



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“Simulación usando Labview de la radiación incidente  
sobre superficies bajo diferentes condiciones aplicando  
un modelo de irradiancia solar basado en  
transmitancias”**

**INFORME DE MATERIA DE GRADUACIÓN**

Previa a la obtención del Título de:  
**INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN EN ELECTRONICA Y  
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentada por:  
**BORIS LENIN CHIRIBOGA ERAZO  
NELSON JAVIER MONDRAGON CORTEZ**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO  
2011**

## **AGRADECIMIENTO**

A esa fuerza superior que damos por llamar Dios, por manejar los hilos de mi destino, de extrañas maneras ciertamente, pero siempre para bien.

**Boris Chiriboga Erazo**

A Dios quien me ha dado la dicha de contar con todas las personas adecuadas a mi lado y poder alcanzar esta meta en mi vida.

**Nelson Mondragón Cortez**

## **DEDICATORIA**

“Justo cuando descubro que mis padres tenían razón, mis hijos me dicen que estoy equivocado...”

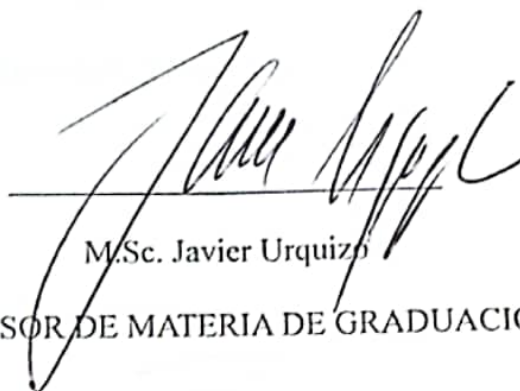
A mis padres, por sus esfuerzos, desvelos y sacrificios. Espero seguir caminando junto a ellos por mucho tiempo más...

**Boris Chiriboga Erazo**

A mi familia y a todos aquellos que confiaron en mi capacidad y fueron partícipes en la culminación de esta etapa de mi vida académica.

**Nelson Mondragón Cortez**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACION



---

M.Sc. Javier Urquiza

PROFESOR DE MATERIA DE GRADUACIÓN



---

M.Sc. Douglas Aguirre

PROFESOR DELEGADO POR EL DECANO DE LA FACULTAD

# DECLARACIÓN EXPRESA

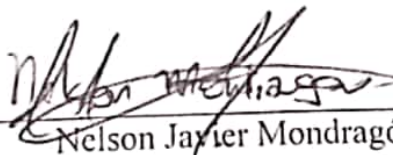
“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



---

Boris Lenin Chiriboga Erazo



---

Nelson Javier Mondragón Cortez

## **RESUMEN**

Con el decrecimiento de la principal fuente de energía que utilizamos en la actualidad, como lo es la energía obtenida de restos fosiles (petróleo), existe a nivel mundial una tendecia a buscar alternativas que nos permita estar preparados para un desabastecimiento de la energía proveniente de restos fosiles, una de estas es la energía proveniente del sol, la cual es una fuente inagotable y disponible de la mejor manera en nuestro país.

El objetivo de éste trabajo de graduación consiste en desarrollar mediante el programa Labview una simulación, que realice el cálculo de la radiación solar incidente en distintas superficies, utilizando para esto modelos de irradiancia solar basados en transmitancias.

El uso de Labview se justifica en que éste software posee un entorno gráfico que facilita su aprendizaje sin por eso disminuir su potencia de cálculo y por otro presenta tanto gráfica como numéricamente los resultados, de una manera sencilla y versátil, presentando además la posibilidad de mejoras futuras basados en su diseño modular.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>VI</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	
<b>1.1 EL SOL.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 COORDENADAS Y MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.....</b>	<b>3</b>
1.2.1 LATITUD.....	4
1.2.2 LONGITUD.....	5
1.2.3 MOVIMIENTOS DE LA TIERRA .....	6
1.2.4 DECLINACIÓN.....	8
<b>1.3 COORDENADAS SOLARES.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4 RADIACIÓN SOLAR.....</b>	<b>14</b>
1.4.1 IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN .....	15
1.4.2 RADIACION EXTRATERRESTE .....	15
1.4.3 EFECTOS DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA RADIACIÓN .....	18
1.4.4 COMPONENTES DE LA RADIACION SOLAR .....	20
1.4.4.1 RADIACION GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL .....	21

1.4.4.2 RADIACION GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA.....	22
1.4.5 TRANSMITANCIA.....	23
<b>1.5 DESCRIPCION DE LOS MODELOS DE RADIACION UTILIZADOS .....</b>	<b>24</b>
1.5.1 MODELOS DE RADIACION ELEGIDOS PARA SUPERFICIES HORIZONTALES .....	25
1.5.1.1 MODELO DE HOTTEL (RADIACION DIRECTA).....	25
1.5.1.2 MODELO DE LIU JORDAN (RADIACION DIFUSA) .....	27
1.5.2 MODELOS DE RADIACION ELEGIDOS PARA SUPERFICIES INCLINADAS.....	27
1.5.2.1 RADIACION DIRECTA Y REFLEJADA SOBRE UN PLANO INCLINADO.....	29
1.5.2.2 MODELO DE REINDL ET AL (COMPONENTE DIFUSA).....	31
<b>1.6 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR SOMBRAS .....</b>	<b>32</b>
1.6.1 METODO PARA REPRESENTAR EL CONTORNO DEL OBSTACULO .....	34
<b>ESTADO DE LA TECNOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....</b>	<b>39</b>
2.1.1 GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	39
2.1.2 ORIENTACIÓN DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO .....	42
2.1.3 PANELES SOLARES MÓVILES: SEGUIMIENTO ACIMUTAL.....	46
<b>2.2 ENERGÍA SOLAR TERMICA .....</b>	<b>47</b>
<b>2.3 INTEGRACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN EDIFICIOS.....</b>	<b>50</b>
<b>2.4 VENTAJAS DEL USO DE LABVIEW EN LA SIMULACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA.....</b>	<b>54</b>
2.5.1 FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL “GLOBAL DÍA N.VI” .....	55
2.5.1.1 ENTRADAS DE “GLOBAL DÍA N.VI” .....	56
2.5.1.2 INSTRUMENTO VIRTUAL “DIAS n Y N.VI” .....	58
2.5.1.3 INSTRUMENTO VIRTUAL “COEFICIENTES DE HOTTEL”.....	60



2.5.1.4 INSTRUMENTO VIRTUAL “CÁLCULOS SOLARES” .....	61
2.5.1.5 INSTRUMENTO VIRTUAL “DIRECTA Y DIFUSA HORIZONTAL” .....	62
2.5.1.6 INSTRUMENTO VIRTUAL “ÁNGULOS WRT Y WST” .....	64
2.5.1.7 INSTRUMENTO VIRTUAL “CÁLCULO DE RB” .....	66
2.5.1.8 INSTRUMENTO VIRTUAL “COEFICIENTES RD Y RR” .....	70

## **PROCESOS EN LA PRODUCCION Y ALMACENAMIENTO DE ENERGIAS**

### **RENOVABLES ..... 71**

#### **3.1 INTEGRACIÓN DEL INSTRUMENTO VIRTUAL “GLOBAL DIA N” PARA EL CÁLCULO DE IRRADIACIONES GLOBALES EN LAZOS ANUALES..... 72**

3.1.2 IRRADIACIÓN GLOBAL ANUAL RECIBIDA POR UNA SUPERFICIE INCLINADA EN UN LUGAR DETERMINADO..... 74

3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO 74

3.1.3 ANÁLISIS DE LA GANANCIA UTILIZANDO SEGUIMIENTO ACIMUTAL..... 78

3.1.4 CÁLCULO DE IRRADIACIÓN RECIBIDA POR FACHADAS..... 82

3.1.5 PÉRDIDAS POR SOMBRAS..... 84

3.1.6 CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DE UNA MEJORA PARA UN PANEL SOLAR FIJO EN UN AMBIENTE RURAL ..... 85

3.1.7 COMPARACION DE RESULTADOS ..... 96

### **CONCLUSIONES ..... 98**

### **RECOMENDACIONES..... 101**

### **BIBLIOGRAFÍA ..... 103**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Espectro general de ondas electromagnéticas .....	3
Figura 2.- Latitud .....	5
Figura 3.- Longitud .....	5
Figura 4.- Movimiento de traslación de la tierra .....	6
Figura 5.- Eje polar y plano de la eclíptica .....	8
Figura 6.- Posición de la tierra respecto del Sol en el solsticio de invierno .....	8
Figura 7.- Esfera celeste .....	10
Figura 8.- Acimut y elevación solar .....	10
Figura 9.- Elevación solar .....	11
Figura 10.- Acimut solar .....	11
Figura 11.- Trayectorias aparentes del Sol en los solsticios y equinoccios.....	12
Figura 12.- Carta solar .....	13
Figura 13.- Espectro electromagnético de la radiación solar extraterrestre y en la superficie de la tierra.....	14
Figura 14.- Masa de aire para diferentes ángulos cenitales.....	19
Figura 15.- Componentes de radiación solar incidentes en una superficie .....	20
Figura 16.- Representación del perfil del obstáculo por medio de rectas .....	35
Figura 17.- Generador fotovoltaico .....	40
Figura 18.- Sistema fotovoltaico .....	42
Figura 19.- Angulo de orientación del generador fotovoltaico .....	43

Figura 20.- Angulo de inclinación del generador fotovoltaico.....	43
Figura 21.- Variación del ángulo cenital solar.....	44
Figura 22.- Superficie normal a la radiación solar. a) Al mediodía del solsticio de invierno. b) Al mediodía de los equinoccios. c) Al mediodía del solsticio de verano	45
Figura 23.- Orientación de una superficie en el hemisferio norte .....	46
Figura 24.- Esquema simple de un sistema de energía solar térmica .....	48
Figura 25.- Central de energía solar térmica basada en helióstatos.....	49
Figura 26.- Edificio con paneles fotovoltaicos como fachada .....	51
Figura 27.- Modelo de edificación con generadores integrados.....	52
Figura 28.- Diagrama de bloques de "Global día n".....	55
Figura 29.- Instrumento virtual "Días n y N" .....	59
Figura 30.- Instrumento virtual "Coeficientes de Hottel" .....	60
Figura 31.- Instrumento virtual "Cálculos solares" .....	62
Figura 32.- Instrumento virtual "Directa y difusa horizontal" .....	63
Figura 33.- Instrumento virtual "Ángulos wrt y wst" .....	65
Figura 34.- Instrumento virtual "Cálculo de Rb" .....	67
Figura 35.- Instrumento virtual "Coeficientes Rd y Rr" .....	70
Figura 36.- Cálculo de irradiación global anual en una superficie inclinada.....	72
Figura 37.- Irradiación recibida por una superficie horizontal.....	73
Figura 38.- Estudio de inclinación óptima para un panel fotovoltaico .....	76
Figura 39.- Energía anual recibida de acuerdo al grado de inclinación.....	77
Figura 40.- Diagrama de bloques para comparar superficies fijas vs. Seguidores	

acimutales .....	78
Figura 41.- Comparación de rendimiento superficie fija vs. Seguimiento acimutal ..	79
Figura 42.- Comparación fija vs. Acimutal en latitud 20° S.....	81
Figura 43.- Diagrama de bloques para estudio de radiación en fachadas .....	82
Figura 44.- Comparación de energía recibida por fachadas .....	83
Figura 45.- Energía recibida en presencia de un obstáculo .....	84
Figura 46.- Paisaje rural de Manabí, lugar del estudio .....	86
Figura 47.- Vivienda dotada de panel solar .....	87
Figura 48.- Ubicación del panel solar .....	88
Figura 49.- Vista de la placa del panel solar.....	89
Figura 50.- Regulador, batería e inversor del panel solar .....	90
Figura 51.- Variación de la radiación en el sitio Maicito .....	91
Figura 52.- Energía recibida por el panel entre los equinoccios de acuerdo al grado de inclinación (O=180°).....	92
Figura 53.- Energía recibida entre septiembre y marzo de acuerdo a la inclinación (O=0°).....	93
Figura 54.- Energía recibida por el sistema modificado .....	94
Figura 55.- El río Quinindé a su paso por Manabí .....	95

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla I.- Datos básicos Sol-tierra.....	2
Tabla II.- Modelos elegidos para la simulación.....	24
Tabla III.- Factores de corrección para diferentes climas .....	26
Tabla IV.- Energía anual recibida por las fachadas .....	83
Tabla V.- Puntos representativos del contorno del obstáculo .....	84
Tabla VI.- Especificaciones del panel solar en estudio.....	89
Tabla VII.- Comparación de resultados .....	96

## NOMENCLATURA

- A: Altura del lugar de estudio.
- $a_0$ : Coeficiente  $a_0$  de Hottel para la transmitancia directa.
- $a_1$ : Coeficiente  $a_1$  de Hottel para la transmitancia directa.
- B: Irradiación directa diaria en superficie horizontal.
- $B_T$ : Irradiación directa diaria en superficie inclinada.
- D: Irradiación difusa diaria en superficie horizontal.
- $D_T$ : Irradiación difusa diaria en superficie inclinada.
- Exc: Factor de excentricidad.
- G: Irradiación global diaria en superficie horizontal.
- $G_0$ : Irradiación global diaria extraterrestre en superficie horizontal.
- $G_T$ : Irradiación global diaria en superficie inclinada.
- $I_0$ : Constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ )
- $I_{\text{ext}}$ : Irradiancia extraterrestre corregida por el factor de excentricidad.
- k: Coeficiente k de Hottel para la transmitancia directa.
- N: Número total de días en el año.
- n: Día juliano.
- O: Angulo de orientación de la superficie inclinada.
- $R_b$ : Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie

horizontal para irradiación directa.

$R_d$ : Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para irradiación difusa.

$R_r$ : Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para irradiación reflejada.

$R_T$ : Irradiación reflejada diaria en superficie inclinada.

$r_0$ : Factor de corrección  $r_0$  de Hottel para la transmitancia directa.

$r_1$ : Factor de corrección  $r_1$  de Hottel para la transmitancia directa.

$r_k$ : Factor de corrección  $r_k$  de Hottel para la transmitancia directa.

$S$ : Angulo de inclinación de la superficie inclinada.

$\alpha$ : Angulo de elevación solar.

$\alpha_{ob}^i$ : Angulo de elevación del punto  $i$  del obstáculo.

$\delta$ : Declinación solar.

$\phi$ : Latitud del lugar de estudio.

$\Gamma$ : Angulo diario.

$\theta$ : Angulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie inclinada.

$\theta_z$ : Angulo cenital solar.

$\rho$ : Albedo del suelo.

$T_{ob,i}$ : Recta representativa del perfil del obstáculo

$\tau_b$ : Transmitancia atmosférica para la radiación .....

$\tau_d$ : Transmitancia atmosférica para la radiación difusa.

- $\omega$ : Angulo horario.
- $\omega_r$ : Angulo de salida del sol en el horizonte.
- $\omega_{rT}$ : Angulo de salida del sol en la superficie inclinada.
- $\omega_s$ : Angulo de puesta del sol en el horizonte.
- $\omega_{sT}$ : Angulo de puesta del sol en la superficie inclinada.
- $\omega^+$ : Angulo auxiliar positivo para el cálculo de  $\omega_{rT}, \omega_{sT}$ .
- $\omega^-$ : Angulo auxiliar negativo para el cálculo de  $\omega_{rT}, \omega_{sT}$ .
- $\Psi$ : Angulo acimutal del sol.
- $\Psi_{ob}^i$ : Angulo acimutal del punto i del obstáculo.



# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 EL SOL**

El Sol es la estrella del sistema planetario en el que se encuentra la tierra, la más cercana a nuestro planeta y el astro con mayor brillo aparente. Su aparición o desaparición en el cielo, determinan lo que conocemos como el día y la noche.

La luz que irradia el Sol constituye la principal fuente de energía de la vida, aparte de mantener en actividad los distintos procesos climáticos en la tierra. Haciendo unas breves comparaciones con respecto a la tierra, encontramos que la masa del Sol es 332000 veces mayor a la masa de la tierra. Por su parte la temperatura en la superficie del Sol llega a los 6.000 ° C.

<u>Datos básicos</u>	<u>El Sol</u>	<u>La tierra</u>
Tamaño: radio ecuatorial	695.000 Km.	6.378 Km.
Periodo de rotación sobre el eje	de 25 a 36 días *	23,93 horas
Masa comparada con la tierra	332.830	1
Temperatura media superficial	6000 ° C	15 ° C
Gravedad superficial en la fotosfera	274 m/s <sup>2</sup>	9,78 m/s <sup>2</sup>

Tabla I.- Datos básicos Sol-tierra

Debido a que el Sol no presenta una superficie definida como la que tenemos en la tierra, lo que asemeja una superficie rodeándolo es una capa de la atmosfera solar y esta compuesta de gases, la cual recibe el nombre de fotosfera e irradia luz debido a su elevada temperatura. Toda materia u objeto caliente irradia luz; siendo más específicos irradia ondas electromagnéticas las cuales tienen un amplio espectro de longitudes de onda las cuales son las que diferencian unas de las otras. Éstas longitudes de onda van desde la visible hasta la que va más allá del espectro visible, entre las cuales tenemos los rayos gama, la infrarroja (IR “debajo del rojo”), ultravioleta (UV “encima del violeta”) entre otras.

En la figura 1 podemos ver el espectro de ondas irradiado por el Sol donde observamos que no irradia todas las longitudes posibles, sino una pequeña parte.

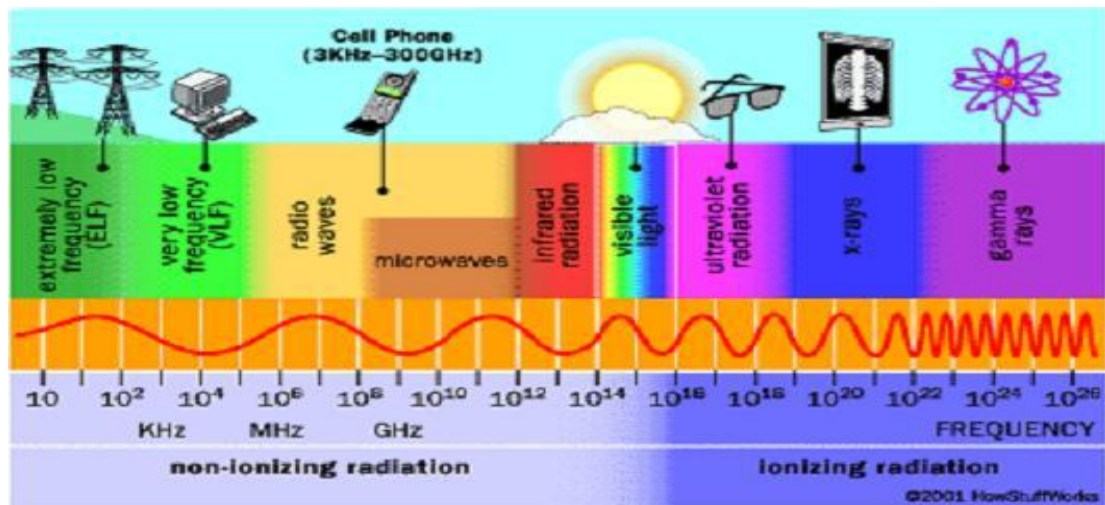


Figura 1.- Espectro general de ondas electromagnéticas

La luz solar como ya vimos es la que transporta la energía proveniente del Sol, ésta a su vez calienta la tierra y es la fuerza impulsora que está detrás de nuestro clima y tiempo atmosférico.

## 1.2 COORDENADAS Y MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

Mediante las coordenadas geográficas latitud y longitud (figuras 2 y 3) podemos definir con precisión una posición cualquiera sobre la superficie terrestre. Se expresan en grados sexagesimales y se dan con referencia al ecuador y al meridiano de Greenwich.

El ecuador es la circunferencia definida sobre la superficie terrestre por un plano perpendicular al eje de rotación de la tierra que la divide en dos partes: el hemisferio

Norte y el hemisferio Sur. El meridiano de Greenwich es la semicircunferencia imaginaria que une los polos y pasa por Greenwich (distrito de Londres donde estaba el Greenwich Royal Observatory).

Las circunferencias definidas sobre la superficie terrestre por planos perpendiculares al eje de rotación de la tierra y por tanto paralelas al ecuador se denominan paralelos. Las semicircunferencias definidas por los círculos máximos de la esfera terrestre que pasan por los polos se denominan meridianos.

### **1.2.1 LATITUD**

La latitud ( $\phi$ ) es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto (figura 2). La latitud del ecuador es, por definición, de  $0^\circ$ . Todos los puntos ubicados sobre el mismo paralelo tienen la misma latitud. Los puntos que se encuentran al Norte del ecuador reciben la denominación Norte (N) y los que se encuentran al Sur del ecuador reciben la denominación Sur (S). Se mide de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y se define como positiva en el hemisferio Norte y negativa en el hemisferio Sur.

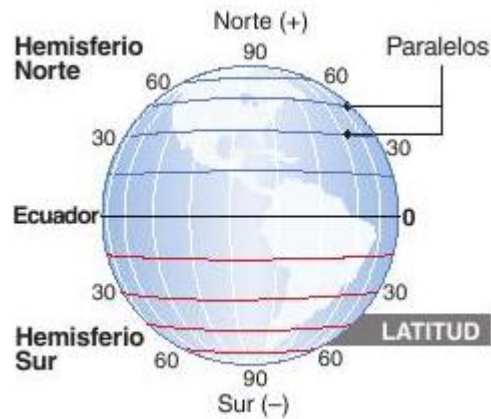


Figura 2.- Latitud

Los Polos Norte y Sur tienen latitud  $90^\circ$  N ( $+90^\circ$ ) y  $90^\circ$  S ( $-90^\circ$ ) respectivamente.

