

## Práctico 1 – Radiación solar

*Se sugiere realizar la resolución desarrollando y probando funciones de cálculo que pueda luego utilizar para el trabajo final. Puede usar el software de su elección (Python, R, Julia, Matlab, Octave o una planilla electrónica). Pedimos que no utilice software de terceros para calcular las magnitudes necesarias, aunque puede usarlos para verificaciones. La entrega del práctico tiene asignado 45 puntos. Las partes indicadas con \* otorgan puntaje extra a efectos de la evaluación.*

### Ejercicio 0 - Antes de empezar

- (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?
- (c) ¿Por dónde amanece el Uruguay: Rocha, Treinta y Tres o Cerro Largo? Elija tres emplazamientos (uno en cada departamento) lo más al Este posible, y calculando la hora del amanecer en función del día del año responda la pregunta.

<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 - Diagrama solar

Se quiere instalar un colector solar para calentamiento de agua en un lugar específico ( $\phi = -33.382^\circ$ ,  $\psi = -56.523^\circ$ ). Al inspeccionar el sitio se descubre que hay obstáculos con distintas elevaciones sobre el plano horizontal. En la siguiente tabla se indica la lista de obstáculos con la ubicación (en metros) de sus puntos más cercanos y más lejanos, respecto a la futura posición del colector. Las edificaciones son todas rectangulares con un lado orientado en dirección Este-Oeste y la última columna indica la altura del obstáculo por encima del plano horizontal donde se ubicará el colector. El eje cartesiano  $Oy$  es creciente hacia el Norte y el eje cartesiano  $Ox$  es creciente hacia el Este.

Objeto	$x_1$ (m)	$y_1$ (m)	$x_2$ (m)	$y_2$ (m)	$z$ (m)
A - Edificio	0.0	30.0	10.0	40.0	9.0
B - Edificio	-5.0	20.0	-12.0	30.0	20.0
C - Galpón	3.0	0.0	15.0	-5.0	1.5
D - Casa	-5.0	0.0	-15.0	-10.0	2.0

- Represente a escala la situación en el plano  $x, y$ , ubicando el colector en el origen y cada uno de los obstáculos respecto a él. Observe la situación y estime cuál de los obstáculos será determinante en la decisión de si ese lugar es correcto o no para la instalación.
- Genere un diagrama solar para el sitio (incluyendo días representativos del año) y ubique los objetos en el mismo. Indique en qué horarios y periodos del año los objetos generarán sombra sobre el emplazamiento.

## Ejercicio 3 - Procesamiento de datos de irradiancia solar

Considere la serie de datos `P1_Ej3_datos.zip` correspondiente a datos minutales de GHI, DHI, y DNI registrados entre el 01/05/2023 y el 31/07/2023 (3 meses) en la estación de medida del LES en Salto ( $\phi = -31.2827^\circ$ ,  $\psi = -57.9181^\circ$ ). La hora del conjunto de datos está expresada en UTC-3.

- Grafique estas cantidades en función del coseno del ángulo cenital considerando las muestras que cumplen que la altura solar es mayor a  $5^\circ$ . ¿Son correctos los gráficos que observa? Discuta lo que observa en cada uno.
- Descargue de la página web de SoDa/CAMS (<https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-mcclear>) el set de datos del modelo de cielo claro McClear para este sitio a escala minutal y para el mismo periodo de tiempo de los datos medidos. Calcule el índice de claridad y el índice de cielo claro. Grafique ambos en función del coseno del ángulo cenital para las muestras que cumplen que la altura solar es mayor a  $5^\circ$ . ¿Son correctos los gráficos que observa? Discuta lo que observa en cada uno.
- Calcule los totales diarios para cada cantidad (GHI, DNI, DHI) y para cada día. Previamente, grafique las series temporales minutales de estas cantidades (en un mismo gráfico) y observe que la medida nocturna presenta valores negativos, así como algunos registros de DNI diurnos en condiciones muy nubladas. Previo al cálculo de los totales diarios, tome acciones respecto a estos valores negativos. Grafique los totales diarios en función del día (para GHI, DNI y DHI) en un mismo gráfico, y calcule el promedio de valores diarios para cada mes.
- Considerando sólo la medida de GHI, calcule los promedios 10-minutales y horarios a partir de la serie minutal. Compárelos en un mismo gráfico con eje temporal común y discuta. Grafique la GHI en función del coseno del ángulo cenital para ambas escalas temporales, ¿es correcto lo que observa? Comente. En particular, especifique qué intervalos temporales está utilizando.
- (e\*) Calcule los totales diarios a partir de los datos 10-minutales y horarios, y compare con lo obtenido en la parte (c). ¿Existen diferencias? Comente.

