

## DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LA RADIACIÓN APLICADA A COLECTORES PLANOS UBICADOS EN LA CIUDAD DE VILLA MERCEDES (SAN LUIS)

**R. MONASTEROLO\*, S. RIBOTTA\*, A. FASULO\***

\*Universidad Nacional de San Luis - Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales  
 Avenida 25 de Mayo 384 (5730) V. Mercedes - San Luis - Tel. (0657) 30954/30980 - Fax (0657) 33790  
 E-mail [monaster@fices.unsl.edu.ar](mailto:monaster@fices.unsl.edu.ar)

# Universidad Nacional de San Luis - Facultad de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales  
 Chacabuco y Pedernera (5700) San Luis - E-mail [solar@unsl.edu.ar](mailto:solar@unsl.edu.ar)

### RESUMEN

En un trabajo previo construimos una base de datos que cubre dos décadas de valores medios mensuales de radiación solar horizontal  $\bar{H}$  y radiación solar difusa  $\bar{H}_d$ , para V. Mercedes empleando datos de radiación registrados en la zona durante dos años por la Red Solarimétrica Nacional<sup>(1)</sup> y datos de heliofanía relativa durante veinte años provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.).

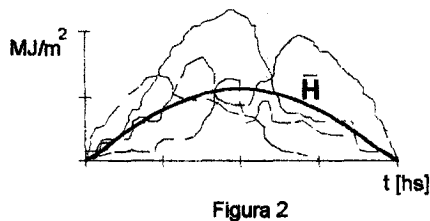
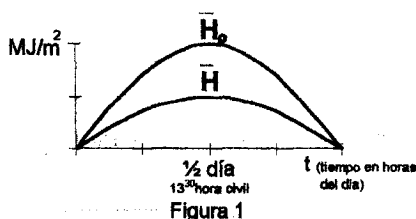
Ahora, a partir de estos datos generamos: la radiación horizontal horaria  $\bar{I}$  y la radiación horizontal difusa horaria  $\bar{I}_d$ , ambas expresadas en valores medios mensuales.

Luego, obtuvimos la radiación directa horizontal  $\bar{I}_d$  a partir de las dos anteriormente deducidas, y calculando el ángulo zenital horario  $\theta_z$  determinamos la radiación solar directa normal  $\bar{I}_n$ .

Con estos datos estimamos la radiación que recibiría un colector plano con seguidor solar, un colector plano fijo inclinado 45° al Norte y un colector plano inclinado 45° al Norte con seguidor solar.

### FUNDAMENTOS DEL MÉTODO APLICADO

Para este fin vamos a postular que la distribución horaria de la radiación solar global en valores medios mensuales  $\bar{H}$  tiene una figura semejante a la distribución horaria, en valores medios mensuales de la radiación solar horizontal sin atmósfera  $\bar{H}_0$ , tal como se muestra en la figura 1 para un mes cualquiera del año.



Esta es una suposición razonable para una localidad como Villa Mercedes, sin serranías en sus proximidades, lo que implica suponer que la presencia y permanencia de nubes en el cielo es totalmente independiente de la hora del día. De manera que la figura de  $\bar{H}$  resultante de la superposición de  $n$  días del mes (600 para dos décadas) es regular como el resultado del efecto compensador de la presencia azarosa en el tiempo de las nubes, figura 2.

### METODOLOGÍA DEL TRABAJO

A partir de los datos de radiación solar global  $\bar{H}$  tomada en plano horizontal y de heliofanía  $\bar{n}$  obtenidos en Villa Mercedes, a través de la estación INTA, se genera una base de datos con los cuales se obtienen los coeficientes de la ecuación de Angstrom-Page<sup>(2)</sup>:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \cdot \frac{\bar{n}}{N} \quad (1)$$

en donde resultó:

$$a = 0,2089 \text{ y } b = 0,5388$$

Una vez determinados los coeficientes a y b y con los datos de heliofania relativa durante veinte años provistos por el S.M.N., se obtuvo una base de datos de radiación global  $\bar{H}$ .

