

GENERACIÓN DE SERIES ARTIFICIALES DE IRRADIACIÓN SOLAR DIARIA PARA CHILE A PARTIR DE LOS DATOS DEL ARCHIVO NACIONAL SOLARIMÉTRICO

Cristián Cortés Aguirre – cgcortes@uc.cl
José Miguel Cardemil – jmcardem@uc.cl
Alberto Ortega Alonso – aortegaa@uc.cl
Rodrigo Escobar Moragas – rescobar@ing.puc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica

Resumen. Existe consenso en la comunidad científica sobre la gran disponibilidad del recurso solar en Chile. Sin embargo, actualmente el país no cuenta con una base de datos completa ni confiable, que permita realizar estimaciones precisas sobre la energía solar disponible para diversas aplicaciones. Una de las pocas fuentes de información disponible es el Archivo Nacional Solarimétrico, donde las mediciones existentes fueron realizadas con actinógrafos Robitzsch Fuess. A partir de estos datos, se proponen dos metodologías estadísticas para generar series artificiales a partir de los promedios mensuales, agrupando la información de acuerdo a 15 climas, que representan 71% de la clasificación climatológica de Chile. La primera metodología utiliza la distribución de frecuencia de días claros (curvas de Bendt) para cada uno de los meses del año, mientras que la otra se basa en la construcción de Matrices de Transición de Markov (MTM). Para determinar la validez de los resultados, las series artificiales se contrastaron con otras fuentes para 6 climas, mediante el test estadístico Kolmogorov Smirnov Integral. A partir de los resultados de este procedimiento se concluyó que las series construidas con MTM entregaron mejores resultados para 5 de los 6 lugares validados. En el contexto de la información existente sobre el recurso solar en Chile, los resultados de este trabajo son un avance significativo al entregar series artificiales diarias -características- de irradiación solar para cada clima, representativas del comportamiento del recurso en el largo plazo.

Palabras clave: Índice de claridad, Curvas de Bendt, Matrices de Transición de Markov.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el 74% de la energía primaria consumida en Chile corresponde a combustibles fósiles, donde el 97% de éstos son importados (CNE, 2012). Esta situación caracteriza una posición vulnerable del país, debido a los riesgos asociados a fallas en el suministro y volatilidad de los precios de estos combustibles. En Marzo de 2012, el gobierno chileno definió la denominada Estrategia Nacional de Energía-ENE (CNE, 2012b), donde se establecen las directrices para el desarrollo energético nacional y se identifica a las energías renovables como una alternativa viable para suministrar energía a bajo costo y con impacto ambiental mínimo. Dentro de las energías renovables, la energía solar ha ganado mayor interés, considerando que la región norte de Chile constituye uno de los sitios de mayor disponibilidad del recurso solar en el mundo (Loster, 2006). En el ENE se identifican las principales barreras de entrada de las energías renovables, dentro de las cuales destaca la escasa información disponible acerca de dicho recurso. En Chile no se han realizado actividades de evaluación del recurso solar a gran escala (Ortega *et al.*, 2010). Sólo existen bases de datos con mediciones para determinados lugares, que generalmente corresponden a las grandes ciudades (Sarmiento, 1995) o modelos físicos que no se encuentran correctamente validados (CNE, 2009).

En este contexto, la modelación estadística del recurso representa una alternativa viable para incrementar la información disponible y así estimar la disponibilidad de recurso en lugares donde no existen mediciones. En esta metodología se considera la radiación solar incidente en la superficie como la suma de una componente determinística y otra estocástica (Tovar-Pescador, 2008). Con el objetivo de prescindir de la componente estacional de los datos registrados y considerar sólo la parte aleatoria, se establece el índice de claridad como un indicador de la transmisividad de la atmósfera existente en un determinado lugar. Este indicador se calcula a partir de los datos según el intervalo de tiempo en el cual son definidos, donde los más utilizados son en base horaria (k_t), diaria (K_t) y mensual (\bar{K}_t).

El presente trabajo consiste en comparar dos metodologías estadísticas con las cuales construir modelos para generar series artificiales de datos de irradiación solar diaria para Chile, en lugares donde no existen datos o éstos no son confiables. Los modelos construidos en este trabajo consideran datos meteorológicos de 15 zonas climáticas del país, almacenados en el Archivo Nacional Solarimétrico (ANS), el cual comprende mediciones realizadas con actinógrafos Robitzsch Fuess en 66 localidades, durante los años 1962 al 2007.

2. DATOS DE IRRADIACIÓN SOLAR

Los datos utilizados en el presente trabajo fueron reunidos a partir de las mediciones disponibles en el Archivo Nacional Solarimétrico (ANS) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Las mediciones que allí existen fueron realizadas con actinógrafos del tipo Robitzsch Fuess. Como el resultado de este instrumento está sujeto a interpretación, los gráficos generados por los actinógrafos fueron evaluados en un solo lugar, para unificar los métodos de lectura (Olivares, 2008).

