

# Ingeniería Energética General

Trayectoria y el Diagrama Solar

## **Ahorro Energético Integral**

Aplicado a la Mediana y Pequeña Industria, a los Centros Comerciales, a los Edificios

Procedimiento para construir el Diagrama Solar de una localidad

## **Resumen**

*En este documento se muestra el procedimiento para construir el Diagrama Solar y poder trazar la trayectoria del Sol en cualquier localidad, conocida la Latitud, Longitud y fijando la hora del día en que se quiera determinar la posición del Sol respecto a la localidad. En el se abordan los conocimientos básicos para poder realizar el trabajo, se muestran los pasos a seguir, como construir el Diagrama Solar, que herramientas de programación pueden emplear y la forma de registrar los datos obtenidos gráficamente para el trazado de la Trayectoria Solar. Este Instructivo tiene la finalidad de proporcionarle al Ingeniero Energético General los conocimientos para que por sus propios medios pueda construir su herramienta de trabajo, dado por sentado lo importante que es para todos los especialistas de nuestra profesión, el dominio de la potencialidad y formas que tiene la energía que nos ofrece el Sol, convencidos de su fuente natural. El Instructivo se inicia con una breve explicación de la importancia que tienen estos conocimientos complementarios, ejemplificando su aplicación práctica. Expone los conocimientos esenciales e incluye los parámetros y datos del Sol como fuente de energía limpia y barata. Inicia el estudio de la Trayectoria Solar con la información de cómo es el movimiento de la tierra alrededor del Sol y define y muestra como calcular los valores que caracterizan el movimiento solar y que a la vez son la fuente de información para poder trazar la trayectoria en un Diagrama Solar.*

*Contiene este Instructivo el procedimiento para determinar las coordenadas de posicionamiento del Sol, explicando el método empleado, en este caso basado en Tablas Excel, las que fueron seleccionadas por ser un SW de fácil compresión y versátil para procesar ecuaciones en Tablas. A la vez el Excel es globalmente conocido y por lo general está montado en el paquete de Office en cualquier computador. Lo anterior facilita que el especialista interesado pueda por si mismo, construir su propio calculador. En el Instructivo se realiza un tutorial a modo de ejemplo, ubicándonos en la ciudad de Roma, Italia. Para esta localidad se aplica el procedimiento, eligiendo un día típico de verano del año, en intervalos de una hora, desde el saliente hasta el poniente. Las coordenadas obtenidas del tutorial se representan en el Diagrama Solar, el que se explica como construirlo. Uniendo los puntos obtenidos se traza el camino del Sol ese día. Una serie de sugerencias practicas y tips que se aprenden en trabajos realizados, se presentan a lo largo del instructivo, de forma de facilitar la comprensión, obviar dificultades que siempre surgen en el desarrollo del trabajo.*

*Para la comprensión de este instructivo se requiere una formación técnica básica, ya que las ecuaciones que se procesan requieren de conocimientos matemáticos y de sumo cuidado en la operación de cálculo, para evitar errores.*

### **el Autor:**

**René Ruano** es director y fundador de Ingeniería Energética General, tiene más de 30 años de experiencia en la realización de proyectos de Ahorro Energético y de Energías Renovables.

**René Ruano** is Manager and founder of General Energetic Engineering with more than 30 years making Save Energy and Renewable Energy Project.

**Índice**

<b>Cap.y/o Epígrafes</b>	<b>Tema</b>	<b>Página</b>
	Resumen	2
	Índice	3
1	Trayectoria Solar, diagrama Solar	4
2	Empecemos resumiendo lo que conocemos del Sol.	5
3	Movimiento del Sol	7
4	Ángulo de elevación y azimuth	7
4.1	El ángulo de elevación o altitud	7
4.2	El ángulo de Azimuth	8
4.3	Tiempo Solar en la localidad. (LST) y Tiempo Local (LT)	8
4.4	Tiempo standard del meridiano de Greenwich (LSTM)	8
4.5	Corrección del tiempo por la excentricidad terrestre. (EoT)	8
4.6	Factor de Corrección del tiempo (TC)	9
4.7	Tiempo Solar de la Localidad (LST)	9
4.8	Ángulo horario (HRA)	9
4.9	Inclinación	9
4.10	$\beta$ Elevación solar	10
4.11	Azimut	10
4.12	Saliente y poniente solar.	10
4.13	Posición del Sol durante el día	11
5	Trayectoria solar	11
5.1	Calculador - Trayectoria Solar	14
5.2	Trazado de la Trayectoria Solar sobre el Diagrama Solar	17
6	Conclusiones	18
8	Bibliografía	19
	ANEXO	20

## 1. Trayectoria Solar, diagrama Solar

El Diagrama Solar es la representación gráfica de la trayectoria que sigue el Sol, para un observador que esté parado sobre la superficie del Planeta en una zona que esté definida por su latitud y longitud. La trayectoria solar influye en la energía y la eficiencia energética de diversas formas. Veamos algunas, entre muchas:

- ✚ Si decidimos colocar un captador solar para utilizar la energía limpia que nos regala la naturaleza, tendremos que conocer como orientarlo en la dirección que reciba la mayor cantidad de radiación solar directa e indirecta.
- ✚ Si a pesar de haberlo colocado en la orientación correcta, pero sobre el captador se proyectan sombras durante las horas del día que la radiación solar incidente es mayor, estaremos perdiendo eficiencia de captación a pesar de haber seleccionado y montado el panel de mayor eficiencia del mercado.
- ✚ Si por el contrario decidimos instalar una máquina Chiller o Enfriadora de Agua y la Unidad de Condensación la montamos en zonas de alta concentración de radiaciones solares, estaremos condenando el equipo a operar con una eficiencia inferior a la que podríamos obtener de su funcionamiento.
- ✚ Cuando desde la etapa del proyecto constructivo decidimos orientar una habitación o un local para que reciba la mayor iluminación natural, entonces necesitamos conocer por donde sale, la trayectoria y por donde se pone el Sol. Necesitaremos buscar una solución constructiva en el exterior del edificio, de manera de colocar obstáculos o pantallas que impidan que los rayos del sol puedan penetrar en el interior de la habitación y generar recalentamiento por radiación.
- ✚ En ocasiones se requiere cumplir normativas que regulan la proyección por reflexión solar sobre áreas de descanso, paseos públicos y construcciones colindantes. Si se procede al acristalamiento de las superficies sin un análisis sobre el impacto que esta solución causaría en áreas y objetivos cercanos, casi seguro que se generaría un mal inevitable. Al reflejarse los rayos solares sobre las superficies acristaladas, su proyección puede incidir sobre zonas de estar, públicas o espacios habitados, invadiendo su interior e incrementando la radiación calórica sobre estas y por supuesto, su carga térmica. No es solo acristalar para utilizar la energía limpia solar, es hacerlo en la orientación correcta sin afectación externa.

