

CARACTERIZACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y CONSTRUCCIÓN DE SERIES SINTÉTICAS REDUCIDAS DE RADIACION SOLAR (SSRRS) PARA SIMULAR EQUIPOS QUE LA COLECTAN CON SIMUSOL.

Diego Saravia

Depto. De Física. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150. CP 4400,
Salta, Argentina Fax : 54-387-4255489, E-mail: diego.saravia@gmail.com

Recibido 03/08/16, aceptado 08/10/16

RESUMEN: Se presentan las SERIES SINTÉTICAS RESUMIDAS de RADIACIÓN SOLAR (SSRRS) como un concepto y metodología para caracterizar series temporales de radiación solar mediante INDICADORES estadísticos que las definen y permiten construirlas y con ellas simular equipos que colectan la radiación. Con las SSRRS se aproxima el comportamiento de los equipos al que tienen con las series temporales caracterizadas. Se logra que los equipos obtengan un rendimiento similar en cada prueba, al que obtendrían usando las series temporales completas, que pueden tener varios años de datos de una localidad, o bien ser un año típico. Por otra parte se introduce software que facilita utilizar los datos disponibles de radiación, que permite crear las SSRRS y usarlas en el SIMUSOL o en otros simuladores. La ventaja fundamental de las SSRRS es la posibilidad de simular sistemas en forma ágil, facilitando su optimización y las pruebas repetidas.

Palabras clave: series sintéticas reducidas de radiación, SSRRS, simulación, SIMUSOL.

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS, ALCANCE.

El modelado y la predicción de la radiación solar tal como llega a la superficie de la tierra ha resultado ser una disciplina con dificultades:

- Es complejo construir modelos estadísticos que representen y más aún predigan adecuadamente, las fluctuaciones de la radiación en diferentes marcos y escalas temporales (Aguar y Collares-Pereira, 1992; Avila Blas et al., 1999 y 2000; Abdulla et al., 2000; Vignola, 2001; Abril, 2004, Grossi y Spreafichi, 2007; Taleb, 2009; Wang et al., 2012; Perez et al., 2015; Fortuna et al., 2016).
- El comportamiento de los equipos que aprovechan la radiación solar es fuertemente dependiente de sus fluctuaciones y no sólo de sus valores medios en una escala temporal relativa a su capacidad de almacenamiento.
- El clima terrestre ha cambiado considerablemente a lo largo del tiempo y nos encontramos en un período donde se esperan fuertes y rápidos cambios. En (Lovelock, 2006), su autor llega al extremo de proponer desestimar el uso de energías basadas en el clima, como la solar y la eólica, debido al cambio climático.

Asi mismo la tarea de diseñar y optimizar un equipo que funcione unos 10 años y una vez diseñado el predecir su producción y su resultado económico es dificultosa. En (Klein y Beckman, 1987) se plantea que se requieren cientos de años de datos para tener una descripción razonable de la radiación en un lugar y que diferentes períodos de 10 años, tendrán medias significativamente diferentes.

Más allá de todas estas dificultades, se usan datos preexistentes para estimar como sera la radiación solar en el tiempo de vida típico de una instalación. Existen, libremente disponibles, varias fuentes de series temporales que contienen datos climáticos, incluyendo valores de radiación, aptos para ser utilizados en las simulaciones.

Muchos tipos de equipos utilizan la radiación solar. Nos concentraremos en este trabajo en equipos con almacenamiento, en los cuales sus usuarios disponen de una fuente adicional para los momentos donde el equipo no puede proveer la potencia requerida, y donde el costo de esa potencia pueda ser estimado y vinculado con la energía no provista.

El enfoque habitual para esta problemática es construir años típicos que representan el comportamiento medio de muchos años en uno sólo (Wilcox y Marion, 2008). Las síntesis de radiación solían usarse antes de disponer de datos satelitales (Chapman, 1990).

En el presente trabajo se explora la posibilidad de simular equipos usando series temporales "sintéticas" relativamente cortas. Hablamos de unos 14 días, en vez de un "año típico". A los efectos de ser usadas para diseñar y optimizar equipos.

La idea es generar, con diferentes modelos, secuencias de días ubicados en diferentes momentos del año, cada una de estas secuencias con días con diferente intensidad de radiación.

Las intensidad y la cantidad de días "iguales" en cada secuencia se optimizan comparando y haciendo similares los efectos en diferentes equipos simulados con la radiación sintética versus la real.

MÉTODOS Y DATOS

Equipo de aprovechamiento de la radiación solar.

Los equipos considerados tienen varias cuestiones en la predicción de sus RESULTADOS.

