_z) \cdot \vec{\mu}_c$$



$$\vec{\mu}_s = [\cos(\psi_s) \sin(\theta_z)] \cdot \vec{\mu}_h + [\sin(\psi_s) \sin(\theta_z)] \cdot \vec{\mu}_\perp + \cos(\theta_z) \cdot \vec{\mu}_c$$

RELACIÓN ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS



EJES LOCALES Y TERRESTRES

$$\begin{aligned}\vec{\mu}_s = & \text{signo}(\phi) \cdot [\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) - \cos(\phi) \sin(\delta)] \cdot \vec{\mu}_h - \\ & - [\cos(\delta) \sin(\omega)] \cdot \vec{\mu}_\perp + \\ & + [\cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi) + \sin(\delta) \sin(\phi)] \cdot \vec{\mu}_c\end{aligned}\quad (1)$$

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

ÁNGULOS SOLARES

$$\cos(\theta_z) = \vec{\mu}_c \cdot \vec{\mu}_s = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi) + \sin(\delta) \sin(\phi)$$

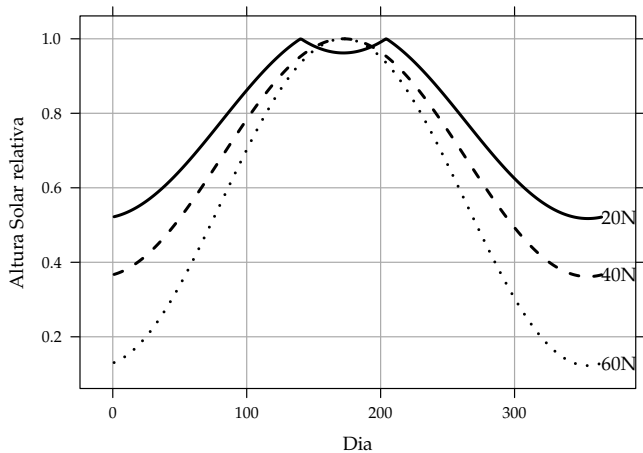
$$\vec{\mu}_s \cdot \vec{\mu}_\perp = -\sin(\psi_s) \sin(\theta_{zs})$$

$$\vec{\mu}_s \cdot \vec{\mu}_h = \text{signo}(\phi) \cdot \cos(\psi_s) \sin(\theta_{zs})$$

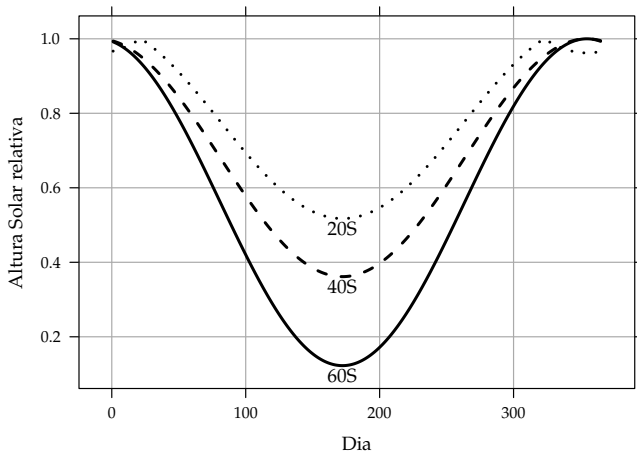
$$\cos(\psi_s) = \text{signo}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) - \cos(\phi) \sin(\delta)}{\sin(\theta_{zs})}$$

$$\sin(\psi_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_{zs})} = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\gamma_s)}$$