Son múltiples las ventajas y utilidades que para el Ingeniero Energético General tiene conocer como trazar la trayectoria solar. Es un conocimiento que complementa su especialidad y es una herramienta muy utilizada hoy en día, por el crecimiento exponencial de las inversiones que se realizan para el uso de las fuentes renovables de energía y principalmente la solar, tanto en captadores, como en soluciones arquitectónicas.

El procedimiento que sigue consiste en confeccionar nuestro Diagrama Solar estudiando a las diferentes horas del día de manera de poder trazar la trayectoria por los puntos más representativos, para un día de los 365 días del año, o para un día de cada mes, según sea nuestra necesidad.

Se irá explicando este procedimiento, la base teórica de los cálculos, la secuencia de cálculos y el trazado en el diagrama Solar. A la vez el lector que quiera conocer como viaja el Sol en una localidad determinada, podría ir construyendo su propio Diagrama.

## 2. Empecemos resumiendo lo que conocemos del Sol.

Todos conocemos que el Sol es una estrella de gases calientes con una temperatura que alcanza más de veinte millones de grados kelvin debido a fusión nuclear del hidrogeno que se convierte en helium ocurriendo en su superficie. El calor se trasmite al exterior a través de una capa de hidrógeno que cubre la superficie solar y que se encuentra a una temperatura aproximada de 6000 °K. La potencia total que emite el sol  $H_{sol}$  es dada por la expresión de Stefan-Boltzmann multiplicando  $\sigma T^4$  por la superficie solar  $0,785 (d_{sol})^2$  con un valor en el orden de  $9,5 E+22$  kw. Un objeto a una distancia  $D$  del sol recibe una radiación solar  $H_0$  (radiación incidente) proporcional a la distancia que se encuentre de la superficie solar y a la intensidad de la radiación. Veamos la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{R_{sol}^2}{D^2} \times H_{sol}$$

donde:  $H_{sol}$  es la intensidad de la radiación solar (en  $W/m^2$ ) y determinada por la ecuación del cuerpo negro de Stefan-Boltzmann;  
 $R_{sol}$  es el radio del Sol en metros;  
 $D$  es la distancia en metros desde el Sol a la superficie donde inciden los rayos solares.

La expresión anterior nos permite precisar como en la medida que la distancia  $D$  aumenta, la radiación incidente disminuye. Apliquemos la expresión para determinar la radiación incidente seleccionando algunos de los Planetas de nuestro sistema solar. Veamos la siguiente

**Tabla 1**

Radiación Solar incidente por $m^2$ sobre la superficie de diferentes planetas							
Planetas	$R_{sol}, m$	$R_{sol}^2, m^2$	Distancia, m	$D^2, m^2$	$H_{sol} W/m^2$	$R^2/D^2$	$H_0 W/m^2$
Venus	6,95E+08	4,83442E+17	1,08E+11	1,17E+22	5,96E+07	4,14E-05	2,47E+03
Marte	6,95E+08	4,83442E+17	2,28E+11	5,20E+22	5,96E+07	9,30E-06	5,54E+02
Tierra	6,95E+08	4,83442E+17	1,49E+11	2,22E+22	5,96E+07	2,18E-05	1,30E+03

Observemos como en la medida que nos alejamos del Sol la radiación incidente disminuye, desde Venus que se encuentra a  $1,08E+08$  km, pasando por la Tierra a  $1,49E+08$  km y finalmente Marte, más distante, a  $2,28E+08$  km. Sobre la atmósfera exterior de la Tierra la radiación incidente es de unos  $1300 W/m^2$ . Pero esta radiación exterior cambia ligeramente, principalmente por la orbita elíptica que describe la Tierra alrededor del Sol, produciendo un máximo de radiación en el mes de enero y un mínimo en julio. Por ser pequeñas estas variaciones, se consideran como constante e igual a  $1353 W/m^2$ . Este valor de radiación solar sobre la atmósfera exterior ha sido definido como la constante para una masa de aire igual a cero, ( $MA0$ ). Aunque la radiación solar sobre la atmósfera terrestre es constante, la radiación solar sobre la superficie de la tierra varía, motivado por los siguientes efectos:

- ✚ efectos de la atmósfera terrestre incluyendo la absorción y la dispersión,
- ✚ concentraciones locales de vapor de agua, nubosidades y contaminantes
- ✚ latitud de la ubicación
- ✚ la estación el año
- ✚ el día y la hora

Estos efectos implican cambios en la cantidad de radiación incidente, en el espectro de radiaciones que se reciben y en el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie que se proyecta. Se comprenderá como la radiación incidente irá modificándose para diferentes

latitudes en los cambios de estación y en las regiones desérticas o tropicales, donde hay patrones nubosos o cielo despejados.

La atmósfera terrestre influye de formas diferentes sobre la radiación solar que finalmente impacta la superficie del Planeta. La trayectoria que siguen las radiaciones solares hasta la superficie terrestre tiene que atravesar la capa atmosférica que la absorbe, tiende a dispersarla y la refleja, lo que produce cambios en el espectro solar debido a que algunas longitudes de onda son absorbidas, otras reflejadas. Se agregan las variaciones de la composición local de la atmósfera, tales como contaminantes, vapor de agua, patrones nubosos, que también influyen sobre la dispersión y debilitamiento de la radiación incidente sobre la tierra. Se estima que llega a la Tierra un 70 % de la radiación incidente sobre la atmósfera exterior.

La Masa de Aire (AM) se define como el camino mas corto para que la radiación solar atraviese la atmósfera y alcance la superficie terrestre, es decir, cuando el sol esta sobre la superficie o sus rayos son perpendiculares a ella. La Masa de Aire (AM) se define como:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo con la trayectoria vertical o perpendicular sobre la superficie. Cuando el Sol está sobre nuestras cabezas entonces el ángulo es cero y el  $\cos \theta = 1$  y  $AM=1$ . Este ángulo se define como el ángulo del Zenith. Finalmente, la Masa de Aire se define como la longitud relativa de la trayectoria que siguen los rayos solares dentro de la atmósfera para impactar la superficie terrestre comparada con la longitud vertical o perpendicular. Asumamos que el ángulo de impacto de los rayos solares sobre una superficie determinada es de  $30^\circ$ . Entonces la Masa de Aire (AM) es igual a  $1/\cos 30^\circ = 1,15$

Es posible determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar utilizando un objeto con una longitud conocida y colocándolo verticalmente sobre la superficie. La sombra proyectada formará un triangulo cuyos lados serán la longitud del objeto, la longitud de la sombra. Calculemos el ángulo que forma la hipotenusa con la sombra, siendo el complemento el ángulo que formará con la vertical llamado el Zenith. Conocido el Zenith determinaremos AM.

Calculemos la intensidad de la radiación basado en la Masa de Aire por la que atraviesa.