- La recolección de energía está relacionada con el área de colección, y los mecanismos de seguimiento o de forma de captación de la radiación total sobre la superficie. Y, desde ya, con la radiación solar efectivamente recibida en la superficie.
- Las pérdidas de energía están relacionadas con parámetros constructivos de eficiencia, con el nivel de energía acumulado y con la saturación de la acumulación. El viento y la temperatura ambiente son otros de los factores que las influencia. La temperatura influye en forma diferente en equipos fotovoltaicos que en térmicos. En éste trabajo se han simulado sólo sistemas térmicos pero se podrían usar las mismas técnicas para fotovoltaicos.
- Hay diferentes perfiles de uso de la energía acumulada.
- Existen períodos en los que no se recibe radiación suficiente y se agota el almacenamiento, para ellos se requiere usar una fuente alternativa. (NERC, 2011; Klein y Beckman, 1984).

En este trabajo se ha restringido la clase de equipos a simular. Se usan equipos colectores solares para calentar agua, variando las siguientes CARACTERÍSTICAS de los mismos (en negrita el nombre de la columna en la Tabla 3):

- **Area:** de colección.
- **Sig-L:** Sigma menos la latitud, sigma es el ángulo del colector con relación a la horizontal (plano fijo).
- **Masa:** tamaño del tanque de almacenamiento.
- **Extr:** total de energía extraída día tras día.

Y dejando fijos, aunque podrían variarse, su eficiencia, el perfil de extracciones horarias de agua a determinada temperatura y su reemplazo por agua a otra temperatura.

Se ha usado como temperatura de extracción 51.7 C y se adoptó el perfil de extracciones para equipos pequeños, ambos según lo indicado por la norma (GPO, 2016).

El equipo usado en este trabajo es "abstracto", dado que no corresponde a un equipo físico determinado, sino que se caracteriza en términos muy generales mediante un modelo computacional simple que tiene en cuenta: pérdidas de energía vinculadas a la temperatura y nivel de acumulación;

pérdidas por exceso de acumulación, y energía sustituta para garantizar la carga. Ese modelo computacional es el usado para hacer las comparaciones cuyos resultados se incorporan y discuten.

Se optimiza sobre los siguientes RESULTADOS de la simulación, reduciendo las diferencias cuadradas entre los obtenidos de las series completas y las reducidas. Todos los valores son de potencia. Las unidades son las correspondientes al Sistema Internacional, pero son irrelevantes para las discusiones del presente trabajo:

- **RadTot:** potencia total recibida, tal como lo hicieron (Liu y Jordan, 1963) en un estudio sin acumulación.
- **RadUsad:** potencia total aprovechada. Lo que está correlacionado con la potencia auxiliar (AUX), -métodos tipo LOLP (NERC, 2011)-, dado que la suma de las dos es constante y depende de lo que se demanda al sistema. La segunda es el objetivo a reducir en una instalación de este tipo, pero la primera es más simple de interpretar y de manejar para el software dado que sus variaciones relativas son menores.
- **PerdTo:** pérdidas por acumulación saturada o tope.
- **Perd:** otras pérdidas.

Datos de clima utilizados

Las series temporales usadas incorporan la radiación mediante DHI, GHI, DNI (Diffuse Horizontal Irradiance, Global Horizontal Irradiance, Direct Normal Irradiance), (Maxwell,1987; Vignola, 2012, Sengupta et al., 2015a) , temperatura del aire y presión atmosférica, y cuando falta alguno de los datos se estima.

A falta de uno o más datos de radiación como DHI, GHI, DNI , se estiman a partir de los presentes con diversos modelos simplificados y finalmente se calcula la radiación sobre el plano de colección, ésta información se genera en un archivo pasible de ser leído por SIMUSOL (Saravia y Saravia 2000; Alía et al., 2002) .

La presión atmosférica se utiliza en las series sintéticas para estimar la masa de aire (Kasten y Young, 1989). A falta de la misma se utiliza la altura del lugar para estimarla.

Para la temperatura de reemplazo del agua acumulada se usa una predicción basada en la temperatura del aire, promediando 11 días, (Zheng 1993; Martincova, 2011), o bien una temperatura de 14.4 C indicada en los ensayos estandar (GPO, 2016).

