

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Eduardo Turrillas Solabre

Jokin Aginaga García

Pamplona, 20/Junio/2014

## ÍNDICE

TABLA DE ILUSTRACIONES .....	4
1.- OBJETIVO.....	5
2.- ANTECEDENTES .....	5
2.1.- Marco de las energías renovables .....	5
2.2.- Clasificación de las instalaciones fotovoltaicas.....	6
2.3.- Terminología geográfica básica .....	12
2.4.- Orientaciones en el espacio según ángulos de Euler .....	15
3.- CÁLCULO DEL ÁREA EXPUESTA .....	18
4.- PANEL SIN SISTEMA DE SEGUIDOR .....	20
4.1.- Optimización de los ángulos del panel solar.....	20
4.2.- Resultados.....	23
5.-PANEL CON SEGUIDOR DE 1 EJE .....	26
5.1.- Posición y rotación del panel solar .....	26
5.2.- Optimización del ángulo fijo del panel solar.....	33
5.3.- Resultados.....	36
5.3.1.- Pamplona .....	36
5.3.2.- Quito .....	37
5.3.3.- Helsinki.....	38
6.- PANEL CON SEGUIDOR DE 2 EJES.....	40
6.1.- Posición y rotación del panel solar .....	40
6.2.- Energía captada por el panel con un seguidor de dos ejes.....	41
6.2.1.- Pamplona .....	42
6.2.2.- Quito .....	42
6.2.3.- Helsinki.....	43
7.- CONCLUSIONES.....	44
8.- LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	47
9.- BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXO 1 .....	51
ANEXO 2 .....	54
ANEXO 3 .....	55
ANEXO 4 .....	58
ANEXO 5 .....	61

ANEXO 6 .....	62
ANEXO 7 .....	65
ANEXO 8 .....	68

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Comparación del consumo energético en los años 2012 y 2013.....	5
Ilustración 2: Porcentaje de cada tipo de energía instalado en España a final de 2013.....	6
Ilustración 3: Panel solar con seguidor de un eje de giro .....	8
Ilustración 4: Disposición de varios paneles con un sistema de seguimiento de un eje .....	9
Ilustración 5: Panel inclinado con sistema de seguimiento de un eje .....	9
Ilustración 6: Panel solar con sistema de movimiento de dos ejes .....	10
Ilustración 7: Paneles solares con sistemas de seguimiento de dos ejes menos convencionales. .....	11
Ilustración 8: Sistema de seguimiento de dos ejes para paneles solares .....	11
Ilustración 9: Representación de la longitud y la latitud en un globo terráqueo .....	13
Ilustración 10: Plano del horizonte del observador que medirá la posición del sol .....	14
Ilustración 11: Representación de los ángulos elevación y azimut del sol .....	14
Ilustración 12: Primera rotación según los ángulos de Euler (respecto a z azul).....	15
Ilustración 13: Segunda rotación según los ángulos de Euler (respecto a x verde).....	16
Ilustración 14: Ángulos de Euler entre dos sistemas de referencia de ejes ortogonales (respecto a y rojo) .....	16
Ilustración 15: Posiciones del sol a lo largo de un día en Pamplona.....	21
Ilustración 16: Segunda vista de las posiciones del sol en Pamplona.....	21
Ilustración 17: Representación de la matriz que almacenará los datos del programa.....	22
Ilustración 18: Matriz resultante con la radiación de todo el año .....	23
Ilustración 19: Posiciones del sol en su trayectoria vistas de perfil.....	24
Ilustración 20: Posición del sol a lo largo de su trayectoria en Pamplona.....	24
Ilustración 21: Proyecciones del sol y el panel solar inclinado .....	25
Ilustración 22: Base fija al panel solar.....	27
Ilustración 23: representación de los giros y sistemas de referencia del panel. ....	27
Ilustración 24: Ángulos girados por el sol desde su posición hasta la base de la Tierra.....	29
Ilustración 25: Proyección de la posición del sol en un plano perpendicular al panel solar.....	30
Ilustración 26: Posiciones del sol y sus proyecciones .....	32
Ilustración 27: Vista en planta de las posiciones del sol y sus proyecciones .....	32
Ilustración 28: Vista de las posiciones y proyecciones del sol .....	33
Ilustración 29: Posiciones del panel al girar $\theta_y$ .....	34
Ilustración 30: Posiciones del panel al girar $\theta_x$ .....	35
Ilustración 31: Posiciones del sol en su trayectoria vistas de perfil.....	36
Ilustración 32: Posición y proyección del sol en Quito.....	38
Ilustración 33: Posiciones del sol en Helsinki .....	39
Ilustración 34: Vista lateral de las posiciones del sol en Helsinki .....	39
Ilustración 35: Posición del sol en Quito .....	45
Ilustración 36: Posición del sol en Helsinki .....	45
Ilustración 37: Sistema de seguimiento alternativo no comercializado .....	47
Ilustración 38: Funcionamiento del <i>backtracking</i> .....	48

# 1.- OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis comparativo de la eficiencia energética de los diferentes tipos de paneles que podemos encontrar en la actualidad en el mercado, tanto los sistemas fijos sin sistema de seguimiento como los que tienen sistemas de uno y dos ejes de movimiento.

# 2.- ANTECEDENTES

## 2.1.- Marco de las energías renovables

En los últimos años se está experimentando un gran aumento en el uso de energías renovables debido entre otras cosas al aumento de concienciación de la sociedad en los aspectos medioambientales y a las primas económicas que se han dado por el uso de este tipo de energías. En la imagen siguiente se observa la demanda energética anual en España en los años 2012 y 2013 y la potencia instalada de cada tipo de energía a final de 2013

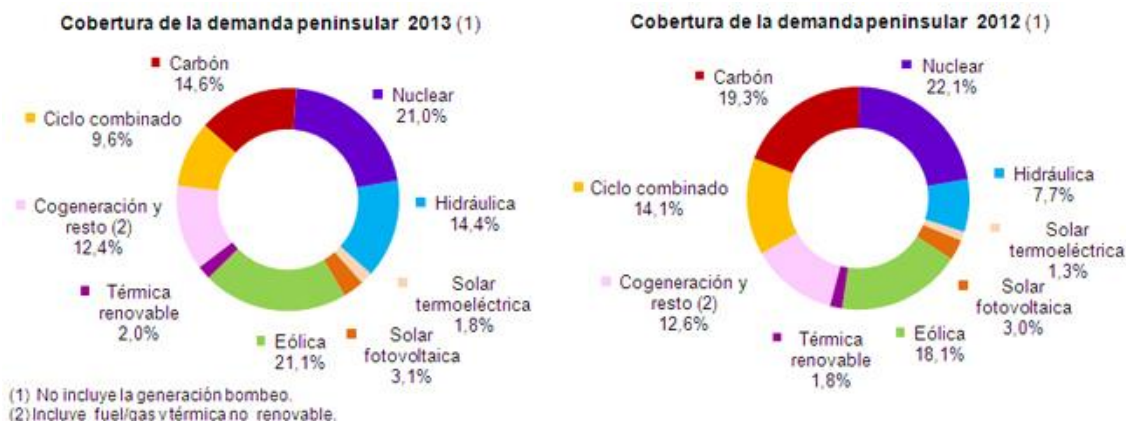


Ilustración 1: Comparación del consumo energético en los años 2012 y 2013

Potencia instalada a 31 de diciembre del 2013 (102.281 MW)

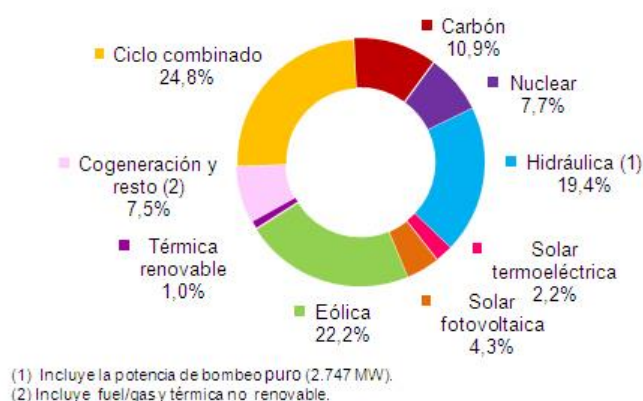


Ilustración 2: Porcentaje de cada tipo de energía instalado en España a final de 2013

Se ve en las gráficas anteriores que la energía solar fotovoltaica ocupa la segunda posición de las energías renovables instaladas actualmente, lo cual supone una gran cantidad de energía generada de esta forma. Además se prevé que el uso tanto de energías renovables en general como de energía fotovoltaica en particular aumentará en los próximos años.

## 2.2.- Clasificación de las instalaciones fotovoltaicas

Respecto a los tipos de instalaciones de placas fotovoltaicas, existen dos tipos: aisladas de la red eléctrica o conectadas a esta. Las instalaciones aisladas de la red eléctrica son sistemas que proporcionan electricidad en lugares alejados de la red eléctrica (como refugios de montaña por ejemplo) o para autoconsumo en pequeñas instalaciones o viviendas. Estos sistemas tienen la necesidad de usar baterías para almacenar la energía captada por el panel solar y disponer así de energía de forma continua. Las instalaciones conectadas a la red inyectan directamente a la red la electricidad generada y esta es comprada por las compañías de distribución eléctrica. La potencia de estas instalaciones puede ir desde unos pocos kilovatios (sistemas aislados de la red) hasta varios megavatios (grandes huertas solares). Sin embargo la capacidad de producción de energía depende en gran medida del rendimiento que tenga el panel solar y es por esto que se están dedicando muchos esfuerzos a mejorarlo en las instalaciones fotovoltaicas actuales.

La eficiencia de la instalación depende de varios factores, como por ejemplo el tipo de placa solar que se utilice. Las placas fotovoltaicas más usadas actualmente se dividen en tres categorías:

-Células monocristalinas: están formadas por un único tipo de cristal de silicio, del cual se ha controlado el crecimiento para que solo se formara en una dirección, consiguiendo un alineamiento bastante perfecto de todos los componentes del cristal. Son las placas más difíciles de producir pero también las que mejor rendimiento tienen.

-Células policristalinas: son las que han sido obtenidas a partir de un cristal de silicio del cual no ha sido controlado su crecimiento. De esta forma el cristal crece en todas direcciones creando un conjunto de cristales diferentes unidos entre sí. Es menos eficiente y menos costosa que la anterior.

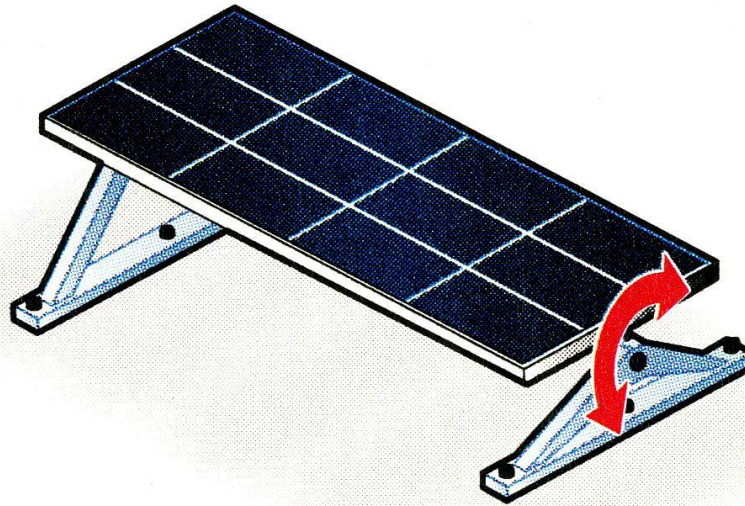
-Células amorfas: se producen cuando el silicio no cristaliza y se deposita sobre un sustrato o capa fina. Son más fáciles de ensamblar y producir en masa pero su eficiencia es menor que la de las células monocristalinas y policristalinas.

Aparte de estos tipos de células explicados anteriormente, en la actualidad se está investigando en un tipo de células esféricas formadas por pequeños corpúsculos de silicio (como gotas) que son capaces de absorber la radiación desde varios ángulos. Estas células presentan un rendimiento mucho mayor pero no se producen a gran escala por el momento.

Otro factor decisivo en la eficiencia a la hora de obtener energía fotovoltaica es si el panel tiene o no seguidor solar, y en caso de tenerlo de qué tipo es. El objetivo del sistema de seguimiento es aumentar el área expuesta a la radiación solar. Los paneles pueden dividirse en tres tipos:

-Fijo: no posee un sistema de seguimiento que lo oriente perpendicular al sol. El panel se encuentra inmóvil en una posición óptima para obtener la mayor cantidad de energía a lo largo del año. Es la peor opción pues para un mismo panel en la misma ubicación es la que menos energía capta.

-Seguidor de un eje: el panel gira en un eje pero se mantiene fijo en los otros. De esta forma sigue la órbita del sol pero sin estar perpendicular a la dirección de los rayos solares. Dentro de este tipo de seguidores, se distinguen varios tipos según el eje de giro y la disposición del panel.



**Ilustración 3: Panel solar con seguidor de un eje de giro**

En la imagen anterior se muestra una de las disposiciones de panel solar con un sistema de seguimiento que permite el giro en el eje longitudinal del panel. Ligeramente se aprecia que una de las patas del panel es más baja que la otra; esto es necesario ya que es la única forma de orientarlo lo más perpendicular al sol posible en aquellos lugares donde la trayectoria del sol sea oblicua.

A continuación se muestra una disposición de varios paneles con este tipo de sistemas. En este caso este tipo de disposición sería adecuada para sitios cercanos al ecuador, donde la trayectoria del sol sea perpendicular al suelo ya que los paneles no se encuentran girados respecto del suelo (el eje longitudinal del panel es paralelo al plano del suelo).



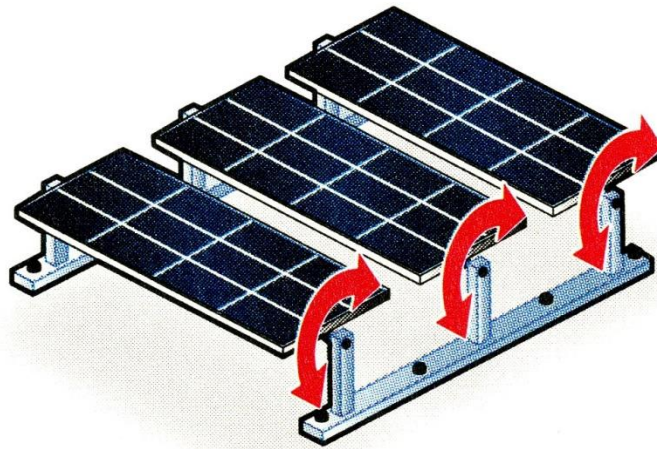


Ilustración 4: Disposición de varios paneles con un sistema de seguimiento de un eje

Con esta disposición de paneles habría que tener cuidado al amanecer y al anochecer para que no se den sombra unos a otros y evitar así pérdidas de eficiencia. Este concepto es conocido como *backtracking* y se explicará más adelante.

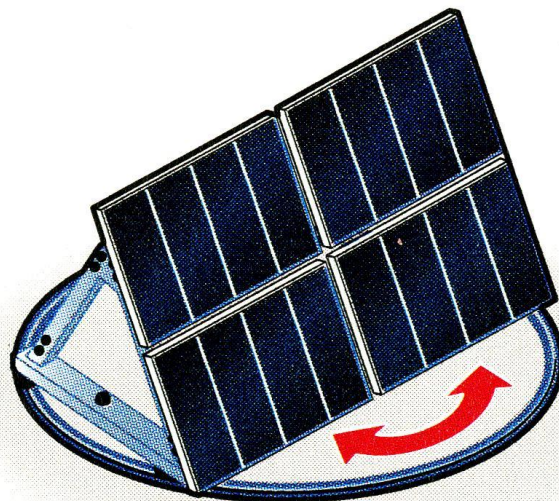


Ilustración 5: Panel inclinado con sistema de seguimiento de un eje

En la ilustración 5 se observa un panel inclinado que gira según un eje perpendicular al plano terrestre. Este tipo de panel sería adecuado para ciudades en las que la trayectoria del sol este contenida en un plano oblicuo (Pamplona por ejemplo), de forma que el panel siga la posición del sol y debido a su inclinación fija se encuentre siempre prácticamente perpendicular al sol.

-Seguidor de dos ejes: el panel se mueve en dos ejes de forma que siempre se encuentra perpendicular al sol captando de esta forma la máxima energía posible. Con un sistema de seguimiento fiable se puede mejorar de forma notable la captación solar respecto a sistemas sin seguidor.

A continuación se muestra un panel dispuesto con el típico sistema de seguimiento de dos ejes. Este sistema permite posicionar de forma continua al panel en la dirección óptima para obtener así la mayor cantidad de energía posible. En la parte derecha de la figura se muestra como se movería el panel conforme el sol recorra su trayectoria.

