Título del proyecto: Pronóstico de la radiación solar y potencia a generar en las plantas fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica nacional.

Informe de resultado:

Uso del WRF-Solar y el post-procesamiento MOS para el pronóstico de la radiación solar con fines energéticos en Cuba.

Autores: Israel Borrajero Montejo Alejandro Baró Pérez Juan Carlos Peláez Chávez Miguel Hinojosa Fernández

Centro de Física de la Atmósfera Instituto de Meteorología Octubre de 2016

Índice

1.	Introducción	3				
2.	Métodos de cálculo y pronóstico de la irradiancia solar.	4				
3.	Materiales y métodos					
	3.1. Pronóstico de los flujos radiativos a través el modelo WRF versión					
	3.6.1(WRF-Solar)	. 6				
	3.2. Datos de irradiancia de las estaciones	. 6				
	3.3. Estadígrafos utilizados	. 9				
	3.4. Post-procesamiento con la técnica Model Output Statistics (MOS)	. 9				
4.	Resultados					
	4.1. Evaluación del pronóstico de irradiancia de WRF-Solar	. 11				
5.	Conclusiones	15				

1. Introducción

El aprovechamiento de la energía solar constituye una alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la generación de electricidad a nivel mundial. Cuba, por su ubicación en la zona tropical, recibe elevados niveles de radiación solar que hacen factible el empleo de tecnologías capaces de utilizar este recurso con fines energéticos. Con este objetivo, en la actualidad, se desarrolla el programa "Desarrollo sostenible de las fuentes renovables de energía", que entre otros aspectos, incentiva el desarrollo de proyectos de investigación dirigidos al aprovechamiento de las energías renovables y el aprote de las mismas a la matriz energética del país. En el caso particular de la energía fotovoltáica, el país tiene como objetivo producir por esta vía 700MWh para el año 2018.

Los niveles de radiación solar que llegan a la superficie terrestre experimentan fluctuaciones, debido a las variaciones en la atenuación atmosférica, ocasionda fundamentalmente por las nubes, la presencia de aerosoles y gases como el vapor de agua y otros componentes menores como es el caso del dióxido de carbono, el ozono, etc, cuyo aporte en la atenuación de la radiación solar resulta de menos envergadura[Rincón, 2013]. En consecuencia, la producción de energía eléctrica a partir del recurso solar es fluctuante, lo cual conduce a la necesidad de realizar pronósticos de irradiancia solar para diferentes escalas espaciales y temporales. Estos pronósticos podrían mejorar aspectos como la gestión de las redes eléctricas, la programación de la producción de centrales eléctricas solares o convencionales, el diseño de nuevas políticas de aprovechamiento energético. Generalmente las especificaciones de los sistemas comerciales de aprovechamiento de la energía solar están basadas en una limitada disponibilidad de información del régimen de radiación solar.

El estudio que se realiza en el presente proyecto está dirigido a mejorar la calidad de las estimaciones de la radiación solar formuladas en proyectos anteriores. Utilizando las salidas de los valores de radiación solar de los modelos de pronóstico numérico, se establece un método de radiación solar para plazos de 24 horas que permitirá estimar la potencia a generar por las plantas FV con conexión a la red nacional eléctrica.

Existen varios métodos y técnicas para pronosticar la radiación solar; la selección de uno u otro depende del horizonte de pronóstico y las resoluciones espacial y temporal necesarias. Por ejemplo, para el pronóstico a muy corto plazo (30 minutos hasta 5-6 horas) se utilizan imágenes de satélite para extrapolar el campo de radiación a través del movimiento de las nubes, mientras que el pronóstico a corto plazo (hasta dos días) se basa en los modelos numéricos de predicción meteorológica del tiempo, conocidos en inglés como Numerical Weather Prediction (NWP) Models.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre el pronóstico de irradiancia solar a corto plazo utilizando modelos numéricos de pronóstico del tiempo. Se destaca el empleo del modelo WRF en varios trabajos, por ejemplo, Lara-Fanego et al. [2012],Rincón [2013], Isvoranu and Badescu [2014], Jiménez et al. [2015], Zempila et al. [2016]. También se ha utilizado el modelo ECMWF por investigadores como Lorenz et al. [2009a] y el PSU/NCAR Mesoscale Model(MM5)

por Heinemann and Girodo [2006a].

