

Diseño paramétrico asistido por computadora de un seguidor solar fotovoltaico a un eje polar / Computer aided parametric design of a polar axis photovoltaic solar tracker

Luis Yoandri Noa-Diéguez tecnologia@turei.co.cu *

Vladimir Álvarez-Sánchez vladimir@facing.uho.edu.cu **

Roberto Pérez-Rodríguez, roberto.perez@facing.uho.edu.cu ***

Institución de los autores

* Empresa de cigarros "Lázaro Peña"

, * Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya"

País: Cuba

RESUMEN

En las últimas décadas existe un marcado interés mundial hacia la investigación, desarrollo y aplicación de las fuentes renovables de energías, debido a su indiscutible impacto en la disminución de los efectos del cambio climático. Una de las variantes de este tipo de energías, es la que se obtiene del sol. Para ello, se utilizan entre otras tecnologías, los seguidores solares. Este artículo presenta las características generales de un procedimiento para el diseño paramétrico de un seguidor solar a un eje polar, utilizando las herramientas CAD/CAE. El procedimiento considera un conjunto de requerimientos funcionales definidos por el ingeniero y produce una descripción de los módulos y partes que conforman el seguidor solar a un eje. El alcance es ilustrar el procedimiento para el diseño paramétrico del referido seguidor solar.

PALABRAS CLAVE: DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORAS; DISEÑO PARAMÉTRICO; SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO.

ABSTRACT

In recent decades there is a strong global interest in research, development and application of renewable energy sources due to its indisputable impact on reducing the effects of climate change. One of the variants of this type of energy is obtained from the sun. To obtain this type of energy, different technologies are used, one of

them is the photovoltaic solar tracker. This article presents the general characteristics of a procedure for the parametric design of a solar tracker to a polar axis, using the CAD/CAE tools. The procedure considers a group of functional requirements defined by the engineer and a description of the modules and parts that make up a one-axis solar tracker. The objective of the article is to illustrate the procedure for the referred solar follower parametric design.

KEYWORDS: COMPUTER AIDED DESIGN; PHOTOVOLTAIC SOLAR TRACKER; PARAMETRIC DESIGN

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el interés mundial hacia la investigación, desarrollo y aplicación de las fuentes renovables de energías, viene dado por la irrefutable conclusión de que la utilización de estas fuentes energéticas, conlleva a disminuir los efectos del cambio climático a nivel global. Dentro de las fuentes renovables de energía se dispone de una amplia gama, como son: la eólica, la marítima, la geotérmica, la solar fotovoltaica y la obtenida de la biomasa [1].

Según Neha y colaboradores [2], la cantidad de energía solar recibida anualmente por la tierra es de $1,5 \times 10^{18}$ kWh, lo que representa diez mil veces el consumo del planeta en ese mismo período de tiempo. Por tanto, además de ser el sol el actor principal de los procesos biológicos en la tierra, es una poderosa e inagotable fuente de energía.

Dentro de los distintos tipos de sistemas de captación solar destaca la fotovoltaica, la cual convierte directamente la radiación proveniente del sol en energía eléctrica. Existen dos formas de lograr un mejor aprovechamiento de la energía solar que se obtiene: (a) la primera consiste en mejorar los componentes internos de las celdas fotovoltaicas (materiales y métodos de fabricación) de manera que su rendimiento aumente [3, 4]; y (b) aumentar la cantidad de radiación solar recibida, buscando que el área del panel permanezca en posición perpendicular a la radiación solar [5]. Con este último fin, se utilizan los llamados seguidores solares, que son dispositivos electro-mecánicos que orientan la superficie captadora durante el recorrido aparente del sol.

En este contexto se trabaja cada vez con mayor ritmo en la búsqueda de nuevas oportunidades de mejora de los sistemas de seguimiento, mediante soluciones rápidas y flexibles. Una de las formas de lograr este objetivo,

además de la obtención de soluciones ajustables a distintas áreas, escenarios y tipos de sistemas de captación, es la aplicación del diseño paramétrico en el proceso de diseño de ingeniería basado en los sistemas CAD/CAE.

Este artículo presenta las características generales de un procedimiento para el diseño paramétrico de un seguidor solar a un eje polar, utilizando las herramientas CAD/CAE. El procedimiento considera un conjunto de requerimientos funcionales definidos por el ingeniero y produce una descripción de los módulos y partes que conforman el seguidor solar a un eje. El alcance del artículo es ilustrar el procedimiento para el diseño paramétrico del referido seguidor solar.