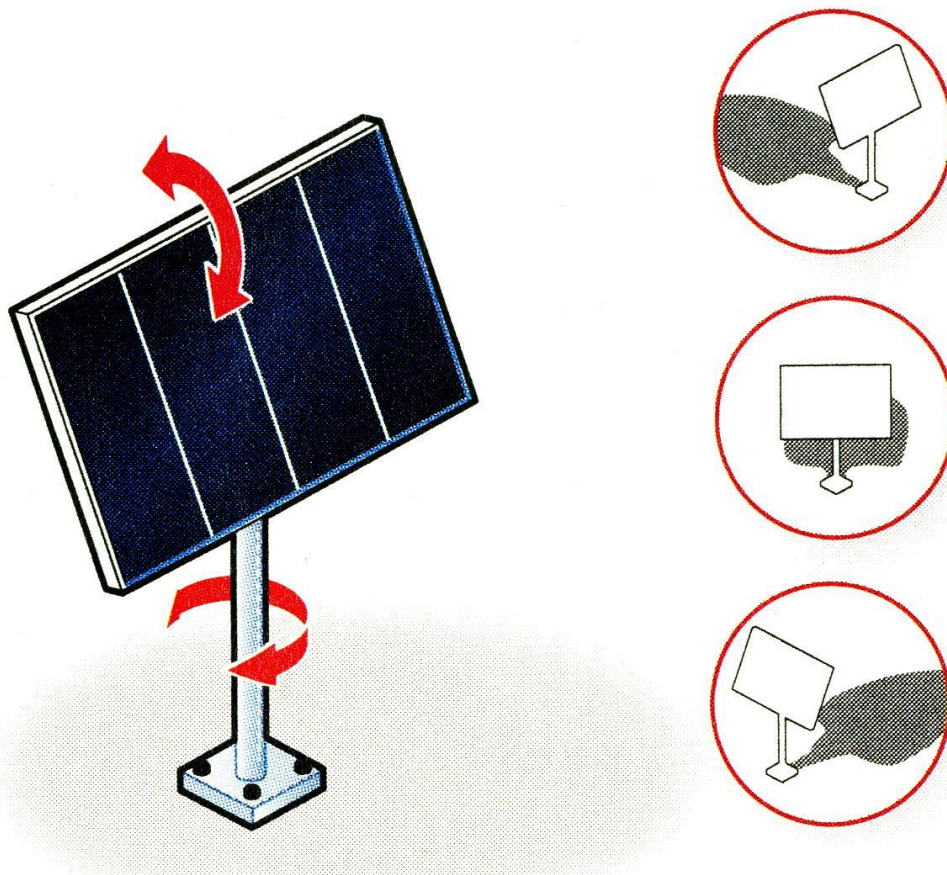


Ilustración 6: Panel solar con sistema de movimiento de dos ejes

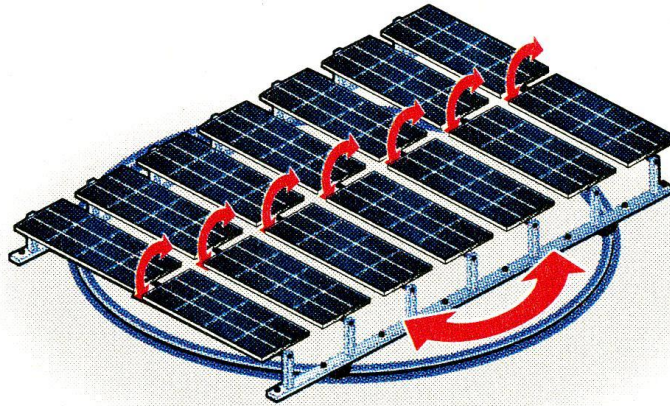


Ilustración 7: Paneles solares con sistemas de seguimiento de dos ejes menos convencionales.

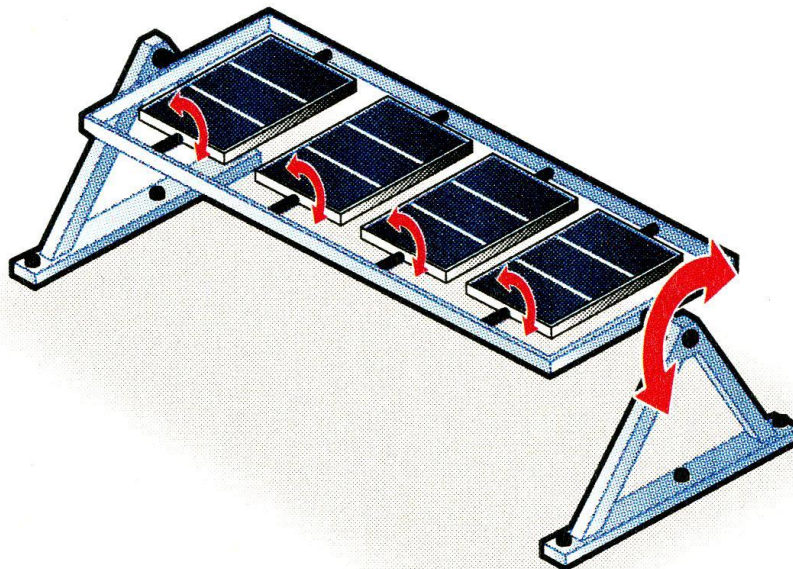


Ilustración 8: Sistema de seguimiento de dos ejes para paneles solares

En las dos imágenes anteriores se muestran dos sistemas de seguimiento de dos ejes, que aunque sí que son menos comunes que el primero, proporcionan igualmente una orientación del panel perpendicular a la dirección de incidencia de los rayos solares.

Con estas dos últimas disposiciones de los paneles solares habría que tener cuidado como ocurría con los dos primeros paneles solares mostrados (ilustraciones 3 y 4) para evitar que se den sombra entre ellos y obtener así menos energía de la posible.

También habrá que tener en cuenta (aunque es obvio) que la energía ahorrada con el sistema de seguimiento elegido deberá ser mayor que la energía consumida por el motor que mueve el panel y el sistema de control que se encarga de que siempre esté en la posición correcta (es este sistema y no el motor lo que más consume).

### **2.3.- Terminología geográfica básica**

Debido al movimiento de la tierra respecto al sol, la trayectoria solar esférica es diferente para cada día del año. Para conocer dicha trayectoria y la ubicación del sol en un momento dado y calcular las diferentes posiciones del panel solar es necesario conocer unas coordenadas geográficas básicas:

-Longitud: longitud de arco medida en grados ( $^{\circ}$ ) desde el meridiano 0 (Greenwich) hasta el punto en el que nos encontramos. Puede ser longitud E (al este de Greenwich) o longitud O (al oeste de Greenwich). En nuestro caso se tomara la longitud E como positiva y la longitud O como negativa.

-Latitud: longitud de arco medida en grados ( $^{\circ}$ ) desde el paralelo del Ecuador hasta el punto en el que nos encontramos. Puede ser latitud N (al norte del paralelo del Ecuador, correspondiente a todo el hemisferio norte) o latitud S (al sur del paralelo del ecuador correspondiente a todo el hemisferio sur). En nuestro caso se tomará la latitud N como positiva y la latitud S como negativa.

-Altitud: es la distancia vertical del punto en el que nos encontramos respecto al nivel medio del mar. En España el punto de referencia para medir la altitud es el nivel medio del mar en la ciudad de Alicante.

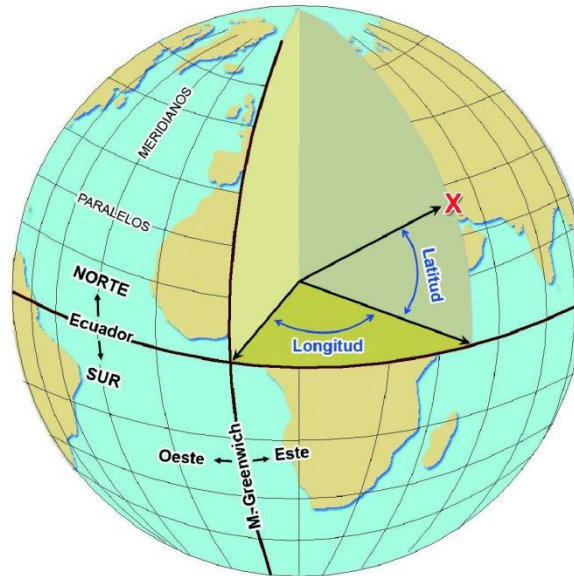


Ilustración 9: Representación de la longitud y la latitud en un globo terráqueo

Con estos tres datos se puede conocer cualquier posición del globo terráqueo con exactitud.

A continuación se describen las coordenadas angulares para determinar la posición del sol:

-Azimut: es el ángulo formado por el punto cardinal norte y la proyección vertical del sol sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud. Se mide en grados con signo positivo desde el norte en el sentido horario. De esta forma el *azimut* del sol proyectado en el este serían  $90^\circ$ , en el sur  $180^\circ$  y en el oeste  $270^\circ$ .

-Elevación: es el ángulo formado por el Sol y el horizonte del observador. Se mide en grados con signo positivo y siempre es menor o igual que  $90^\circ$ . Nótese que la *elevación* es un ángulo girado respecto a un eje cuya ubicación depende del ángulo girado *azimut*.

Con estas dos coordenadas angulares podemos conocer la ubicación del sol en cualquier posición en la que nos encontremos. Como es obvio, estos parámetros dependen de la posición del observador que mide la posición del sol, es decir, para una misma posición del sol habrá varias coordenadas (*azimut* y *elevación*) en función del lugar en el que se encuentre la persona que lo esté midiendo.

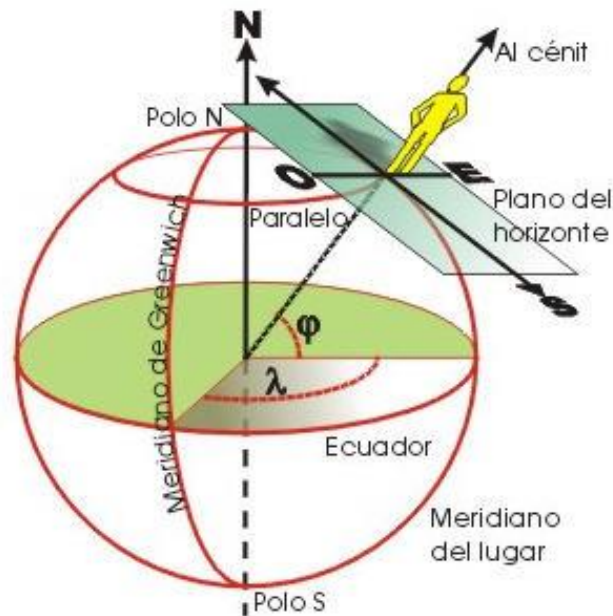


Ilustración 10: Plano del horizonte del observador que medirá la posición del sol

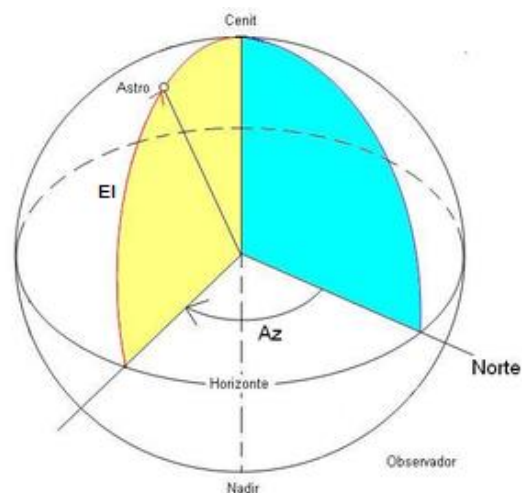


Ilustración 11: Representación de los ángulos elevación y azimut del sol

En la ilustración 10 se observan los ángulos de longitud y latitud ( $\lambda$  y  $\varphi$  respectivamente) y el plano del horizonte que es el plano de visión de la persona situada en la latitud y longitud especificada.

En la ilustración 11 se observan los ángulos *azimut* y *elevación*. El plano en el que está contenido el ángulo *azimut* es el plano del horizonte que se ve en la ilustración 10.

Relacionando este plano y los ángulos de las dos ilustraciones anteriores, se puede conocer la ubicación del sol desde cualquier punto de la tierra.

Para acotar los giros que llevará a cabo el panel con respecto al sistema de coordenadas tanto terrestre como del sol, es necesario definir previamente los ángulos de Euler.

## 2.4.- Orientaciones en el espacio según ángulos de Euler

Cualquier rotación en el espacio tridimensional puede ser descrita utilizando tres ángulos. Si las rotaciones básicas son escritas en términos de matrices de rotación D, C y B, entonces una rotación general A puede ser escrita como  $A = BCD$ . Los tres ángulos que dan las matrices de rotación son llamados ángulos de Euler y constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia en ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos.

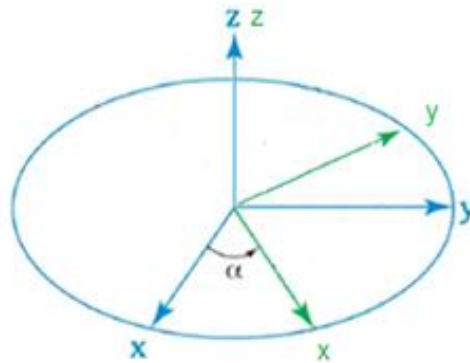


Ilustración 12: Primera rotación según los ángulos de Euler (respecto a z azul)

En la figura anterior se observa el giro  $\alpha$  que realiza la base azul según el eje Z (el cual coincide con el eje Z de la base verde).

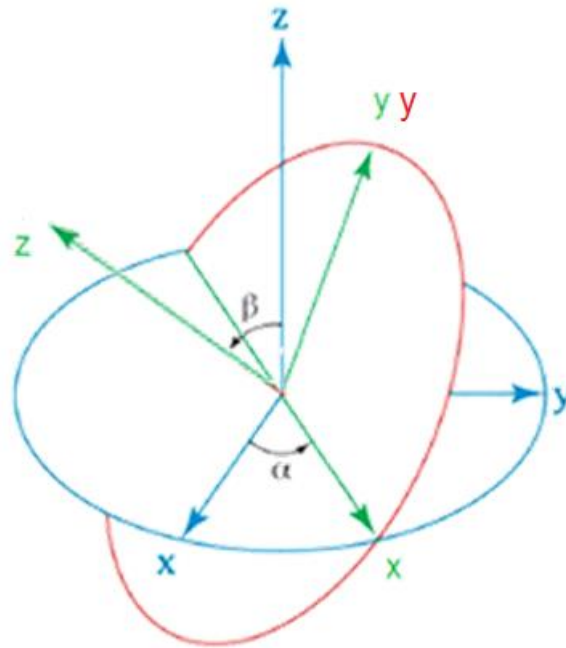


Ilustración 13: Segunda rotación según los ángulos de Euler (respecto a x verde)

En la ilustración anterior se muestra el segundo giro realizado. En este caso la base verde gira un ángulo  $\beta$  según el eje X. Ahora el eje Y verde coincide con el eje Y rojo (correspondiente a la base que obtenemos al girar un tercer ángulo, mostrado en la imagen siguiente).

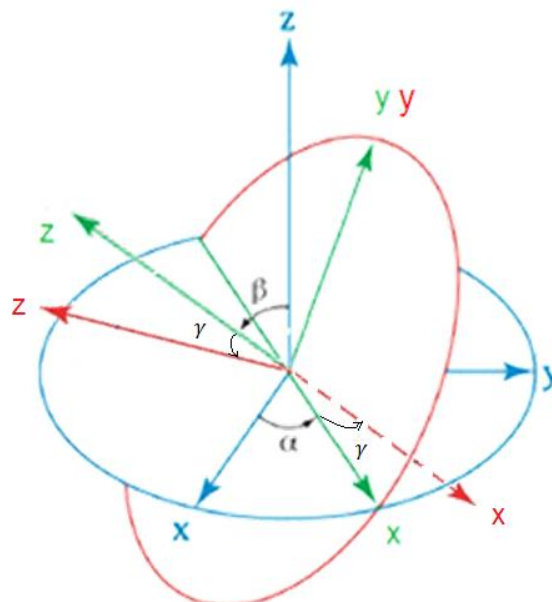


Ilustración 14: Ángulos de Euler entre dos sistemas de referencia de ejes ortogonales (respecto a y rojo)



En la imagen anterior se aprecia el tercer y último giro realizado. En este caso la base roja gira un ángulo  $\gamma$  respecto a la base verde según el eje Y (coincidente para las bases verde y roja).

Las rotaciones dadas por los ángulos de Euler ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) son:

-La primera rotación es por un ángulo  $\alpha$  a través del eje de z utilizando D.

-La segunda rotación es por un ángulo  $\beta$  sobre el que era originalmente el eje de x utilizando C.

-La tercera rotación es por un ángulo  $\gamma$  sobre el que era originalmente el eje de y utilizando B.

Los componentes de rotación están dados por:

$$D = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha & 0 \\ \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\operatorname{sen} \beta \\ 0 & \operatorname{sen} \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \operatorname{sen} \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen} \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

De esta forma se puede construir una matriz de rotación  $A=BCD$  para definir una rotación general.

En nuestro caso, dado que el panel se mueve en dos ejes solo tendremos dos ángulos y la matriz de rotación A estará compuesta por dos matrices en vez de tres como ocurre en el caso general anterior.

### 3.- CÁLCULO DEL ÁREA EXPUESTA

Para calcular la relación entre el área proyectada sobre el plano perpendicular a la dirección de incidencia de los rayos del sol (área real que capta radiación) y el área real del panel tenemos que calcular el ángulo formado por estos.

Suponiendo el vector director del plano del panel solar de forma general:

$$\vec{n}_p = (A_p, B_p, C_p)$$

Y el vector de los rayos solares (vector director del plano perpendicular a estos rayos solares) como:

$$\vec{n}_s = (A_s, B_s, C_s)$$

Aplicando una simple fórmula matemática vemos que el ángulo formado entre los dos planos es:

$$\alpha = \arccos \frac{|A_p \cdot A_s + B_p \cdot B_s + C_p \cdot C_s|}{\sqrt{A_p^2 + B_p^2 + C_p^2} \cdot \sqrt{A_s^2 + B_s^2 + C_s^2}}$$

Obtenemos la matriz de cambio de base  $[\bar{R}_{\theta_x \theta_y}]_{x' y' z'}$  haciendo la inversa de la calculada anteriormente  $[\bar{R}_{\theta_x \theta_y}]_{x y z}$  y nos queda:

$$[\bar{R}_{\theta_x \theta_y}]_{x' y' z'} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \text{sen}(\theta_y) \\ \text{sen}(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) & \cos(\theta_x) & -\text{sen}(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \\ \cos(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) & \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \end{bmatrix}_{x y z}$$

Multiplicando esta matriz por el vector que define el plano del panel en las coordenadas de la base fija al panel (x" y" z"), obtenemos el vector perpendicular al plano del panel solar en la base terrestre:

$$[\bar{R}_{\theta_x \theta_y}]_{x y z} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}_{x' y' z'} = \begin{Bmatrix} \text{sen}(\theta_y) \\ -\text{sen}(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \\ \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \end{Bmatrix}_{x y z}$$

Conociendo el ya varias veces mencionado vector de posición del sol y el vector director del plano del panel, calculamos la fórmula general que tendrá el ángulo formado entre ellos (el mismo ángulo que el formado entre los planos:

$$\alpha = \arccos \frac{|\sin(\theta_y) \cdot \cos(El) \cdot \sin(Az) - \sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \cos(El) \cdot \cos(Az) + \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \sin(El)|}{\sqrt{(-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (\cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + \sqrt{(\cos(El) \cdot \sin(Az))^2 + (\cos(El) \cdot \cos(Az))^2 \cdot (\sin(El))^2}}}$$

El área proyectada sería el área real del panel por el coseno de este ángulo  $\alpha$ , y como este a su vez es una función *arco coseno*, el área proyectada es el área real por el término interno de dicha función. La relación entre áreas se calcula como

$$\frac{\text{Área proyectada}}{\text{Área real}} = \frac{\text{Área real} \cdot \text{término de la función arccos}}{\text{Área real}} = \text{término de la función arccos}$$

De esta forma la relación entre el área proyectada y el área real será:

$$\text{factor de área expuesta} = \frac{|\sin(\theta_y) \cdot \cos(El) \cdot \sin(Az) - \sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \cos(El) \cdot \cos(Az) + \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \sin(El)|}{\sqrt{(-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (\cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + \sqrt{(\cos(El) \cdot \sin(Az))^2 + (\cos(El) \cdot \cos(Az))^2 \cdot (\sin(El))^2}}}$$

## 4.- PANEL SIN SISTEMA DE SEGUIDOR

Los paneles solares que no cuentan con un sistema de seguimiento no rotan a lo largo del tiempo por lo que para determinar su posición en cada instante no hace falta operar con los vectores de posición del sol y del panel como ocurre con los sistemas de seguimiento de uno y dos ejes de giro (se verá más adelante). En este caso el panel está girado unos ángulos  $\theta_x$  y  $\theta_y$  que son fijos en todo momento. Obviamente esta disposición del panel es la que menos eficiencia tiene de las tres mencionadas pero es posible calcular la orientación óptima en función de las coordenadas terrestres, de modo que se logre captar la máxima cantidad de energía posible.