Recientemente el modelo WRF ha incorporado mejoras en el pronóstico de los flujos radiativos con el fin de satisfacer las necesidades de las aplicaciones de energía solar. La configuración del modelo orientada a este fin ha sido bautizada como WRF-Solar Jiménez et al. [2015] y es resultado de los trabajos de Ruiz-Arias et al. [2013],Jiménez et al. [2015],Ruiz-Arias et al. [2015] y Jiménez et al. [2016].

Un elemento importante en los pronósticos de irradiancia solar son las técnicas de post-procesamiento que se aplican a la salidas de los modelos numéricos con el objetivo de disminuir los errores sistemáticos en el pronóstico. Según Rincón [2013] las técnicas más utilizadas son el Model Output Statistics(MOS) [Glahn and Lowry, 1972], las Redes Neuronales Artificiales(ANN) [Bishop, 1995] y el filtro de Kalman(KF) [Kalman, 1960].

En el presente trabajo se utiliza la configuración WRF-Solar (WRF versión 3.6.1) con el objetivo de pronosticar los flujos de irradiancia sobre Cuba. Además se realiza el post procesamiento de la irradiancia global horizontal pronosticada (GHIwrf) utilizando la técnica Model Output Statistics (MOS) en base a la metodología desarrollada por Lorenz et al. [2009a].

2. Métodos de cálculo y pronóstico de la irradiancia solar.

Según explican Sengupta et al. [2015] y Haupt et al. [2016], los pronósticos de irradiancia solar se pueden realizar utilizando diferentes métodos cuya elección depende de los requerimientos en cuanto al horizonte de pronóstico y las resoluciones espacial y temporal. Para pronósticos intra-horarios puntuales con altas resoluciones se utilizan modelos estadísticos de series temporales con mediciones de irradiancia local como datos de entrada. También son empleadas las cámaras de cielo (ground-based sky imagers), que proporcionan información sobre las nubes y su movimiento en los alrededores de un sitio dado, lo cual permite extrapolar las condiciones de nubosidad e irradiancia hacia el futuro con horizontes típicos entre 15 y 30 minutos. Para pronósticos con horizontes entre 3 y 6 horas se utilizan las imágenes de satélite, a partir de las cuales se analizan y extrapolan los campos de nubes para luego estimar la irradiancia que reciben los lugares deseados. Los modelos numéricos de pronóstico del tiempo son las herramientas más eficaces para plazos superiores a las 5-6 horas. Con ellos se modela el comportamiento de la física atmosférica utilizando las leves de conservación de la masa, el momento y la energía, lo cual permite pronosticar numerosas variables meteorológicas incluyendo a los flujos radiativos.

A pesar de ser actualmente el mejor método disponible para el pronóstico de irradiancia con horizontes mayores que 5 horas, los NWP operacionales cometen errores de forma sistemática que se pueden atribuir a varias fuentes: la resolución del dominio, las parametrizaciones físicas del modelo y las condiciones iniciales imprecisas [Mathiesen et al., 2014]. Aquí la representación adecuada de la nubosidad y su influencia en el balance radiativo es la causa fundamental de los errores en el pronóstico. Los complejos procesos que ocurren durante la formación, el desarrollo

y la disipación de las nubes en adición a la gran variabilidad espacio-temporal que las caracteriza constituyen un gran reto para la modelación, que continúa teniendo dificultades en esta área a pesar de los avances logrados en los últimos años. La asimilación es una de las técnicas utilizadas para mejorar la representación de las nubes en los modelos NWP, pero también se enfrenta a grandes desafíos. Por otro lado, en condiciones de cielo claro o parcialmente nublado, los aerosoles tienen un fuerte impacto en la irradiancia en superficie, particularmente sus componentes directa y difusa, circunstancias bajo las cuales el pronóstico de los modelos NWP, como WRF o ECMWF, se ha visto con bias elevados [???]. Una vía apropiada de manejar los aerosoles es aplicar modelos de transporte de aerosoles como el que tiene el proyecto Monitoring Atmospheric Carbon and Climate (MACC) Schroedter-Homscheidt et al. [2013].

Para reducir los errores sistemáticos que ocurren en los pronósticos de irradiancia de los modelos NWP se utilizan varias técnicas de post-procesamiento. Según Rincón [2013] los métodos más usados son el Model Output Statistics (MOS) de Glahn and Lowry [1972], las Redes Neuronales Artificiales (ANN) de Bishop [1995] y el Kalman Filter (KF) de Kalman [1960].

