

## SINTESIS DE SERIES DIARIAS Y HORARIAS DEL INDICE DE CLARIDAD

J. L. Duomarco, B. Zimberg y M. Vignolo  
Instituto de Física

Facultad de Ingeniería, cc. 30  
Montevideo, Uruguay

### INTRODUCCION

La utilización generalizada de la computación como herramienta de diseño de Sistemas Solares, ha impuesto la necesidad de contar con largas Series de Insolación sobre planos de diferente inclinación y orientación, sobre la horizontal y respecto del Norte.

Las exigencias, siempre exceden las disponibilidades de Series Solares Medidas. Esto es obviamente el caso, cuando se trata de evaluar la radiación en planos inclinados y orientados. Además, lo usual es contar con muy pocas Series Solares Medidas en algunas localidades en cada país o región, que suelen presentar huecos más o menos graves. Por estas razones la Síntesis de Series Solarimétricas es un tema en constante revisión, para satisfacer la demanda creciente de los diseñadores Solares.

Los modelos de radiación se desarrollan con la finalidad de generar series numéricas, cuyas características estadísticas sean

Serie Solarimetrica de Arquitectura  
1980-1981-1982-1983-1984

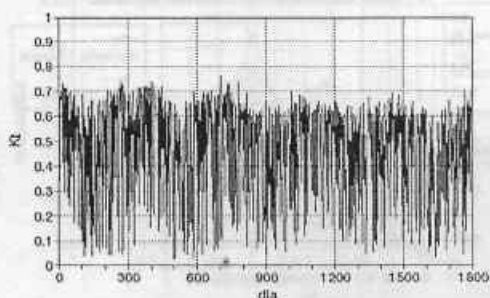


Fig. 1

Serie Solarimetrica de La Estanzuela  
1969-70-71-72-73-74-75-76-1977

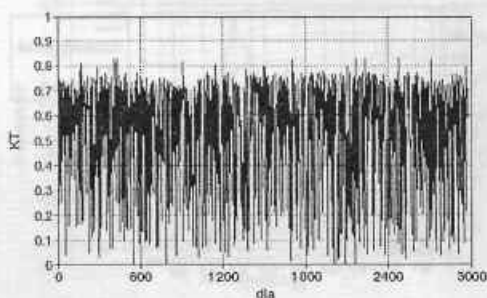


Fig. 2

las mismas de una Serie Solar Medida en la Naturaleza. Las series así generadas son completas, tan largas como se desee y se obtienen a partir de algoritmos que requieren un reducido número de parámetros para funcionar [5, 7].

Se describe un procedimiento de generación de series de insolación horaria sobre plano diversamente inclinado y orientado. Su esquema es el siguiente:

a) Se calculan los índices de claridad  $K_t$  diarios, para la Serie Solar Medida en la Naturaleza que servirá de Modelo. Se confeccionan los histogramas mensuales y los histogramas anuales de autocorrelación con uno, dos, tres y cuatro días de horizonte, para un período móvil de 30 días.

b) Se genera por un procedimiento Montecarlo, a partir de los histogramas mensuales de  $K_t$ , una serie numérica tan larga como se quiera. Dicha serie posee características estadísticas estacionarias idénticas a las de la Serie Solar Medida, pero carece de su persistencia temporal.

c) Se reordenan los elementos de la serie extensa, por grupos sucesivos, hasta que verifiquen los criterios de persistencia de la Serie Solar Medida. Este procedimiento permite inyectar a dicha serie numérica, la persistencia del Modelo, sin alterar sus características estadísticas estacionarias.

d) Se generan los índices de claridad  $k_t$  horarios de la Serie Solar Medida y se archivan como "formas" paramétricas en el índice de claridad diario  $K_t$ , el mes del año y el  $K_T$  diario medio de dicho mes.

e) Utilizando la serie diaria de  $K_t$  sintetizada y un procedimiento aleatorio, se asocia a cada  $K_t$  diario, una "forma" diaria de 24  $k_t$  horarios del mismo mes, extraída del archivo anteriormente generado.