Antecedentes

Según Morales [6], el diseño paramétrico consiste en la generación de geometrías a partir de la definición de una familia de parámetros iniciales y la programación de las relaciones formales que existen entre ellos. Esto permite generar todo el rango de posibles soluciones que la variabilidad de los parámetros iniciales permita. Las ventajas de este proceso son inmediatas, pues es un salto cualitativo en la calidad del proceso de diseño, al no estar constreñido por la herramienta que utilicemos.

En la literatura consultada varios autores abordan el diseño de seguidores solares entre los que destacan Grassi y colaboradores [7], quienes en su investigación presentan el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes, controlado por medio de una conexión a una computadora personal. El sistema propuesto es de bajo costo, utiliza componentes reciclados y permite aumentar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos de manera significativa. En ese trabajo no se hace referencia a la parametrización desde el punto de vista del diseño en sistemas CAD.

Por otra parte, Pineda-Arciniega y colaboradores [8] desarrollan un seguidor solar desde la etapa del diseño de mecanismos, seleccionan los materiales y las propiedades de los mismos, realizando el modelado con herramientas CAD y el posterior análisis empleando herramientas CAE en *SolidWorks*[®], sin llegar a la parametrización del modelo CAD.

González y colaboradores [9] propusieron la utilización de dos mecanismos de cuatro barras como impulsores de un seguidor solar, con el procedimiento analítico asociado. El procedimiento tuvo por objetivo optimizar el ángulo de

transmisión y disminuir el torque impulsor. Se obtuvo un modelo matemático y se construyó un prototipo del seguidor solar. No se utilizó la parametrización CAD en el diseño del prototipo.

Se identifica como necesidad, la utilización de un procedimiento que facilite al diseñador parametrizar el diseño de los seguidores solares a un eje, utilizando las herramientas CAD/CAE, con el objetivo de evaluar de manera automatizada, las diferentes variantes factibles a construir.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos analizados para el diseño de seguidores solares a un eje, tienen como insuficiencias, la no utilización de procedimientos que faciliten el proceso de búsqueda de soluciones que garanticen los requerimientos exigidos. Es común la utilización de los sistemas CAD como plataformas de dibujo en tres y dos dimensiones, para análisis estático o dinámico de estructuras en los sistemas CAE, pero no se abordan enfoques que garanticen una mejor variabilidad de soluciones utilizando las herramientas de parametrización del diseño que ofrecen los propios sistemas CAD.

A partir de estos análisis, se desarrolló un procedimiento (Figura 1) que facilita el proceso de diseño paramétrico en las plataformas CAD, específicamente utilizando el *SolidWorks*®.

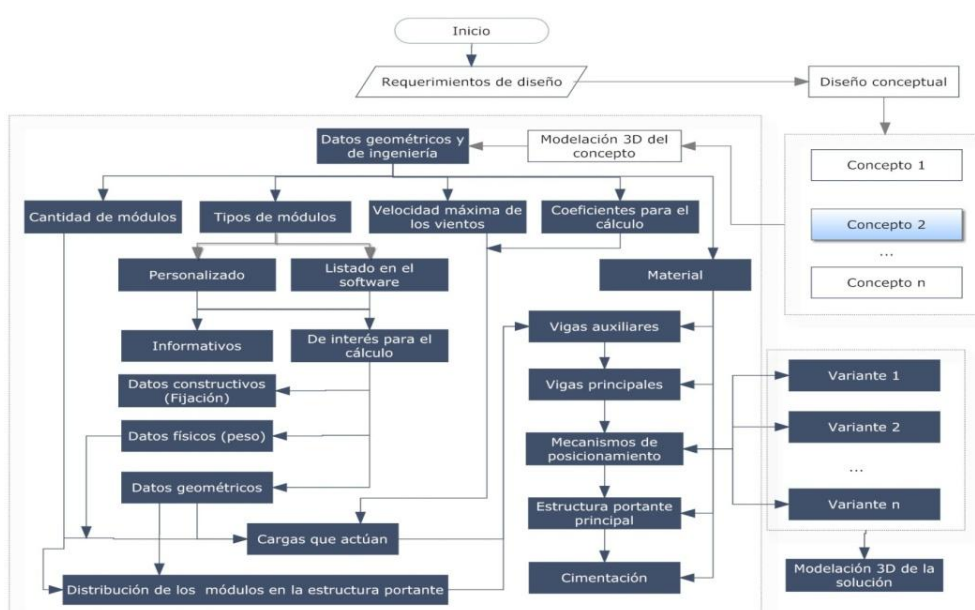


Figura 1. Procedimiento para el diseño paramétrico en sistemas CAD de un seguidor solar de un eje.

