

4. Estación radiométrica de la ETSI

La estación radiométrica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros se encuentra situada en la azotea de sus laboratorios, con coordenadas geográficas 37.40° N y 6.01° W. En ella se recogen medidas de radiación desde 1998 y en su mayoría se almacenan en una base de datos de forma continua y automática. En la misma base de datos también se conservan las medidas de radiación hechas por la misma estación cuando ésta se encontraba situada en el recinto universitario de Reina Mercedes, antigua Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla, durante el período 1984-1998, con coordenadas geográficas $37,37^{\circ}$ N y 6.00° W.

Durante todos estos años la estación ha ido evolucionando hasta la situación actual compuesta por unos equipos que explicaremos con detalle en el siguiente apartado. Uno de los cambios más señalados que ha sufrido en el último período, ha sido la sustitución de un sistema de medidas de irradiancia directa normal con seguimiento solar en eje polar que debía ser corregida manualmente en función de la época del año, por un medidor de la irradiancia directa normal totalmente automático con seguidor en dos ejes. De ahí que resulte más interesante hacer el estudio principalmente con los datos recogidos durante este período.

4.1 Equipos de medida

La estación radiométrica la componen una serie de equipos encargados de medir y almacenar valores de las principales variables de radiación. Todos los equipos trabajan de forma continua y en su mayoría automática, aunque algunos necesitan de una aportación manual para su correcto funcionamiento cada cierto tiempo. A continuación haremos una breve descripción de cada uno de ellos:

- **Piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM21:**

El piranómetro es un sensor que se encarga de medir la irradiancia global sobre superficie horizontal. Este modelo de piranómetro utiliza un mecanismo de medida muy sencillo. La energía radiante es absorbida por un disco pintado de negro. El calor fluye a través de una resistencia térmica hasta el cuerpo del piranómetro. La diferencia de temperatura entre los extremos de la resistencia se convierte en una tensión proporcional a la irradiancia absorbida.

El detector está protegido por dos cúpulas de cristal para evitar que las variaciones de temperaturas ambientales afecten a la medida. Estas cúpulas permiten la transmisión homogénea de la componente directa de la radiación independientemente de la posición del sol. El sensor consta de un sistema que absorbe la humedad, para prevenir el rocío en el interior de la semiesfera, que podría enfriar considerablemente el sensor en las noches claras y sin viento.

Especificaciones:

- Rango espectral: 305-2800 nm
- Sensibilidad: 7-17 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
- Tiempo de respuesta: 5 seg.
- Temperatura de operación: de -40°C a 80°C



Figura 4.1 Piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM21

- **Piranómetro Eppley blanco y negro (Modelo 8-48) sobre superficie inclinada 37° :**

Este sensor al igual que el anterior se encarga de medir la irradiancia global pero en este caso sobre una superficie inclinada 37° . Este modelo de piranómetro consiste en un hilo bobinado radial, una termopila diferencial con los receptores de unión caliente ennegrecidos con una capa superficial negra del tipo 3M Velvet y con los receptores de unión fría blanqueados con sulfato de bario. Este instrumento cuenta con una base de precisión desmontable y una semiesfera pulida de cristal óptico Schott WG295, que es transparente a la radiación entre 0.285 y 2.8 μm . El aparato también cuenta con tres reguladores de nivel y un absorbedor de la humedad (silicagel).

Especificaciones:

- Sensibilidad: aprox. $10 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
- Impedancia: aprox. 350Ω
- Dependencia con la temperatura: $\pm 1.5\%$ sobre un rango de temperatura de -20°C a 40°C
- Linealidad: $\pm 1\%$ de $0-1400 \text{Wm}^{-2}$
- Tiempo de respuesta: 5 seg.



Figura 4.2 Piranómetro Eppley blanco y negro (Modelo 8-48) sobre superficie inclinada 37°

- **Piranómetro Middleton SK01-D con banda de sombra:**

Este dispositivo consta de un piranómetro con una banda metálica acoplada a la plataforma horizontal que impide que incida sobre él la radiación directa. Con este montaje conseguimos que el piranómetro recoja el valor de la irradiancia difusa sobre una superficie horizontal. El SK01-D incorpora un filtro especial que limita su sensibilidad a la radiación sintética. Este modelo de piranómetro utiliza un detector fotodiódico. El detector está protegido por una cúpula de cristal. La señal del detector es aumentada mediante un amplificador.