El error de medición de los actinógrafos se ubica entre el 15% y el 20%, considerando el error propio del instrumento más el inducido por la interpretación del registro en papel. Con una calibración mensual los actinógrafos pueden alcanzar un rango de errores entre 5 y el 10%, por lo que, según la clasificación de radiómetros de la Organización Meteorológica Mundial, a partir de la precisión que alcanzan, son considerados equipos de tercera categoría, donde la primera categoría la constituyen los pirheliómetro de referencia con trazabilidad (Tiba et al., 2000). Sin embargo, existen trabajos que proponen métodos empíricos para reducir el error hasta un 4% (Esteves & De Rosa, 1989).

De los datos disponible en el ANS, se seleccionaron 31 de las 66 localidades en las cuales se posee información, considerando sólo aquellos sitios donde la información disponible contara con al menos 6 años de medición. Además, de los lugares seleccionados, sólo se consideraron años con un mínimo de 300 días medidos y de ellos, sólo se trabajó con los meses que contuvieran a lo menos el 70% de la información. Las localidades y su posición geográfica son detalladas en la Tab. 1.

Tabela 1. Localidades del ANS cuyas series de datos fueron utilizadas en el presente trabajo.

Localidad	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (metros)	Clima	Localidad	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (metros)	Clima
Parinacota	-18° 22'	-69° 16'	4392	ETH[W]	Los Molles	-30° 45'	-70° 25'	2620	BSk's
Murmuntane	-18° 22'	-69° 34'	3280	ETH[W]	Valparaíso	-33° 02'	-71° 36'	70	Csbn
Arica	-18° 30'	-70° 19'	100	BWhn	Pudahuel	-33° 23'	-70° 47'	475	Csb
Iquique	-20° 13'	-70° 09'	8	BWn	Quinta Normal	-33° 27'	-70° 42'	520	Csb
Pica	-20° 30'	-69° 21'	1280	BWk'	Central Rapel	-34° 03'	-71° 36'	265	Csb
Calama	-22° 28'	-68° 55'	2270	BWk'	Curicó	-34° 58'	-71° 14'	228	Csb
San Pedro de Atacama	-22° 55'	-68° 11'	2436	BWk'	Concepción	-36° 50'	-73° 02'	15	Csbn's
Antofagasta	-23° 28'	-70° 26'	122	BWn	Carillanca	-38° 40'	-72° 25'	200	Cfsb
El Salvador	-26° 16'	-69° 32'	1660	BWk'	Temuco	-38° 45'	-72° 38'	114	Cfsb
Chañaral	-26° 20'	-70° 37'	9	BWn	Huilo Huilo	-39° 49'	-72° 00'	320	Cfsb
Isla de Pascua	-27° 10'	-109° 26'	41	Afa	Lago Chapo	-41° 26'	-72° 35'	247	Cfb
Copiapó	-27° 21'	-70° 20'	370	BWh	Alto Palena	-43° 37'	-71° 47'	226	Cfc
Vallenar	-28° 35'	-70° 46'	469	BWh	Kampennaike	-52° 41'	-70° 54'	20	Cfc
La Serena	-29° 54'	-71° 15'	32	BSn	Pta. Arenas	-53° 00'	-70° 50'	33	Cfc
Ovalle	-30° 34'	-71° 11'	370	BSks	Pto. Williams	-54° 56'	-67° 29'	8	Cfc
La Paloma	-30° 41'	-71° 02'	342	BSks					

El territorio nacional abarca dominios climáticos sumamente disímiles, desde desértico tropical, subtropical, templado, hasta polar. Estos climas además son alterados por factores como la latitud, la influencia oceánica y el relieve, entre otros (INE, 2009). En este contexto, las localidades en la Tab. 1 fueron agrupadas según los tipos de clima de Chile, con el fin de (mediante la aplicación de los algoritmos) extrapolar las mediciones existentes a lugares con condiciones meteorológicas similares donde no exista información disponible.

3. METODOLOGÍA

A la fecha, se han propuesto varios métodos que modelan la radiación solar a partir de datos irradiación solar de larga data, entre estos destacan las Series de Fourier, Redes Neurales Artificiales, Procesos ARMA (AutoRegresive Moving Average), Curvas de Bendt y Matrices de Transición de Markov. En particular, el presente trabajo utiliza los últimos dos métodos, los cuales son descritos a seguir.

3.1 Curvas de Bendt

El método de las curvas de Bendt propone generar series artificiales basado en que las distribuciones de índice de claridad diario para un mes se pueden determinar a partir de un valor de \bar{K}_t (Liu & Jordan, 1960). Por lo tanto, es posible presentar una formulación analítica para dichas curvas de distribución (Bendt et al., 1981), la cual permita conocer los valores de irradiación solar diaria de un mes conociendo sólo el promedio mensual de dicha magnitud. Si bien las primeras investigaciones plantearon la universalidad de la forma de las curvas de distribución, estudios posteriores han comprobado que ella varía según la estación del año (Fig. 1) y/o el clima del lugar en estudio (Babu & Satyamurty, 2001; Tiba et al., 2007; Vijayakumar, 2004, Tovar-Pescador, 2008).

