

# **Diseño del Control Digital de un Seguidor Solar para la Medición de Radiación Solar Directa en Bogotá**

**Cristian Rodríguez Rodríguez**

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia, rockcristian89@gmail.com

**Andrés Leonardo Jutinico Alarcón**

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia, ajutinico@gmail.com

**Diego Varón Peña**

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia, dievarpe@gmail.com

**Nelson Forero Chacón**

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, Colombia, nlforeroc@bt.unal.edu.co

## **RESUMEN**

La radiación solar directa es una variable, que no es comúnmente medida en la ciudad de Bogotá y que es de gran interés en diseño de sistemas Foto Voltaicos. El presente artículo describe el diseño de un controlador digital, implementado en un seguidor solar acoplado a un Pirheliómetro, con el fin de realizar dicha medición. Los índices de desempeño del sistema son adecuados para el seguimiento solar, en particular se elimina el error de estado estacionario utilizando un compensador dither y el tiempo de estado estacionario es de 28 segundos. El controlador y el sensor se encuentran en funcionamiento desde el 17 de julio de 2012 de forma continua, esto contribuirá a complementar los estudios realizados al medio ambiente en la ciudad. El documento esta dividido en cinco secciones las cuales muestran la identificación del modelo de referencia del seguidor solar, el diseño del controlador utilizando un modelo de referencia y el controlador en LabVIEW.

**Palabras Clave:** Seguidor Solar, radiación solar, Pirheliómetro, LabVIEW.

## **1. INTRODUCCION**

La medición de parámetros del medio ambiente, como la radiación solar, velocidad de los vientos, humedad, temperatura y presión es de interés en la generación de energía. En la ciudad de Bogotá estos datos son medidos por entes gubernamentales y a nivel académico por parte de las Universidades. La energía solar es la energía recibida en la tierra proveniente del sol. Esta energía es inagotable, no produce efectos contaminantes y es gratis. A través de los últimos veinte años las investigaciones para la utilización de esta energía han dado avances importantes en la generación de electricidad (Zibin et al 2012.,).

Las tres componentes de la radiación solar son la radiación solar directa, difusa y reflejada. La radiación solar directa es la radiación que proviene directamente del disco solar y por lo tanto ha de medirse utilizando sistemas de seguimiento solar. La Figura 1 representa las componentes de la radiación solar.

La medida de la radiación directa necesita de la orientación perpendicular a los rayos solares. La medición de la radiación solar directa se hace por medio de pirheliómetros, sin embargo esta medida varía de acuerdo a factores atmosféricos, geográficos, topográficos y meteorológicos (Wang et al 2009., Islam et al 2008).



**Figura 1: Componentes de la Radiación Solar.**

Las medidas de radiación solar en Bogotá se presentan en las componentes globales en su mayoría, la componente difusa en un menor grado y la componente directa solo para calibración. Por tal motivo es indispensable realizar la medición de la radiación solar continua. La medición de la radiación solar varía de acuerdo a factores como la ubicación geográfica, la ubicación de la superficie del instrumento, la orientación, el tiempo del día y la condición atmosférica (Vera et al 2005.,).

Para la medición de la radiación solar directa es necesario contar con un elemento que permita realizar el seguimiento del sol, para tal propósito es necesario contar con un Seguidor Solar. Los seguidores solares son mecanismos utilizados para aumentar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, este aumento de eficiencia es cerca del 30 al 60 por ciento. Este aumento depende del lugar donde se efectuó la medición (Aleksander et al 2009.,).

Los seguidores también son utilizados para realizar mediciones de radiación solar. Estos se encargan del seguimiento del sol y en ellos se disponen los sensores para efectuar la medida de radiación.

La precisión de los seguidores solares se da de acuerdo a su configuración, ya sean utilizando sensores de posición o algoritmos astronómicos. Los seguidores solares que utilizan sensores los utilizan para detectar la luz del sol, estos son poco utilizados ya que las condiciones atmosféricas afectan el desempeño de estos. Los seguidores que utilizan un algoritmo para calcular la posición del sol son precisos y de muy bajo costo, por lo general se utilizan microcontroladores para realizar el cálculo (Shoukun et al 2011.,).