Fig. 3



Fig. 4

f) No es usual contar con valores de índice de claridad que vayan más allá del valor diario. Por tanto para aquellas series a modelar que no lo dispongan, hemos procedido a utilizar el archivo de "formas" de otra Serie Solar Medida de Referencia. Para mantener la escala se utiliza la relación de los KT medios del mes, afectando a todos los elementos de la "forma", por igual.

g) Utilizando una relación horaria (kt, fd) o (kt, kb) se determina la radiación difusa y la radiación de haz directo, horarias.

h) Utilizando el conocido método de Liu-Jordan se determina la radiación incidente sobre plano inclinado y orientado, horario o diario.

### DESCRIPCION DE LAS SERIES SOLARES DE REFERENCIA

Se utilizaron en nuestro análisis dos series de Uruguay. Una serie de "La Estanzuela", Colonia (Serie ZUELA: 34° 20' latitud Sur, 57° 41' longitud Oeste, nivel del mar) y una serie de la "Facultad de Arquitectura", Montevideo (Serie ARCHI: 34° 50' latitud Sur, 56° 9' longitud Oeste, nivel del mar) [1, 2].

La serie ZUELA esta formada por 2969 valores diarios de radiación global sobre plano horizontal, medidos desde octubre de 1969 hasta noviembre de 1977. El instrumento utilizado fué un piranómetro Kipp & Zonen. Los datos fueron obtenidos por planimetría de bandas de papel.

La serie ARCHI está formada por parejas de datos de insolación horaria global sobre plano horizontal y horaria directa de incidencia normal, medidas en forma simultánea, desde mayo de 1979 hasta diciembre de 1984. Los instrumentos utilizados fueron un pirheliómetro Eppley de incidencia normal (NIP) y un piranómetro Black & White de Eppley. Los datos fueron obtenidos por planimetría de bandas de papel. Se utilizó una Apple Tablet para realizar la

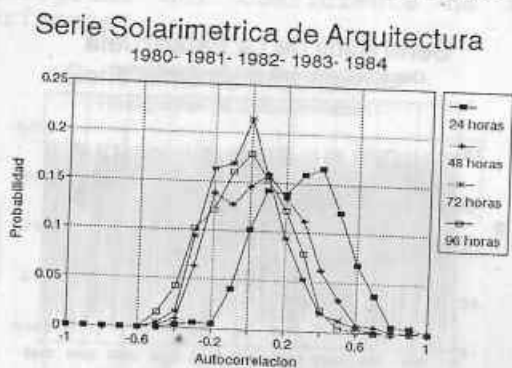


Fig. 5

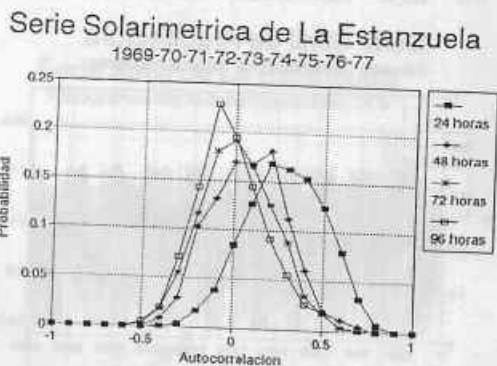


Fig. 6

integración horaria.

## EL INDICE DE CLARIDAD DIARIO COMO VARIABLE ALEATORIA

El efecto de la latitud es extraído de la serie, por lo menos en parte, trabajando con el índice de claridad  $K_t = H / H_0$ , donde  $H$  es la radiación global diaria sobre plano horizontal y  $H_0$  la radiación extraterrestre diaria sobre plano horizontal para el mismo lugar y día, calculada con el valor de la constante solar  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

La periodicidad estacional también se atenúa considerablemente, pero no se elimina totalmente, como surge de los estudios espectrales de estas series.

Las fórmulas de definición del promedio  $X$ , la covarianza  $S$  y el coeficiente de autocorrelación,  $C$  son las usuales:

$$(1) \quad X(t;m) = 1/m * \text{Sum} [i= t \rightarrow t+m-1] \quad K_t(i) ,$$

$$(2) \quad K_x(i;m) = K_t(i) - X(i; m) ,$$

$$(3) \quad S(t;m,p) = 1/m * \text{Sum} [i= t \rightarrow t+m-1] \quad K_x(i; m) * K_x(i+p; m) ,$$

$$(4) \quad C(t;m,p) = m / (m+1) * S(t;m,p) / [ S(t;m,0) * S(t+p;m,0) ]^{0.5} .$$

La periodicidad anual de las series del índice de claridad  $K_t$  diario [9], justifica tomar al año como base temporal sobre la cual trabajar. La parcelación mensual se prefiere por razones prácticas. El mes es una unidad de tiempo suficientemente corta para no perder la estructura anual de la información y a su vez suficientemente larga para permitir construir una razonable estadística. Las distribuciones mensuales se forman agrupando todos los datos del mismo mes, de los diferentes años de la Serie Solar Medida.