Se usaron series de datos obtenidas del NREL, en su ajuste del 2010 (Wilcox, 2010; Sengupta et al., 2015b, RAFG, 2015), en formato TMY3 (Wilcox y Marion, 2008) . En particular se ha trabajado con una lista reducida de lugares tomada de (Fortuna et al., 2016), dado que son datos muy estudiados y conocidos que utilizan correlaciones satelitales contra datos efectivamente medidos en series temporales cuyo inicio de recolección es de los más antiguos existentes. Por otro lado se espera que la cooperación internacional lleve a este tipo de formatos los datos de todo el planeta.

```
#Source,Location ID,City,State,Country,Latitude,Longitude,Time Zone,Elevation,Local Time Zone,Clearsky DHI Units,Clearsky DNI Units,Clearsky GHI Units,Dew Point Units,DHI Units,DNI Units,GHI Units,Solar Zenith Angle Units,Temperature Units,Pressure Units,Relative Humidity Units,Precipitable Water Units,Wind Direction Units,Wind Speed,Snow Depth Units,Cloud Type -1,Cloud Type 0,Cloud Type 1,Cloud Type 2,Cloud Type 3,Cloud Type 4,Cloud Type 5,Cloud Type 6,Cloud Type 7,Cloud Type 8,Cloud Type 9,Cloud Type 10,Cloud Type 11, Cloud Type 12, Fill Flag 0, Fill Flag 1, Fill Flag 2, Fill Flag 3, Fill Flag 4, Fill Flag 5, Version
#NSRDB, 504187, -, -, -,38.01,-103.7, -7, 1294, -7, w/m2, w/m2, w/m2, c, w/m2, w/m2, w/m2, Degree, c, mbar, mm, Degrees, m/s, m, N/A, Clear, Probably Clear, Fog, Water, Super-Cooled Water, Mixed, Opaque Ice,Cirrus,Overlapping, Overshooting, Unknown, Dust, Smoke, N/A, Missing Image, Low Irradiance, Exceeds Clearsky, Missing CCloud Properties, Rayleigh Violation, v2.0.1
#Year,Month,Day,Hour,Minute,Dew Point,DHI,DNI,GHI,Temperature,Pressure,Wind Speed
#2009,1,1,0,0,-6.381628417968727,0,0,0,3.1255737304687727,845.1928100585938,5.71328067779541
#2009,1,1,0,30,-6.633612060546852,0,0,0,2.9974304199218977,845.0834350585938,5.615479469299316
```

Tabla 1. Ejemplo de fuentes de datos utilizados: Encabezados y dos líneas de datos. Se usan valores para todo un año, pero la idea es poder estimar los valores usando al menos 10 años.

Indicadores estadísticos.

Habitualmente se emplean estadísticos como los momentos muestrales: promedios, varianzas, etc. para caracterizar un conjunto de datos. Si los datos constituyen series temporales se usan técnicas como autocorrelaciones, análisis de Fourier, reducción de ruido, dimensión fractal, etc. (Harrouni, 2008; Fortuna et al., 2016).

Sin embargo no hay un procedimiento de estimación directa a partir de los estadísticos anteriores de los rendimientos de un equipo que la utilice. Diferentes equipos o configuraciones reaccionarán diferente a la misma radiación y no es obvio identificar estadísticas de una serie de radiación que nos permitan predecir el comportamiento de los equipos. Se puede aproximar una solución del problema a partir de la frecuencia relativa de días consecutivos de "baja radiación" y de "alta radiación". De hecho este trabajo podría verse como una extensión de estas técnicas.

En este trabajo se propone una estadística basada en el comportamiento simulado de una clase de equipos abstractos. Y una serie de indicadores que permiten conformar una serie de radiación reducida. Los indicadores se encuentran buscando una serie optimizada, que de la menor diferencia posible en una simulación con la radiación "real" y la reducida. Esta estadística, por la forma de calcularla, es directamente pertinente al objetivo central del campo de la energía solar.

Estructura de la serie sintética reducida de radiación solar(SSRRS)