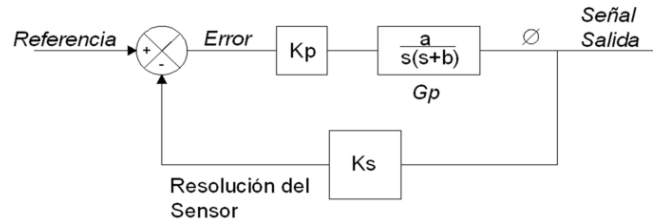
El seguidor solar debe ser controlado para que el sensor este posicionado directamente hacia el sol y de esta forma realizar la medición de la radiación solar de forma continua, esta medida será la única en la ciudad de Bogotá realizada de esta manera. A continuación se presenta el desarrollo del cálculo del control digital.

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA DEL SEGUIDOR SOLAR

La identificación del modelo matemático en los sistemas de control es necesaria para determinar el comportamiento óptimo que realizará la planta. Este modelo matemático genera las pautas del diseño para su posterior funcionamiento en base al comportamiento esperado del sistema (Ogata et al 2006.,).

La caracterización del sistema es uno de los pasos fundamentales para desarrollar el control, al obtener una caracterización errónea es posible que el control diseñado no sea óptimo.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de bloques del modelo teórico del seguidor solar. Donde,  $K_p$  es la constante proporcional,  $G_p$  es el modelo de un sistema de segundo orden tomado como referencia,  $K_s$  es la resolución del sensor, *Referencia* es la señal de entrada de la planta en voltios y *Señal de Salida* es el ángulo del pirheliómetro dado en grados.

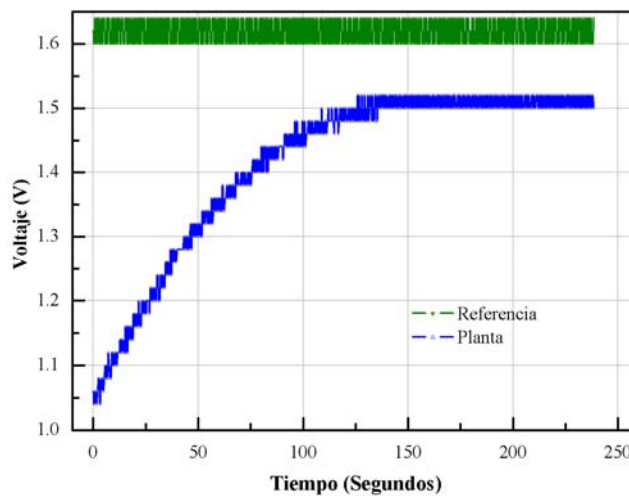


**Figura 2: Diagrama de bloques del modelo teórico del seguidor solar.**

La resolución del sensor ( $K_s$ ) está dada por la variación del sensor de posición, dada en grados sobre voltaje. El valor de la resolución es:

$$K_s = 0.00866667 \text{ [V/}^\circ\text{]}$$

La Figura 3 muestra la caracterización realizada al seguidor solar, los datos se obtuvieron con pruebas experimentales de seguimiento. El procedimiento era llevar el seguidor solar de un ángulo de  $0^\circ$  hasta  $156^\circ$ , esta diferencia angular corresponde al rango de voltaje entre 1.04V y 1.62V; en este estado el seguidor solar presenta un error de estado estacionario del 6%.



**Figura 3: Caracterización del Seguidor Solar**

Con los datos encontrados se toman en consideración el tiempo de subida ( $t_{sub}$  cuando la señal alcanza el 90% de la respuesta esperada) y el tiempo de establecimiento ( $t_{est}$  cuando la señal alcanza el 98% de la respuesta esperada). Estos tiempos se obtienen del promedio de las pruebas realizadas, como resultado se determina que:

$$t_{sub} = 103.12 \text{ seg}$$

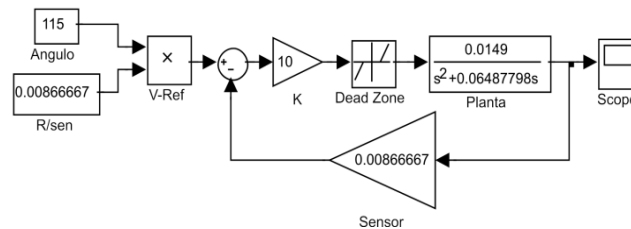
$$t_{est} = 123.64 \text{ seg}$$

De acuerdo con las ecuaciones para los sistemas críticamente amortiguados se obtiene (Ogata et al 2006.,)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{a}{s(s+b)} = \frac{H_0 \omega_n^2}{s(s+2\zeta H_0 \omega_n)}$$

Luego de hallar los valores esperados, estos son utilizados para construir el modelo matemático de la planta según el modelo teórico presentado en la Figura 2. El modelo de la planta se presenta en la Figura 4.

