

3 Métodos de generación de series sintéticas de radiación solar

En el capítulo anterior se ha realizado un breve repaso al estado del arte respecto a los diferentes métodos de generación de series solares. Sólo se han comentado muy brevemente los diferentes métodos que hay, pero no se ha desarrollado su formación. Antes de comenzar a explicar el método de generación de series sintéticas de radiación solar basado en el modelo de red neuronal Perceptrón Multicapa, que se propone en esta tesis, se ha creído interesante resumir muy brevemente algunos de los métodos clásicos que otros autores han propuesto, por dos razones fundamentales: la primera, porque el explicar dichos métodos supondrá un acercamiento a las técnicas empleadas en la generación de series de radiación solar, y la segunda, que en un capítulo posterior de esta tesis se mostrarán los resultados del estudio comparativo entre diferentes métodos y el método propuesto, por lo que ha sido necesaria la implementación de los mismos para generar diferentes series artificiales para su comparación y estudio. Asimismo se ha considerado interesante implementar un método también basado en redes neuronales artificiales, además del propuesto en esta tesis, con el fin de incluirlo también en el estudio comparativo.

Como ya se comentó en el capítulo anterior, en el que se hizo un repaso introductorio a los diferentes métodos para generar secuencias solares, atendiendo a la escala temporal en la que se realiza la generación se pueden observar dos grandes grupos: series en escala diaria y series en escala horaria. En este sentido, este capítulo se inicia diferenciando en primer lugar dos secciones bien definidas. En la primera de ellas se tratan los métodos clásicos denominados diarios. La segunda sección se centra en los métodos clásicos denominados horarios. Todos los métodos, tanto diarios como horarios, que se explican en este capítulo, se han implementado con finalidad comparativa en la realización de esta tesis. Posteriormente se han generado con ellos series sintéticas de radiación solar, en las dos escalas temporales citadas, que han sido utilizadas para validación y comparación con los resultados que proporciona el método que se propone en esta tesis.

Existe una tercera y última sección en este capítulo, donde se explica el método de generación de series de radiación solar basado no en los métodos clásicos, sino en un método que emplea RNA's. Como ya se ha adelantado previamente, se ha creído muy interesante incluir

este método para tener otra herramienta comparativa, además de los métodos de generación solar usuales.

3.1.- Métodos clásicos diarios

Por medio de estos métodos se generan secuencias de radiación solar a escala diaria. Se basan principalmente en una propiedad que tiene la radiación solar que recibe el nombre de **persistencia radiativa**. Consiste en que de un día para otro los cambios climáticos no son bruscos, sino que son graduales, por lo que la influencia de cómo haya sido un día sobre cómo será el siguiente es importante. Por ejemplo, si un día ha sido muy nublado, este hecho incrementa la probabilidad de que el siguiente también lo sea, o que sea algo nuboso, pero decrementa la probabilidad de que sea totalmente despejado. Y al contrario ocurrirá algo similar, si un día es muy claro y despejado de nubes, muy probablemente el día siguiente será similar, y si se pasa a nublado es presumible que lo haga de forma gradual.

De los métodos clásicos propuestos para generar secuencias diarias es interesante resaltar los que a continuación se resumen, puesto que cada uno de ellos supuso una mejora en el estudio de las series temporales de radiación solar.

3.1.1.- Método de Brinkworth [1]

El método de Brinkworth, que a partir de ahora se denotará por BW, se basó en el análisis de las características secuenciales de los datos de radiación solar global diaria de la localidad británica de Bracknell (latitud $51^{\circ} 23' N$, longitud $0^{\circ} 47' W$, altitud 73 m.s.n.m.). Los años en estudio fueron 8 años medidos entre 1968 y 1975. El tipo de clima de la localidad en estudio corresponde al típico clima atlántico muy lluvioso de las Islas Británicas.

La característica secuencial en estudio fue la autocorrelación (este estadístico se explicará más detalladamente en el capítulo 5 de la presente tesis). Cada año en estudio fue dividido en seis intervalos (con una duración de aproximadamente dos meses) centrados en los solsticios. De este modo, Brinkworth observó que en cada uno de esos intervalos existía una determinada tendencia que seguían las series, sobre la que aparecían fluctuaciones que podían simularse aleatoriamente.

Propuso por tanto una ecuación para la generación de las series de radiación global compuesta por una parte denominada la tendencia junto con una segunda parte o componente aleatoria. La ecuación propuesta para un día n cualquiera es la siguiente:

$$G(n) = B + Cn + \lambda Q(n-1) + r(n), \quad (1)$$

siendo:

n: orden del día: varía de 1 a 365.

G(n): radiación global sobre superficie horizontal durante el día n.