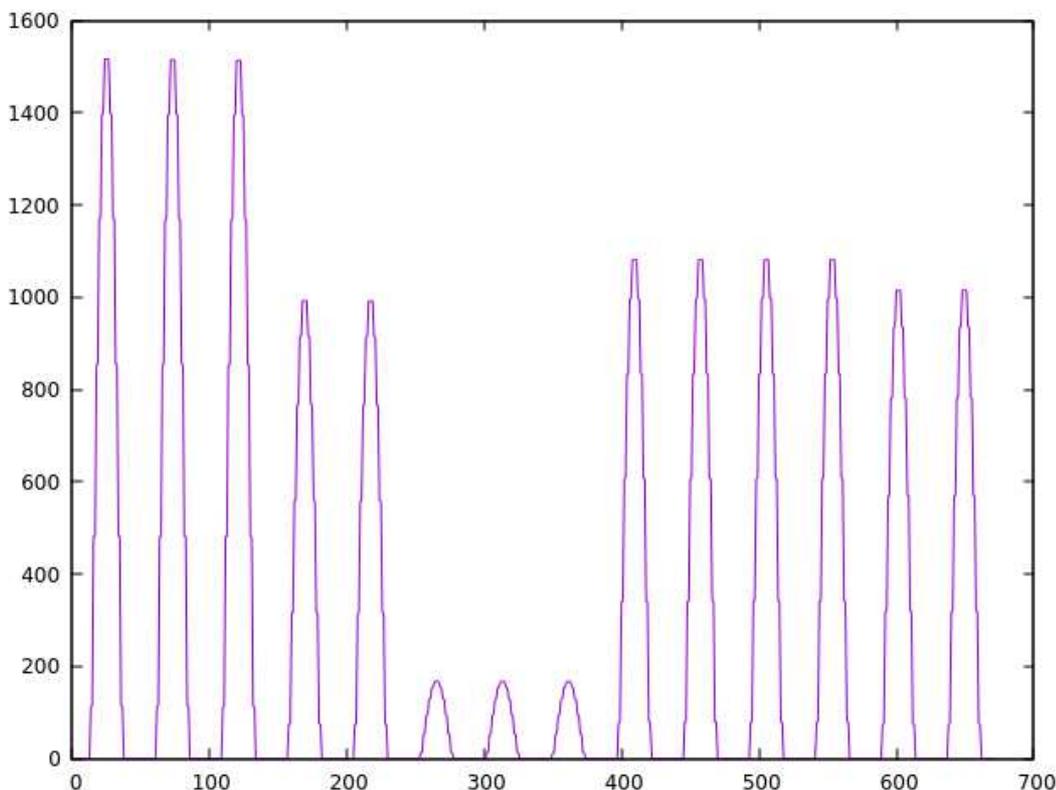


Figura 1: Esquema de una serie sintética reducida. En el eje vertical la potencia de la radiación solar, en el horizontal el número de dato (uno cada media hora). En el archivo tipo TMY representativo de la serie se incluye la fecha y la hora. Como se calcula con ese archivo la radiación sobre determinadas superficies eso es necesario. Nótese que las fechas presentan una discontinuidad entre las dos sub-series, lo que debe ser tenido en cuenta al generar la tabla para SIMUSOL, donde ya se calcula la radiación en el equipo, como si fuese suplida en forma continua, y no es necesario saber la fecha del año, sólo un tiempo correlativo proporcional a número de dato y sin discontinuidad alguna.

Se ha diseñado una serie temporal sintética reducida de radiación solar o SSRRS consistente en dos sub-series, cada una con varias secuencias de días, en cada secuencia los días son "iguales". Se usan dos sub-series para representar la variabilidad de la radiación con las estaciones, y tener elementos que sirvan al sistema para ajustar los datos con la variación del ángulo del sistema con relación a la horizontal, cuando esté fijo.

Una de las sub-series se construye a partir del día con más radiación en la serie real. Otra con el de menor.

En ambas sub-series se incorporan secuencias descendentes en radiación. En la que comienza con el día de mayor radiación se usan tres, en la otra dos.

En la primer sub-serie se incluyen 3 secuencias, para tener elementos que den diferente peso a cada uno de los tres tipos de pérdidas de los sistemas solares con acumulación. La secuencia con los días máximos se incluye para tener días representativos de las pérdidas por incapacidad de acumulación (acumulador lleno). La de días intermedios para tener un elemento representativo de las pérdidas siempre presentes dependientes de la cantidad acumulada y eventualmente de la temperatura exterior. La de días mínimos para tener en cuenta la condición en que el sistema es incapaz de entregar potencia, porque no recibe lo suficiente y tiene vacío el acumulador. En la segunda serie se incluyen dos secuencias.

Si bien cada tipo de sub-serie y secuencia tiene su fundamento, el sistema ajusta su duración e intensidad en forma automática y general, reduciendo las diferencias cuadráticas totales en indicadores de comportamiento de diversos sistemas y configuraciones usadas.

La radiación de un día de la serie sintética se construye en base a un modelo simple de seguimiento de la posición solar (Reda y Andreas, 2008) y de masa de aire. Cada uno de los días se incorpora ajustando la radiación de todos los instantes del día (cada media hora) con el mismo factor en cada día.

Los valores estadísticos adoptados son los que sirven para generar y definir la SSRRS. Por cada secuencia dos valores: el factor de la radiación de día limpio, y la duración en días, que se usan para generar esa secuencia. En éste trabajo, son diez números que especifican totalmente la SSRRS. Los que caracterizan, según el planteo de éste trabajo, la radiación de un lugar de la Tierra, en cuanto a la capacidad de captar energía solar de ésta clase de colectores. En resumen, introduciendo 10 números para una localidad, SIMUSOL, es capaz de calcular en forma aproximada el rendimiento esperado de un equipo solar de la clase estudiada, clase donde en cada caso, se puede cambiar el ángulo del colector, su capacidad de almacenamiento, rendimiento, etc..