Los datos de caracterización del seguidor solar presentan una característica de no linealidad conocida como Zona Muerta. Esta característica hace que la planta tenga un comportamiento no deseado representado como un error de estado estacionario.

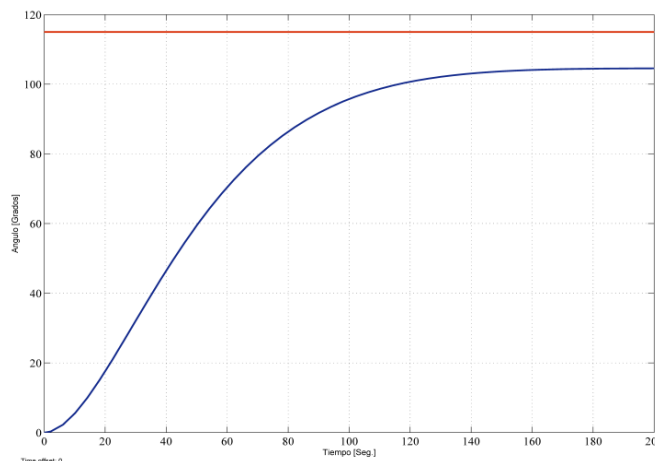


**Figura 4: Diagrama de bloques del modelo matemático que caracteriza al seguidor solar.**

En la Figura 5 se presenta la simulación del modelo matemático, la línea roja representa la señal de referencia y la línea azul el comportamiento de la planta. La grafica es igual a la obtenida con el osciloscopio, concluyendo que la identificación de la planta se realizó correctamente. Ahora se procede a realizar el diseño del controlador el cual modifique el comportamiento de la planta.

Al analizar la función descriptiva de la zona muerta y las simulaciones, se concluye que la zona muerta describe un cambio en la referencia de entrada de la planta, por tal motivo es necesario eliminar esta no linealidad.

La forma de eliminar la zona muerta es por medio de una señal Dither. La señal Dither es una señal periódica con una frecuencia y una amplitud determinada de acuerdo a la zona muerta a eliminar (Zibin et al 2010.,). Esta señal compensa el voltaje de arranque del motor, este voltaje es el necesario para que el motor sea capaz de romper la inercia y empezar el movimiento.



**Figura 5: Simulación del modelo matemático del seguidor solar.**

### 3. CONTROL POR MEDIO DE UN MODELO DE REFERENCIA

El comportamiento actual del sistema no es satisfactorio con lo requerido, el tiempo de establecimiento ( $t_{est}$ ) es de 123.64 segundos el cual no es conveniente ya que la corrección del ángulo se debe hacer cada minuto para asegurar un seguimiento adecuado. Debido a esto se procede a diseñar un comportamiento dinámico óptimo mediante los polinomios característicos de Bessel (Ogata et al 2006.), los cuales no presentan un sobre pico en la respuesta final.

La Figura 6 presenta el esquema general para el diseño del controlador.

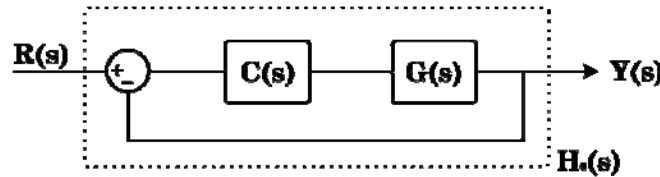


Figura 6: Esquema de un modelo de referencia.

En este modelo se tiene que  $R(s)$  es la entrada del sistema,  $Y(s)$  la salida del sistema,  $G(s)$  el modelo de la planta,  $C(s)$  el control del sistema y  $H(s)$  el modelo de referencia.