Como no es posible determinar un orden de ocurrencia de los días sólo considerando la información de la curva de Bendt, se han desarrollado más de una metodología para generar la secuencia de los datos en las series artificiales anuales. Knight et al. (1991) propone distribuir aleatoriamente los días del mes y una vez construido el año, utilizar como criterio de evaluación si la autocorrelación parcial con lag 1 de la serie anual generada se encuentra dentro de un determinado rango establecido a partir de una revisión bibliográfica. Por otra parte, Santos et al. (2003) determina el orden de ocurrencia de los días en cada mes a partir de un modelo ARIMA(1,1,1) cuyos parámetros fueron estimados a partir de mediciones específicas.

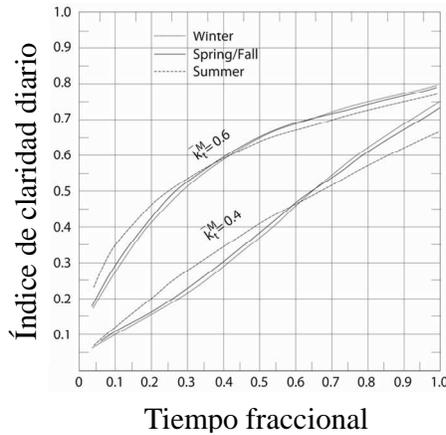


Figura 1- Variación de la distribución de días claros con la estación del año para similares índices de claridad mensual promedio (Tovar-Pescador, 2008).

El método de construcción de las curvas de Bendt utilizado aquí se inicia confeccionando, para cada mes calendario de cada año, la distribución de frecuencia con que ocurren los índices de claridad diarios. Posteriormente, se construye la distribución acumulada de dichos índices. Finalizados los pasos anteriores, se reúnen las series con igual \bar{K}_t por mes, de todas las localidades que poseen climas idénticos, por rangos cuyo tamaño es 0,05 (Bartoli et al., 1979) y cuyo centro es el valor de \bar{K}_t que los define. Por ejemplo, todos los meses de Enero del clima Desértico Normal (*BWk*) cuyo índice de claridad promedio mensual se encuentre en el intervalo [0,525;0,575], se agrupan en “Enero 0,55”.

Una vez agrupadas las series según su índice de claridad promedio mensual, por mes y para cada clima, se procede a buscar la curva que mejor se ajuste a esta distribución de los datos. Para esto, los autores utilizaron la herramienta de ajuste no lineal denominada *Curve Fitting*, disponible en el *software* MATLAB[®]. Este algoritmo utiliza el método de ajuste por mínimos cuadrados para obtener los coeficientes de la curva que mejor se aproxima a la serie de datos ingresados. Una vez conocida la forma teórica de las curvas de distribución de días claros (Tiba et al., 2007; Bendt et al., 1981), se propusieron 5 modelos de ajuste no lineal, presentados en la Tab. 2. De dicha tabla, se seleccionó la función que mejor aproxima la distribución de los datos agrupados. La selección se realizó mediante la revisión de la gráfica que reúne los resultados de cada uno de los ajustes y los datos. Junto a ello, para la decisión también se consideró la distribución del error a lo largo de la serie, conforme observado en la Fig. 2.

Tabela 2. Funciones disponibles para ajustar las distribuciones de K_t

Ajuste 1	$y = \alpha_1 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot x) + \alpha_3 \cdot \exp(\alpha_4 \cdot x)$
Ajuste 2	$y = \alpha_1 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot x) + \alpha_3 \cdot \exp(\alpha_4 \cdot x) + \alpha_5$
Ajuste 3	$y = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \exp(\alpha_3 \cdot x)$
Ajuste 4	$y = \frac{\alpha_1 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot x) - \alpha_3 \cdot \exp(-\alpha_4 \cdot x)}{\alpha_5 \cdot \exp(\alpha_6 \cdot x) + \alpha_7 \cdot \exp(-\alpha_8 \cdot x)}$
Ajuste 5	$y = \alpha_1 \cdot (1 - \exp(\alpha_2 \cdot x))$

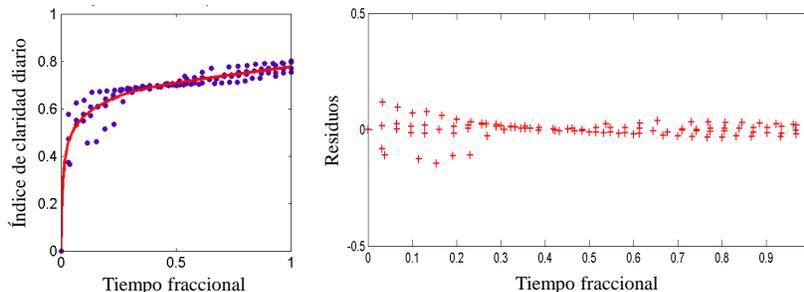


Figura 2- Ajuste no lineal escogido para los datos del mes de Enero del clima *BWk* cuyo índice de claridad promedio mensual es 0,7.

