

Estudio entre perpendicularidad y captación de la radiación solar.

Study between perpendicularity and capture of solar radiation.

Presentación: 26/10/ 2023

Laura Aquino
Facultad Regional Reconquista – UTN
lauraa1uino9.ok@gmail.com

Melani Alvarez
Facultad Regional Reconquista – UTN
melanianaalvarez3334@gmail.com

Resumen:

Este trabajo consiste en un estudio comparativo entre el porcentaje de perpendicularidad a los rayos solares en el año que ofrece una instalación de paneles fotovoltaicos fijos respecto al porcentaje de radiación solar global captado por dicha instalación. Este análisis se realizó para el día de inicio de cada estación y por cada hora en una franja horaria entre las 6hs y las 18hs, mediante el concepto de porcentaje de perpendicularidad que ofrece la superficie de un panel a los rayos solares y del concepto de captación de radiación solar global por dicha superficie, usando geometría solar y el programa PV LIGHTHOUSE respectivamente. De esta manera los valores obtenidos mediante el programa de cálculo de captación de radiación global son mayores que el porcentaje de perpendicularidad que ofrece la superficie de un panel a los rayos solares según la geometría solar, estos son; 71,98% respecto a un 42,69%.

Palabras clave: Energía Solar, Radiación solar

Abstract:

This work consists of a comparative study between the percentage of perpendicularity to the sun's rays in the year offered by an installation of fixed photovoltaic panels with respect to the percentage of global solar radiation captured by said installation. This analysis was carried out for the start day of each station and for each hour in a time slot between 6 a.m. and 6 p.m., using the concept of the percentage of perpendicularity that the surface of a panel offers to the sun's rays and the concept of collection. of global solar radiation on said surface, using solar geometry and the PV LIGHTHOUSE program respectively. In this way, the values obtained through the global radiation capture calculation program are greater than the percentage of perpendicularity that the surface of a panel offers to the solar rays according to the solar geometry, these are; 71.98% compared to 42.69%.

Keywords: Solar energy, Solar radiation

Introducción

El presente trabajo consiste en un estudio basado en una comparativa de porcentajes, en una instalación fotovoltaica fija instalada en la ciudad de Reconquista en el año, entre el porcentaje de captación del espectro de radiación solar global empleando como programa de cálculo el PV LIGHTHOUSE, y el porcentaje de perpendicularidad que ofrece la misma a los rayos solares mediante el empleo de principios de geometría solar. Para la determinación del espectro de radiación solar captado por la instalación fotovoltaica por medio del programa citado, el mismo determina el porcentaje de radiación en condiciones de cielo despejado, para lo cual el usuario debe establecer; la ubicación (Latitud y Longitud) y orientación del módulo (ángulo de inclinación respecto al suelo y ángulo de azimut respecto al Norte geográfico), la hora del día, el día y el mes del año y las condiciones atmosféricas, todo esto en la interfaz del programa. Luego, la calculadora determina los componentes directo, difuso y su suma (global) de la radiación espectral que incide en la instalación FV. Para el caso del enfoque de perpendicularidad que ofrece la superficie del panel a los rayos solares se han aplicados los conceptos de geometría solar en función a las mismas variables que intervienen en el uso del programa, salvo las condiciones atmosféricas, ya que se basa en el movimiento aparente del Sol y por ende en las variables que intervienen en dicho movimiento. Ambos estudios se han realizado para los días de inicio de cada estación, 4 en total, y por cada hora en una franja horaria entre las 6hs y las 18hs.

Desarrollo

1. *En base al programa PV LIGHTHOUSE, versión 1.1.1, 17 de febrero de 2014, el cual posee una interfaz de usuario como se muestra en la Figura 1, se tiene:*

Datos de **ENTRADAS**:

- **Fechas y horas;** las cuales se tomaron para el año 2021 y los meses y días los correspondientes al inicio de cada estación; Equinoccio de otoño, Solsticio de invierno, Equinoccio de primavera y Solsticio de Verano correspondientes a las fechas; 21/03, 21/06, 21/09 y 21/12 respectivamente. En lo que respecta a las horas determinadas para el cálculo del espectro de radiación solar se emplearon cada hora de un intervalo de franja horaria entre las 6h y las 18h.
- **Ubicación del Módulo;** se especificó como ubicación la de la ciudad de Reconquista de la Provincia de Santa Fé, que es el lugar donde se desarrolla el proyecto, con valores de Latitud igual a -29° y de Longitud -59° . En lo que respecta a la orientación del módulo se emplea dos ángulos para definir al mismo y que son, el ángulo de inclinación (β) respecto al nivel del suelo (horizontal) y el ángulo de azimut (γ) que indica su orientación respecto al Norte geográfico, ambos ilustrados en la siguiente Figura 2.