B y C: constantes de la componente tendencia. (Hay seis parejas de valores B,C correspondientes a los seis intervalos en los que se dividen las series).

λ : parámetro de correlación que coincide con la autocorrelación de orden 1.

Q(n-1): fluctuación (desviación respecto a la tendencia) en el día n-1.

r: número aleatorio con distribución gaussiana en el día n, cuya varianza ha de cumplir:

$$V(r) = V(Q) (1-\lambda^2), \quad (2)$$

siendo V la varianza.

Los dos primeros sumandos del término derecho de la ecuación (1) son la parte de tendencia, mientras que los sumandos tercero y cuarto corresponden a la parte aleatoria.

Este método, debido principalmente a que fue uno de los pioneros en este campo, presenta algunos inconvenientes que en estudios posteriores pudieron corregirse, a saber:

- a) Al tratar con la radiación solar directamente para una sola localidad en estudio, presenta una fuerte dependencia con dicha localidad, no siendo en absoluto un método aplicable directamente en otras localidades (las constantes B, C y λ han de ser calculadas en los diferentes lugares donde se vaya a aplicar).
- b) Las series obtenidas, según afirma el propio Brinkworth, deben reajustarse con valores reales.

Como ejemplo de los valores para B, C, V(Q) y λ que Brinkworth propone, se presenta la siguiente tabla:

Intervalo	B (MJ /m ²)	C (MJ /m ²)	V (Q) (MJ /m ²)	λ
21 ENE - 21 MAR	2.088	0.104	7.545	0.264
22 MAR – 21 MAY	9.412	0.125	25.693	0.187
22 MAY – 21 JUL	18.036	-0.029	37.985	0.291
22 JUL – 20 SEP	16.355	-0.107	22.735	0.210
21 SEP – 20 NOV	9.602	-0.130	6.387	0.145
21 NOV – 22 ENE	2.387	-0.012	1.437	0.146

Tabla 3.1. Valores medios de las constantes de tendencia, varianza y autocorrelación de orden 1 para Reino Unido.

Como posteriormente se indicará, en esta tesis las localidades en estudio con datos de radiación solar han sido varias localidades españolas, para las cuales se aplicó este mismo método, obteniéndose unos valores diferentes de B, C, V(Q) y λ . Dichos valores se presentan en la tabla 3.2 que se muestra a continuación:

Intervalo	B (MJ /m ²)	C (MJ /m ²)	V (Q) (MJ /m ²)	λ
21 ENE - 21 MAR	6.887	0.114	5.327	0.193
22 MAR – 21 MAY	12.962	0.161	19.901	0.175
22 MAY – 21 JUL	21.316	0.014	28.409	0.287
22 JUL – 20 SEP	22.689	-0.143	17.017	0.222
21 SEP – 20 NOV	13.393	-0.108	3.377	0.137
21 NOV – 22 ENE	5.838	0.015	0.956	0.125

Tabla 3.2. Valores medios de las constantes de tendencia, varianza y autocorrelación de orden 1 para España.

3.1.2.- Método de Boileau [2]

Boileau analizó tres modelos diferentes para la generación de series diarias de radiación global. Utilizó en su estudio datos de radiación de tres lugares con climas diferentes: un sitio de clima templado (Trappes, latitud 49° N), otro de clima mediterráneo (Carpentras 44° N) y otro con clima ecuatorial situado a gran altitud (Hullao 13° S, 3000 m).

El primer modelo, al que denomina modelo A, no será expuesto aquí, puesto que el mismo autor lo descarta al ser superado por los otros dos. Este modelo necesita más de un año de medidas y está basado en el modelo estacional propuesto por Box y Jenkins [3].

Un segundo modelo que propone recibe el nombre de modelo B. Éste se basa en el estudio de la variación de la radiación global diaria de un día respecto a otro, variable que se puede describir como: $v_i = I_i - I_{i-1}$, siendo I_i la radiación correspondiente al día i , y similarmente I_{i-1} lo es para el día $i-1$. Una vez que prepara las series con valores de v_i , obtenido del modo descrito, propone un modelo MA1 (Media Móvil 1, “Moving Average 1”) para simular dicha variable:

$$v_i = a_i - \theta a_{i-1}, \quad (3)$$

con $\theta = 0.75$.

El primer valor de a , a_0 , es aleatorio, y a partir de él se construye toda la serie. El mismo autor, sin embargo, hace hincapié en que las series obtenidas siguiendo este procedimiento presentan ciertas derivas que hay que corregir posteriormente.

Finalmente, con el tercer y último modelo que plantea Bolieau se obtienen los mejores resultados, y será el que se utilice en esta tesis para obtener series de radiación que serán comparadas con las obtenidas por el método basado en el Perceptrón Multicapa.