## 1.2.2 LONGITUD

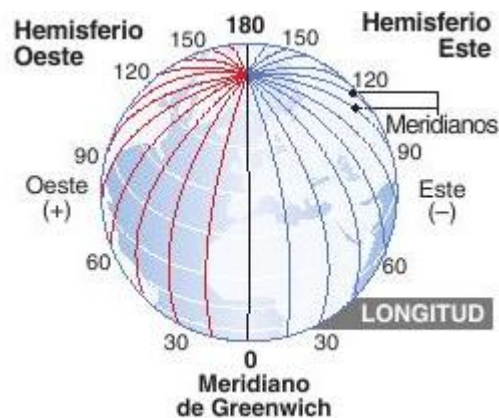


Figura 3.- Longitud

La longitud (figura 3) es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. El meridiano de Greenwich divide a la tierra en dos hemisferios llamados Este (oriental) y Oeste (occidental). Al meridiano de

Greenwich, por el ser el meridiano de referencia, le corresponde la longitud cero, también se lo denomina meridiano cero o meridiano base.

La longitud se mide de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y se define como positiva hacia el Oeste (hemisferio occidental) y negativa hacia el Este (hemisferio oriental).

### 1.2.3 MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

La tierra tiene un movimiento de traslación alrededor del Sol, en sentido contrario a las agujas del reloj si se observa desde el hemisferio Norte, describiendo una órbita ligeramente elíptica con el Sol, astro que se sitúa en uno de los focos de la elipse y no en el centro de la misma. Esto provoca que la distancia del Sol a la tierra no sea constante (figura 4).



Figura 4.- Movimiento de traslación de la tierra

La distancia media entre la tierra y el Sol es de aproximadamente 149597870 kilómetros y se utiliza para definir la unidad de distancia denominada unidad astronómica (ua). El punto más alejado de la órbita de la tierra alrededor del Sol (1,017 ua) se llama afelio, se produce en torno al 4 de julio. El punto más cercano de la órbita (0,983 ua) se llama perihelio y ocurre en torno al 3 de enero. Se puede ver que la excentricidad de la elipse es tan pequeña que prácticamente parece una circunferencia.

Llamamos año al tiempo que tarda la tierra en recorrer la órbita descrita, invirtiendo en cada ciclo de traslación 365 días, 5 horas, 48 minutos y 46 segundos, con pequeñas variaciones de un año a otro.

La tierra gira sobre sí misma rotando alrededor del eje que pasa por los polos, denominado eje polar, con una velocidad aproximada de una vuelta por día. Un día dura 23 horas, 56 minutos y 4 segundos, aproximadamente. El sentido de rotación de la tierra es de Oeste a Este como se deduce del hecho de que el Sol sale por el Este y se pone por el Oeste. El eje polar de la tierra no es perpendicular al plano de su órbita alrededor del Sol, sino que forma un ángulo de  $23,45^\circ$  con la perpendicular a dicho plano. Este plano se denomina plano de la eclíptica (figura 5) porque sobre este plano teórico, donde se sitúan las órbitas de la mayoría de los planetas y satélites del Sistema solar, se producen los eclipses.



Figura 5.- Eje polar y plano de la eclíptica

Esta inclinación del eje polar provoca los cambios estacionales, duraciones de luz solar diferentes para los días en verano e invierno, y también produce que el Sol esté más alto al mediodía en verano que en invierno.

#### 1.2.4 DECLINACIÓN



Figura 6.- Posición de la tierra respecto del Sol en el solsticio de invierno

La declinación ( $\delta$ ) es el ángulo que forma el plano del ecuador de la tierra con la línea situada en el plano de la eclíptica, que une los centros del Sol y de la tierra (figura 6). Este ángulo varía a lo largo de la órbita de la tierra alrededor del Sol, alcanzando valores máximos en los Solsticios de verano (declinación máxima



positiva,  $\delta = 23,45^\circ$ ) e invierno (declinación máxima negativa,  $\delta = -23,45^\circ$ ) y valores nulos en los equinoccios (declinación nula,  $\delta = 0^\circ$ ). Aunque la declinación varía se puede suponer que permanece constante a lo largo de un día.

La declinación para un determinado día se puede calcular por distintos métodos los cuales están diferenciados por su grado de precisión. En éste documento y dada la potencia del programa Labview vamos a elegir una de las fórmulas más precisas, formulada por Spencer (1971) expresada en términos de series de Fourier:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma \\ & - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma \\ & - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad [1]$$

Esta fórmula brinda el valor de la declinación solar en radianes y produce un error máximo menor a 0.0006 radianes (1). La variable  $\Gamma$  se denomina ángulo diario y viene dada por la expresión:

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{N} \quad [2]$$

Donde  $n$  es el día juliano, es decir, el número del día del año. Por ejemplo, el 1 de enero tendrá el valor 1, el 1 de febrero será el 32 y así por el estilo.

$N$  es el número de días del año (366 para años bisiestos).

### 1.3 COORDENADAS SOLARES

Para situar la posición del Sol en el cielo se utiliza el concepto de esfera celeste, idea que asume una esfera imaginaria de radio arbitrario, centrada en el observador, sobre

la que se proyecta la posición del Sol (figura 7). Cada punto de ésta esfera celeste es una dirección en el cielo vista desde la tierra.



Figura 7.- Esfera celeste

Este sistema de representación muestra las posiciones del Sol como si tuviera un movimiento aparente alrededor de la tierra siguiendo una trayectoria dentro del plano de la eclíptica que forma un ángulo de  $23,45^\circ$  con el ecuador de la esfera celeste. El Sol recorre la eclíptica una vez al año y la esfera celeste gira una vez al día en torno a la tierra. En el sistema de coordenadas de la esfera celeste, que es similar al usado para definir la longitud y latitud terrestres, se especifica la posición del Sol mediante dos ángulos que se denominan elevación y acimut (figura 8).



Figura 8.- Acimut y elevación solar

Estas coordenadas solares se definen respecto a la dirección vertical que es la dirección que marcaría una plomada, que apuntando hacia abajo, se dirigiría hacia el centro de la tierra y hacia arriba interceptaría a la esfera celeste en un punto denominado cenit (figura 8). La intersección con el hemisferio opuesto de la esfera celeste definiría el punto opuesto al cenit denominado nadir. Las distintas definiciones de las coordenadas solares son:

- **Elevación solar  $\alpha$** : es el ángulo que forman los rayos solares con la horizontal (figuras 8 y 9). Toma valores que van de  $(90^\circ - \phi - \delta)$  en el Solsticio de invierno a  $(90^\circ - \phi + \delta)$  en el Solsticio de verano, siendo  $\phi$  la latitud del lugar y  $\delta$  la declinación.

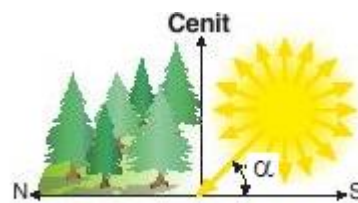


Figura 9.- Elevación solar

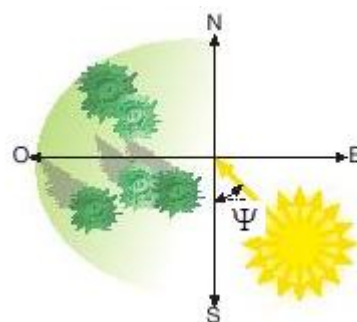


Figura 10.- Acimut solar

- **Acimut solar  $\Psi$** : ángulo formado por el meridiano del Sol y el meridiano del lugar, tomando como referencia el Sur (figuras 8 y 10). Los ángulos medidos desde el Sur

hacia el Oeste se consideran positivos, así el Oeste tendrá un acimut de  $90^\circ$ , el Norte  $180^\circ$  y el Este  $270^\circ$ .

• **Ángulo cenital o Distancia cenital  $\theta_z$** : ángulo formado por la dirección del Sol y la vertical del lugar. Es el ángulo complementario de la elevación solar (figura 8). Por esta definición sabemos que  $\theta_z + \alpha = 90^\circ$ .

La figura 11 representa las trayectorias aparentes del Sol en los Solsticios de verano e invierno y en los equinoccios de primavera y otoño, vistas por un observador situado en el hemisferio Norte mirando hacia el punto cardinal Sur. El resto del año, el Sol sigue trayectorias intermedias entre las representadas. La elevación solar alcanza en los solsticios de verano e invierno sus valores máximo y mínimo, respectivamente. En la figura 11 se ha marcado la posición del Sol a una hora determinada (10AM). El observador porta un plano en el que se reflejan las diferentes trayectorias anuales del Sol. Este plano recibe el nombre de carta solar.

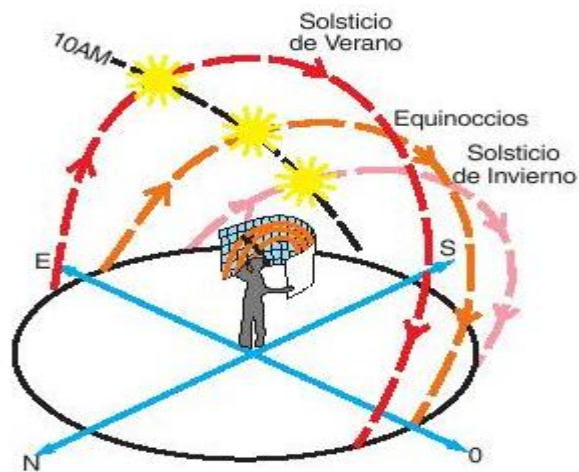


Figura 11.- Trayectorias aparentes del Sol en los solsticios y equinoccios

El conjunto de trayectorias del Sol en un lugar determinado se puede representar en una carta solar (figura 12) que refleja la posición del Sol, definidas por su acimut y elevación, en cada hora, desde el punto de vista de un observador que mira hacia el Sur en el hemisferio Norte (en el hemisferio Sur miraría hacia el Norte). Veamos cómo se interpreta: tomamos la línea que representa a un día, por ejemplo el 21 de marzo, nos situamos en la posición Este, amanece a las 6 de la mañana (6 AM), elevación  $0^\circ$  y acimut  $-90^\circ$ ; a las 11 de la mañana (11 AM), elevación  $50^\circ$ , acimut  $-22^\circ$  aproximadamente; al mediodía (12), elevación  $52^\circ$  aproximadamente, acimut  $0^\circ$ ; a las 3 de la tarde (3 PM), elevación  $32^\circ$  aproximadamente; acimut  $+60^\circ$ . La carta solar es un instrumento muy útil para determinar las pérdidas por sombras que se producen en un generador fotovoltaico.

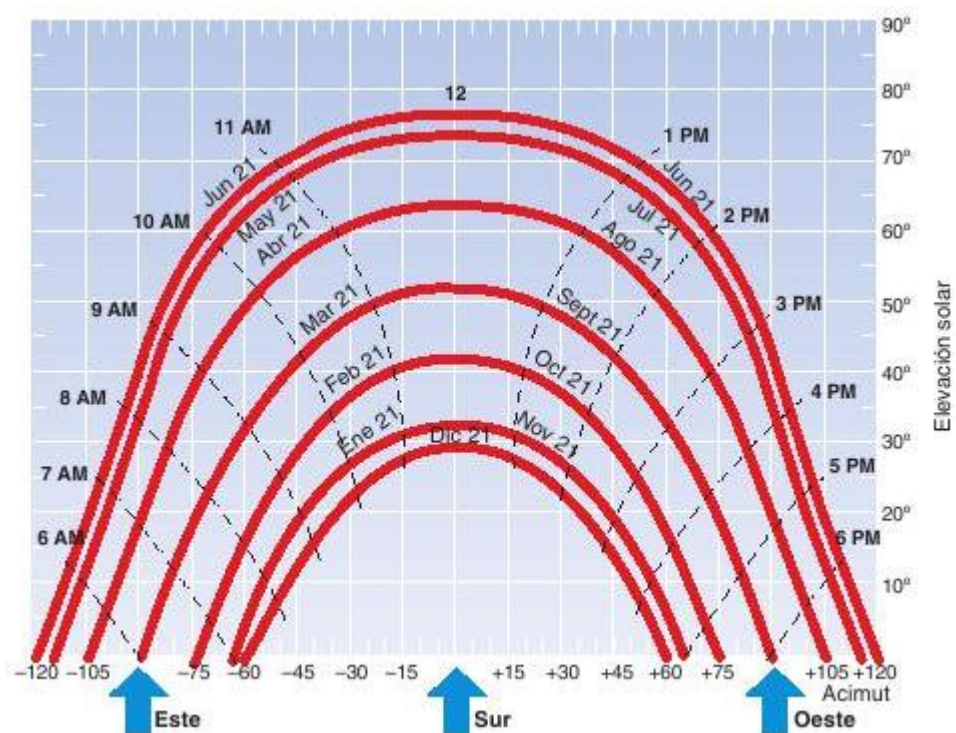


Figura 12.- Carta solar

## 1.4 RADIACIÓN SOLAR

Como vimos anteriormente, el Sol genera energía mediante reacciones que producen los distintos gases del cual está compuesto su núcleo. Esta energía recibe el nombre de radiación solar, se transmite en forma de radiación electromagnética y alcanza la atmósfera terrestre en forma de conjunto de radiaciones o espectro electromagnético con longitudes de onda que van de 0,15  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$  aproximadamente (figura 13).

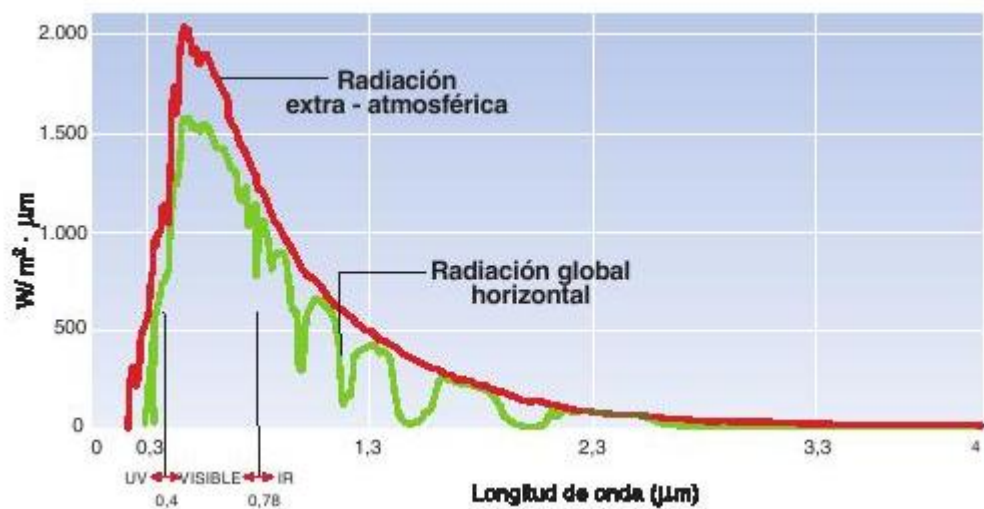


Figura 13.- Espectro electromagnético de la radiación solar extraterrestre y en la superficie de la tierra

La parte del espectro que va de 0,40  $\mu\text{m}$  a 0,78  $\mu\text{m}$ , forma el espectro visible que denominamos comúnmente luz. El resto del espectro, que no es visible, lo forman las radiaciones con longitudes de onda inferiores a 0,4  $\mu\text{m}$ , denominadas radiaciones ultravioletas (UV) y con longitudes superiores a 0,75  $\mu\text{m}$  denominadas radiaciones infrarrojas (IR).

### 1.4.1 IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN

Para dimensionar la radiación solar se utilizan dos magnitudes que corresponden a la potencia y a la energía de la radiación que llegan a una unidad de superficie, se denominan irradiancia e irradiación y sus definiciones y unidades son las siguientes:

- **Irradiancia:** Es la potencia o radiación incidente por unidad de superficie. Indica la intensidad de la radiación solar. Se mide en vatios por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

- **Irradiación:** Es la integración o suma de las irradiancias en un periodo de tiempo determinado, mide la cantidad de energía solar recibida durante un intervalo de tiempo. Se mide en julios por metro cuadrado por un periodo de tiempo ( $\text{J}/\text{m}^2$  por hora, día, semana, mes, año, etc., según el caso).

Vale acotar que en la práctica, dada la relación con la generación de energía eléctrica, se utiliza como unidad el  $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  y sus múltiplos más habituales  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  y  $\text{MW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ .

### 1.4.2 RADIACIÓN EXTRATERRESTE

Antes de definir lo que es la radiación extraterrestre pasemos por un término que está ligado a este, la constante solar ( $I_0$ ) que la definiremos como la cantidad de

energía procedente del Sol que llega, por unidad de tiempo y área, a una superficie perpendicular a los rayos del Sol, situada fuera de la atmósfera, su valor varía entre 1338 y 1386 W/m<sup>2</sup>. Esto debido a que la distancia Sol-tierra cambia a lo largo del año, al ser la órbita terrestre alrededor del Sol elíptica. El valor que vamos a utilizar de aquí en adelante es 1367 W/m<sup>2</sup>, que es el valor adoptado por el World Radiation Center.

La radiación extraterrestre es la cantidad de energía recibida en la parte exterior de la atmósfera por unidad de superficie. Como hemos visto éste valor será función, en cada momento, de la distancia Sol-tierra, de la declinación, de la latitud del lugar considerado y de la hora del día.

La irradiancia extraterrestre en una superficie horizontal es:

$$I_{\text{ext}} = I_o \cdot \text{Exc} \cdot \cos \theta_z \quad [3]$$

$I_{\text{ext}}$  es la irradiancia extraterrestre y Exc es el llamado factor de excentricidad, desarrollado para tomar en cuenta la variación en la distancia de la tierra al Sol y también descrito por Spencer (1971) según la fórmula:

$$\text{Exc} = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad [4]$$

Durante un periodo de tiempo tenemos que:

$$dI_{\text{ext}} = I_o \text{Exc} \cos \theta_z (\omega) dt \quad [5]$$

$\omega$  se denomina ángulo horario y es el ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Su relación con el ángulo solar cenital está dada por:



$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad [6]$$

Si procedemos a integrar la irradiancia extraterrestre entre la salida y la puesta del sol, obtendremos la irradiación total para un día determinado, es decir, cuanta energía fue receptada por la superficie durante esa jornada.

Para obtener los ángulos de salida y puesta del sol en el horizonte basta con saber que, según el sistema de coordenadas que hemos escogido, al amanecer y atardecer el ángulo cenital solar será igual a  $90^\circ$ . Bajo esta condición  $\cos \theta_z = 1$ .

Reemplazando en [6] y despejando llegamos a:

$$\omega_s = a \cos(-\tan \delta \tan \phi) \quad [7]$$

Nótese que el ángulo de puesta del sol (atardecer)  $\omega_s$  y el ángulo de salida del sol (amanecer)  $\omega_r$  tienen el mismo valor y únicamente los diferencia su signo. La convención que adoptaremos en esta tesis es que en las mañanas el valor de  $\omega$  será negativo, al mediodía será de  $0^\circ$  y durante las tardes será positivo.

Una vez calculados estos ángulos podemos integrar la irradiancia extraterrestre entre el amanecer y el ocaso para saber la irradiación global recibida por una superficie horizontal extraterrestre durante un día. Partiendo de la relación:

$$\frac{dt}{d\omega} = \frac{43200s}{\pi \text{ radianes}} \quad [8]$$

Reemplazamos en [5]:

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{43200I_0 \text{Exc}}{\pi} \int_{\omega_r}^{\omega_s} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \\ &= \frac{83400I_0 \text{Exc}}{\pi} (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \end{aligned} \quad [9]$$

$G_0$  es la cantidad de energía recibida durante un día por una superficie horizontal extraterrestre y la usaremos más adelante cuando estudiemos la radiación incidente sobre superficies inclinadas.

### 1.4.3 EFECTOS DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA RADIACIÓN

A pesar de que los modelos de transmitancias que se utilizaron para la realización de esta tesis no dependen directamente de la **masa de aire**, sino que éste concepto se encuentra incorporado por las pertinentes regresiones realizadas por sus autores, se la ha querido citar para poder indicar el comportamiento de la radiación solar al pasar por la atmósfera. La radiación solar atraviesa la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre y se altera por el aire, la suciedad, el vapor de agua, los aerosoles en suspensión y otros elementos de la atmósfera. Estas alteraciones son de diferentes tipos según la propiedad óptica que se pone de manifiesto:

- Reflexión: nubes.
- Absorción: ozono, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua. Sólo actúa sobre algunas longitudes de onda de la radiación.
- Difusión: polvo, aerosoles, gotas de agua.

Estos efectos varían dependiendo de la cantidad de atmósfera que la radiación solar ha de atravesar. Para especificar esta distancia se utiliza el concepto de masa

de aire (AM) que es el espesor de la atmósfera terrestre que recorre la radiación solar directa expresado como múltiplo del camino que recorrería en una dirección perpendicular a la superficie terrestre. Cuando el Sol está en su posición más alta, en un día sin nubes (figura 14), la masa de aire (AM) atravesada es mínima y tiene valor unitario a nivel del mar. Se indica como AM 1. El valor AM 0 se utiliza para especificar las condiciones sobre una superficie normal al Sol fuera de la atmósfera terrestre.

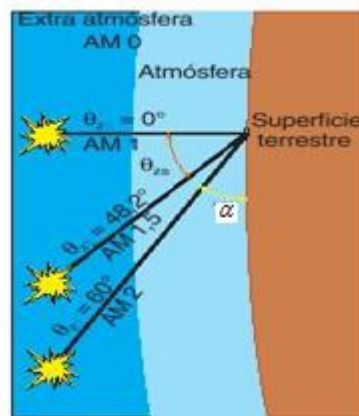


Figura 14.- Masa de aire para diferentes ángulos cenitales

Se puede calcular la masa de aire con la expresión:

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha} [10]$$

Cuando se especifica la potencia máxima de un módulo fotovoltaico en sus hojas de datos se indica para un valor de AM 1,5 que corresponde a un ángulo cenital  $\theta_z = 48.2^\circ$ .

#### 1.4.4 COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar sobre la superficie terrestre tiene variaciones temporales, siendo unas aleatorias, como la nubosidad, y otras previsible, como son los cambios estacionales o el día y la noche, provocadas por los movimientos de la tierra.

Para facilitar su estudio, la radiación solar sobre un receptor ubicado en la tierra se clasifica en tres componentes: directa, difusa y reflejada o de albedo (figura 15).