La intensidad de la componente directa sobre la tierra se determina por la expresión

$$I_D = 1,353 \times (0,7^{AM})^{0,678}$$

donde  $I_D$  es la intensidad de la radiación sobre el plano perpendicular en  $W/m^2$ , el valor de 1353 es la constante solar. AM es la Masa de Aire por la que atraviesa y 0,7 es el coeficiente de la radiación neta que impacta la superficie terrestre. Para días despejados, la radiación difusa es un 10% superior a la radiación directa  $I_{Dif}=1,1 I_D$

### 3. Movimiento del Sol

La tierra rota alrededor de su eje mientras se traslada dentro de su orbita alrededor del Sol. De esta manera cambia el ángulo de la componente directa del rayo de luz que impacta la superficie terrestre. Este valor depende de la localización geográfica, de la estación, del día y de la hora. Por lo tanto, estas variaciones determinan el valor de la intensidad de la radiación solar y por ello existirán diferentes valores dependiendo de los mismos. Para determinar el ángulo en una localidad terrestre, tenemos que precisar la latitud, la longitud, el día del año y la hora.

El ángulo de incidencia, que definiremos por  $\delta$ , varía estacionalmente debido a la inclinación de la tierra sobre su eje de rotación durante su trayectoria en la orbita solar. Si la Tierra no tuviese ese ángulo de inclinación sobre su eje, el ángulo de incidencia seria igual a 0. Pero no es así, el ángulo de inclinación sobre su eje es de  $23,45^\circ$  y además varia desde + a - durante las estaciones del año. El ángulo de inclinación respecto al Sol es igual al ángulo formado entre el ecuador y la línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del Sol.

Este ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + d) \right]$$

Donde d es el día del año para el que determinaremos el ángulo de incidencia  $\delta$

$\delta$  es cero en los equinoccios, marzo 22 y septiembre 22.

$\delta$  es positivo en verano del hemisferio norte y negativo en el invierno en el hemisferio norte.

$\delta$  alcanza el máximo de  $+23,45^\circ$  en el hemisferio norte el 22 de junio o solsticio de verano

$\delta$  alcanza el mínimo de  $-23,45^\circ$  en el hemisferio norte el 22 de diciembre o solsticio de invierno

## 4. Ángulo de elevación y azimuth

### 4.1 El ángulo de elevación o altitud

El ángulo de elevación o altitud es el que forma el rayo solar que impacta una superficie con la línea del plano horizontal. Este ángulo varía para cada día del año y durante las horas del día, dependiendo de la latitud donde nos encontremos. El valor máximo del ángulo de elevación o altitud ocurre al mediodía y dependerá de la latitud y del ángulo de inclinación de la tierra sobre su eje. Podemos determinar el ángulo de elevación al mediodía mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = 90^\circ + \phi - \delta$$

donde ( $\alpha$ ) es función de la latitud y del ángulo de inclinación  $\delta$

**$\Phi$  es la latitud de la localidad.** Importante, será positiva en el hemisferio Norte y negativa en el hemisferio Sur.

**$\delta$**  es el ángulo de inclinación que como vimos, depende del día del año.

### 4.2 El ángulo de Azimut

Es el ángulo que va formando la trayectoria solar en el espacio desde que sale por el este, hasta que se pone por el oeste, medido respecto al norte o al sur. Si estamos en el hemisferio Norte, se mide respecto al Sur. Si estamos en el hemisferio Sur, medido respecto al Norte. El ángulo azimut varía a través de las horas del día. En los equinoccios, el sol sale exactamente desde el este y se pone por el oeste, completando un ángulo de  $90^\circ$  cuando esta sobre nuestras cabezas y de  $270^\circ$  cuando se pone. El azimut varía con la latitud y la época del año. Estudiemos como determinar la posición del sol durante el día.

Para determinar la posición del sol necesitamos conocer  $\delta$  que es el ángulo de inclinación y el ángulo azimut durante el día. Estos ángulos se calculan utilizando el tiempo solar. Convencionalmente, las regiones terrestres son divididas en diferentes zonas horarias. Por lo tanto, cuando el sol está en lo más alto del cielo, que es al mediodía, no coincidirán en el tiempo para las diferentes zonas horarias. El tiempo solar es único para cada longitud en particular. Consecuentemente con lo anterior, la posición solar estará determinada por el tiempo solar que se corresponde con la longitud y después por los ángulos de inclinación y azimut

### 4.3 Tiempo Solar en la localidad. (LST) y Tiempo Local (LT)

Las 12.00 del mediodía o Tiempo Solar Local (LST) se define cuando el Sol está en lo más alto en el cielo. El tiempo local (LT) generalmente varía respecto a LST producto de la excentricidad de la orbita terrestre y debido a los cambios horarios y ajustes en las zonas horarias o por ahorro de energía.

### 4.4 Tiempo standard del meridiano de Greenwich (LSTM)

(LSTM) se ha seleccionado como el meridiano de referencia y es similar a definirlo como el primer meridiano. A partir de él se definen las diferentes zonas horarias.

(LSTM) se calcula mediante la expresión:

$$\text{LSTM} = 15^\circ \times \Delta T_{\text{GMT}}$$

donde  $\Delta T_{\text{GMT}}$  es la diferencia en horas entre el tiempo de la localidad (LT) y el tiempo del meridiano de Greenwich (GMT).

### 4.5 Corrección del tiempo por la excentricidad terrestre. (EoT)

Esta expresión es empírica, su resultado se reporta en minutos y corrige la excentricidad de la orbita terrestre y su ángulo de inclinación.

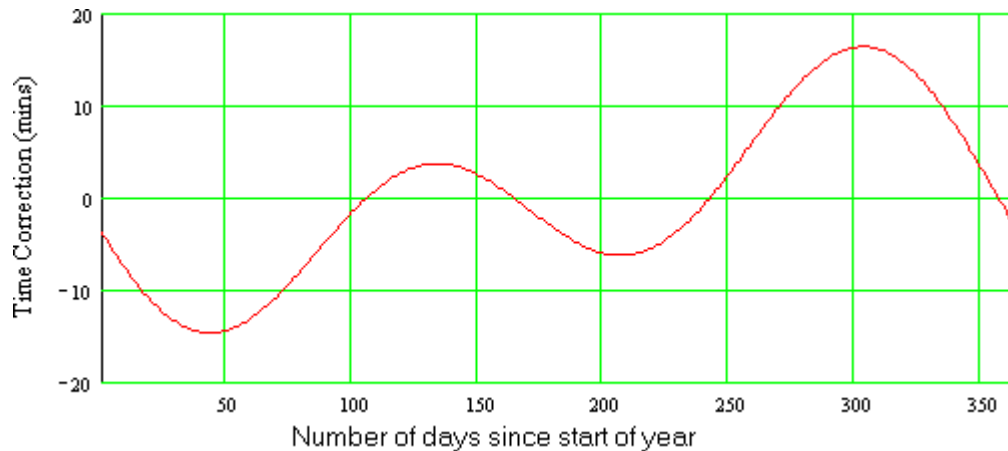
$$\text{EoT} = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

donde:

$$B = \frac{360}{365}(d - 81)$$

B es en grados y d es el numero d días del año. La gráfica de la ecuación se representa a continuación.