La generación de las series sintéticas a partir de las curvas de Bendt se basa en el método propuesto en Knight et al. (1991). Sin embargo, en el presente trabajo los valores de K_t para los días del mes fueron obtenidos a partir de la curva de ajuste seleccionada. Adicionalmente, se procuró que el año generado posea una autocorrelación para *lag* 1, dentro de un determinado intervalo, cuyos límites se definieron a partir del promedio de las autocorrelaciones anuales de las series del *AMS* (denominado como *AC_p* en la Fig. 3) utilizadas para construir las curvas. La selección de la distribución de días para cada mes se realiza a partir del índice de claridad promedio mensual.

Con base en lo definido anteriormente, el algoritmo sigue la estructura detallada en el diagrama de flujo de la Fig.3.

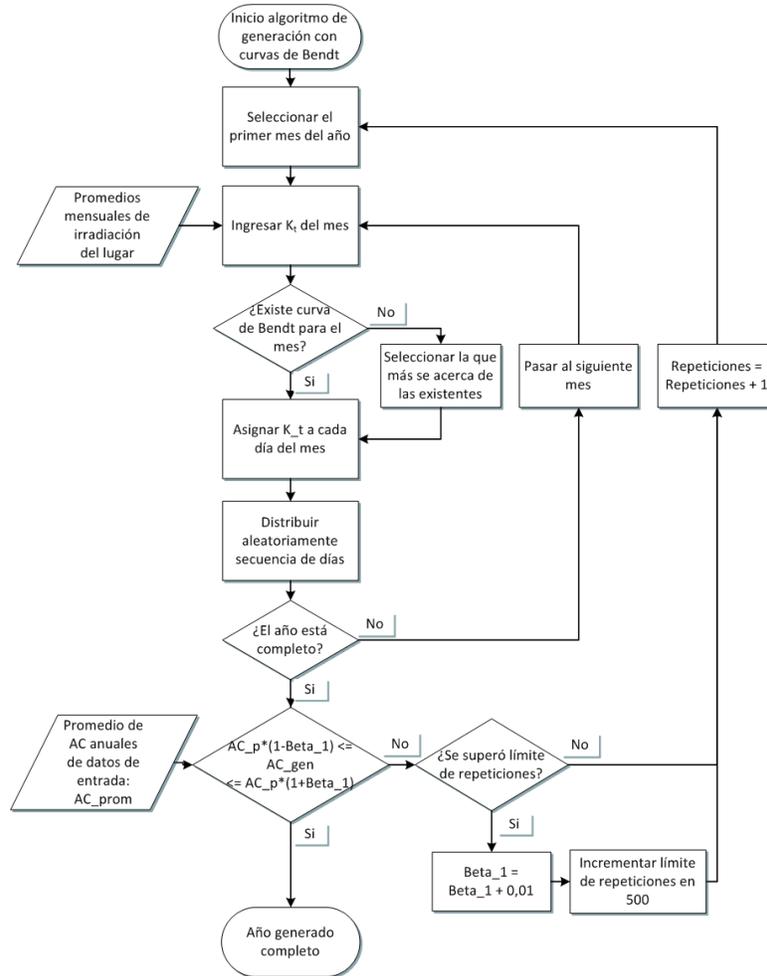


Figura 3- Diagrama de flujo del algoritmo para generar series artificiales a partir de las distribuciones de día claro.

3.2 Matrices de Transición de Markov

El otro método empleado en este trabajo utiliza como herramienta principal las denominadas Matrices de Transición de Markov (*MTM*). Esta metodología se ha aplicado para simular la distribución de variables meteorológicas, tanto a escala diaria como horaria (Poggi et al., 2000). Se ha aplicado en el área de la energía solar considerando cadenas principalmente de primer orden y la variación mas común entre los distintos autores que desarrollan trabajos en la materia es cómo se determinan los estados a representar con cada una de las matrices. Por ejemplo, Aguiar et al. (1988) emplean este método construyendo matrices para diez diferentes rangos de \bar{K}_t cuyas filas y columnas representan cada uno de los diez rangos establecidos en cada matriz para los valores que puede tomar K_t . Por otro lado, Poggi et al. (2000) define veinte estados de k_t y las *MTM* se generan para cada uno de estos en función del promedio mensual de k_t .

Las Matrices de Transición de Markov (*MTM*) permiten generar series artificiales representativas de cualquier localidad donde predomine un comportamiento meteorológico definido. La metodología establecida en el presente trabajo corresponde a la presentada por Aguiar et al. (1988), considerando los mismos 10 rangos de \bar{K}_t definidos por esos autores, conforme presentado en la Fig. 4. De esta manera, para cada clima se obtiene una biblioteca de 10 matrices en la que cada una representa un rango de los posibles valores de \bar{K}_t , con los que posteriormente se generan las series artificiales en cada zona.