Serie Simil de Arquitectura

Decada Generada por Reordenamiento

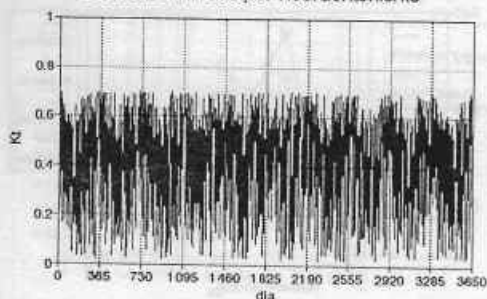


Fig. 7

Serie Simil de La Estanzuela

Decada Generada por Reordenacion

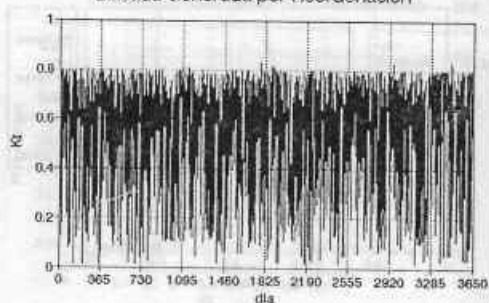


Fig. 8

## GENERACION DE SERIES DE INDICE DE CLARIDAD DIARIO

El análisis de los datos experimentales, muestra dos aspectos independientes, para una adecuada descripción estadística de una serie del índice de claridad diario  $K_t$ , la periodicidad anual de su valor y su corta persistencia de no más de un día [4, 8].

Estas dos características pueden ser correctamente medidas mediante sus doce histogramas mensuales de valor,  $F_i[K_t(j<i>)]$ , (donde  $i = \text{Ene, Feb, Mar, ... Nov, Dic}$  y donde  $j<i>$ , identifica el caso del mes  $i$ , de cualquier año de la serie) y por el histograma anual de los coeficientes de autocorrelación por períodos móviles, para un horizonte de un día,  $G[C(j; m, p)]$ , (donde  $m=30$  días es el período móvil,  $j$  identifica dicho período y  $p=1$  día es el horizonte de la autocorrelación). Los histogramas del coeficiente de autocorrelación para horizontes de dos, tres, y cuatro días ( $m=30; p=2, p=3$  y  $p=4$ ) muestran una total indiferencia estadística.

La generación de la serie comienza formando un conjunto de valores de  $K_t$ , cubriendo el período de tiempo a ser sintetizado, que ajuste correctamente las distribuciones mensuales de  $K_t$  y por ende su distribución anual. Esto se realiza por un procedimiento Monte Carlo.

El algoritmo de reordenación toma en cuenta datos previamente ordenados. Una ventana de 10 días, en el final de un bloque móvil de 30 días se baraja hasta que el coeficiente de autocorrelación de horizonte un día es el correcto. Si esta situación no se obtiene en un número fijo de mil tiradas, se selecciona la mejor ordenación.

El criterio de selección de grupo consiste en la pertenencia del coeficiente de autocorrelación, a un intervalo de amplitud fija, centrado en un valor aleatoriamente obtenido a partir del histograma del coeficiente de autocorrelación para un día de horizonte.

