

## Evaluación del Recurso Renovable – Solar

### Máster en Energías

Francisco José Pérez Zenteno

#### Representación gráfica de la irradiación Solar

Uno de los principales datos que tenemos que tomar en cuenta cuando queramos caracterizar el comportamiento y/o rendimiento de una celda solar, es la irradiancia solar que recibe a lo largo del tiempo. Gracias de diversas formulas y aproximaciones podemos conocer con cierta precisión como será dicha irradiación a lo largo de un día e inclusive a lo largo de todo el año.

Antes de poder conocer dicha irradiancia es conveniente conocer ciertos conceptos que nos serán de ayuda para entender como debemos de ocupar las fórmulas. A continuación, se muestra el significado y formulas de los conceptos:

- Constante solar ( $I_{sc}$ ): Es la cantidad de irradiancia total que una superficie puede recibir cuando se encuentra en posición normal a la luz del Sol. Este dato corresponde a lo que se obtendría en el espacio; es decir, no toma en cuenta las mitigaciones de la atmosfera.

$$I_{sc} \approx 1367 \frac{W}{m^2} = 4921 \frac{kJ}{m^2 h}$$

- Distancia Tierra-Sol ( $E_o$ ): Es como su nombre lo dice la distancia entre nuestra estrella y el planeta. Hay varias formulas que nos ayuda a saber su valor; sin embargo, una de las más simple para ocupar es la desarrollada por Duffie y Beckman ya que ocupa el dato del día del año ( $dn$ ).

$$E_o = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi dn}{365}$$

- Declinación solar ( $\delta$ ): Se define como el ángulo que existe el centro del Sol y el plano del ecuador. Este valor llega a su máximo ( $23.5^\circ$ ) en los solsticios de verano e invierno. De igual manera que  $E_o$ , existe distintas formulas para conocer su valor; sin embargo, la más acertada es la desarrollada por Spencer.

$$\delta = \frac{180}{\pi} (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)$$

Donde el  $\Gamma$  es al ángulo del día.

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365} (dn - 1)$$

- Ángulo horario ( $\omega$ ): Es el ángulo que se forma entre el meridiano donde está el observador al meridiano que contiene la estrella. Cabe decir que el tiempo ( $t$ ) tiene que estar en LAT.

$$\omega = \frac{360}{24}(12 - t)$$

LAT – (Local Apparent Time) es el tiempo del Sol verdadero; es decir, cuando el Sol pasa sobre el meridiano del observador.

LMT – (Local Mean Time) es el tiempo considerando un Sol ficticio que circula en una órbita circular. La duración del día es igual para cada día del año. Este tiempo hace referencia también al meridiano del observador

LST – (Local Standard Time) es el tiempo de los relojes. Se toma de referencia el meridiano de Greenwich. Tomando como referencia una diferencia de 15 ° entre meridianos. Este tiempo se creó considerando factores políticos o geográficos

La relación que hay entre cada uno de ellos se puede resumir en la siguiente formula:

$$LAT = LMT + E_t$$

$$LAT = LST + 4 (L_s - L_e) + E_t$$

En donde tenemos que  $E_t$  es la diferencia que hay entre LAT y LMT.

$$E_t = LAT - LMT$$

$$E_t = 229.18 \frac{\text{min}}{\text{rad}} (0.0000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.040849 \sin 2\Gamma)$$

Finalmente notamos que  $L_s$  es la longitud del meridiano de referencia y  $L_e$  es la longitud del meridiano del observador

Es así como finalmente podemos definir la irradiancia horaria extraterrestre de cualquier lugar del planeta. Donde  $\phi$  no es otra cosa sino la latitud del lugar.

$$I_0 = I_{SC} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega)$$

Se puede mencionar que esta última expresión a pesar de dar la irradiancia solar por hora. Podemos tomar las declinaciones críticas [tabla 1] para calcular un promedio de la irradiación anual de dicho lugar.