El programa genera las series temporales reducidas en el mismo formato tipo TMY3 que usa para leer las series reales de radiación.

```
# From 504187_38.01_-103.7_2009.csv
#Year Month Day Hour Minute DewPoint DHI DNI GHI Temperature Pressure
WindSpeed WaterTemp WaterCons Rad Time
2009 1 1 0 0 -6.381628417968727 0 0 0 3.1255737304687727 845.1928100585938
5.71328067779541 15.00 0 0 0
2009 1 1 0 30 -6.633612060546852 0 0 0 2.9974304199218977 845.0834350585938
5.615479469299316 15.00 0 0 1800
2009 1 1 1 0 -6.889929199218727 0 0 0 2.8692871093750227 844.9740600585938
5.517678737640381 15.00 0 0 3600
2009 1 1 1 30 -7.018988037109352 0 0 0 2.6906372070312727 844.9171142578125
5.434755325317383 15.00 0 0 5400
```

Tabla 2. Ejemplo de tabla generada. Se incluyen cuatro líneas de datos. La tabla es la misma, en cada ubicación, para todos los equipos del tipo estudiado en éste trabajo y contiene los valores cada media hora de todos los días incluidos en la SSRRS (14 en el ejemplo de la Figura 1).

Se incluye la temperatura ambiental, la presión, la temperatura de entrada del agua, la velocidad del viento en caso de disponer la serie real estos datos, en caso contrario, se estiman como se indicó en “Datos de clima usados”. Esta tabla es la que utiliza SIMUSOL, para sus cálculos. Asimismo incorpora la potencia que se pretende extraer en diversos momentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación

A los efectos de validar las funciones que calculan radiación se han contrastado en forma exitosa sus resultados con los obtenidos por (Grossi y Rugini, 2012). Es interesante notar que las conclusiones presentes en ese trabajo con relación al ángulo óptimo se confirman en todas las series de radiación utilizadas. En tal sentido cada vez que se probaron series de radiación y sus efectos sobre equipos con diferentes inclinaciones, la mejor inclinación siempre resultó la que corresponde a la latitud del lugar.

Se han observado otros máximos relativos colocando el colector a más y menos 23 grados con relación a la latitud del lugar. Es posible que estos máximos se obtengan debido al modelo de radiación utilizado y no tengan un significado real. Todo lo anterior se observa en la Tabla 3.

El software creado es fácilmente utilizable no sólo para calcular los INDICADORES descriptos sino también para optimizar equipos.

Ajuste de las series, optimización, cálculo de estadísticos.

En el campo de la simulación, uno puede para cada equipo bajo diseño, simplemente optimizar los parámetros del mismo, simulándolo contra por ejemplo, 10 años de series temporales horarias de radiación. Este enfoque de uso masivo de datos es computacionalmente costoso (Prada, 2014; Ko 2015; Gelažanskas y Gamage 2015), y se puede tratar de reducir esta masividad utilizando por ejemplo "un año típico" construido con diferentes modalidades. Puede también plantearse a estos efectos si se requieren un dato por hora, un dato por día, o menos aún.

Se diseñaron las series reducidas para que conserven su sentido físico, en el sentido de que responden a días de radiación posibles y que siguen una secuencia temporal que permite una simulación de los equipos en condiciones también posibles, y con resultados esperables. Cada serie se define por sus INDICADORES..

Se han calculado óptimos de INDICADORES realizando comparaciones con diferentes CARACTERISTICAS de equipos, de area de colección, angulo del plano, y tamaño de almacenamiento.

La optimización se hace minimizando los errores cuadráticos en las diferencias de los RESULTADOS para una SSRRS creada con dichos INDICADORES contra otra serie real.

El proceso de optimización es del tipo prueba y error. Comienza fijando en forma arbitraria los estadísticos en valores iniciales y el programa va cambiando uno a uno éstos valores tanto en forma creciente como decreciente. Si los errores son menores, el programa acepta el último cambio efectuado y continua en el mismo sentido. Si no, lo descarta y prueba cambiando el valor en el otro sentido. Agotados ambos sentidos, procede a cambiar otro valor. Este proceso continua hasta agotar todos los valores susceptibles de cambio.

Sin duda sería útil generar series ultra-reducidas con por ejemplo un sólo valor por día de energía de radiación y de extracción de energía, pero en éste trabajo se busca generar series que permitan seguir momento a momento el comportamiento de las variables del sistema simulado.

Una de las primeras cuestiones observadas al efectuar el cálculo de estadísticos por optimización, es que el proceso tendía a encontrar valores negativos de radiación en algunos casos y mayores a los que el recurso potencialmente puede brindar en otros. Lo cual es totalmente esperable porque los modelos simplificados de equipos usados, no tienen consideraciones que adecuen su funcionamiento a datos de radiación imposibles.

Así se restringieron los valores para evitar que las series utilicen en sus optimizaciones datos no razonables desde el punto de vista físico.

En algunos casos se observó que el programa tendía a incrementar la cantidad de días en cada serie, cosa que justamente se quiere evitar, dado que la idea es que las series sean "reducidas". También se evita que esto suceda mediante límites.