Luego, utilizando la base de datos anterior y mediante la correlación de Iqbal<sup>(3)</sup> se determinó la radiación difusa  $\bar{H}_d$  para el mismo período:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,958 - 0,982 \cdot \bar{K}_t \quad (2)$$

Luego a partir de estos datos, vamos a obtener la radiación horizontal horaria  $\bar{I}$  particionando la radiación solar global (valores medios mensuales) en horas. Se empleará la formulación de M. Collares-Pereira y A. Rabl<sup>(4)</sup>

$$rh = \frac{\bar{I}}{\bar{H}} = \frac{\pi}{T} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3)$$

cuyos coeficientes a y b valen:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047) \quad (4)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047) \quad (5)$$

Los valores correspondientes obtenidos para la radiación global horaria  $\bar{I}$  se muestran en la Tabla Nro. 1

		$\bar{I}$ - radiación solar horizontal total horaria [MJoule/m <sup>2</sup> ]												
		$\omega_s$ (ángulo horario)												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Meses	1	0,46	1,04	1,67	2,28	2,79	3,14	3,26	3,14	2,79	2,28	1,67	1,04	0,46
	2	0,28	0,84	1,47	2,09	2,62	2,98	3,10	2,98	2,62	2,09	1,47	0,84	0,28
	3	0,04	0,53	1,11	1,69	2,20	2,54	2,66	2,54	2,20	1,69	1,11	0,53	0,04
	4		0,25	0,77	1,32	1,81	2,14	2,26	2,14	1,81	1,32	0,77	0,25	
	5		0,05	0,47	0,94	1,36	1,65	1,76	1,65	1,36	0,94	0,47	0,05	
	6			0,36	0,80	1,21	1,50	1,60	1,50	1,21	0,80	0,36		
	7			0,00	0,41	0,86	1,27	1,56	1,66	1,56	1,27	0,86	0,41	0,00
	8			0,16	0,64	1,16	1,62	1,93	2,05	1,93	1,62	1,16	0,64	0,16
	9			0,42	0,98	1,55	2,05	2,39	2,51	2,39	2,05	1,55	0,98	0,42
	10	0,19	0,70	1,29	1,87	2,37	2,71	2,83	2,71	2,37	1,87	1,29	0,70	0,19
	11	0,40	0,94	1,54	2,13	2,62	2,95	3,07	2,95	2,62	2,13	1,54	0,94	0,40
	12	0,50	1,06	1,66	2,25	2,74	3,07	3,18	3,07	2,74	2,25	1,66	1,06	0,50

TABLA Nro. 1

Procedemos a hallar la radiación difusa horaria  $\bar{I}_d$ , a partir de la siguiente expresión

$$rd = \frac{\bar{I}_d}{\bar{H}_d} = \frac{\pi}{T} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (6)$$

De manera similar al paso anterior, encontramos los valores correspondientes para la radiación difusa horaria  $\bar{I}_d$ , los cuales se muestran en la Tabla Nro. 2

		$\bar{I}_d$ - radiación solar horizontal difusa horaria [MJoule/m <sup>2</sup> ]												
		$\omega_s$ (ángulo horario)												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Meses	1	0,24	0,49	0,71	0,91	1,06	1,16	1,19	1,16	1,06	0,91	0,71	0,49	0,24
	2	0,15	0,41	0,64	0,84	1,00	1,10	1,13	1,10	1,00	0,84	0,64	0,41	0,15
	3	0,03	0,29	0,53	0,74	0,89	0,99	1,03	0,99	0,89	0,74	0,53	0,29	0,03
	4		0,14	0,38	0,58	0,73	0,83	0,86	0,83	0,73	0,58	0,38	0,14	
	5		0,03	0,25	0,44	0,59	0,68	0,72	0,68	0,59	0,44	0,25	0,03	
	6			0,19	0,37	0,51	0,60	0,63	0,60	0,51	0,37	0,19		
	7		0,00	0,21	0,40	0,54	0,63	0,66	0,63	0,54	0,40	0,21	0,00	
	8		0,09	0,32	0,51	0,66	0,75	0,78	0,75	0,66	0,51	0,32	0,09	
	9		0,23	0,46	0,66	0,82	0,92	0,95	0,92	0,82	0,66	0,46	0,23	
	10	0,11	0,36	0,60	0,80	0,96	1,05	1,09	1,05	0,96	0,80	0,60	0,36	0,11
	11	0,22	0,46	0,69	0,89	1,04	1,14	1,17	1,14	1,04	0,89	0,69	0,46	0,22
	12	0,27	0,51	0,74	0,93	1,08	1,17	1,21	1,17	1,08	0,93	0,74	0,51	0,27

