



Seguimiento solar

Seguimiento solar (según mec. accion.)

- Pasivo
- Activo

JHaas



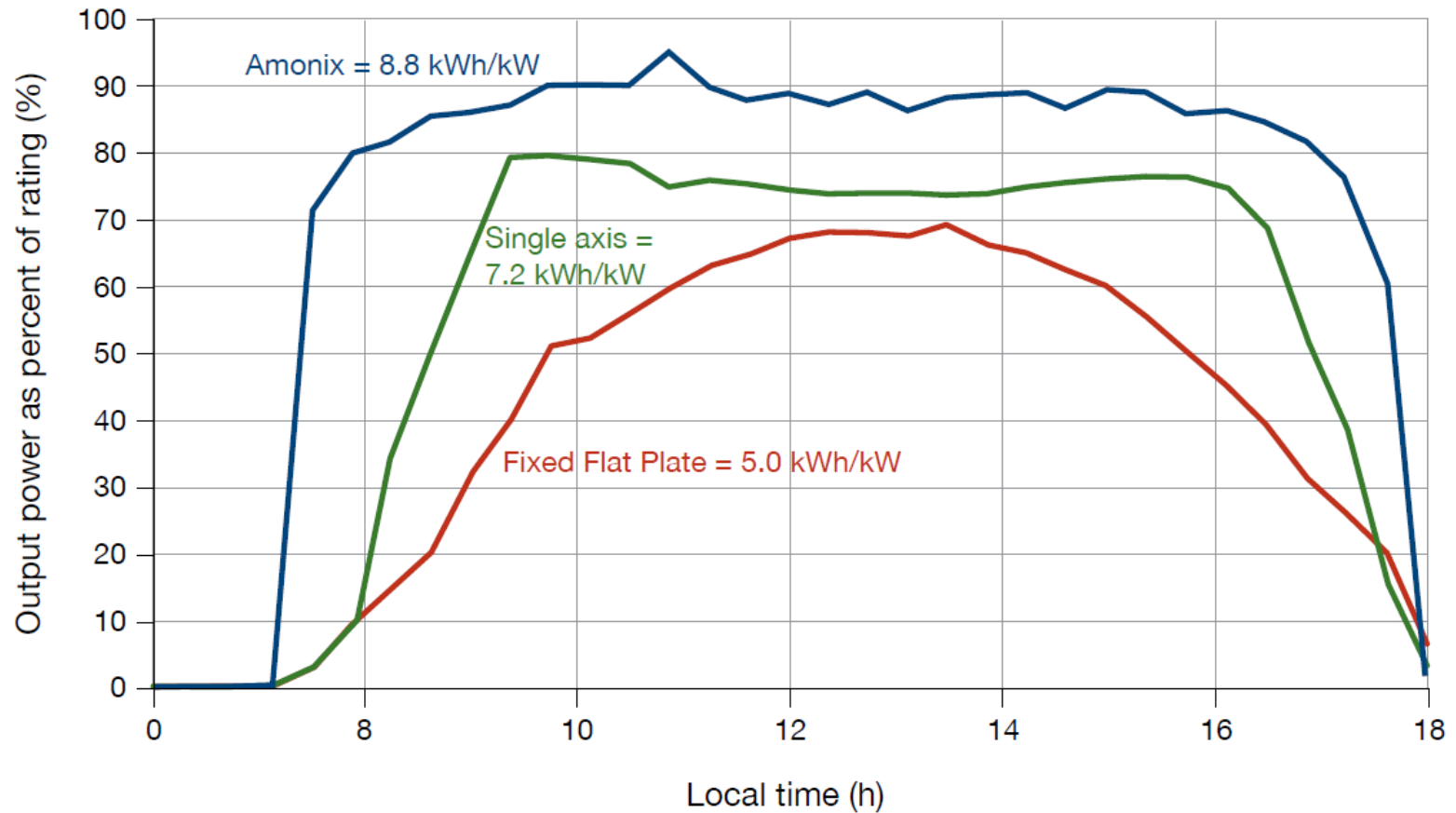
Seguimiento solar (según eje)