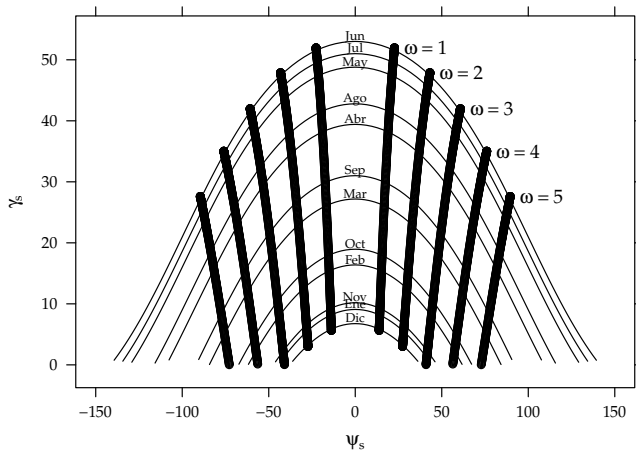
ALTURA SOLAR (HEMISFERIO NORTE)



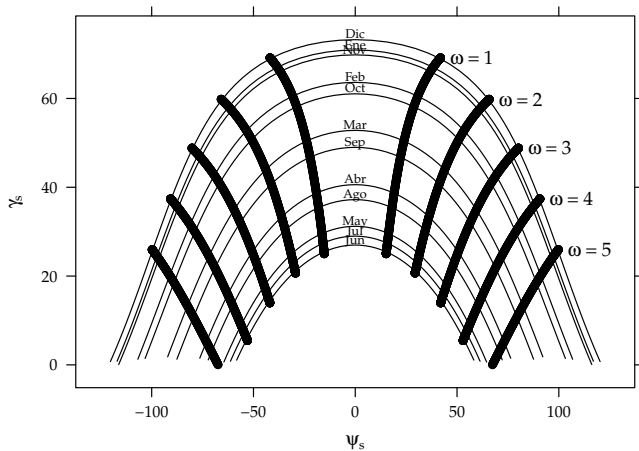
ALTURA SOLAR (HEMISFERIO SUR)



TRAYECTORIA SOLAR (60°N)



TRAYECTORIA SOLAR (40°S)



MEDIODÍA, AMANECER Y ANOCHER

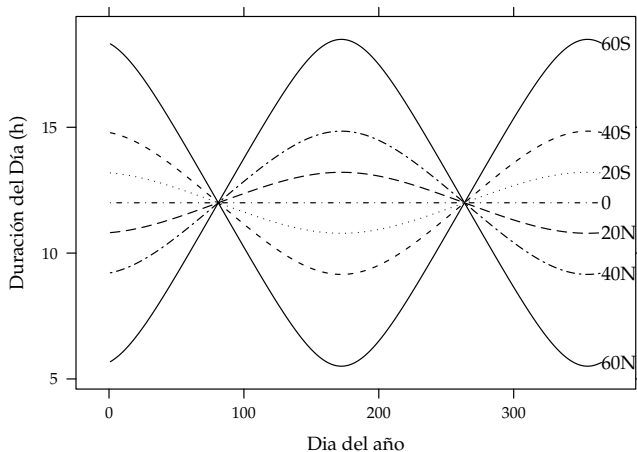
- Mediodía:

$$\psi_s = 0 \Rightarrow \sin(\psi_s) \Rightarrow \omega = 0$$

- Amanecer / Anochecer:

$$\gamma_s = 0, \theta_z = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos(\theta_z) = 0 \Rightarrow \cos(\omega_s) = -\tan(\delta) \tan(\phi)$$

DURACIÓN DEL DÍA



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 rija por el huso horario de Centroeuropa. Este huso horario está situado en 15°E .