### 4.1.- Optimización de los ángulos del panel solar

Para calcular la posición óptima en la que colocar un panel fijo (sin ningún tipo de sistema de movimiento) realizaremos un sistema de bucles anidados por medio del comando *for* con el software matemático *Matlab*.

Se recorre el ángulo  $\theta_y$  a lo largo de  $180^\circ$  (de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ ) en intervalos de  $5^\circ$ . Para cada valor de  $\theta_y$  se recorre el ángulo  $\theta_x$  de la misma forma (de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  cada  $5^\circ$ ). Se toman intervalos tan grandes porque si no al programa le cuesta muchísimo tiempo ejecutarse (del orden de 20 horas).

Dentro de este bucle a su vez hay otro en el que se recorren de uno en uno los 365 días del año y para cada día se recorre un último bucle evaluando cada hora del día.

Una vez se tiene una hora, día y ángulos  $\theta_x$  y  $\theta_y$  concretos, se evalúan las siguientes funciones que son guardadas en matrices:

-Cálculo de la posición del sol: mediante un programa con la fecha y hora, latitud, longitud y altura del lugar donde se instala el panel (datos conocidos) como variables de entrada se obtienen los ángulos azimut y elevación que definen la posición del sol. Este programa no ha sido diseñado por el autor del presente trabajo sino que fue cedido por el tutor.

A continuación se muestra una imagen con las diferentes posiciones que el sol tiene a lo largo del día en Pamplona. Estas posiciones (y todas las que se muestran más adelante) han sido calculadas a fecha de 4 de abril. La posición de sol está representada por los vectores azules y el vector rojo representa el Norte.

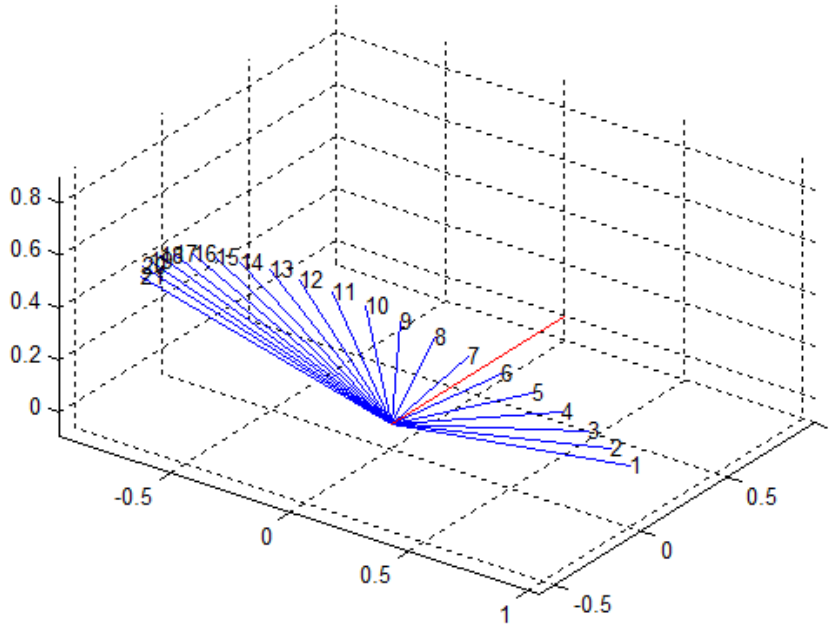


Ilustración 15: Posiciones del sol a lo largo de un día en Pamplona

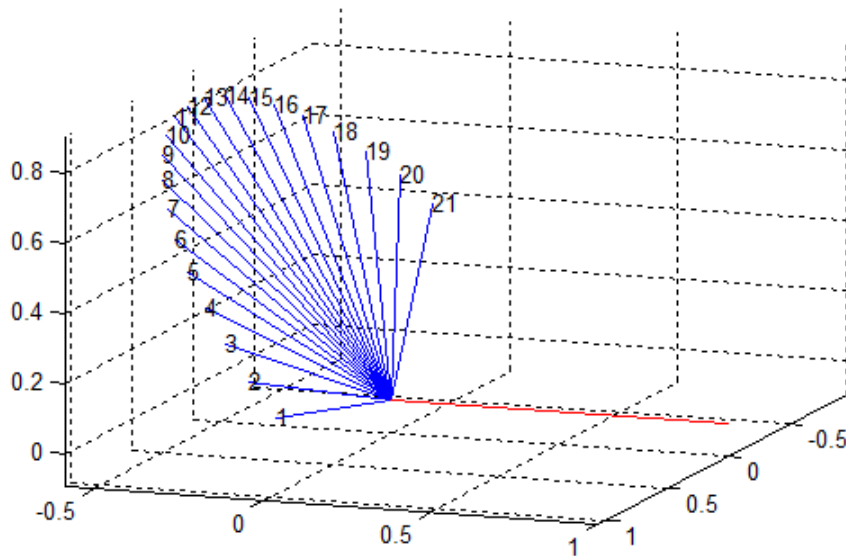


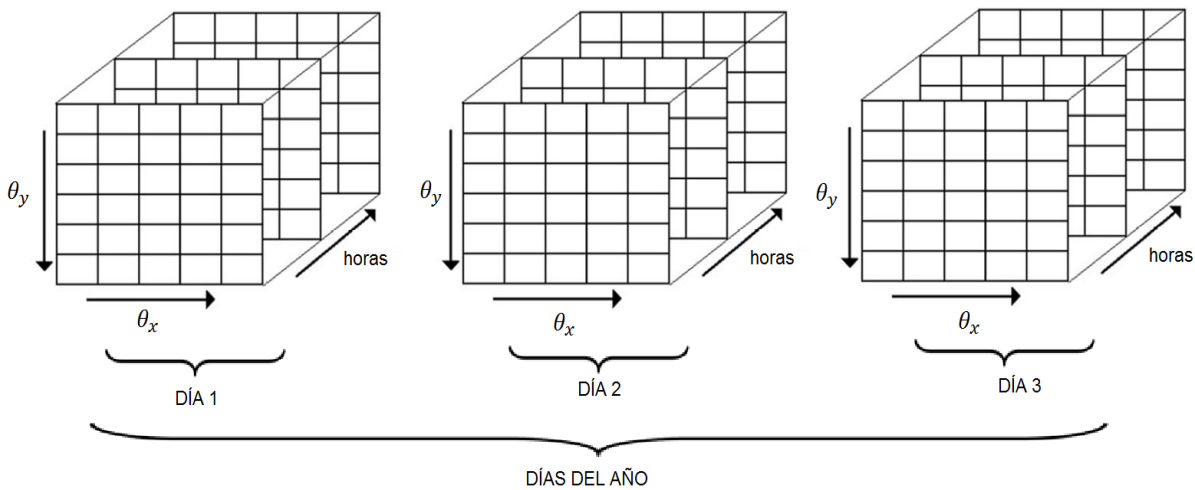
Ilustración 16: Segunda vista de las posiciones del sol en Pamplona

-Relación del área expuesta: se calcula la relación entre la proyección del área sobre el plano perpendicular a la dirección de los rayos solares (área efectiva que capta radiación) y el área máxima que tendría si el panel estuviese perfectamente orientado. Se muestra a continuación la ecuación que relaciona el área expuesta con el área real (más adelante en el apartado 7 se muestra el desarrollo de las ecuaciones y obtención de dicha fórmula).

$$\begin{aligned}
 & \text{Relación entre área expuesta y área real} = \\
 & = \frac{|\sin(\theta_y) \cdot \cos(EL) \cdot \sin(Az) - \sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \cos(EL) \cdot \cos(Az) + \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \sin(EL)|}{\sqrt{(-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (-\sin(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2 + (\cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y))^2} + \sqrt{(\cos(EL) \cdot \sin(Az))^2 + (\cos(EL) \cdot \cos(Az))^2 \cdot (\sin(EL))^2}}
 \end{aligned}$$

**-Radiación que llega al panel:** se calcula la radiación por unidad de área y hora ( $W/m^2$ ) que llega al lugar en el que se encuentra el panel (con un error de  $0,025^\circ$ ). Esta radiación se obtiene a partir de una tabla de datos (CM SAF). La tabla ha sido obtenida a partir del sitio web [www.cmsaf.eu](http://www.cmsaf.eu), el cual pertenece a la aplicación de redes de satélites EUMETSAT. Este sistema es un conjunto de seis sistemas de servicios nacionales europeos hidrológicos y meteorológicos liderados por Alemania. CM SAF tiene como objetivo la previsión de datos geofísicos obtenidos por satélite adecuados para la vigilancia del clima.

Estos datos se almacenan en diferentes matrices (la relación de área en una y la cantidad de radiación en otra). Estas matrices tienen cuatro dimensionales ya que una dimensión corresponde a los valores de  $\theta_y$ , otra a los valores de  $\theta_x$ , otra a los días, otra a las horas y tienen una dimensión total de  $37 \times 37 \times 365 \times 24$ . La matriz tomará la siguiente forma:



**Ilustración 17: Representación de la matriz que almacenará los datos del programa**

Los valores de la radiación obtenida se multiplicada por los segundos de una hora de forma que así obtenemos la energía (en  $J/m^2$ ) que llega a un punto concreto en una hora para una posición y día concretos.

$$\frac{W}{m^2 \cdot h} \cdot 3600 s = \frac{J}{m^2 \cdot h}$$

Tras realizar este cálculo el programa suma los valores de radiación de cada hora y día correspondientes a cada valor de  $\theta_x$  y  $\theta_y$  para obtener así la radiación captada por el panel a lo largo de todo un año para una posición fija de  $\theta_x$  y  $\theta_y$ . Tras esto nos queda una matriz de dimensión  $37 \times 37$

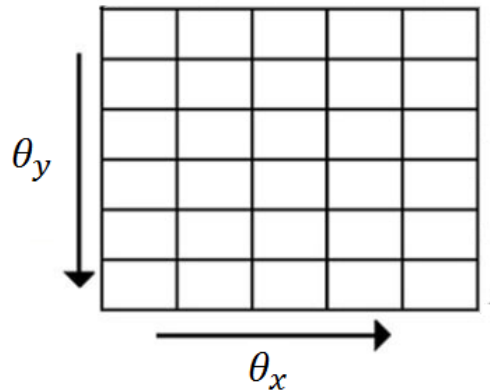


Ilustración 18: Matriz resultante con la radiación de todo el año

De esta matriz obtenemos el valor máximo de radiación obtenida y los valores de  $\theta_x$  y  $\theta_y$  a los que corresponde (esto se realizará por medio de una sencilla función en *Matlab*). Estos serán los valores de los ángulos con los que debemos orientar nuestro panel para obtener la máxima radiación a lo largo de todo un año.

## 4.2.- Resultados

Tras realizar la simulación con el software *Matlab* y el programa diseñado para la ubicación de Pamplona (latitud= $42^{\circ}49'00''$ N; longitud= $-1^{\circ}39'00''$ E; Altitud=460 m), se obtuvo la siguiente energía absorbida por el panel solar en un año:

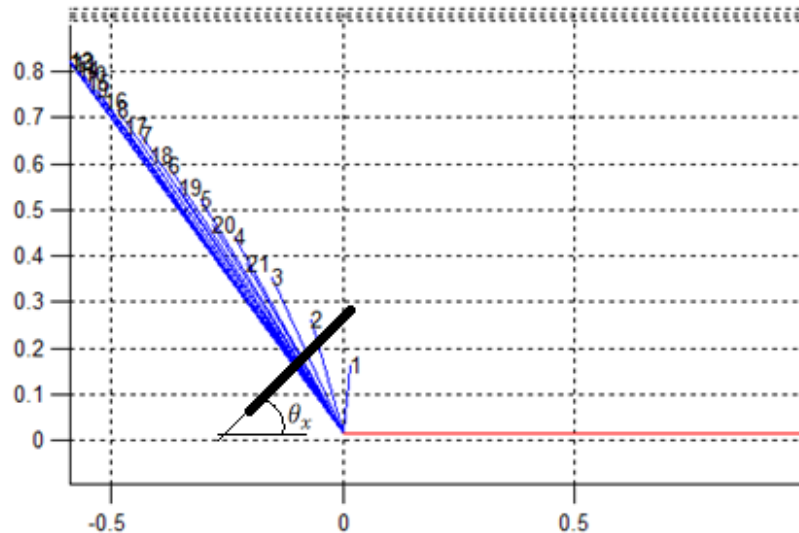
$$\text{Energía} = 5,3686 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Esta energía se obtuvo para unos ángulos fijos cuyo valor es el siguiente:

$$\theta_x = 40^{\circ}$$

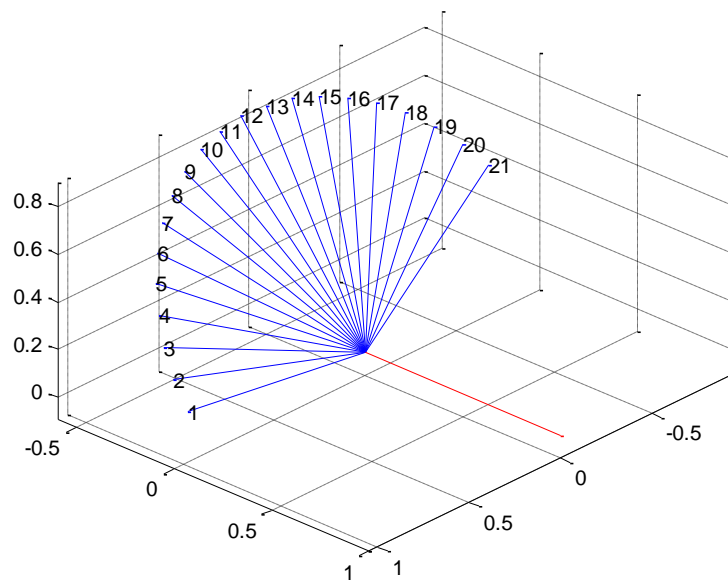
$$\theta_y = 40^{\circ}$$

Si se analizan, estos valores resultan obvios ya al analizar la trayectoria del sol vemos que el ángulo  $\theta_x$  alcanza valores en torno a  $45^{\circ}$  para estar perpendicular a las direcciones de incidencia de los rayos del sol.



**Ilustración 19: Posiciones del sol en su trayectoria vistas de perfil**

A continuación se muestra una imagen de la trayectoria del sol en Pamplona donde el primer vector azul señalado con el 1 corresponde a las 6:00 y de ahí en adelante cada vector es media hora más.



**Ilustración 20: Posición del sol a lo largo de su trayectoria en Pamplona**

Fijándose en la imagen anterior vemos que el ángulo  $\theta_y = 40^\circ$  obtenido correspondería a que el panel se encuentre más o menos perpendicular al vector 8 que equivale a la hora 09:30 (hay que tener en cuenta que coincide a esta hora para el día calculado, 4 de abril; si cambiásemos de día para representar las posiciones del sol el panel podría ser perpendicular a los vectores correspondientes a otras fechas). Esto tiene sentido ya que al encontrarse en esta posición capta bastante bien las



horas de máxima radiación (mediodía) y las horas del amanecer. Por el contrario deja de captar radiación para las horas del atardecer que son las horas de menos radiación. Debido a esto, podemos deducir que los ángulos obtenidos para fijar el panel tienen sentido y coherencia. A continuación se muestra la vista frontal (de norte a sur) de las posiciones del sol y el panel solar (representado por una línea negra más gruesa) con un ángulo  $\theta_y$  de unos  $40^\circ$

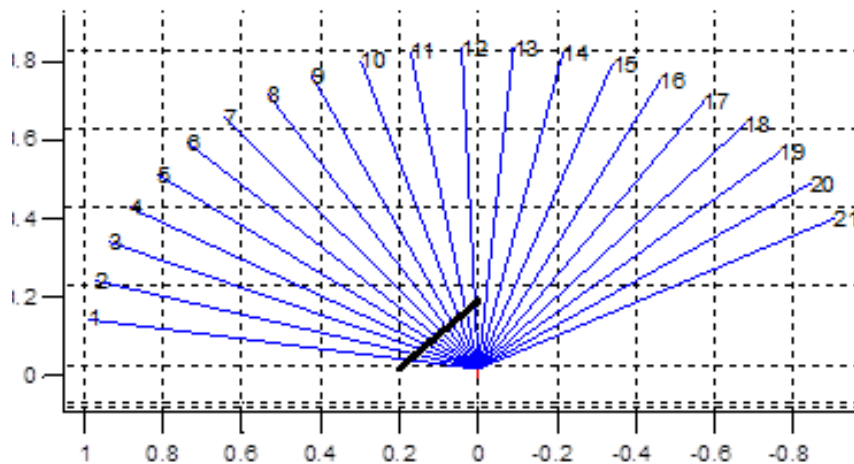


Ilustración 21: Proyecciones del sol y el panel solar inclinado

Hay que resaltar que el ángulo es de  $40^\circ$  pero que el programa evalúa de 5 en 5 grados por lo que tiene un error considerable en lo que a la posición del panel se refiere. Se podría afinar más la posición del panel evaluando los ángulos en el programa cada menos grados pero entonces ejecutar el programa llevaría mucho más tiempo.