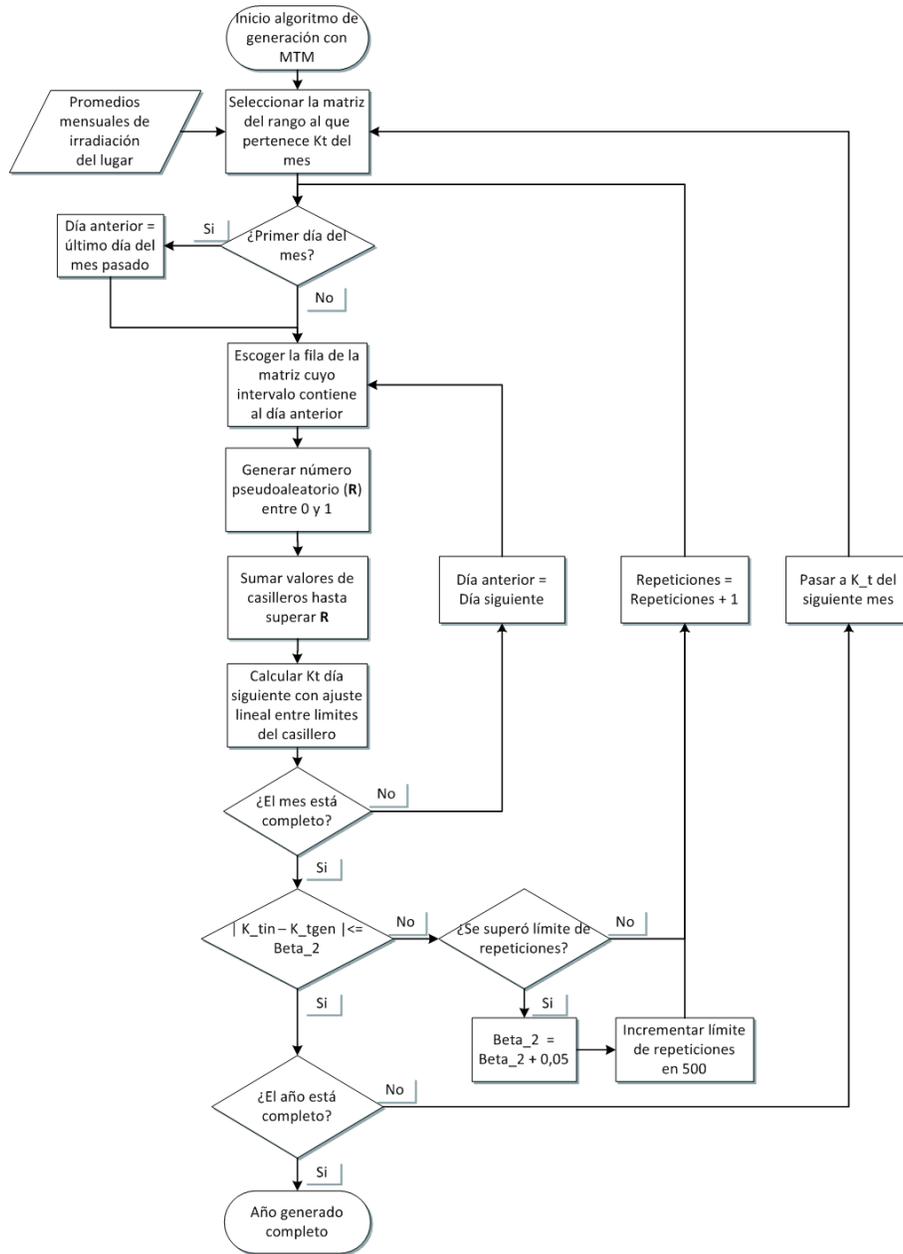


Figura 4- Diagrama de flujo para el proceso de generación mediante *MTM*.

4. RESULTADOS

A partir de ambas metodologías implementadas y de la información en el *ANS*, se generaron 15 series artificiales, usando ambas (Curvas de Bendt y *MTM*), para 15 climas de Chile. Para validar las metodologías utilizadas se aplicó el test de contrastación de hipótesis Kolmogorov - Smirnov Integral (*KSI*) a las series artificiales generadas en el presente trabajo, contrastando los resultados con series de radiación solar de otras fuentes. Una de esas fuentes son los archivos climatológicos disponibles en la biblioteca meteorológica del programa EnergyPlus, donde se encuentran series de datos en formato *EPW* (Energy Plus Weather format) para Antofagasta, Isla de Pascua, Santiago, Concepción y Punta Arenas. Estos datos corresponden a un año meteorológico típico, donde los datos de radiación son estimados a partir de información meteorológica registrada durante más de 15 años. La otra fuente corresponde a series anuales medidas en terreno en dos lugares específicos: Pudahuel y Sierra Gorda. Los datos de la primera localidad fueron medidos por la Dirección Meteorológica de Chile (*DMC*) con un piranómetro CM11, mientras que los datos de la segunda localidad fueron obtenidos mediante un Rotating Shadow Band Radiometer (*RSBR*). La Tab. 3 presenta un resumen de los datos meteorológicos utilizados para la validación de las metodologías implementadas en el presente trabajo.

Conforme a lo indicado anteriormente, en Chile existe muy poca información acerca del recurso solar y de las características de éste. Esta situación se hace evidente ante la limitada cantidad de series de datos para validar los

resultados aquí obtenidos. Además, la evaluación de dichos resultados hace necesario utilizar series que representen el comportamiento del recurso en el largo plazo, para cada localidad, mientras que los pocos datos de calidad disponibles actualmente datan de menos de 5 años.