#### 4.6 Factor de Corrección del tiempo (TC)

El factor de corrección neto (en minutos) considera el Tiempo Solar de la Localidad o (LST) determinado por la longitud (valor abs.) que define la zona horaria e incorpora el factor de corrección (EoT) anterior.

$$T_{ime} C_{orrection} = 4(LSTM - Longitude) + EoT$$

La constante 4 minutos es basado en que la tierra rota 1° cada 4 minutos.

#### 4.7 Tiempo Solar de la Localidad (LST)

(LST) podemos determinarlo utilizando las correcciones anteriores para ajustar el tiempo de la zona o localidad (LT).

$$LST = LT + TC$$

#### 4.8 Ángulo horario (HRA)

No es más que los grados para cada hora en que el Sol se mueve en su trayectoria sobre la tierra. Convertimos el tiempo horario local en grados. Por definición es igual a cero al mediodía. La tierra rota 15° por hora, por lo que cada hora se corresponde con un movimiento solar de 15° en su trayectoria. Durante la mañana el ángulo horario es negativo y después del mediodía positivo.

$$HRA = 15^\circ (LST - 12)$$

#### 4.9 Inclinación

El ángulo de inclinación podemos determinarlo mediante la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + d) \right]$$

donde **d** es el número de días a lo largo del año.

#### 4.10 $\beta$ Elevación solar

El ángulo de elevación se puede determinar mediante:

$$\text{Elevation} = \sin^{-1} [\sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(HRA)]$$

El ángulo entre el sol y la vertical es el Zenith

$$\text{zenith} = 90^\circ - \beta$$

#### 4.11 Azimut

El Ángulo que se forma producto de la trayectoria solar durante el día respecto al Norte o al Sur considerando como convención el valor de  $0^\circ$  en el Norte y de  $180^\circ$  en el Sur, o lo inverso. El ángulo Azimut se calcula por:

$$\text{Azimuth} = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(\delta) \cos(\phi) + \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(HRA)}{\cos(\text{elevation})} \right]$$

#### 4.12 Saliente y poniente solar.

En la ecuación 4.10  $\beta$  (Elevación) =  $\sin^{-1} [\sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(HRA)]$

Cuando el Sol **sale** y se **pone** tenemos que el ángulo de elevación  $\beta=0$ , despejemos

$$\text{Entonces } \cos(HRA) = -[\sin(\delta) * \sin(\phi) / \cos(\delta) * \cos(\phi)] = [-\tan(\delta) * \tan(\phi)]$$

De donde el  $\cos^{-1}$  es el ángulo que buscamos (HRA), al cual habrá que corregirlo con el valor de TC, en horas

La hora salida del sol  $\text{hss} = 12\text{h} - [(HRA) / 15] - \text{TC}, \text{h}$

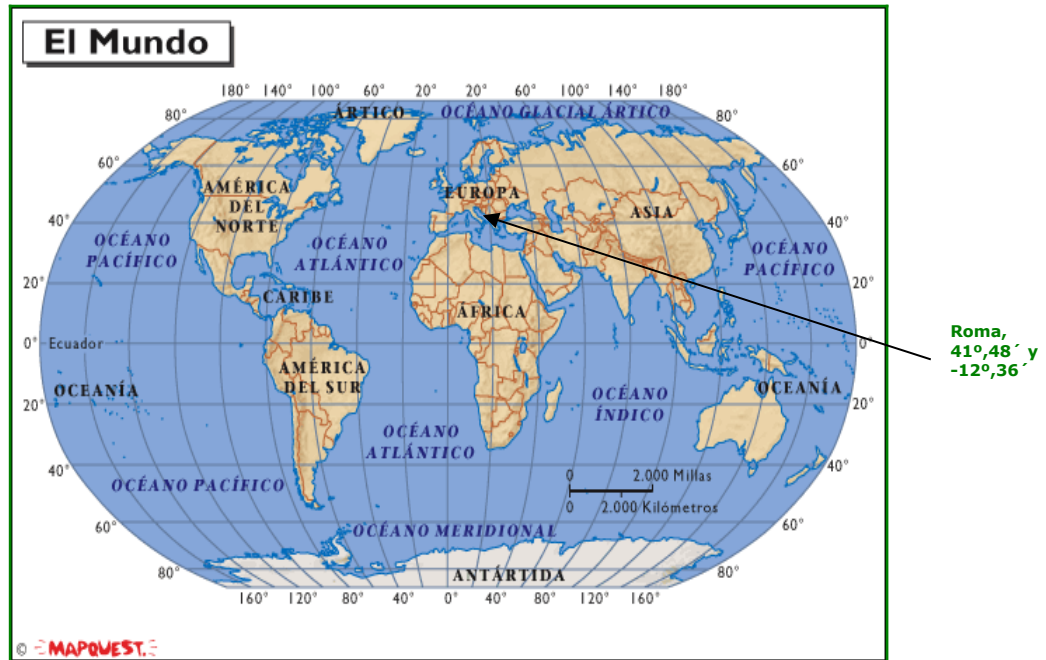
Y la hora en que se pone  $\text{hps} = 12\text{h} + [(HRA) / 15] - \text{TC}, \text{h}$

#### 4.13 Posición del Sol durante el día.

Ya hemos considerado todos los factores que intervienen en la determinación de la posición solar para cualquier latitud, longitud, estación, día y hora. Ahora tendremos que encontrar el ángulo de elevación  $\beta$  y el azimut a las diferentes horas del día que escojamos.

### 5. Trayectoria solar

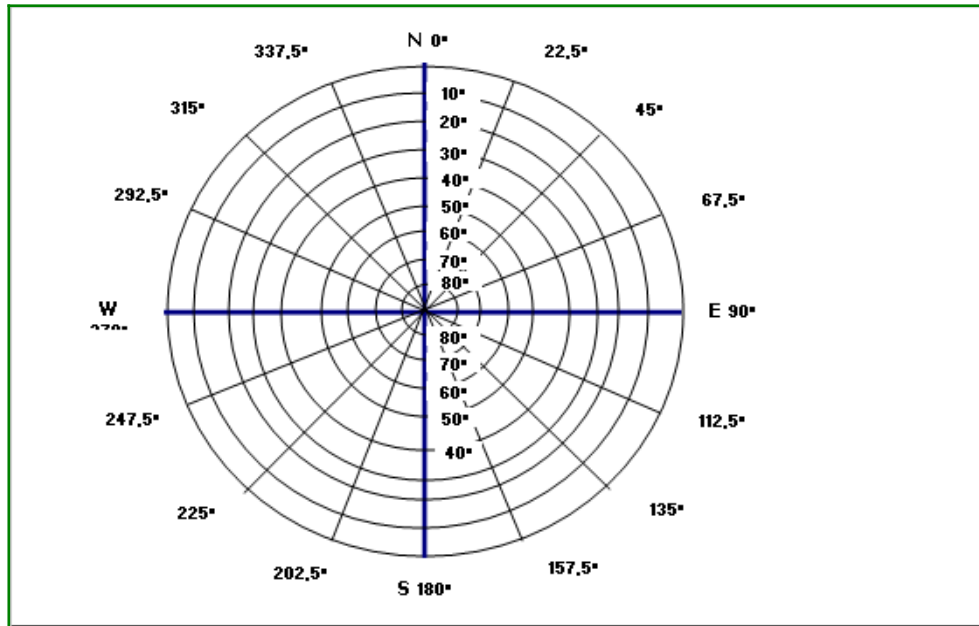
La **Figura 1** nos muestra a El Mundo, sus latitudes y longitudes.