## 5.-PANEL CON SEGUIDOR DE 1 EJE

### 5.1.- Posición y rotación del panel solar

Para poder comparar la eficiencia energética producida por el uso de un tipo de seguidor u otro o por no usar ninguno se debe calcular la cantidad de energía que le llega a cada tipo de panel.

Primero hay que calcular la posición del panel y del sol con respecto a la tierra en todo momento para poder operar más tarde de forma vectorial. Se consideran tres sistemas de referencia; la base de la Tierra (la cual se nombrará con los ejes principales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), la base fija a la superficie del panel solar (la cual se nombrará con los ejes principales  $x''$ ,  $y''$ ,  $z''$ ) y la base fija en el sol (la cual se nombrará con los ejes principales  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ) en la que el eje  $y''$  tiene la dirección que une el sol con el punto de la tierra en el que está el seguidor solar.

El panel tiene dos grados de libertad de rotación ( $\theta_x$  en el eje  $x'$  y  $\theta_y$  en el eje  $y$ ) para ponerse perpendicular a la dirección de incidencia de los rayos del sol. Para poder situarlo en todo momento definiremos una matriz de cambio de base para pasar el vector perpendicular al panel de la base fija de la placa solar a la base de la tierra. La base del panel coincide con la base terrestre cuando el panel se encuentra horizontal sin haber realizado ningún giro en ningún eje, sin embargo esta base cambia al orientar el panel en la dirección perpendicular a los rayos del sol. A continuación se muestra la base del panel (coincidente con la de la tierra cuando no se ha movido):



Ilustración 22: Base fija al panel solar

El panel se moverá de forma que el eje  $z$  de tome la misma dirección que los rayos del sol. Para esto realizará dos giros. Primero girará en el eje  $y$  un ángulo  $\theta_y$  y quedará un sistema de referencia con unos ejes  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  donde  $y'$  coincidirá con  $y$ . Después rotará en torno al eje  $x$  del panel ( $x'$  ahora) un ángulo  $\theta_x$  y quedará un sistema de referencia con unos ejes  $x''$ ,  $y''$  y  $z''$  donde  $x'$  coincidirá con  $x''$ . Estos giros y sistemas de referencia se muestran gráficamente en la siguiente imagen.

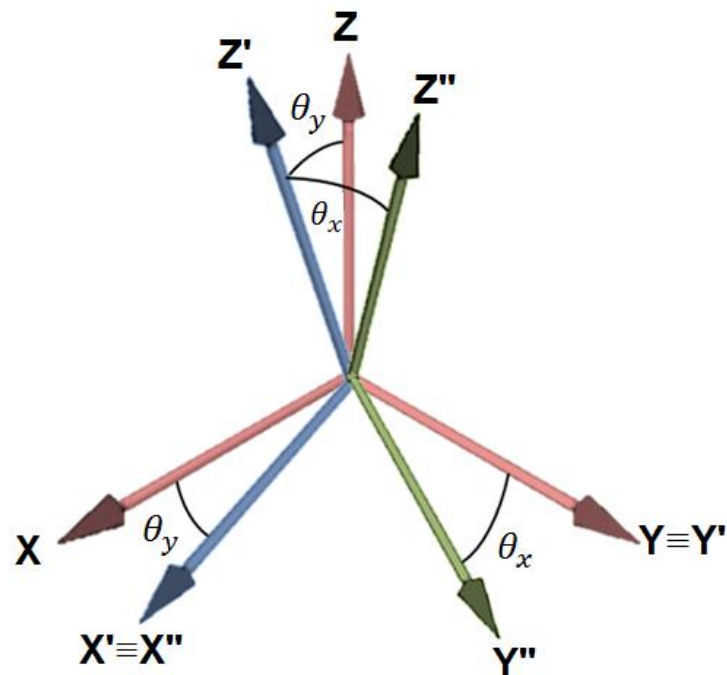


Ilustración 23: representación de los giros y sistemas de referencia del panel.

De esta forma la base del panel siempre será la  $x''$ ,  $y''$ ,  $z''$  que coincidirá con la base terrestre ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) cuando el panel no se haya movido. Con estos giros se construye la matriz de cambio de base para pasar de la base del panel a la base fija terrestre.

La matriz correspondiente al primer giro:

$$[\bar{R}_{\theta_y}]_{x'y'z'}^{xyz} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\text{sen}(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}_{x'y'z'}$$

La matriz correspondiente al segundo giro:

$$[\bar{R}_{\theta_x}]_{x''y''z''}^{x'y'z'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \text{sen}(\theta_x) \\ 0 & -\text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}_{x''y''z''}$$

Y multiplicando las dos matrices anteriores se obtiene la matriz completa que nos permite cambiar de una base a otra:

$$\begin{aligned} [\bar{R}_{\theta_x\theta_y}]_{x''y''z''}^{xyz} &= [\bar{R}_{\theta_x}]_{x''y''z''}^{x'y'z'} \cdot [\bar{R}_{\theta_y}]_{x'y'z'}^{xyz} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & \text{sen}(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) & -\cos(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ 0 & \cos(\theta_x) & \text{sen}(\theta_x) \\ \text{sen}(\theta_y) & -\cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \end{bmatrix}_{x''y''z''}^{xyz} \end{aligned}$$

Para representar el vector de posición del sol en la base fija a la tierra ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) en función de los ángulos *azimut* y *elevación* explicados anteriormente, al igual que en el caso anterior es necesario definir una matriz de cambio de base que permita situar al sol en cualquier punto en el que este se encuentre. A continuación se muestra una representación de los giros que realiza el sol. Los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  representan la base de la tierra y los ejes  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$  representan la base del sol cuando ha realizado los giros correspondientes a los ángulos *azimut* (girado en el eje  $Z \equiv C$  y representado con las letras  $Az$ ) y *elevación* (girado en el eje  $A \equiv A'$  y representado con las letras  $Ei$ ) respectivamente.

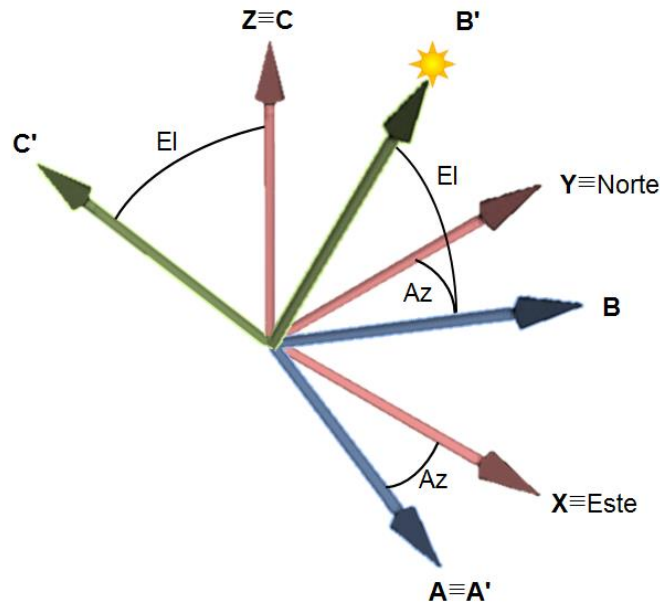


Ilustración 24: Ángulos girados por el sol desde su posición hasta la base de la Tierra

Con estos giros se construye la matriz de cambio de base para pasar de la base fija del panel a la base fija terrestre.

La matriz correspondiente al giro del ángulo *azimut*:

$$[\bar{R}_{Az}]_{xyz}^{abc} = \begin{bmatrix} \cos(Az) & \text{sen}(Az) & 0 \\ -\text{sen}(Az) & \cos(Az) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{xyz}^{abc}$$

La matriz correspondiente al giro del ángulo *elevación*:

$$[\bar{R}_{El}]_{abc}^{a'b'c'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(El) & -\text{sen}(El) \\ 0 & \text{sen}(El) & \cos(El) \end{bmatrix}_{abc}^{a'b'c'}$$

Multiplicando estas dos matrices en el orden correcto obtenemos la matriz de cambio de base final:

$$\begin{aligned} [\bar{R}_{AzEl}]_{xyz}^{a'b'c'} &= [\bar{R}_{Az}]_{xyz}^{abc} \cdot [\bar{R}_{El}]_{abc}^{a'b'c'} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(Az) & \text{sen}(Az) \cdot \cos(El) & -\text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(El) \\ -\text{sen}(Az) & \cos(Az) \cdot \cos(El) & -\cos(Az) \cdot \text{sen}(El) \\ 0 & \text{sen}(El) & \cos(El) \end{bmatrix}_{xyz}^{a'b'c'} \end{aligned}$$

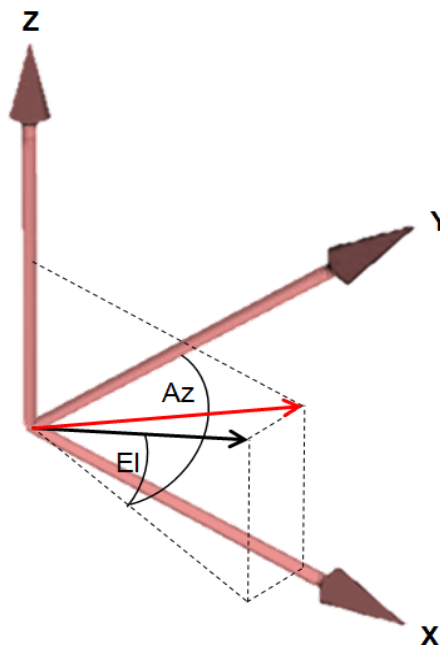
Se puede observar que el vector que indica la posición del sol en la base solidaria al sol ( $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ) es el propio eje  $B'$  por lo que el vector de posición del sol queda:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}_{a'b'c'}$$

Multiplicando la matriz de cambio de base calculada anteriormente por este vector obtenemos el deseado vector de posición del sol en la base de coordenadas de la Tierra:

$$\{posición\ del\ sol\}_{xyz} = [\bar{R}_{AzEl}]_{xyz}^{a'b'c'} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}_{a'b'c'} = \begin{Bmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \\ \cos(El) \cdot \cos(Az) \\ \text{sen}(El) \end{Bmatrix}_{xyz}$$

A continuación se van a calcular las ecuaciones para calcular el ángulo que debe girar el panel para estar perpendicular al sol cuando tiene un sistema de seguimiento de un solo eje. Suponiendo que el ángulo  $\theta_x$  girado en el eje x es fijo y el panel sigue la posición del sol girando un ángulo  $\theta_y$  según el eje y, el vector director del plano del panel solar deberá coincidir con el vector de posición del sol proyectado en el plano perpendicular al panel solar. Este vector de posición del sol proyectado se muestra en la imagen siguiente:



**Ilustración 25: Proyección de la posición del sol en un plano perpendicular al panel solar**

En la imagen anterior la flecha negra representa el vector posición real del sol, y la flecha roja el vector de posición del sol proyectado sobre el plano perpendicular al panel. En este caso el panel no habría girado ningún ángulo  $\theta_x$  (en su situación original estaría paralelo al suelo) y solo giraría en el eje y, estando de esta forma, el

vector director del plano del panel siempre contenido en el plano xz. El vector de posición del sol proyectado en plano xz y representado en la base terrestre (x, y, z) es simplemente el vector de posición del sol calculado anteriormente pero eliminando la componente en el eje y.

$$\{posición\ del\ sol\ proyectada\}_{xyz} = \begin{Bmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \\ 0 \\ \text{sen}(El) \end{Bmatrix}_{xyz}$$

Como ya se ha mencionado anteriormente el vector de posición del sol proyectado debe coincidir con el vector director del plano del panel. Tal y como se muestra en la *ilustración 11* el vector director del panel solar coincide con el eje Z'' y es el siguiente (coinciden las bases x''y''z'' y x'y'z' porque no ha habido giro en el eje x):

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}_{x''y''z''} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}_{x'y'z'}$$

Teniendo en cuenta que para poder igualar los vectores deben estar en la misma base, cambiamos de base el vector de posición del sol multiplicándolo por la matriz de cambio de base  $[\bar{R}_{\theta_y}]_{x'y'z'}^{xyz}$  que ha sido calculada anteriormente.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}_{x''y''z''} &= [\bar{R}_{\theta_y}]_{x'y'z'}^{xyz} \cdot \begin{Bmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \\ 0 \\ \text{sen}(El) \end{Bmatrix}_{xyz} \\ &= \begin{Bmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \cos(\theta_y) - \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ 0 \\ \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(El) \end{Bmatrix}_{x''y''z''} \end{aligned}$$

Pasando el término de la izquierda a la derecha se iguala el sistema a cero y se obtiene el sistema de ecuaciones que hay que resolver.

$$\begin{cases} 0 = \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \cos(\theta_y) - \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ 0 = \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(El) - 1 \end{cases}$$

Este sistema se resolverá de forma iterativa con la función *fsolve* del programa *Matlab* para obtener el ángulo  $\theta_y$  que debe girar el panel para mantenerse lo más perpendicular al sol que pueda teniendo en cuenta que no puede girar en los dos ejes y nunca estará perfectamente perpendicular porque la trayectoria del sol no se efectúa en un plano.

En las tres imágenes siguientes se puede observar las diferentes posiciones que va tomando el sol para cada hora (los vectores azules) para una trayectoria vista desde Pamplona y la proyección de estos sobre un plano perpendicular al plano terrestre (vectores en verde). El vector rojo indica el norte.

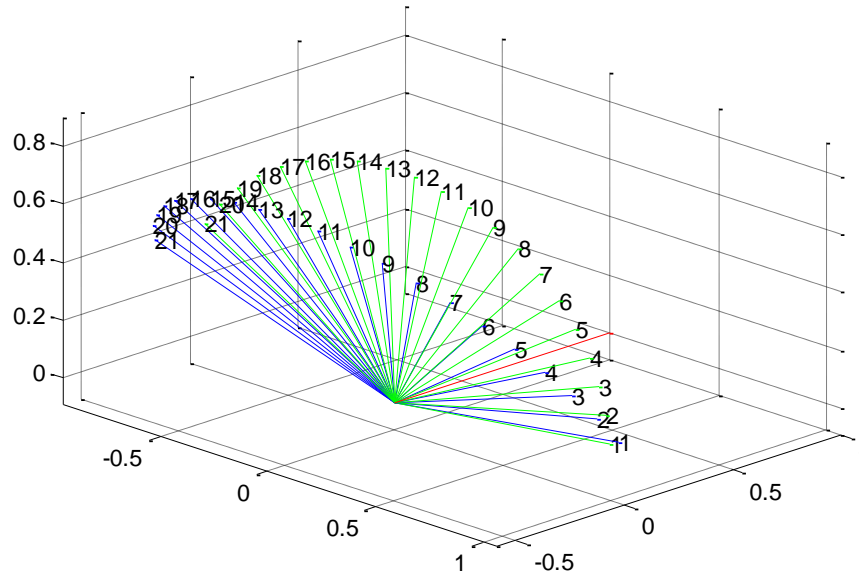


Ilustración 26: Posiciones del sol y sus proyecciones

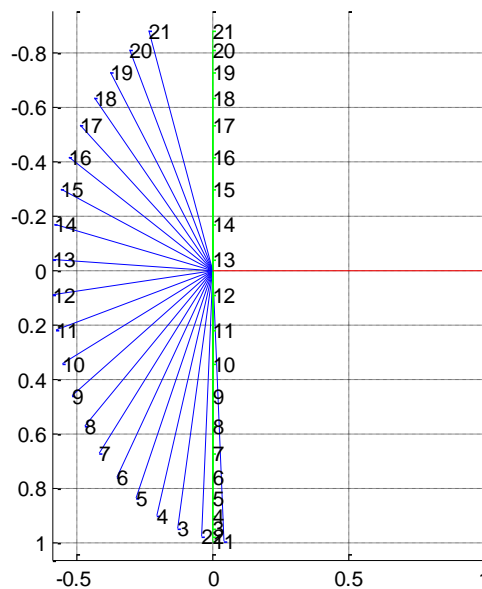


Ilustración 27: Vista en planta de las posiciones del sol y sus proyecciones

En la ilustración 27 observamos la vista en planta de la posición del sol y sus proyecciones (todas ellas vistas como una sola recta ya que están contenidas en el mismo plano).



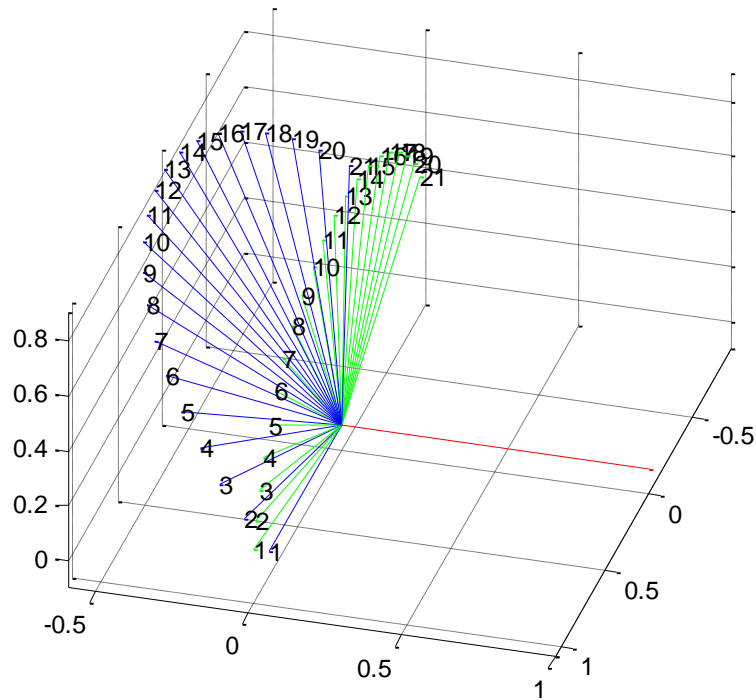


Ilustración 28: Vista de las posiciones y proyecciones del sol

## 5.2.- Optimización del ángulo fijo del panel solar

En este caso se mantiene fijo el ángulo  $\theta_x$  y el panel va girando según el ángulo  $\theta_y$ . Para calcular la radiación obtenida de esta forma se ejecuta un programa similar al descrito en el apartado de optimización de los ángulos del panel solar sin sistema de seguimiento.