Month	Date	$\delta$ (degrees)	Day number $d_n$
January	17	- 20.84	17
February	14	- 13.32	45
March	15	- 2.40	74
April	15	+ 9.46	105
May	15	+ 18.78	135
June	10	+ 23.04	161
July	18	+ 21.11	199
August	18	+ 13.28	230
September	18	+ 1.97	261
October	19	- 9.84	292
November	18	- 19.02	322
December	13	- 23.12	347

Tabla 1 Tabla de declinaciones críticas

Para el calculo de la irradiancia ya sea para el caso de un solo día o para el caso de un año, se realizó un programa en Matlab para poder generalizar las ecuaciones para cualquier condición que se desee. Dicho programa es capaz de realizar los cálculos correspondientes para graficar las irradiancias diarias en cada uno de los sistemas horarios o una comparación entre cada uno de ellos. Además, tiene la opción de calcular la irradiancia de algún lugar a lo largo de todo un año.

En primer lugar, podemos analizar cómo será la irradiación de Madrid en los solsticios y equinoxios. Los datos de entrada para está situación serían:

$$\phi = 40.4165^\circ$$

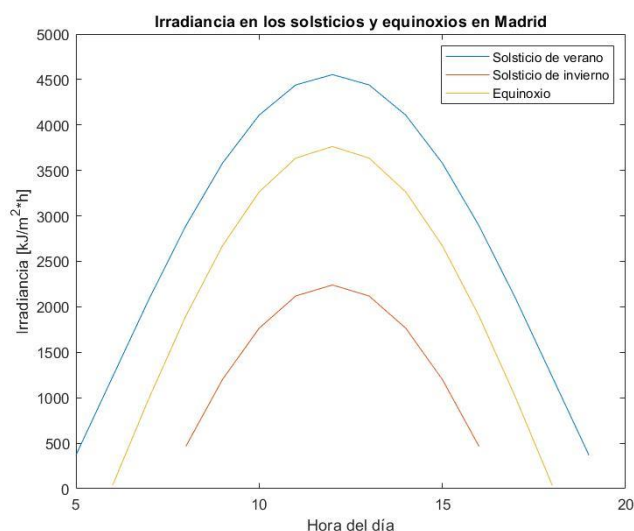
Opción = 1 [para cálculo de irradiancia horaria]

Día y mes = 21 de junio [solsticio de verano]

Día y mes = 21 de diciembre [solsticio de invierno]

Día y mes = 22 de septiembre [equinoxio de otoño]

El resultado sería la siguiente gráfica.



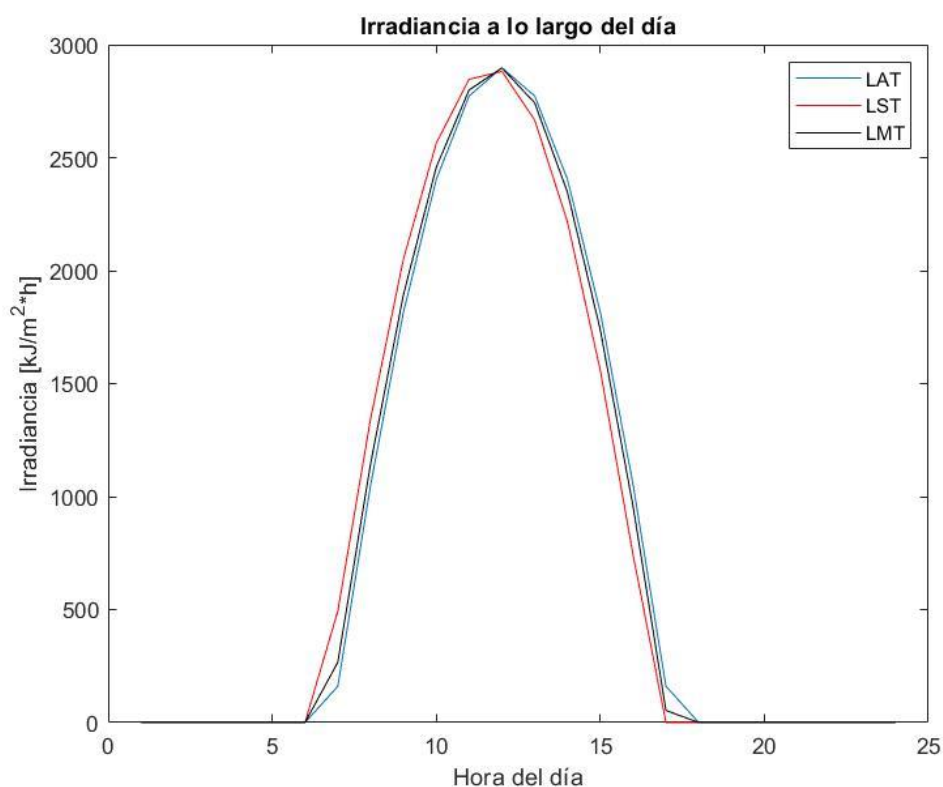
Gráfica 1 Irradiancia en los solsticios y equinoxios Madrid