HORA OFICIAL

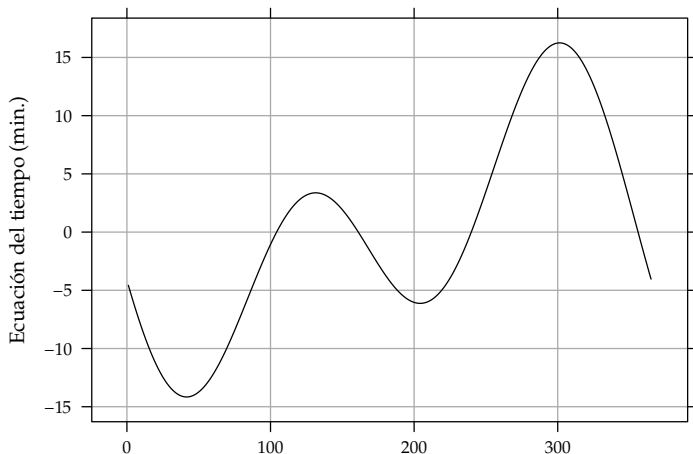
- **Corrección:** $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$, con λ_L la longitud local y λ_H la longitud del huso horario.
- Longitudes *positivas* al *este* del meridiano de Greenwich. $\Delta\lambda$ es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.
- Diferencia adicional: *horario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

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

$$\text{EoT} = 229,18 \cdot (-0,0334 \cdot \sin(M) + 0,04184 \cdot \sin(2 \cdot M + 3,5884))$$



EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min.}$
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:37 hora oficial.

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$.
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:37 hora oficial.

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$.
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:30 hora oficial.

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- **En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.**
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min.}$
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:37 hora oficial.

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- **Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min.}$**
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:37 hora oficial.

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

- Calculemos la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia.
- Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud $8,38^\circ\text{W}$ y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.
- Por tanto $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min.}$
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:31 hora oficial.

CÁLCULO ÁNGULOS SOLARES

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

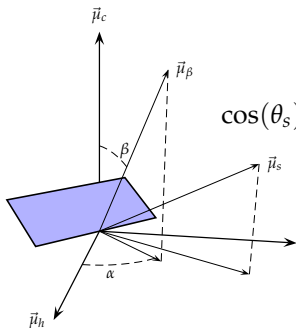
1 MOVIMIENTO SOL Y TIERRA

2 GEOMETRÍA DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

ÁNGULO DE INCIDENCIA

SISTEMA ESTÁTICO

$$\vec{\mu}_\beta = [\sin(\beta) \cos(\alpha)] \cdot \vec{\mu}_h + [\sin(\beta) \sin(\alpha)] \cdot \vec{\mu}_\perp + \cos(\beta) \cdot \vec{\mu}_c$$

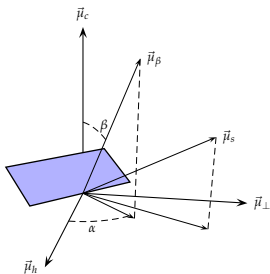


$$\begin{aligned} \cos(\theta_s) = & \text{signo}(\phi) \cdot [\sin(\beta) \cos(\alpha) \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) \\ & - \sin(\beta) \cos(\alpha) \cos(\phi) \sin(\delta)] + \\ & + \sin(\beta) \sin(\alpha) \cos(\delta) \sin(\omega) + \\ & + \cos(\beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi) + \\ & + \cos(\beta) \sin(\delta) \sin(\phi) \end{aligned}$$

ÁNGULO DE INCIDENCIA

SISTEMA ESTÁTICO

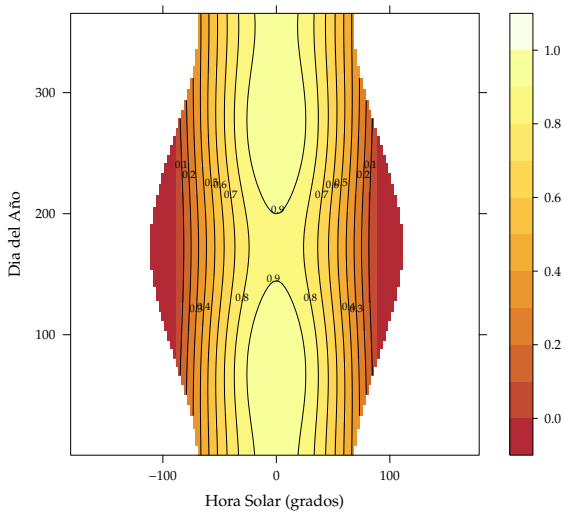
Cuando $\alpha = 0$



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

ÁNGULO DE INCIDENCIA

SISTEMA ESTÁTICO (40°N)