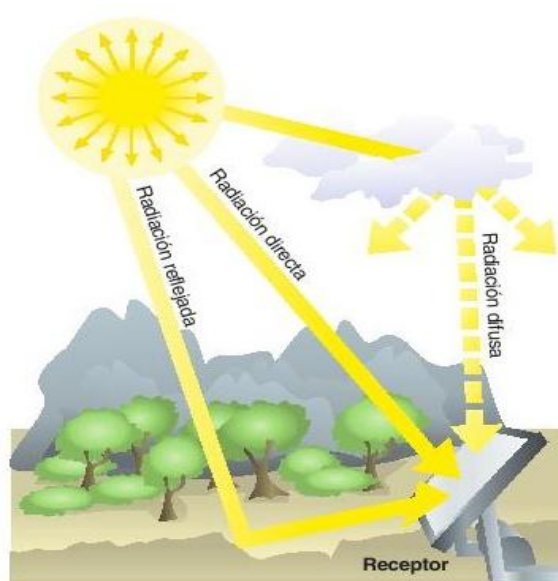


Figura 15.- Componentes de radiación solar incidentes en una superficie

- **Radiación directa:** la forman los rayos recibidos directamente del Sol.

- **Radiación difusa:** originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera, incluidas las nubes.
- **Radiación reflejada o de albedo:** es la radiación incidente en la superficie que procede de la reflejada por el suelo. Aquí vale mencionar un término que va ligado a radiación reflejada y es el albedo definido como el cociente entre la radiación reflejada y la radiación incidente en la superficie de la tierra. Esta componente de la radiación solar se calcula cuando la superficie tiene alguna inclinación con respecto al suelo, de lo contrario se considera nula.

La suma de todas las componentes descritas recibe el nombre de radiación global, es decir, la radiación solar total que recibe la superficie de un receptor y por lo tanto, la que nos interesa conocer y cuantificar en esta tesis mediante un programa.

#### **1.4.4.1 RADIACIÓN GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL**

En los apartados anteriores hemos visto qué es la radiación solar, cómo se altera cuando atraviesa la atmósfera, qué tipos de radiación solar llegan a una superficie y con qué magnitudes se caracteriza la radiación solar, pero ¿qué sucede cuando la superficie receptora es un plano horizontal? Cuando esto

sucede las componentes directa y difusa son las únicas que alcanzan dicho plano, teniendo que la suma de éstas es la radiación global.

Podríamos preguntarnos por la utilidad de éste cálculo dado que nuestro objetivo es obtener la radiación en una superficie con cualquier inclinación y los planos horizontales deberían considerarse un caso especial de un concepto mucho más general. Sin embargo, se han realizado múltiples intentos por tratar de modelar la radiación solar en superficies inclinadas, pero no brindan los resultados esperados presentando muchas incongruencias. Los modelos más exactos para calcular la radiación incidente en una superficie inclinada se basan en la radiación recibida por una superficie horizontal para luego usar factores de corrección para cada componente como veremos más adelante.

Por lo tanto, para conocer la energía recibida por una superficie inclinada es necesario primero calcular la energía receptada por una superficie horizontal bajo las mismas condiciones a las que someteremos el plano inclinado en estudio.

#### **1.4.4.2 RADIACIÓN GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA**

Cuando la superficie de recepción está inclinada con respecto a la horizontal del lugar, las componentes que llegan a la superficie y que forman la

radiación global son la componente directa, difusa y reflejada de la radiación solar.

#### **1.4.5 TRANSMITANCIA**

Definimos a la transmitancia como la parte de energía que atraviesa un cuerpo en cierta cantidad de tiempo, vemos que existen distintos tipos de transmitancias dependiendo del tipo de energía que tomemos en consideración, siendo estas:

**Transmitancia Óptica:** esta se refiere a la parte de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda.

**Transmitancia Térmica:** Nos referimos a transmitancia térmica como la parte de energía en forma de calor que atraviesa un cuerpo, en cierta cantidad de tiempo.

En general, los modelos de irradiancia solar basados en transmitancias utilizan éste parámetro para evitar un análisis espectral de cada longitud de onda, lo cual haría un cálculo mucho más engorroso.

## 1.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE RADIACIÓN UTILIZADOS

Inclinación de la Superficie	Componente	Modelo Elegido
Superficie Horizontal	Radiación Directa	Modelo de Hottel
Superficie Horizontal	Radiación Difusa	Modelo de Liu Jordan
Superficie Inclinada	Radiación Directa	Factor geométrico
Superficie Inclinada	Radiación Difusa	Modelo de Reindl et al
Superficie Inclinada	Radiación Reflejada	Convención generalizada

Tabla II.- Modelos elegidos para la simulación

Una vez caracterizada la fuente luminosa, conocida tanto su comportamiento y sus variables de interés, movimiento de la tierra y superficie receptora de la radiación podemos ya elegir los modelos de radiación basados en transmitancias para las distintas situaciones requeridas (superficie horizontal o inclinada) como lo pide nuestro proyecto basándonos en distintos criterios de selección.

Para esta selección se ha revisado varios de los modelos existentes de entre los cuales tenemos Orgill y Hollands, Page, Iqbal, Liu y Jordan, Hoyt y Hottel por citar unos cuantos, de los cuales hemos escogido los descritos a continuación.



## 1.5.1 MODELOS DE RADIACIÓN ELEGIDOS PARA SUPERFICIES HORIZONTALES

Para poder determinar el valor de radiación total en una superficie horizontal necesitamos el valor de sus dos componentes, haciendo una breve explicación en las siguientes líneas.

### 1.5.1.1 MODELO DE HOTTEL (RADIACIÓN DIRECTA)

Para el modelado de la radiación directa en superficies horizontales se utilizó el Modelo de día claro de Hottel (1976), el cual es un método para calcular la radiación directa transmitida a través de la atmósfera clara, en el cual se toma en cuenta el ángulo cenital solar y la altitud para una atmósfera estándar y cuatro tipos de clima: tropical, verano en latitudes medias, verano subártico e invierno en latitud media (2).

El coeficiente de transmitancia para la radiación solar directa  $\tau_b$  está dado por la expresión:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left[\frac{-k}{\cos \theta_z}\right] \quad [11]$$

Las constantes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  de la atmósfera estándar con 23 Km. de visibilidad son encontradas de las siguientes ecuaciones:

$$a_0 = r_0 \left[ 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \right] \quad [12]$$

$$a_1 = r_1 \left[ 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \right] \quad [13]$$

$$k = r_k \left[ 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \right] \quad [14]$$

La atmósfera estándar representa una condición típica de latitud media y sin contaminación por polución, independientemente del grosor de la capa de ozono.

En las fórmulas anteriores  $A$  es la altitud del observador, en kilómetros, y los parámetros  $r_0$ ,  $r_1$  y  $r_k$  están dadas por la tabla que se muestra a continuación, para distintos tipos de clima:

Tipo de clima	$r_0$	$r_1$	$r_k$
<b>Tropical</b>	0,95	0,98	1,02
<b>Verano (latitudes medias)</b>	0,97	0,99	1,02
<b>Invierno (latitudes medias)</b>	1,03	1,01	1,00
<b>Verano subártico</b>	0,99	0,99	1,01

Tabla III.- Factores de corrección para diferentes climas

Una vez obtenido el valor de ésta transmitancia, el valor de la irradiancia directa incidente en una superficie horizontal es:

$$I_B = I_{\text{ext}} \tau_b \cos \theta_z \quad [15]$$

### 1.5.1.2 MODELO DE LIU JORDAN (RADIACIÓN DIFUSA)

Para el modelado de la radiación difusa en superficies horizontales se utilizó la relación de Liu Jordan la cual determina la transmitancia atmosférica para la radiación difusa por la siguiente fórmula:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b \quad [16]$$

Por lo que tenemos que la irradiancia difusa solar en superficie horizontal es:

$$I_d = I_{ext} \tau_d \cos \theta_z \quad [17]$$

## 1.5.2 MODELOS DE RADIACIÓN ELEGIDOS PARA SUPERFICIES INCLINADAS

Para poder determinar el valor de irradiación total en una superficie inclinada necesitamos el valor de sus componentes, a saber: directa, difusa y reflejada.

$$G_T = B_T + D_T + R_T \quad [18]$$

Siendo:

$G_T$  = Irradiación global diaria en superficie inclinada

$B_T$  = irradiación directa diaria en superficie inclinada

$D_T$  = irradiación difusa diaria en superficie inclinada

$R_T$  = irradiación reflejada diaria en superficie inclinada

La ecuación [18] puede ser reescrita por sus respectivas proporciones de

radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para las distintas radiaciones por lo que [18] queda de la siguiente manera:

$$G_T = R_b B + R_d D + R_r G \quad [19]$$

Dónde:

$G_T$  = Irradiación global diaria en superficie inclinada

$R_b$  = Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para irradiación directa; también se lo llama factor geométrico

$B$  = irradiación directa diaria en superficie horizontal

$R_d$  = Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para irradiación difusa

$D$  = irradiación difusa diaria para superficie horizontal

$R_r$  = Proporción de radiación diaria incidente en superficie inclinada a superficie horizontal para irradiación difusa

$G$  = Irradiación global diaria en superficie horizontal

Las distintas irradiaciones descritas en [19] fueron explicadas con anterioridad y los modelos de irradiancia sobre superficies inclinadas básicamente se concentran en resolver el problema del cálculo de  $R_b$ ,  $R_d$  y  $R_r$ .

### 1.5.2.1 RADIACIÓN DIRECTA Y REFLEJADA SOBRE UN PLANO INCLINADO

Para poder conocer el valor de las componentes de radiación directa y reflejada, necesitamos conocer sus respectivas proporciones de radiación diaria incidente, como se vio anteriormente  $R_b$  y  $R_r$  (4).

$R_b$  se llama también factor geométrico de corrección, y define la proporción de radiación incidente sobre una superficie inclinada versus la radiación incidente sobre superficie horizontal como:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [20]$$

En nuestra tesis vamos a calcular un valor de  $R_b$  diario por lo que el factor geométrico de corrección quedaría de la siguiente manera:

$$R_b = \frac{\int_{\omega_r}^{\omega_s} \cos \theta(\omega) \cdot d\omega}{\int_{\omega_r}^{\omega_s} \cos \theta_z(\omega) \cdot d\omega} \quad [21]$$

$\theta$  es el ángulo de incidencia sobre el plano inclinado y está dado por la expresión:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos S - \sin \delta \cos \phi \sin S \cos O + \cos \delta \cos \phi \cos S \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin S \cos O \cos \omega + \cos \delta \sin S \sin O \sin \omega \end{aligned} \quad [22]$$

Klein propuso un método finalmente modificado por Andersen para el cálculo de  $\omega_{sT}$  y  $\omega_{rT}$  (5). Estos son definidos como los ángulos horarios del atardecer

y amanecer en la superficie inclinada y son necesarios para el cálculo de  $R_b$ , ya que en una superficie inclinada es posible que el Sol no salga en el mismo instante que lo hace en el horizonte (6). Según estos autores los ángulos en mención se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\omega^+ = \frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \quad [23]$$

$$\omega^- = \frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \quad [24]$$

$$A = \frac{\cos \phi}{\sin O \tan S} + \frac{\sin \phi}{\tan O} \quad [25]$$

$$B = \tan \delta \left( \frac{\cos \phi}{\tan O} - \frac{\sin \phi}{\sin O \tan S} \right) \quad [26]$$

Si  $O \leq \pi$

$$\omega_{rT} = -\min(\omega_s, \omega^+)$$

$$\omega_{sT} = \min(\omega_s, \omega^-) \quad [27]$$

sino

$$\omega_{rT} = -\min(\omega_s, \omega^-)$$

$$\omega_{sT} = \min(\omega_s, \omega^+) \quad [28]$$

En éstas fórmulas  $O$  es el ángulo de orientación del plano con respecto al Sur.

Varía desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ .

$S$  es el ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal del

lugar. Toma valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

$R_r$  puede ser calculado como función de una característica llamada albedo, denotada por  $\rho$  que es una medida de la tendencia de una superficie a reflejar radiación incidente.

$$R_r = \rho \frac{(1 - \cos S)}{2} \quad [29]$$

Si no se conoce este valor, es una norma general adoptar el valor  $\rho = 0.2$

### **1.5.2.2 MODELO DE REINDL ET AL (COMPONENTE DIFUSA)**

Como vimos anteriormente para poder conocer el valor de radiación difusa en una superficie inclinada necesitamos saber cómo se comporta  $R_d$ . Esto lo podemos hacer mediante el modelo de Reindl et al, el cual es un modelo anisotrópico.

Los modelos isotrópicos asumían que la radiación difusa proveniente del cielo es igual en todas las direcciones, de ahí su nombre.

Sin embargo, esto resulta no ser correcto puesto que la radiación difusa además de la componente isotrópica consta de una vertiente anisotrópica causada por la radiación difusa proveniente de la región circunsolar (brillo cercano al disco solar) y por el brillo del horizonte.

Los modelos anisotrópicos tomaron en cuenta esta situación y corrigieron la deficiencia añadiendo una componente anisotrópica a los métodos anteriores.

El modelo de Reindl et al es un método citado en la literatura constantemente por su gran exactitud y al complementarse perfectamente con los modelos basados en transmitancias ha sido el elegido para éste trabajo.

De ésta manera se define  $R_d$  como:

$$R_d = \frac{B}{G_0} R_b + \left(1 - \frac{B}{G_0}\right) \left(1 + \frac{\cos S}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{B}{G}} \cdot \sin^3 \frac{S}{2}\right) \quad [30]$$

Donde  $G$  es la irradiación global diaria en superficie horizontal y los otros valores han sido definidos previamente. Aquí se nota claramente la componente anisotrópica de la radiación en el primer término de la ecuación dado que como sabemos  $R_b$  se relaciona con la radiación directa, siendo éste valor la contribución de la radiación difusa en la región circumsolar.

## 1.6 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR SOMBRAS

Diversos estudios demuestran que los paneles fotovoltaicos son muy sensibles a la sombra. Una pequeña sombra puede causar reducciones muy grandes en el rendimiento, a tal punto que se ha llegado a asumir que una sombra proyectada en el panel solar aunque no abarque toda su superficie, lo deja inhabilitado.

Por otra parte, analizar punto por punto la proyección de una sombra sobre una superficie es una tarea compleja. Existen muchos y muy elaborados algoritmos para calcular la porción de sombra que se causa en un plano por un obstáculo circundante, incluso en Internet se pueden descargar programas especializados para estos menesteres. Sin embargo no es el objetivo de éste estudio un análisis detallado y exhaustivo de las sombras, sino más bien una aproximación razonable para un proceso de optimizar paneles (aunque un buen diseño debería excluir la posibilidad



de sombras dado el alto coste de un panel solar) y también una ayuda para el diseño en edificios inteligentes brindando la radiación incidente en fachadas con obstáculos alrededor (7).

Asumiendo lo anterior, hemos creado un sencillo método, el cual a nuestro criterio brinda resultados muy satisfactorios y consta de los siguientes pasos:

- Escogemos el punto central más bajo de nuestro plano inclinado, el cual será el origen de nuestras coordenadas.
- Luego, dibujamos el perfil del obstáculo por medio de cuatro puntos que lo representan. Hemos escogido esta cantidad de puntos porque representa satisfactoriamente cualquier obstáculo circundante aunque se podría incrementar el número de puntos para representar una sombra más compleja.
- Uniendo éstos puntos formamos rectas, representadas por funciones lineales del acimut solar.
- Para un instante conocido del día, denotado por el acimut solar, calculamos el ángulo de elevación del obstáculo en ese momento y de ser mayor a la altura solar entonces existe sombra sobre nuestra superficie.
- Prevenidos de la existencia de sombra en el plano inclinado, anulamos todas las componentes de radiación que sean necesarias en nuestro programa.

### **1.6.1 MÉTODO PARA REPRESENTAR EL CONTORNO DEL OBSTÁCULO**

Para tener claro el concepto que vamos a manejar es necesario recordar la descripción que hicimos sobre la carta solar. En pocas palabras, la carta solar es un mapa de las trayectorias del sol dibujadas sobre el rango de vista de un observador. Por lo general, se toma como centro de las abscisas al Sur, es decir cuando el acimut solar vale cero.

Sin embargo, en la carta solar podríamos representar incluso ángulos acimutales de  $\pm 180^\circ$ , abarcando de ésta manera una visión completa del perímetro del observador.

Como definimos anteriormente, el punto central más bajo de nuestra superficie será el origen de las coordenadas. Partiendo de éste punto procedemos a dibujar el perfil del obstáculo tal y como observamos en la figura 16. Aquí está representado un obstáculo con varios puntos para representar el potencial de éste método aunque en el programa dibujaremos el contorno de nuestro obstáculo únicamente con 4 puntos.

Las coordenadas de un punto estarán dadas por su acimut y altura con respecto al origen, el cual se encuentra en nuestro plano inclinado.

De esta manera, contando con una brújula, una cinta para medir distancia y una calculadora podemos calcular fácilmente los valores que requerirá el programa, teniendo mucho cuidado en ingresar los valores de estos ángulos en radianes.

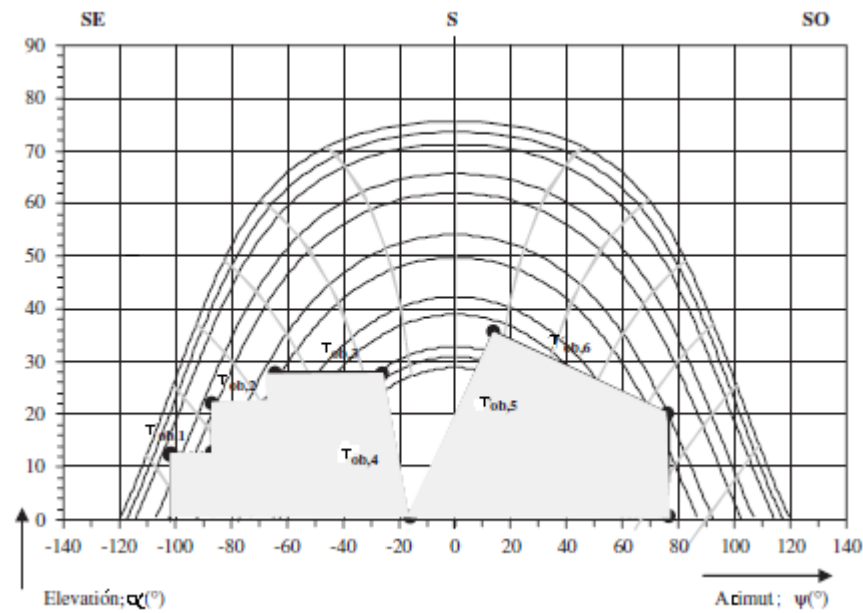


Figura 16.- Representación del perfil del obstáculo por medio de rectas

Una vez obtenidos los valores representativos de cada punto respecto del origen, simulamos el contorno del obstáculo por medio de rectas que unen los puntos elegidos.

Dados los puntos  $P_{ob,i}(\psi_{ob}^i, \alpha_{ob}^i)$  y  $P_{ob,i+1}(\psi_{ob}^{i+1}, \alpha_{ob}^{i+1})$ , vértices del obstáculo en estudio, la recta que une a estos puntos tendrá la forma:

$$Y = mX + b \quad [31]$$

En nuestro caso las ordenadas representan el ángulo de elevación y las abscisas el ángulo acimutal del obstáculo, respectivamente. Por lo tanto, si nos regimos por la ecuación de la recta tendremos que:

$$T_{ob,i}(\Psi) = \frac{\alpha_{ob}^{i+1} - \alpha_{ob}^i}{\psi_{ob}^{i+1} - \psi_{ob}^i} \Psi + \frac{\alpha_{ob}^i \psi_{ob}^{i+1} - \alpha_{ob}^{i+1} \psi_{ob}^i}{\psi_{ob}^{i+1} - \psi_{ob}^i} \quad [32]$$

Entonces, cada tramo del contorno del obstáculo queda representado por una recta

denotada por  $T_{ob,i}$  que es una función lineal de  $\Psi$  (acimut solar) y que representa la línea que une los puntos  $P_{ob,i}$  y  $P_{ob,i+1}$ . En nuestro programa y como ya se indicó el parámetro  $i$  toma valores entre 0 y 3.

Una vez caracterizado el perfil del obstáculo, para cada valor de ángulo horario tomado durante el día el programa deberá verificar si el acimut solar se encuentra dentro del rango cubierto por el contorno del obstáculo. De ser así, calculará la elevación del obstáculo en ese momento basado en la recta que contenga el acimut solar. Si la elevación del obstáculo es mayor a la altura solar, nuestro punto se halla bajo sombra.

De producirse una sombra en nuestra superficie se deben anular dos componentes de radiación: la componente de radiación directa y la componente difusa anisotrópica proveniente de la región circumsolar.

Las componentes difusa isotrópica y reflejada permanecen inalteradas, puesto que el modelado indica que provienen de toda la esfera celeste y por lo tanto sus características son las mismas en cualquier dirección.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DE LA TECNOLOGÍA**

Aproximadamente el 85 % de la energía que utilizamos a nivel mundial se obtiene de combustibles fósiles (se produce del carbón, gas natural y petróleo). Con tasas altas de consumo de energía las cuales aumentan día a día y a sabiendas de que el panorama que se nos presenta es que este tipo de recursos se están agotando, es indispensable la propuesta de nuevas formas de energías que nos liberen de la dependencia que tenemos de petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o simplemente agotables.

Estas nuevas fuentes de energía a la que nos referimos son las energías renovables que constituyen un recurso natural ilimitado de energía y se pueden restaurar en una mínima cantidad de tiempo. Algunas de las energías renovables que podemos utilizar

son las que se originan de la energía del sol, energía del viento, energía geotérmica, energía mareomotriz entre otras.

Uno de los recursos renovables más utilizados es la energía solar debido a sus múltiples usos y ventajas de entre los cuales podemos nombrar dos: calor (energía solar térmica) y electricidad (energía solar fotovoltaica).

Entre las ventajas que ofrece podemos mencionar que es de sencilla obtención, no es contaminante del medio ambiente o del agua como sí lo es y en gran medida, la quema de combustibles fósiles.