En el programa se fija un ángulo  $\theta_x$  y se recorren dos bucles; uno para los días y otro para las horas. Cuando se tienen una hora, día y ángulo  $\theta_x$  se calcula la posición del sol y en función de esta se resuelven las ecuaciones calculadas en el apartado anterior para obtener así  $\theta_y$ . De esta forma el panel siempre está lo más perpendicular que el ángulo  $\theta_x$  le permite.

Con los dos ángulos ya fijados se ejecutan las diferentes funciones explicadas con anterioridad y se la radiación y la relación de área expuesta.

De esta forma se obtienen diferentes matrices tridimensionales ya que una dimensión corresponde a los valores de  $\theta_y$ , otra a los días y otra a las horas y tienen una dimensión total de  $37 \times 365 \times 24$ .

A la hora de orientar el panel y fijar un ángulo del panel se puede fijar  $\theta_x$  o  $\theta_y$  y a su vez podemos situar en una posición oblicua, horizontal o vertical. La fijación del ángulo  $\theta_x$  (y girar el ángulo  $\theta_y$ ) resulta mucho más eficiente que la fijación del ángulo  $\theta_y$  (y girar el ángulo  $\theta_x$ ). Viendo las imágenes de la trayectoria solar resulta obvio, ya que si fijamos  $\theta_x$ , el panel gira siguiendo al sol mientras que si fijamos  $\theta_y$ , el panel tiene una relación de área proyectada y área real grande muy poco tiempo al día.

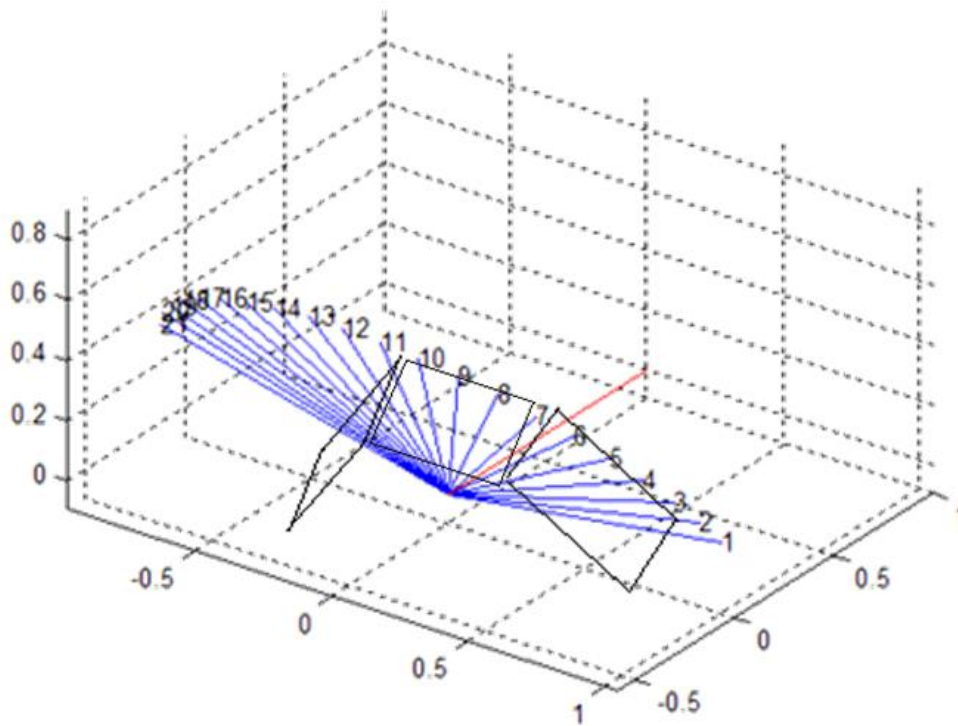


Ilustración 29: Posiciones del panel al girar  $\theta_y$

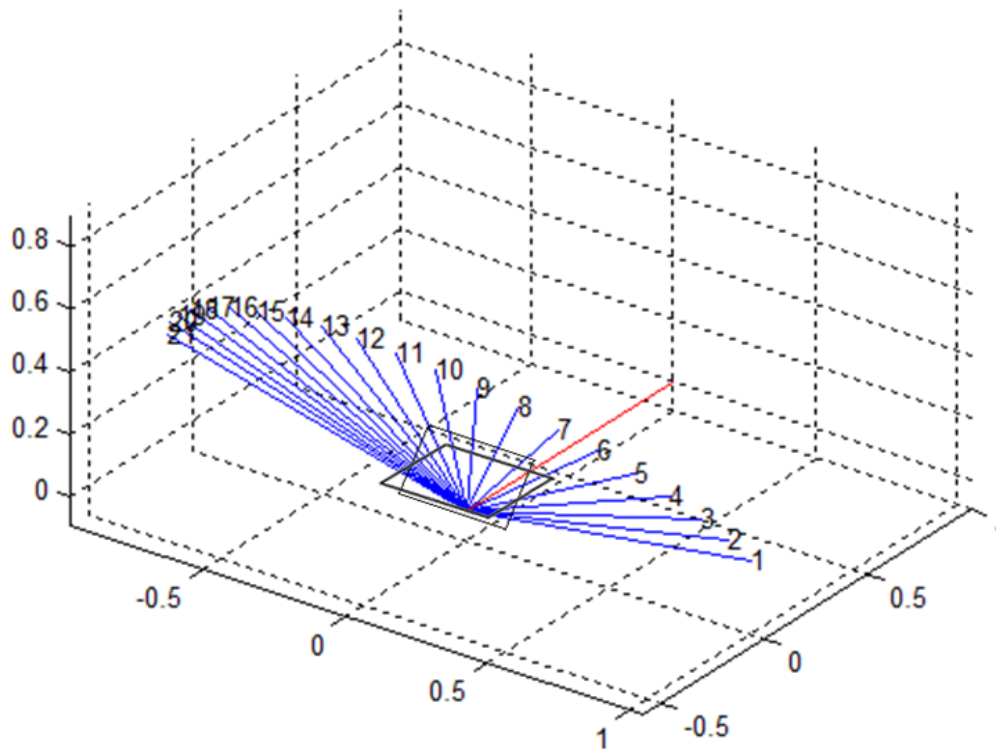


Ilustración 30: Posiciones del panel al girar  $\theta_x$

El ángulo  $\theta_x$  girado variará según donde coloquemos el panel. Será próximo a cero en el ecuador (ya que los rayos del sol inciden prácticamente siempre perpendiculares al plano terrestre) y más próximo a  $90^\circ$  cuanto más al norte esté situado el panel (ya que los rayos inciden de forma más oblicua).

Se observa en las ilustraciones 19 y 20 que la mejor disposición (para Pamplona en este caso) es girar un ángulo  $\theta_x$  unos  $40^\circ$  aproximadamente para obtener la máxima cantidad de energía.

Para calcular este ángulo que debemos girar lo que hacemos es, partiendo de la matriz obtenida en el apartado del panel sin sistemas de seguimiento (un matriz  $37 \times 37$  que contenía la radiación para las posibles combinaciones de ángulos) sumar todas las radiaciones correspondientes a los 37 diferentes  $\theta_y$  que hay para cada  $\theta_x$ . De esta forma se obtiene un vector  $1 \times 37$  que contiene toda la radiación obtenida para un  $\theta_x$  al girar  $\theta_y$  los  $180^\circ$  especificados anteriormente.

### 5.3.- Resultados

Para no tener información de un solo sitio únicamente, se ejecutó el programa introduciendo las coordenadas de tres ciudades, dos de ellas en zonas alejadas de forma que se aprecie la variación de los resultados. Las ciudades son:

-Pamplona: latitud=42°49'00"N; longitud=-1°39'00"E; Altitud=460 m

-Quito: latitud=0°13'07"N; -78°30'35"E; altitud=0 m. Se ha elegido esta ciudad por estar situada en el ecuador, de forma que se obtengan unos valores de  $\theta_x$  próximos a cero.

-Helsinki: latitud=60°10'24"N; longitud=24°56'55"E; altitud=0 m. Se ha elegido esta ciudad ya que es una de las más al norte (dentro de las ciudades grandes y más importantes de cada país). Así en este caso, en contra del anterior, el valor de  $\theta_x$  será mayor que obtenido para Pamplona.

#### 5.3.1.- Pamplona

Viendo el valor máximo del vector  $1 \times 37$  mencionado al final del apartado 4.2.- se obtiene el ángulo al que corresponde. Se obtiene que:

$$\theta_x = 45^\circ$$

Viendo de perfil la imagen de la trayectoria del sol, vemos que los 45 corresponden prácticamente a que el panel este en todo momento perpendicular a los rayos del sol (la línea negra más gruesa representa el panel solar).

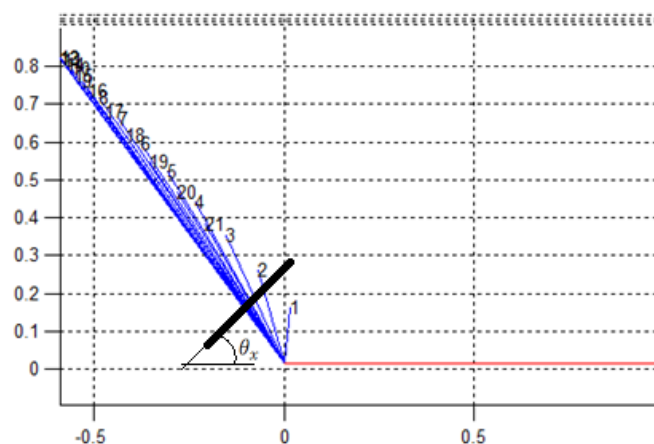


Ilustración 31: Posiciones del sol en su trayectoria vistas de perfil

Fijando este ángulo, ejecutamos el programa y se obtiene que la radiación máxima tiene un valor de:

$$\text{Energía} = 7,0010 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Vemos que es un valor considerablemente mayor que el obtenido para el panel sin sistema de seguimiento.

$$\text{Ganancia} = \frac{7,0010 \cdot 10^6}{5,3686 \cdot 10^6} \cdot 100 - 100 = 30,41\%$$

Aplicando un sistema de seguidor de un eje a un panel obtenemos una ganancia del 30,41% respecto a un panel sin sistemas de seguimiento óptimamente orientado.

Ejecutando el programa para un valor de  $\theta_x = 0^\circ$  y  $\theta_x = 90^\circ$  (el panel situado de forma horizontal o vertical) se obtienen las siguientes radiaciones:

$$\text{Energía}(\theta_x = 0^\circ) = 6.3689 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

$$\text{Energía}(\theta_x = 90^\circ) = 5.8164 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Con estos valores podemos comprobar que la mejor posición de  $\theta_x$  es una oblicua (como la utilizada anteriormente).

### 5.3.2.- Quito

Para calcular la radiación obtenida por sistemas de seguimiento de un eje en Quito se necesita conocer el ángulo  $\theta_x$  y para ello es necesario haber calculado toda la matriz de radiación correspondiente al sistema sin seguimiento (como en el caso anterior) que no se ha hecho. Para solventar este problema representamos la trayectoria del sol en Quito:

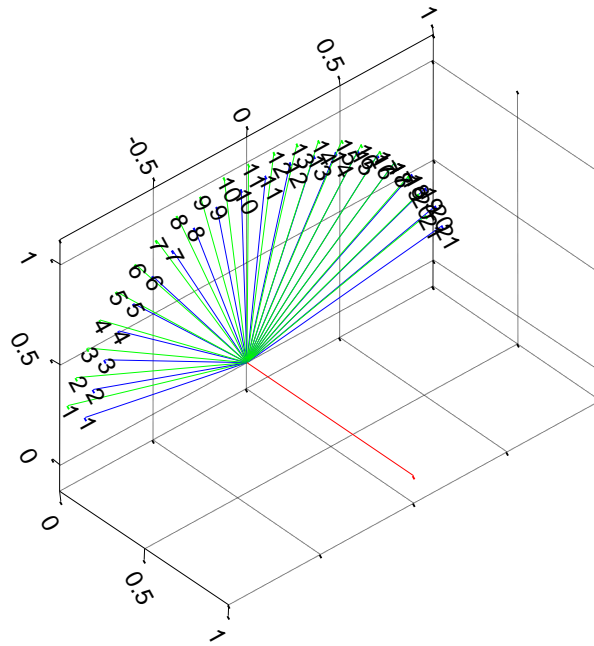


Ilustración 32: Posición y proyección del sol en Quito

Viendo la figura podemos asumir que  $\theta_x \approx 0^\circ$ . Con este valor ya conocido calculamos la radiación máxima que llega en esta ubicación.

Obtenemos la siguiente radiación

$$\text{Energía} = 7,9313 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

### 5.3.3.- Helsinki

Ahora vuelve a ocurrir lo mismo que ocurría al calcular la radiación para Quito, que no conocemos el valor de  $\theta_x$  que tomar. Para solucionar el problema tomamos un valor aproximado a partir de las posiciones del sol a lo largo de la trayectoria realizada.

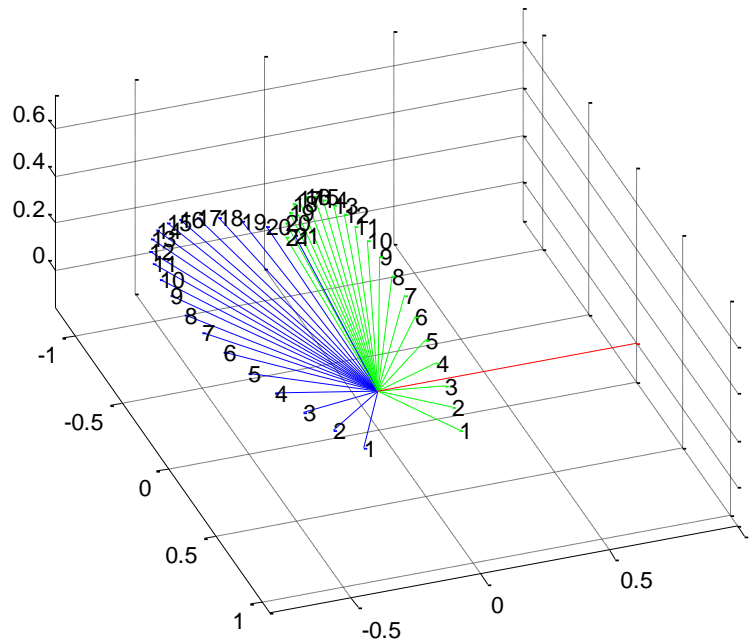


Ilustración 33: Posiciones del sol en Helsinki

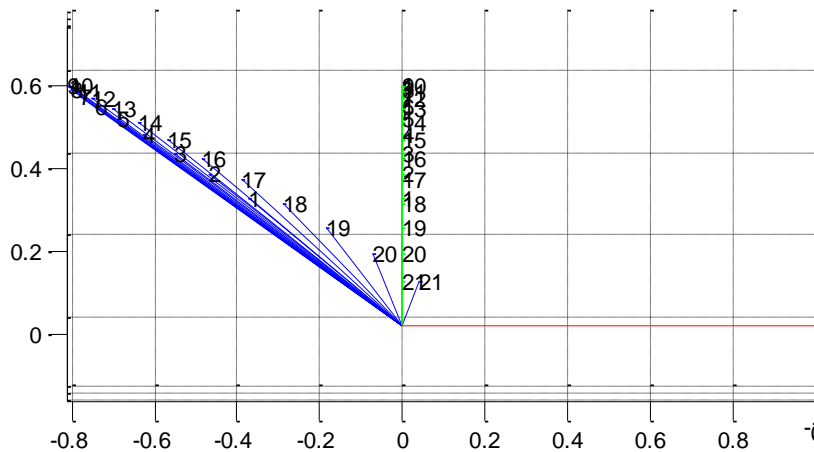


Ilustración 34: Vista lateral de las posiciones del sol en Helsinki

A partir de las dos imágenes anteriores aproximamos un valor a  $\theta_x \approx 55^\circ$ .

Teniendo ese valor para el ángulo fijo y las coordenadas geométricas del lugar, se ejecuta el programa y obtenemos la energía absorbida por el panel:

$$Energía = 6,1776 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

## 6.- PANEL CON SEGUIDOR DE 2 EJES

### 6.1.- Posición y rotación del panel solar

El panel que utiliza un seguidor con dos rotaciones, gira tal y como se ha explicado anteriormente (*ilustración 23*), rotando un ángulo  $\theta_y$  según el eje  $y \equiv y'$  y un ángulo  $\theta_x$  según el eje  $x' \equiv x''$ .

Las matrices de cambio de base panel-tierra, sol tierra y el vector de posición del sol son los mismos que los explicados anteriormente:

$$\left[ \bar{R}_{\theta_x \theta_y} \right]_{x''y''z''}^{xyz} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & \text{sen}(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) & -\cos(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ 0 & \cos(\theta_x) & \text{sen}(\theta_x) \\ \text{sen}(\theta_y) & -\cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \end{bmatrix}_{x''y''z''}^{xyz}$$

$$\left[ \bar{R}_{AzEl} \right]_{xyz}^{a'b'c'} = \begin{bmatrix} \cos(Az) & \text{sen}(Az) \cdot \cos(El) & -\text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(El) \\ -\text{sen}(Az) & \cos(Az) \cdot \cos(El) & -\cos(Az) \cdot \text{sen}(El) \\ 0 & \text{sen}(El) & \cos(El) \end{bmatrix}_{xyz}^{a'b'c'}$$

$$\{\text{posición del sol}\}_{xyz} = \begin{Bmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \\ \cos(El) \cdot \cos(Az) \\ \text{sen}(El) \end{Bmatrix}_{xyz}$$

De la misma forma que en el caso anterior de seguidor de un eje, tenemos que igualar el vector de posición del sol (en este caso no es el proyectado pues situaremos el panel exactamente perpendicular al sol) y el vector director del plano de la placa solar. En este caso el vector director del plano del panel solar es:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}_{x''y''z''}$$

Para poder igualar los vectores deben estar ambos en la misma base (al igual que ocurría en el caso anterior), por lo que hay que cambiar el vector del sol a la base del panel solar por medio de la matriz  $\left[ \bar{R}_{\theta_x \theta_y} \right]_{x''y''z''}^{xyz}$  calculada anteriormente:



$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_{xyz} = [\bar{R}_{\theta_x \theta_y}]_{xyz} \cdot \begin{pmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \\ \cos(El) \cdot \cos(Az) \\ \text{sen}(El) \end{pmatrix}_{xyz}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \cos(\theta_y) - \cos(\theta_x) \cdot \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \text{sen}(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_x) + \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \cos(\theta_x) \\ \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(El) - \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(\theta_x) \end{pmatrix}_{xyz}$$

Pasando el término de la izquierda a la derecha se iguala el sistema a cero y se obtiene el sistema de ecuaciones que hay que resolver:

$$\begin{cases} 0 = \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \cos(\theta_y) - \cos(\theta_x) \cdot \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \text{sen}(\theta_x) \cdot \text{sen}(\theta_y) \\ 0 = \text{sen}(El) \cdot \text{sen}(\theta_x) + \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \cos(\theta_x) \\ 0 = \cos(El) \cdot \text{sen}(Az) \cdot \text{sen}(\theta_y) + \cos(\theta_x) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(El) - \cos(Az) \cdot \cos(El) \cdot \cos(\theta_y) \cdot \text{sen}(\theta_x) \end{cases}$$

Al igual que el sistema anterior este se resolverá utilizando la función *fsolve* (que lo resuelve por métodos iterativos) con ayuda del programa *Matlab*. Una vez se resuelve el sistema se obtienen los valores de  $\theta_x$  y  $\theta_y$  para los que el panel se encuentra perfectamente orientado para una fecha, hora, latitud, longitud y altura dadas.