Especificaciones:

- Tipo de sensor: Fotodiodo
- Espectro nominal: 300-1150
- Sensibilidad: 1.0 mV/Wm^{-2}
- Ángulo de visión: 2π estereorradianes
- Tiempo de respuesta (95%): 30 ms



Figura 4.3 Piranómetro Middleton SK01-D con banda de sombra

- **Pirheliómetro Eppley, modelo NIP**

El NIP incorpora una termopila de cable enrollado en la base del tubo, con un ratio de 1 a 10 entre la apertura y su longitud. El interior de este tubo de latón está ennegrecido y con un diafragma adecuado. El tubo está lleno de aire seco a la presión atmosférica y sellado en la base receptora. En cada extremo del cilindro hay dos discos, provistos con un mecanismo que permite comprobar la alineación del pirheliómetro con el sol.

Especificaciones:

- Sensibilidad: aprox. $8 \mu\text{V/Wm}^{-2}$
- Dependencia con la temperatura: $\pm 1\%$ sobre un rango de temperatura de -20°C a 40°C
- Linealidad: $\pm 0.5\%$ desde 0 hasta 1400 Wm^{-2}
- Tiempo de respuesta: 1 seg.



Figura 4.4 Pirheliómetro Eppley, modelo NIP

- **Sun tracker de Sci-tec, modelo 2AP:**

Es un dispositivo que se utiliza para seguir al sol. Sobre él se encuentra colocado el pirheliómetro con el que se pretende medir la irradiancia directa normal. Por ello, los rayos solares deben incidir en todo momento en una dirección perpendicular al plano de su apertura.

El 2AP cuenta con un microprocesador encargado de controlar la posición del seguidor mediante dos ejes de control Cenit y Acimut. Introduciendo la hora local en el microprocesador nos aseguramos un seguimiento preciso del sol, evitando los problemas de desalineamiento del seguidor en un solo eje.



Figura 4.5 Sun tracker de Sci-tec, modelo 2AP

- **Heliógrafo de Campbell-Stokes:**

El Heliógrafo de Campbell-Stokes se encarga de medir la heliofanía, o lo que es lo mismo, las horas de sol. Consiste en una esfera de vidrio, montada concéntricamente en una sección de un recipiente esférico, cuyo diámetro es tal que los rayos de sol se focalizan en una cartulina sostenida por unas guías.

Especificaciones:

- Forma: uniforme
- Diámetro: 10 cm
- Color: transparente
- Índice de refracción: 1.52 +/- 0.2

Bandas de sol:

- Material: Papel de buena calidad que no esté muy afectado por la humedad
- Anchura: Con una precisión de 0.3 mm
- Espesor: 0.4 +/- 0.05
- Efecto de la humedad: 2%
- Color: oscuro, homogéneo sin diferencias detectables a la luz del día
- Graduaciones: Horas del día impresas en blanco



Figura 4.6 Heliógrafo de Campbell-Stokes

- **Escáner HP 34970A de Hewlett-Packard**

Es una unidad de adquisición de datos. Ésta realiza las funciones de amplificación de las señales de los sensores, multiplexión, muestreo y retención y conversión analógico digital de las señales de los sensores que requieren todos o algunos de estos procesos con anterioridad a su tratamiento digital en la unidad central.

Especificaciones:

- Capacidad para hasta 120 canales analógicos, con tres ranuras para inserción de módulos multiplexores.
- Resolución de 6 ½ dígitos (22 bits)
- Velocidad de muestreo de hasta 250 canales
- Un módulo multiplexor HP 34901A, con 20 canales de entrada (pueden mezclarse canales de 2 y 4 hilos) más 2 canales protegidos (intensidad hasta 1 A), velocidad de muestreo de 60 canales y hasta 120 conmutaciones (canales digitales).

- **Unidad central**

La unidad central se compone de un ordenador personal, una tarjeta controladora para la conexión con la unidad de adquisición por medio de una interfaz HP-IB y un software para las funciones de control del sistema de adquisición, interfaz de operador y programación y mantenimiento del módulo de adquisición. El programa de la unidad central está desarrollado en lenguaje HP-VEE.