TABLA Nro. 2

La radiación global horizontal diaria  $\bar{H}$ , es el resultado de sumar la proyección horizontal  $\bar{H}_b$  de la radiación normal directa  $\bar{H}_n$  mas la radiación difusa  $\bar{H}_d$ . Esto es:

$$\bar{H} = \bar{H}_b + \bar{H}_d \quad (7)$$

Lo mismo vale para la radiación global horizontal horaria. La proyección horizontal de la radiación solar horaria  $\bar{I}_b$  se determina a partir de la ecuación

$$\bar{I} = \bar{I}_b + \bar{I}_d \quad (8)$$

por lo tanto:

$$\bar{I}_b = \bar{I} - \bar{I}_d \quad (9)$$

pero tenemos que:

$$\bar{I}_b = \bar{I}_n \cos\theta_z \quad (10)$$

En base a los valores mostrados de la radiación global horizontal horaria  $\bar{I}$  (Tabla 1) y de la radiación difusa horaria  $\bar{I}_d$  (Tabla 2), podemos obtener  $\bar{I}_b$ .

Por último, una vez determinado  $\bar{I}_b$  podemos hallar la proyección sobre un plano horizontal de la radiación directa horaria  $\bar{I}_n$ , a través de la siguiente ecuación

$$\bar{I}_n = \frac{\bar{I}_b}{\cos\theta_z} \quad (11)$$

Entonces, primero determinamos  $\cos\theta_z$  para el día característico de cada mes del año, y operando con las Tablas 1 y 2 obtenemos la siguiente tabla con los valores correspondientes a  $\bar{I}_n$ .

		$\bar{I}_n$ - radiación solar directa normal horaria [MJoule/m <sup>2</sup> ]													
		w <sub>s</sub> (ángulo horario)													
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
Meses	1	1,12	1,38	1,62	1,83	1,99	2,09	2,12	2,09	1,99	1,83	1,62	1,38	1,12	
	2	1,00	1,29	1,55	1,78	1,96	2,07	2,10	2,07	1,96	1,78	1,55	1,29	1,00	
	3	0,70	1,03	1,32	1,57	1,76	1,87	1,91	1,87	1,76	1,57	1,32	1,03	0,70	
	4		0,91	1,24	1,52	1,74	1,87	1,92	1,87	1,74	1,52	1,24	0,91		
	5		0,65	1,01	1,30	1,52	1,66	1,71	1,66	1,52	1,30	1,01	0,65		
	6			1,01	1,32	1,56	1,71	1,76	1,71	1,56	1,32	1,01			
	7			1,22	1,03	1,33	1,56	1,70	1,75	1,70	1,56	1,33	1,03	1,22	
	8			0,85	1,18	1,46	1,68	1,81	1,86	1,81	1,68	1,46	1,18	0,85	
	9			1,01	1,31	1,57	1,76	1,89	1,93	1,89	1,76	1,57	1,31	1,01	
	10		0,84	1,11	1,37	1,59	1,76	1,87	1,91	1,87	1,76	1,59	1,37	1,11	0,84
	11		1,00	1,25	1,48	1,68	1,84	1,93	1,97	1,93	1,84	1,68	1,48	1,25	1,00
	12		1,07	1,32	1,54	1,73	1,88	1,98	2,01	1,98	1,88	1,73	1,54	1,32	1,07

TABLA Nro. 3

## APLICACIÓN

A continuación, se determinan los valores de radiación solar media mensual horaria que recibirá un colector plano ubicado en la ciudad de Villa Mercedes (33°43'S). Se analizan tres situaciones diferentes:

- Con seguidor solar.
- Inclinado 45° Norte fijo.
- Inclinado 45° Norte con seguidor solar.

Los valores de radiación que recibirá el colector serán la suma de la componente horizontal de la radiación normal directa  $\bar{I}_b$  mas la radiación difusa  $\bar{I}_d$ . Consideraremos para los casos de colector inclinado a 45° que la radiación difusa que no recibe el colector, debido a que por su inclinación no puede ver una porción de la esfera celeste, esta disminución se verá compensada por la radiación reflejada emitida por una fracción de la superficie de la tierra, la que ve el colector.