Este tercer modelo que será denominado BO surgió a partir de un estudio estadístico, algo más detallado, de los datos de que disponía. Analizando dichos datos se calcula la media de la radiación global diaria para un día i a lo largo de muchos años $\langle I_i \rangle$ y la varianza σ_i . Si entonces se realiza la siguiente transformación:

$$u_i = (I_i - \langle I_i \rangle) / \sigma_i, \quad (4)$$

comprobó que la serie así obtenida sigue un proceso de Markov de orden AR1 (AutoRegresivo orden 1):

$$u_i = Q u_{i-1} + a_i, \quad (5)$$

con Q un parámetro de valor fijo igual a 0.25 y a_i un número aleatorio con distribución gaussiana. Con toda esta información Bolieau propone el siguiente algoritmo:

1 Obtención de la media y varianza de la serie.

Aunque los valores de varianza y media sólo se conocen en las localidades en estudio, en cualquier otra localidad propone que se calculen ajustados según series de Fourier. Para ello propone los coeficientes de Fourier a partir de los cuales se podrá calcular $\langle I_i \rangle$ y σ_i .

2 Cálculo de la serie u_i .

A continuación se debe calcular la serie u_i según la expresión (5).

3 Obtención de la serie I_i .

Puesto que ya es conocido $\langle I_i \rangle$, σ_i e u_i , se deberá obtener la serie I_i , aunque esta I_i no será todavía la definitiva. En este caso se ha de aplicar la expresión:

$$I_i = \sigma_i \cdot u_i + \langle I_i \rangle. \quad (6)$$

4 Determinación de las envolventes

Se han de calcular a continuación, por medio de unos coeficientes de Fourier que también proporciona, tres nuevos parámetros denominados envolvente superior de las series de radiación solar E_i , envolvente inferior de las series de radiación solar e_i y la serie filtrada A_i , que se calcula según la siguiente expresión:

$$A_i = \langle I_i \rangle - (E_i - \langle I_i \rangle) = 2\langle I_i \rangle - E_i, \quad (7)$$

salvo que A_i sea menor que E_i , en cuyo caso $A_i = e_i$.

5 Transformación de la variable I_i a I_i'

Se transforma la variable I_i en otra nueva variable I_i' según:

$$-I_i' = I_i \quad \text{si } I_i > \langle I_i \rangle \quad (8)$$

$$I_i' = \langle I_i \rangle + [(I_i - \langle I_i \rangle)(\langle I_i \rangle - A_i) / (\langle I_i \rangle - e_i)] \quad \text{si } I_i < \langle I_i \rangle \quad (9)$$

6 Cálculo de la media y varianza de I_i'

De nuevo empleando ajuste con los coeficientes correspondiente a series de Fourier que Boileau propone, se calcula $\langle I_i' \rangle$ y σ_i' .

7 Cálculo de la variable u_i'

Por último, se debe calcular u_i' una vez que son conocidos $\langle I_i' \rangle$ y σ_i' , mediante:

$$u_i' = (I_i' - \langle I_i' \rangle) / \sigma_i'. \quad (10)$$

Y a partir de u_i' se calcula de nuevo I_i , según lo siguiente:

$$I_i = \langle I_i' \rangle + \sigma_i' \cdot u_i' \quad \text{si } u_i' > 0 \quad (11)$$

$$I_i = \langle I_i' \rangle + \sigma_i' \cdot u_i' \cdot (I_i - e_i) / (\langle I_i' \rangle - A_i) \quad \text{si } u_i' < 0 \quad (12)$$

Tras las simulaciones que se han realizado en esta tesis utilizando este método se concluye que, además de ser algo engorroso de aplicar, no conduce a unos resultados suficientemente satisfactorios.

3.1.3.- Método de Bartoli et al. [4]

La principal diferencia de este método con los anteriores es que en este caso se utiliza como variable a simular, en vez de la radiación global directamente, el índice de claridad K_T , gracias al cual, como se empieza a demostrar en estos trabajos, los resultados son mejores. En este caso los autores disponían de un total de 18 localidades italianas con datos de radiación solar global diaria sobre superficie horizontal medidos durante los años 1971, 1972 y 1973. Las latitudes de esas localidades varían entre los 36.82° N y los 45.43° N.

Tras un estudio exhaustivo de las secuencias del índice de claridad K_T obtenido a partir de los valores de radiación global, proponen un modelo basado en un proceso estocástico autoregresivo de primer orden que cumple la siguiente expresión:

$$u(t) = \rho u(t-1) + \varepsilon(t), \quad (13)$$

siendo:

$t, t-1$: indica el orden del día

ρ : coeficiente de autocorrelación. Proponen el valor $\rho = 0.25$

u : índice de claridad K_T menos índice de claridad medio mensual: $u = K_T - K_{Tm}$

ε : número aleatorio con distribución gaussiana.