Más allá de que éstas prácticas puedan aparentemente reducir la precisión que aporta la metodología, en realidad constituyen una medida de sentido común para aportar series físicamente posibles.

Se encuentra que a partir de INDICADORES iniciales que dan un error cuadrático total del orden de 300, el error se reduce a 3 luego de optimizarlo. Se encuentran diferencias realmente pequeñas entre los RESULTADOS de cada configuración de equipo, por ejemplo:

	Sig-L	Area	Masa	RadTot	RadUsad	Acum	Aux	Perd	PerdTo
R	0	0.42	70.37	6.745	4.633	12.86	2.1122	2.1291	0.0000
S	0	0.42	70.37	6.733	4.570	13.45	2.1823	2.1523	0.0000
R	0	0.42	140.7	6.745	4.819	23.62	1.9265	1.95	0.0000
S	0	0.42	140.7	6.733	4.760	24.64	1.9929	1.95	0.0000
R	0	1.41	70.37	22.48	5.727	15.51	1.0182	10.00	6.7619
S	0	1.41	70.37	22.44	5.917	17.18	0.835	9.77	6.7201
R	0	1.41	140.7	22.48	6.363	37.30	0.382	12.51	3.5993
S	0	1.41	140.7	22.44	6.040	40.16	0.712	12.61	3.7388
R	10	0.42	70.37	5.856	3.975	12.49	2.770	1.88	0.000
S	10	0.42	70.37	5.896	3.950	13.04	2.802	1.93	0.000
R	10	0.42	140.7	5.856	4.097	23.23	2.648	1.78	0.000
S	10	0.42	140.7	5.896	4.057	24.19	2.695	1.82	0.000
R	10	1.41	70.37	19.52	5.665	15.51	1.080	9.68	4.172
S	10	1.41	70.37	19.65	5.914	17.16	0.838	9.53	4.177
R	10	1.41	140.7	19.52	6.305	36.03	0.441	11.89	1.3219
S	10	1.41	140.7	19.65	5.9928	40.13	0.7602	11.93	1.6564

Tabla 3: Resultados de contrastar una serie real con una SSRRS en equipos de diferentes configuraciones. Los encabezados corresponden a las CARACTERISTICAS de los equipos, (3 primeras columnas) y las otras a los RESULTADOS obtenidos en cada simulación. Por ejemplo Acum, es la energía que queda acumulada después de la simulación (Ver “Métodos y Datos, Equipo de aprovechamiento de la radiación solar.”). R es para una serie Real y S para una sintética reducida. Se corren simulaciones para dos valores de cada característica. La SSRRS se obtiene al minimizar para diferentes series sintéticas, los cuadrados de las diferencias en los resultados entre R y S, para la suma de las columnas RadTot, RadUsad, Perd y PerdTo.

Trabajo Futuro

Se debe continuar trabajando para:

- Ampliar el tipo de CARACTERISTICAS a variar en las optimizaciones y considerar más RESULTADOS dándoles un peso específico a cada uno.
- Probar otras formas de series sintéticas resumidas y correlacionar cada INDICADOR con los RESULTADOS que se piensa que influyen.
- Utilizar modelos realistas para diferentes clases de equipos solares, por ejemplo fotovoltaicos. El reemplazo del SCEPTRE en el que se está trabajando resulta clave en esto ya que permite trabajar con funciones implícitas (Saravia, 2015) que facilitan el modelado, por ejemplo, de colectores solares para calentar agua.
- Crear y validar el uso de éstas series mediante otros programas, esquemas de uso, e investigadores.
- Utilizar datos locales de Salta y Argentina, probar especialmente datos de gran altura, como en la Puna.

- Obtener y comparar los indicadores obtenidos para diferentes lugares con otras clasificaciones y caracterizaciones de la radiación de un lugar.

CONCLUSIONES

- Se construyó un software que permite utilizar los datos de radiación solar disponibles libremente, transformándolos automáticamente en un formato usable por SIMUSOL.
- Se propuso un modelo de series temporales sintéticas relativamente cortas, que permiten simular con menos esfuerzo computacional, el comportamiento de equipos solares, definidas con unos 10 valores (Largo e intensidad de cada secuencia).
- Se desarrolló un método para encontrar óptimos en esos 10 valores tornándolos en INDICADORES, estadísticos que permiten simular el comportamiento de un conjunto de equipos. A partir de la radiación real se crea una serie reducida óptima.
- Los estadísticos o INDICADORES definidos permiten caracterizar la radiación de un lugar en términos de su aprovechamiento por ésta clase de equipos.
- El software será distribuido en forma libre y gratuita con las próximas versiones de SIMUSOL.