Enseguida podemos realizar la comparación entre cada uno de los sistemas horarios. Los datos de entrada serían los siguientes:

$\phi = 40.4165^\circ$   
 Opción = 1 [para cálculo de irradiancia horaria]  
 Día y mes = 1 de noviembre  
 Opcion\_2 = 4 [comparación entre horas]  
 $L_s = 0$   
 $L_e = -3.7025$  [Longitud de Madrid]

Los resultados serían los siguientes:

7 Irradiancia [LAT]: 160.715	Irradiancia [LMT]: 266.977	Irradiancia [LST]: 493.209
8 Irradiancia [LAT]: 1051.57	Irradiancia [LMT]: 1146.4	Irradiancia [LST]: 1345.26
9 Irradiancia [LAT]: 1816.57	Irradiancia [LMT]: 1893.5	Irradiancia [LST]: 2051.43
10 Irradiancia [LAT]: 2403.57	Irradiancia [LMT]: 2457.36	Irradiancia [LST]: 2563.61
11 Irradiancia [LAT]: 2772.57	Irradiancia [LMT]: 2799.56	Irradiancia [LST]: 2846.88
12 Irradiancia [LAT]: 2898.43	Irradiancia [LMT]: 2896.78	Irradiancia [LST]: 2881.94
13 Irradiancia [LAT]: 2772.57	Irradiancia [LMT]: 2742.39	Irradiancia [LST]: 2666.41
14 Irradiancia [LAT]: 2403.57	Irradiancia [LMT]: 2346.91	Irradiancia [LST]: 2214.97
15 Irradiancia [LAT]: 1816.57	Irradiancia [LMT]: 1737.3	Irradiancia [LST]: 1558.38
16 Irradiancia [LAT]: 1051.57	Irradiancia [LMT]: 955.09	Irradiancia [LST]: 741.393
17 Irradiancia [LAT]: 160.715	Irradiancia [LMT]: 53.5981	Irradiancia [LST]: 0



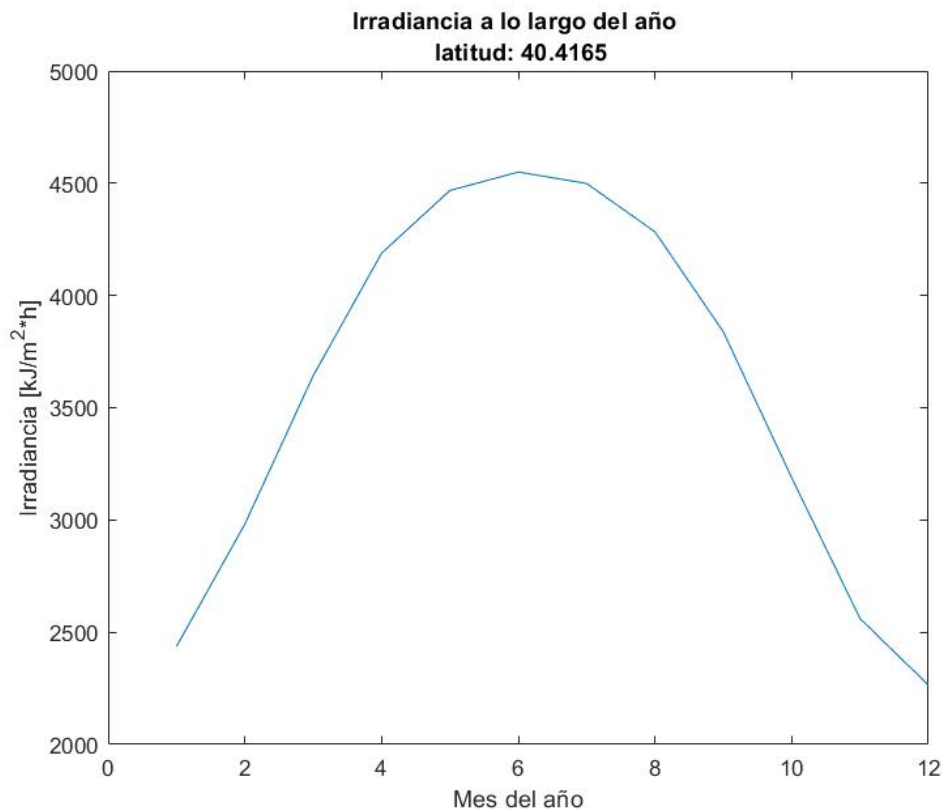
Gráfica 2 Comparación de irradiancia con los distintos sistemas horarios