Datos para contemplar:

- B: ángulo de inclinación igual a la Latitud del emplazamiento 29° .
- γ : ángulo de azimut igual a 0° respecto al Norte.

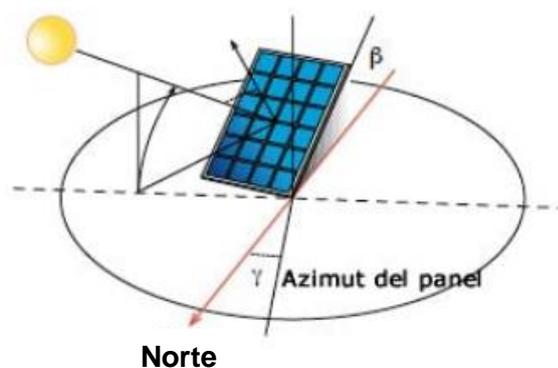


Figura 2, ángulos que definen la orientación de un módulo FV.
Recuperado de: <https://www.sunalizer.es/post/orientacion-paneles-solares>.

El programa contempla el Este a un valor de ángulo de 90°, el Norte igual a 360° y el Oeste 270°.

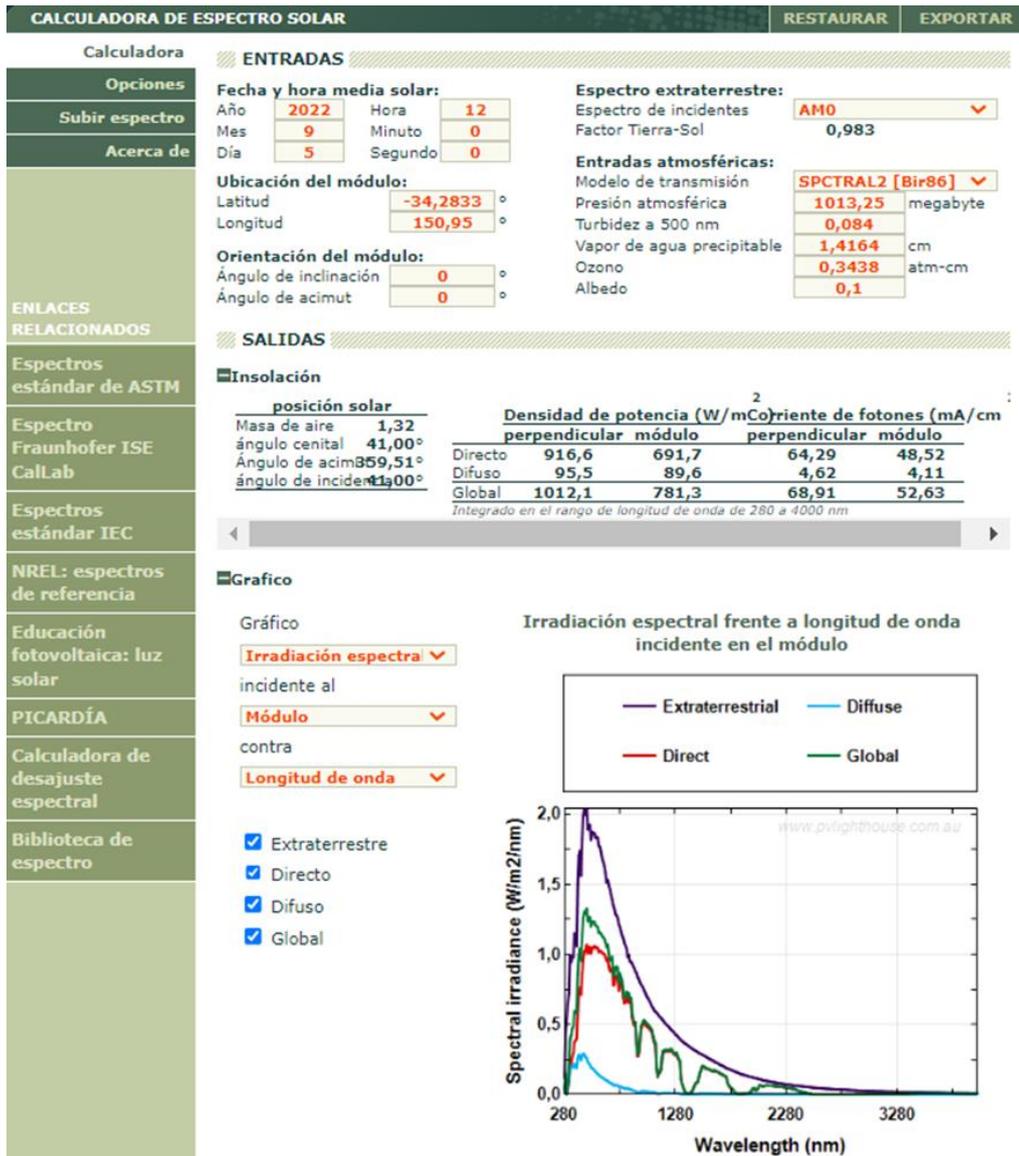


Figura 1, captura de imagen del entorno de interfaz de usuario de PV LIGHTHOUSE.

En la interfaz de **SALIDAS** se describirán los datos empleados para el objetivo del trabajo;

- **Espectro de radiación solar;** en sus componentes directa y difusa, en el cual el valor Global resulta de la suma de las anteriores, donde se visualiza los valores en la Tablas 2 y en la figura 3 correspondiente. Estos valores son hallados por integración del área en la gráfica de la Figura 1, en el cual se emplea la Irradiancia o “Potencia instantánea de Radiación Solar” por unidad de área (W/m²/nm) en la ordenada y en función del rango de longitud de onda entre 280nm a 4.000nm en la abscisa, el valor que se adopta del programa es el mostrado en la sección “Módulo”. Cabe aclarar que los paneles FV tradicionales de celdas de Silicio; Monocristalinos, Policristalinos y Amorfo trabajan en el espectro de luz visible más una pequeña porción de luz ultravioleta (300nm a 700nm).