REFERENCIAS

- Abdulla S. H., Klein, S. A., y Beckman, W. A. (2000). A New Correlation for the Prediction of the Frequency Distribution of Daily Solar Radiation. American Solar Energy Society.
- Abril J.C. (2004) Modelos para el análisis de las series de tiempo. Ediciones Cooperativas.
- Aguiar R., y Collares-Pereira M. (1992). TAG: A time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. Solar Energy. Vol 49 Num 3. pp. 167-174 *Pages 167-174* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9290068L>.
[doi:10.1016/0038-092X\(92\)90068-L](https://doi.org/10.1016/0038-092X(92)90068-L)
- Alía, D., Saravia L. y Saravia D. (2002). Avances introducidos en la capacidad del simulador de sistemas solares térmicos SIMUTERM (SIMUSOL). AVERMA Vol. 6, N° 2, 2002. . ISSN 0329-5184.
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2002/2002-t008-a006.pdf>
- Avila Blas O. J., Abril J. C. y Lesino G. (1999). Análisis estadístico estructural de series de radiación diaria. AVERMA 11.5 ISSN 0329-5184
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/1999/1999-t011-a005.pdf>
- Avila Blas O. J., Abril J. C. y Lesino G. (2000). Radiación y temperatura diaria: un modelo de correlación estructural. AVERMA 11.6 ISSN 0329-5184
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t011-a006.pdf>
- Chapman R. N. (1990). The synthesis of solar radiation data for sizing stand-alone photovoltaic systems. Photovoltaic Specialists Conference. Record of the Twenty First IEEE pp. 965 - 970 vol.2. [10.1109/PVSC.1990.111761](https://doi.org/10.1109/PVSC.1990.111761)
- Fortuna L., Nunnari, G. y Nunnari, S. (2016). Nonlinear Modeling of Solar Radiation and Wind Speed Time Series. Springer. ISBN 21915520
- Gelažanskas L. y Gamage, K. A. A (2015). Forecasting Hot Water Consumption in Residential Houses Energies 2015, 8, 12702–12717; doi:10.3390/en8112336
- GPO. U.S. Government Publishing Office (2016). Uniform Test Method for Measuring the Energy Consumption of Water Heaters. Appendix E to Subpart B of Part 430.
[http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=80dfa785ea350ebee184bb0ae03e7f0&mc=true&node=ap10.3.430_127.e&rgn=div9)
https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/standards.aspx?productid=32
- Grossi H. y Spreafichi M. (2007). Análisis de tendencias de heliofanía efectiva en Argentina. Meteorologica. Vol. 32 no.1-2.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2007000100001
- Grossi H. y Righini R. (2012). Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios. AVERMA Vol. 16, 2012. ISSN 0329-5184

- http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/783_ART.pdf
Harrouni S. (2008). Fractal Classification of Typical Meteorological Days from Global Solar Irradiance: Application to Five Sites of Different Climates. En: Capitulo 2. Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances. Springer
<http://www.springer.com/us/book/9783540774549>
- Liu B. y Jordan R.C. (1963). The Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors. Solar Energy vol. 7 No. 2, pp. 53-74.
- Martincova M., Dosa M., Pekarova P., Kostka Z., y Holko L. (2011). Water – soil – air temperature relationships in the Jalovecky creek catchment. *Bodenkultur* 89 62 (1–4)
<https://diebodenkultur.boku.ac.at/volltexte/band-62/heft-1-4/martincova.pdf>
- Maxwell E. (1987). A Quasi Physical Model for Converting Hourly Global Insolation to Direct Normal Insolation. (DISC Model), SERI/TR-215-3087
<http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/PDFs/TR-215-3087.pdf>
- NERC. North American Electric Reliability Corporation (2011). Methods to Model and Calculate Capacity Contributions of Variable Generation for Resource Adequacy Planning.
<http://www.nerc.com/files/ivgtf1-2.pdf>
- Kasten F. y Young A.T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics* Vol. 28, Issue 22 pp. 4735-4738
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.28.004735>
<http://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-28-22-4735>
- Klein S. A. y Beckman W. A. (1984). Review of Solar Radiation Utilizability
J. Sol. Energy Eng. 106(4), 393-402
<http://sel.me.wisc.edu/publications/journals/rosru84.pdf>
- Klein S. A. y Beckman W. A. (1987). Loss-of-Load Probabilities for Stand-Alone Photovoltaic Systems, Solar Energy. Vol 39, Issue 6, pp. 499-512.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X87900570>
- Ko M. J. (2015). Analysis and Optimization Design of a Solar Water Heating System Based on Life Cycle Cost Using a Genetic Algorithm. *8 Energies* , 11380-11403; doi:10.3390/en81011380
<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/11380/pdf>
- Lovelock J. (2006). La venganza de la tierra. La teoría de Gaia y el futuro de la humanidad. Planeta. ISBN 9788408070283.
- Prada A., Pernigotto G., Baggio P., Gasparella A. y Mahdavi A. (2014). Effect of Solar Radiation Model on the Predicted Energy Performance of Buildings. International High Performance Buildings Conference.
<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1129&context=ihpbc>
- Perez R., David M., Hoff T., Kivalov S., Kleissl J., Lauret P. y Perez M. (2015). Spatial and temporal variability of solar energy. DRAFT 3-14-2015
<http://asrc.albany.edu/people/faculty/perez/2015/SEVAR.pdf>
- RAFG, Resource Assessment and Forecasting group (2015). Inventory of solar radiation/solar energy systems estimators, site-specific data, and publications (updated in 2015) NREL public domain publications site.
www.nrel.gov/rredc/pdfs/INVENTORY%20OF%20SOLAR%20RADIATION_final.pdf
<http://www.nrel.gov/research/publications.html>
- Reda I. y Andreas A. (2008). Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. NREL/TP-560-34302
<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>
- Roberti A., Renzini G., Sierra V. y Grossi H. (2002). Primeros resultados del análisis estadístico de los datos de heliofanía en la Argentina. *AVERMA* Vol. 6, N 2. ISSN 0329-5184
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2002/2002-t011-a006.pdf>
- Saravia L. y Saravia D. (2000). Simulación de sistemas solares térmicos: un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad, (*AVERMA*) Vol. 4, 08-17- 08.22.
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t008-a004.pdf>
- Saravia D. (2015). SIMUSOL: Ecuaciones implícitas con interpretación dinámica, cortes inductivos y lazos capacitivos. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES). Vol. 3, pp. 08.87-08.98, 2015. ISBN 978-987-29873-0-5