Este procedimiento parte del planteamiento de los requerimientos funcionales exigidos para el seguidor solar a un eje, estos se expresan a través de un listado ordenado y estratificado de necesidades. Este listado constituye la entrada al diseño conceptual de los seguidores solares y forman parte de los criterios de evaluación para los diferentes conceptos a analizar. Una vez seleccionado el concepto a desarrollar, se genera su modelo tridimensional, que es donde se ejecuta el proceso de parametrización CAD.

Según se describe en la Figura 1, la obtención del modelo tridimensional ajustado a las demandas constructivas y de resistencia comienza con los datos de entrada. Que incluye: cantidad y tipos de módulos fotovoltaico (FV) disponibles o deseados. Para el caso del tipo de módulo, el usuario tiene la opción de crear uno personalizado de forma que permita la utilización de una gama mayor a las disponibles en el software CAD; velocidad máxima de los vientos según lugar de emplazamiento y los distintos coeficientes para el cálculo.

El módulo FV como elemento base a partir del cual se estructurará el resto del sistema está definido por un conjunto de datos, de los cuales una parte están referidas a informaciones que son utilizadas fundamentalmente para el cálculo eléctrico y para las condiciones de operación del sistema. Estos datos son entre otros: potencia nominal expresada en Watt pico (Wp), tensión en circuito abierto y tensión en máxima potencia expresadas en (V), eficiencia en (%), resistencia al impacto y temperaturas de trabajo, etc.

Por otra parte, los datos de interés para el cálculo de resistencia y dimensionamiento de la estructura del seguidor solar son: los constructivos, que definen la fijación de los módulos a la estructura portante y los físicos que en conjunto con los datos geométricos permiten determinar las cargas actuantes sobre el sistema.

La distribución de los módulos en la estructura portante se realiza bajo dos criterios: la relación entre el ancho y el largo debe ser lo más cercano a uno, con el objetivo de que la distancias entre el centro de rotación y el punto más alejado del panel en los ejes de las abscisas y las ordenadas, tenga los valores más cercanos posibles. A partir de conocer el valor de las cargas actuantes sobre el sistema, se procede a dimensionar cada uno de los elementos que componen el seguidor, determinando en cada caso las relaciones geométricas y de posición.

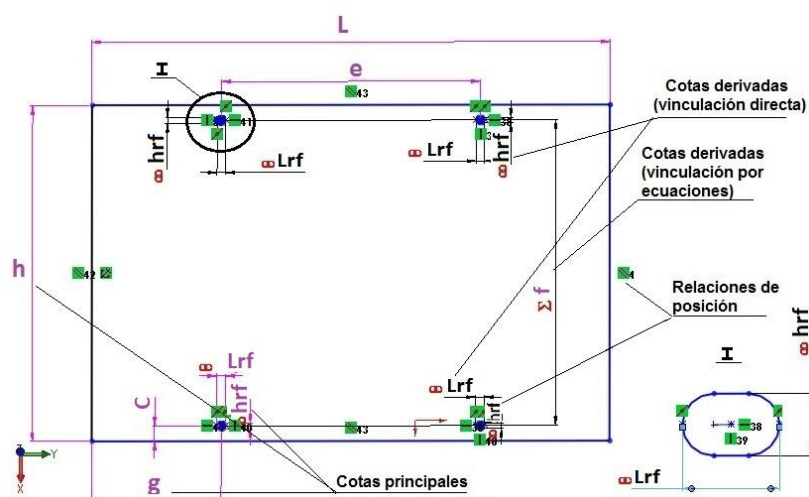


Figura 2. Croquis y definición de cotas del módulo FV.