Tradicionalmente el MOS está asociado al uso de ecuaciones de regresión, y en un concepto más amplio incluye cualquier aproximación estadística que relacione las salidas del modelo con las variables observadas [Sengupta et al., 2015]. Esta técnica aplicada a los pronósticos de irradiancia ha experimentado avances en los últimos años como resultado de los trabajos de Girodo [2006], Heinemann and Girodo [2006a], Heinemann et al. [2006b], Lorenz et al. [2009a], Lorenz et al. [2009b] y Lorenz et al. [2011]. El trabajo más relevante en este tema fue el presentado por Lorenz et al. [2009a], quien propuso un método de post-proceso para la corrección del error sistemático a través de una regresión polinóminca de cuarto orden, la cual ajusta los coeficientes mendiante un entrenamiento de 15 días de cada mes para un período de estudio de 10 meses (2007) en Alemania. La regresión MOS realiza la estimación del Bias de los pronósticos en función de las condiciones del cielo dadas por el índice kt y el cos(SZA). Adicionalmente, establecen una técnica de interpolación espacial denominada promedio espacial (spatial averaging) que consiste en optimizar el pronóstico espacial mediante el promedio de los puntos circundantes de la malla horizontal del modelo. El trabajo presenta una evaluación del modelo IFS a través de más de 200 estaciones en Alemania donde obtienen un rRMSE de 37 % para el primer día de pronóstico. Otros trabajos que han utilizado el MOS son los de Bofinger and Heilscher [2004] y Mathiesen and Kleissl [2011]. En el último se aplica la corrección MOS de Lorenz et al. [2009a] para los modelos NAM, GFS e IFS y obtiene una corrección del Bias en el modelo NAM de 57 a 7 $W \cdot m^{-2}$ (rMBE de 15 a 1.9%), en el modelo GFS de 35 a 5.3 $W \cdot m^{-2}$ (rMBE de 9.6 a 1.4%) y en el modelo IFS de 31 a 0.6 $W \cdot m^{-2}$ (rMBE de 8.5 a 0.1%), con 56 días previos de entrenamiento.

3. Materiales y métodos

3.1. Pronóstico de los flujos radiativos a través el modelo WRF versión 3.6.1(WRF-Solar)

El WRF-Solar es una configuración específica del modelo WRF diseñada para las aplicaciones de energía solar. Incluye un desarrollo para diagnosticar de forma interna parámetros atmosféricos relevantes requeridos por la industria solar, una mejorada representación de la interacción aerosol-radiación, la incorporación de la interacción nube-aerosol, y una mejorada interacción nube-radiación [Jiménez et al., 2015]. El modelo calcula las variables: irradiancia global horizontal (GHI), irradiancia directa (DIR), irradiancia difusa (DIF), y la irradiancia normal directa (DNI). Incluye dos climatologías de propiedades ópticas de aerosoles y además permite incorporar datos reales o pronosticados de las propiedades ópticas de aerosoles en la simulación (AOD 550 μ m, exponente de Angstrom, etc). Se aprovecharon las mejoras realizadas en la modelación de las interacciones aerosol-nube-radiación que trae esta versión del WRF para realizar el pronóstico de GHI para 24 horas sobre el territorio cubano.

El modelo se configuró según una de las variantes planteadas por Jiménez et al. [2015] para aprovechar las mejoras en el pronóstico de irradiancia. Se utilizó el esquema de transferencia radiativa RRTMG en onda larga y onda corta combinado con la climatología Tegen de propiedades ópticas de aerosoles; el esquema de microfísica Thompson; la parametrización de cúmulos Grell-Freitas (ensemble squeme) combinada con la convección somera disponible para este esquema. Además se activaron los efectos a escala sub-rejilla de las nubes sobre el espesor óptico en la radiación. Se establecieron dos dominios anidados de 27 y 9 km de resolución centrados en los 22 grados de latitud norte y los 79 grados de longitud oeste. La resolución temporal de los flujos radiativos y otras variables necesarias como el coseno del ángulo cenital solar (cos(SZA)) se fijó en 15 minutos.

Las figuras 1 y 2 muestran, a manera de ejemplo, los flujos radiativos pronosticados con WRF para el dominio de 9 km de resolución y en los puntos correspondientes a seis estaciones meteorológicas.

3.2. Datos de irradiancia de las estaciones

Los valores de suma horaria de GHI registrados por las estaciones correspondientes Sistema de Monitoreo Automático del Tiempo (SISMAT) de Cuba fueron utilizados para la evaluación y post-procesamiento del pronóstico de GHI del modelo WRF. Se utilizaron los datos de 2015 correspondientes a 15 estaciones automáticas distribuidas a lo largo de la isla (cuadro 1).