		Irradiancia (W/m ²) sobre una superficie fija a 29° de inclinación													
		Angulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)90° 6h	(-)75° 7h	(-)60° 8h	(-)45° 9h	(-)30° 10h	0° 11h	15° 12h	30° 13h	45° 14h	60° 15h	75° 16h	90° 17h	18h	Promedios
171	Invierno	0,00	3,00	311,30	556,20	739,90	855,50	896,70	860,80	750,20	571,00	330,20	21,10	0,00	453,53
264	Primavera	8,00	233,00	500,00	738,10	921,20	1033,10	1064,80	1013,60	883,80	685,90	438,10	171,00	0,00	591,58
355	Verano	29,20	244,90	489,60	713,00	888,70	999,80	1036,50	995,90	881,20	702,70	477,50	232,70	21,00	593,28
80	Otoño	0,00	173,50	445,70	697,50	898,20	1029,50	1080,70	1047,80	933,30	746,50	503,80	231,80	4,40	599,44
Promedio Anual															559,46

Tabla 2, valores de Irradiancia (W/m²) para una instalación con una inclinación de 29° para los días de inicio de cada estación en una franja horaria de 6h a 18h para un panel inclinado igual a la Latitud del lugar.

Los valores mostrados en la tabla 2 (Irradiancia), fueron obtenido para cada día de inicio de cada estación y en una franja horaria entre las 6h y las 18h mostrados en el programa en la sección “Salidas, Densidad de Potencia (columna módulo)” en lo que respecta a la radiación solar captada por la superficie de un panel inclinado un ángulo igual a la Latitud del lugar (29°), y que resulto ser de promedio anual igual a $559,46 \text{ W/m}^2$. A la vez estos valores y por cada estación y hora se muestran representados en la Figura 3 siguiente.