- Seguimiento 1-eje
 - Eje horizontal
 - Eje vertical
 - Eje inclinado
- Seguimiento 2-ejes



Seguimiento solar

- Energía transformada



Seguimiento solar

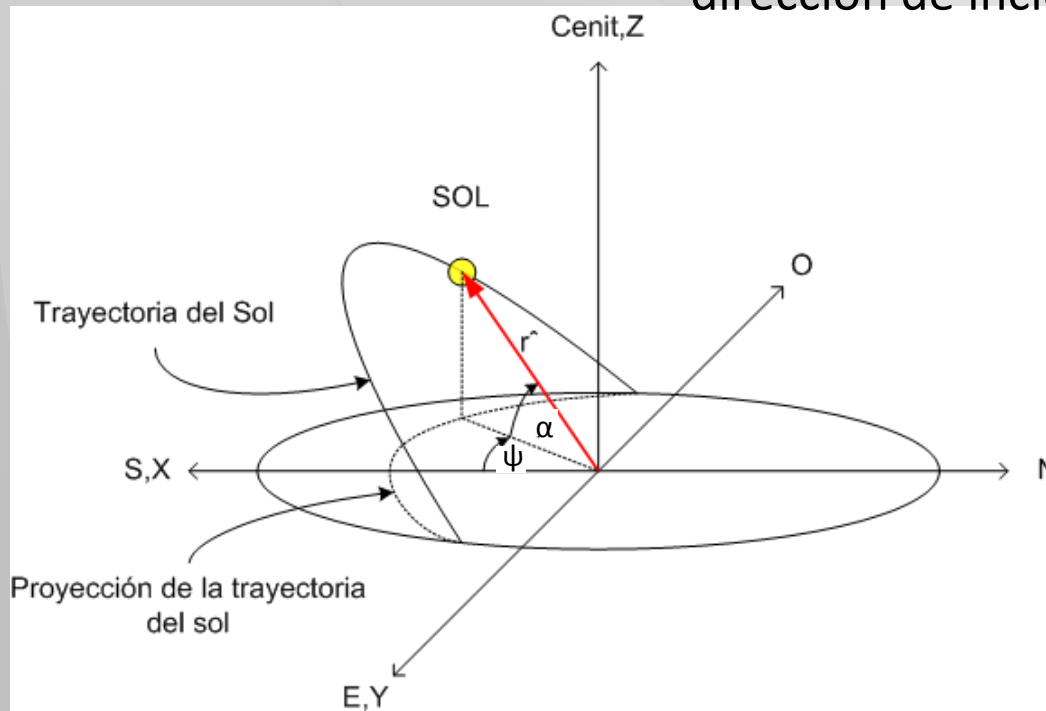
Índices de interés

- GCR (Ground coverage ratio)
- Δ kWh
- Δ inversión
- Δ O&M



Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

r: Vector unitario que además indica la dirección de incidencia de los rayos solares