Serie Simil de Arquitectura  
Histogramas de Autocorrelacion

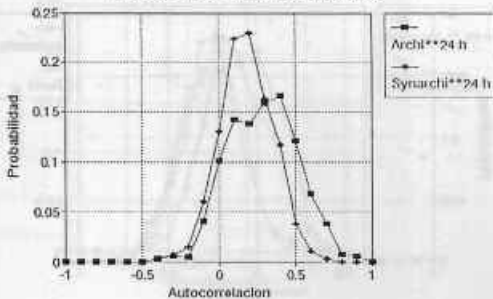


Fig. 9

Serie Simil de La Estanzuela  
Histogramas de Autocorrelacion de 24 h

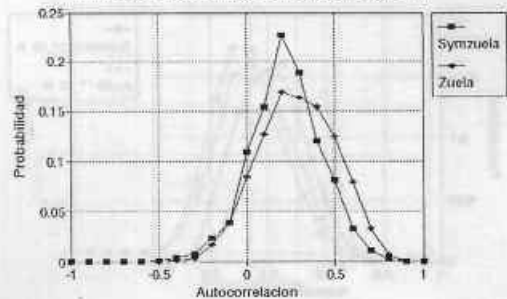


Fig. 10



## GENERACION DE SERIES DE INDICE DE CLARIDAD HORARIO

La serie solar de Arquitectura fué medida en forma horaria, por lo cual se dispone de un archivo de "formas" diarias de kt con dicha resolución. Este archivo se organizó en forma paramétrica en el Kt diario y en el mes del año. Se evaluó además el KT diario medio para cada mes, a ser utilizado como referencia de escala.

Para sintetizar una serie horaria similar a la de Arquitectura, se procede asociando aleatoriamente a cada valor diario de Kt una "forma" de 24 kt horarios con el mismo valor de Kt diario y correspondiente al mismo mes.

Para sintetizar una serie horaria similar a la de La Estanzuela, de la cual no se dispone un archivo de "formas", se procede en forma diferente. Se adopta el archivo correspondiente de la serie de Arquitectura pero se lo corrige por escala. Cada elemento de sus "forma" y el Kt diario asociado, se los afecta por un mismo factor de escala,  $(KT\_ZUELA/KT\_ARCHI)$ , diferente mes a mes.

## RADIACION DIFUSA Y DE HAZ DIRECTO

La Serie ARCHI cuenta con parejas de datos simultáneos de radiación horaria global sobre plano horizontal (h) y de radiación horaria directa de incidencia normal (ib).

Con estos valores se pueden calcular los siguientes números adimensionados:

a) Índice de claridad horario horizontal.

$$(5) \quad kt = h / ho$$

donde  $ho$  es la radiación horaria extraterrestre evaluada sobre plano horizontal en el mismo lugar e instante.

b) Índice de claridad horario de incidencia normal.

Serie Simil de Arquitectura

Histogramas de Autocorrelacion de 48 h

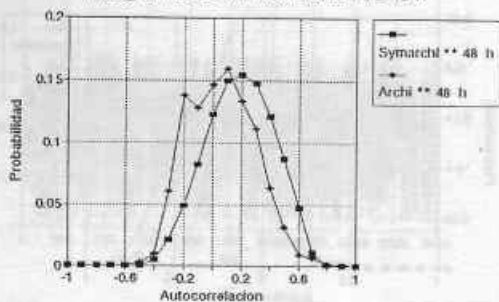


Fig. 11

Serie Simil de La Estanzuela

Histogramas de Autocorrelacion de 48 h

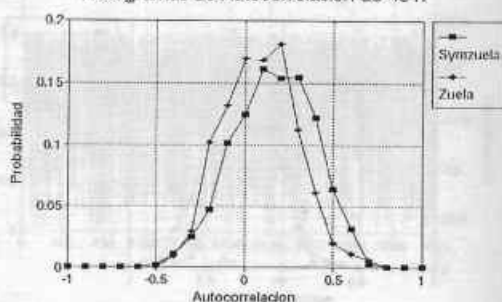


Fig.12

(6)  $kb = ib / ibo$   
 donde  $ibo$  es la radiación horaria extraterrestre directa de incidencia normal.

c) Fracción difusa horizontal.

(7)  $fd = hd / h$   
 donde  $hd$  es la radiación difusa sobre plano horizontal.

d) Fracción directa horizontal.

(8)  $fb = hb / h$   
 donde  $hb$  es la radiación directa sobre plano horizontal.

Entre los números adimensionados existen las siguientes relaciones adicionales:

a) Completitud horizontal.

(9)  $fb + fd = 1$

b) Relaciones angulares.

(10)  $ho = ibo * \text{sen } \langle h \rangle$

(11)  $hb = ib * \text{sen } \langle h \rangle$

donde  $\langle h \rangle$  es la altura solar sobre el horizonte.