Finalmente podemos obtener como será la irradiancia solar a lo largo de todo un año para Madrid. Los datos de entrada serían en este caso:

$$\phi = 40.4165^\circ$$

Opción = 1 [para cálculo de irradiancia anual]

Cuyos resultados serían:



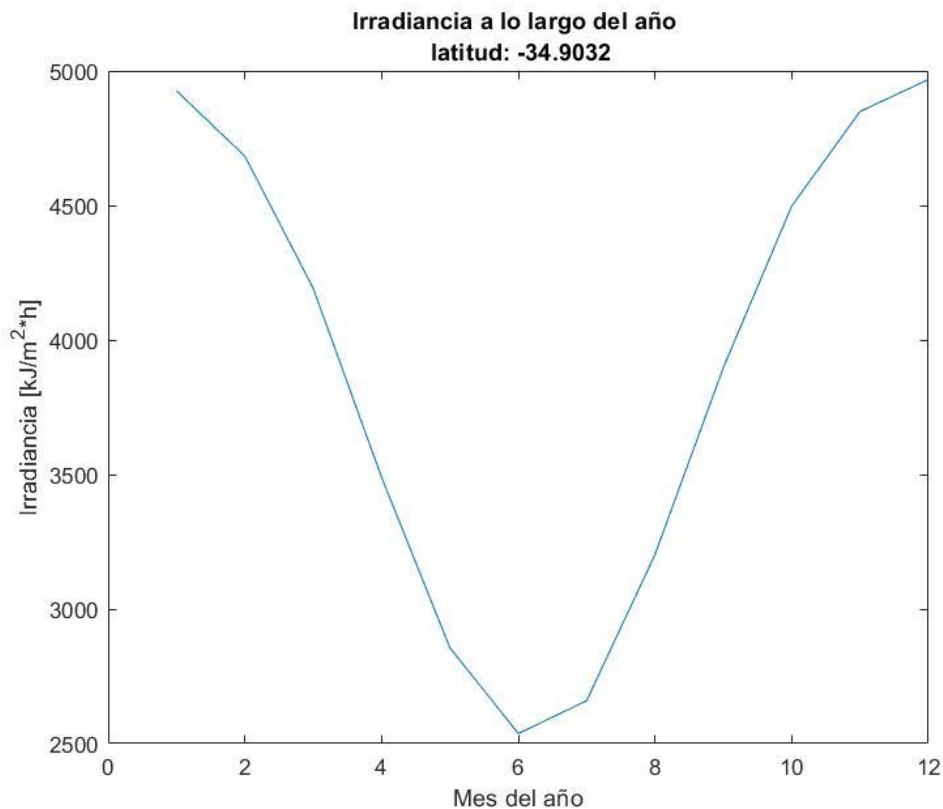
Gráfica 3 Irradiancia anual en Madrid

Para poder comparar, podemos analizar la irradiación a lo largo del año en un lugar del hemisferio sur. Por ejemplo, Montevideo. En dicho caso, los datos de entrada serían:

$$\phi = -34.9032^\circ$$

Opción = 1 [para cálculo de irradiancia anual]

En conclusión, los resultados serían los siguientes:



*Gráfica 4 Irradiancia anual en Montevideo*

Con todos estos cálculos podemos concluir con los siguientes aspectos:

- Tal y como se vio en clase, la irradiación diaria de cierto lugar va cambiando conforme la Tierra sigue la traslación, de tal forma que en el caso del hemisferio norte la irradiación será máxima en el solsticio de verano seguida por los equinoxios para finalizar con el solsticio de invierno.
- El uso de un sistema horario u otro puede llegar a cambiar ligeramente la información de la irradiación recibida. En el caso de lugares cuyas longitudes estén al oeste del meridiano de Greenwich se nota que de izquierda a derecha aparecen: LST-LMT-LAT. En caso contrario, cuando las longitudes se encuentren al este de Greenwich la gráfica aparece: LAT-LMT-LST.
- La irradiación anual en el hemisferio sur es completamente contraria a la encontrada en el hemisferio norte; es decir, su máxima irradiación se presentará en el solsticio de invierno y su mínima en el solsticio de verano.

Para concluir se anexa el código realiza en Matlab.

```

clc
clear

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%{
    Programa de irradiancia Solar extraterrestre a lo largo de un día o a lo
    largo de un año para una lugar [Latitud] determinada.

    Evaluación del recurso solar
    Máster en energías
    Universidad Complutense de Madrid
    Elaborado por: Francisco José Pérez Zenteno
%}

%Inputs del programa
%dia_del_ano   = '16 de octubre';
%latitud Madrid = 40.4165000
%longitud      = -3.7025600

latitud = input('Inserte la latitud deseada: ');
opcion = input('Desea conocer la irradiancia horaria o anual: \n 1 horaria\n 2 anual');
irradiancia = 4921;

% Opcion para conocer datos de irradiancia horaria.
if opcion == 1

    dia_del_ano = input('Inserte el dia y mes que desea [Eje. 16 de octubre]: ', 's');
    opcion_2 = input('Inserte la opcion de hora deseada: \n 1 - LAT \n 2 - LST \n 3 - LMT \n
4 - Comparación entre horas');

    %Métodos para obtener el día del año adecuado
    str = erase(dia_del_ano, '-');
    str = erase(dia_del_ano, 'de');
    str = erase(dia_del_ano, 'DE');
    str = lower(str);
    str = split(str);

    dia = str2double(str(1,1));          %Obtiene el valor numérico de la cadena
    mes = str(2,1);                     %Obtiene el mes de la cadena

    %Llamada de funciones para obtener la delta y Eo
    [delta, dia_completo, angulo_dia] = delta_spencer(dia,mes);
    eo = excentricidad(dia_completo);

    %Llamada de funciones para obtener la irradiancia del día señalado
    [hora, ir, angulo, tipo] =
irradiancia_diaria(irradiancia, eo, delta, latitud, angulo_dia, opcion_2);
    ir_positiva = irradiancia_positiva(hora, ir);

    if not(isequal(tipo, 'TODOS'))

        %Mostrar datos en la pantalla de comandos
        fprintf('\n***** \n');
        fprintf('Los datos obtenidos son: \n');
        fprintf('Hora del día \t irradiancia [kJ/m^2*h] \n');

```

```

        for i= 1:length(hora)
            if ir(i) > 0
                fprintf(' %g \t %g \n',i,ir(i));
            end
        end

        %Gráfica de la irradiancia
        plot(hora,ir_positiva)
        titulo = sprintf('Irradiancia a lo largo del día: %s\n latitud: %g hora: %s',dia_del_ano,latitud,tipo);
        title(titulo);
        xlabel('Hora del día');
        ylabel('Irradiancia [kJ/m^2*h]');

    end

    %Opción para conocer la irradiancia anual
    elseif opcion == 2

        irradiancia_anual(irradiancia, latitud);

    end

    %*****

    %*****

    % Funciones del programa

    function [y, dia_completo, angulo_dia] = delta_spencer( dia, mes)

    mes = char(mes);
    switch mes
        case 'enero'
            dia_completo = dia ;
        case 'febrero'
            dia_completo = dia + 31;
        case 'marzo'
            dia_completo = dia + 59;
        case 'abril'
            dia_completo = dia + 90;
        case 'mayo'
            dia_completo = dia + 120;
        case 'junio'
            dia_completo = dia + 151;
        case 'julio'
            dia_completo = dia + 181;
        case 'agosto'
            dia_completo = dia + 212;
        case 'septiembre'
            dia_completo = dia + 243;
        case 'octubre'
            dia_completo = dia + 273;
        case 'noviembre'
            dia_completo = dia + 304;
        case 'diciembre'
            dia_completo = dia + 334;
    end