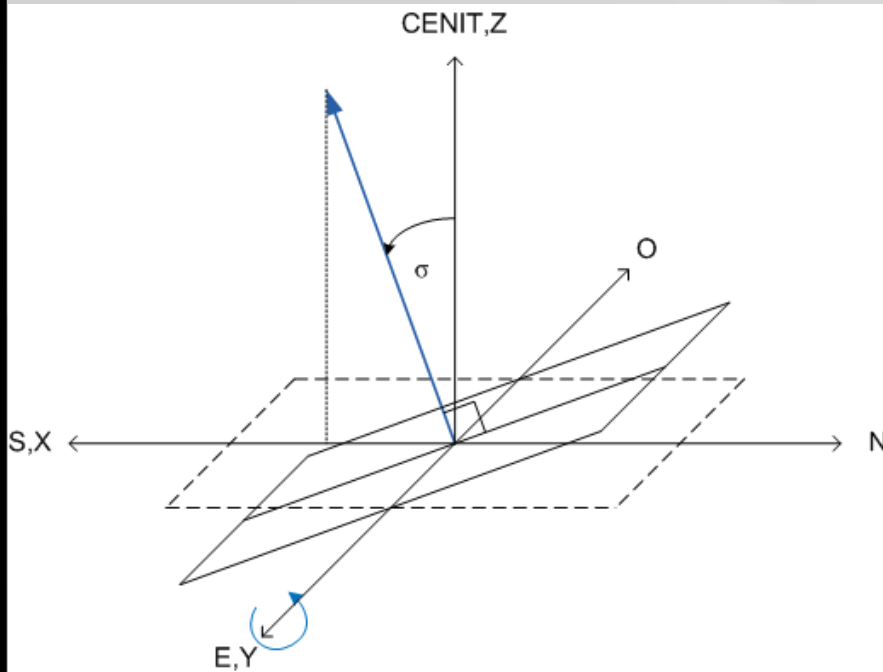


$$\hat{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$

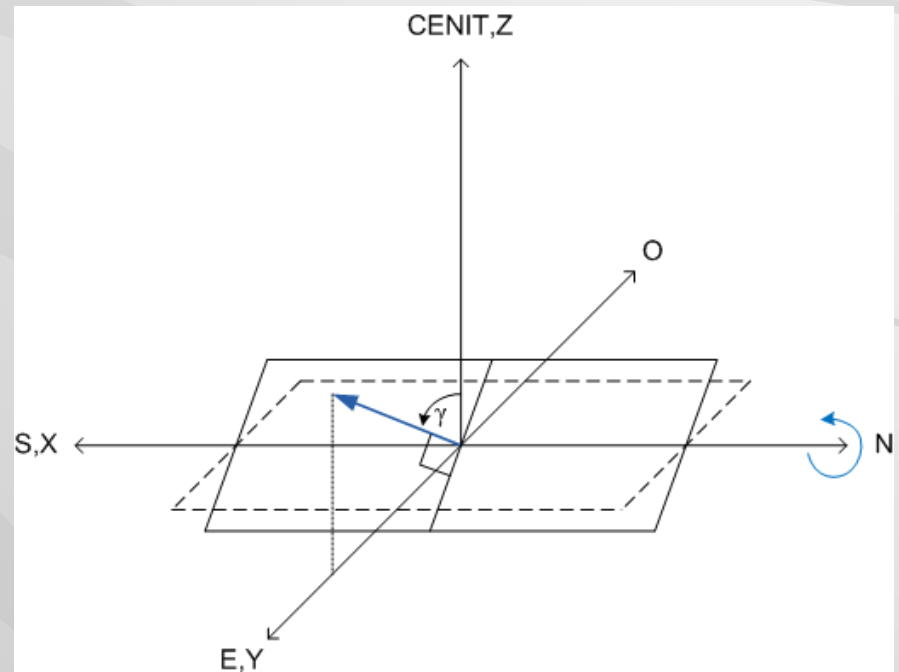


Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

$$\sigma, \gamma \in [-90^\circ, 90^\circ]$$



Seguimiento norte-sur
(eje rotación: oeste-este)