## Ejercicio 4 - Irradiancia de cielo claro

En el archivo `P1_Ej4_datos.zip` se encuentran datos de GHI ( $\text{Wh/m}^2$ ) horarios para una estación de medida en Las Brujas, Canelones ( $\phi = -34.6720^\circ$ ,  $\psi = -56.3401^\circ$ ) correspondientes al año 2018. La etiqueta horaria indica *el inicio* de cada hora en tiempo estándar UTC-3.

- Calcule el coseno del ángulo cenital para cada dato (en el centro del intervalo) y compárelo con el coseno del ángulo cenital que viene en los archivos como chequeo. ¿Nota alguna diferencia? Comente. Grafique para condiciones diurnas GHI vs  $\cos \theta_z$ .
- Utilizando el modelo ESRA genere estimativos de GHI de cielo claro ( $\text{GHI}_{cc}$ ) usando la turbidez Linke media apropiada e indicando cuál es. Grafique  $\text{GHI}_{cc}$  vs.  $\cos \theta_z$  con otro color sobre la figura de la parte (a).
- Grafique las series temporales de los datos y del modelo. Detecte visualmente un día completamente despejado en verano, invierno y primavera de las series temporales, calcule el desvío cuadrático medio (RMSD) y el sesgo (MBD), entre el modelo y la medida para esos días, descartando medidas con Sol bajo ( $\alpha_s < 5^\circ$ ).

## Ejercicio 5 - Fracción difusa

Considere los datos en `P1_Ej5_datos.zip` para irradiación horaria global, directa y difusa generados por equipos de alta precisión montados sobre un seguidor solar fino de la estación del LES en Salto ( $\phi = -31.2827^\circ$ ,  $\psi = -57.9181^\circ$ ) durante el 2017. La etiqueta horaria indica *el inicio* de cada hora en tiempo estándar UTC-3.

- Realice un control de calidad básico considerando como datos correctos aquellos que verifiquen:  $\cos \theta_z > 0.12$ ,  $\text{DHI} > 0$ ,  $\text{DNI} > 0$ ,  $\text{GHI} > 0$  y  $f_d < 1.05$ .
- 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 el conjunto de datos de irradiancia promedio de GHI, DNI y DHI 10-minutal del archivo `P1_Ej6_datos.zip`. Estos fueron datos registrados en enero y junio de 2023 en la estación de medida del LES en Salto ( $\phi = -31.2827^\circ$ ,  $\psi = -57.9181^\circ$ ). Observar que la etiqueta temporal está centrada en el medio del intervalo 10-minutal y en hora UTC-3.

- Estime para ambos sets de datos la irradiancia global (GTI) sobre un panel orientado al Norte con inclinación de  $\beta = 35^\circ$ . Utilice el modelo de transposición isotrópico considerando que el terreno circundante es una pastura común. Grafique las series temporales de GHI, DHI, DNI y GTI en un mismo eje temporal común y comente los resultados. Puede ser útil observar el comportamiento en días de cielo despejado y días de cielo nublado.
- Repita la estimación de GTI, pero en vez de utilizar los datos de DHI y DNI, utilice únicamente los datos de GHI y un modelo de fracción difusa a elección. ¿Observa diferencias? Calcule el promedio de la GTI al utilizar ambos modelos para los dos meses y compare.