```



```

angulo_dia = ((2*pi)/365)*(dia_completo-1);    %valor del (gamma) para la formula de Spencer
angulo_dia = rad2deg(angulo_dia);
y = (180/pi)*(0.006918 - 0.399912*cosd(angulo_dia) + 0.070257*sind(angulo_dia) -
0.006758*cosd(2*angulo_dia) + 0.000907*sind(2*angulo_dia) - 0.002697*cosd(3*angulo_dia) +
0.00148*sind(3*angulo_dia));

%y = 23.45*sin((2*pi/365)*(dia_completo+284));
end

%Función para obtener la excentricidad de un día en específico
function e = excentricidad(dia)

e = 1 + 0.033*cos((2*pi*dia)/365);

end

%Función para calcular la irradiación a lo largo de 24 hrs
function [hora, irradiancia, angulo_horario, tipo] = irradiancia_diaria(isc, eo, delta, lat,
angulo_dia, opcion)

hora = zeros(24,1);
irradiancia = zeros(24,1);
angulo_horario = zeros(24,1);

%Calculo de la irradiancia con la hora: LAT
if opcion == 1

    tipo = 'LAT';
    for i = 1:1:24
        angulo_horario(i) = 15*(12-i);                %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora(i) = i;
        irradiancia(i) = ir;
    end

    %Calculo de la irradiancia con la hora: LST
elseif opcion == 2

    tipo = 'LST';
    long_merid = input('Inserte la longitud del meridiano de su zona horaria: ');
    long_ref = input('Inserte la longitud de referencia (justo donde se encuentra): ');
    %angulo_dia = input('Inserte el angulo del dia: ');

    for i = 1:1:24

        %El ciclo for sirve como la hora del reloj LST, de ahí se
        %pasa a la conversión de la hora de reloj a la hora real
        %del SOL con la función que convierte LST a LAT.
        LAT = LST2LAT(i, long_merid, long_ref, angulo_dia);

        angulo_horario(i) = 15*(12-LAT);                %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora(i) = i;
        irradiancia(i) = ir;

        fprintf('Hora LST: %g \t Hora LAT: %g\n',i, LAT);
    end
end

```

```

end

%Calculo de la irradiancia con la hora: LMT
elseif opcion == 3

    tipo = 'LMT';
    for i = 1:1:24
        LAT = LMT2LAT(i,angulo_dia);
        angulo_horario(i) = 15*(12-LAT);           %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora(i) = i;
        irradiancia(i) = ir;

        fprintf('Hora LMT: %g \t Hora LAT: %g\n',i, LAT);

    end

    %Comparación de la irradiancia entre los distintos tipos de horas
elseif opcion == 4

    tipo = 'TODOS';
    long_merid = input('Inserte la longitud del meridiano de su zona horaria: ');
    long_ref = input('Inserte la longitud de referencia (justo donde se encuentra): ');

    %LAT
    for i = 1:1:24
        angulo_horario(i) = 15*(12-i);           %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora_lat(i) = i;
        irradiancia_lat(i) = ir;
    end

    %LST
    for i = 1:1:24

        LAT = LST2LAT(i, long_merid, long_ref, angulo_dia);

        angulo_horario(i) = 15*(12-LAT);           %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora_lst(i) = i;
        irradiancia_lst(i) = ir;

    end

    %LMT
    for i = 1:1:24
        LAT = LMT2LAT(i,angulo_dia);
        angulo_horario(i) = 15*(12-LAT);           %Obtiene el angulo horario [w] del LAT
        ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario(i)));

        hora_lmt(i) = i;
        irradiancia_lmt(i) = ir;

    end
end