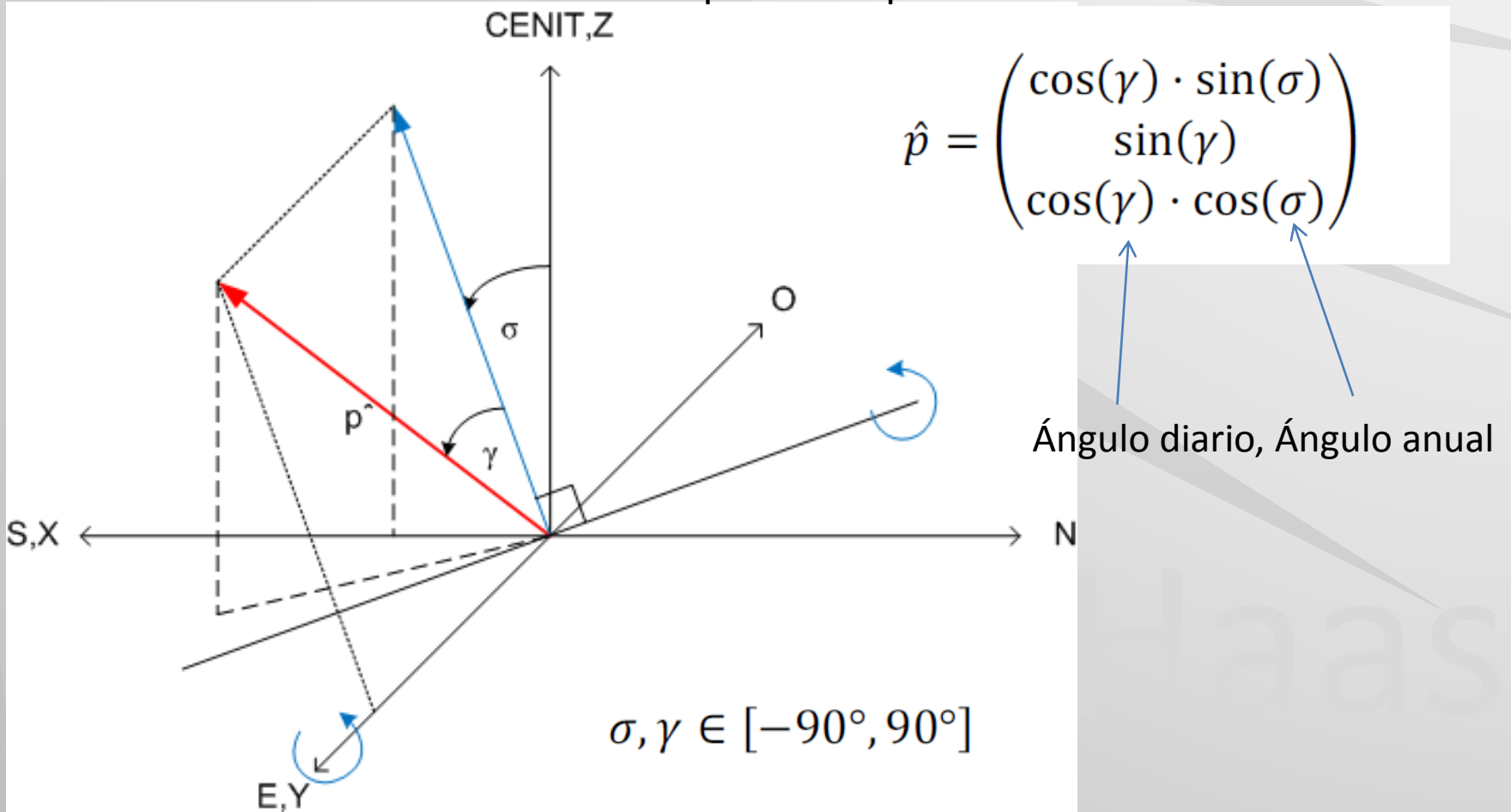


Seguimiento este-oeste
(eje rotación: norte-sur)



Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

p: vector unitario perpendicular al plano del panel solar.



Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

$$G_{DIRECT} = CS' \cdot \langle \hat{r}, \hat{p} \rangle \cdot T_n$$

- Irradiación: **proyección** del vector unitario dirección de los rayos solares en el vector perpendicular al plano del panel
- $CS' = CS \cdot E_0$

$$\langle \hat{r}, \hat{p} \rangle = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cdot \sin(\sigma) \\ \sin(\gamma) \\ \cos(\gamma) \cdot \cos(\sigma) \end{pmatrix}$$



Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

$$T_N = (0.6 + 0.2 \cdot \sin(\beta))(1 - 0.4F_{sH})(1 - 0.7F_{sM})(1 - 0.4F_{sL})$$

- T_N : Describe albedo (Con F_{sH} , F_{sM} , F_{sL} : fracción de cielo cubierto alto, medio y bajo respectivamente.)