Durante las pruebas experimentales se midió el tiempo de respuesta que el seguidor solar toma para realizar el barrido correspondiente entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (máxima trayectoria presentada) con el voltaje máximo en el motor de 12V, este tiempo corresponde a 25 segundos, tiempo el cual será tomado como el óptimo para el diseño, con este tiempo se puede corregir el ángulo del seguidor dos veces cada minuto, además es la velocidad máxima a la cual se mueve el seguidor. Utilizando este valor, según el criterio polinomio de Bessel se calcula la frecuencia natural no amortiguada según las siguientes ecuaciones:

$$\omega_n = \frac{4,6}{2t_{est}}$$

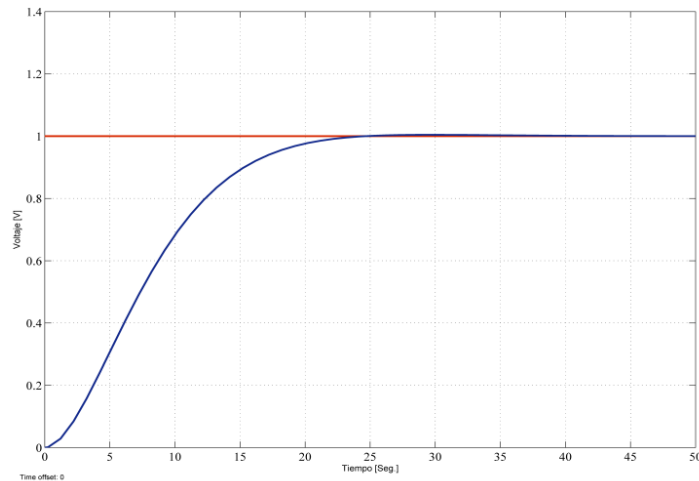
$$2\zeta\omega_n = \sqrt{3}\omega_n \text{ por lo tanto } \zeta = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\omega_n = \frac{4,6}{25[\text{Seg.}] \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0,212464$$

De esta manera el modelo de referencia determinado por el polinomio de Bessel está dado por la siguiente ecuación:

$$H_0(s) = \frac{0,0451413333}{s^2 + 0,368s + 0,0451413333}$$

El comportamiento del modelo de Bessel se presenta en la Figura 7, La línea roja representa la referencia y la línea azul el comportamiento de la planta, en este caso el tiempo de asentamiento es de 25 segundos, este comportamiento corresponde al diseño planteado.

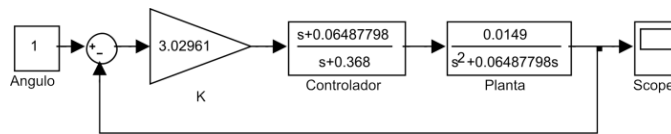


**Figura 7: Simulación del modelo de referencia diseñado para el control del seguidor solar.**

Al obtener  $H_0(s)$  se calcula el controlador, se utiliza la matemática de bloques en la Figura 6 y se obtiene la función de transferencia del controlador  $C(s)$ ,

$$C(s) = 3.02961 \frac{s + 0.06487798}{s + 0.368}$$

De esta forma se obtiene el control, la Figura 8 presenta el diagrama de bloques del seguidor solar y el controlador.



**Figura 8: Diagrama de bloques que representa el control diseñado utilizando el modelo de referencia.**

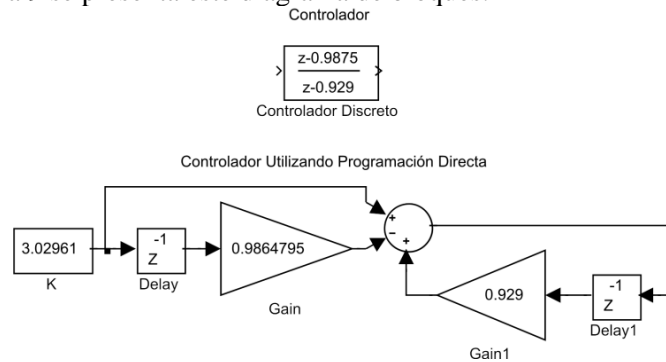
Ya que al encontrar el modelo de referencia, el controlador fue definido en forma continua, es necesario encontrar un modelo del mismo de manera discreta, e incluir el periodo de muestreo en el diseño. El tiempo de muestreo es de 0.2 segundos, este tiempo es el que toma el instrumento virtual en realizar los cálculos astronómicos para posicionar el seguidor solar. La función discreta del controlador es:

$$C(z) = \frac{z - 0.9875}{z - 0.929}$$

El controlador propuesto cambia el sistema original incluyendo una constante proporcional igual a 3.02961, un polo en 0.9875 y un cero en 0.929, mejorando el tiempo de respuesta del seguidor.