Tabela 3. Series de datos meteorológicos utilizadas para la validación de los resultados.

Lugar	Fuente	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Clima	Años registrados
Antofagasta	EPW	-23,43	-70,43	120	BWn	1982-1999
Isla de Pascua	EPW	-27,15	-109,42	47	Afa	1986-1992
Santiago	EPW	-33,38	-70,78	476	Csb	1985-1998
Concepción	EPW	-36,77	-73,05	16	Csbn's	1982-1999
Punta Arenas	EPW	-53	-70,85	37	Cfc	1987-1998
Sierra Gorda	Medición	-22,93	-69,1	2143	BWk	2009
Pudahuel	Medición de DMC	-33,38	-70,78	475	Csb	2004

4.1 Test KSI

Para estimar el grado de ajuste entre las series generadas y las series medidas en terreno o las pertenecientes al *EnergyPlus*, se aplica el test *KSI* (Espinar et al., 2009; METEOTEST, 2010), que corresponde a una variación del test estadístico no paramétrico de contrastación de hipótesis Kolmogorov – Smirnov (Massey, 1951). En él se compara la similitud de las distribuciones de probabilidad acumulada mediante la definición de una distancia crítica máxima aceptable entre ambas. La modificación de Espinar et al. (2009) aplicada en este trabajo define dos parámetros, *KSI* y *KSI_{over}*, los cuales cuantifican la distancia existente entre ambas distribuciones acumuladas. En la Tab. 4 se muestran los resultados del test *KSI*, para las series generadas a través de Curvas de Bendt y para aquellas generadas a través de MTM.

Tabela 4. Resultados del test *KSI* para las localidades de la validación.

Lugar	Bendt		MTM	
	<i>KSI</i> (%)	<i>KSI_{over}</i> ((%))	<i>KSI</i> (%)	<i>KSI_{over}</i> (%)
Antofagasta	15,4	0	23,3	0
Isla de Pascua	27,6	0	17,8	0
Santiago	62	23	38,2	1,9
Concepción	74,1	19,2	65,8	13,1
Punta Arenas	22,9	0	19,8	0
Sierra Gorda	73,1	17,3	26,2	1
Pudahuel	59,4	15,3	37,2	0,1

Los valores del parámetro *KSI_{over}* que sean mayores a cero rechazan la hipótesis de que las series artificiales propuestas tengan la misma función de probabilidad acumulada que las series originales. Esto ocurre para Santiago, Concepción, Pudahuel y Sierra Gorda, en orden decreciente en cuanto a la magnitud de la diferencia con la serie original. Para todos los casos la serie obtenida con *MTM* posee magnitudes menores de *KSI_{over}* que las obtenidas por las series generadas con el algoritmo que usa las Curvas de Bendt. Es interesante notar que en todas las comparaciones donde se refuta la proposición de que ambas distribuyen igual, existen notorias diferencias para los valores más altos de irradiación solar diaria, conforme se observa en las Fig. 5 y 6. Por otro lado, de los casos donde no se registran distancias por sobre el valor crítico (*KSI_{over}* igual a cero), en la mayoría de ellos las series generadas mediante *MTM* resultan en valores menores de *KSI* que el algoritmo de curvas de Bendt. Esto quiere decir que el primero aproxima de mejor forma la serie original. El único lugar donde este comportamiento no se presenta es en Antofagasta.

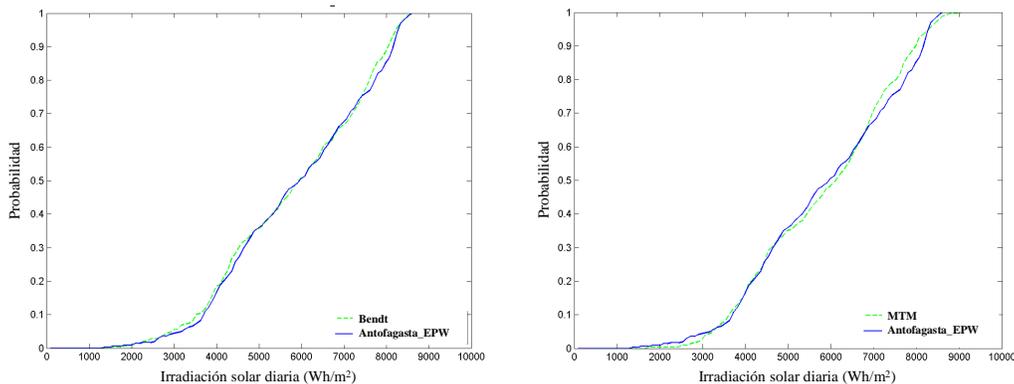


Figura 5- Comparación de curvas de distribución de probabilidad acumulada para Antofagasta