```

```

%Obtiene unicamente los valores de irradiación positiva
irradiancia_lat = irradiancia_positiva(hora_lat,irradiancia_lat.');
irradiancia_lmt = irradiancia_positiva(hora_lmt,irradiancia_lmt.');
irradiancia_lst = irradiancia_positiva(hora_lst,irradiancia_lst.');

%Datos
for i = 1:1:24
    if irradiancia_lat(i) ~= 0
        fprintf('Hora: %g \t Irradiancia [LAT]: %g \t Irradiancia [LMT]: %g \t
Irradiancia [LST]: %g \n ',i, irradiancia_lat(i), irradiancia_lmt(i), irradiancia_lst(i));
    end
end

%Gráfica
plot(hora_lat, irradiancia_lat, hora_lst, irradiancia_lst,'r', hora_lmt,
irradiancia_lmt,'k');
titulo = sprintf('Irradiancia a lo largo del día');
title(titulo);
xlabel('Hora del día');
ylabel('Irradiancia [kJ/m^2*h]');
legend('LAT','LST','LMT');

end
end

%Función que arroja solamente la irradiancia positiva
function g = irradiancia_positiva(hora, irradiancia)

aux_ir = zeros(24,1);
for i = 1:1:length(hora)
    if irradiancia(i,1) > 0
        aux_ir(i,1) = irradiancia(i,1);
    else
        continue;
    end
end

g = aux_ir;

end

%Función para cálculo de la irradiancia anual
function irradiancia_anual(isc, lat)

meses = (1:12);
dias_representativos = [17 45 74 105 135 161 199 230 261 292 322 347];
irradiancia = zeros(1,12);
angulo_horario = 0; %Se considera el angulo horario al medio dia LAT = 12:00

for i = 1:1:12

    angulo_dia = rad2deg(((2*pi)/365)*(dias_representativos(i)-1)); %valor del (gamma) para
la formula de Spencer
    delta = (180/pi)*(0.006918 - 0.399912*cosd(angulo_dia) + 0.070257*sind(angulo_dia) -
0.006758*cosd(2*angulo_dia) + 0.000907*sind(2*angulo_dia) - 0.002697*cosd(3*angulo_dia) +
0.00148*sind(3*angulo_dia));
    eo = excentricidad(dias_representativos(i));

```

```

    ir = isc*eo*(sind(delta)*sind(lat) + cosd(delta)*cosd(lat)*cosd(angulo_horario));
    irradiancia(i) = ir;

end

plot(meses, irradiancia);
titulo = sprintf('Irradiancia a lo largo del año \n latitud: %g',lat);
title(titulo);
xlabel('Mes del año');
ylabel('Irradiancia [kJ/m^2*h]');

end

%{
Funciones para hacer la conversión entre los distintos tipos de horas

LAT - (Local Apparent Time) es el tiempo del Sol verdadero. Cuando el sol
      pasa sobre el meridiano local del observador.

LMT - (Local Mean Time) es el tiempo considerando un Sol ficticio que
      circula en una orbita circular. La duración del día es igual para cada día
      del año. Hace referencia también al meridiano del observador

LST - (Local Standard Time) es el tiempo de los relojes. Se toma de
      referencia el meridiano de Greenwich. Tomando como referencia 15° entre
      meridianos. En este se puede considerar factores políticos o geográficos

%}

function [hora, et] = LMT2LAT(lmt,angulo_dia)

et = 229.18*(0.0000075 + 0.001868*cos(angulo_dia) - 0.032077*sin(angulo_dia) -
0.014615*cos(2*angulo_dia) - 0.040849*sin(2*angulo_dia));
hora = hours(lmt) + minutes(et);           %Suma los minutos obtenidos de et al tiempo LMT
hora = hours(hora);                       %Da el resultado en horas (considerando los
minutos como decimales de la hora)

end

%Función que convierte la hora del reloj LST en la hora del Sol real
function [hora, et, dif_mer] = LST2LAT(lst, long_merid, long_ref, angulo_dia)

et = 229.18*(0.0000075 + 0.001868*cos(angulo_dia) - 0.032077*sin(angulo_dia) -
0.014615*cos(2*angulo_dia) - 0.040849*sin(2*angulo_dia));
dif_mer = minutes(4*(long_merid - long_ref));
hora = hours(lst) + minutes(4*(long_merid - long_ref) + et);
hora = hours(hora);

end

end

```