Figura 1: Irradiancia global horizontal(GHI), irradiancia directa(DIR), irradiancia difusa(DIF) e irradiancia normal directa(DNI) pronosticadas por el WRF para el día 7 de agosto de 2015 a las 17:30 UTC. Dominio de 9 km de resolución.



Figura 2: Irradiancia global horizontal(GHI), irradiancia directa (DIR), irradiancia difusa(DIF) e irradiancia en condiciones de cielo claro (GHI-Cl) pronosticadas en los puntos correspondientes a seis estaciones meteorológicas para diferentes días del año 2015.

Estación	Latitud	Longitud
Bahía Honda	22 56' N	83 10' W
Bainoa	23 00' N	81 57' W
Batabanó	22 45' N	82 18' W
Bauta	22 58' N	82 32' W
Bayamo	20 21' N	76 37' W
Casablanca	23 10' N	82 21' W
Jovellanos	22 48' N	81 07' W
Jucarito	20 40' N	76 54' W
La Piedra	22 07' N	79 59' W
Las Tunas	20 57' N	76 57' W
Manzanillo	20 20' N	77 08' W
Melena del Sur	22 46' N	86 08' W
Playa Girón	22 04' N	81 02' W
Santiago de las Vegas	22 58' N	82 23' W
Varadero	23 10' N	81 14' W
Yabú	22 26' N	79 59' W

Cuadro 1: Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas

3.3. Estadígrafos utilizados

Se utilizaron los estadígrafos empleados por Lorenz et al. [2009a]: el Bias, el error cuadrático medio, y la desviación estándar del error (ecuaciones 1, 2 y 3).

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (GHI_{pronostico,i} - GHI_{medida,i})$$
(1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (GHI_{pronostico,i} - GHI_{medida,i})}^{2}$$
(2)

$$STDERR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} (GHI_{pronostico,i} - GHI_{medida,i} - Bias)^2}$$
(3)

Donde la i representa a cada uno de los pronósticos y mediciones de la GHI de las estaciones. La relación entre estas medidas está dada por la ecuación:

$$RMSE^2 = Bias^2 + STDERR^2 \tag{4}$$

También fueron utilizados los valores relativos del Bias(rBias) y del RMSE(rRMSE). Estos valores fueron calculados respecto al promedio de la suma horaria de GHI en las estaciones durante el período de estudio.

3.4. Post-procesamiento con la técnica Model Output Statistics (MOS)

En un primer paso se obtuvieron, para 212 días del año 2015, los pronósticos de GHI del modelo WRF-Solar con resolución espacial de 9 km y resolución temporal 15 minutos. Los valores de GHI en los puntos correspondientes a las estaciones fueron calculados utilizando una interpolación bilineal a partir de la rejilla de 9 km del modelo y luego empleados para estimar la suma horaria pronosticada y compararlos con la medición correspondiente.

Teniendo estos datos se procedió a la evaluación del pronóstico de la GHI y la corrección del BIAS utilizando la técnica MOS según la metodología propuesta por Lorenz et al. [2009a] y Mathiesen and Kleissl [2011]. La técnica MOS [Glahn and Lowry, 1972] consiste en determinar correlaciones entre una variable dependiente y varias variables independientes de un modelo matemático simple, mediante una regresión polinomial, y tiene la capacidad de predecir el error sistemático en sistemas numéricos. Se aplica a las salidas de los modelos NWP para mejorar objetivamente las correlaciones entre las simulaciones y las observaciones [Rincón, 2013]. El método se aplicó a 152 días del año 2015. Para cada día seleccionado, el pronóstico de GHI del WRF-Solar fue evaluado y corregido por MOS utilizando como entrenamiento los 60 días anteriores. La implementación de esta técnica se describe a continuación.

Para el pronóstico de la GHI de un día determinado, a partir de su período de entrenamiento correspondiente, se calculan los valores de BIAS, RMSE y STDERR por intervalos de índice de cielo claro (kt*) pronosticado y coseno del ángulo cenital (SZA). El índice kt* se define como la razón entre la GHI (medida o pronosticada) y la GHI que hubiera en condiciones de cielo claro. Este parámetro caracteriza la transmisión de la irradiancia a través de la atmósfera y es independiente del curso determinístico de la irradiancia [Lorenz et al., 2009a]. El empleo conjunto de kt* y SZA permite tener en cuenta la influencia de la nubosidad y la altura solar en la evaluación y corrección del pronóstico.