Como comentario a este método es interesante resaltar varias ventajas: por una parte, utiliza una gran variedad de localidades en estudio. Por otro lado, utiliza el índice de claridad en vez de la radiación global directamente, lo que proporciona mejores resultados. El método propuesto es muy simple de implementar, y los resultados son bastante satisfactorios. Sin

embargo, también se pueden indicar algunos inconvenientes, como pueden ser que los años en estudio para cada localidad son muy pocos (apenas tres años, en las localidades en las que todos los datos sean válidos) y todas las localidades son de climas muy similares (mediterráneo con pequeñas variaciones).

3.1.4.- Método de Graham y Hollands [5]

El método de Graham-Hollands (GH) se basa en lo que ellos denominan *inversión gaussiana*. Estos investigadores estudiaron las propiedades estadísticas de numerosos registros de radiación solar diaria de tres localidades canadienses con diferentes climas. Las localidades en estudio fueron: Vancouver (latitud 49° 20' N, clima atlántico), Swift Current (latitud 50° 20' N, clima continental frío) y Toronto (latitud 43° 39' N, clima continental). Para cada localidad disponían de 10 años de medidas. Observaron el fenómeno anteriormente citado de persistencia radiativa entre días consecutivos, así como el hecho de que las secuencias de radiación global diaria (o del índice de claridad diario) no siguen una distribución totalmente gaussiana, sino que se asemeja a una distribución del tipo Beta.

Como se ha descrito en los apartados anteriores, casi todos los otros investigadores, pasando por alto este hecho, habían propuesto expresiones similares a ésta:

$$\text{Rad}(n) = \text{Constante Rad}(n-1) + \text{Aleatorio}(n), \quad (14)$$

donde

Rad (n) se refiere a la radiación (o el índice de claridad) del día n

Rad (n-1) es la radiación (o el índice de claridad) del día n-1 (día anterior)

Aleatorio (n) es un número aleatorio, para el día n, que sigue una distribución gaussiana.

Sin embargo expresiones como (14) conducen a resultados que no son totalmente satisfactorios, puesto que producen distribuciones gaussianas de la radiación solar, y no del tipo Beta como GH descubrieron. Por ello GH propusieron un nuevo método, para generar secuencias del índice de claridad diario K_T , que se puede resumir en estos pasos:

1 Obtención de la variable χ gaussiana.

Primero se generan 365 valores de una variable gaussiana llamada χ (J_i) según la siguiente expresión:

$$\chi(n) = 0.29 \cdot \chi(n-1) + w(n), \quad (15)$$

donde

n es el orden del día que se quiere obtener y $n-1$ es el correspondiente al día anterior,

$w(n)$ es un número aleatorio con distribución gaussiana,

el valor inicial es aleatorio, y la constante 0.29 la obtuvieron tras el estudio de numerosos datos.

2 Obtención del índice de claridad diario K_T :

Puesto que la radiación global real no es de tipo gaussiano, GH proponen hacer una transformación para calcular el K_T que sí siga una distribución más parecida a la real. La expresión propuesta es:

$$0.5 \cdot [1 + \operatorname{erf}(\chi/\sqrt{2})] = F(K_T, K_{Tm}), \quad (16)$$

siendo

F , la función de densidad de probabilidad del índice de claridad diario,

erf , la función de error,

K_T , el índice de claridad diario correspondiente al valor χ ,

K_{Tm} , el índice de claridad diario medio mensual (que ha de ser conocido).

La función de densidad de probabilidad tiene la siguiente forma, que se indica en la figura 3.1.

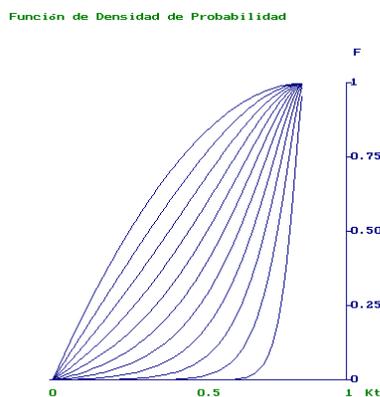


Figura 3.1. Función de densidad de probabilidad

Nota: cada curva corresponde a un valor de K_{Tm} que va desde 0.35 (curva más a la izquierda) hasta K_{Tm} 0.85 (curva más a la derecha)