Superficie horizontal

si $\gamma = 0^\circ$ y $\sigma = 0^\circ$ entonces:

$$G_{DIRECT} = CS' \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) \cdot \sin(0) \\ \sin(0) \\ \cos(0) \cdot \cos(0) \end{pmatrix} \cdot T_N$$

$$G_{DIRECT} = CS' \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot T_N$$

$$G_{DIRECT} = CS' \sin(\alpha) \cdot T_n$$



Superficie inclinada (orientación no ecuatorial)

- ¿Y la Radiación difusa?
- Según Clearness index valen distintas fórmulas
 - Despejado
 - Nublado:
 - Hottel y Woertz
 - Liu&Jordan
 - Kasten Dehne



Energía acumulada en un año

Integral **discreta** de la curva de irradiación durante un intervalo de días que considera ciertas horas de cada día.

$$E_M = CS \sum_{i=d_1}^{d_2} \sum_{j=n_{1i}}^{n_{2i}} < \hat{r}(\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}), \hat{p}(\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j}) > \cdot T_N(\beta_{i,j}, F_{SH}, F_{SM}, F_{SL}) \cdot dh$$

Donde:

- d_1 : Día juliano inicial del intervalo de optimización.
- d_2 : Día juliano final del intervalo de optimización.
- n_{1i} : Hora inicial del intervalo de optimización en el día i .
- n_{2i} : Hora final del intervalo de optimización en el día i .
- CS : Constante Solar.
- $\hat{r}(\alpha_{i,j}, \beta_{i,j})$: Vector unitario dirección de incidencia de los rayos solares.
- $\hat{p}(\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j})$: Vector unitario perpendicular al plano del panel.
- $T_N(\beta_{i,j}, F_{SH}, F_{SM}, F_{SL})$: Transmitividad neta.



Energía acumulada en un año

$$E_{M_{anual}} = CS \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=n_1^* i}^{n_2^* i} \langle \hat{r}(\alpha_{i,j}, \psi_{i,j}), \hat{p}(\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j}) \rangle T_{N_{i,j}} dh$$

Puesta y salida
del sol

$$\sin(\beta) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(h)$$



$$n_1^* i \text{ y } n_2^* i$$

$$E_{M_{anual}} = CS \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{N_{max}} \langle \hat{r}(\alpha_{i,j}, \psi_{i,j}), \hat{p}(\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j}) \rangle T_{N_{i,j}} dh \quad \forall j \text{ tq: } \beta_{i,j} \geq 0$$



Seguimiento

Problema de optimización

$$\max_{\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j}} CS \sum_{i=d_1}^{d_2} \sum_{j=n_{1i}}^{n_{2i}} \langle \hat{r}(\alpha_{i,j}, \psi_{i,j}), \hat{p}(\gamma_{i,j}, \sigma_{i,j}) \rangle T_{N_{i,j}} dh$$

Diario Anual

$$s. a \quad \gamma_{i,j} = cte_1 \in [-90^\circ, 90^\circ] \forall i, j$$

$$\sigma_{i,j} = cte_2 \in [-90^\circ, 90^\circ] \forall i, j$$

$$n_{2i} = n_{max} \text{ y } n_{1i} \leq n_{2i} \forall i$$

$$d_1, d_2 \in [1, 366] \text{ y } d_1 \leq d_2$$



Tipos de Seguimientos

| Notación | Descripción | Ángulo anual | Ángulo diario |
|----------|---|---|---|
| S1 | Fijo en el plano horizontal. | $\sigma_{i,j} = 0$ | $\gamma_{i,j} = 0$ |
| S2 | Fijo en el óptimo anual y fijo diario. | $\sigma_{i,j} = \text{opt}(366 \text{ días})$ | $\gamma_{i,j} = 0$ |
| S3 | Móvil anual (15 días) y fijo diario. | $\sigma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ días})$ | $\gamma_{i,j} = 0$ |
| S4 | Fijo anual y móvil diario. | $\sigma_{i,j} = 0$ | $\gamma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ min})$ |
| S5 | Fijo en el óptimo anual y móvil diario. | $\sigma_{i,j} = \text{opt}(366 \text{ días})$ | $\gamma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ min})$ |
| S6 | Móvil anual (15 días) y móvil diario.. | $\sigma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ días})$ | $\gamma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ min})$ |
| S7 | Seguimiento perfecto | $\sigma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ min})$ | $\gamma_{i,j} = \text{opt}(15 \text{ min})$ |



Seguimiento

- ¿Cómo decidir si seguimiento vale la pena?