Los valores calculados de BIAS, RMSE y STDERR por intervalos de kt^{*} y cos(SZA) son empleados para determinar los coeficientes de la regresión MOS utilizando polinomios de orden cuatro. Para el BIAS, por ejemplo, la regresión queda:

$$Bias_{kt,cos(SZA)} = a_1 \cdot kt + a_2 \cdot kt^2 + a_3 \cdot kt^3 + a_4 \cdot kt^4 + a_5 \cdot cos(SZA) + + a_6 \cdot cos(SZA)^2 + a_7 \cdot cos(SZA)^3 + a_8 \cdot cos(SZA)^4 + a_9 \cdot kt \cdot cos(SZA) + + a_{10} \cdot kt^2 \cdot cos(SZA) + a_{11} \cdot kt^3 \cdot cos(SZA) + a_{12} \cdot kt \cdot cos(SZA)^2 + + a_{13} \cdot kt \cdot cos(SZA)^3 + a_{14} \cdot kt^2 \cdot cos(SZA)^2 + C$$
(5)

De igual forma se realiza para RMSE y STDERR.

Posteriormente, con los coeficientes de la regresión correspondiente al período de entrenamiento ya determinados, y los valores de kt^{*} y cos(SZA) pronosticados por el modelo para el día en evaluación (día 61), se calculan los valores de BIAS, RMSE y STDERR estimados por el MOS para esa fecha.

Los valores del error sistemático $Bias_{(kt*,cos(SZA))}$ estimados por el MOS son utilizados para corregir el pronóstico de la GHI del modelo WRF:

$$GHI_{corregida} = GHI_{wrf} + Bias_{(kt,cos(SZA))}$$
(6)

Mientras que los valores estimados de $STDERR_{(kt*,cos(SZA))}$ son empleados en el cálculo de los intervalos de pronóstico (GHI_{inter}) de la GHI del modelo, con un nivel de confianza del 95% asumiendo una distribución normal:

$$GHI_{inter} = GHI_{corregida} \pm 2 \cdot STDERR_{(kt,cos(SZA))}$$
(7)

Debido a que todavía no existen mediciones de radiación solar (o no están disponibles para su uso) en los parques solares instalados, es de interés conocer cuáles serían los resultados del pronóstico en lugares que no disponen de mediciones. Por este motivo se utilizaron dos variantes al realizar el post-procesamiento con el MOS. En la primera, los ajustes de los estadígrafos Bias, RMSE y STDERR en función de los parámetros kt^{*} y cos(SZA) se realizaron teniendo en cuenta el conjunto de mediciones de todas las estaciones. En la segunda se realizó, para cada estación, un ajuste independiente que excluyó las mediciones de GHI de la propia estación (como ocurriría en un lugar carente de datos). De esta manera el error entre el valor de la estación y el valor estimado por el ajuste refleja las condiciones de un punto arbitrario y no de una estación que contribuya al ajuste. El objetivo aquí es tener una idea de la calidad de la estimación en zonas donde no hay mediciones.

4. Resultados

4.1. Evaluación del pronóstico de irradiancia de WRF-Solar.

En el cuadro 2 se observan los valores de RMSE y rRMSE obtenidos para cada las estación antes (WRF-Solar) y después del post-procesamiento (WRF-Solar+MOS), además del porciento de mediciones de GHI que caveron dentro de los intervalos pronosticados según el STDERR estimado por el post-proceso MOS. Aquí solamente se consideran los ángulos solares cenitales menores que 70°. En todas las estaciones se aprecia, respecto a los valores obtenidos con WRF-Solar, una disminución del RMSE (y rRMSE) utilizando cualquiera de las dos variantes de post-procesamiento. Además por ambas variantes del post-procesamiento se obtuvieron resultados muy similares. Esto significa que el ajuste logra que el estimador de los parámetros RMSE, Bias y STDERR resulte robusto, es decir, que depende poco de la muestra. Por tanto es posible utilizar la metodología en lugares donde no se cuenta con mediciones de GHI. En cuanto al porciento de efectividad dentro de los intervalos de pronóstico (GHI-inter(%)) en 12 de las 16 estaciones se obtuvieron valores por encima del 90%. Los mejores resultados se alcanzaron en Melena del Sur (96.7), Manzanillo (95.3) y Las Tunas (95.6 con la variante 1 y 95.0 con la variante 2), todas igual o por encima del 95% de efectividad esperado. Por otro lado en 4 estaciones se obtuvieron resultados entre $80 \ge 90\%$: Bahía Honda (89.6 y 89.7), Batabanó (82.0 y 81.9), Santiago de las Vegas (88.0) y Varadero (86.0 y 81.9).