El paso siguiente es diseñar el controlador en el programa de National Instrument – LabVIEW 8.5, estos programas son llamados instrumentos virtuales (VI) y son usados en instrumentación y control de procesos a nivel industrial.

Para implementar el controlador en Labview es necesario representarlo en términos de retardos ( $z^{-1}$ ). Se utilizo el método de programación directa, el cual representa el controlador en un diagrama de bloques, de esta forma se incluye en el VI. En la Figura 9 se presenta este diagrama de bloques.



**Figura 9: Representación del Controlador utilizando programación directa.**

Al obtener este esquema se realiza la programación en Labview. La Figura 10 presenta el panel frontal del instrumento virtual diseñado.



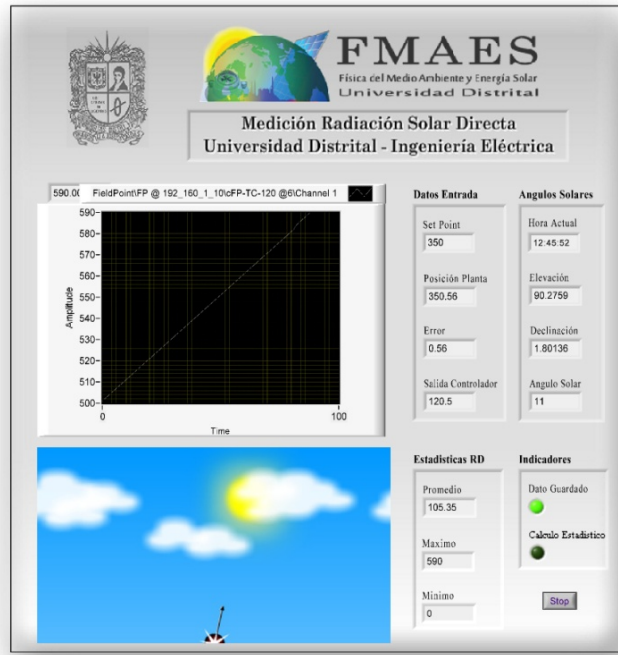
**Figura 10: Panel frontal del controlador diseñado en LabVIEW.**

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

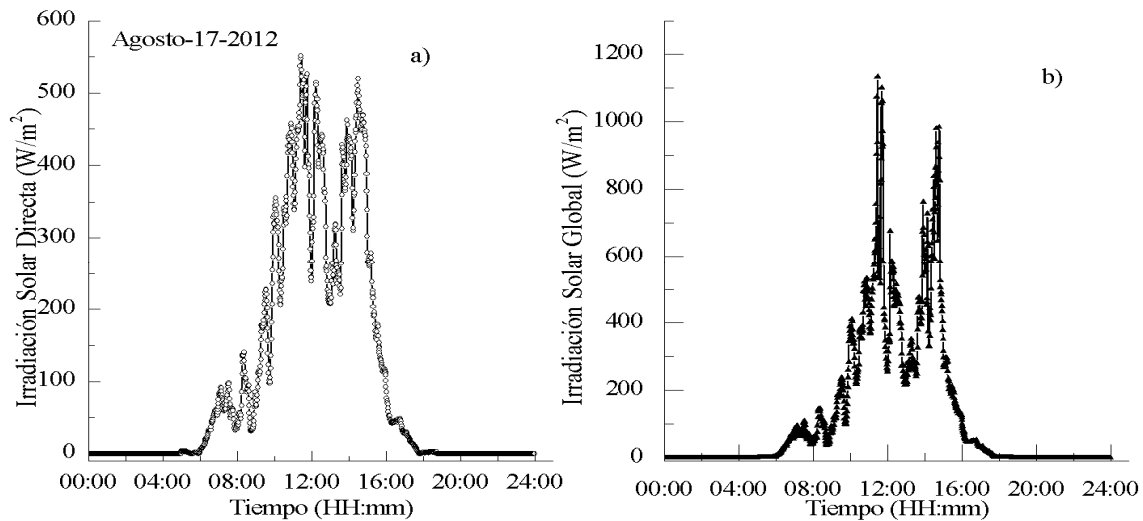
El controlador diseñado presenta un buen comportamiento, el seguidor solar presenta un tiempo de 28.5 segundos en su trayectoria de 0° a 180°. Este tiempo es mayor al planteado en el diseño, sin embargo la corrección del ángulo se alcanza a hacer dos veces cada minuto. Este tiempo es aceptable. En la Figura 11 se presenta panel frontal del VI diseñado para el control y medición de la radiación solar.