Su valor disminuirá cuando se logre la masificación (fabricación a gran escala) del consumo de aquellos aparatos que funcionan con energía solar; es muy probable que para la tercera década del siglo, una buena parte de la electricidad consumida en los países ricos en sol tenga su origen en la energía emitida por el astro rey.

La radiación solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así, una casa bien aislada puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol. El coste de la factura de la luz sería sólo una fracción del que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar.

## **2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

La energía solar fotovoltaica es la energía procedente del Sol que se convierte en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia. Esta se produce mediante generadores compuestos por módulos fotovoltaicos conectados entre sí que a su vez están compuestos por unidades básicas denominadas células solares o fotovoltaicas. El conjunto de módulos fotovoltaicos que componen un generador forma una superficie plana, que tiene que ser expuesta a la luz del Sol para producir energía eléctrica.

La inclinación y orientación adecuadas de dicha superficie son fundamentales para conseguir una conversión eficiente de energía solar en energía eléctrica.

Para conseguir este objetivo es necesario conocer un conjunto de conceptos básicos los cuales ya hemos revisado en partes anteriores de este documento y otros los revisaremos más adelante.

### **2.1.1 GENERADOR FOTOVOLTAICO**

La conversión de la radiación solar en energía eléctrica se lleva a cabo en la célula fotovoltaica.

La luz está compuesta por partículas, los fotones, que transportan energía.

Cuando un fotón con una gran cantidad de energía golpea la célula, es absorbido

por los materiales semiconductores y libera un electrón. El electrón, una vez libre, deja atrás de sí una carga positiva llamada hueco.

Por lo tanto, cuanto mayor sea la cantidad de fotones (intensidad de la radiación) que golpean la célula mucho más numerosas serán las parejas electrón-hueco producidas por efecto fotovoltaico y por lo tanto más grande la cantidad de corriente producida. Esta célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una lámina delgada de un material semiconductor, muy a menudo de silicio. Se trata del mismo silicio utilizado en la industria electrónica, cuyo coste todavía es alto.

La célula fotovoltaica está fabricada de una placa de silicio normalmente cuadrada, con aproximadamente 10 cm de lado y con un grosor que varía entre los 0.25 y los 0.35 mm con una superficie de más o menos 100 cm<sup>2</sup>.



Figura 17.- Generador fotovoltaico

Una célula fotovoltaica por sí sola no puede producir los niveles de voltaje o corrientes necesarios para el funcionamiento de un equipo electrónico, por lo que se ensamblan un conjunto de ellos para formar una estructura única que se llama



generador o panel fotovoltaico que ya es una estructura sólida y manejable a los requerimientos necesarios.

Los generadores fotovoltaicos pueden tener diferentes tamaños y estar formados por muchas células, los más utilizados son los formados por 36 células conectadas electrónicamente en serie. De acuerdo a las necesidades de potencia requeridas por el sistema eléctrico, se pueden ir conectando generadores fotovoltaicos en serie. Los generadores fotovoltaicos están montados en una estructura mecánica capaz de sujetarlos y orientarlos. Por medio del programa realizado con motivo de ésta tesis se puede determinar la orientación (acimut) e inclinaciones ideales para maximizar la cantidad de radiación solar que reciben y, por lo tanto, dispones de la mayor cantidad de energía posible.

La producción de energía eléctrica fotovoltaica, al estar ligada a la luz del sol, no es constante; está sujeta a las variaciones de día y noche, a los cambios de estaciones y, por supuesto, a las condiciones meteorológicas. Además, el panel proporciona niveles de voltajes continuos y la gran mayoría de los elementos eléctricos que se utilizan necesitan de una alimentación de tensión alterna. Por lo tanto, es necesario adaptar y transformar la tensión creada por los generadores; esto se lo realiza por medio de un inversor.

Por último, todo este conjunto de elementos los podemos agrupar en un sistema fotovoltaico que en si será el medio encargado de captar y transformar (generadores solares), almacenar (acumulador), regular (regulador de carga) y acondicionar (inversor).



Figura 18.- Sistema fotovoltaico

## 2.1.2 ORIENTACIÓN DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

Una vez descritas las coordenadas que nos permiten situar el Sol en el cielo, hay que posicionar la superficie del generador fotovoltaico de manera que reciba la mayor cantidad posible de energía solar. Esto depende de:

- La orientación de la superficie del generador fotovoltaico.
- El tiempo que se va a usar a lo largo del año: anual, estacional, etc.
- La aplicación que va a tener: autónomo, conectado a la red, etc.

La orientación de un generador fotovoltaico se define mediante coordenadas angulares, similares a las utilizadas para definir la posición del Sol:

- **Ángulo de acimut (O):** es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección Sur (figura 19). Vale  $0^\circ$  si coincide con la orientación Sur, es positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este. Si coincide con el Este su valor es  $-90^\circ$  y si coincide con

el Oeste su valor es  $+90^\circ$ . En ésta tesis denominaremos también a éste valor ángulo de orientación.

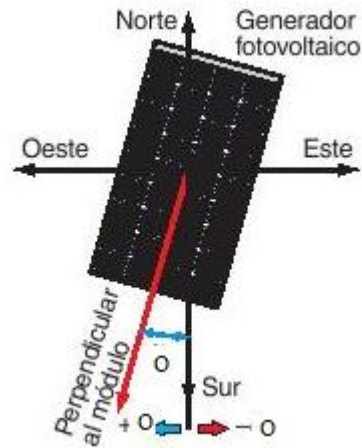


Figura 19.- Ángulo de orientación del generador fotovoltaico

• **Ángulo de inclinación (S):** es el ángulo que forma la superficie del generador con el plano horizontal (figura 20). Su valor es  $0^\circ$  si el módulo se coloca horizontal y  $90^\circ$  si se coloca vertical.

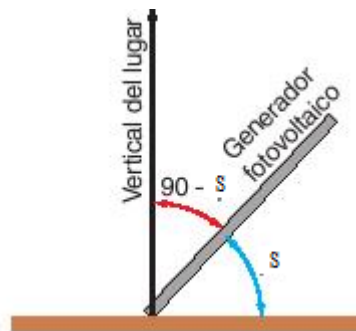


Figura 20.- Ángulo de inclinación del generador fotovoltaico

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a

la dirección del Sol. Como la posición del Sol varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable. Veamos cómo es esa variación.

Hemos definido la declinación ( $\delta$ ) como el ángulo variable que forma el ecuador con el plano de la eclíptica. Por lo tanto, la dirección de la radiación solar incidente sobre la tierra varía en función de la declinación. La latitud ( $\phi$ ) de un lugar A (figura 21) indica el ángulo que forma la vertical de ese lugar con el ecuador. Por lo tanto, a lo largo del año el ángulo cenital  $\theta_z$  que forma la vertical de un lugar A con la dirección de la radiación solar varía desde  $\theta_z = \phi - \delta$  en el solsticio de verano a  $\theta_z = \phi + \delta$  en el solsticio de invierno, pasando dos veces por el valor  $\theta_z = \phi$  en los equinoccios del año.

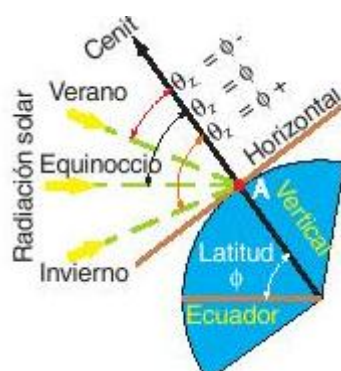


Figura 21.- Variación del ángulo cenital solar

Entonces, para que una superficie reciba la radiación solar perpendicularmente (figura 22) tendremos que inclinar la superficie un ángulo  $S$  con la horizontal igual al que forma la vertical del lugar con la radiación solar. Tendremos que

variar el ángulo de inclinación desde  $S = \phi - \delta$  en el solsticio de verano (figura 22.c) a  $S = \phi + \delta$  en el solsticio de invierno (figura 22.a), pasando por el valor  $S = \phi$  en los equinoccios (figura 22.b).

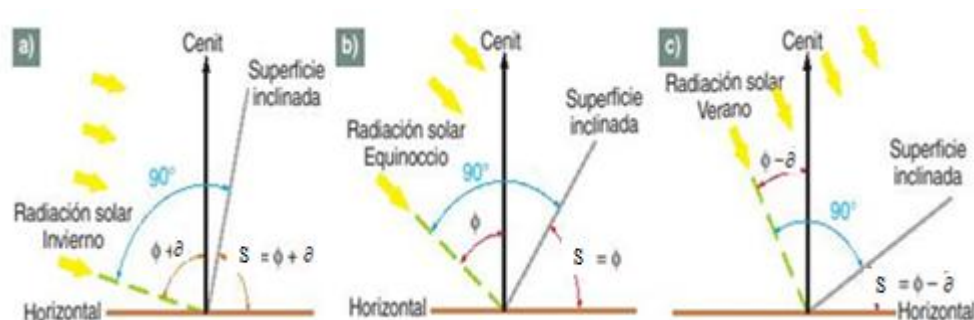


Figura 22.- Superficie normal a la radiación solar. a) Al mediodía del solsticio de invierno. b) Al mediodía de los equinoccios. c) Al mediodía del solsticio de verano

Aunque hay generadores fotovoltaicos que son capaces de seguir la trayectoria solar, lo habitual es que la superficie del generador sea de orientación fija. La orientación óptima será un valor constante, con una inclinación ( $S$ ) que va a depender de la latitud  $\phi$  del lugar y un acimut ( $O$ ) que depende del hemisferio en el que está situado el generador. La figura 23 muestra una superficie situada en el hemisferio Norte, donde el Sol sigue una trayectoria Este-Sur-Oeste. Si pretendemos maximizar la captación de energía solar, la superficie tendrá que estar orientada hacia el Sur y por lo tanto el ángulo de acimut ( $O$ ) debe ser nulo. El acimut óptimo para que una superficie fija reciba la mayor cantidad posible de energía solar debe ser cero ( $O = 0^\circ$ ) si el panel se encuentra en el hemisferio Norte y  $O=180^\circ$  si nos encontramos en el hemisferio Sur.

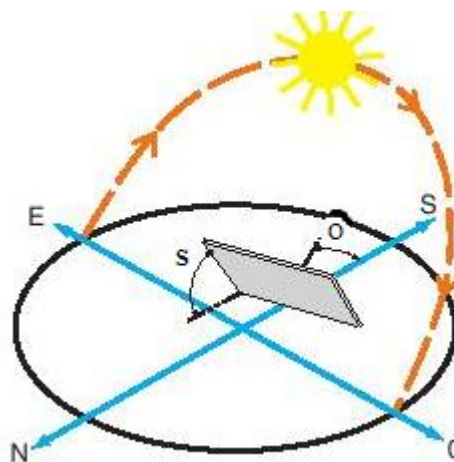


Figura 23.- Orientación de una superficie en el hemisferio norte

### 2.1.3 PANELES SOLARES MÓVILES: SEGUIMIENTO ACIMUTAL

Uno de los requerimientos al realizar esta tesis fue analizar generadores fotovoltaicos provistos de sistemas de seguimiento para aumentar la cantidad de energía solar captada.

Los seguidores solares básicamente se dividen en dos tipos: de un eje y de dos ejes.

Los seguidores solares de dos ejes se utilizan por lo general en granjas solares a gran escala, puesto que su valor es extremadamente alto pero se justifica en esta aplicación al lograr que el ángulo de incidencia de los rayos solares sea siempre perpendicular a la superficie de captación.

Una alternativa muy accesible es utilizar seguimiento solar a un eje, y entre estos sistemas destaca el seguidor acimutal por su relativa sencillez.

En vista de todo lo explicado hasta el momento, podemos concluir que el estudio de cualquier tipo de seguimiento se reduce únicamente en averiguar como ésta modificación afecta el valor de  $R_b$ , el cual, como es obvio, deseamos aumentar para lograr captar más energía solar.

Para estudiar el seguidor acimutal es necesario reescribir la ecuación [22] de una manera en la que el análisis será mucho más fácil:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos S + \sin \theta_z \sin S \cos(\Psi - O) \quad [33]$$

Esta ecuación, en el análisis que nos ocupa es muy útil. El ángulo de orientación de la superficie en un seguidor acimutal, como su nombre lo indica, siempre será igual al ángulo acimutal del sol  $\Psi = O$ , con lo cual [33] se reduce a:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos S + \sin \theta_z \sin S \quad [34]$$

Esta será la fórmula utilizada en nuestro programa para calcular  $\theta$  en nuestro programa.

## **2.2 ENERGÍA SOLAR TERMICA**

La energía solar térmica es una parte de la energía solar, que se dedica al aprovechamiento de la energía calorífica del sol, para distintas actividades entre las cuales podemos mencionar agua caliente para uso doméstico, agua caliente\_sanitaria, calefacción o para producción de energía mecánica y a partir de ella de energía eléctrica. A nivel doméstico se utiliza para cocinar alimentos (estufas solares), para

generar agua caliente (calentadores solares de agua) o para calefacción. También se utiliza mucho a nivel industrial, en donde se calienta el agua hasta evaporarse y este vapor de agua mueve turbinas para generar electricidad (plantas de energía solar térmica). Uno de los usos más conocidos que tiene la energía solar térmica es de los calentadores solares de agua para uso doméstico. Este relativamente sencillo dispositivo consiste principalmente de dos partes, el colector solar que captura la radiación solar y la convierte en energía térmica (calor) y el tanque de almacenamiento. El colector solar es un cuadro de aproximadamente  $2 \text{ m}^2$ , por lo general es de placa plana y cubierta de vidrio. Dentro del colector hay una serie de tubos de color oscuro (las superficies oscuras calientan más) por donde pasa el agua, que al entrar en contacto con el sol es calentada. Cabe acotar que el vidrio que cubre el captador no sólo protege la instalación sino que también permite conservar el calor produciendo un efecto invernadero que mejora el rendimiento del captador.

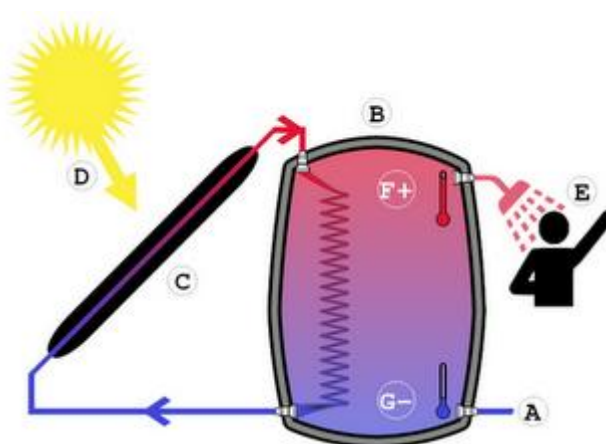
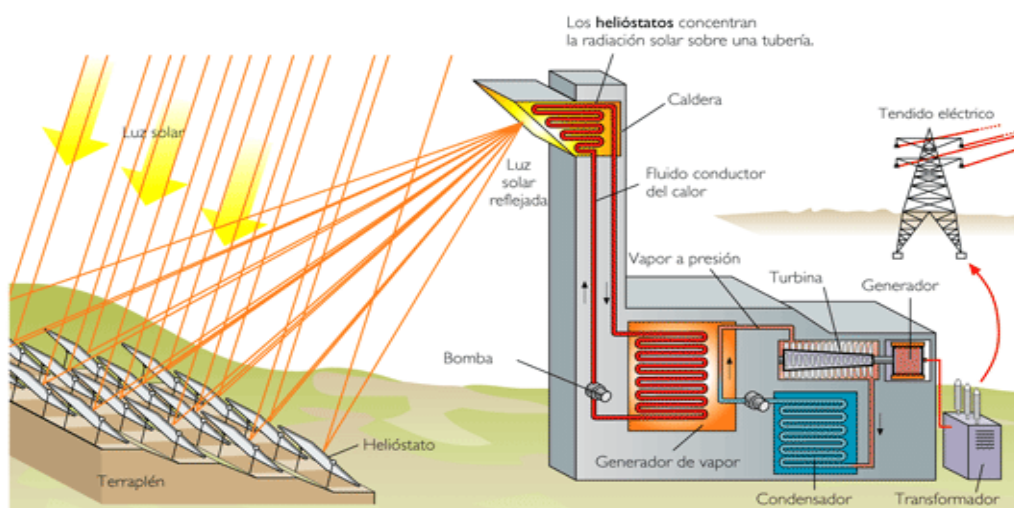


Figura 24.- Esquema simple de un sistema de energía solar térmica



Una vez caliente es almacenada en el tanque de almacenamiento o acumulador (un tanque aislado, como un termo) en donde permanece caliente para cuando se necesite. Estos calentadores pueden generar hasta el 91% del agua caliente que consume una familia, dependiendo del uso y la cantidad de sol que haya en la ubicación del calentador. Otro uso de la energía solar térmica que está tomando mucho impulso dentro de las casas son las estufas solares, que a pesar de no presentar una intensidad calorífica tan alta como una alimentada por gas, económicamente si representa una gran ventaja.

Como habíamos mencionado, la energía solar térmica también se puede usar para generar electricidad. Una de las maneras de hacer esto es construyendo una torre en cuya cima hay un gigantesco tanque de agua.



**Figura 25.- Central de energía solar térmica basada en helióstatos**

Alrededor de la torre se colocan miles de espejos que apuntan hacia el tanque, con lo que el agua se calienta y evapora; ese vapor es obligado a pasar por unas turbinas que generan electricidad. En la noche el agua se condensa y rellena el tanque para que al día siguiente se vuelva a generar energía eléctrica limpia.

## **2.3 INTEGRACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN EDIFICIOS**

Un punto interesantísimo que se puede lograr con paneles fotovoltaicos, es la utilización de programas de estudio de radiación recibida por superficies (paneles fotovoltaicos) como el realizado en esta tesis, para el diseño y construcción de edificaciones inteligentes donde se necesite la intervención de energías renovables. Los generadores fotovoltaicos pueden ir como elementos constructivos, sirviendo éstos como paredes exteriores y teniendo como incentivo la reducción de costes a corto y a largo plazo. El programa realizado sirve como ayuda a los arquitectos para lograr el mejor diseño en este tipo de edificaciones ayudándolos a esbozar sus proyectos de manera que se logre un mayor aprovechamiento de la energía solar.

Esta es una tendencia que se está implementando mundialmente, está en constante crecimiento, siendo potencialmente atractivos para la arquitectura la incorporación de nuestra tecnología para reducir costos y ayudar en el cuidado del medio ambiente.

Si se quisiera integrar los paneles solares en el techo, el programa permite situar los paneles en la inclinación óptima para el aprovechamiento de la luz, permitiría conocer que fachadas recibirían mayor radiación durante el año, o incluso calcular con anticipación como se afectaría la radiación por edificaciones circundantes que causen sombras.

Hay numerosas formas de disponer arquitectónicamente los módulos en los edificios (dependiendo en cada caso de sus características constructivas y aprovechamiento que se quiera de energía solar). En cualquier caso es necesario tener en cuenta que suponen un peso adicional que la estructura del edificio debe ser capaz de soportar (25 Kg./m<sup>2</sup> incluyendo la estructura de soporte).



Figura 26.- Edificio con paneles fotovoltaicos como fachada

Como recomendaciones generales se puede decir:

- A la hora de la sujeción debe prevalecer la protección contra el ingreso de agua de las cubiertas del edificio.

- El ángulo de inclinación debe ser tal que permita que el agua de lluvia o la nieve escurra con facilidad (normalmente la inclinación del tejado ya contempla este hecho).

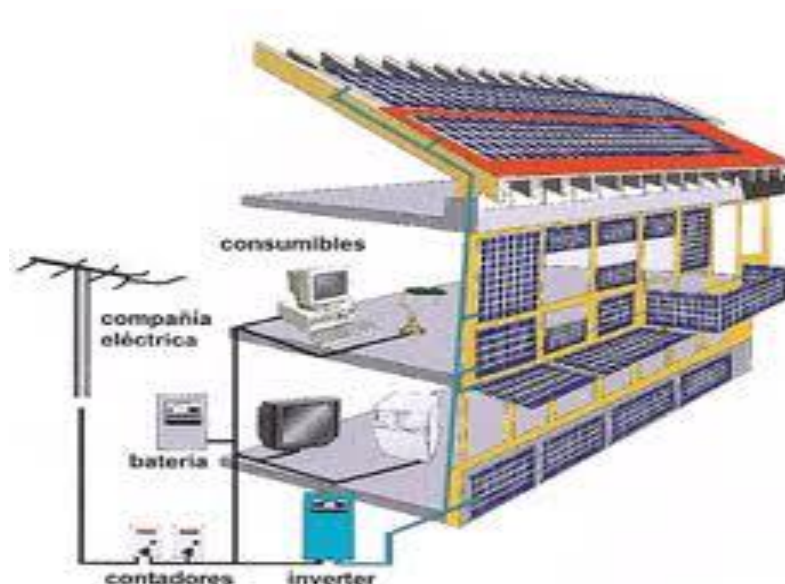


Figura 27.- Modelo de edificación con generadores integrados

- Se ha de procurar evitar en la medida de lo posible los sombreados sobre partes del generador fotovoltaico.
- Por medio del programa de simulación de radiación sobre superficies, se determina la inclinación y orientación óptima de los paneles teniendo en cuenta que se procure que cada tira de módulos conectados en serie tengan la misma orientación e inclinación para evitar pérdidas. Se estima que las pérdidas por cada grado de desviación en inclinación y orientación están en el rango de 0.2 y 0.008% del valor óptimo. Es importante señalar que el ángulo de inclinación óptimo es el que da la mayor radiación para el peor mes.

## **2.4 VENTAJAS DEL USO DE LABVIEW EN LA SIMULACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

Labview es un entorno de programación gráfico que se utiliza principalmente para desarrollar sistemas de medidas, pruebas y control utilizando una interfase intuitiva a manera de un diagrama de bloques.

A pesar de su simplicidad es una herramienta muy potente y como un ejemplo de su robustez fue utilizado en el 2008 para controlar el LHC (Large Hadron Collider), el acelerador de partículas más grande construido hasta la fecha.

