

## Ejercicios prácticos – Repaso de radiación solar

---

*Se sugiere realizar la resolución desarrollando y probando funciones de cálculo utilizando el software de su elección (Python, R, Julia, Matlab, Octave o una planilla electrónica). Salvo que se sugiera en la letra de algún ejercicio, pedimos que no utilice software de terceros para calcular las magnitudes necesarias, aunque puede usarlos para verificaciones.*

---

### Ejercicio 0 - Funciones básicas

- (a) Implemente las siguientes funciones (para un año no bisiesto) en función del día ordinal y una ubicación especificada por su latitud ( $\phi$ ) y longitud ( $\psi$ ):
- Factor de corrección orbital,  $F_n$ .
  - Declinación solar,  $\delta$ .
  - Altura solar máxima,  $\alpha_s^{max}$  y ángulo cenital mínimo,  $\theta_z^{min}$ .
  - Ángulo horario de puesta del Sol,  $\omega_s$ .
  - Azimut solar a la puesta del Sol,  $\gamma_s$ .
  - Ecuación del tiempo,  $E$ , en minutos.
  - Cantidad de horas diurnas, en horas y fracción (tiempo estándar).
  - Irradiación diaria TOA<sup>1</sup> en incidencia normal, en MJ/m<sup>2</sup>.
  - Irradiación diaria TOA sobre un plano horizontal, en MJ/m<sup>2</sup>.
- (b) Implemente las siguientes funciones, para un día ordinal y ubicación dada, en función del ángulo horario asociado a cada minuto del día (tome las 24 horas del día y establezca las modificaciones necesarias en la serie temporal para una correcta visualización nocturna).
- Calcule la serie temporal del ángulo cenital ( $\theta_z$ ), la altura solar ( $\alpha_s$ ) y el ángulo azimutal ( $\gamma_s$ ). Grafique estas funciones para días próximos a ambos solsticios y para uno de los equinoccios en función del ángulo horario y la hora del día.
  - Grafique la trayectoria solar de ese día en un diagrama ( $\gamma_s, \alpha_s$ ).
  - ¿A qué hora del día en UTC-3 ocurre el mediodía solar exactamente?

### Ejercicio 1 - Irradiación TOA y cantidades básicas

- (a) Visualice gráficamente las funciones implementadas previamente (Ejercicio 0 parte (a)) variando el día del año entre 1 y 365 para Montevideo ( $\phi = -35^\circ, \psi = -56^\circ$ ). ¿Cuáles son los días más corto y largo del año? ¿En qué días del año se obtiene la máxima irradiación diaria TOA sobre plano horizontal? Compare cuantitativamente con la máxima irradiación diaria TOA sobre plano horizontal calculada para el mismo meridiano, pero en el hemisferio norte ( $\phi = +35^\circ, \psi = -56^\circ$ ). ¿A qué se debe la diferencia?
- (b) Compare la irradiación diaria TOA en el plano horizontal en función del día del año entre de dos sitios de latitudes  $\phi = -30^\circ$  y  $\phi = -45^\circ$ . ¿Porqué el sitio más cerca del polo a veces muestra más irradiación diaria?

---

<sup>1</sup>TOA = Top of the Atmosphere, es decir, a una altura a la cual se pueden despreciar los efectos de la atmósfera.

## Ejercicio 2 - Duración del día solar

El ángulo horario  $\omega$  define el Tiempo Solar Aparente,  $T_s$ . La duración del día solar para un observador dado en la superficie terrestre, puede definirse como el intervalo de tiempo (en horas y fracción) entre dos cruces sucesivos del Sol por el meridiano del observador.

- Para Montevideo ( $\phi = -35^\circ, \psi = -56^\circ$ ) determinar (en horas y fracción) la duración del día solar, para cada día de un año no bisiesto. Graficar y comentar el resultado. ¿Cuál es la relación de la duración del día solar con la ecuación de tiempo?
- ¿En qué días del año el día solar dura exactamente 24 horas?

## Ejercicio 3 - Diagrama solar

- Realice un diagrama solar para una ubicación en Artigas ( $\phi = -30.40^\circ, \psi = -56.51^\circ$ ). Para ello calcule los ángulos  $\alpha_s$  y  $\gamma_s$  para los equinoccios y los solsticios de verano e invierno y grafique las curvas en la misma figura.
- Verifique su diagrama generando un diagrama automático para la misma ubicación usando software específico (por ejemplo SunChart de la Universidad de Oregon <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>), indicando las hora en tiempo estándar UTC-3.
- Suponga que existe un conjunto de eucaliptus de 25 m de altura bordeando un camino de acceso recto de 60 m de largo que corre en dirección N-S. El punto medio del camino está ubicado 50 m al Este del observador. Ubicar este obstáculo en el diagrama solar y determinar entre que fechas y horas habrá sombra en la mañana sobre el punto de interés.