## 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).

- Estime la irradiación directa horaria sobre un sistema de concentración en los siguientes casos: i) sobre un plano fijo con inclinación  $\beta = 30^\circ$  hacia el Norte, ii) inclinado un ángulo  $\beta = 30^\circ$  y con seguimiento azimutal y iii) con seguimiento de dos ejes.
- Grafique de forma superpuesta las 3 series horarias de irradiación **directa** horaria para un día despejado. Comente el comportamiento.
- Grafique la irradiación directa *diaria* en función del día del año para los 3 casos de la parte (a). Halle los totales anuales ¿Cuál es la ganancia porcentual de la energía aprovechable por tecnologías de concentración captada en el año al agregar uno y dos ejes de rotación?

## Ejercicio 8 - Inclinación óptima de captación (sin considerar nubosidad)

Considere estimativos 15-minutales de cielo claro (irradiancia promedio de GHI, DHI, DNI) generados con el modelo ESRA para el año 2020 y la estación de Artigas ( $\phi = -30.3984^\circ$ ,  $\psi = -56.5117^\circ$ ).

- Calcule la irradiancia global en un plano inclinado (GTI) con inclinación  $\beta = 60^\circ$  y acimut Norte con el modelo HD. Para la reflectancia del suelo puede usar  $\rho_g = 0.40$ . Realice un gráfico de la serie temporal de GHI y GTI, y comente los resultados.
- Para una superficie orientada al Norte obtenga la irradiación anual de cielo claro,  $H_a$ , en función de  $\beta$  y grafique  $H_a$  vs.  $\beta$ . Halle la inclinación óptima  $\beta_{max}$  que maximiza la irradiación incidente sobre el plano de los paneles (en condiciones de cielo claro). Calcule el rango de variación de la inclinación  $\beta$  para que la energía captada no varíe más de 10 %, 5 % y 1 % de su valor máximo.
- Para  $\gamma = 0$ , ¿Sería adecuado usar  $\beta_{max}$  hallado en (a) para instalar un colector solar térmico para proveer agua caliente para uso residencial? En caso que no lo sea, hallar un  $\beta'_{max}$  adecuado para este caso.

## Ejercicio 9 - Control de calidad de datos de irradiancia

Se considera la serie de datos minutales de la estación de la red SONDA São Martinho da Serra ( $\phi = -29.4428^\circ$ ,  $\psi = -53.8231^\circ$ ), descargada de <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/saomartinho.html> y disponible en P1\_Ej9\_datos. La serie cuenta con datos crudos (sin controles de calidad) de GHI, DHI, DNI correspondientes a 2013. El objetivo de este ejercicio es aplicar sucesivos criterios de control de calidad para obtener series limpias con las tres componentes en simultáneo.

- Implementar los criterios BSRN de control de calidad en el siguiente orden: filtro para GHI, filtro para DHI, filtro para DNI, límites para la fracción difusa y límites para el error de la ecuación de clausura. Se utilizará el criterio para datos extremadamente raros. Se pide realizar una tabla indicando el número de datos filtrados en cada etapa. También se graficarán para cada componente los datos medidos en negro y los descartados en rojo (radiación vs.  $\cos \theta_z$ ). Como punto de partida se utilizan los datos diurnos donde existan mediciones de las 3 medidas.
- Realice una inspección visual de los datos crudos sin filtrar, por ejemplo graficando las series temporales de las tres componentes superpuestas. ¿Parecen confiables todos los datos? ¿Es necesario descartar algunos datos manualmente que no son filtrados por BSRN? Si descarta algunos datos en esta instancia justifique por qué y repita la parte (a) con el nuevo subconjunto.