De forma general el RMSE inicial del pronóstico de WRF-Solar fue de 222.0 $W \cdot m^{-2}$ (rRMSE = 44.7 %), mientras que para WRF-Solar+MOS se obtuvo 159.7 $W \cdot m^{-2}$ (rRMSE=32.1 %), lográndose una reducción de 62.3 $W \cdot m^{-2}$ y 12.6 % en los valores de RMSE y rRMSE respectivamente. La GHI medida quedó dentro del intervalo de pronóstico en el 91 % de los casos.

En la figura 3 se observan los valores de Bias, RMSE y STDERR obtenidos antes y después del post-procesamiento en función del índice kt^{*} pronosticado y el cos(SZA). Los valores del Bias de WRF-Solar indican una sobrestimación

Estación	WRF-Solar		WRF-Solar+MOS					
			Variante 1		Variante 2			
	RMSE	rRMSE	RMSE	rRMSE	GHI-	RMSE	rRMSE	GHI-
		(%)		(%)	inter		(%)	inter
					(%)			(%)
Bahía Honda	227.4	46.7	175.9	36.1	89.6	176.0	36.1	89.7
Bainoa	236.3	50.5	167.2	35.7	92.6	166.9	35.6	92.5
Batabanó	218.9	41.2	182.4	34.3	82.0	184.0	34.6	81.9
Bauta	232.0	51.9	163.7	36.7	92.3	163.7	36.6	92.1
Bayamo	229.5	55.7	141.9	34.5	91.0	150.0	36.4	88.9
Casablanca	217.2	43.2	160.9	32.0	93.3	160.6	31.9	93.4
Jovellanos	233.4	42.2	143.4	25.9	95.2	143.6	25.9	95.2
Jucarito	209.3	37.0	149.9	26.5	93.6	152.3	26.9	93.4
La Piedra	247.6	48.5	182.4	35.6	90.9	182.7	35.7	90.9
Las Tunas	216.7	42.8	145.5	28.7	95.6	145.8	28.8	95.0
Manzanillo	161.3	29.5	120.8	22.1	95.3	121.2	22.1	95.3
Melena del Sur	111.2	24.1	94.0	20.4	96.7	94.1	20.4	96.7
Playa Girón	243.7	52.3	145.9	31.4	91.6	149.3	32.0	90.9
Santiago de las Vegas	227.9	48.4	172.4	36.6	88.0	172.6	36.5	88.0
Varadero	227.8	39.6	175.6	30.5	86.0	179.8	31.2	81.9
Yabú	209.1	54.6	124.4	32.5	94.8	125.4	32.8	94.7
Todas las estaciones	222.0	44.7	159.7	32.1	91.1			

Cuadro 2: Valores de RMSE, rRMSE obtenidos por el WRF-Solar y el WRF-Solar+MOS y % de efectividad de los intervalos pronóstico (GHI-inter(%)) construidos a partir de WRF-Solar+MOS.

de la GHI pronosticada fundamentalmente en la zona delimitada por kt*>0.7 y $\cos(SZA)>0.4$, característica del pronóstico de condiciones de poca nubosidad o cielos claros durante las horas centrales del día. Por otro lado se observa que en la mitad inferior derecha predomina la subestimación de los valores de GHI que aumenta en dirección a kt*=0 y $\cos(SZA)=1$, situación que corresponde a los pronósticos de mucha nubosidad en horarios cercanos al mediodía. Es en esta zona donde también se producen los mayores valores de RMSE, lo cual la ratifica como la región con más dificultades para el pronóstico de la GHI. En cuanto a los gráficos correspondientes a WRF-Solar+MOS se observa una mejora notable en el Bias pues los valores se aproximan mucho más a 0; mientras que el RMSE también mejora sus resultados fundamentalmente en la zona cercana a kt*=0 y $\cos(SZA)=1$.