En la Figura 12 se presentan los datos de la radiación solar directa registrados por el VI, medidos con el Pirheliómetro de la marca Epplay Lab montado sobre el seguidor solar. Los datos que se presentan han sido obtenidos en la Universidad Distrital F.J.C – Macarena B, Bogotá durante el diecisiete de Agosto del 2012. Los datos medidos no se compararon con datos de otras entidades, porque no fue posible encontrar en la ciudad de Bogotá mediciones continuas de radiación solar directa.

La radiación solar directa máxima presentada este día es de  $551.909 \text{ W/m}^2$ , valor obtenido a las 14:14 horas, obteniéndose los promedios más altos entre las 13:00 y las 14:00 horas. El perfil de radiación solar directa se presenta en la figura 12 a) en contraste con los de la radiación solar global, adquiridos a partir de un Piranómetro Eppley tipo termopila perteneciente al grupo de investigación FMAES de la Universidad Distrital.



**Figura 11:** Panel frontal del IV diseñado en Labview, este controla el seguidor solar y muestra los datos de radiación solar directa.



**Figura 12:** a), radiación solar directa.

**b) radiación solar global para el 17 de Agosto 2012, a manera de contraste.**

## 5. CONCLUSIONES



La caracterización de la planta se realizó con pruebas experimentales, proporcionando los datos necesarios para plantear el modelo matemático utilizado para diseñar el control.

Los resultados obtenidos muestran que el seguidor solar se posiciona adecuadamente para realizar las mediciones de la radiación solar directa.

Los datos de radiación solar directa en Bogotá son el aporte principal del proyecto. Estos datos son obtenidos realizando una medición continua de la radiación solar directa en la ciudad de Bogotá, además ninguna entidad realiza esta medición de esta forma.

## 6. REFERENCIAS

Zibin, X., Kantchev, G. y Kchaou, H. s.l.(2012) “*Determination of the exploitable solar energy for electricity generation using the photovoltaic systems*” Publish: IEEE.

Wang Li., Qui Xinfu.( 2009) “*Distributed Modeling of Direct Solar Radiation of Rugged Terrain Base on GIS*” School of Remote Sensing. Nanjing University of Information Science and Technology, China. Publish: IEEE.

Vera Mella, Nelson. (2005) “*Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica*”. Barcelona : Tesis Doctoral - Universidad Politécnica de Cataluña.

Aleksander Stjepanovic, Sladjana Stjepanovic, Ferid Softic, Zlatko Bundalo.(2009) “*Microcontroller Based Solar Tracking System*”. Publish: IEEE.

Shoukun Xu, Dan Kong, Zhenghua Ma, LiuJun Yao. (2011) “*The implementation of High-Precision Solar Tracking System*”. Department of Information Science and Engineering, Changzhou University, China. Publish: IEEE.

*K. Ogata. Sistemas de Control 2006.*

Zibin, W. y Jianqing, M. Hangzhou, ZheJiang Province. (2010).”*Study on Improving the Dead Zone Character of Electro-Hydraulic Servo System with Dither*”, Publish:IEEE.

Islam M.D., Kubo I., Ohadi M., Alili A.A. (2008) “*Measurement of solar energy radiation in Abu Dhabi, UAE*” *Department of Mechanical Engineering, The Petroleum Institute, Abu Dhabi, P.O. Box 2533, United Arab Emirates* Editors: Applied Energy, Elsevier Ltd. All rights reserved.

### ***Authorization and Disclaimer***

*Andres Leonardo Jutinico Alarcón authorize PREC to publish the paper in the conference proceedings. Neither PREC nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.*