**Figura 1 (gracias a Mapquest)**

El trazado de la trayectoria solar se realiza calculando y registrando en un gráfico espacial la posición del sol a cada hora del día, mediante coordenadas polares tomado como referencia una posición cardinal. Esta representación consiste en la proyección sobre un plano de las trayectorias solares de la bóveda celeste.

El gráfico espacial está compuesto por una serie de circunferencias concéntricas, espaciadas cada  $10^\circ$ , con centro en la intersección de los dos ejes perpendiculares. El eje vertical apunta al Norte terrestre y en sentido contrario al Sur (Ver Gráfico 1 más abajo). El eje horizontal apunta al Este en el sentido positivo y en dirección opuesta al Oeste. Las circunferencias concéntricas son representativas de las latitudes terrestres.



**Gráfico 1.** Diagrama Solar

El Diagrama Solar que construiremos representará la trayectoria solar relativa a **la ciudad de Roma, Italia**. En la **Figura 1**, anterior El Mundo y sobre el Plano, representamos su localización.

El procedimiento a seguir consiste primeramente, en registrar los datos o información primaria que necesitamos. El primer dato es la localidad respecto a la cuál determinaremos la trayectoria solar y para ubicarla geográficamente, necesitamos conocer su latitud, longitud y el uso horario respecto al Meridiano de Greenwich. Como datos que siguen en la información primaria, se necesita precisar el mes y el día del año para el cuál calcularemos la trayectoria solar. Para cada hora del día será necesario calcular, el ángulo de elevación y el ángulo de desplazamiento, conocido como Azimut. Las ecuaciones que se requieren para calcular cada uno de estos parámetros, han sido estudiadas anteriormente y ahora las iremos aplicando ordenadamente.

Para facilitar la tarea, se pueden realizar los cálculos programando estas fórmulas en una Tabla de Excel. La hoja de cálculo se puede dividir en dos partes, una superior donde se introduzca la información primaria y otra zona inferior, donde se realice el procesamiento y se muestren los resultados obtenidos. Cualquier especialista relacionado con la energía y por sus propios medios, podría construir una hoja de este tipo y tenerla a mano. Seguidamente iré mostrando las secciones de la hoja de cálculo que he diseñado en este Instructivo y en el epígrafe 5.1 posterior, la describiré.

Para realizar la tarea, seleccionaremos el **día primero de julio (día 182 del año)** y haremos los cálculos de la posición del Sol en intervalos de 1.00 h, desde el saliente hasta el poniente.

La información primaria para los cálculos se registra o introduce en el Formulario de entrada, en la zona del encabezamiento de la hoja de cálculo. A continuación muestro el Formulario de entrada.

INFORMACIÓN PRIMARIA	REGISTRO DE LA INFORMACIÓN	DATOS
Realizado por		
Fecha - (00/00/0000)		
Localidad, (ciudad)		<b>Roma</b>
<b>Registrar la Latitud, en grados y minutos. Negativa al Sur y positiva al Norte</b>		
Latitud, en grado (00°)		<b>41,00</b>
Latitud, en minutos ( 00 min)		<b>48,00</b>
<b>Registrar la Longitud, en grados y minutos. Negativa al Este y positiva al Oeste</b>		
Longitud, en grado (00°)		<b>-12,00</b>
Longitud, en minutos ( 00 min)		<b>-36,00</b>
<b>Mes, día y horas en la que se calculará la posición solar.</b>		
Año, (0000)		<b>2010</b>
Mes del año (0 a 12)		<b>7</b>
Día del mes (1 a 31)		<b>1</b>
<b>Registrar la hora del día, en horas y minutos</b>		
Hora del día ( de 1 - 24)		<b>6</b>
Minutos ( de 0 - 60)		<b>0</b>
<b>Uso horario respecto al Meridiano de Greenwich. Delante de GMT es positivo y detrás de GMT negativo</b>		
Hora Δ GMT (-12 a 12)		<b>1</b>

Como se puede observar, en la información primaria está incluida la hora (incluyendo minutos si se prefiere) para la cual se quiere conocer la posición del Sol relativa a la localidad. Con la información primaria anterior, el calculador realiza el procesamiento de los datos y muestra los parámetros característicos para ese día solar, entre ellos la hora a la que sale y se pone el Sol.

Más abajo hay una sección del calculador que está programada para procesar y mostrar los parámetros que caracterizan la posición del Sol en cada. Esos son los parámetros básicos que servirán para representarlos en el Diagrama Solar y construir la trayectoria solar. Estos son los valores que representaremos sobre el **Gráfico 1**.

El objetivo del calculador es facilitar el procesamiento numérico y mostrar las coordenadas horarias de la posición del Sol. Estas coordenadas están formadas por el ángulo de Elevación  $\beta$ , el ángulo **Azimut** y la hora fijada.

Ya conocemos que las circunferencias concéntricas del **Gráfico 1** representan las latitudes desde 0 a 80° en el hemisferio Norte - Sur, que son **positivas al Norte, negativas al Sur**, y las líneas diametrales representan las longitudes entre **0 y 360°**, las que son **positivas al Oeste y negativas al Este**. Por ello la posición elegida y donde nos encontraremos, Roma, Italia, tiene una **longitud negativa de -12°36'** y una **latitud positiva de +41°48'**. Roma tiene un horario +1.00 h (adelanto) respecto al Meridiano de Greenwich.

Por normativas, se ha fijado 0° en el Norte y 180° en el Sur. Si partimos del Norte, en sentido de las manecillas del reloj, el Este se encuentra a 90° y al Oeste a 270° desde el punto de referencia Norte. Como sabemos el Sol nace por el Este y se **pone por el Oeste**, encontrándose próximo sobre nuestras cabezas al mediodía. Si estamos observando desde el hemisferio Norte, su recorrido lo tendremos frente a nosotros, en el hemisferio Sur. Sólo en algunos meses del año la trayectoria corta la línea Este-Oeste y penetra en el hemisferio Norte, al salir y al ponerse, y

según en la localidad donde nos encontremos. Si realizamos la misma observación pero localizados en el hemisferio Sur, veremos el trazo del Sol sobre el hemisferio Norte.

Las fracciones de la latitud y longitud, se interpretan como minutos y a la inversa. Por ejemplo la latitud de 17° y 30' se considera como 17,5 y la fracción 17,5 se considera como 17°, 30'. Las regiones cuya localización están **al Este, tienen una longitud negativa, al Oeste positiva**. Debido a los cambios horarios **en la estación de verano** para el ahorro de energía, se debe restar 1 h del valor reportado en la zona horaria o  $\Delta$ GMT. Las localizaciones **al Este del meridiano de Greenwich, consideran  $\Delta$ GMT positivas y al Oeste negativas**. Anteriormente definimos que la latitud de la localidad **será positiva en el hemisferio Norte y negativa en el hemisferio Sur**.