Existen expresiones para calcular F analíticamente, conocido K_T . Hollands y Hughet [6] propusieron una expresión para $F(K_T, K_{Tm})$ que es:

$$F(K_T, K_{Tm}) = C / (K_{tu} \cdot \lambda \cdot \gamma) \cdot [e^{\lambda \cdot K_T} (1 - \gamma \cdot K_T) - 1], \quad (17)$$

con

$$C = \lambda^2 \cdot K_{tu} / (e^{\lambda \cdot K_{tu}} - 1 - \lambda \cdot K_{tu}), \quad (18)$$

$$K_{tu} = 0.864 \text{ (máximo } K_T \text{ observado)}, \quad (19)$$

$$\gamma = \lambda / (1 + \lambda \cdot K_{tu}), \quad (20)$$

$$K_{Tm} = C / (\lambda^2 \cdot K_{tu}) \cdot [(2/\lambda + K_{tu}) \cdot (1 - e^{\lambda \cdot K_{tu}}) + 2K_{tu} \cdot e^{\lambda \cdot K_{tu}}], \quad (21)$$

Por tanto, aplicando todas estas expresiones, se puede calcular para cada valor de χ , el correspondiente valor de K_T .

En definitiva, por medio del método de GH se pueden generar los años sintéticos que se deseen en cualquier localidad, sin más que conocer los 12 valores medios mensuales del índice de claridad (K_{Tm}).

3.1.5.- Método de Aguiar y Collares-Pereira [7]

Por medio del método propuesto por estos investigadores es posible generar secuencias de radiación solar diaria, similares a las series con datos reales, de una forma muy sencilla. Al igual que en el método GH, es necesaria muy poca información de partida, puesto que sólo se necesitan los 12 valores del índice de claridad diario medio mensual (K_{Tm}).

Sin embargo, en este caso el enfoque es diferente puesto que se utilizan las llamadas Matrices de Transición de Markov. Una vez más, para la obtención de este método Aguiar y Collares-Pereira (AC) se basaron en el estudio estadístico de una gran cantidad de datos de radiación solar disponibles en un gran número de localidades distribuidas entre varias latitudes (Lisboa, Faro de Portugal continental, Ponta Delgada en las Islas Azores, Porto Santo en las Islas

Madeira, ambas pertenecientes a Portugal, Polana en Mozambique, Trappes y Carpentras de Francia y Macao en China). En casi todas las localidades disponían de dos años de radiación registrados. Tras esa observación y estudio se llegó a estas dos importantes conclusiones: i) hay una importante correlación sólo entre la radiación de un día con el día anterior, pero muy poca o casi nula con dos días antes y ii) la función de probabilidad para cualquier periodo del año tiene una forma que está caracterizada por el índice de claridad medio durante ese periodo (generalmente se elige un mes), independiente de la localidad y la época del año.

El modelo se puede resumir como sigue: AC proponen una librería de matrices de transición asociadas, cada una de ellas, a un intervalo específico de K_{Tm} . A cada matriz se asocia, además, un intervalo de valores de K_T definido por sus valores máximo y mínimo ($K_{Tm\acute{a}x}$ y $K_{Tm\acute{m}n}$). Este intervalo se subdivide en 10 subintervalos, tantos como filas y columnas tiene cada matriz. Con toda esta información el proceso para generar cualquier valor de la serie es, una vez determinados los 12 valores de K_{Tm} de partida:

- 1) Seleccionar una Matriz de Transición de Markov (MTM) a partir del valor del índice de claridad medio mensual de enero. Esta matriz lleva asociado un intervalo de K_T [$K_{Tm\acute{m}n}$, $K_{Tm\acute{a}x}$].
- 2) Para obtener el K_T correspondiente al 1 de enero se supone que el valor anterior de la serie, el que correspondería al 31 de diciembre, es el K_{Tm} de diciembre.
- 3) El intervalo de K_T correspondiente se subdivide en 10 subintervalos, tantos como filas tiene la matriz, y se determina a que número de subintervalo corresponde el K_T del día anterior (en este caso se aplica lo comentado en el punto anterior).
- 4) Se genera un número aleatorio, con distribución uniforme dentro del intervalo (0,1). Se suman a continuación los elementos de la fila seleccionada comenzando por la izquierda de la MTM hasta que la suma exceda el valor del número aleatorio obtenido. El número de la columna del último elemento sumado, indica el subintervalo de K_T al que pertenece el valor del índice de claridad que se va a generar. A continuación se le asigna o bien el valor medio de este

subintervalo o bien, para ser más precisos se interpola en el intervalo y se le asigna el valor resultante de la interpolación. Así se habrá generado el primer valor de la serie. Se repite este proceso nuevamente utilizando este nuevo valor como índice de claridad del día anterior.