- **Panel de conexión**

El panel de conexión, situado en la misma plataforma de sensores, proporciona una interfaz física entre éstos y la unidad de adquisición, facilitando y simplificando la instalación y el mantenimiento del cableado.

4.2 Base de datos

La base de datos del Grupo de Termodinámica de la ETSI de Sevilla contiene los registros de las medidas obtenidas con el sistema automático de adquisición de datos desde su puesta en marcha, en enero de 1984, hasta la actualidad. A lo largo de esos años la base de datos ha utilizado diferentes tipos de formato a la hora de almacenar las medidas. A continuación explicaremos cómo se encuentra la base de datos en este momento y qué tipo de formato se emplea para cada uno de los años registrado:

- **Período 1984-1995:**

Si abrimos cualquier carpeta perteneciente a estos años encontraremos unos archivos “.OUT” todos nombrados con la misma estructura, comienzan por las letras SR seguidas de los dos últimos dígitos del año al que pertenecen y por otros tres que nos informan del día en que fueron tomadas las medidas. Por ejemplo, el “SR88039.OUT” sería un archivo perteneciente a la carpeta de 1988 que contiene los valores de radiación medidos durante el día 39 de ese año. El contenido de cualquiera de estos ficheros tiene la siguiente estructura:

G.M.T.	I.G	flag	H.G	I.d	flag	H.d	I30	H30	I.D	flag	H.D
HH:MM	w/m2	7.87%	KJ/m2	w/m2	7.09%	KJ/m2	w/m2	KJ/m2	w/m2	0.00%	KJ/m2
07:15	33	00999	7	29	00999	6	54	12	43	00999	10
07:20	49	00999	19	40	00999	16	90	31	96	00999	28
07:25	65	00999	36	49	00999	30	123	64	136	00999	64
07:30	75	00999	56	55	00999	45	141	102	155	00999	106
07:35	71	00999	79	53	00999	61	126	144	121	00999	150
07:40	69	00999	100	52	00999	78	121	182	103	00999	186
07:45	78	00999	122	58	00999	94	136	219	111	00999	216
07:50	92	00999	148	67	00999	113	162	266	130	00999	254
07:55	110	00999	177	77	00999	134	195	316	159	00999	294
08:00	126	00999	211	86	00999	157	226	376	183	00999	342
08:05	112	00999	248	78	00999	183	195	444	142	00999	395
08:10	120	00999	278	83	00999	205	204	493	147	00999	428
08:15	157	00999	318	101	00999	232	277	563	214	00999	478
08:20	184	00999	367	112	00999	263	331	650	261	00999	545
08:25	181	00999	423	106	00999	296	329	751	258	00999	626
08:30	192	00999	474	106	00999	326	350	845	282	00999	700
08:35	218	00999	537	116	00999	359	394	958	325	00999	792

Figura 4.7 Fichero de radiación del día 39 de1988.

Como podemos observar la primera fila nos indica el día al que pertenecen los datos registrados y la estación de medidas a la que pertenecen. A continuación aparecen una serie de columnas que almacenan las siguientes variables:

- -G.M.T.(HH:MM): Instante temporal en que se han tomado las medidas;
- Irradiancia global sobre superficie horizontal (W/m^2);
- -flag: código de cinco dígitos que etiqueta el valor de la medida tomada en la columna anterior según su fiabilidad;
- Irradiación global sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia difusa sobre superficie horizontal (W/m^2);
- -flag: código de cinco dígitos que etiqueta el valor de la medida tomada en la columna anterior según su fiabilidad;
- Irradiación difusa sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 30° (W/m^2);
- -flag: código de cinco dígitos que etiqueta el valor de la medida tomada en la columna anterior según su fiabilidad;
- Irradiación global sobre superficie inclinada (kJ/m^2);
- Irradiancia directa normal (W/m^2);
- -flag¹: código de cinco dígitos que etiqueta el valor de la medida tomada en la columna anterior según su fiabilidad;
- Irradiación directa normal (kJ/m^2);

Para mayor información sobre el significado de los dígitos identificativos de la fiabilidad de los valores consultar el proyecto fin de carrera de Lucía Fernández-Montes González.