En la figura 4 se muestran los valores de GHI pronosticados por WRF-Solar y WRF-Solar+MOS, así como los medidos por ocho estaciones en días diferentes del período evaluado. Para días con poca nubosidad (valores de kt* elevados) como los mostrados en Jovellanos_2015-08-01 y Casablanca_2015-12-18 se observa la tendencia del WRF-Solar a sobrestimar la GHI medida, mientras que WRF-Solar+MOS la subestima. En el caso de la estación de Bahía Honda para el día 2015-11-03 el modelo erró al pronosticar poca nubosidad. Este error no fue corregido en el post-procesamiento y provocó además que las mediciones de la estación quedaran fuera del intervalo de pronóstico durante las 16 y 17 UTC. Para Bainoa_2015-07-11 ocurrió lo contrario, el modelo pronosticó valores de kt* pequeños cuando realmente el día fue predominantemente soleado; sin embargo esta vez el post-proceso MOS mejoró el pronóstico de forma apreciable entre las 14 y las 20 UTC. En los casos de Bauta_2015-07-17, Bayamo_2015-10-04, La Piedra_2015-10-24 y Yabú_2015-08-01 se observan condiciones de nubosidad variables durante el día. Aquí WRF-Solar+MOS obtiene mejores resultados que WRF-Solar.



Figura 3: Bias y RMSE obtenidos en el pronóstico de suma horaria de GHI del WRF-Solar antes(columna izquierda) y después del post-procesamiento(columna derecha).



Figura 4: Valores de suma horaria de GHI pronosticados por WRF (GHI-WRF), corregidos por el post-proceso MOS (GHI-MOS) y medidos por la estación (GHI-Est). El área en azul claro corresponde al intervalo de pronóstico de la GHI determinado por el post-proceso MOS.

5. Conclusiones

En este trabajo fue utilizado el WRF-Solar con el post-procesamiento MOS para realizar pronósticos horarios de la GHI en Cuba. La comparación entre los resultados obtenidos con WRF-Solar y WRF-Solar+MOS demostró que el postprocesamiento mejora el pronóstico de la GHI, pues se logró de forma general una reducción del Bias y el RMSE en función de kt^{*} y el cos(SZA).

En la evaluación del pronóstico de WRF-Solar+MOS en cada estación, se obtuvieron resultados similares tanto incluyendo como excluyendo del período de entrenamiento las mediciones de GHI de la propia estación, lo cual significa que se puede aplicar este método en lugares donde no se cuentan con mediciones previas de GHI. Esto constituye una gran ventaja para las plantas de paneles fotovoltaicos recientemente instaladas en el país las cuales no cuentan con mediciones históricas de irradiancia solar.

Posteriores estudios deberán hacerse donde se amplíe el horizonte de pronóstico hasta 48 o 72 horas y se utilicen otras técnicas de post-procesamiento como el filtro de Kalman y las redes neuronales. También es de interés optimizar la longitud del período de entrenamiento(cantidad de días) y conocer si se producen mejoras al utilizar un post-procesamiento independiente para estación (que incluya solamente a sus mediciones en el entrenamiento). Respecto a esto es necesario que los datos de GHI de las estaciones estén lo más completo posible. Por último queda también probar otras técnicas para mejorar la aproximación del valor de GHI de la salida del modelo a los valores puntuales de las estaciones.

En resumen, este es un primer paso en el uso del modelo WRF con métodos de post-procesamiento para pronosticar la radiación solar con fines energéticos en Cuba. La metodología empleada puede ser utilizada como base para realizar el pronóstico de potencia generada por paneles fotovoltaicos.

Referencias

- C. Bishop. Neural networks for pattern recognition. Oxford Univestity Press, New York, 1995.
- S. Bofinger and G. Heilscher. Solar radiation forecast based on ecmwf and model output statistics. Techical Report AO/1-4364/03/I-IW, EOEP-EOMD,ESA/ENVISOLAR, 2004.
- T. Gerstmaier, M. Bührer, M. Röttger, A. Gombert, C. W. Hansen, and J. S. Stein. How predictable is dni? an evaluation of hour-ahead and day-ahead dni forecasts from four different providers. In Proc. CPV-8 Conf., Toledo, Spain, 2012.
- M. Girodo. Solarstrahlungsvorhersage auf der Basis numerischer Wettermodelle. Phd thesis, Universittät Oldenburg, 2006.
- H. Glahn and D. Lowry. The use of model output statistics(mos) in objective weather forecasting. *Applied Meteorology*, 11:1203–1211, 1972.
- S. Haupt, B. Kosovic, T. Jensen, J. Lee, P. Jiménez, J. Lazo, J. Cowie, T. McCandless, J. Pearson, G. Weiner, S. Alessandrini, and L. D. Monache. The suncast solar power forecasting system: The result of the public-private-academic partnership to advance solar power forecasting. Technical note, NCAR, 2016.
- D. Heinemann, E. Lorenz, and M. Girodo. Solar irradiance forecasting for the management of solar energy system. *Energy and Semiconductor Research Laboratory, Energy Meteorology Group, Oldenburg University.*, 2006b.
- E. Heinemann, D.and Lorenz and M. Girodo. Forecasting of solar radiation. Nova Science Publishers, pages 83–94, 2006a.
- D. Isvoranu and V. Badescu. Preliminary wrf-arw model analysis of global solar irradiation forecasting. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 10(1):8, 2014.
- P. Jiménez, J. Hacker, J. Dudhia, J. Haupt, S.and Ruiz-Arias, C. Gueymard, and et al. Wrf-solar: An augmented nwp model for solar power prediction.model description and clear sky assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015.
- P. Jiménez, S. Alessandrini, S. Haupt, A. Deng, B. Kosovic, J. Lee, and L. D. Monache. The role of unresolved clouds on short-range global horizontal irradiance predictability. *Sin revista*, 2016.
- R. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Jorurnal* of basic Engineering, 82(1):35–45, 1960.
- V. Lara-Fanego, J. Ruiz-Arias, D. Pozo-Vázquez, F. Santos-Alamillos, and J. Tovar-Pescador. Evaluation of the wrf model solar irradiance forecasts in andalusia (southern spain). *Solar Energy*, 86:2200–2217, 2012.