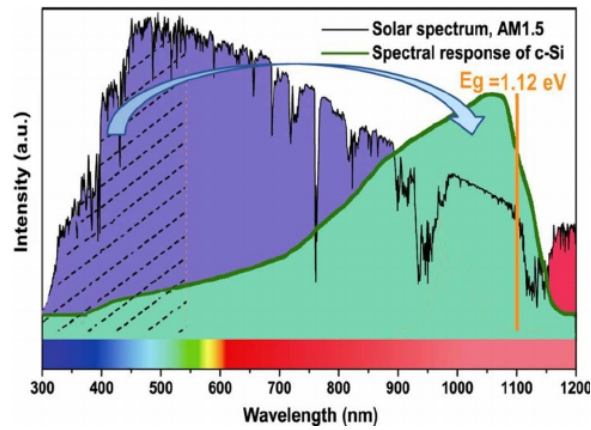
## Ejercicio 4 - Espectro de radiación

- Utilice un espectro estándar de la irradiancia solar extraterrestre en incidencia normal (por ejemplo ASTM E490-AM0<sup>2</sup>) para calcular que porcentajes de la constante solar corresponden a la porción (i) ultravioleta (UV), (ii) visible (VIS) y (iii) infrarroja (NIR y FIR) del espectro solar, respectivamente. Puede usar los siguientes límites para las bandas:

banda	sigla	longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
ultravioleta	UV	< 0.400
visible	VIS	0.400 - 0.770
infrarrojo	IR	> 0.770

- Estime la temperatura de cuerpo negro de la superficie solar consistente con la constante solar.

<sup>2</sup>Disponible en <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>



- (c) La figura muestra la respuesta espectral típica de una celda fotovoltaica de Silicio cristalino (con un gap en 1.12 eV), superpuesta al espectro solar estándar AM 1.5<sup>3</sup>. Puede apreciarse que la mayor respuesta tiene lugar en el entorno de  $1\ \mu$ , en tanto que el pico del espectro AM 1.5 está en torno a  $0.5\ \mu$ . Este problema es conocido como desajuste espectral (o spectral mismatch). La energía solar excedente se libera como calor, aumentando la temperatura y reduciendo la eficiencia de la celda. Considere el espectro estándar ASTM-G173<sup>4</sup> usado para evaluación de módulos fotovoltaicos. Que % de la potencia incidente está en cada una de las bandas definidas en (a)? Que % de la potencia incidente está en la banda más aprovechable por la celda, de 0.82 - 1.12 micras ?

### Ejercicio 5 - Fracción difusa

Considere los datos en P1.EJ5-6\_datos.zip para irradiación horaria global, directa y difusa generados por equipos de alta precisión montados sobre un seguidor solar fijo de la estación del LES en Salto ( $\phi = -31.28^\circ$ ,  $\psi = -57.92^\circ$ ) durante el 2017. La etiqueta horaria indica *el inicio* de cada hora en tiempo estándar UTC-3.

- (a) Realice un control de calidad básico considerando como datos correctos aquellos que verifiquen:  $\cos \theta_z > 0.12$ ,  $DHI > 0$ ,  $DNI > 0$ ,  $GHI > 0$  y  $f_d < 1.05$ .
- (b) Utilizando el modelo de Ruiz-Arias para fracción difusa (con coeficientes ajustados localmente) estime la irradiancia difusa a partir de las medidas de GHI. Compare la DHI y la DNI estimadas a partir de la fracción difusa, con las correspondientes medidas. Realice los gráficos de dispersión y calcule RMSD y MBD (porcentuales, relativos a la media de las medidas), entre el modelo y la medida. Grafique  $f_d$  vs.  $k_t$  a partir de los datos originales (en gris), y luego superponga la fracción difusa estimada en otro color en la misma figura.

### Ejercicio 6 - Plano inclinado

Considere los datos horarios del ejercicio 5 sin filtrar (GHI, DNI y DHI). Utilice en todos los casos el modelo HDKR y la reflectividad difusa adecuada para una superficie pintada de color claro ( $\rho_g = 0.55$ ).

- (a) Grafique la información de las tres componentes como función del tiempo para 5 días consecutivos que tengan comportamiento variado (a elección). Superponga los gráficos en una misma figura e intérpretelos.

<sup>3</sup>fuentes: Near-Infrared Down-Conversion and Energy Transfer Mechanism of Ce<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup>-Co-Doped Ba<sub>2</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Cl Phosphors, J. Zhao, C. Guo and T. Li, ECS Journal of Solid State Science and Technology, 5(1) R3055-R3058 (2016).

<sup>4</sup>Disponible en <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.

- (b) Estime la irradiación global horaria (GTI) sobre el plano de un colector orientado al Norte para de inclinación de  $\beta = 30^\circ$  e incorpore la serie sobre la figura de la parte (a). Interprete cualitativamente el resultado.

### Ejercicio 7 - Seguimiento de la radiación directa

En este ejercicio se estudiará específicamente la componente directa, recurso de interés en sistemas de concentración solar. Descargue de <http://les.edu.uy/productos/amtues-2> el Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar (AMTUes), y considere la ubicación del Laboratorio de Energía Solar - LE (Salto).

- (a) Estime la irradiación directa horaria sobre un sistema de concentración en los siguientes casos:
- sobre un plano fijo con inclinación  $\beta = 30^\circ$  hacia el Norte,
  - inclinado un ángulo  $\beta = 30^\circ$  y con seguimiento azimutal y
  - con seguimiento de dos ejes.
- (b) Grafique de forma superpuesta las 3 series horarias de irradiación **directa** horaria para un día despejado. Comente el comportamiento.