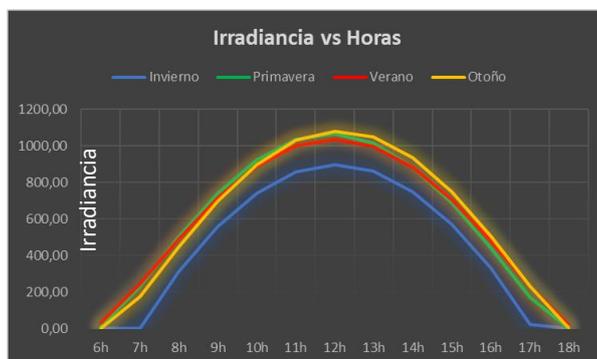


Figura 3. Valores de Irradiancia vs horas para el día de inicio de cada estación incidente sobre la superficie de un panel fijo inclinado un ángulo igual a la Latitud del Lugar (29°).

De los valores mostrados en la tabla 3 siguiente sobre Densidad de Radiación Global (W/m^2), donde también fueron obtenido para cada día de inicio de cada estación y en una franja horaria entre las 6h y las 18h, son mostrados en el programa en la sección “Salidas, Densidad de Potencia (columna perpendicular)” en lo que respecta a la radiación global captada por la superficie del suelo, de lo cual resulto ser de un promedio anual igual a $777,17 \text{ W/m}^2$.

		Densidad de Radiación global (W/m^2) incidente en la superficie del suelo														
en el a	Estación	Angulo horario/Horario														Promedios
		(-)90° 6hs	(-)75° 7hs	(-)60° 8hs	(-)45° 9hs	(-)30° 10hs	(-)15° 11hs	0° 12hs	15° 13hs	30° 14hs	45° 15hs	60° 16hs	75° 17hs	90° 18hs		
171	Invierno	0,00	6,60	579,60	785,10	880,30	925,30	939,20	927,10	884,70	794,10	600,40	55,40	0,00	567,52	
264	Primavera	60,20	666,90	874,80	973,90	1025,00	1049,20	1055,30	1045,40	1016,00	956,40	840,20	585,20	0,00	780,65	
355	Verano	612,80	872,00	998,50	1067,60	1105,40	1124,00	1129,40	1123,40	1104,40	1065,00	993,90	863,20	592,70	973,25	
80	Otoño	0,00	587,20	850,20	969,40	1030,60	1060,60	1070,70	1064,20	1039,10	986,10	883,10	665,70	27,10	787,23	
Promedio Anual															777,17	

Tabla 3, valores de Densidad de Radiación Global (W/m^2) incidente en la sup. del suelo en una franja horaria de 6h a 18h.

Del valor promedio anual dado en las dos tablas 2 y 3 sobre; la Irradiancia captada por la superficie del panel inclinado 29° y sobre la Radiación global recibida por el suelo respectivamente, se observa que el porcentaje captado por el panel en función al valor recibido por la superficie terrestre como promedio anual es de un 71,98%.

2. *Empleando geometría solar se tiene sobre el concepto de perpendicularidad de los rayos solares a la superficie del panel:*

Según la figura 4 siguiente se tienen las siguientes variables a contemplar:

Θ_2 : Angulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel.

Ψ : Angulo acimutal de la superficie respecto a la orientación del panel respecto al Norte.

β : Angulo de inclinación del panel respecto al plano del suelo de referencia.

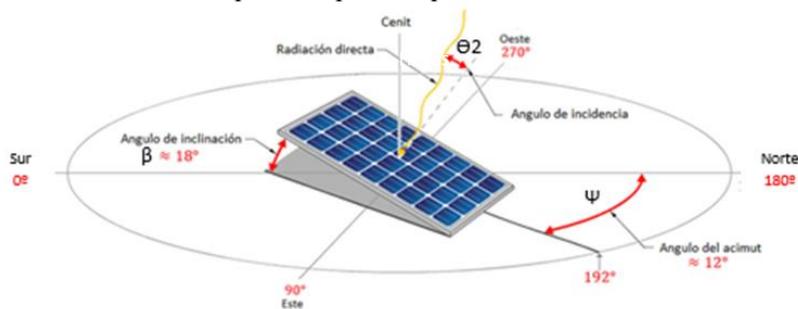


Figura 4. Variables en la incidencia de radiación solar sobre un panel.