- E. Lorenz, J. Hurka, D. Heinemann, and H. G. Beyer. Irradiance forecasting for the power prediction of grid connected photovoltaic systems. *IEEE Journal of* selected topics in applied earth observations and remote sensing., 2(1):9, 2009a.
- E. Lorenz, J. Remund, S. Müller, W. Traunmüller, G. Steinmaurer, D. Pozo, J. Ruiz-Arias, V. Fanego, L. Ramírez, M. Romeo, C. Kurz, L. Pomares, and C. Guerrero. Bechmarking of different apapproach to forecast solar irradiance. *Proceedings of the 24th European Photovoltaic and solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, Germany*, 2009b.
- E. Lorenz, T. Scheidsteger, J. Hurka, D. Heinemann, and C. Kurz. Regional pv power prediction fo improved grid integration. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7):757–771, 2011.
- P. Mathiesen and J. Kleissl. Evaluation of numerical weather prediction for intraday solar forecasting in the continental united states. *Solar Energy*, 85(5): 967–977, 2011.
- P. Mathiesen, C. Collier, J. Parkes, L. Lnadberg, and J. Kleissl. Improved solar power forecasting using cloud assimilation into wrfimproved solar power forecasting using cloud assimilation into wrf. *Proceedings of the 52nd Annual Conference*, *Australian Solar Energy Society.*, 2014.
- A. A. Rincón. Sistema de pronóstico de radiación solar a corto plazo a partir de un modelo meteorológico y técnicas de post-proceso para España. Tesis de doctorado., Universitat Politecnica de Catalunya., Barcelona, 2013.
- J. Ruiz-Arias, C. Gueymard, J. Dudhia, and D. Pozo-Vázquez. Improvement on the wrf model for solar resource assessments and forecasts under clear skies. *Proc. WREF Conf., Denver, CO, AM Solar En Soc*, 2012.
- J. Ruiz-Arias, J. Dudhia, F. J. Santos-Alamillos, and D. Pozo-Vázquez. Surface clear-sky shortwave radiative closure intercomparisons in the weather research and forecasting model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118:1–13, 2013.
- J. Ruiz-Arias, C. Arbizu-Barrena, F. J. Santos-Alamillos, J. Torvar-Pescador, and D. Pozo-Vázquez. Assessing the surface solar radiation budget in the wrf model: A spation-temporal analysis of the bias and its causes. *Monthly Weather Review*, 2015. i. press, Ed.
- M. Schroedter-Homscheidt, A. Oumbe, A. Benedetti, and J. J. Morcrette. Aerosols for concentrating solar electricity production forecasts: Require quantification and eaacmawaf/macc aerosol forecast assessment. Bulletin American Meteorological Society, pages 902–914, June 2013.
- M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, and C. Gueymard. Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications. Techical report, National Renewable Energy Laboratory, February 2015.

- A. Troccoli and J. J. Morcrette. Forecast assessment of surface solar radiation over australia. *Proc. WREF Conf., Denver, CO, AM Solar En Soc.*, 2012.
- M.-M. Zempila, T. M. Giannaros, M. D. Bais, A., and A. Kazantzidis. Evaluation of wrf shortwave radiation parameterizations in predicting global horizontal irradiance in greece. *Renewable Energy*, 86:831–840, 2016.