Como se puede deducir de la primera columna, las medidas de irradiancia se presentan cada 5 minutos, siendo almacenado el valor medio del intervalo de cinco minutos que finaliza en el momento que la columna de tiempos expresa. Los datos de irradiación expresan el valor de la integral de la irradiancia desde la primera medida registrada hasta el instante en el que se almacena el valor.

El tamaño de este tipo de ficheros oscila entre los 9y 13 KB .

• **Período 1996-1998:**

En las carpetas de cada año pertenecientes a este período encontramos dos tipos de archivos para cada día en la que fueron tomadas las medidas. El primer tipo, mantiene exactamente la misma estructura que los archivos pertenecientes al período anterior pero son nombrados de forma diferente. En este período este tipo de ficheros son nombrados “SRAD-ddd.DAT” donde los tres dígitos designados por la letra d nos informan del día al que pertenecen. Vemos una muestra de esos ficheros en la figura4.8:

G.M.T	I.G	flag	H.G	I.d	flag	H.d	I30	H30	I.D	flag	H.D
HH:MM	w/m2	29.21%	KJ/m2	w/m2	26.40%	KJ/m2	w/m2	KJ/m2	w/m2	23.03%	KJ/m2
05:06	0	00999	0	0	00999	0	2	0	0	00999	0
05:11	1	00999	0	0	00999	0	4	0	1	00999	0
05:16	4	00999	0	0	00999	0	6	0	1	00999	0
05:21	7	00999	0	6	00999	0	9	0	2	00999	0
05:26	11	00999	0	10	00999	0	12	0	1	00999	0
05:31	15	00999	0	13	00999	0	14	0	2	00999	0
05:36	20	00999	0	16	00999	0	18	0	56	00999	0
05:41	32	00999	0	21	00999	0	22	0	164	00999	1
05:46	42	00999	0	26	00999	0	27	0	213	00999	2
05:51	52	00999	1	30	00999	0	30	0	145	00999	2
05:56	64	00999	1	35	00999	0	33	0	49	00999	2
06:01	75	00999	1	36	00999	0	36	1	130	00999	2
06:06	89	00999	1	38	00999	1	40	1	18	00999	2
06:11	102	00299	2	41	00299	1	42	1	11	00299	2
06:16	114	00299	2	44	00299	1	45	1	36	00299	2
06:21	128	00999	2	45	00999	1	48	1	420	00999	2
06:26	143	00999	2	45	00999	1	51	1	458	00999	3
06:31	157	00299	3	47	00299	1	54	2	128	00299	4
06:36	170	00999	4	50	00999	1	60	2	460	00999	6
06:41	190	00999	4	53	00999	1	74	2	522	00999	7
06:46	203	00999	5	53	00999	1	83	2	544	00999	8

Figura 4.8 Fichero de radiación del día 185 de1996.

El contenido de sus columnas es el mismo que para el caso anterior.

El segundo tipo de fichero que nos encontramos en este período son nombrados de forma similar a los anteriores, “RAD-ddd.DAT” y tienen la siguiente estructura:

G.M.T	I.d	H.d	I.G	H.G	I30	H30	I.D	H.D	H.S.
HH:MM	w/m2	KJ/m2	w/m2	KJ/m2	w/m2	KJ/m2	w/m2	KJ/m2	HH:MM
05:06	0	0	0	0	2	0	0	0	04:39
05:11	0	0	1	0	4	0	1	0	04:44
05:16	0	0	4	0	6	0	1	0	04:49
05:21	6	0	7	0	9	0	2	0	04:54
05:26	10	0	11	0	12	0	1	0	04:59
05:31	13	0	15	0	14	0	2	0	05:04
05:36	16	0	20	0	18	0	56	0	05:09
05:41	21	0	32	0	22	0	164	1	05:14
05:46	26	0	42	0	27	0	213	2	05:19
05:51	30	0	52	1	30	0	145	2	05:24
05:56	35	0	64	1	33	0	49	2	05:29
06:01	36	0	75	1	36	1	130	2	05:34
06:06	38	1	89	1	40	1	18	2	05:39
06:11	41	1	102	2	42	1	11	2	05:44
06:16	44	1	114	2	45	1	36	2	05:49
06:21	45	1	128	2	48	1	420	2	05:54
06:26	45	1	143	2	51	1	458	3	05:59
06:31	47	1	157	3	54	2	128	4	06:04
06:36	50	1	170	4	60	2	460	6	06:09
06:41	53	1	190	4	74	2	522	7	06:14

Figura 4.9 Fichero de radiación del día 185 de1996.