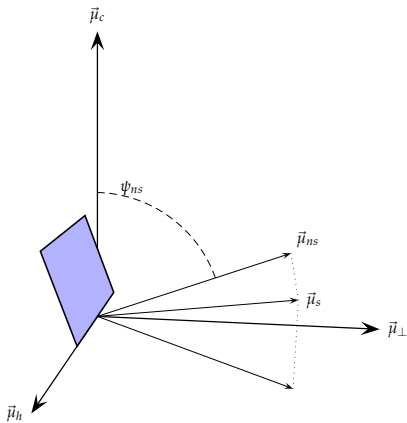


ÁNGULO DE INCIDENCIA

EJE HORIZONTAL N-S, GENERADOR HORIZONTAL

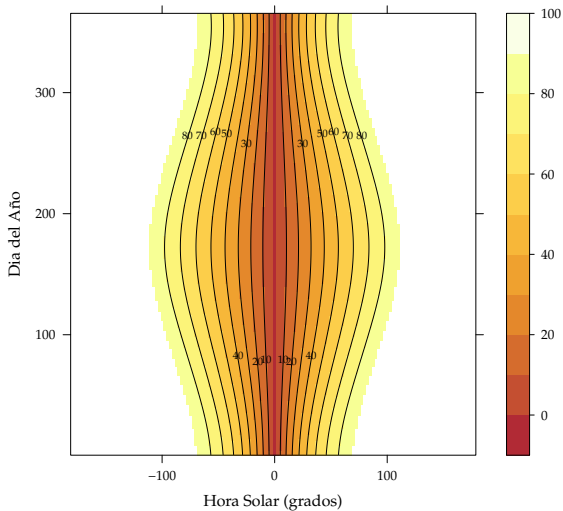
$$\vec{\mu}_{ns} = \sin(\psi_{ns}) \cdot \vec{\mu}_{\perp} + \cos(\psi_{ns}) \cdot \vec{\mu}_c$$

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



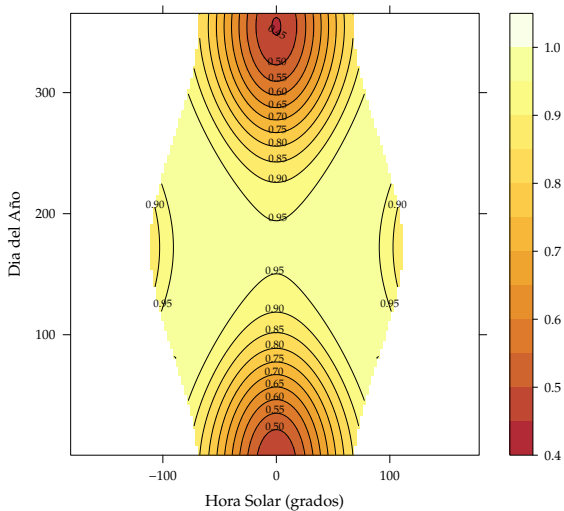
ÁNGULO DE INCLINACIÓN

EJE HORIZONTAL N-S, GENERADOR HORIZONTAL, (40°N)



ÁNGULO DE INCIDENCIA

EJE HORIZONTAL N-S, GENERADOR HORIZONTAL, (40°N)