No es lo usual disponer series simultáneas de radiación horaria global horizontal y directa para un mismo lugar. Lo más común consiste en disponer solamente series de radiación global horizontal obtenidas por piranómetro. Por esta razón es de fundamental importancia disponer de un algoritmo que permita obtener para cada  $kt$ , valores razonables de directa o difusa. Por

### Serie Simil de Arquitectura

Histogramas de Autocorrelacion de 72 h

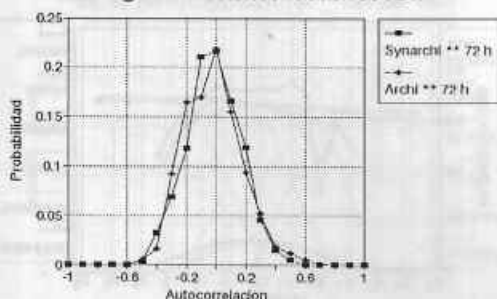


Fig. 13

### Serie Simil de La Estanzuela

Histogramas de Autocorrelacion de 72 h



Fig 14.

esta razón disponer de una correlación (kt, kb) o (kt, fd) es de gran utilidad práctica en los cálculos.

Sin embargo se debe ser consciente que la vinculación antedicha presenta una dispersión considerable en sus valores. De esto se desprende que el índice de claridad kt no es suficiente para caracterizar por sí sólo las propiedades de absorción y dispersión de la atmósfera [3].

El ajuste por mínimos cuadrados de la correlación (kt, kb) es el siguiente:

(12)

$$kb = ((((-7.822*kt+3.108)*kt+6.505)*kt-2.897)*kt+0.482)*kt+0.0127$$

para  $0 < kt < 0.74$

$$kb = 0.590$$

para  $0.74 < kt < 1$

El ajuste por mínimos cuadrados de la correlación (kt, fd) es el siguiente:

(13)

$$fd = 1 - 0.53*kt$$

para  $0 < kt < 0.24$

$$fd = (((12.1564*kt - 12.4227)*kt + 0.7515)*kt + 0.4362)*kt + 0.8547$$

para  $0.24 < kt < 0.7$

$$fd = 0.186$$

para  $0.7 < kt < 1$

Correlaciones (kb, kt) & (fd, kt)  
Serie de Arquitectura (1980-81-82-83-84)

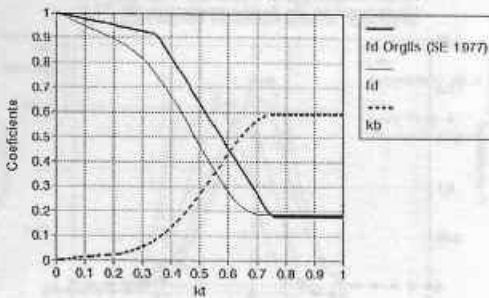


Fig. 15

RAZONES SOLARIMETRICAS  
SERIE DE ARQUITECTURA 1/ ENE/ 1980

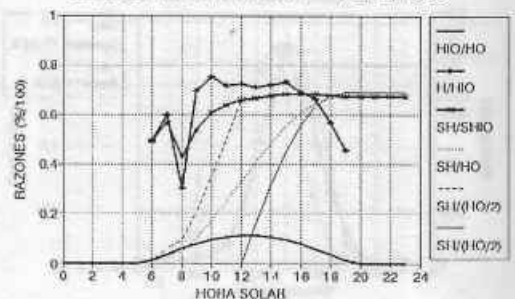


Fig. 16



## RADIACION SOBRE PLANO INCLINADO Y ORIENTADO

El procedimiento seguido para evaluar la radiación sobre plano inclinado y orientado fué el de Liu-Jordan [6]. La radiación total sobre plano inclinado y orientado, para una hora, está formada por tres términos, la radiación directa del haz, la radiación difusa y la radiación reflejada.

$$(14) \quad it = ib \cdot \cos\langle tet \rangle + \\ + hd \cdot (1 + \cos\langle bet \rangle) / 2 + (hb + hd) \cdot ro \cdot (1 - \cos\langle bet \rangle) / 2$$

donde  $\langle tet \rangle$  es el ángulo que formó el haz con la normal al plano colector,  $\langle bet \rangle$  es el ángulo de inclinación y  $ro$  es el coeficiente de reflexión del terreno. Se adoptó el valor  $ro = 0.2$ .