Para averiguar el ángulo de incidencia de los rayos solares Θ_2 respecto a la normal del panel se emplea la ecuación² (2) siguiente:

$$\cos \theta_2 = \cos(\beta) \cos(z) + \text{sen}(\beta) \text{sen}(z) \cos(\Phi - \psi) \quad (2)$$

Además, “z” (ángulo Cenital) resulta de la expresión¹ (3) siguiente:

$$\cos z = \cos(\delta) \cos(L) \cos(H) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(L) \quad (3)$$

Y también Φ , que es el ángulo acimutal, resulta de la expresión¹ (4):

$$\text{sen } \Phi = \frac{\cos(\delta) \text{sen}(H)}{\cos(a)} \quad (4)$$

A la vez se obtiene “a” (ángulo de altitud solar), que resulta de la expresión¹ (5):

$$\text{sen } a = \cos(\delta) \cos(L) \cos(H) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(L) \quad (5)$$

Donde:

L: Angulo de Latitud del lugar donde se emplaza el proyecto.

H: Angulo horario, tomándose 15° por cada hora, arrancando por -90° para las 6h y finalizando con 90° a las 18h.

δ : Angulo de declinación que forman los rayos solares con el plano del Ecuador, 0° en los Equinoccios y 23,53° para los Solsticios, siendo este valor negativo para el Solsticio de Verano.

Las variables por calcular a partir de las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 fueron determinadas para cada día de inicio de cada estación y para cada hora en una franja de 6h a 18h.

Los ángulos dados por la ecuación (2) son representados en la tabla 4 siguiente:

Angulo con la normal a la superficie Fija a 30°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90° 6h	(-)75° 7h	(-)60° 8h	(-)45° 9h	(-)30° 10h	(-)15° 11h	0° 12h	15° 13h	30° 14h	45° 15h	60° 16h	75° 17h	90° 18h
171	Invierno	90,00	76,26	62,69	49,55	37,39	27,59	23,44	27,59	37,34	49,55	62,69	76,26	90,00
263	Primavera	90,00	75,00	60,00	45,00	30,00	15,00	0,50	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
355	Verano	90,00	76,26	62,69	49,55	37,39	27,61	23,45	27,61	37,39	49,55	62,69	76,26	90,00
80	Otoño	90,00	75,00	60,00	45,00	30,00	15,00	0,68	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00

Tabla 4. Valores del ángulo de la incidencia solar sobre la normal de la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario en una franja de 6h hasta las 18h.

El método empleado para calcular el porcentaje de incidencia de radiación solar sobre una superficie se determinó mediante coeficientes a través de la relación³ (6) siguiente:

$$\text{Coef. de incidencia} = 1 - \frac{\theta_2}{90^\circ} \quad (6)$$

Estos coeficientes resultan de aplicar la ecuación³ (6) a cada día de inicio para cada estación y para cada ángulo horario según el valor que adopta Θ_2 , representados estos en la tabla 4 anterior y obtenidos según la ecuación (2). Los valores obtenidos para los coeficientes de incidencia según el empleo de la (6) se muestran en la tabla 5 siguiente.

Coef. de captación respecto a la Normal para una superficie Fija a 30°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90° 6h	(-)75° 7h	(-)60° 8h	(-)45° 9h	(-)30° 10h	(-)15° 11h	0° 12h	15° 13h	30° 14h	45° 15h	60° 16h	75° 17h	90° 18h
171	Invierno	0,00	0,15	0,30	0,45	0,58	0,69	0,74	0,69	0,59	0,45	0,30	0,15	0,00
264	Primavera	0,00	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	0,99	0,83	0,67	0,50	0,33	0,17	0,00
355	Verano	0,00	0,15	0,30	0,45	0,58	0,69	0,74	0,69	0,58	0,45	0,30	0,15	0,00
80	Otoño	0,00	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	0,99	0,83	0,67	0,50	0,33	0,17	0,00

Tabla 5. Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario en una franja de 6h hasta las 18h.