Los programas creados en Labview se llaman Instrumentos Virtuales o VI's por sus siglas en ingles. Cada VI por muy pequeño o grande que sea se puede guardar y luego ser utilizado en otro VI como una subrutina y es aquí donde radica la verdadera potencia de Labview, pues estamos hablando de un lenguaje de programación con dos grandes ventajas: es modular puesto que se pueden programar VI's por separado, y es completamente escalable dado que estos VI's anteriores pueden construir un VI mucho más grande y complejo.

Sumado a lo anterior el lenguaje cuenta con potentes funciones para programar en campos diversos como matemáticas, estadística, análisis numérico, control industrial, electrónica, etc.

En el tema que nos ocupa y estando involucradas tantas variables en el estudio de la radiación solar es muy útil poder programar modularmente y pasar luego a etapa de

integración, pruebas y análisis de errores.

## 2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA

Básicamente el programa “**Irradiancia.vi**” funciona basado en un núcleo principal que lo constituye el instrumento virtual “**Global día n.vi**”, el cual calcula la irradiación recibida por una superficie inclinada en un día  $n$ , pudiendo estar  $n$  entre los valores de 1 a 366 para años bisiestos. Por supuesto, este VI aparte de recibir el dato del día  $n$  también toma en cuenta otras variables descritas en este documento como latitud, altura, orientación del plano receptor, puntos de sombra, tipo de clima, etc.

El software desarrollado en esta tesina está dirigido a la optimización de la irradiación recibida por superficies inclinadas y la mayor parte de este afinamiento se reduce a tratar de captar la mayor cantidad de energía posible durante el año.

Con “Global día n.vi” calculamos la irradiación global recibida por una superficie inclinada de  $1 \text{ m}^2$  durante un día, siendo este día  $n$  el día juliano.

Luego utilizando un lazo For podemos calcular esta irradiación global diaria para cada día del año, agregarla como elemento de un arreglo, sumar los elementos del arreglo y obtener la irradiación global anual en dicho plano inclinado.



### 2.5.1.1 ENTRADAS DE “GLOBAL DÍA N.VI”

Las entradas para este VI representadas por los controles son las siguientes:

- **Altitud:** Este control fija la altitud del lugar donde se encuentra la superficie inclinada. Debe ser ingresado en kilómetros. Varía desde 0 hasta 2.5 debido a que este es el rango en el cual es válido el modelo de Hottel.
- **Latitud.-** Fija la latitud del lugar. Se ingresa al sistema en grados sexagesimales y luego se convierte a radianes para su alimentación al sistema. Varía de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ .
- **Tipo de clima.-** El modelo de Hottel se basa en la división del clima del lugar de estudio en cuatro tipos. Este control es adimensional, varía entre 1 y 4 e indica al sistema que tipo de clima debe escoger y por ende que coeficientes de corrección utilizar.
- **Cálculo anual.-** Es un interruptor que indica al sistema si se va a proceder a calcular irradiaciones anuales o diarias. Ingresar valores “falso” o “verdadero”.
- **n cálculo anual.-** Esta entrada se deja habilitada pues será utilizada en cálculos de irradiación anual. Por aquí se ingresará el número del día juliano para que el sistema realice los cálculos respectivos cuando implementemos lazos para sumar las irradiaciones de los días del año.



- **Time Stamp.-** Este control ingresa la fecha de cálculo para el programa. Ingresar al programa un dato tipo “string” que luego se convierte por medio de un subVI.
- **Albedo.-** Indica el coeficiente de reflexión del suelo. Varía entre 0 y 1 y es adimensional.
- **Puntos de sombra.-** Es un arreglo de 2 dimensiones: cuatro filas por dos columnas. Representa los valores del ángulo acimutal y altura solar respectivamente para cada punto que dibuja el perfil del obstáculo de estudio, ingresando en la primera columna el acimut del punto y en la segunda columna su altura. Como se explicó anteriormente, en este programa realizaremos cálculos sencillos dibujando un obstáculo con cuatro puntos significativos, lo cual es suficiente para la representación de edificios, torres, vallas publicitarias o cualquier tipo de polígono regular como los que encontramos en las ciudades. Los valores deben ser ingresados en radianes y los puntos se deben ingresar desde el que tiene un menor acimut hacia el que cuenta con mayor acimut.
- **Orientación del plano receptor.-** Fija la dirección en que se encuentra el plano de estudio. En este documento tomamos al Sur como referencia asignándole un valor de  $0^\circ$ . Los ángulos medidos del Sur hacia el Oeste serán considerados positivos y con estas condiciones veríamos que el punto cardinal Oeste tendría una orientación de  $\pi/2$ , el Norte  $\pi$  y al Este le correspondería  $3\pi/2$ . Se ingresa en grados y luego se convierte a radianes.

- **Tipo de cálculo.-** Este control indica al programa que condiciones desea establecer para la superficie de estudio. Tiene dos valores: “0” computa el valor de la irradiación para una superficie inclinada fija; “1” prepara al sistema para calcular los valores de un plano captador provisto de seguimiento acimutal.
- **Inclinación de superficie receptora.-** Indica la inclinación del plano respecto de la horizontal del lugar. Se ingresa en grados, el sistema la convierte a radianes y varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

#### **2.5.1.2 INSTRUMENTO VIRTUAL “DIAS n Y N.VI”**

Cuando ingresamos una fecha en Time Stamp esta pasa a las funciones Format Date/Time String como se observa en la figura 29.

\* Como observamos en el ramal superior el código que se ingresa en la función es %#Y. Esto da como resultado en la salida el año que se encuentra en Time Stamp.

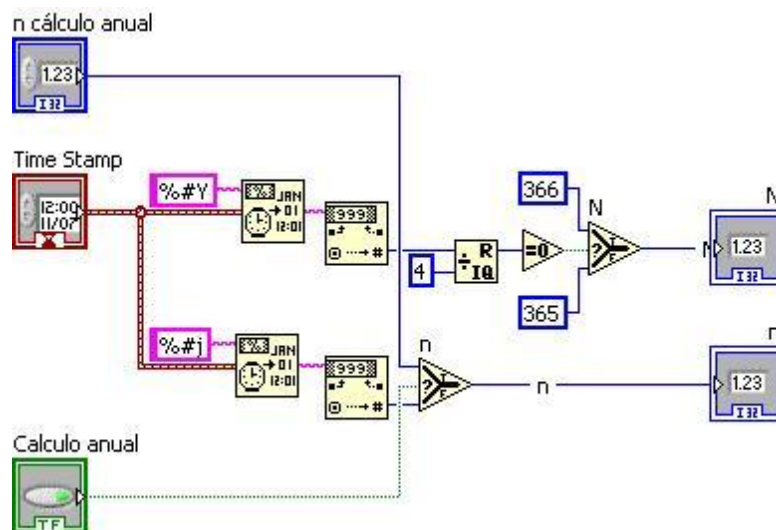


Figura 29.- Instrumento virtual "Días n y N"

El signo # elimina los ceros a la izquierda. Luego la función Decimal String to Number convierte este dato de tipo cadena en tipo numérico. Se divide para cuatro y si el residuo es igual a cero (lo cual indica año bisiesto) el selector entrega el valor  $N=366$ , caso contrario  $N=365$ .

\* En el ramal inferior encontramos un código %#j en la función que da formato a Time Stamp. Esto solicita que en la salida sea colocado el número del día juliano en que se realizara el cálculo, el cual obviamente corresponderá a la fecha ingresada en Time Stamp. Como observamos al final de este ramal existe un selector gobernado por el interruptor de Cálculo Anual. Se implementó para poder ingresar uno a uno los días del año cuando se realicen sumatorias de irradiación anuales. Sí Cálculo anual está apagado entonces la salida n corresponde a un dato tipo numérico con el valor del día juliano correspondiente a Time Stamp.

### 2.5.1.3 INSTRUMENTO VIRTUAL “COEFICIENTES DE HOTTEL”

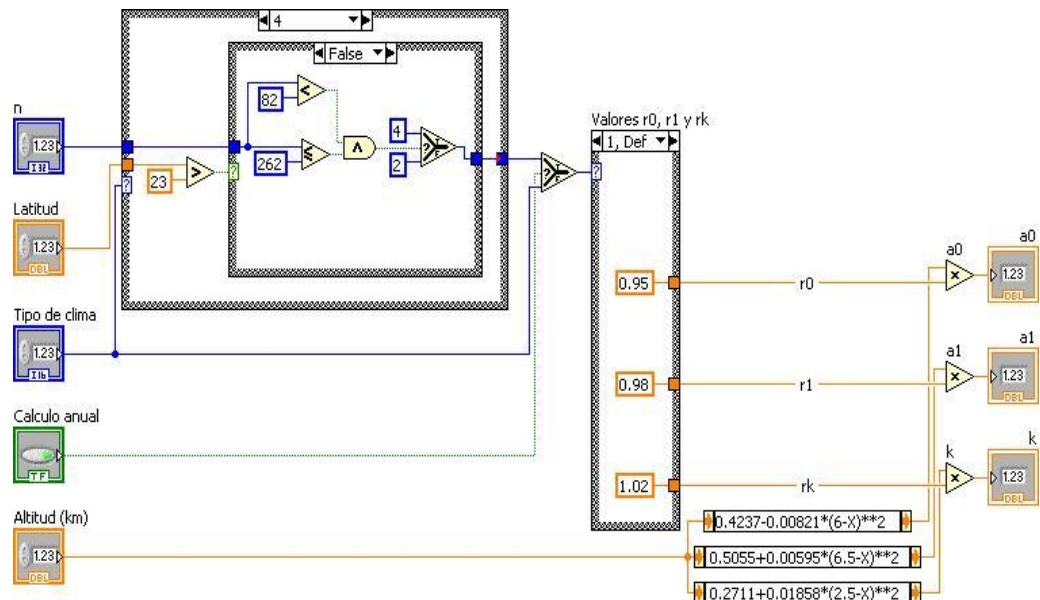


Figura 30.- Instrumento virtual "Coeficientes de Hottel"

La entrada “tipo de clima” a través del selector proporciona los coeficientes respectivos para el cálculo de las transmitancias. Si observamos la estructura de casos antes del selector, esta nos ayuda a seleccionar los coeficientes para cálculo anual cuando analicemos latitudes medias puesto que el modelo de Hottel a estas regiones asigna coeficientes diferentes para verano e invierno. De esta manera centramos el verano para el Hemisferio Norte en el día juliano  $n=172$ , o sea el 21 de junio (solsticio de verano). Los coeficientes de verano serán utilizados por el programa durante 90 días antes y 90 días después del día juliano 172, mientras que los días que no cumplan esta condición brindaran al sistema valores correspondientes al invierno del Hemisferio

Norte. El Hemisferio Sur maneja la misma óptica pero centrando el invierno en el solsticio de verano del Hemisferio Norte. Por medio de esta estructura de casos evitamos cálculos erróneos, puesto que si creamos un lazo For para medir irradiaciones anuales se utilizarían coeficientes fijos durante todo el año sin tomar en cuenta el cambio de estaciones presente en latitudes medias. El resto del VI tal como podemos observar se limita a calcular los valores para luego ser ingresados en el modelo.

Los valores  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  serán tomados posteriormente por otro VI para calcular la transmitancia.

#### **2.5.1.4 INSTRUMENTO VIRTUAL “CÁLCULOS SOLARES”**

En la figura 31 podemos observar el diagrama de bloques del instrumento virtual “Cálculos Solares”. Tiene una configuración muy sencilla basada en las fórmulas explicadas en este documento y entrega valores que serán utilizados por el sistema en cálculos posteriores: Angulo horario de salida del sol, irradiación global diaria extraterrestre en superficie horizontal, declinación solar e irradiancia extraterrestre. Todos estos valores se calculan basados en los días  $n$ ,  $N$  y en la latitud del lugar.

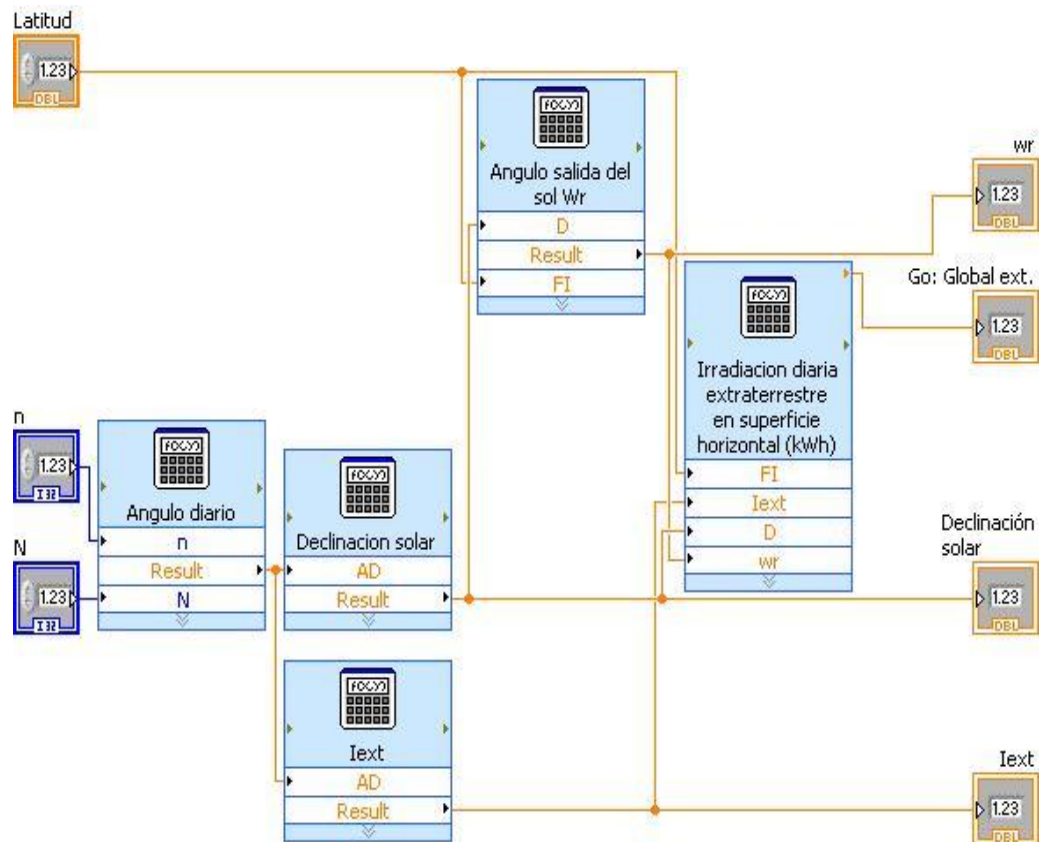


Figura 31.- Instrumento virtual "Cálculos solares"

### 2.5.1.5 INSTRUMENTO VIRTUAL “DIRECTA Y DIFUSA HORIZONTAL”

Podríamos decir que ésta es una de las partes más importantes del programa dado que este VI calcula la irradiación global en superficie horizontal a través de las transmitancias. Puesto que la radiación en superficie horizontal es el punto de partida para calcular la energía recibida por otro tipo de superficies, este VI nos brinda la base sobre la cual se fundamenta el programa.

Si observamos la figura 32 el lazo For se ejecuta un número de veces

establecido por el usuario.

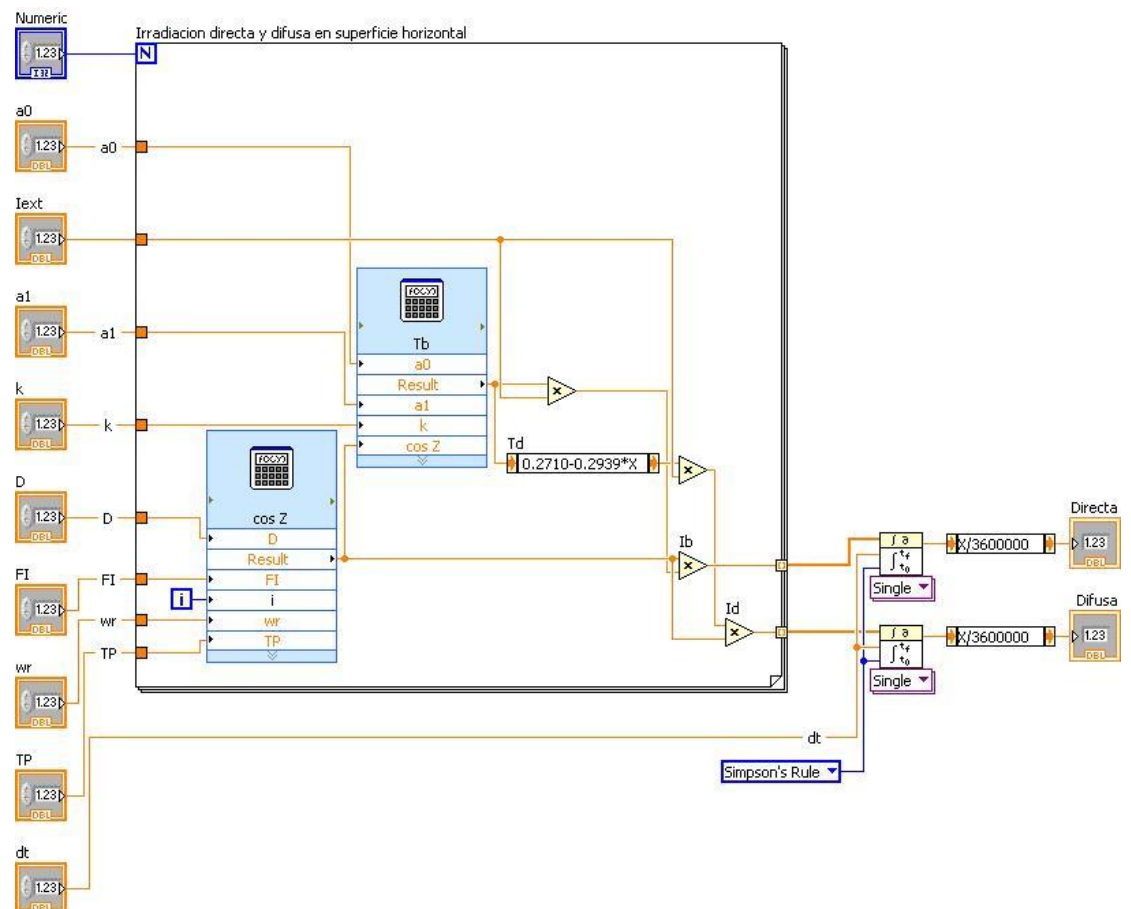


Figura 32.- Instrumento virtual "Directa y difusa horizontal"

Hemos escogido el valor de 145 porque la entrada TP (tamaño de paso) divide al día en periodos iguales de aproximadamente 5 minutos dependiendo del ángulo horario de salida y puesta del sol.

Si asumimos que la radiación solar no varía en este intervalo de tiempo promedio (5 minutos) se podrían sumar los valores de energía recibida por la superficie en periodos de 5 minutos para llegar a una irradiación global diaria (8). Este enfoque es seguido por muchos autores, sin embargo, al disponer de

una herramienta tan poderosa como Labview hemos creído conveniente calcular la irradiancia en cada uno de esos 145 instantes en los que hemos dividido el día y luego integrar numéricamente los valores de éstas irradiancias para llegar al valor de la irradiación global diaria en superficie horizontal.

Como observamos, el lazo For calcula el valor de la irradiancia directa según el modelo de Hottel y la irradiancia difusa se obtiene por el modelo de Liu-Jordan.

Estos arreglos de irradiancias pasan a las funciones 1D Numeric Integration. El valor del diferencial de tiempo (en segundos) lo fija el programa transformando el tamaño de paso –medido en ángulo horario- por medio de la relación  $\pi = 43200$  segundos. El método de integración escogido es la regla de Simpson. Finalmente se divide el valor de las integrales para 3600000 puesto que el resultado de las integrales nos proporcionará valores con unidades en julios y en esta tesis, dada nuestra orientación a la generación eléctrica usaremos valores en kilovatios hora.

#### **2.5.1.6 INSTRUMENTO VIRTUAL “ÁNGULOS WRT Y WST”**

Por la teoría sabemos que para obtener la radiación en superficies inclinadas primero debemos conocer la radiación en superficie horizontal. En el VI



anterior dimos este paso y ahora, siguiendo los lineamientos de este documento, vamos a establecer la irradiación en superficies inclinadas.

Este VI calcula los valores de  $\omega_{sT}$  (ángulo de salida del sol en la superficie inclinada) y  $\omega_{sT}$  (ángulo de puesta del sol en la superficie inclinada) según las fórmulas descritas en este documento para luego usadas en el cálculo de  $R_b$ .

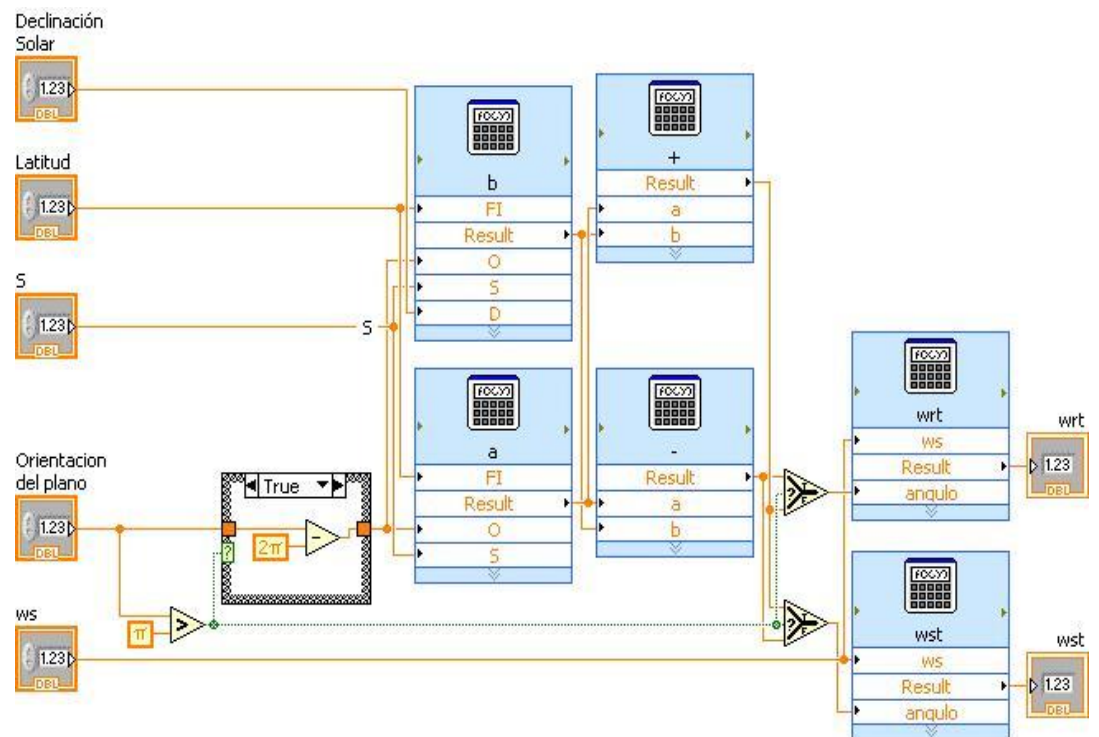


Figura 33.- Instrumento virtual "Ángulos wrt y wst"

### **2.5.1.7 INSTRUMENTO VIRTUAL “CÁLCULO DE RB”**

Nos encontramos ante otro VI muy importante para el funcionamiento del programa, dado que el problema de encontrar la radiación incidente en una superficie inclinada se reduce básicamente en hallar el valor de  $R_b$ .