3.2.- Métodos horarios

Los métodos horarios son aquellos por medio de los cuales las series de radiación que se generen corresponderán a valores en escala horaria. De forma similar a los diarios, estos métodos se basan en estudios previos sobre las propiedades estadísticas de las series de radiación solar, en este caso en el ámbito horario. Estas series cumplen una serie de propiedades entre las que cabe destacar de nuevo la persistencia de la radiación solar, que hará que el valor de radiación solar obtenido durante cierta hora influya en el valor de radiación solar de la hora siguiente.

Igualmente a como se ha visto en el apartado de métodos diarios, de los métodos clásicos propuestos para generar secuencias diarias se presentan a continuación los más sobresalientes.

3.2.1.- Método de Mora y Sidrach [8]

Este método, que se denominará MS, se ha elegido para aplicarlo en el estudio comparativo por dos razones fundamentales. Por un lado, utiliza prácticamente las mismas localidades españolas que se van a utilizar en la implementación del método propuesto en esta tesis, incluso con los mismos años registrados, puesto que proceden de la misma fuente. Por otro lado, es un método bastante interesante, fácilmente aplicable, y conduce a unos resultados de los mejores que se han obtenido con respecto a todos los métodos probados. Además, presenta la gran ventaja de que, como dato inicial de partida, necesita sólo los valores medios mensuales de la radiación global y no los valores diarios como los otros métodos que se explicarán posteriormente.

Aunque en el trabajo referenciado estos investigadores hacen un estudio muy exhaustivo de los datos de que disponen y desarrollan un método muy completo, aquí simplemente se realizará un pequeño resumen de los pasos a seguir. Éstos se pueden resumir en lo siguiente:

1 Cálculo de la variable σ^2

En primer lugar se ha de calcular la variable σ^2 a partir de la siguiente expresión:

$$\log(\sigma^2) = \alpha_1 K_{Tm} + \alpha_2 K_{Tm} + \gamma_m + \varepsilon, \quad (22)$$

donde todos los coeficientes que aparecen en la ecuación anterior están proporcionados por el método.

2 Cálculo de la variable ϕ_1

Esta variable también se obtiene a partir de una ecuación que proponen MS:

$$\phi_1 = \alpha_1 K_{Tm} + \alpha_2 K_{Tm} + \alpha_3 \sigma^2 + \gamma_m + \varepsilon. \quad (23)$$

3 Determinación de la variable θ_1

Este parámetro se calcula a partir de una distribución de Weibull, según explican MS, con valores de a = -11.25 y b = 0.816.

4 Generación de valores $\varepsilon(t)$

Los valores de $\varepsilon(t)$ proceden de una variable gaussiano cuya varianza es σ^2 .

5 Generación de la serie Y(t)

Aquí es donde se aplica el proceso multiplicativo ARMA según la ecuación:

$$Y(t) = \phi_1 Y(t-1) + \varepsilon(t) - \theta_1 \varepsilon(t-s) \quad t=2, 3, \dots, Ns, \quad (24)$$

siendo N el número de días del mes, y s el número de horas por día.

6 Obtención de la serie $X_h(t)$

Esta serie se obtiene una vez conocida la serie Y(t), puesto que la relación entre ambas es

$$Y(t) = X_h(t) - X_h(t-s). \quad (25)$$

7 Obtención de la serie $S_h(t)$

Esta serie está más detallada en el trabajo de MS y puede resumirse con esta ecuación:

$$S_h(t) = 3.96 [\cos \theta_2(t)]^{1.05} X_h(t). \quad (26)$$

8 Obtención de la serie final $G_h(t)$

Finalmente, a partir de la serie de $S_h(t)$ se obtiene la serie final $G_h(t)$ gracias a la relación:

$$G_h(t) = S_h(t) G_{hm} / S_{hm}, \quad (27)$$

siendo G_{hm} y S_{hm} los valores medios mensuales.

3.2.2.- Método de Graham-Hollands [9]

Este método se basa en suponer que los valores del índice de claridad horario k_{th} se puede descomponer en dos factores, según esta expresión:

$$k_{th} = k_{tm} + \alpha, \quad (28)$$

siendo

k_{tm} el factor que lleva implícita la tendencia de la radiación solar, y que dependerá sólo del índice de claridad diario K_T , y α es el factor que lleva implícita la aleatoriedad de la radiación solar, en cuyo cálculo intervienen más factores.

Cada uno de esos elementos se obtiene de la siguiente forma:

1 Cálculo de k_{tm} (Factor de tendencia).

Este factor se calcula con las siguientes expresiones:

$$k_{tm} = \lambda + \varepsilon \exp(-m\kappa), \quad (29)$$

siendo

$$\lambda(K_T) = K_T - 1.16 \cdot K_T^3 \cdot (1 - K_T), \quad (30)$$

$$\varepsilon(K_T) = 0.979 \cdot (1 - K_T), \quad (31)$$

$$\kappa(K_T) = 1.141 \cdot (1 - K_T) / K_T, \quad (32)$$

m = masa de aire (“airmass”), relacionada con la distancia zenital θ_{zs} : $\theta_{zs} = \sec^{-1} m \theta_{zs}$.