## 6.2.- Energía captada por el panel con un seguidor de dos ejes

Utilizando un sistema de seguimiento de dos ejes, el panel solar se encontrará siempre en la posición idónea, perpendicular al sol, captando así la máxima radiación que el rendimiento del propio panel permita. De esta forma ya no hay que tener en cuenta la relación entre el área real y el área proyectada puesto que estas coinciden en todo momento.

Para obtener la energía captada por la placa fotovoltaica y poder comprar más adelante la importancia del uso de los seguidores solares simplemente se calculará la energía en cada hora y día del año mediante los datos tabulados explicados anteriormente.

Para obtener estos datos, al igual que en el caso anterior se realizará un programa con *Matlab* utilizando un bucle *for* para recorrer todas las horas de todos los días del año obteniendo el dato de radiación en cada hora y almacenándolo en una matriz, que en este caso tendrá unas dimensiones de 365×24. El programa suma todos los valores de esta matriz obteniendo así un único dato correspondiente a la radiación obtenida en el panel a lo largo de todo el año.

De la misma forma que en el apartado anterior (4.3.-) en este también se ejecutará el programa para las ciudades de Pamplona, Quito y Helsinki por su localización geográfica característica (Quito se encuentra en la línea del ecuador y Helsinki es la capital europea más al norte).

### 6.2.1.- Pamplona

Al ejecutar el programa para el panel con un sistema de seguimiento de dos ejes (siempre perpendicular) en la ciudad de Pamplona se obtuvo la siguiente cantidad de energía incidente en el panel:

$$Energía = 7,4810 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Con respecto al sistema de seguimiento de un eje para la misma ciudad e intervalo de tiempo se da la siguiente mejora:

$$Ganancia = \frac{7,4810 \cdot 10^6}{7,0010 \cdot 10^6} \cdot 100 - 100 = 6,86\%$$

Con respecto a un panel sin sistema de seguimiento para la misma ciudad e intervalo de tiempo se da la siguiente mejora:

$$Ganancia = \frac{7,4810 \cdot 10^6}{5,3686 \cdot 10^6} \cdot 100 - 100 = 39,35\%$$

### 6.2.2.- Quito

Al ejecutar el programa para el panel con un sistema de seguimiento de dos ejes (siempre perpendicular) en la ciudad de Quito se obtuvo la siguiente cantidad de energía incidente en el panel:

$$Energía = 8,2611 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Con respecto al sistema de seguimiento utilizado en el apartado anterior para la misma ciudad e intervalo de tiempo se da la siguiente mejora:

$$Ganancia = \frac{8,2611 \cdot 10^6}{7,9313 \cdot 10^6} \cdot 100 - 100 = 4,16\%$$

### 6.2.3.- Helsinki

Al ejecutar el programa para el panel con un sistema de seguimiento de dos ejes (siempre perpendicular) en la ciudad de Pamplona se obtuvo la siguiente cantidad de energía incidente en el panel:

$$\text{Energía} = 6,9268 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

Con respecto al sistema de seguimiento utilizado en el apartado anterior para la misma ciudad e intervalo de tiempo se da la siguiente mejora:

$$\text{Ganancia} = \frac{6,9268 \cdot 10^6}{6,1776 \cdot 10^6} \cdot 100 - 100 = 12,13\%$$

## 7.- CONCLUSIONES

Tras obtener los datos tanto de radiación obtenida como de ángulos óptimos para cada tipo de seguidor y cada ciudad los recopilamos en la siguiente tabla (radiación medida en  $J/m^2$  y ángulos medidos en grados):

		Seguidor de 2 ejes	Seguidor de 1 eje		Sin seguidor		
		Radiación	Radiación	Ángulo $\theta_x$	Radiación	Ángulo $\theta_x$	Ángulo $\theta_y$
Ciudades	Quito	$8,2611 \cdot 10^6$	$7,9313 \cdot 10^6$	$0^\circ$	-	-	-
	Pamplona	$7,4810 \cdot 10^6$	$7,0010 \cdot 10^6$	$45^\circ$	$5,3686 \cdot 10^6$	$40^\circ$	$40^\circ$
	Helsinki	$6,9268 \cdot 10^6$	$6,1776 \cdot 10^6$	$55^\circ$	-	-	-

Se deduce de los datos recogidos en la tabla que cuanto más nos alejamos del ecuador (al norte en este caso) más disminuye la radiación que llega del sol. Esto es obvio ya que se debe a que los rayos inciden de forma más oblicua cuanto más lejos nos encontramos del ecuador. Esto repercute directamente en el ángulo de inclinación que tendremos que fijar ( $\theta_x$ ), que será mayor cuanto más nos alejemos del ecuador ya que lo que hace este ángulo es posicionar el panel perpendicular a los rayos, que inciden de forma más oblicua cuanto más alejados nos encontramos del ecuador.

Fijándose en las mejoras mostradas en los apartados anteriores (y en las radiaciones mostradas en la tabla) se puede apreciar que la utilización de sistemas de seguimiento, tanto de uno como de dos ejes, produce una mejora de la eficiencia energética considerable respecto a un panel fijo. No obstante, la mejora no es tan importante en el paso de seguidores de un eje a dos ejes.

Para completar este estudio sería necesario analizar el consumo energético de los seguidores, ya que, como se ha dicho previamente, la ganancia energética respecto al panel fijo debe ser siempre mayor que el consumo del seguidor.

También se observa que conforme más al norte se sitúa el panel mayor es la mejora de la eficiencia al utilizar sistemas de seguimiento de 2 ejes en vez de sistemas de seguimiento de un eje. Esto es debido a que cuando empleamos sistemas de seguimiento de un eje, el ángulo  $\theta_x$  lo mantenemos fijo y a que la trayectoria del sol no está contenida en un plano exacto sino que tiene algo de curvatura. Esto se puede explicar mediante las siguientes ilustraciones.

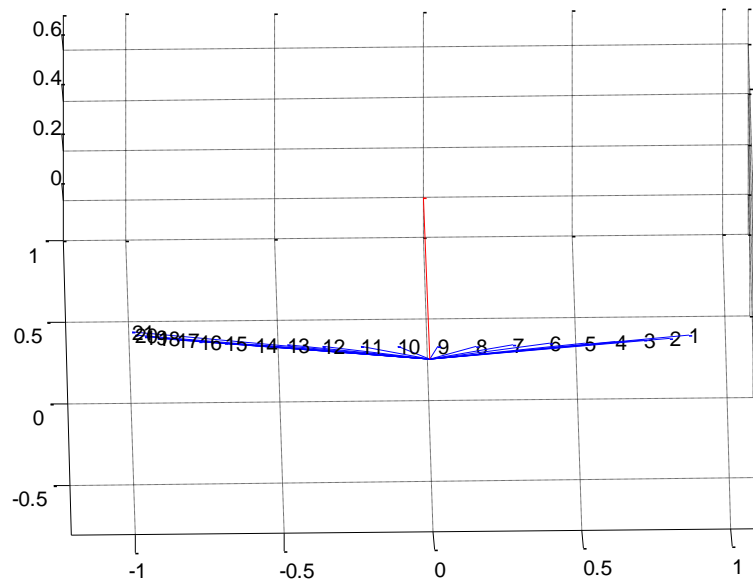


Ilustración 35: Posición del sol en Quito

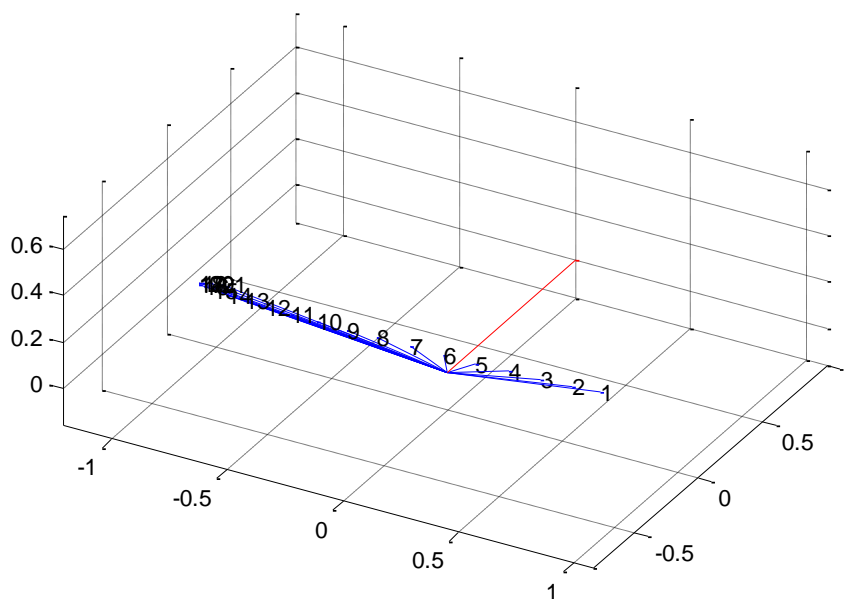


Ilustración 36: Posición del sol en Helsinki

En las dos ilustraciones anteriores se aprecia la curvatura de la trayectoria del sol, se puede observar como los vectores que indican la posición del sol no están todos contenidos en el mismo plano. Aunque levemente también se aprecia que dicha curvatura es algo mayor en la foto correspondiente a Helsinki

Esta curvatura (salirse del plano) es mayor cuanto más nos alejamos del ecuador (en el ecuador exacto está contenida en un plano perpendicular al suelo). Al fijar  $\theta_x$  se elige un valor tal que el plano del panel quede siempre perpendicular a este plano que

aproximadamente contiene la trayectoria del sol. Cuanto más plana sea la trayectoria del sol, más se asemejará nuestro sistema de seguimiento de un eje a un sistema de seguimiento de dos ejes y cuanto más curva sea (más alejada del ecuador) más variará el sistema de un eje respecto al de dos. Es por esto que al situarse más al norte la mejora del panel de dos ejes respecto al de un eje es mayor, porque en esa ubicación el sistema de un eje es menos eficiente que el sistema de un eje en el ecuador.

## 8.- LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

El objetivo inicial de este trabajo era más ambicioso y se pretendía alcanzar además de los resultados obtenidos, un análisis de las pérdidas por rozamiento que se tienen al girar los paneles y una mejora que tuviese en cuenta el *backtracking*.

Además en un principio también se quería llevar a cabo un estudio sobre un tipo de panel solar con un sistema de seguimiento novedoso que no se comercializa actualmente en el mercado. El sistema de seguimiento de este panel consistía en que el panel (con forma circular en la ilustración, aunque no necesariamente) se sujetaba mediante un mástil que alzaba el panel al comienzo del día y por medio de un sistema de frenos iba bajando. El sistema de frenos estaba compuesto por tres frenos que se iban soltando unos u otros de forma que movían el panel para que este quedase orientado. De esta forma únicamente se consume energía al realizar la elevación y no durante el seguimiento solar.

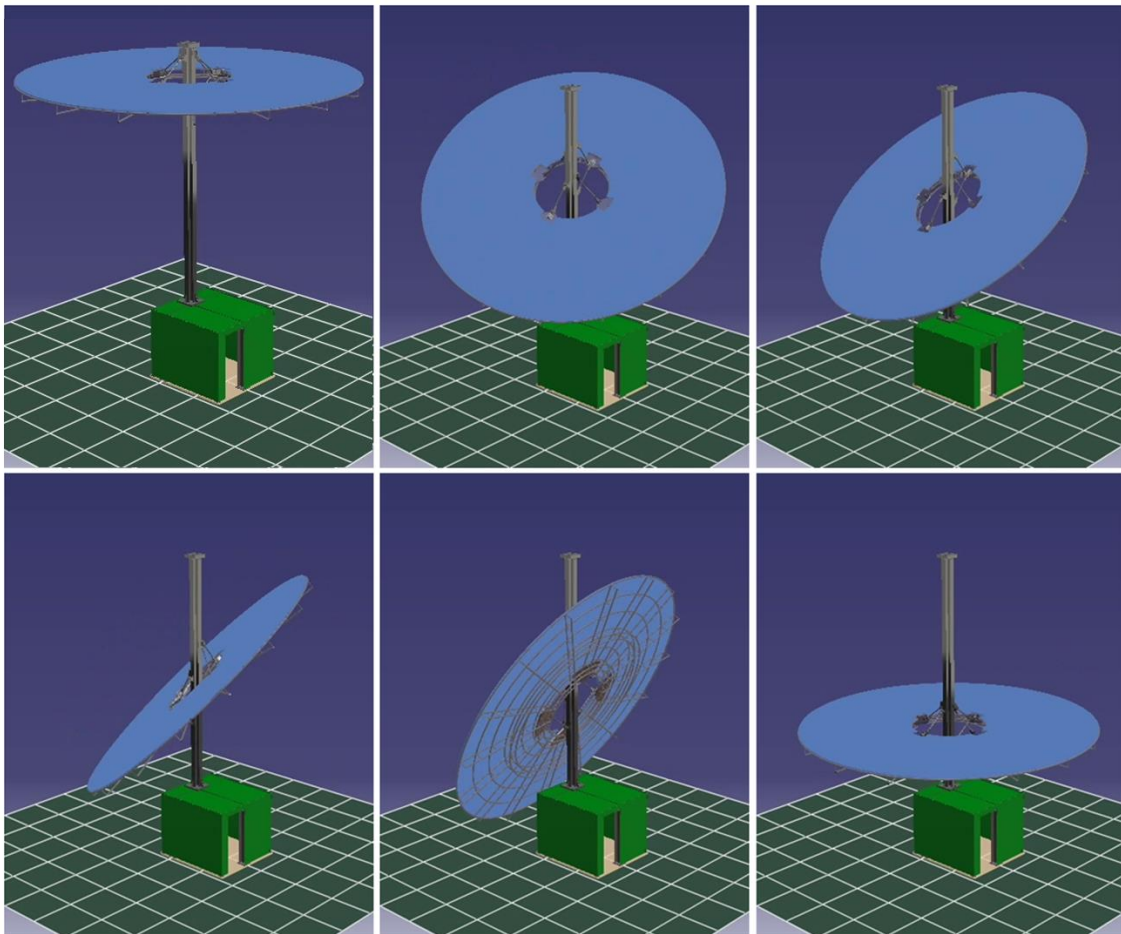


Ilustración 37: Sistema de seguimiento alternativo no comercializado

Sin embargo por falta de tiempo todas estas ideas iniciales no se pudieron llevar a cabo y algunas de ellas han quedado como líneas de trabajo futuro.

En el estudio y los programas realizados hay varios puntos esenciales que se podrían mejorar considerablemente, de forma que la comparativa del ahorro energético fuese más precisa.

-Utilización de radiación horaria: los datos empleados para calcular la radiación en cada punto geográfico han sido obtenidos a partir de unos datos de radiación promedio mensual. En la misma web en la que se obtuvieron (CM SAF) está disponible también una tabla de radiación horaria. Si se utilizasen estos datos, los resultados obtenidos serían más precisos. El inconveniente es que al ser radiación horaria la cantidad de datos que hay es mucho mayor y por tanto el espacio que ocupan también (en torno a 800 GB), pudiendo suponer esto un problema.

-Consideración de *backtracking*: el backtracking es un sistema que se utiliza en los campos solares con varios paneles, de forma que al amanecer el panel no se pone perpendicular al sol para obtener la máxima radiación ya que daría sombra a los que tiene detrás. Al tener varios paneles resulta más eficiente que tengan una menor área expuesta y que el sol llegue a todos a que el sol incida perpendicularmente en unos pocos de ellos. La ilustración 35 muestra esta consideración para seguidores de un eje horizontal.

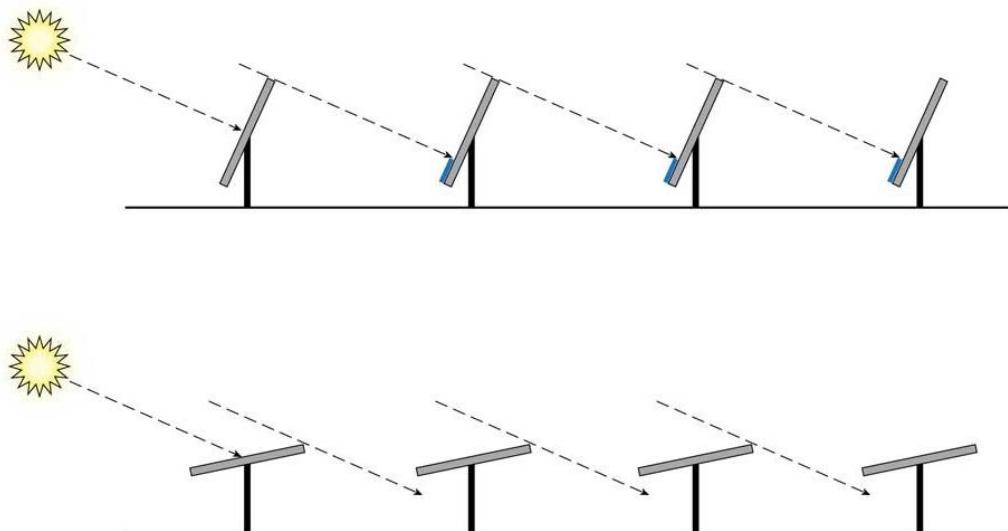


Ilustración 38: Funcionamiento del *backtracking*



Como mejora del estudio, se incluiría un programa que en las primeras horas del día y en función de la distancia y disposición de los paneles calcule la sombra que se dan entre ellos y el ángulo óptimo de inclinación para obtener la máxima energía.