ÁNGULO DE INCIDENCIA ACIMUTAL Y DOBLE EJE

DOBLE EJE

$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

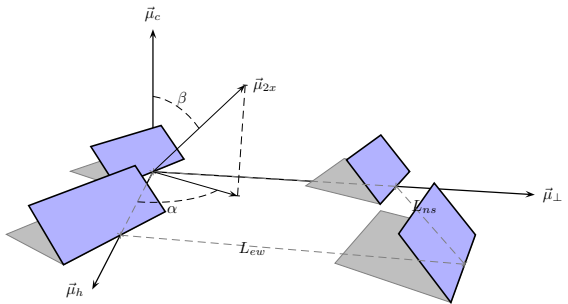
$$\cos(\theta_s) = 1$$

ACIMUTAL

$$\beta = cte.$$

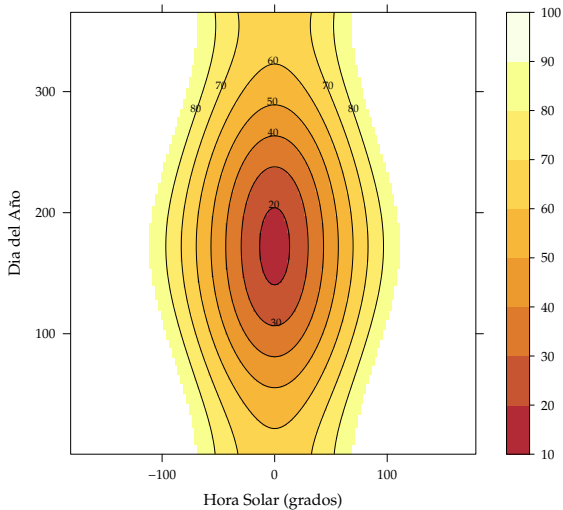
$$\alpha = \psi_s$$

$$\cos(\theta_s) = \cos(\beta - \theta_z)$$



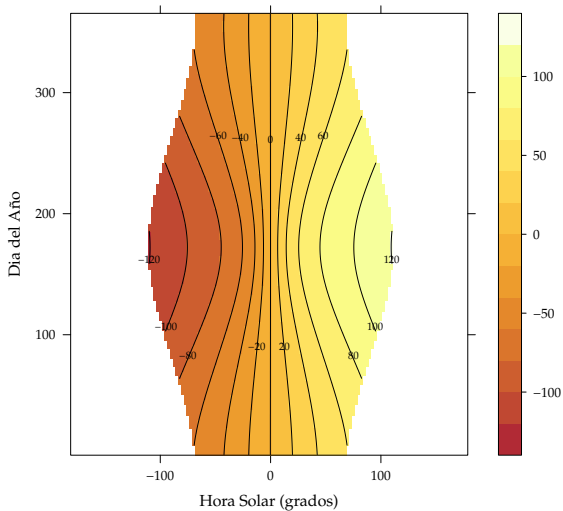
ÁNGULO DE INCLINACIÓN

DOBLE EJE, (40°N)

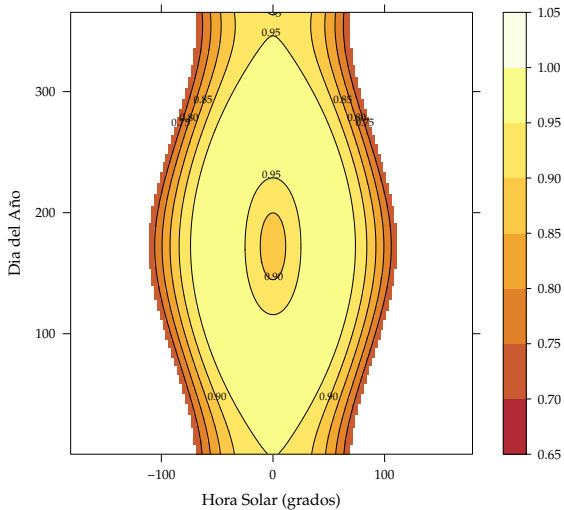


ÁNGULO DE ORIENTACIÓN

ACIMUTAL, ($40^{\circ}N$)



ÁNGULO DE INCIDENCIA ACIMUTAL, (40°N)



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: 37.2°N ;

Día del Año: 340, 2 horas después del amanecer,

Latitud: 15°S ;