2 Cálculo de α . (Factor de aleatoriedad).

El procedimiento se puede resumir en lo siguiente:

i.- Cálculo de σ_α :

σ_α es la varianza de α y Graham demostró que depende del índice de claridad diario K_T según esta expresión:

$$\sigma_\alpha = 0.16 \text{ sen}(\pi \cdot K_T / 0.90). \quad (33)$$

ii.- Cálculo de la variable Gaussiana β

β es una variable que se genera de la siguiente forma

$$\beta(t) = \beta(t-1) \cdot \phi + b(t), \quad (34)$$

siendo

$\beta(t)$ y $\beta(t-1)$ los valores que tiene la variable beta en el instante t (que es el que se va a calcular) y un instante anterior $t-1$ (en este caso serían horas).

ϕ según Graham tiene el valor de 0.35 y está relacionado con la autocorrelación de la serie β .

$b(t)$ es un número aleatorio con distribución gaussiana.

Una vez que se genera la serie de β , hay que calcular la serie α que está relacionada con la serie β según esta expresión (*inversión gaussiana* como en el caso de diarias):

$$0.5 \cdot [1 + \operatorname{erf}(\beta / \sqrt{2})] = F(\alpha, K_T), \quad (35)$$

siendo

erf : Función de error

$F(\alpha, K_T)$: la función de distribución de α con respecto a K_T que se calcula gracias a estas expresiones:

$$u = (k_t - k_{tl}) / (k_{tu} - k_{tl}), \quad (36)$$

con

$$k_{tl} = \max(0.0, k_t - 4 \cdot \sigma_\alpha), \quad (37) \quad k_{tu} = \min(0.9, k_t + 4 \cdot \sigma_\alpha), \quad (38)$$

$$u_{\text{media}} = (k_{tm} - k_{tl}) / (k_{tu} - k_{tl}), \quad (39) \quad \sigma_u = \sigma_\alpha / (k_{tu} - k_{tl}), \quad (40)$$

$$p = u_{\text{media}}^2 \cdot (1 - u_{\text{media}}) / \sigma_u^2 - u_{\text{media}}, \quad (41) \quad q = p \cdot (1 - u_{\text{media}}) / u_{\text{media}}, \quad (42)$$

$$P(k_t, K_T) = P(\alpha, K_T) = \{ \Gamma(p+q) \cdot u^{p-1} \cdot (1-u)^{q-1} \} / \{ \Gamma(p) \cdot \Gamma(q) \cdot (k_{tu} - k_{tl}) \}. \quad (43)$$

Y para calcular $F(\alpha, K_T)$, se integra $P(\alpha, K_T)$.

3.2.3.- Método de Aguiar Collares-Pereira [10]

Este método también propone la descomposición del índice de claridad horario en dos componentes bien distintas: la componente de tendencia y la componente de aleatoriedad, por medio de la expresión:

$$k_{th} = k_{tm} + \alpha. \quad (44)$$

De nuevo el factor de tendencia se calcula con unas expresiones similares a las propuestas por GH:

$$k_{tm} = \lambda + \varepsilon \exp(-m\kappa), \quad (45)$$

$$\lambda(K_T) = -0.19 + 1.12 \cdot K_T + 0.24 \exp(-8K_T), \quad (46)$$

$$\varepsilon(K_T) = 0.32 - 1.6 \cdot (K_T - 0.5)^2, \quad (47)$$

$$\kappa(K_T) = 0.19 + 2.27 \cdot K_T^3 - 2.51 K_T^3, \quad (48)$$

m = masa de aire (“airmass”), relacionada con la distancia zenital θ_{zs} : $\theta_{zs} = \sec^{-1} m \theta_{zs}$.

En este caso para el cálculo de la parte aleatoria, AC observaron que σ depende no sólo de K_T , como proponen GH, sino también de la hora solar. Finalmente el algoritmo que proponen AC es:

Primero se ha de definir un valor δ para permitir desviaciones entre los valores del índice de claridad K_T observados y los sintéticos (por ejemplo un 3 % ó un 5 %). Se deben de conocer los índices de claridad diarios, si éstos no están disponibles habría que acudir a uno de los métodos diarios y generarlos. Una vez que tenemos estos datos de partida, para cada día:

Calcular la hora de salida y puesta del sol (ángulo horario ω_s). Calcular la autocorrelación ϕ_1 según la siguiente expresión:

$$\phi_1 = 0.38 + 0.06 \cos (7.4 K_T - 2.5). \quad (49)$$

A continuación para cada hora del día se deben calcular:

- 1) Los ángulos horarios del principio, medio y final de la hora:

$$\omega_i = (h-13)d\omega, \quad (50)$$

$$\omega = (h-12.5)d\omega, \quad (51)$$

$$\omega_f = (h-12)d\omega, \quad (52)$$

con $d\omega = \pi/12$.