-Consideración del rozamiento: los paneles al girar tienen un rozamiento que genera unas pérdidas energéticas por fricción. Estas pérdidas pueden ser pequeñas pero pueden tener relevancia a la hora de comparar los paneles con seguimiento respecto a los que no lo tienen.

-Pérdidas por nubosidad: no se ha tenido en cuenta la cantidad de nubes que hay en los diferentes lugares según el clima y la fecha en la que se mida la radiación. Esto puede ser un factor importante ya que en lugares como Pamplona o ciudades con una gran cantidad de nubes al año supondría una pérdida de radiación considerable a lo largo del año. Para mejorar este aspecto se puede crear una matriz con factores de nubosidad (disponibles en la página web de CM SAF) que multiplicarían a la radiación obtenida de igual forma que lo hace el factor del área expuesta, obteniendo así unos valores más acordes con la realidad.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

Siemer J. *Los sistemas de seguimiento: una tecnología conforme a la actualidad*, Photon. La revista de Fotovoltaica 2009 Vol. 10, páginas 70–121.

Altuzarra O, Seras I, Macho E, et al. *A low energy consumption solar tracker based in parallel kinematics*. In: Padois V, Bidaud P and Khatib O (eds) Proceedings of the 19th CISM-Ifomm Symposium on Romansy 19 –robot design, dynamics and control, 2013, pp.69–76.

Apuntes de Mécanica, 2º Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

<http://www.solarweb.net/solar-fotovoltaica.php>

<http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2013/12/la-demanda-de-energia-electrica-desciende-un-2-1-en-2013>

<http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com.es/2013/04/que-panel-comprar-monocristalino-o-policristalino.html>

<http://www.isolari.es/tipos-de-placas-fotovoltaicas>

[http://renaissance.unizar.es/attachments/088\\_Posici%C3%B3n%20y%20Movimiento%20del%20Sol.pdf](http://renaissance.unizar.es/attachments/088_Posici%C3%B3n%20y%20Movimiento%20del%20Sol.pdf)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Altura\\_%28astronom%C3%ADa%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Altura_%28astronom%C3%ADa%29)

<http://www.slideshare.net/tito.carreras/ngulos-de-euler-1477463>

## ANEXO 1

### PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL

```

function [Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt)

% Programed by Darin C. Koblick 2/17/2009

% External Function Call Sequence:
%[Az El] = SolarAzEl('1991/05/19 13:00:00',50,10,0)

% Function Description:
% SolarAzEl will ingest a Universal Time, and specific site location
on earth
% it will then output the solar Azimuth and Elevation angles relative
to that
% site.

%Input Description:
% UTC (Coordinated Universal Time YYYY/MM/DD hh:mm:ss)
% Lat (Site Latitude in degrees -90:90 -> S(-) N(+))
% Lon (Site Longitude in degrees -180:180 W(-) E(+))
% Altitude of the site above sea level (km)

%Output Description:
%Az (Azimuth location of the sun in degrees)
%El (Elevation location of the sun in degrees)

%Source References:
%Solar Position obtained from:
%http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html#5

% Code Sequence

%compute JD
jd = juliandate(UTC, 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');
d = jd-2451543.5;

% Keplerian Elements for the Sun (geocentric)
w = 282.9404+4.70935e-5*d; % (longitude of perihelion degrees)
a = 1.000000;% (mean distance, a.u.)
e = 0.016709-1.151e-9*d;% (eccentricity)
M = mod(356.0470+0.9856002585*d,360);% (mean anomaly degrees)
L = w + M; % (Sun's mean longitude degrees)
oblecl = 23.4393-3.563e-7.*d; % (Sun's obliquity of the ecliptic)

%auxiliary angle
E = M+(180/pi).*e.*sin(M.*(pi/180)).*(1+e*cos(M.*(pi/180)));

%rectangular coordinates in the plane of the ecliptic (x axis toward
%perhilion)
x = cos(E.*(pi/180))-e;
y = sin(E.*(pi/180)).*sqrt(1-e.^2);

%find the distance and true anomaly
r = sqrt(x.^2 + y.^2);
v = atan2(y,x).*(180/pi);

```

```

%find the longitude of the sun
lon = v + w;

%compute the ecliptic rectangular coordinates
xeclip = r.*cos(lon.*(pi/180));
yeclip = r.*sin(lon.*(pi/180));
zeclip = 0.0;

%rotate these coordinates to equatorial rectangular coordinates
xequat = xeclip;
yequat = yeclip.*cos(oblecl.*(pi/180))+zeclip*sin(oblecl.*(pi/180));
zequat = yeclip.*sin(23.4406.*(pi/180))+zeclip*cos(oblecl.*(pi/180));

%convert equatorial rectangular coordinates to RA and Decl:
r = sqrt(xequat.^2 + yequat.^2 + zequat.^2)-(Alt/149598000); %roll up
the altitude correction
RA = atan2(yequat,xequat).*(180/pi);
delta = asin(zequat./r).*(180/pi);

%Following the RA DEC to Az Alt conversion sequence explained here:
%http://www.stargazing.net/kepler/altaz.html

%Find the J2000 value
J2000 = jd - 2451545.0;
hourvec = datevec(UTC, 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');
UTH = hourvec(4) + hourvec(5)/60 + hourvec(6)/3600;

%Calculate local sidereal time
GMST0=mod(L+180,360)/15;
SIDTIME = GMST0 + UTH + Lon/15;

%Replace RA with hour angle HA
HA = (SIDTIME*15 - RA);

%convert to rectangular coordinate system
x = cos(HA.*(pi/180)).*cos(delta.*(pi/180));
y = sin(HA.*(pi/180)).*cos(delta.*(pi/180));
z = sin(delta.*(pi/180));

%rotate this along an axis going east-west.
xhor = x.*cos((90-Lat).*(pi/180))-z.*sin((90-Lat).*(pi/180));
yhor = y;
zhor = x.*sin((90-Lat).*(pi/180))+z.*cos((90-Lat).*(pi/180));

%Find the h and AZ (grados)
Az = atan2(yhor,xhor).*(180/pi); % from North (0_deg) through East
(90_deg), South (180_deg), West (270_deg) and back to North
El = asin(zhor).*(180/pi);
%
% function jd = juliandate(varargin)
% % This sub function is provided in case juliandate does not come
with your
% % distribution of Matlab
%
% [year,month,day,hour,min,sec] = datevec(datenum(varargin{:}));
%
% for k = length(month):-1:1
%     if ( month(k) <= 2 ) % january & february
%         year(k) = year(k) - 1.0;

```

```
%      month(k) = month(k) + 12.0;
%      end
% end
%
% jd = floor( 365.25*(year + 4716.0)) + floor( 30.6001*( month + 1.0))
+ 2.0 - ...
%      floor( year/100.0 ) + floor( floor( year/100.0 )/4.0 ) + day -
1524.5 + ...
%      (hour + min/60 + sec/3600)/24;
```

## ANEXO 2

### PROGRAMA PARA LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES EN EL SEGUIDOR DE 2 EJES

```

% Az y El son los ángulos azimutal y elevación (en grados) de la
posición
% del sol

% x(1) y x(2) son teta_x y teta_y respectivamente. (Angulo que gira
el
% panel en x y en y).

function [f]=solucion_ecuaciones(x,Az2,El)

%Ecuaciones

f(1)=cos(El*(pi/180))*sin(Az2*(pi/180))*cos(x(2))-
cos(x(1))*sin(El*(pi/180))*sin(x(2))+cos(Az2*(pi/180))*cos(El*(pi/180)
)*sin(x(1))*sin(x(2));
f(2)=sin(El*(pi/180))*sin(x(1))+cos(Az2*(pi/180))*cos(El*(pi/180))*cos
(x(1));
f(3)=cos(El*(pi/180))*sin(Az2*(pi/180))*sin(x(2))+cos(x(1))*cos(x(2))*
sin(El*(pi/180))-
cos(Az2*(pi/180))*cos(El*(pi/180))*cos(x(2))*sin(x(1))-1;

```

## ANEXO 3

### PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL Y DEL PANEL EN EL SEGUIDOR DE 2 EJES

```

%Definimos las coordenadas del lugar en el que nos encontramos.

UTC='2014/04/04 06:00:00';      %Fecha de inicio
Lat=42;                        %Latitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Lon=-1.8;                      %Longitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Alt=0.46;                     %Altitud del lugar donde nos
encontramos en km
Inc=30;                       %incrementos en minutos para las
diferentes medidas del sol
UTC2='2014/04/04 16:00:00';   %Fecha final para el cálculo de la
posición del sol

% Definimos mat_pos_sol: matriz que rellenaremos con los diferentes
resultados de los angulos azimutal
% y elevación.
mat_pos_sol=[];

%Definimos mat_pos_panel: matriz que rellenaremos con los ángulos que
se debe mover el panel solar
%para estar perpendicular al sol.
mat_pos_panel=[];

%Definimos mat_fecha: matriz que rellenaremos con las fechas
correspondientes a cada medición
mat_fecha=[];

%Definimos mat_error: matriz que rellenaremos con las comprobaciones
de la función con los valores
%obtenidos (debería ser todo ceros)
mat_error=[];

%Definimos mat_exitflag: matriz que rellenaremos con las condiciones
de resolución de las
%ecuaciones(exitflag)
mat_exitflag=[];

%Definimos el valor inicial para realizar las iteraciones
X0=[0,pi/2];

%Pasamos la fecha inicial, el incremento de tiempo y la fecha final a
un
%valor numérico para poder operar con ellos.
A=datetime(UTC);
B=datetime(0000,00,0,0,Inc,0);
C=datetime(UTC2);
A2=datetime(UTC);      %Definimos A2 como un vector de valor numérico
correspondiente a la fecha (igual que A) que es el que va a ir
aumentando los incrementos especificados para obtener las posiciones
del sol.

%Comenzamos el bucle desde la fecha inicial hasta la fecha final
tantas

```

```

%veces como incrementos de tiempo haya entre las fechas comprendidas.

figure
hold on
count=0;

for i=A:B:C

    count=count+1; %contador que usaremos para que aparezca el número
de cada vector de posición del sol cuando lo representemos
graficamente
    A2=A2+B; %Aumentamos la fecha anterior en el incremento
especificado
    formatOut = 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS'; %Especificamos el tipo de
formato de salida de la fecha para volver a convertir el valor
numérico de la fecha modificada a un formato de fecha que se entienda
    UTC=datestr(A2,formatOut); %Convertimos el valor numérico de la
fecha (A2) aumentada un incremento (B2) al formato especificado
anteriormente
    mat_fecha=[mat_fecha;UTC]; %Insertamos la fecha en la matriz que
contendrá a todas y que hemos definido previamente
    [Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt); %Calculamos la posición
del sol en función de los parámetros de entrada
    Az2=Az-180; %Cambiamos el ángulo azimutal obtenido en el programa
(que lo toma medido desde el sur con valores negativos hacia el este y
positivos hacia el oeste) para que cuadre con nuestras ecuaciones (que
para hacer los cambios de base lo hemos tomado como medido desde el
norte y positivo hacia el este y negativo hacia el oeste)
    mat_pos_sol=[mat_pos_sol;Az2,El]; %Almacenamos los dos ángulos
que identifican la posición del sol en la matriz que contendrá todas
las posiciones del sol

    %Resolución del sistema de ecuaciones

    [X,feval,exitflag] = fsolve(@(x)
solucion_ecuaciones(x,Az2,El),X0); %Mediante un método iterativo
resolvemos el sistema de 3 ecuaciones y 2 incógnitas (giro en x y en y
del panel solar)

    X0=X; %definimos que las condiciones iniciales sean las
soluciones obtenidas para que en la próxima resolución del sistema de
ecuaciones le cueste menos iterar por estar la solución real y los
valores iniciales mucho más próximos

    mat_pos_panel=[mat_pos_panel;X*(180/pi)]; %Almacenamos los dos
ángulos que debe girar el panel solar (los obtenidos al solucionar
elsistema de ecuaciones) en la matriz de posiciones del panel

    mat_error=[mat_error;feval]; %Almacenamos el resultado de las
funciones al evaluarlas en las soluciones obtenidas por el programa
(deberá ser un valor muy próximo a cero, sin llegar a serlo debido a
que el método de resolución no es exacto)

    mat_exitflag=[mat_exitflag;exitflag]; %Almacenamos el parámetro
que nos indicará como se ha realizado la resolución del sistema de
ecuaciones (de forma correcta, incorrecta, exacta...)

    %Pasamos los ángulos obtenidos de radianes a grados

```



```

Az=Az*pi/180;
Az2=Az2*pi/180;
El=El*pi/180;

```

```

R_az_el =[ cos(Az2), cos(El)*sin(Az2), -sin(Az2)*sin(El);-sin(Az2),
cos(Az2)*cos(El), -cos(Az2)*sin(El); 0, sin(El),
cos(El)]; %Matriz de cambio de base de la base del sol a la base
terrestre

```

```

vector_unitario=[0;1;0]; %vector de posición del sol en la propia
base del sol

```

```

vector_unitario_xyz=R_az_el*vector_unitario; %Vector que representa
la posición del sol en la base terrestre (xyz)

```

```

%representamos gráficamente las posiciones del sol (en azul)
plot3([0,vector_unitario_xyz(1)],[0,vector_unitario_xyz(2)],[0,vector_
unitario_xyz(3)])
text(vector_unitario_xyz(1),vector_unitario_xyz(2),vector_unitario_xyz
(3),num2str(count))

```

```

end;

```

```

%Representamos en la misma gráfica un vector que indica el norte (en
rojo)
plot3([0,0],[0,1],[0,0],'r')
axis equal
grid on
view(45,25)

```

```

%Mostramos las diferentes matrices con todos los datos obtenidos
mat_fecha
mat_pos_sol
mat_pos_panel
mat_error
mat_exitflag

```

## ANEXO 4

### PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL Y DEL PANEL EN EL SEGUIDOR DE 1 EJE

```

%Definimos las coordenadas del lugar en el que nos encontramos.

UTC='2014/04/04 05:50:00';      %Fecha de inicio
Lat=42;                        %Latitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Lon=-1.8;                      %Longitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Alt=0.46;                      %Altitud del lugar donde nos
encontramos en km
Inc=30;                        %incrementos en minutos para las
diferentes medidas del sol
UTC2='2014/04/04 16:00:00';    %Fecha final para el cálculo de la
posición del sol

% Definimos mat_pos_sol: matriz que rellenaremos con los diferentes
resultados de los ángulos azimutal
% y elevación.
mat_pos_sol=[];

%Definimos mat_pos_panel: matriz que rellenaremos con los ángulos que
se debe mover el panel solar
%para estar perpendicular al sol.
mat_pos_panel=[];

%Definimos mat_fecha: matriz que rellenaremos con las fechas
correspondientes a cada medición
mat_fecha=[];

%Definimos mat_error: matriz que rellenaremos con las comprobaciones
de la función con los valores
%obtenidos (debería ser todo ceros)
mat_error=[];

%Definimos mat_exitflag: matriz que rellenaremos con las condiciones
de resolución de las
%ecuaciones(exitflag)
mat_exitflag=[];

%Definimos el valor inicial para realizar las iteraciones
X0=[pi/2];

%Pasamos la fecha inicial, el incremento de tiempo y la fecha final a
un
%valor numérico para poder operar con ellos.
A=datetime(UTC);
B=datetime(0000,00,0,0,Inc,0);
C=datetime(UTC2);
A2=datetime(UTC);      %Definimos A2 como un vector de valor numérico
correspondiente a la fecha (igual que A) que es el que va a ir
aumentando los incrementos especificados para obtener las posiciones
del sol.

```

```

%Comenzamos el bucle desde la fecha inicial hasta la fecha final
tantas
%veces como incrementos de tiempo haya entre las fechas comprendidas.

figure
hold on
count=0;

for i=A:B:C

    count=count+1; %contador que usaremos para que aparezca el número
de cada vector de posición del sol cuando lo representemos
graficamente
    A2=A2+B; %Aumentamos la fecha anterior en el incremento
especificado
    formatOut = 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS'; %Especificamos el tipo de
formato de salida de la fecha para volver a convertir el valor
numérico de la fecha modificada a un formato de fecha que se entienda
    UTC=datestr(A2,formatOut); %Convertimos el valor numérico de la
fecha (A2) aumentada un incremento (B2) al formato especificado
anteriormente
    mat_fecha=[mat_fecha;UTC]; %Insertamos la fecha en la matriz que
contendrá a todas y que hemos definido previamente
    [Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt); %Calculamos la posición
del sol en función de los parámetros de entrada
    Az2=Az-180; %Cambiamos el ángulo azimutal obtenido en el programa
(que lo toma medido desde el sur con valores negativos hacia el este y
positivos hacia el oeste) para que cuadre con nuestras ecuaciones (que
para hacer los cambios de base lo hemos tomado como medido desde el
norte y positivo hacia el este y negativo hacia el oeste)
    mat_pos_sol=[mat_pos_sol;Az2,El]; %Almacenamos los dos ángulos
que identifican la posición del sol en la matriz que contendrá todas
las posiciones del sol

    %Resolución del sistema de ecuaciones

    [X,feval,exitflag] = fsolve(@(x) ecuaciones_un_eje(x,Az2,El),X0);
%Mediante un método iterativo resolvemos el sistema de 3 ecuaciones y
2 incógnitas (giro en x y en y del panel solar)

    X0=X; %definimos que las condiciones iniciales sean las
soluciones obtenidas para que en la próxima resolución del sistema de
ecuaciones le cueste menos iterar por estar la solución real y los
valores iniciales mucho más próximos

    mat_pos_panel=[mat_pos_panel;X*(180/pi)]; %Almacenamos los dos
ángulos que debe girar el panel solar (los obtenidos al solucionar
elsistema de ecuaciones) en la matriz de posiciones del panel

    mat_error=[mat_error;feval]; %Almacenamos el resultado de las
funciones al evaluarlas en las soluciones obtenidas por el programa
(deberá ser un valor muy próximo a cero, sin llegar a serlo debido a
que el método de resolución no es exacto)

    mat_exitflag=[mat_exitflag;exitflag]; %Almacenamos el parámetro
que nos indicará como se ha realizado la resolución del sistema de
ecuaciones (de forma correcta, incorrecta, exacta...)