- <http://www.simusol.org/downloads/1520-4912-1-PB.pdf>
- Sengupta M., Habte A., Kurtz S., Dobos A., Wilbert S., Lorenz E., Stoffel T., Renné D., Gueymard C., Myers D., Wilcox S., Blanc P., y Perez R. (2015). Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. Technical Report. NREL/TP-5D00-63112
<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63112.pdf>
- Sengupta M., Weekley A., Habte A., Lopez A., y Molling C. (2015). Validation of the National Solar Radiation Database (NSRDB). Physical Solar Model (PSM) Update. European PV Solar Energy Conference and Exhibition Hamburg, Germany. Conference Paper NREL/CP-5D00-64981 .
<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64981.pdf>
<https://nsrdb.nrel.gov/user-manuals>
- Taleb N. N. (2009). El cisne negro. Paidós. ISBN 9789501250299.
- Vignola F. (2012). GHI Correlations with DHI and DNI and the Effects of Cloudiness on one-minute Data, Proceedings of the World Energy Forum, Denver, CO, (2012)
<http://solardat.uoregon.edu/download/Papers/GHICorrelationswithDHIandDNIandtheEffectsofCloudinessonOne-MinuteData.pdf>
- Vignola F. (2001). Variability of solar radiation data over short time intervals., Proc. Solar 2001, American Solar Energy Society Conf., Washington, D.C
- Wang F, Mi. Z, Su S, and Zhao H. (2012). Short-Term Solar Irradiance Forecasting Model Based on Artificial Neural Network Using Statistical Feature Parameters. Energies 2012, 5, 1355-1370; doi:10.3390/en5051355 OPEN ACCESS. ISSN 1996-1073
<http://www.mdpi.com/journal/energies>
- Wilcox S. y Marion W. (2008). Users Manual for TMY3 Data Sets. Technical Report NREL/TP-581-43156
https://en.wikipedia.org/wiki/Typical_meteorological_year
http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3/14_1229_announcement.pdf
http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3/
- Wilcox S. (2010). National Solar Radiation Database 1991–2010 Update: User’s Manual.
<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54824.pdf>
<http://www.nrel.gov/rredc/>
- Zheng D., Raymond R. y Running S. (1993). A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. Climate Research. Vol. 2: 183-191.1993
<http://www.int-res.com/articles/cr/2/c002p183.pdf>

ABSTRACT SOLAR RADIATION REDUCED SYNTHETIC SERIES (SSRRS) as a concept and methodology for characterizing time series of solar radiation through statistical indicators that define and build SSRRS, and could be used to simulate equipment that collect radiation, are presented. With SSRRS the behavior of equipment approaches the real behavior. Equipment get similar performance in each test, compared to the performance obtained using the full time series, which may have several years of data, or be a typical year. Moreover, the software that facilitates the use of available radiation data, to create the SSRRS and use them in SIMUSOL or another simulators is presented. The fundamental advantage of the SSRRS is the ability to simulate systems in a flexible way, facilitating optimization and repeat simulations.

Keywords: Solar radiation reduced synthetic series, SSRRS, simulation, SIMUSOL.