La suma de los valores horarios de  $it$  del día forman los valores diarios de radiación sobre plano inclinado y orientado  $H_t$ .

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Este trabajo describe un procedimiento de generación de series horarias y diarias de radiación sobre plano inclinado y orientado, con la característica de ser estadísticamente indistinguibles de la serie real tomada de modelo.

La información necesaria de la serie a modelar, para la generación de la serie diaria del índice de claridad  $K_t$  es reducida:

- Los histogramas mensuales del índice de claridad diario  $K_t$ .
- El histograma anual de autocorrelación de horizonte un día de los períodos móviles de 30 días de la serie solar a modelar.
- El archivo de "formas" de índice de claridad horario  $kt$ , paramétrico en el  $K_t$  diario, en el mes del año y en el promedio mensual del  $K_t$  diario,  $KT$ .

### RAZONES SOLARIMETRICAS

SERIE DE ARQUITECTURA 19/ FEB/ 1981

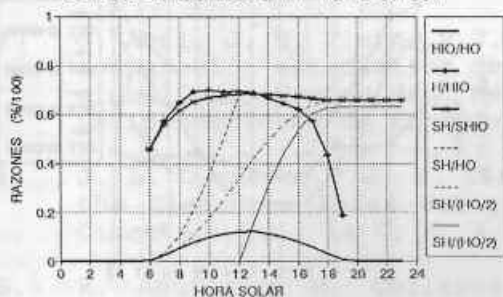


Fig. 17

### RAZONES SOLARIMETRICAS

SERIE DE ARQUITECTURA 20/ ABR/ 1982

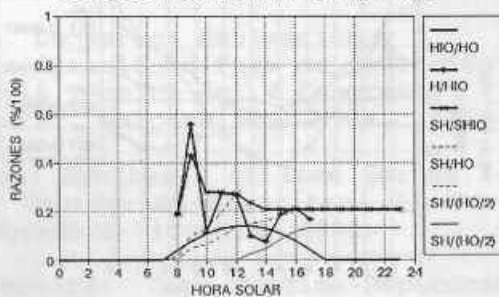


Fig. 18

Este último archivo no es usualmente accesible, ya que no es usual una medida horaria de radiación. En esos casos puede adoptarse las "formas" de otra serie tomada de referencia, ajustando adecuadamente su escala.

El procedimiento de generación de Kt diario por reordenación, está basado en la independencia entre la estadística estacionaria del valor de Kt y la estadística de la persistencia temporal, que no excede de un día.

De la generación por Monte Carlo de los valores estacionarios de Kt surge una serie sin persistencia temporal alguna. Los histogramas de autocorrelación de uno, dos, tres y cuatro días de horizonte, así lo muestran.

Al reordenar, se altera con exclusividad el histograma de autocorrelación de un día de horizonte, y los demás, para dos, tres y cuatro días permanecen incambiables.

El procedimiento de generación del kt horario saca partido de la relación existente entre el Kt diario y las "formas" del kt horario mes a mes, ajustando las escalas adecuadamente.

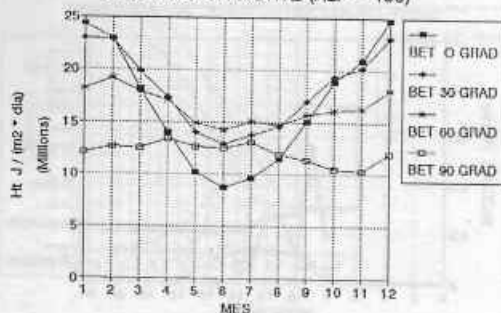
La selección de "formas" es al azar y no tiene en cuenta posibles vinculaciones entre los kt de la tarde y la mañana de días consecutivos.

Su utilidad para reflejar las variaciones horarias, sin embargo, está garantizada por utilizar "formas" reales.

Para obtener la insolación sobre plano inclinado se requiere contar con información adicional sobre la radiación difusa o la radiación directa.

El procedimiento seguido consistió en utilizar las correlaciones (kt, kb) y (kt, fd) horarias, con más amplio respaldo en la literatura.