Los valores de radiación determinados para estos colectores se muestran en la Figura 3.

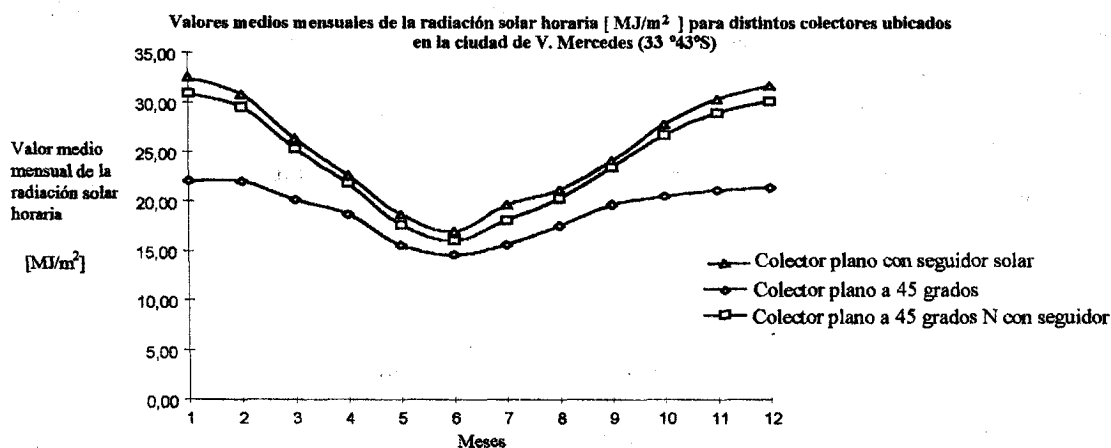


FIGURA 3

## CONCLUSIONES

Se dispone de una base de datos generada con datos de dos décadas de la radiación solar en valores medios mensuales para la ciudad de Villa Mercedes de radiación horaria  $\bar{I}_h$ ,  $\bar{I}_a$  e  $\bar{I}_n$  que nos permiten predecir resultados y así llevar a cabo el desarrollo o implementación de nuevas experiencias referentes a energía solar.

## NOMENCLATURA

$\bar{H}$  : Promedio de radiación diaria mensual [MJ/m<sup>2</sup>Día]

$\bar{H}_0$  : Promedio de radiación extraterrestre diaria mensual [MJ/m<sup>2</sup>Día]

$\bar{H}_d$  : Promedio de radiación difusa diaria mensual [MJ/m<sup>2</sup>Día]

$\bar{K}_t$  : Índice de claridad promedio ( $= \bar{H} / \bar{H}_0$ ) [adimensional]

$\bar{I}$  : Radiación solar horaria media mensual [MJ/m<sup>2</sup>]

$I_b$  : Componente horizontal de la radiación directa normal media mensual [MJ/m<sup>2</sup>]

$\bar{I}_a$  : Radiación solar difusa horaria media mensual [MJ/m<sup>2</sup>]

$\bar{I}_n$  : Radiación solar directa normal horaria media mensual [MJ/m<sup>2</sup>]

$\omega_s$  : Ángulo horario de puesta del sol

$\theta_z$  : Ángulo zenital

$\psi$  : Ángulo azimutal

$\bar{n}$  : Valor promedio diario mensual de horas de sol en [hs]

$\bar{N}$  : Horas máximas de sol, correspondiente al día característico en [hs]

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) **RED SOLARIMETRICA NACIONAL** - Cuadernos números 4 al 9 (1980-1982) - Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales - Cento Espacial San Miguel - Argentina.
- (2) **M. IQBAL**, An introduction to Solar Radiation - Academic Press
- (3) **M. IQBAL** - A study of Canadian diffuse and total radiation data - Monthly average daily horizontal radiation - SOLAR ENERGY - Vol. 22 pag 81-86 - TECHNICAL NOTE (1979)
- (4) **M. COLLARES PEREYRA and A. RABL** - The average distribution of solar radiation - Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values - SOLAR ENERGY - Vol. 20 pag 101-105 (1979)