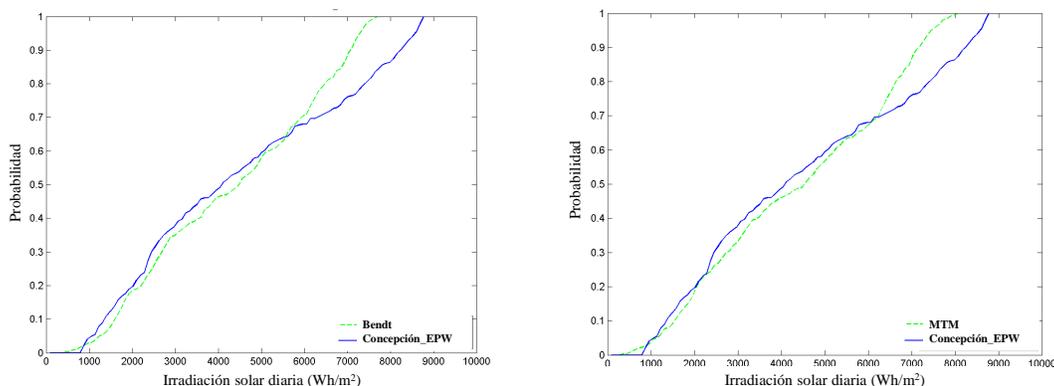


Figura 6- Comparación de curvas de distribución de probabilidad acumulada para Concepción

4.2 Generación de series artificiales para los climas trabajados.

A partir de los datos del ANS, para cada clima trabajado, se calculó el valor de \bar{K}_t de cada mes. Estos valores fueron ingresados a los algoritmos implementados y detallados en la Tab. 5, bajo la columna denominada *Input*. Posteriormente, se obtuvieron años representativos de cada clima expresados en función de K_t . Éstos, al estar expresados como K_t , representan el nivel de radiación solar de un lugar determinado al multiplicar esos valores por la irradiación extraterrestre.

Tabela 5. Promedios mensuales ingresados y los obtenidos para cuatro meses del año.

	Enero			Abril			Julio			Octubre		
Clima	Input	Bendt	MTM	Input	Bendt	MTM	Input	Bendt	MTM	Input	Bendt	MTM
Afa	0,47	0,46	0,47	0,42	0,40	0,42	0,42	0,40	0,43	0,46	0,44	0,46
BWhn	0,66	0,66	0,65	0,62	0,61	0,62	0,53	0,54	0,53	0,63	0,65	0,63
BWn	0,52	0,50	0,52	0,47	0,45	0,47	0,45	0,45	0,45	0,48	0,49	0,48
BWk	0,63	0,64	0,62	0,65	0,65	0,64	0,65	0,65	0,65	0,67	0,65	0,68
BWh	0,54	0,55	0,53	0,48	0,50	0,48	0,48	0,50	0,49	0,54	0,55	0,53
ETH[w]	0,48	0,49	0,49	0,61	0,61	0,61	0,64	0,65	0,64	0,62	0,60	0,63
BSn	0,49	0,50	0,49	0,39	0,39	0,38	0,39	0,40	0,38	0,43	0,44	0,42
BSks	0,61	0,61	0,61	0,53	0,55	0,52	0,49	0,50	0,49	0,58	0,60	0,59
BSk's	0,67	0,66	0,67	0,66	0,66	0,66	0,55	0,53	0,56	0,64	0,66	0,64
Csbn	0,51	0,51	0,50	0,41	0,40	0,40	0,36	0,35	0,36	0,46	0,45	0,46
Csbn's	0,55	0,55	0,55	0,48	0,50	0,47	0,38	0,39	0,37	0,49	0,50	0,50
Csb	0,54	0,56	0,55	0,42	0,40	0,42	0,31	0,29	0,31	0,46	0,45	0,46
Cfsb	0,51	0,50	0,51	0,38	0,40	0,38	0,30	0,30	0,29	0,42	0,40	0,41
Cfb	0,42	0,39	0,43	0,35	0,34	0,34	0,27	0,26	0,27	0,36	0,34	0,36
Cfc	0,43	0,45	0,42	0,38	0,39	0,37	0,35	0,35	0,34	0,46	0,46	0,47

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta la aplicación de dos metodologías para generar series artificiales de irradiación solar diaria. En este contexto datos representativos de para 15 zonas climáticas de Chile, son considerados. Los resultados obtenidos entregan una aproximación de las características del recurso solar en lugares donde no se dispone de mediciones.

Con base en la acotada información disponible, se puede concluir que las series generadas son una representación útil del recurso disponible en zonas de Chile que despiertan poco interés para la industria solar, como Isla de Pascua, Punta Arenas y en menor medida Antofagasta. Para la región norte (Sierra Gorda), centro (Santiago, Pudahuel) y centro – sur (Concepción) del país, las series no muestran buenos resultados, sobre todo para los valores más elevados de irradiación solar que ocurren a lo largo del año, como se observa en las curvas de distribución de probabilidad acumulada. Además, el resultado del test *KSI* permite concluir que en todos los casos validados, salvo en Antofagasta, las series generadas con *MTM* generan resultados que se aproximan más a las series externas que los obtenidos mediante la metodología basada en las curvas de Bendt.

Finalmente, al no existir grandes diferencias entre ambos métodos para obtener las series artificiales se concluye que, para la información utilizada en este trabajo, no representa un cambio significativo la variación intermensual del comportamiento del recurso solar. Esto pues las *MTM* no distinguen entre los diferentes meses del año, sólo por promedio mensual, mientras que en las curvas de Bendt si existe esa diferencia.