Y calcular la correspondiente altura solar γ (ω). Comprobar que $\omega_f < -\omega_s$ y que $\omega_i > \omega_s$.

- 2) El parámetro cielo claro: k_{cs} (γ). Representa un máximo para k_{th} que varía según la hora solar. Una expresión que es válida para la mayoría de las localidades es:

$$k_{cs}(\gamma) = 0.88 \cos \{ \pi (h-12.5) / 30 \}. \quad (53)$$

- 3) A continuación se debe calcular la componente de tendencia k_{tm} según las expresiones que se han incluido a principio de la sección.

- 4) La desviación estándar σ será:

$$\sigma(K_T, \gamma) = A \exp \{ B (1 - \text{sen}(\gamma)) \}, \quad (54)$$

$$A = 0.14 \exp \{ -20(K_T - 0.35)^2 \}, \quad (55)$$

$$B = 3(K_T - 0.45)^2 + 16 K_T^5. \quad (56)$$

- 5) Un número aleatorio, con distribución gaussiana, r , con media nula y desviación estándar σ^* :

$$\sigma^* = \sigma (1 - \phi_1^2)^{0.5}. \quad (57)$$

- 6) Por último, calcular la variable normalizada “ y ” para cada hora “ h ”, que será la que forme junto con σ de la componente aleatoria α :

$$y(h) = \phi_1 y(h-1) + r, \quad (58)$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{s}y. \quad (59)$$

3.3.- Métodos no clásicos. Método de Mohandes et al.[11]

Como ya se ha mencionado en la introducción de este capítulo, se ha decidido utilizar, además de los métodos clásicos, otro método que proporcione un enfoque no convencional, sino basado en RNA's. Las series de radiación solar que proporcione este método también se incluirá en el estudio comparativo que se explica en un capítulo posterior de esta tesis. En concreto, el método utilizado es el propuesto por Mohandes y otros investigadores [11] de la Universidad de Dhahran en Arabia Saudí. En este método se utilizan funciones de base radial (“Radial Basis Functions RBF”) para estimar la radiación diaria media mensual. Las RBF son un tipo de red neuronal muy parecida al perceptrón multicapa, que es el que se presenta en esta tesis. Puesto que todavía no se ha explicado con detalle el perceptrón multicapa, tampoco se explicará en este apartado el método de Mohandes, sino que se dejará para más adelante, cuando se haga el repaso al perceptrón multicapa presentado en esta tesis.

Referencias

- [1] B.J. Brinkworth. *Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences*. Solar Energy. Vol. **19**. 1977.
- [2] Bolieau E. *Use of simple statistical models in solar meteorology*. Solar Energy **30** 333. 1983.
- [3] G.E.P. Box & G.M. Jenkins. *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco. 1970.
- [4] B. Bartoli et al. *Autocorrelation of daily global solar radiation*. Il nuovo cemento **40**. 1983.
- [5] V. A. Graham, K. G. T. Hollands and T. E. Unny. *A Time Series Model for Kt with Application to Global Synthetic Weather Generation*. Solar Energy, Vol. **40**, No. 3, pp. 269-279. 1988.
- [6] K.G. T. Hollands, R. G. Hughet. *A probability density function for the clearness index, with applications*. Solar Energy vol **30 (3)** 195-209. 1983.
- [7] R. Aguiar, M. Collares-Pereira, J.P. Conde. *Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices*. Solar Energy Vol. **40** pp. 269-279. 1988.
- [8] Ll. Mora and M. Sidrach-de-Cardona. *Multiplicative ARMA models to generate hourly series of global irradiation*. Solar Energy Vol. **63**. pp. 283-291. 1998.
- [9] V. A. Graham and K. G. T. Hollands. *A Method to Generate Synthetic Hourly Solar Radiation Globally*. Solar Energy, Vol. **44**, No. 6, pp. 333-341. 1990.
- [10] R. Aguiar and M. Collares-Pereira. *TAG: A Time-Dependent, Autorregressive, Gaussian Model for Generating Synthetic Hourly Radiation*. Solar Energy, Vol. **49**, No. 3, pp. 167-174. 1992.
- [11] Mohandes M, Balchonaim A., Kassas Rehman S, Halawani TO. *Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation*. 2000. Solar Energy Vol. **68**. N° 2 p. 161-168. 2000.