ESTANZUELA. INSOLACION PLANO INCLINADO  
ORIENTACION NORTE (ALF = 180)



ESTANZUELA. INSOLACION PLANO INCLINADO  
ORIENTACION (ALF = 0)

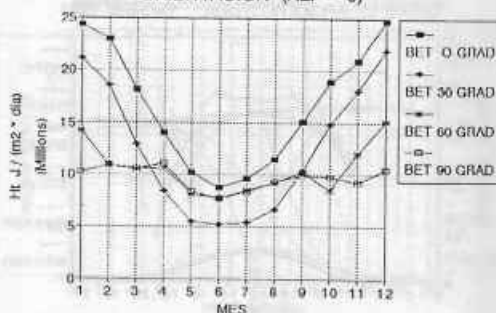


Fig. 19

Fig. 20

ESTANZUELA. INSOLACION PLANO INCLINADO  
ORIENTACION NORTE (ALF = 180)

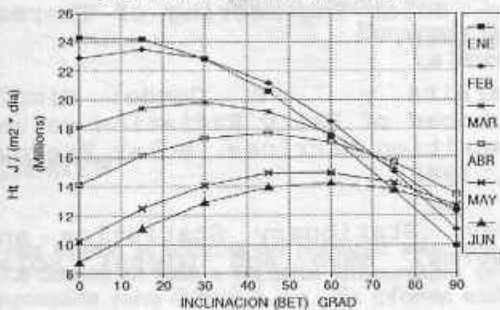


Fig. 21

ESTANZUELA. INSOLACION PLANO INCLINADO  
ORIENTACION NORTE (ALF = 180)

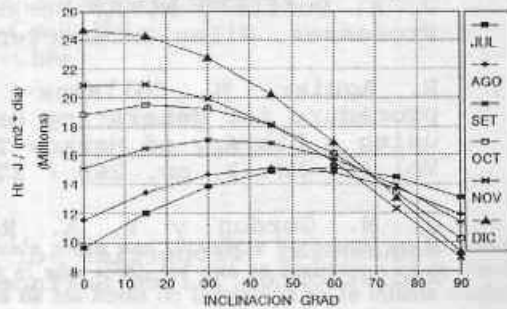


Fig. 22

El procedimiento para generar la insolación sobre plano inclinado fué el de Liu-Jordan que asume isotropía en la radiación difusa y reflejada.

El sistema de cálculo es suficientemente detallado para aplicaciones de ingeniería. Se respeta la estructura horaria y diaria de la insolación, como para permitir un ajustado diseño de los Sistemas Solares.

#### REFERENCIAS

1. Mediciones de irradiación solar en "La Estanzuela" y en la "Facultad de Arquitectura". Boletín Energético del Ministerio de Industria y Energía, Montevideo, Uruguay. N°1\_7, 1979.
2. I. W. de Ewenson y B. Gil: Mediciones de Radiación Solar. Radiación Global Horaria. Radiación Directa Horaria. Período 1977-1983. Anales del Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, 1986.
3. G. Abal, J. E. Tierno y J. L. Duomarco: Estimación y comparación estadística de la fracción difusa de radiación global para Montevideo. Memoria Técnica del V Congreso Latinoamericano de Energía Solar, Valparaíso, Chile, 1986.
4. J. L. Duomarco y J. E. Tierno: Synthesis of Time Series for the Clearness Index Using a Reordering Algorithm. Il Nuovo Cimento. Vol. 14 C, N. 6, Noviembre-Dicembre, 1991.
5. R. Aguiar y M. Collares-Pereira: Tag: A Time-Dependent, Autoregressive, Gaussian Model for Generating Synthetic Hourly Radiation. Solar Energy. Vol 49, No.3, pp.167-174,

1992.

6. J. A. Duffie y W. A. Beckman: Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley-Interscience, 1980.
7. R. Aguiar, M. Collares- Pereira y J. P. Conde: Simple procedure for generating Sequences of Daily Radiation values using a Library of Markov Transition Matrices. Solar Energy. Vol 40, No. 3, pp. 269 - 279, 1988.
8. J. M. Gordon y T. A. Reddy: Stationary Statistics and Sequential Properties of Normal Beam and Global Solar Radiation on Tilted Surfaces.
9. J. L. Duomarco, J. E. Tierno y G. Abal: A Seasonal Auto-Regressive Model for the Clearness Index. Memorias del VI Congreso Latinoamericano y III Iberoamericano de Energía Solar, Cartagena, Colombia, pp. A 1-16, 1989.