REFERENCIAS

- Aguiar, R. J., Collares-Pereira, M., & Conde, J. P., 1988. Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov Transition Matrices, *Solar Energy*, 40(3), 269-279.
- Babu, K. S., & Satyamurty, 2001. Frequency Distribution of Daily Clearness Indices Through Generalized Parameters, *Solar Energy*, 70(1), 35-43.
- Bartoli, B., Catalanotti, S., Cuomo, V., Francesca, M., Serio, C., Silvestrini, V., y otros, 1979. Statistical Correlation between Daily and Monthly Averages of Solar-Radiation Data, *IL NUOVO CIMENTO*, 222-234.
- Bendt, P., Collares-Pereira, M., & Rabl, A., 1981. The frequency distribution of daily insolation values, *Solar Energy*, 27, 1-5.
- CNE. 2009. Modelación de recurso solar y eólico en el norte de Chile. Recuperado el 7 de 6 de 2011, de <http://condor.dgf.uchile.cl/EnergiaRenovable/Chile/>
- CNE. 2012. Balance Nacional de Energía 2011, Comisión Nacional de Energía. www.cne.cl.
- CNE. 2012b. Estrategia Nacional de Energía 2012-2030 Comisión Nacional de Energía. www.cne.cl.
- Espinar, B., Ramírez, L., Drews, A., Beyer, H. G., Zarzalejo, L. F., Polo, J., y otros, 2009. Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations, *Solar Energy*, 83, 118-125.
- Esteves, A., & De Rosa, C., 1989. A simple method for correcting the solar radiation readings of a Robitzsch-type pyranometer, *Solar Energy*, 42(1), 9-13.
- INE, I., 2009. Recuperado el 19 de 11 de 2011, de sitio web de Instituto Nacional de Estadísticas - Chile: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_medio_ambiente/medio_ambiente.php
- Knight, K. M., Klein, S. A., & Duffie, J. A., 1991. A methodology for the synthesis of hourly weather data, *Solar Energy*, 46(2), 109-120.
- Liu, B., & Jordan, R., 1960. The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, 4, 1-19.
- Loster, M., 2006. Total Primary Energy Supply: Required Land Area. Recuperado el 6 de Junio de 2011, de http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/
- Massey, F., 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit, *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 68-78.
- METEOTEST, 2010. METEONORM Version 6.0.
- Olivares, A., 11 de Septiembre de 2008. Laboratorio de Evaluación Solar. Recuperado el 20 de Noviembre de 2011, de <http://www.labsolar.utfsm.cl/>
- Ortega, A., Escobar, R., Colle, S., & Luna de Abreu, S., 2010. The state of solar energy resource assessment in Chile. *Renewable Energy*, 2514-2524.
- Poggi, P., Notton, G., Muselli, M., & Louche, A., 2000. Stochastic Study of Hourly Total Radiation in Corsica Using a Markov Model, *International Journal of Climatology*, 20, 1843-1860.
- Santos, J. M., Pinazo, J. M., & Cañada, J., 2003. Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value K_t . Determining the daily sequence using stochastic models, *Renewable Energy*, 28, 1523-1544.
- Sarmiento P., 1995. *Energía Solar: Aplicaciones e Ingeniería*. 3ª ed. Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- Tiba, C., Fraidenraich, N., Moszkowicz, M., Camelo Cavalcant, E. S., Maciel Lira, F. J., & de Barros Nogueira, Á. M., 2000. *Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres*. Recife, Brasil: Universitária da UFPE.
- Tiba, C., Siqueira, A., & Fraidenraich, N., 2007. Cumulative distribution curves of daily clearness index in a southern tropical climate, *Renewable Energy*, 32, 2161-2172.
- Tovar-Pescador, J., 2008. Modelling the Statistical Properties of Solar Radiation and Proposal of a Technique Based on Boltzmann Statistics. En V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* Heidelberg: Springer.
- Vijayakumar, G., 2004. Assessment of solar radiation data used in analyses of solar energy systems. University of Wisconsin-Madison.

GENERATION OF ARTIFICIAL SERIES OF DAILY SOLAR RADIATION FOR CHILE USING DATA FROM THE ANS

Abstract. *There is consensus within the scientific community about the wide availability of solar radiation in Chile. However, a proper Chilean atlas of solar energy, with actual data of low uncertainty is not available. One of the few data available are stored in the Archivo Nacional Solarimétrico (ANS) where the measurements were collected by using actinography. The present work proposes two methodologies to use these data, and generate artificial series of daily solar radiation using monthly average of solar radiation. The first methodology uses the so called Bendt curves method, whilst the second is based on the construction of Markov Transition Matrix (MTM). The two methodologies are compared with other series using the KSI test. The results show that the series build using the MTM methodology present better agreement with the series used as reference. Considering the lack of information about the solar resource in Chile the results presented herein are a significant contribution to the characterization of the solar radiation, since the generated series will allow further studies of the resource in each climate, considering long term data.*

Keywords: *Clearness Index, Bendt Curves, Markov Transition Matrix.*