Los valores de coeficientes de captación en función de las horas, expresados en la tabla 5, se expresan a continuación en porcentajes mediante la siguiente relación³ (7) y mostrados en la Tabla 6 siguiente y su correspondiente Figura 5:

$$\% \text{Captación} = 100\% \times \text{Coeficiente de Capt.} \quad (7)$$

		Porcentaje de captación para una superficie fija a 30° de inclinación														
		Angulo horario/Horario														
Día en el año	Estación	(-)90° 6h	(-)75° 7h	(-)60° 8h	(-)45° 9h	(-)30° 10h	(-)15° 11h	0° 12h	15° 13h	30° 14h	45° 15h	60° 16h	75° 17h	90° 18h	Promedios	
171	Invierno	0,00	15,27	30,34	44,94	58,46	69,34	73,96	69,34	58,51	44,94	30,34	15,27	0,00	39,29	
264	Primavera	0,00	16,67	33,33	50,00	66,67	83,33	99,44	83,33	66,67	50,00	33,33	16,67	0,00	46,11	
355	Verano	0,00	15,27	30,34	44,94	58,46	69,32	73,94	69,32	58,46	44,94	30,34	15,27	0,00	39,28	
80	Otoño	0,00	16,67	33,33	50,00	66,67	83,33	99,25	83,33	66,67	50,00	33,33	16,67	0,00	46,10	
Promedio Anual		0,00	15,97	31,84	47,47	62,56	76,33	86,65	76,33	62,58	47,47	31,84	15,97	0,00	42,69	

Tabla 6. Valores de porcentajes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario en una franja de 6h hasta las 18h.

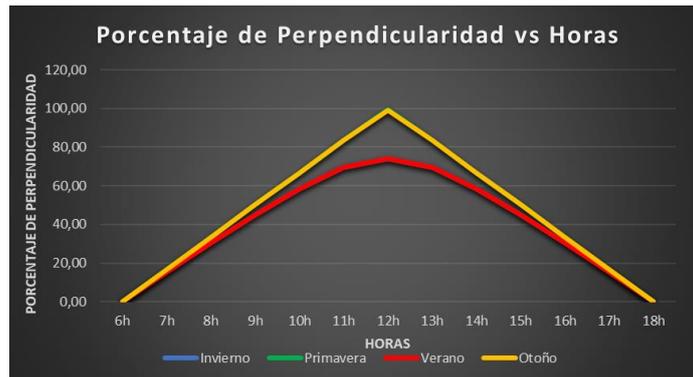


Figura 5. Porcentaje de perpendicularidad en el año.

El grado de perpendicularidad que ofrece la superficie del panel en todo el año mostrado en la tabla 6 y su correspondiente figura 5 es de 42,69% y se puede observar que, las curvas de otoño y primavera (Equinoccios) poseen los mismos valores de coeficiente o porcentaje de captación solar (porcentaje de perpendicularidad), sucediendo lo mismo que las curvas para el invierno y el verano (Solsticios), por lo que en ambos casos las curvas están superpuestas.

Conclusiones

Se puede concluir que el porcentaje de radiación solar captado por la superficie del panel FV que resulto de 71,98%, arrojado por el programa usado, es mayor que el valor de 42,69% dado por aplicar geometría solar en el concepto de la perpendicularidad que ofrece la superficie del panel FV a los rayos solares. Esto se debe como se observa en la figura anterior que, para el enfoque de perpendicularidad los Solsticios de verano y de invierno, cuyas curvas se superponen, color rojo sobre la azul respectivamente, ambas describen en su punto más alto un valor de ángulo por arriba y por debajo a la normal de la superficie del panel e igual al valor de la Latitud del lugar, a diferencia de las curvas de los Equinoccios, otoño superpuesta a la de primavera, que poseen en su punto más alto un valor de perpendicularidad de 100%. Dando por ello un valor de perpendicularidad para el verano mucho menor al igual que en invierno, cosa que en lo que respecta al cálculo de radiación global captada es mucho mayor en verano que en invierno según el programa de cálculo y como se aprecia en la figura 3.

Referencias

- [1] Meinel, A.. Meinel M.. (1982). "Aplicaciones de la Energía Solar", Editorial Reverté s.a.
- [2] Petros I. Axaopoulos. (2011). Solar Thermal Conversion. TEI de Atenas Grecia.
- [3] Ros, M. Rosatti, E. Soto, W.. (2020). "Captación directa de la energía solar, Principios de geometría solar aplicados a instalaciones fotovoltaicas". Editorial Académica Española.
- [4] Maestre López-Salazar, R. (2016). Instrumento didáctico para comprender las órbitas del sol alrededor de cualquier punto de la Tierra: Una carta solar tridimensional universal.