Para lograr el propósito de brindarle flexibilidad al programa hemos creado una estructura de casos para el cálculo de  $R_b$  bajo las diferentes condiciones a las que se podría ver abocado el programa.

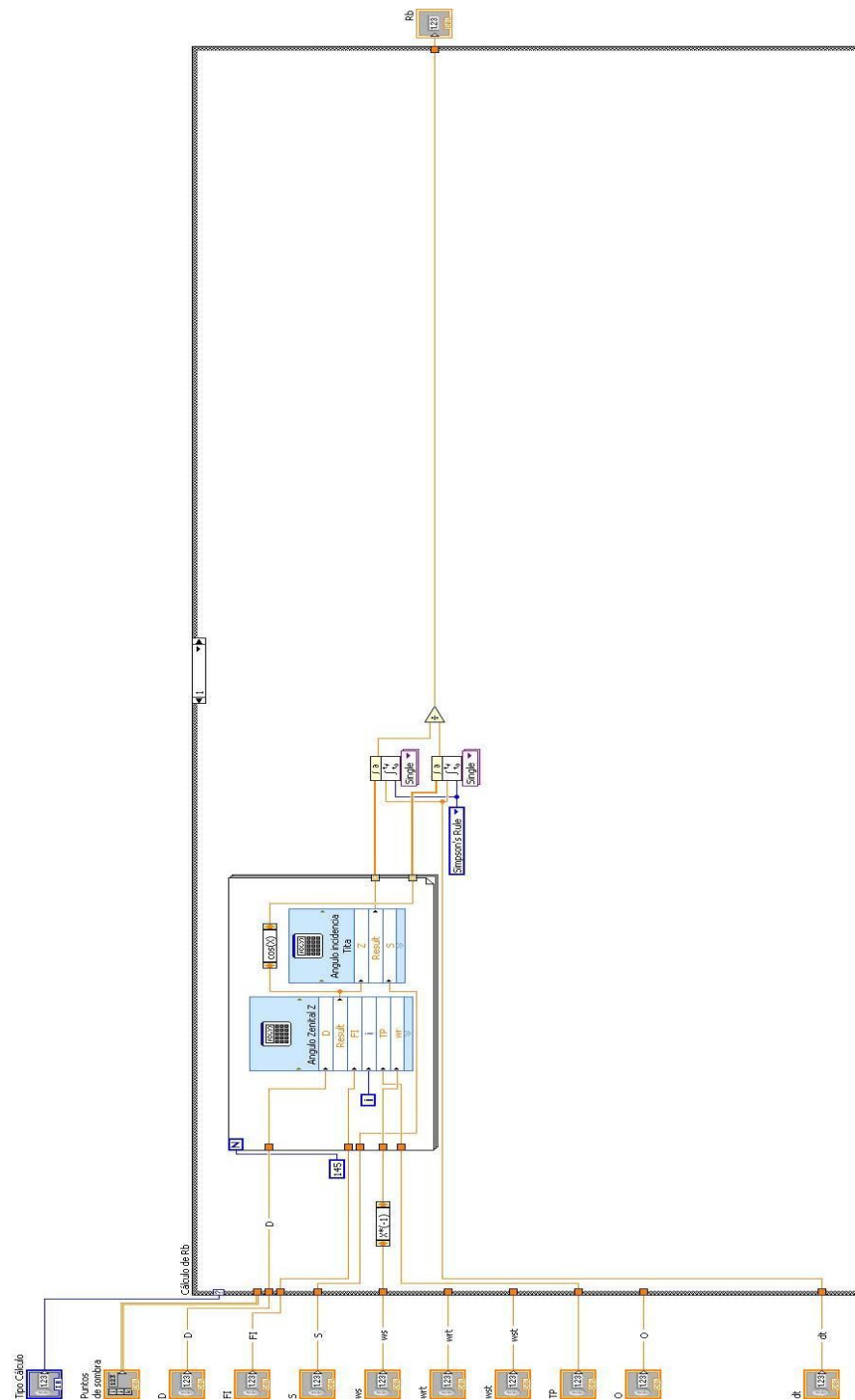


Figura 34.- Instrumento virtual "Cálculo de Rb"

De esta manera, si se desea añadir una funcionalidad como por ejemplo, el

estudio de otro tipo de seguimiento, simplemente deberíamos añadir un caso que se ajuste a la teoría de esa situación.

Para el caso “0” (Superficie inclinada fija), únicamente se calcula el valor de  $R_b$  reemplazando los valores según se ha explicado en la teoría.

Cuando el selector de casos fija el “1” se procede a calcular  $R_b$  por métodos numéricos, pero tomando en cuenta las condiciones de un seguidor acimutal.

De esta manera,  $R_b$  en el caso de un seguidor acimutal será:

$$R_b = \frac{\int_{\omega_r}^{\omega_s} (\cos \theta_z(\omega) \cdot \cos S + \sin \theta_z(\omega) \cdot \sin S) \cdot d\omega}{\int_{\omega_r}^{\omega_s} \cos \theta_z(\omega) \cdot d\omega} \quad [35]$$

Esta es la manera más sencilla de calcular  $R_b$  puesto que integrar el dividendo de esta ecuación es muy complicado. Por eso es preferible (aprovechando la potencia de Labview) obtener el resultado numéricamente como se observa en el diagrama de bloques al dividir el resultado de las integraciones diarias tanto del ángulo de incidencia en la superficie inclinada como del ángulo solar cenital.

Para cálculos de energía recibida en presencia de obstáculos que puedan ocasionar sombras simplemente es necesario ingresar los puntos del obstáculo en el arreglo Puntos de Sombra. Por defecto, éste arreglo tiene los valores de

altura solar en 0, para evitar errores en los cálculos. Siempre deberemos ingresar los puntos desde el que tenga menor acimut hacia el punto de mayor acimut y, además, éstos ángulos acimutales no pueden ser iguales puesto que se ocasionarían divisiones por 0, según las fórmulas planteadas. En el diagrama de bloques dentro del lazo For adicionalmente a los cálculos usuales de  $\theta_z, \cos \theta_z, \omega, \Psi$  entre otros, encontramos un evento secuencial. Esto lo hemos hecho para evitar caer en equivocaciones cuando tratemos de integrar numéricamente el ángulo de incidencia en la superficie inclinada. Si miramos dentro de la secuencia el primer paso es correr el subVI “Sombras”. Este VI computa los puntos de sombra ingresados, la altura y acimut solar e indica si en ese instante dado (el cual depende de  $\omega$ ) la superficie inclinada recibe o no los rayos solares directos. En el siguiente cuadro de la secuencia encontramos un caso verdadero/falso: si el VI “Sombras” nos indica que el obstáculo impide el paso del sol, entonces automáticamente el valor entregado al arreglo de integración es 0. De lo contrario se calcula el valor del  $\cos \theta$  para su posterior integración numérica.

De esta manera se obtiene con mucha exactitud el valor de  $R_b$  y logramos un efecto colateral de muchísima ayuda para evitar cálculos posteriores: afectar la componente difusa anisotrópica de la radiación sobre la superficie inclinada. Esto es extremadamente útil dado que ya no es necesario calcular este valor para restarlo de nuestra componente difusa.

### 2.5.1.8 INSTRUMENTO VIRTUAL “COEFICIENTES $R_d$ Y $R_r$ ”

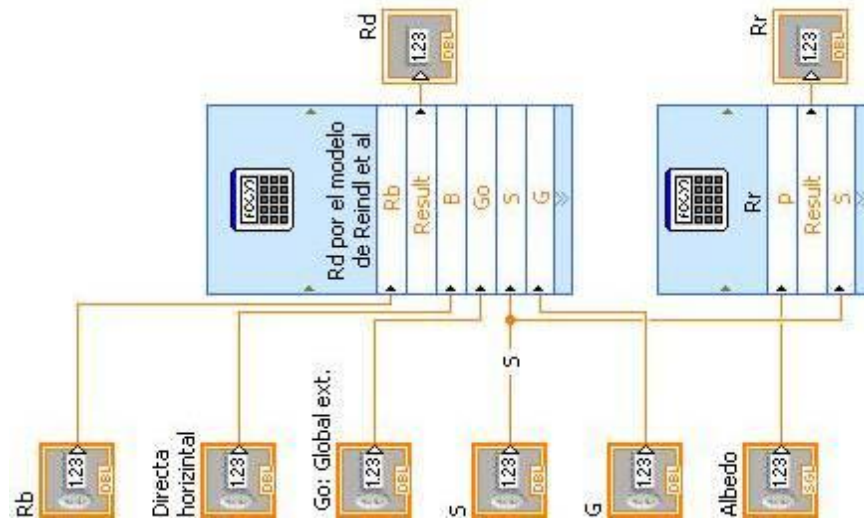


Figura 35.- Instrumento virtual "Coeficientes  $R_d$  y  $R_r$ "

Como observamos en la figura 35 este VI simplemente obtiene los valores de  $R_d$  y  $R_r$  de acuerdo a las fórmulas teóricas explicadas anteriormente.

Para el caso de  $R_d$  según el modelo de Reindl et al., cuando realicemos cálculos de pérdidas por sombras no es necesario restar la componente difusa anisotrópica puesto que al haber integrado numéricamente considerando valores nulos de rayos directos si el obstáculo producía sombra sobre la superficie inclinada, estamos anulando automáticamente esta componente anisotrópica.

## **CAPÍTULO 3**

# **PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

### **3.1 INTEGRACIÓN DEL INSTRUMENTO VIRTUAL “GLOBAL DIA N” PARA EL CÁLCULO DE IRRADIACIONES GLOBALES EN LAZOS ANUALES**

Una vez descrito el funcionamiento de “Global día n” está claro que integrarlo dentro de un lazo For para obtener la energía recibida durante un año por la superficie inclinada es la mejor opción. La terminal “i” del lazo For nos servirá para las

iteraciones de  $n$  y haciendo unos cuantos ajustes llegaremos a realizar cálculos anuales muy útiles para el aprovechamiento de la energía solar, como estudios de latitudes, optimización de inclinaciones, sombras en fachadas, etc.

A continuación mostraremos algunas maneras de sacar provecho de este programa.

### 3.1.2 IRRADIACIÓN GLOBAL ANUAL RECIBIDA POR UNA SUPERFICIE INCLINADA EN UN LUGAR DETERMINADO

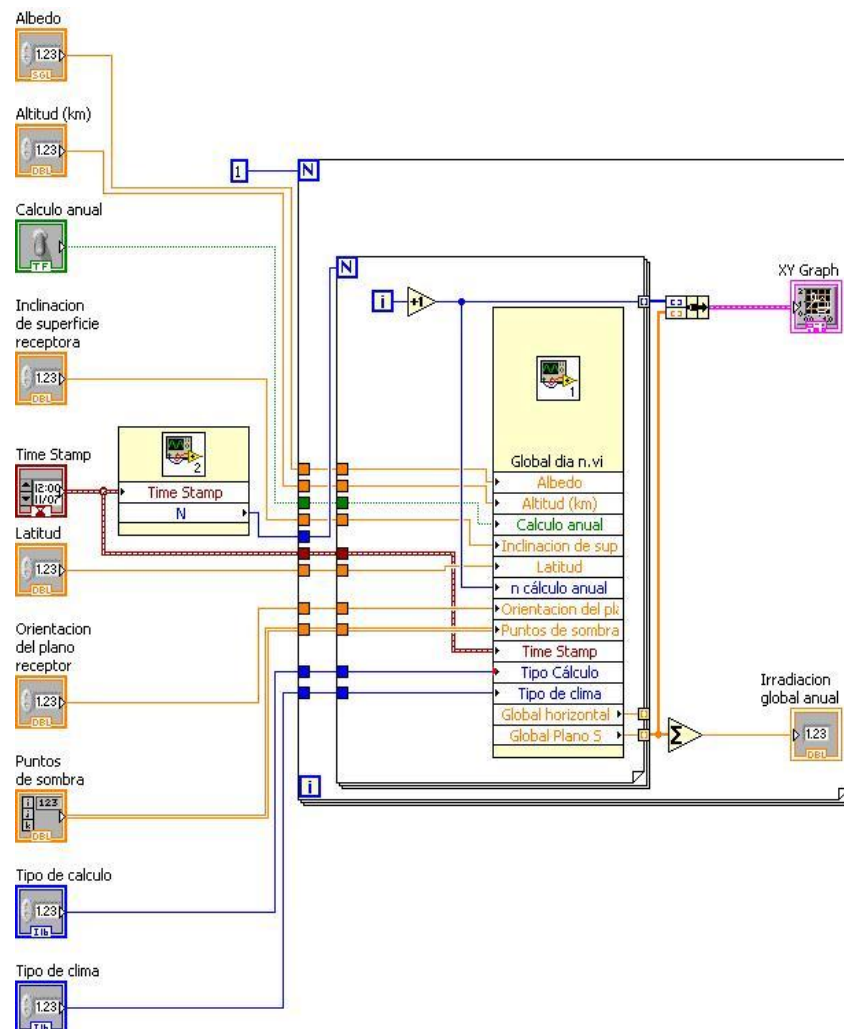


Figura 36.- Cálculo de irradiación global anual en una superficie inclinada



Para calcular la radiación anual recibida por una superficie inclinada configuramos el diagrama de bloques como se indica en la figura 36.

El lazo For externo servirá posteriormente para variar algún parámetro como latitud o inclinación, pero por el momento se dejará  $N=1$  para concentrarnos en el lazo For interno, el cual realiza la sumatoria de las irradiaciones diarias y además presenta un gráfico de estas irradiaciones.

Según Google Earth, las coordenadas de la plazoleta de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación de la ESPOL son: Latitud =  $-2.145339$ , Longitud =  $-79.966314$ , elevación = 83 metros sobre el nivel del mar.

Si nuestro hipotético plano horizontal estuviera en este lugar, la energía proveniente del sol que recibiría durante un año sería de 2411.33 Kwh. y la cantidad de energía recibida día a día estuviera distribuida como vemos en la figura 37.

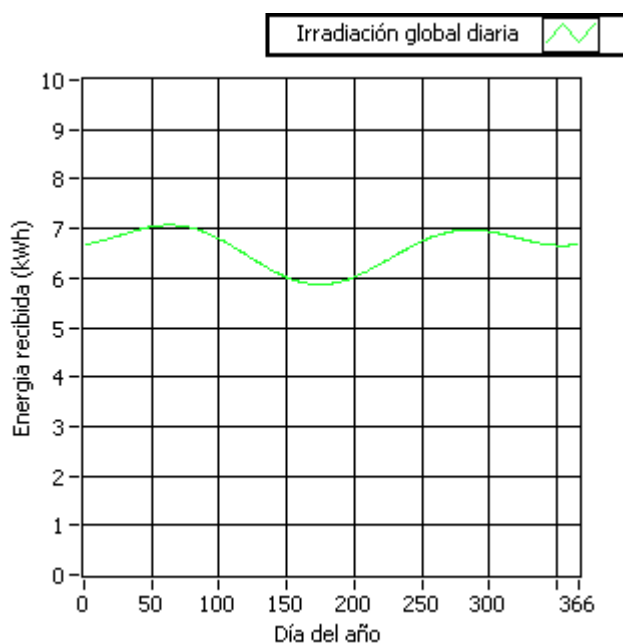


Figura 37.- Irradiación recibida por una superficie horizontal

### **3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO**

Dado que para obtener el máximo rendimiento de un panel fotovoltaico es necesario que éste reciba la mayor cantidad posible de energía, variaremos la inclinación de la superficie receptora en la localidad anterior y graficaremos la energía total recibida en un año para cada inclinación. Al encontrarse este panel en el hemisferio Sur deberemos orientarlo hacia el Norte, es decir, la orientación del panel será de  $180^\circ$ .

Por sentido común una superficie fija que capte energía solar debería inclinarse un ángulo igual a la latitud del lugar, puesto que de esta manera el ángulo de incidencia de los rayos solares sería el menor. En latitudes medias se acostumbra inclinar los paneles  $10^\circ$  más que la latitud del lugar, debido a que tratan de captar la mayor energía posible durante el invierno para ahorrar energía en calefacción. Sin embargo, esta no es la inclinación óptima para la cual se captara la mayor radiación durante el año, sino una aplicación especial motivada por razones climáticas.

En la figura 38 observamos la configuración recomendada del diagrama de bloques para realizar un estudio de la energía recibida de acuerdo a la inclinación de la superficie.

Como podemos ver, comienza a tomar sentido la existencia del lazo For externo, pues por medio de éste variaremos la inclinación del panel solar entre  $0$  y  $90^\circ$ .

Para esto desconectamos el control indicador de la inclinación S y conectamos el terminal de iteración i del lazo a la entrada vacante de “Global día n”. Esto permitirá al programa calcular la radiación diaria para una inclinación dada, sumarla durante el año, ponerla en un arreglo para graficarla y luego pasar a la siguiente iteración.

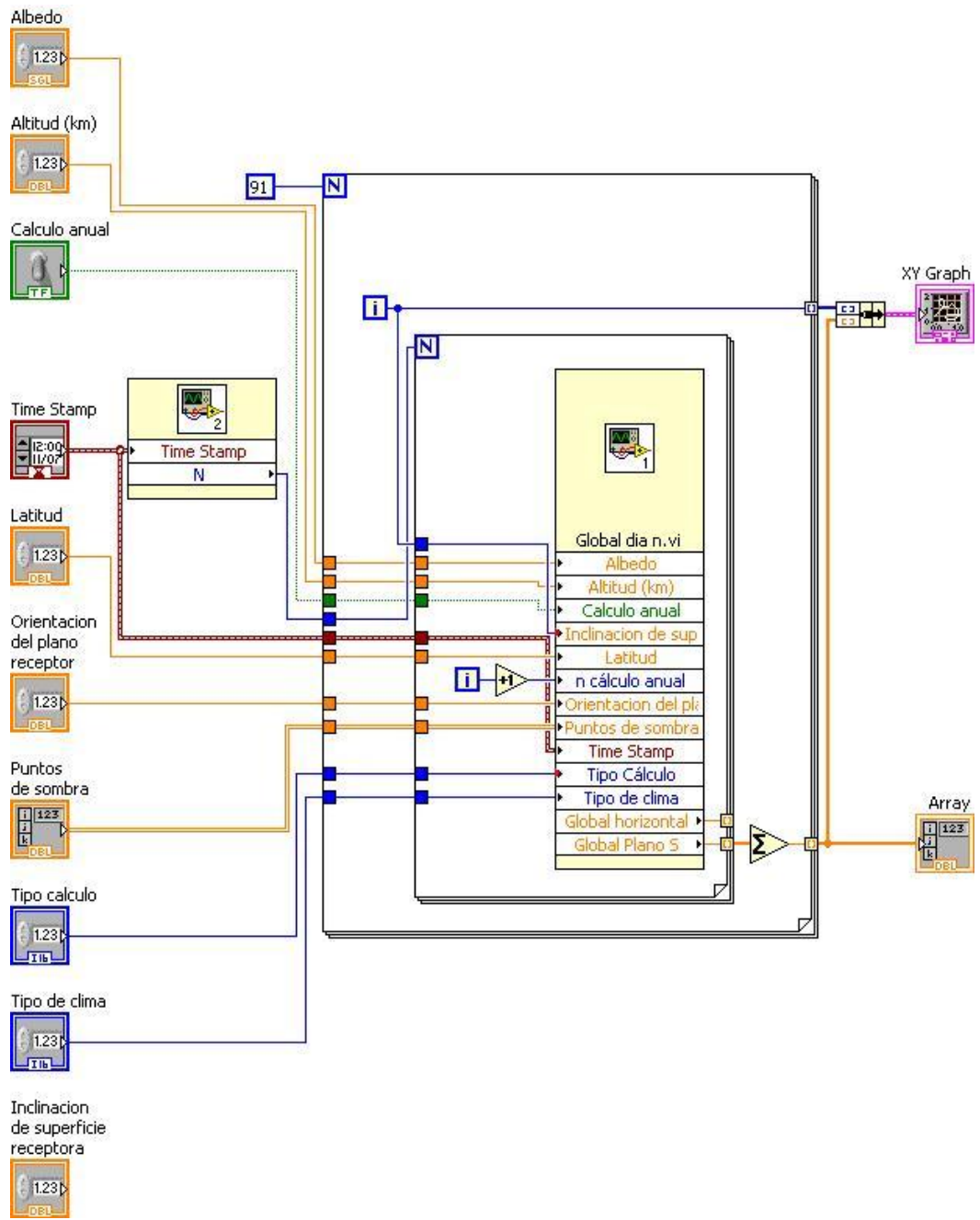
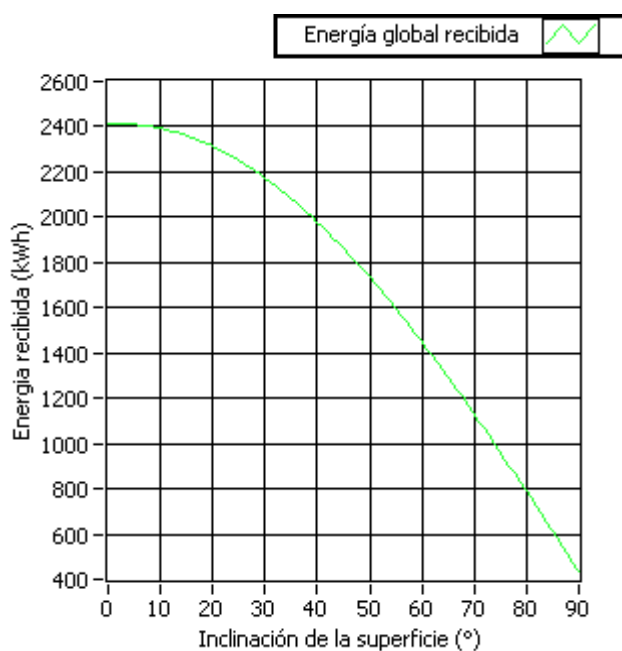