JHaas



Análisis económico FV

¿Cuánto estoy dispuesto a gastar en un sistema de seguimiento?

| "Insolación mensual promedio (Santiago) para superficies de orientación ecuatorial (kWh/m ² /day)" (fte. NASA) | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Prom |
| Direct | 10.1 | 9.34 | 8.77 | 7.87 | 5.98 | 5.41 | 5.03 | 6.25 | 7.68 | 8.67 | 10.1 | 10.7 | 8.00 |
| Tilt 0 | 8.59 | 7.73 | 6.59 | 5.23 | 3.65 | 3.12 | 3.14 | 4.27 | 5.75 | 7.01 | 8.42 | 8.92 | 6.03 |
| Tilt 15 | 8.33 | 7.81 | 7.11 | 6.11 | 4.49 | 3.98 | 3.90 | 5.08 | 6.36 | 7.26 | 8.25 | 8.55 | 6.43 |
| Tilt 30 | 7.61 | 7.47 | 7.23 | 6.64 | 5.08 | 4.62 | 4.45 | 5.60 | 6.62 | 7.11 | 7.62 | 7.71 | 6.47 |
| Tilt 45 | 6.53 | 6.74 | 6.95 | 6.79 | 5.39 | 4.99 | 4.74 | 5.82 | 6.50 | 6.57 | 6.62 | 6.51 | 6.17 |
| Tilt 90 | 2.28 | 2.95 | 3.97 | 4.96 | 4.44 | 4.36 | 4.01 | 4.51 | 4.13 | 3.13 | 2.42 | 2.11 | 3.61 |

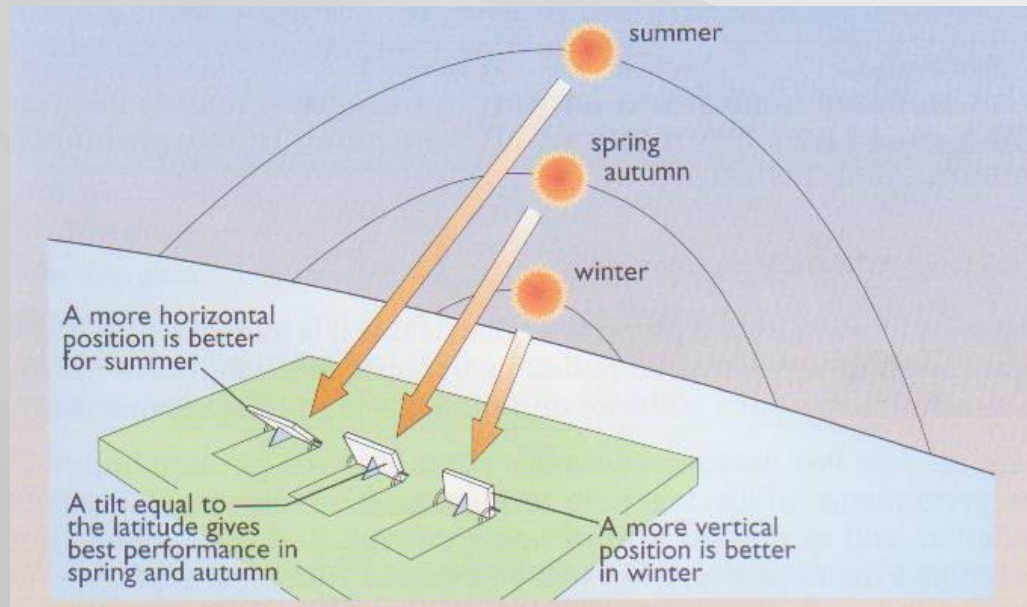


Datos de Radiación

- Departamento de Geofísica
ftp://dgf.uchile.cl/pub/rgarreau/ESTACION_DGF/Datos_anho_actual
- Nasa
<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/register.cgi>
- Registro solarimétrico
(UTFSM)
- Base de datos en distintos programas (ej: retscreen)
- **Mediciones locales**
- ¡Para proyectos a futuro notar diferencia entre datos según distintas fuentes!



Conclusión



¿Qué se dijo?

- Geometría Solar
 - Ángulos solares
 - Declinación (t)
 - Excentricidad (t)
 - Altura solar (t)
- Seguimiento





FIN

Geometría solar y seguimiento

[EL6000] Jannik Haas