Para representar el valor del ángulo Azimut sobre el Diagrama Solar, tendremos que tomar en cuenta que este ángulo toma valores a partir del eje Norte – Sur. Cuando el ángulo Azimut es menor a 90 ° a la salida del Sol, el astro en su camino parte del hemisferio norte y cruza el eje Este – Oeste.

Las líneas horarias (longitud) se representan mediante los arcos de color verde que interceptan en el plano espacial las circunferencias concéntricas de las latitudes y los radios o longitudes. Los puntos de intercepción de esta línea con la (latitud – longitud) nos sirven de posicionamiento de la trayectoria solar durante las horas del día.

Si en el proceso de cálculo anterior, como resultado obtenemos que a las 4:43 am sale el Sol, en ese momento el ángulo de elevación será cero y el ángulo Azimut tendrá el valor de 58,16 °. Este valor al ser menor a 90° nos indica que en este día y mes, el Sol parte del hemisferio Norte, entonces en su trayectoria cruzará la línea Este - Oeste. En nuestro plano espacial, y entre las curvas horarias 4 y 5 am, trazamos una nueva curva imaginaria que pase por 4:43 am. Si desde el centro de la circunferencia trazamos un radio con un ángulo de 58,16 ° respecto al eje Norte 0°, este radio cortará la línea imaginaria del tiempo. En la intercepción tendremos la posición del Sol en el saliente.

Para ubicar la posición a la hora que se pone el Sol, que para este mes y día ocurrirá a las 19:42, repetimos el procedimiento. Ahora el Azimut tiene un valor mayor a 270°, coincidiendo que también la trayectoria cruzará la línea Este – Oeste. Si calculamos el valor del Azimut, es de 301,81 °, relativo al eje que apunta al Norte. Representando ese punto en el Plano espacial, tendremos la ubicación por donde desaparece el Sol.

En cada hora, el calculador nos muestra dos valores de coordenadas, la hora y el ángulo Azimut. Se sigue el procedimiento anterior, hora a hora. Al final unimos los puntos representados en el plano espacial y obtenemos la curva del camino solar, para esa localidad, el mes y día del año.

### **5.1 Calculador - Trayectoria Solar**

A continuación copiamos una fotografía del **Calculador – Trayectoria Solar**, donde hemos registrado la información para la localidad seleccionada, **la ciudad de Roma, Italia** y se han procesado estos datos. Este sencillo calculador es capaz de realizar el complejo trabajo de determinar donde se encuentra el Sol.

**¿Qué información se obtiene de este Calculador?** Para cada hora solar, que abarca desde que sale Sol hasta que se pone, muestra el ángulo solar horario, el valor de la elevación del Sol y el valor del áng. Azimut. En el día, el factor de corrección del tiempo, la hora de salida y la hora



## TRAYECTORIA SOLAR - INGENIERÍA ENERGÉTICA GENERAL

Inst: Trayectoria Solar. IEG: 080927  
www.energianow.net

de puesta del Sol. Este es su encabezamiento o Formulario de entrada:

Ingeniería Energética General		
www.energianow.com		
CALCULADOR DE LA TRAYECTORIA SOLAR.		
INFORMACIÓN PRIMARIA	REGISTRO DE LA INFORMACIÓN	DATOS
Realizado por		
Fecha - (00/00/0000)		
<b>Localidad, (ciudad)</b>		<b>Roma</b>
<b>Registrar la Latitud, en grados y minutos. Negativa al Sur y positiva al Norte</b>		
Latitud, en grado (00°)		41,00
Latitud, en minutos ( 00 min)		48,00
<b>Registrar la Longitud, en grados y minutos. Negativa al Este y positiva al Oeste</b>		
Longitud, en grado (00°)		-12,00
Longitud, en minutos ( 00 min)		-36,00
<b>Mes, día y horas en la que se calculará la posición solar.</b>		
Año, (0000)		2010
Mes del año (0 a 12)		7
Día del mes (1 a 31)		1
<b>Registrar la hora del día, en horas y minutos</b>		
Hora del día ( de 1 - 24)		6
Minutos ( de 0 - 60)		0
<b>Uso horario respecto al Meridiano de Greenwich. Delante de GMT es positivo y detrás de GMT negativo</b>		
Hora Δ GMT (-12 a 12)		1

Con esta información, se obtienen las salidas que son comunes para las horas del día solar:

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	
Número de días desde el inicio del año	182
Corrección por excentricidad terrestre. (EoT), min	-3,4723
Tiempo estándar del meridiano de Greenwich (LSTM)	-15,0000
Factor de corrección (neto) del tiempo (TC) ,min	-13,0723
LST, en horas	5:46
Ángulo horario HRA	-93,2681
Ángulo de inclinación, °	23,1204
Elevación solar °	12,8640
Azimut °	70,36
Salida del Sol	4:43
Puesta del Sol	19:42

En esta segunda sección de impresión de resultados, el calculador muestra la información horaria del posicionamiento del Sol.

**POSICIÓN DEL SOL DURANTE LAS HORAS SOLARES DEL DÍA.**

Horas	LST	Ang. Horario	Altitud	Azimut
4	3:46	-123,2681	-6,5672	50,7174
5	4:46	-108,2681	2,6831	60,9605
6	5:46	-93,2681	12,8640	70,3600
7	6:46	-78,2681	23,6486	79,4267
8	7:46	-63,2681	34,7583	88,8150
9	8:46	-48,2681	45,8969	99,5375
10	9:46	-33,2681	56,6118	113,5428
11	10:46	-18,2681	65,8908	135,1082
12	11:46	-3,2681	71,1218	170,6742
13	12:46	11,7319	68,9075	211,3081
14	13:46	26,7319	60,9323	238,3746
15	14:46	41,7319	50,6569	254,9388
16	15:46	56,7319	39,6289	266,7594
17	16:46	71,7319	28,4657	276,5694
18	17:46	86,7319	17,5060	285,6822
19	18:46	101,7319	7,0258	294,8679
20	19:46	116,7319	-2,6751	304,6864
21	20:46	131,7319	-11,2239	315,5965
22	21:46	146,7319	-18,1506	327,9331