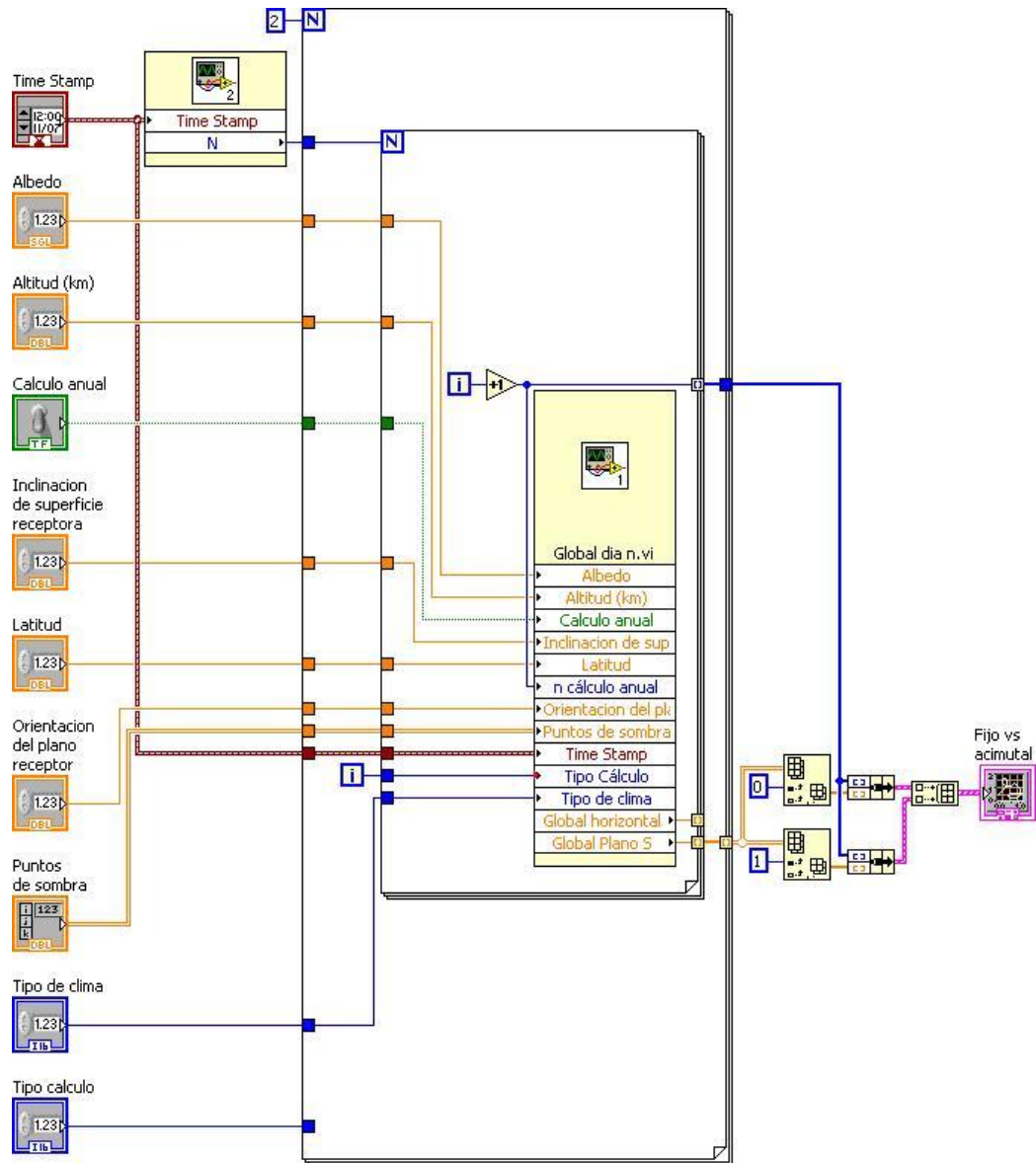
Figura 38.- Estudio de inclinación óptima para un panel fotovoltaico



**Figura 39.- Energía anual recibida de acuerdo al grado de inclinación**

Como observamos en la figura 39 es obvio que las inclinaciones a las cuales recibimos la mayor cantidad de energía durante un año en la plazoleta de la FIEC son cercanas a  $0^\circ$ . Usando el indicador de Labview, navegamos en el arreglo resultante y encontramos que la mayor captación se da inclinando el panel  $2^\circ$  sobre la horizontal, siendo este valor de 2412.6 Kwh. Esto coincide completamente con la teoría como hemos explicado. Notemos también que es un valor muy parecido al recibido en superficie horizontal puesto que nos encontramos cerca del ecuador, pero a medida que aumenta la latitud este valor varía mucho más.

### 3.1.3 ANÁLISIS DE LA GANANCIA UTILIZANDO SEGUIMIENTO ACIMUTAL



365

Figura 40.- Diagrama de bloques para comparar superficies fijas vs. Seguidores acimutales

En la figura 41 vemos la comparación entre una superficie fija y otra que posee seguimiento azimutal. Se nota claramente una ganancia en el rendimiento aunque

por encontrarnos muy cerca del ecuador la diferencia no es muy pronunciada. Para lograr este gráfico modificamos el diagrama de bloques como se observa en la figura 40.

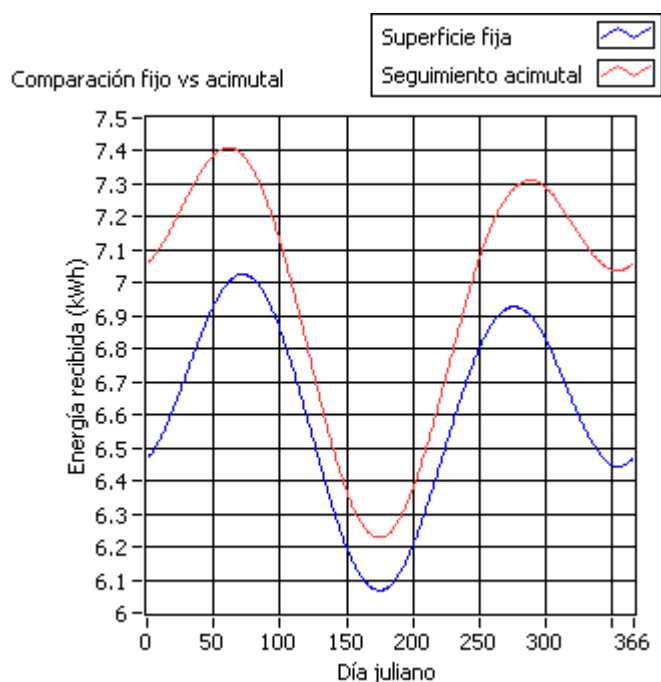


Figura 41.- Comparación de rendimiento superficie fija vs. Seguimiento acimutal

Como nuestro objetivo es comparar una superficie con seguimiento contra una que carezca de él desconectamos el control “tipo de cálculo”. En su lugar hacemos que el lazo externo realice 2 iteraciones y que comande la entrada “tipo de cálculo”. Así durante la primera iteración se calculará radiación sobre una superficie fija mientras en el siguiente ciclo el cálculo tomará en cuenta un seguidor acimutal.

Esta operación nos brinda a la salida un arreglo de  $2 \times 365$  elementos, el cual es dividido en arreglos individuales por medio de las funciones “Index Array” y luego empacadas para poder realizar un gráfico de múltiples entradas.

Para entender las ventajas del seguimiento acimutal calculemos la radiación total recibida por las superficies. El programa nos indica que la superficie fija recibió 2412.29 Kwh. durante el año, mientras la que está dotada de seguidor acimutal captó 2540.26 Kwh. A simple vista no parece rentable un seguidor acimutal, pues la ganancia es de sólo el 5.3%. Debemos recordar que por encontrarnos muy cerca del ecuador captamos una inmensa cantidad de radiación solar con superficies prácticamente horizontales, pero a medida que las latitudes crecen el sol no llega tan vertical como lo hace en nuestro país.

Para demostrarlo realicemos el análisis para una latitud de  $20^\circ$  S. Ingresando los datos al sistema, el gráfico resultante es el siguiente:



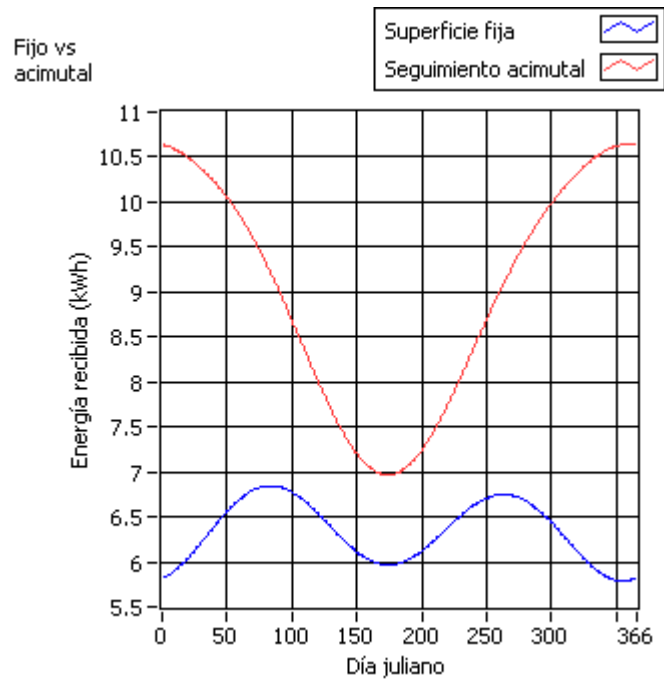


Figura 42.- Comparación fija vs. Acimutal en latitud 20° S

Ahora si es notable la mejora en el rendimiento al incorporar el seguimiento acimutal en nuestro sistema. Durante el año la superficie fija recibió 2315.09 Kwh. mientras el seguidor acimutal elevó la energía total recibida a 3282.46 Kwh., un aumento del 41.8%. En latitudes medias muchas veces los ingenieros optan por sistemas de seguimiento puesto que el aumento en rendimiento justifica el costo de la modificación.

### 3.1.4 CÁLCULO DE IRRADIACIÓN RECIBIDA POR FACHADAS

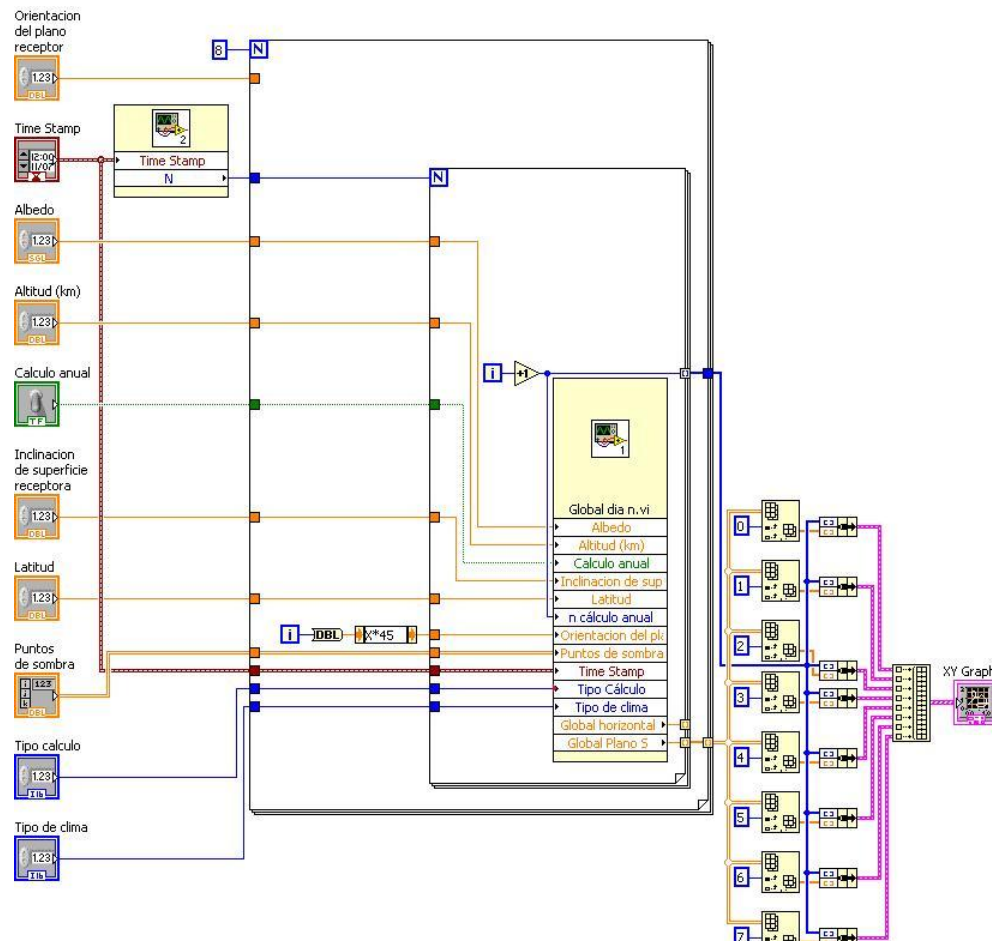


Figura 43.- Diagrama de bloques para estudio de radiación en fachadas

La figura 43 nos muestra el diagrama de bloques necesario para estudiar la radiación recibida por las fachadas de un edificio, de así ser necesario. El lazo For externo gobernará la orientación de las fachadas, cuyas inclinaciones serán fijadas a  $90^\circ$ , aunque éste parámetro puede ser cambiado por el usuario.

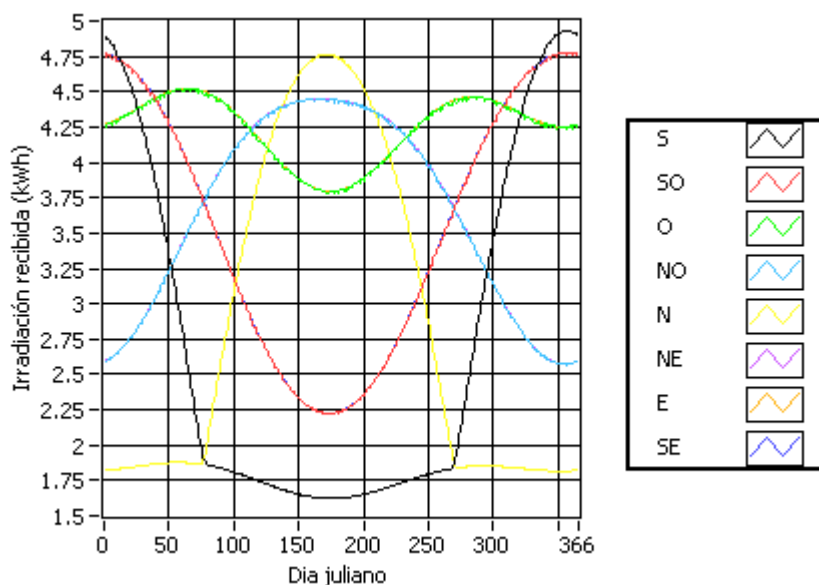


Figura 44.- Comparación de energía recibida por fachadas

En la figura 44 observamos el gráfico resultante. Esto sería de mucha utilidad para el diseño de edificios inteligentes y ecológicos, donde es deseable conocer la cantidad de energía recibida por una fachada para decidir la instalación de tipos de vidrio, paneles solares, etc.

FACHADA	ENERGÍA ANUAL RECIBIDA (Kwh.)
SUR	990.986
SUROESTE	1291.16
OESTE	1545.43
NOROESTE	1331.81
NORTE	1048.43
NORESTE	1333.03
ESTE	1547.21
SURESTE	1292.45

Tabla IV.- Energía anual recibida por las fachadas

Modificando un poco el diagrama de bloques encontramos la energía total recibida por cada fachada durante el año, la cual se presenta en la tabla IV.

### 3.1.5 PÉRDIDAS POR SOMBRAS

Ahora asumimos que nuestro panel, ubicado en la plazoleta de la FIEC está optimizado con una inclinación de  $2^\circ$  y mirando hacia el Norte. Supongamos que un obstáculo es colocado al noroeste del punto de estudio y se encuentra representado por los puntos siguientes:

PUNTO	ACIMUT( $^\circ$ )	ALTURA( $^\circ$ )
P0	100	30
P1	120	90
P2	140	90
P3	170	20

Tabla V.- Puntos representativos del contorno del obstáculo

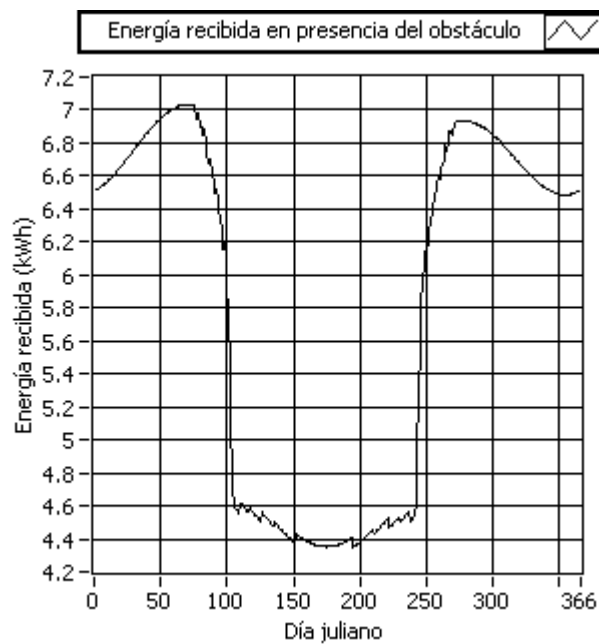


Figura 45.- Energía recibida en presencia de un obstáculo

Ingresamos estos puntos en el arreglo “Puntos de Sombra” y procedemos al cálculo de la energía recibida durante el año. El gráfico resultante se observa en la figura 45.

En ésta imagen se nota claramente la disminución de la energía recibida debido a la sombra creada por el obstáculo. La pérdida es mucho más notoria en los meses de verano, es decir, cuando observamos el sol desde el Norte. Esto coincide con lo esperado, puesto que al encontrarse nuestro obstáculo al noroeste es lógico que la sombra cause una merma de energía más pronunciada.

La irradiación recibida por la superficie en presencia de éste obstáculo es de 2127.04 Kwh. Si lo comparamos con el valor obtenido para un plano sin obstáculos alrededor encontraremos una pérdida del 13.4%.

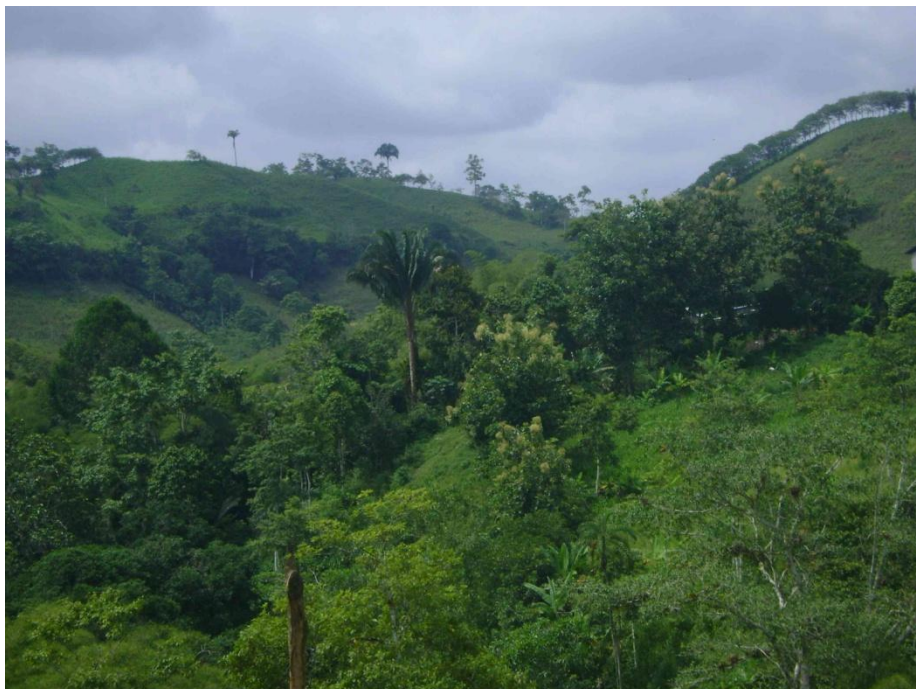
### **3.1.6 CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DE UNA MEJORA PARA UN PANEL SOLAR FIJO EN UN AMBIENTE RURAL**

La energía solar toma cada vez más impulso en Ecuador. Nuestra ubicación privilegiada nos permite contar con rayos solares en abundancia y con una inclinación muy cercana a la vertical.

En nuestro país, a través del FERUM o por iniciativa privada se están instalando paneles solares en lugares alejados de las líneas de distribución eléctrica.

Como una muestra de la utilidad del programa realizado procederemos a diseñar una pequeña mejora para un panel solar instalado en una hacienda ganadera

ubicada en el sitio El Maicito del cantón El Carmen en la provincia de Manabí.