En este caso, las primeras filas nos indican el día al que pertenecen los datos registrados y el tipo de medidas. A continuación aparecen una serie de columnas que almacenan las siguientes variables:

- Hora G.M.T.(HH:MM)
- Irradiancia difusa sobre superficie horizontal (W/m^2);
- Irradiación difusa sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia global sobre superficie horizontal (W/m^2);
- Irradiación global sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 30° (W/m^2);
- Irradiación global sobre superficie inclinada 30° (kJ/m^2);
- Irradiancia directa normal (W/m^2);
- Irradiación directa normal (kJ/m^2);
- Hora solar aparente (hh:mm).

En este caso también se toman medidas cada 5 minutos y el tamaño de los ficheros oscila entre los 8-12 KB.

- **Período 1999-2002:**

Durante este período se continúan almacenando los archivos “RAD-ddd.DAT” y además se comienzan a generar unos nuevos llamados “ARADddd.DAT”.

Time	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Time
04:47:09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	04:28
04:47:14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	04:28
04:47:19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:28
04:47:24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:28
04:47:29	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:28
04:47:34	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:28
04:47:39	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:47:44	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:47:49	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:47:54	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:47:59	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:48:04	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:48:09	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:48:14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:48:19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	04:29
04:48:24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:29
04:48:29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	04:29
04:48:34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	04:30
04:48:39	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:30
04:48:44	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:30
04:48:49	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:30
04:48:54	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	04:30

Figura 4.10 Fichero de radiación del día 185 de1996.

Como podemos observar en el ejemplo, en este caso no se introduce texto en el fichero, esto facilita mucho la gestión de los datos que contienen, pero dificulta la comprensión de las variables para alguien que no esté familiarizado con estos archivos. En la figura 13 vemos que únicamente aparecen una serie de columnas que almacenan las siguientes variables:

- Hora G.M.T.(HH:MM:SS)
- Irradiancia difusa sobre superficie horizontal (W/m^2);

- Irradiación difusa sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia global sobre superficie horizontal (W/m^2);
- Irradiación global sobre superficie horizontal (kJ/m^2);
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 30° (W/m^2);
- Irradiación global sobre superficie inclinada 30° (kJ/m^2);
- Irradiancia directa normal (W/m^2);
- Irradiación directa normal (kJ/m^2);
- Hora solar aparente (hh:mm).

En este caso los valores se registran cada 5 segundos aumentando el tamaño de los ficheros que ahora oscila entre los 500 y los 800 KB.

- **Período 2003-2005:**

En el año 2003 se continúan almacenando los dos tipos de archivos analizados en el período anterior pero con extensión ".txt". Y durante los años 2004 y 2005 únicamente se han generado los "aradddd.txt", es decir los ficheros que almacenaban valores cada 5 segundos. Si se necesitaran los valores de las medidas cada 5 minutos, éstos podrían ser generados matemáticamente sin mucha dificultad a partir de los de 5 segundos.

Como acabamos de ver la base de datos está compuesta por varios tipos de ficheros de radiación con diferentes formatos. De todos ellos, únicamente utilizaremos para nuestro estudio aquellos que recogen medidas cada 5 segundos y éstas fueron tomadas cuando el pirheliómetro con seguimiento en dos ejes ya se encontraba operativo. Este período es el correspondiente a los años 2000-05.

No se han utilizado los datos almacenados durante el 2006 porque el pirheliómetro dejó de funcionar correctamente y tuvo que ser sustituido durante la mayor parte del año por el que sólo tiene seguimiento automático en eje polar, cuyas mediciones tampoco resultaron fiables debido a diversos factores relacionados con su instalación y mantenimiento.