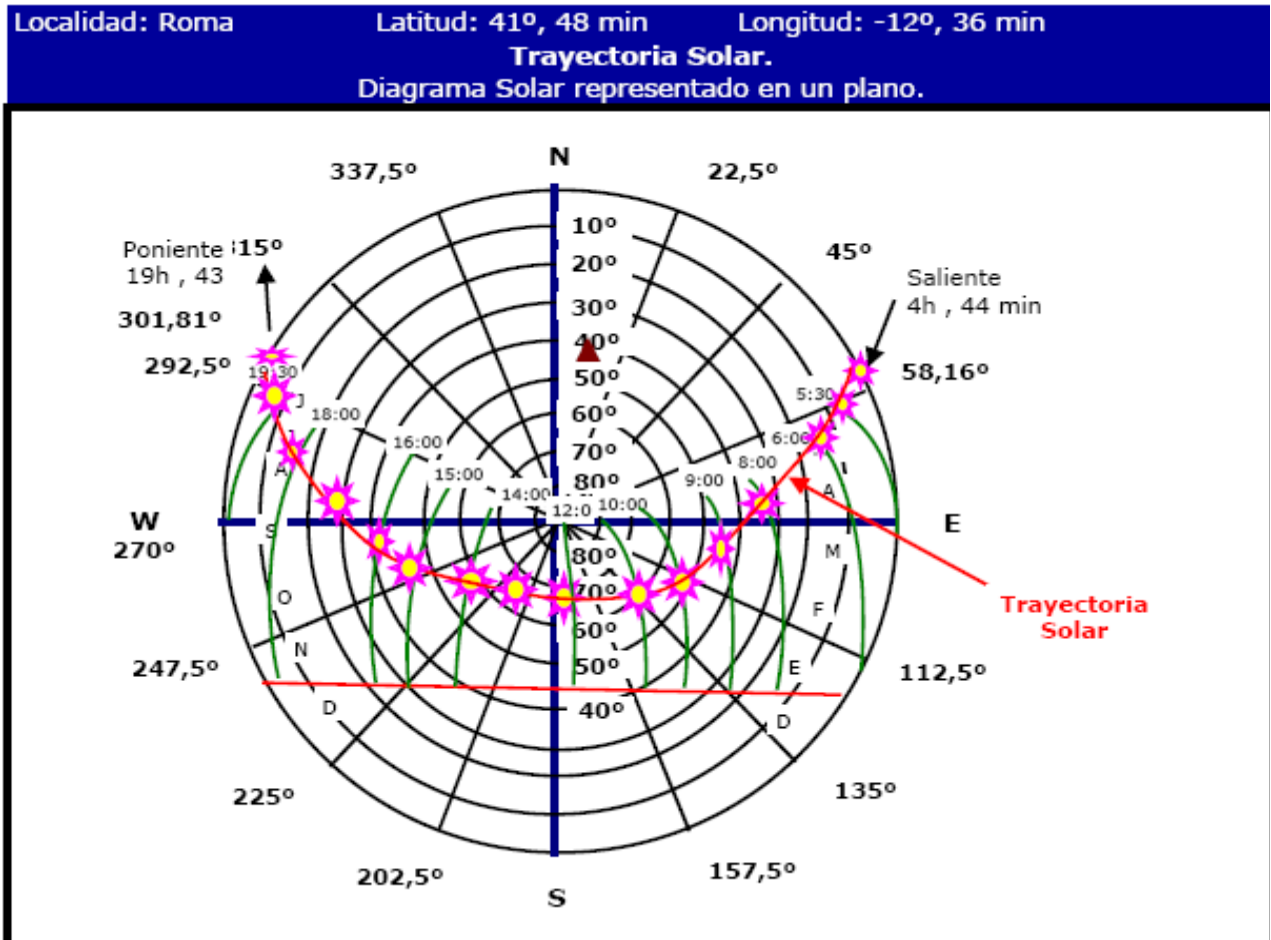
Si ya se ha construido el Diagrama Solar sobre un plano espacial, en una hoja formato A4 o de carta, ya estará listo para registrar la posición horaria del Sol y trazar su trayectoria durante el día. En este ejemplo, el procedimiento lo he realizado en una hoja formato carta, y copio la foto más abajo.



**5.2 Trazado de la Trayectoria Solar sobre el Diagrama Solar.**

Día 1º de julio, Ciudad de Roma, Italia.

**Gráfico 1**



Los puntos rojos y centro amarillo  representan la posición del Sol a las horas del día para las que calculamos la trayectoria. El triángulo marrón,  en la posición

de **Latitud 41º,48'** y **Longitud -12º,36'** representa nuestra ubicación en **Roma, Italia**. El trazo en rojo la trayectoria que siguió el Sol desde el saliente hasta el poniente.

Si realizamos estos mismos cálculos para los días primero de cada mes, veremos coincidencia entre los meses de Enero-Noviembre; Febrero-Octubre; Marzo-Septiembre; Abril-Junio. Eso es debido que son imágenes unas de otra puesto que la tierra gira sobre su eje mientras sigue la elíptica alrededor del Sol, y esta inclinación es de 23,011º. Veamos nuevamente y comparemos las siguientes fotos que ilustran como el ángulo de declinación cambia desde ±23,011º respecto a la vertical, pasando por cero en los equinoccios y por el máximo en los solsticios.



Con esto damos por terminado el objetivo de este Instructivo que es el de mostrar el procedimiento a seguir para el trazado de la Trayectoria Solar, conocida la Latitud y Longitud donde nos encontramos y definiendo las horas y el día para el cual queremos conocer el posicionamiento del astro.

## 6. Conclusiones

En el desarrollo de este instructivo hemos explicado como construir el diagrama solar y expuesto las herramientas que se utilizan para ello.

La importancia de que el Ingeniero Energético General maneje con confianza estos conceptos, complementan su trabajo para las aplicaciones donde el Sol juega el rol principal con relación a nuestro Planeta, que es la de servirnos de fuente de energía, proveernos en cantidad suficiente sin impactar negativamente sobre el medio ambiente, facilitándonos el desarrollo y las condiciones de vida. Conocer y saber utilizar la radiación solar que la naturaleza nos regala, es una fortaleza de conocimientos para el ingeniero que tiene que buscar soluciones prácticas en un mercado creciente, donde existe una demanda exponencial de las nuevas tecnologías que utilizan el Sol como fuente energética. Las cifras mundiales de inversiones que crecen por año así lo demuestran. Hoy se multiplican desde simples captadores térmicos o fotovoltaicos en los hogares hasta grandes Plantas de Energía Solar Concentrada que generan electricidad a gran escala para ciudades completas. Para el proyecto, operación y mantenimiento de tales sistemas, los de pequeña y gran capacidad, se requiere el dominio de esta fuente de energía natural, conocer el potencial de la radiación solar y como aprovecharla en mayor proporción, tener dominio de la trayectoria que sigue el Sol en cada hora del día, con la finalidad de extraer el máximo aprovechamiento de los sistemas que emplean la energía solar. Por lo general, para las grandes instalaciones concentradoras y fotovoltaicas, se reservan invertir en instalar sistemas automáticos de seguimiento de la trayectoria solar (solar tracking), los que requieren de la vigilancia, ajuste y control del personal de operación, así de conocer como realizar su correcta selección y montaje.