**Figura 46.- Paisaje rural de Manabí, lugar del estudio**

Al llegar al sitio notamos la inclinación horizontal del panel, algo lógico puesto que nuestro GPS marca una latitud de  $0^{\circ}13'35.1''$  y una altura de 193 metros sobre el nivel del mar.

La casa queda en la cima de una montaña y el panel está instalado sobre el techo de la vivienda por lo cual no existen problemas de sombras adyacentes a pesar de los árboles circundantes.

Como se mencionó anteriormente, por encontrarnos muy cerca del ecuador, el Sol es un recurso abundante en superficies prácticamente horizontales, por lo cual, el diseño de mejora que realizaremos brindará una ganancia pequeña comparada a si

la optimización se realizara en un lugar más alejado del ecuador. También recalcamos en líneas anteriores, que en nuestro país el seguidor solar más efectivo sería el seguidor horizontal, pero por razones económicas no se puede adoptar este sistema para la vivienda en estudio.



**Figura 47.- Vivienda dotada de panel solar**

Los criterios preponderantes para buscar una mejora de este panel con nuestro programa serán:

1. Economía: Es conocida la pobreza en que viven los habitantes del sector rural de nuestro país. Entonces una de las variables a tener en cuenta será lograr una mejora económicamente viable.
2. Facilidad de instalación: Al encontrarse el panel en una zona de difícil acceso

es necesario evitar el uso de partes excesivamente grandes, lo cual crearía obstáculos logísticos.

3. Facilidad de manipulación: Los conocimientos técnicos de nuestros campesinos son muy escasos, por lo tanto, este requisito debe ser cumplido para garantizar el funcionamiento fiable del sistema.



**Figura 48.- Ubicación del panel solar**

Procedamos entonces, con estos criterios a la revisión del panel.

Observamos en las fotografías su ubicación horizontal, apoyado en cuatro platinas fijas. Según nuestro GPS el eje menor del panel rectangular se ha orientado hacia el norte y en la placa del equipo leemos las especificaciones detalladas en la tabla VI.



Por la teoría sabemos que al encontrarnos tan cerca del ecuador podemos asumir un concepto muy aproximado a la realidad y es que, cuando la declinación solar es positiva, observamos el Sol desde el Norte; y cuando es negativa los rayos solares vienen desde el hemisferio Sur.



Figura 49.- Vista de la placa del panel solar

Potencia Máxima	75 W
Corriente a potencia máxima	4.35 A
Voltaje a potencia máxima	17.4 V
Corriente de cortocircuito	4.72 A
Voltaje de circuito abierto	21.7 V

Temperatura de operación	$45 \pm 2^\circ \text{C}$
--------------------------	---------------------------

Tabla VI.- Especificaciones del panel solar en estudio

Basados en este enfoque, hemos creído conveniente darle dos orientaciones diferentes al panel durante el año, coincidiendo las fechas de estos cambios con los equinoccios, es decir, cambiar la orientación del panel cuando exista un cambio de signo en la declinación solar.

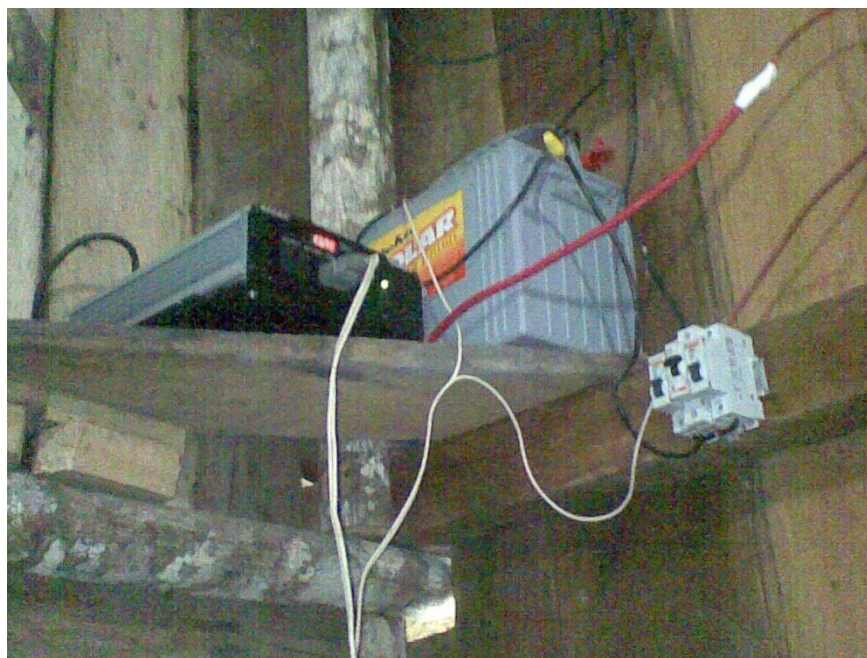


Figura 50.- Regulador, batería e inversor del panel solar

Para lograr una mejor comprensión del concepto, configuremos Labview para estudiar la variación anual de la radiación en esta latitud para una superficie horizontal.

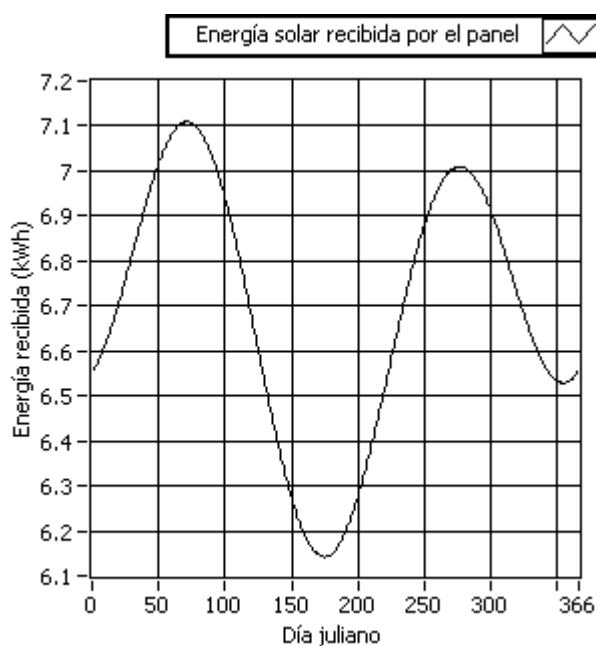
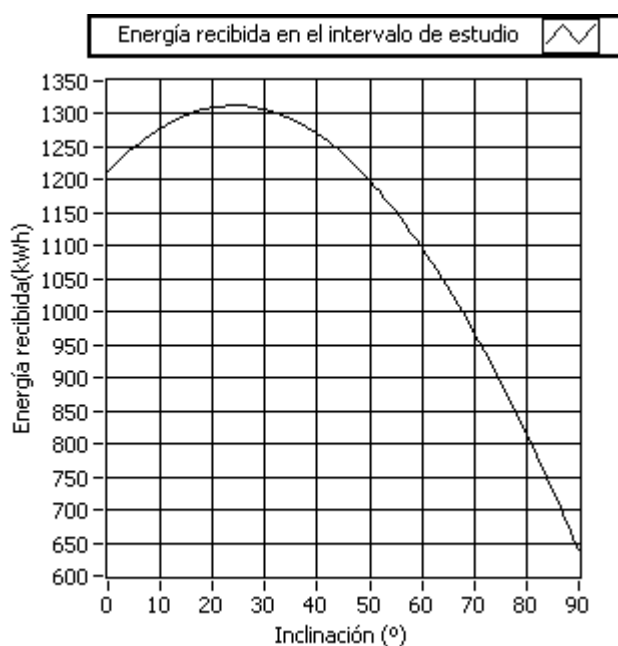


Figura 51.- Variación de la radiación en el sitio Maicito

Vemos claramente como los picos de energía recibida coinciden con los equinoccios, alrededor del 21 de marzo (día juliano 80) y 23 de septiembre (día juliano 266).

Configuremos Labview para estudiar la radiación incidente entre los dos equinoccios; es decir, estudiemos la radiación solar variando la inclinación de 0 a 90 grados con una orientación de  $180^\circ$  para conocer a que inclinación sería adecuado recibir la energía proveniente del hemisferio Norte.



**Figura 52.- Energía recibida por el panel entre los equinoccios de acuerdo al grado de inclinación ( $O=180^\circ$ )**

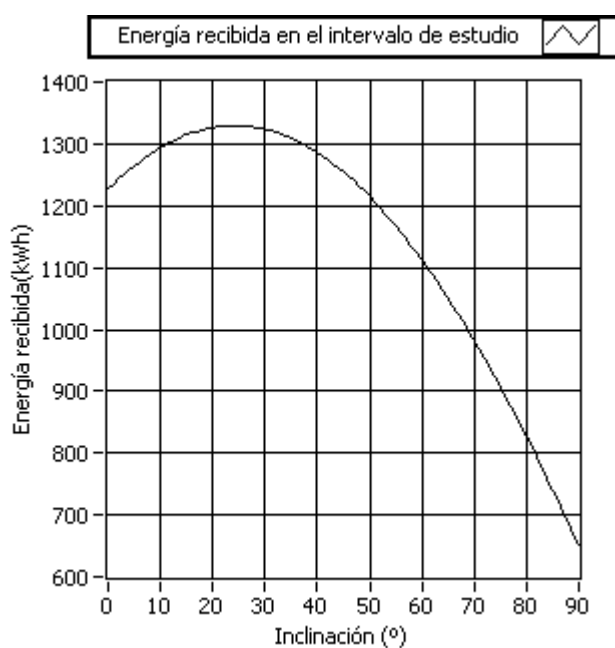
En la figura 52 observamos que la inclinación óptima para el panel orientado al Norte durante el intervalo entre los equinoccios se encuentra entre 20 y 30 grados. Usando el indicador de Labview encontramos en nuestro arreglo de salida que éste valor es de 1312.67 Kwh. para  $23^\circ$  de inclinación.

Enfoquemos ahora nuestra atención a la otra porción del año, cuando la declinación es negativa y observamos el Sol desde el Sur. Siguiendo los lineamientos anteriores y usando una orientación de  $0^\circ$  obtenemos la figura 53.

Notamos en esta ilustración la similitud con el gráfico anterior, pero observando que la orientación del panel es de  $0^\circ$ , es decir, se encuentra orientado hacia el Sur. Utilizando las herramientas que nos ofrece Labview encontramos que la superficie recibe 1329.41 Kwh. a  $23^\circ$  de inclinación, siendo este el pico del

gráfico.

A la luz de estas observaciones, concluimos que sería de mucha ayuda cambiar la orientación del panel en las fechas de los equinoccios para captar mayor energía solar y a la vez mantener una inclinación fija del orden de los  $23^\circ$  para cumplir con el requisito de facilidad de manipulación.



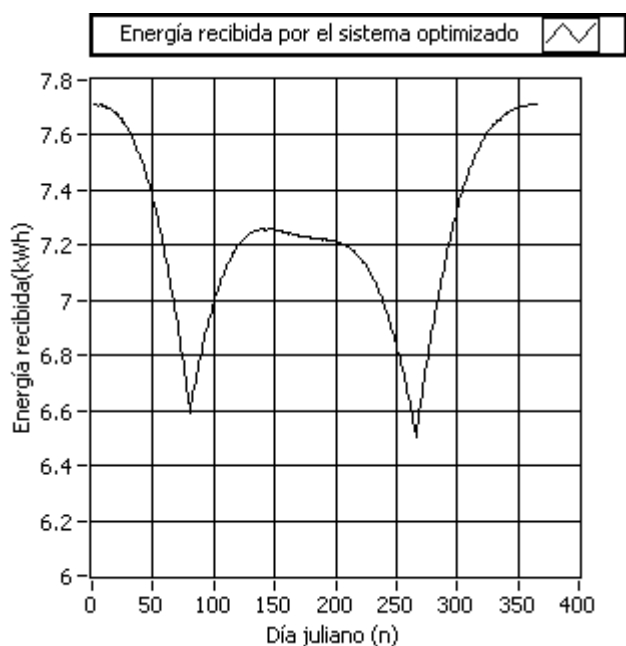
**Figura 53.- Energía recibida entre septiembre y marzo de acuerdo a la inclinación ( $0=0^\circ$ )**

Siguiendo el lineamiento anterior, solo sería necesario manipular el panel solar dos veces al año. Las modificaciones que haríamos son las siguientes:

1. Cortar 2 platinas de soporte en un mismo lado del rectángulo que forma el panel solar de manera que una vez posicionada la placa solar se tenga una inclinación de este plano a  $23^\circ$  con respecto a la horizontal del lugar.
2. Capacitar al dueño de la vivienda para que el día 21 de marzo de cada año fije

el panel con una orientación hacia el Norte y el día 23 de septiembre cambie el acimut de este plano a  $0^\circ$ , es decir, mirando hacia el Sur. Para esto solo será necesario aflojar cuatro tuercas en las platinas de soporte del panel y cambiar la orientación del panel.

Ahora configuremos “Irradiancia.vi” para calcular la radiación recibida con estas observaciones. Es decir, nuestra superficie tendrá una orientación de  $180^\circ$  entre el 21 de marzo y el 23 de septiembre, mientras que en los días que no se cumpla la condición anterior usaremos una orientación de  $0^\circ$ . En cualquier caso su inclinación será de  $23^\circ$ .



**Figura 54.- Energía recibida por el sistema modificado**

En la figura 54 se observa el resultado de la modificación propuesta. Es obvio que estamos mejorando el sistema evitando la baja del rendimiento en verano

comparado con un sistema fijo horizontal. La energía total recibida es de 2641.48 Kwh. En la superficie horizontal este valor es de 2441.50 Kwh.

Hemos alcanzado una mejora del 8.19%, aumento pequeño según nuestras previsiones pero que puede significar, en el caso de esta vivienda, la posibilidad de añadir algún electrodoméstico de bajo consumo al hogar.

Para esto únicamente ha sido necesario recortar 2 platinas de soporte y cambiar la orientación del panel (un trabajo sencillo) dos veces por año.

Esta es una muestra más de las muchas maneras en que puede ser aprovechado el software para el diseño y optimización de sistemas de captación solar.



**Figura 55.- El río Quinindé a su paso por Manabí**

### 3.1.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla VII se muestra una verificación de los resultados del programa contrastándolo frente a un software similar (9).

FECHA	$\phi(^{\circ})$	A(kM)	S(^{\circ})	O(^{\circ})	Irradiancia (Kwh)	Geosol (Kwh)	% $\Delta$
ENE01	-10	0	0	0	7.19948	7.59444	5.5
FEB07	0	1	30	180	5.06905	5.4167	6.8
ABR26	35	0.5	20	0	7.54167	7.9056	4.8
JUL24	60	0.8	50	45	7.4083	7.5305	1.6
NOV20	-20	0.3	45	180	5.08786	5.522	8.5

Tabla VII.- Comparación de resultados

Podemos observar que las diferencias en porcentajes son pequeñas. Esto puede deberse a varias causas entre las que podemos citar las siguientes:

- A pesar de que en ambos casos utilizamos el modelo de Hottel, no disponemos de información sobre cómo se calcula la componente difusa horizontal en el programa de referencia. Como se mencionó anteriormente, para el modelado de la radiación difusa existen muchos métodos, por lo tanto se podría estar generando aquí una primera diferencia en resultados.
- Las estaciones meteorológicas recaban datos en intervalos de 5, 15 o 60



minutos. Los autores por lo general disponen de datos de irradiancia y calculan la energía recibida asumiendo un valor constante de irradiancia durante el intervalo de tiempo elegido. El cálculo se reduce a multiplicar la irradiancia por el intervalo de tiempo y sumar toda la energía recibida en cada uno de estos intervalos. Hemos considerado mucho mejor realizar integraciones numéricas debido a la potencia de Labview lo cual brinda un acercamiento mayor a la curva real de la irradiancia solar.

- Por último, cuando se entra en el campo de superficies inclinadas la aproximación del factor  $R_b$  y el modelo elegido para la componente difusa ingresan otro error más en consideración.

## **CONCLUSIONES**

- 1) Los modelos de radiación solar basados en transmitancias, y en particular el método de Hottel, presentan una manera sencilla y relativamente precisa de calcular la radiación solar incidente en la tierra. La limitación común de estos modelos es su restricción al estudio de “días claros”, pero no por eso dejan de tener validez puesto que un estudio no podría prever, como sabemos, una variable climatológica tan aleatoria como las nubes. Existen otros modelos que toman en cuenta el factor nubes pero no están basados en transmitancias sino más bien en el llamado “índice de claridad”, para lo cual es necesario tener un conocimiento estadístico del clima del lugar, datos que en el caso de nuestro país son escasos o nulos.
- 2) A pesar de lo indicado en el punto anterior, los modelos de día claro basados en transmitancias proporcionan resultados muy precisos basados en pocas variables de fácil medición, por lo cual, es válido su uso para estudios tanto académicos como económicos.
- 3) Dentro de los modelos de radiación basados en transmitancias, el método de Hottel es uno de los más sencillos, de acuerdo al número de variables requeridas para su uso. Esto permite una rápida familiarización con los conceptos asociados a la radiación solar y evita la introducción de variables muy complejas y de difícil medición tales como: grosor de la capa de ozono,

altura de la columna de vapor de agua precipitable, turbiedad de la atmósfera, etc.

- 4) Los modelos para el cálculo de radiación en superficies inclinadas por lo general difieren únicamente en la obtención de la componente difusa, siendo el método de Reindl et al uno de los más fiables y utilizados.
- 5) El programa Labview presenta múltiples ventajas en el desarrollo de aplicaciones para medición y control. El uso adecuado de estas facultades ha permitido la elaboración de un programa para el cálculo de la radiación solar que presenta muchas ventajas y puede ser modificado en cualquier momento para incorporar variables nuevas al sistema.
- 6) Los seguidores solares de un eje, como es el caso del seguidor acimutal, presentan una ganancia en el rendimiento por lo cual es recomendable su utilización con ciertas precauciones: Como demostramos en este documento, es necesario realizar un estudio de la energía adicional recibida en este caso, para justificar económicamente el uso de un seguidor. Como vimos, el seguidor acimutal es rentable en latitudes medias.
- 7) Tomando en cuenta el punto anterior, y por la experiencia obtenida, creemos que el tipo de seguidor ideal para nuestro país es el seguidor horizontal, girando alrededor de un eje orientado de norte a sur. Los rayos solares al encontrarnos cerca del ecuador caen muy verticales, por lo que el ajuste ideal sería seguir el ángulo horario del sol, no su acimut.

8) Tal como encontramos en el caso de estudio realizado, los paneles solares muy cercanos al ecuador pueden aumentar su rendimiento de una manera muy sencilla cambiando su orientación dos veces por año con una inclinación constante.

## **RECOMENDACIONES**

- 1) Uno de los recursos más abundantes del Ecuador es la energía solar. Se debería poner énfasis en la investigación, diseño y aprovechamiento de esta fuente de energía renovable puesto que su utilización en nuestro país presenta grandes ventajas geográficas y por ende, económicas.
- 2) Cabe sugerir la investigación de los variados tipos de seguidores solares que existen para determinar el más adecuado para nuestro país. Hemos concluido por la intuición y guiados por los conocimientos adquiridos que el seguidor horizontal podría enmarcarse dentro de este grupo, sin embargo, es deseable poder contrastar esta hipótesis para llegar a una respuesta definitiva. El software desarrollado en esta tesis sería de mucha utilidad para esta investigación.
- 3) Internet es una gran herramienta. Muy pronto esta red será considerada –si no lo es ya- uno de los más grandes logros de la humanidad. Sin embargo, dado su carácter público es un arma de doble filo para la investigación. Al ser la Web nuestra fuente principal de información, encontramos muchas veces aseveraciones y fórmulas erróneas o mal escritas, lo cual produjo una considerable pérdida de tiempo y esfuerzo al tener que contrastar la veracidad en varias fuentes.
- 4) Es recomendable que la FIEC en sus seminarios de graduación, incentive la

investigación en energías renovables, puesto que a mediano plazo los combustibles fósiles se habrán agotado. Dentro de estas fuentes, la energía solar debería ocupar un lugar preponderante dada su abundancia en nuestra región.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- (1) Iqbal, M.: “An introduction to solar energy”; Academic Press, Toronto, 1983.
- (2) Sanz, S., Díaz, J., Caballero, P., Poncela, M.: “Software de simulación de la radiación incidente sobre superficies bajo diferentes condiciones”; cea-ifac.es, 2006
- (3) Hottel, H.C.: “A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres”, Solar Energy Vol. 18, páginas 129-134; Estados Unidos, 1976.
- (4) Liu, B. y Jordan, R.: “The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation”; Solar Energy Vol. 4, páginas 1-19; Estados Unidos, 1960.
- (5) Duffie, J. y Beckman, W.: “Solar engineering of thermal processes”; Wiley, New York, 1980
- (6) Kamali, Gh., Moradi, I., Khalili, A.: “Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran)”, Theoretical and applied climatology, Vol. 84, páginas 235-241; Austria, 2006.
- (7) Allen, R., Trezza, R., Tasumi, M.: “Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes”, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 139, páginas 55-73; Estados Unidos, 2006
- (8) Drif, M., Perez, P., Aguilera, J., Aguilar, J.: “A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems”, Renewable Energy, Vol. 33, páginas 2048-2056

(9) Passamai, V.: “Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; Universidad Nacional de Salta; Argentina, 2000.

(10) Hernández, Alejandro: “Programa Geosol V 2.0 para Windows”, [alejo@unsa.edu.ar](mailto:alejo@unsa.edu.ar), 2003



# **INTRODUCCION**

Este trabajo de grado se enfoca en la capacidad del programa realizado en Labview, para determinar las distintas radiaciones incidentes en superficies bajo distintas inclinaciones, teniendo como principal aprovechamiento en el uso de paneles solares y su mejor aprovechamiento al conocer la cantidad de radiación solar que se obtiene.

Esta simulación estará en la capacidad de realizar lo siguiente:

Calculo la radiación incidente en todo tipo de superficies definidas por su inclinación, orientación, latitud, longitud y altitud.

Comparativas de radiación en superficies para diferentes orientaciones (fachadas)

Estudios de inclinación óptima de paneles (solares térmicos y fotovoltaicos)

Cálculo de las pérdidas por sombras en una superficie de captación