```

```

%Pasamos los ángulos obtenidos de radianes a grados
Az=Az*pi/180;
Az2=Az2*pi/180;
El=El*pi/180;

R_az_el =[ cos(Az2), cos(El)*sin(Az2), -sin(Az2)*sin(El);-sin(Az2),
cos(Az2)*cos(El), -cos(Az2)*sin(El); 0, sin(El),
cos(El)]; %Matriz de cambio de base de la base del sol a la base
terrestre

R_az_el_proy=[ cos(Az2), cos(El)*sin(Az2), -sin(Az2)*sin(El);0, 0, 0;
0, sin(El), cos(El)]; %Matriz de cambio de base de la
base del sol proyectado a la base terrestre

vector_unitario=[0;1;0]; %vector de posición del sol en la propia
base del sol

vector_unitario_xyz=R_az_el*vector_unitario; %Vector que representa
la posición del sol en la base terrestre (xyz)

vector_unitario_xyz_proy=R_az_el_proy*vector_unitario;

%representamos gráficamente las posiciones del sol (en azul)
plot3([0,vector_unitario_xyz(1)],[0,vector_unitario_xyz(2)],[0,vector_uni-
tario_xyz(3)])
text(vector_unitario_xyz(1),vector_unitario_xyz(2),vector_unitario_xyz
(3),num2str(count))

plot3([0,vector_unitario_xyz_proy(1)],[0,vector_unitario_xyz_proy(2)],[
0,vector_unitario_xyz_proy(3)],'g')
text(vector_unitario_xyz_proy(1),vector_unitario_xyz_proy(2),vector_un-
itario_xyz_proy(3),num2str(count))

end;

%Representamos en la misma gráfica un vector que indica el norte (en
rojo)
plot3([0,0],[0,1],[0,0],'r')
axis equal
grid on
view(45,25)

%Mostramos las diferentes matrices con todos los datos obtenidos
mat_fecha
mat_pos_sol
mat_pos_panel
mat_error
mat_exitflag

```

## ANEXO 5

### PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA EXPUESTA

```

function
[porcentaje_area]=main_area_expuesta(Az,El,UTC,Lat,Lon,Alt,theta_x_grad,theta_y_grad)

%[Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt); %Calculamos la posicion del
sol en funcion de los parámetros de entrada
Az2=Az-180; %Cambiamos el angulo azimutal obtenido en el programa (que
lo toma medido desde el sur con valores negativos hacia el este y
positivos hacia el oeste) para que cuadre con nuestras ecuaciones (que
para hacer los cambios de base lo hemos tomado como medido desde el
norte y positivo hacia el este y negativo hacia el oeste)

theta_x=theta_x_grad*(pi/180);
theta_y=theta_y_grad*(pi/180);

%Vectores perpendiculares a los planos de incidencia del sol y del
panel
%solar respectivamente
plano_sol=[ cos(El*(pi/180))*sin(Az2*(pi/180));
cos(Az2*(pi/180))*cos(El*(pi/180)); sin(El*(pi/180))];

plano_panel=[sin(theta_y); -(cos(theta_y)*sin(theta_x));
(cos(theta_x)*cos(theta_y))];

porcentaje_area=abs(plano_sol(1)*plano_panel(1)+plano_sol(2)*plano_panel(2)+plano_sol(3)*plano_panel(3))/(sqrt(plano_panel(1)^2+plano_panel(2)^2+plano_panel(3)^2)*sqrt(plano_sol(1)^2+plano_sol(2)^2+plano_sol(3)^2));

% figure
% hold on
%
%
% %representamos gráficamente las posiciones del sol (en azul)
% plot3([0,plano_sol(1)],[0,plano_sol(2)],[0,plano_sol(3)],'b')
%
% %representamos gráficamente las posiciones del panel (en verde)
% plot3([0,plano_panel(1)],[0,plano_panel(2)],[0,plano_panel(3)],'g')
%
% %Representamos en la misma gráfica un vector que indica el norte (en
rojo)
% plot3([0,0],[0,1],[0,0],'r')
% axis equal
% grid on
% view(45,25)

```

## ANEXO 6

### PROGRAMA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SEGUIDOR FIJO

```

%Dado una ubicación (altitud, longitud y latitud) obtendremos en
función de
%la intensidad del año el ángulo óptimo para colocar nuestro panel

%Definimos las coordenadas del lugar en el que nos encontramos.
Lat=42; %Latitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Lon=-1.8; %Longitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Alt=0.46; %Altitud del lugar donde nos
encontramos en km

%Definimos la matriz donde se guardaran los porcentajes
correspondientes a
%cada hora, día y posición de theta_x y theta_y.
MAT_PORCENTAJE=zeros(37,37,365,24); %Matriz donde se almacenarán
los coeficientes del área expuesta
MAT_RADIACION=zeros(37,37,365,24); %Matriz donde se almacenarán
los datos de la radiación obtenida
UTC2='2014/01/01 00:00:00'; %Fecha de inicio para comenzar
a recorrer el bucle de un año
load mat_rad_mensual.mat; %Cargamos los datos
correspondientes a la radiación según la zona
mat_rad_mensual=mat_rad_mensual/(30*24);%Dividimos la radiación
mensual entre los días y horas del mes
load vec_lat.mat;
load vec_long.mat;
%Pasamos las fechas a vectores
A=datevec(UTC2);
C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
D=datevec('2014/02/01 00:00:00');
%Definimos los contadores que se utilizarán en el bucle
count_theta_x=0;
count_theta_y=0;
count_dias=0;
count_horas=0;
count_mes=1;
%Definimos los vectores que contendran los valores de los ángulos que
van a
%tomar theta_x y theta_y
vec_theta_y_grad=-90:5:90;
vec_theta_x_grad=-90:5:90;

%Comenzamos con los bucles
for theta_y_grad=-90:5:90; %Recorremos los grados en y de la posición
del panel solar de -90 a 90 de 5 en 5.
    count_theta_y=count_theta_y+1; %Contador que indicara el índice
que ocupara el dato registrado (porcentaje de area y radiación) en sus
respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)

    for theta_x_grad=-90:5:90; %Recorremos los grados en x de la
posición del panel solar de -90 a 90 de 5 en 5.
        count_theta_x=count_theta_x+1; %Contador que indicara el
índice que ocupara el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)
    end
end

```

```

    for dias=1:1:365;    %Recorremos de uno en uno todos los días
del año
        count_dias=count_dias+1;    %Contador que indicara el
índice que ocupara el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)

        for horas=1:1:24;    %Recorremos de una en una todas las
horas del día
            count_horas=count_horas+1;    %Contador que indicara el
índice que ocupara el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)
            A(4)=A(4)+1;    %Sumamos una hora al
vector que indica la fecha
            UTC=datestr(A,'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');    %Pasamos el
vector de la fecha a formato string
            A=datevec(UTC);    %Volvemos a pasar el
string a formato vector. Esto es así porque si no al sumar varias
horas da error
            [Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt);    %Calculamos
los ángulos de posición del sol

[porcentaje_area]=main_area_expuesta(Az,El,UTC,Lat,Lon,Alt,theta_x_gra
d,theta_y_grad);    %Calculamos el área expuesta

MAT_PORCENTAJE(count_theta_y,count_theta_x,count_dias,count_horas)=por
centaje_area;    %Almacenamos el factor de área expuesta en la matriz
creada para ello
            C(4)=C(4)+1;    %Sumamos una hora al vector fecha C,
que nos sirve para contar los meses
            UTC=datestr(C,'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');
            C=datevec(UTC);

            %Comprobamos si C es igual a D, si es así significa
que ha transcurrido un mes, sumamos 1 al contador del mes y ponemos C
a su valor inicial
            if C==D
                count_mes=count_mes+1;
                C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
            end;

            [min_long,indice_long]=min(abs(vec_long-Lon));
%Calculamos el valor de longitud mínimo y el índice al que este
corresponde en la matriz de datos de radiación
            [min_lat,indice_lat]=min(abs(vec_lat-Lat));
%Calculamos el valor de latitud mínimo y el índice al que este
corresponde en la matriz de datos de radiación

MAT_RADIACION(count_theta_y,count_theta_x,count_dias,count_horas)=mat_
rad_mensual(indice_lat,indice_long,count_mes);%Almacenamos en la
matriz de radiación el valor correspondiente al lugar donde nos
encontramos

            %Comprobamos si ha transcurrido un año entero, en cuyo
caso
            %ponemoselcontador delmes a 1
            if count_mes==12
                count_mes=1;
            end;
        end;
        count_horas=0;
    end;

```

```
        count_dias=0;
        A=datevec(UTC2);    %Al terminar el bucle del año ponemos la
fecha en su valor inicial
    end;
    count_theta_x=0;    %Al terminar el bucle del ángulo theta_x
ponemos el valor de su contador a cero
end;
count_theta_y=0;

%Calculamos las matrices que queremos obtener
MAT_FINAL=MAT_PORCENTAJE.*MAT_RADIACION;
MAT_FINAL_SUMA=sum(sum(MAT_FINAL,4),3);
[pos_theta_y,pos_theta_x]=find(MAT_FINAL_SUMA==max(max(MAT_FINAL_SUMA)
));
theta_y=vec_theta_y_grad(pos_theta_y)
theta_x=vec_theta_x_grad(pos_theta_x)
rad_max=MAT_FINAL_SUMA(pos_theta_y,pos_theta_x)
```



## ANEXO 7

### PROGRAMA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SEGUIDOR DE 1 EJE

```

%Dado una ubicación (altitud, longitud y latitud) obtendremos en
función de
%la intensidad del año el ángulo óptimo para colocar nuestro panel

%Definimos las coordenadas del lugar en el que nos encontramos.
Lat=0.22; %Latitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Lon=-68.51; %Longitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Alt=0; %Altitud del lugar donde nos encontramos
en km

%Definimos la matriz donde se guardaran los porcentajes
correspondientes a
%cada hora, día y posición de theta_x y theta_y.
MAT_PORCENTAJE_1_EJE=zeros(365,24); %Matriz donde se almacenarán los
coeficientes del área expuesta
MAT_RADIACION_1_EJE=zeros(365,24); %Matriz donde se almacenarán los
datos de la radiación obtenida
UTC2='2014/01/01 00:00:00'; %Fecha de inicio para comenzar
a recorrer el bucle de un año
load mat_rad_mensual.mat; %Cargamos los datos
correspondientes a la radiación según la zona
mat_rad_mensual=mat_rad_mensual/(30*24);%Dividimos la radiación
mensual entre los días y horas del mes
load vec_lat.mat;
load vec_long.mat;
%Pasamos las fechas a vectores
A=datevec(UTC2);
C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
D=datevec('2014/02/01 00:00:00');
%Definimos los contadores que se utilizarán en el bucle
% count_theta_x=0;
% count_theta_y=0;
count_dias=0;
count_horas=0;
count_mes=1;
%Definimos el vector que contendrá los valores de los ángulos que va a
%tomar theta_y y el valor fijo de theta_x
theta_x_grad=0;
% vec_theta_y_grad=-90:5:90;
%Definimos el valor inicial para realizar las iteraciones
X0=[pi/2];

%Comenzamos con los bucles

    for dias=1:1:365; %Recorremos de uno en uno todos los días
del año
        count_dias=count_dias+1; %Contador que indicara el
índice que ocupará el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)

        for horas=1:1:24; %Recorremos de una en una todas las
horas del día

```

```

        count_horas=count_horas+1; %Contador que indicara el
        índice que ocupara el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
        en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)
        A(4)=A(4)+1; %Sumamos una hora al
        vector que indica la fecha
        UTC=datestr(A, 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS'); %Pasamos el
        vector de la fecha a formato string
        A=datevec(UTC); %Volvemos a pasar el
        string a formato vector. Esto es así porque si no al sumar varias
        horas da error
        [Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt); %Calculamos
        los ángulos de posición del sol

        Az2=Az-180; %Cambiamos el angulo azimutal obtenido en
        el programa (que lo toma medido desde el sur con valores negativos
        hacia el este y positivos hacia el oeste) para que cuadre con nuestra
        ecuaciones (que para hacer los cambios de base lo hemos tomado como
        medido desde el norte y positivo hacia el este y negativo hacia el
        oeste)

        [theta_y,feval,exitflag] = fsolve(@(x)
        ecuaciones_un_eje(x,Az2,El),X0); %Mediante un método iterativo
        resolvemos el sistema de 3 ecuaciones y 2 incógnitas (giro en x y en y
        del panel solar)

        X0=theta_y; %definimos que las condiciones iniciales
        sean las soluciones obtenidas para que en la proxima resolucio del
        sistema de ecuaciones le cueste menos iterar por estar la solucio
        real y los valores iniciales mucho más próximos
        theta_y_grad=theta_y*(180/pi);

[porcentaje_area]=main_area_expuesta(Az,El,UTC,Lat,Lon,Alt,theta_x_gra
d,theta_y_grad); %Calculamos el área expuesta

MAT_PORCENTAJE_1_EJE(count_dias,count_horas)=porcentaje_area;
%Almacenamos el factor de área expuesta en la matriz creada para ello
        C(4)=C(4)+1; %Sumamos una hora al vector fecha
        C, que nos sirve para contar los meses
        UTC=datestr(C, 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');
        C=datevec(UTC);

        %Comprobamos si C es igual a D, si es así significa
        que ha transcurrido un mes, sumamos 1 al contador del mes y ponemos C
        a su valor inicial
        if C==D
            count_mes=count_mes+1;
            C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
        end;

        [min_long,indice_long]=min(abs(vec_long-Lon));
        %Calculamos el valor de longitud mínimo y el índice al que este
        corresponde en la matriz de datos de radiación
        [min_lat,indice_lat]=min(abs(vec_lat-Lat));
        %Calculamos el valor de latitud mínimo y el índice al que este
        corresponde en la matriz de datos de radiación

MAT_RADIACION_1_EJE(count_dias,count_horas)=mat_rad_mensual(indice_lat
,indice_long,count_mes);

        %Comprobamos si ha transcurrido un año entero, en cuyo
        caso

```

```
        %ponemoselcontador delmes a 1
        if count_mes==12
            count_mes=1;
        end;
    end;
    count_horas=0;
end;
count_dias=0;
A=datevec(UTC2);    %Al terminar el bucle del año ponemos la
fecha en su valor inicial
% end;
% count_theta_y=0;

%Calculamos las matrices que queremos obtener
MAT_FINAL_1_EJE=MAT_PORCENTAJE_1_EJE.*MAT_RADIACION_1_EJE;
MAT_FINAL_SUMA_1_EJE=sum(sum((sum(MAT_FINAL_1_EJE,3))));
```

## ANEXO 8

### PROGRAMA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SEGUIDOR DE 2 EJES

```

%Dado una ubicación (altitud, longitud y latitud) obtendremos en
función de
%la intensidad del año el ángulo óptimo para colocar nuestro panel

%Definimos las coordenadas del lugar en el que nos encontramos.
Lat=42; %Latitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Lon=-1.8; %Longitud del lugar donde nos
encontramos en grados
Alt=0.46; %Altitud del lugar donde nos
encontramos en km

%Definimos la matriz donde se guardarán los porcentajes
correspondientes a
%cada hora, día y posición de theta_x y theta_y.
MAT_RADIACION=zeros(365,24);
UTC2='2014/01/01 00:00:00'; %Fecha de inicio para comenzar a
recorrer el bucle de un año
load mat_rad_mensual.mat; %Cargamos los datos correspondientes a
la radiación según la zona
mat_rad_mensual=mat_rad_mensual/(30*24);%Dividimos la radiación
mensual entre los días y horas del mes
load vec_lat.mat;
load vec_long.mat;
%Pasamos las fechas a vectores
A=datevec(UTC2);
C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
D=datevec('2014/02/01 00:00:00');
%Definimos los contadores que se utilizarán en el bucle
count_dias=0;
count_horas=0;
count_mes=1;

%Comenzamos con los bucles
for dias=1:1:365; %Recorremos de uno en uno todos los
días del año
count_dias=count_dias+1; %Contador que indicara el
índice que ocupará el dato registrado (porcentaje de area y radiación)
en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y MAT_RADIACION)

for horas=1:1:24; %Recorremos de una en una todas
las horas del día
count_horas=count_horas+1; %Contador que indicara
el índice que ocupará el dato registrado (porcentaje de area y
radiación) en sus respectivas matrices (MAT_PORCENTAJE y
MAT_RADIACION)
A(4)=A(4)+1; %Sumamos una hora al vector que
indica la fecha
UTC=datestr(A,'yyyy/mm/dd HH:MM:SS'); %Pasamos el
vector de la fecha a formato string
A=datevec(UTC); %Volvemos a pasar el string a
formato vector. Esto es así porque si no al sumar varias horas da
error

[Az,El] = SolarAzEl(UTC,Lat,Lon,Alt); %Calculamos
los ángulos de posición del sol

```

```

C(4)=C(4)+1;          %Sumamos una hora al vector fecha
C, que nos sirve para contar los meses
UTC=datestr(C,'yyyy/mm/dd HH:MM:SS');
C=datevec(UTC);

%Comprobamos si C es igual a D, si es así significa
que ha transcurrido un mes, sumamos 1 al contador del mes y ponemos C
a su valor inicial
if C==D
    count_mes=count_mes+1;
    C=datevec('2014/01/01 00:00:00');
end;

[min_long,indice_long]=min(abs(vec_long-Lon));
%Calculamos el valor de longitud mínimo y el índice al que este
corresponde en la matriz de datos de radiación
[min_lat,indice_lat]=min(abs(vec_lat-Lat));
%Calculamos el valor de latitud mínimo y el índice al que este
corresponde en la matriz de datos de radiación

MAT_RADIACION(count_dias,count_horas)=mat_rad_mensual(indice_lat,indice_long,count_mes); %Almacenamos en la matriz de radiación el valor correspondiente al lugar donde nos encontramos

%Comprobamos si ha transcurrido un año entero, en cuyo
caso
    %ponemos el contador del mes a 1
    if count_mes==12
        count_mes=1;
    end;
end;
count_horas=0;
end;
count_dias=0;
A=datevec(UTC2); %Al terminar el bucle del año ponemos la
fecha en su valor inicial

%Calculamos la matriz que queremos obtener
rad_max=sum(sum(MAT_RADIACION));

```