No se puede obviar la importancia que tiene esta aplicación en la Arquitectura Bioclimática y Ambiental, para la correcta utilización de la iluminación natural. El uso de la iluminación natural produce ahorros sensibles en los consumos de electricidad, pero a su vez tienen que ser balanceados con el aumento del calor que se genera dentro de los locales, que en ocasiones obliga a emplear climatización para el confort interior. Por otra parte, de colocarse superficies acristaladas hay que cuidar no reflejar la radiación calórica sobre espacios reservados para el descanso o paseos públicos, u otros edificios, invadiendo fronteras y violando las regulaciones y exigencias establecidas que prohíben estas irregularidades.

El procedimiento de cálculo aquí empleado es semiautomático, muy sencillo, basado en una Tabla Excel, por ser éste un SW de amplia divulgación global y de conocimiento. También existen SW de cálculos para determinar la trayectoria solar

que pueden ser adquiridos por diferentes vías y es posible que en Internet se encuentren algunos calculadores que ofrecen soluciones parciales, no siempre con iguales resultados.

Será de gran utilidad que el Ingeniero Energético cuente con su propio calculador. Diseñarlo y construirlo le ayudará a comprender mejor el enorme potencial natural que nos ofrece el Sol y la forma de emplearlo convenientemente en función de la eficiencia energética, de la sustitución de fuentes fósiles de energía y con ello influir para reducir el impacto negativo que tiene el uso de energías sucias sobre nuestro medio ambiente.

## 7. Bibliografía

- 1) <http://www.sel.me.wisc.edu/>. University Wisconsin-Madison Solar Energy Laboratory
- 2) <http://www.sij.fh-aachen.de/> Solar Institut Juelich Germany.
- 3) <http://www.ases.org>. American Solar Energy Society
- 4) <http://www.ies-def.upm.es/> Institute of energy and sustainable development  
<http://www.nrel.gov/ncpv/> National Center for Photovoltaics
- 5) <http://userwww.sfsu.edu/~ciotola/solar/> National Solar Power Research Institute, Inc.
- 6) <http://www.nmsea.org/> New Mexico Solar Energy Association
- 7) <http://www.ncsc.ncsu.edu/> North Carolina Solar Center
- 8) <http://www.photonics.com> Photonics Spectra Magazine
- 9) <http://www.solarenergycentre.com/> Solar Energy Centre Denmark
- 10) <http://www.pv.unsw.edu.au/>. University of New South Wales. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications.  
Christiana Honsberg & Stuart Borden.
- 11) <http://rredc.nrel.gov/solar/> Solar Radiation Resource Information
- 12) <http://www.ecobuild.com/> EcoBuild
- 13) <http://www.ujaen.es/investiga/solar> Guía Solar GreenPeace 2003
- 14) <http://www.ece.gatech.edu/research/UCEP/> University of Florida - Solar Energy and Energy Conversion Laboratory
- 15) <http://www.eere.energy.gov/> U.S. Department of Energy Photovoltaics Program
- 16) <http://www.renewable-energy-world.com> Renewable Energy World. Magazine
- 17) <http://www.ipcc.ch> IPCC - OMM - PNUMA



El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General sobre el Autor. Este, Juan Domingo, tiene más de 30 años de experiencia en actuaciones en sistemas y equipos energéticos, tanto en los que utilizan energía fósil como fuentes renovables. Se inició como operador, posteriormente como Gerente Técnico en la Industria de Conversión y Refinación de los Combustibles. Ha sido fundador y Gerente Técnico de varios Equipos de Ingeniería Energética dirigidos al Proyecto, Montaje y los Servicios Técnicos en los Sistemas de Calor y Frío, abarcando la generación, distribución y uso del vapor y el agua caliente en mediana y pequeñas instalaciones, hasta 10 bar de presión; y en los sistemas de Frío las bajas temperaturas (refrigeración y producción de hielo industrial), medianas temperaturas (conservación) y altas temperaturas (Aire Acondicionado) para instalaciones industriales y comerciales. Ha realizado múltiples actuaciones en proyectos, ejecución y servicios de Ingeniería Energética General.

**ANEXO**

Latitud, Longitud y Zona Horaria de algunas ciudades y países.

PAÍS	LATITUD	LONGITUD	ZONA HORARIA
<b>ARGENTINA</b>			
Buenos Aires	34° 35' S	58° 29' W	GMT-0300
Cordoba	31° 22' S	64° 15' W	GMT-0300
Tucuman	26° 50' S	65° 10' W	GMT-0300
<b>AUSTRALIA</b>			
Adelaide	34° 56' S	138° 35' E	GMT+0930
Alice Springs	23° 48' S	133° 53' E	GMT+0930
Brisbane	27° 28' S	153° 2' E	GMT+1000
Darwin	12° 28' S	130° 51' E	GMT+0930
Melbourne	37° 49' S	144° 58' E	GMT+1000
Perth	31° 57' S	115° 51' E	GMT+0800
Sydney	33° 52' S	151° 12' E	GMT+1000
<b>BRAZIL</b>			
Brasilia	15° 52' S	47° 55' W	GMT-0300
Porto Alegre	30° 2' S	51° 13' W	GMT-0300
Sao Paulo	23° 33' S	46° 38' W	GMT-0300
<b>CHINA</b>			
Shanghai	31° 12' N	121° 26' E	GMT+0800
<b>ECUADOR</b>			
Guayaquil	1° 0' S	79° 53' W	GMT-0500

**TRAYECTORIA SOLAR - INGENIERÍA ENERGÉTICA GENERAL****Inst: Trayectoria Solar. IEG: 080927**

www.energianow.net

Quito	0° 13' S	78° 32' W	GMT-0500
<b>EGYPT</b>			
Cairo	29° 52' N	31° 20' E	GMT+0200
<b>FRANCE</b>			
Paris	48° 49' N	2° 29' E	GMT+0100
<b>INDIA</b>			
Bombay	18° 54' N	72° 49' E	GMT+0530
Calcutta	22° 32' N	88° 20' E	GMT+0530
<b>INDONESIA</b>			
Jakarta	6° 11' S	106° 50' E	GMT-0700
<b>IRAQ</b>			
Baghdad	33° 20' N	44° 24' E	GMT+0300
<b>ITALY</b>			
Milan	45° 27' N	9° 17' E	GMT+0100
Rome	41° 48' N	12° 36' E	GMT+0100
<b>JAPAN</b>			
Tokyo	35° 41' N	139° 46' E	GMT+0900
<b>KENYA</b>			
Nairobi	1° 16' S	36° 48' E	GMT+0300
<b>RUSSIA</b>			
Moscow	55° 46' N	37° 40' E	GMT+0300
<b>SOUTH AFRICA</b>			
Cape Town	33° 56' S	18° 29' E	GMT+0200
Pretoria	25° 45' S	28° 14' E	GMT+0200
<b>SOUTH KOREA</b>			
Seoul	37° 34' N	126° 58' E	GMT+0900
<b>U_KINGDOM</b>			
London	51° 29' N	0° 0' W	GMT+0000
Edinburgh	55° 55' N	3° 11' W	GMT+0000
<b>VENEZUELA</b>			
Caracas	10° 30' N	66° 56' W	GMT-0400