Cada croquis está definido por las cotas principales y las derivadas (Figura 2). Las principales son aquellas que provienen de los datos de entradas o de los cálculos analíticos, por su parte, las cotas derivadas tienen una relación dependiente de las principales a través de dos variantes: la vinculación directa de valores para aquellas que tendrán siempre dimensiones iguales entre sí y la correlación mediante ecuaciones, para las que dependen de una relación matemática. Se emplean además las relaciones de posición entre las entidades del croquis para garantizar se cumplan siempre, determinadas condiciones constructivas.

Las cotas de los croquis y los parámetros de las operaciones son colocados en las tablas de diseño de *SolidWorks*®, tanto las piezas independientes como los ensambles, las que finalmente son exportadas como ficheros independientes de *Microsoft Excel*®. Esto permite, además del dimensionado automático de las piezas, la interrelación entre los elementos del modelo.

Procedimiento de cálculo

I. Determinación de las cargas actuantes sobre el modelo

- a) A partir de los datos de entradas declarados en la Figura 1 se determina el área total del panel (A_{tp} , en m^2) y su peso (P_{tp} , en kg) según las ecuaciones (1) y (2).

$$A_{tp} = A_m \cdot C_m \quad (1)$$

$$P_{tp} = P_m \cdot C_m \quad (2)$$

- b) Determinación de la fuerza del viento (F_{vt} , en N) según [10] por la ecuación (3).

$$F_{vt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_{tp} \cdot V^2 \quad (3)$$

ρ_a : Densidad del aire.

II. Distribución de los módulos en la estructura portante

- a) Conociendo A_{tp} , se determinan sus lados (a , en m) mediante la ecuación (4) y la cantidad de módulos (C_{my}) en el sentido del eje y , que es donde se ubica el lado más largo del módulo, según la ecuación (5).

$$a = \sqrt{A_{tp}} \quad (4)$$

$$C_{my} = a/l \quad (5)$$

- b) Conociendo C_{my} , se determina la cantidad de módulos en el sentido del eje (x), (C_{mx}), según la ecuación (6).

$$C_{mx} = C_m / C_{my} \quad (6)$$

III. Determinación de las cargas actuantes y dimensionamiento de las vigas auxiliares

Estas vigas forman parte de la estructura portante y tienen la función de permitir la sujeción de los módulos a la estructura soportando el peso de los mismos y las cargas originadas por la acción de los vientos. La determinación de las cargas actuantes se obtiene a través del siguiente procedimiento.

- a) Según el diseño objeto de estudio, se necesitan dos vigas por cada módulo ubicado en el eje (y). Sobre cada viga actúa una carga (q_{va} , en N/m) provocada por la fuerza del viento y determinada por la ecuación (9). La longitud de la viga auxiliar (L_{va} , m) se determina según la ecuación (10).

$$q_{va} = \left(\frac{F_{vt}}{2 \cdot C_{my}} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_{va}} \right) \quad (9)$$

$$L_{va} = (h \cdot C_{mx}) + [S_{em} \cdot (C_{mx} - 1)] \quad (10)$$

- b) Se calcula el momento flector máximo $Mf_{m\acute{a}x}$ y la fuerza cortante Q a los que está sometida cada viga, según [10], determinadas por las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$Mf_{m\acute{a}x} = -\frac{q_{va} d_b^2}{2} \quad (11)$$

$$Q = q_{va} [d_{vp} + 2d_b - (d_b + d_{vp})] \quad (12)$$

- c) Determinación de la tensión admisible ($[\sigma]$, MPa) según la ecuación (13).

$$[\sigma] = \frac{\sigma_f}{c_s} \quad (13)$$

- d) Aplicar condición de resistencia, según la ecuación (14).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mf_{m\acute{a}x}}{[W_y]} \leq [\sigma], [W_y] = \frac{Mf_{m\acute{a}x}}{[\sigma]} \quad (14)$$

IV. Dimensionamiento de la viga auxiliar

Se determina la sección del perfil, para el caso de un perfil rectangular de paredes delgadas.

RESULTADOS DEL TRABAJO

Partiendo del diseño conceptual del seguidor solar S1XP-00, se generó el modelo 3D empleando el software profesional de diseño SolidWorks®. Se establecen las relaciones entre las cotas de cada pieza y entre los elementos del modelo, manteniendo la proporcionalidad y las geometrías deseadas.

A partir de las geometrías generadas por el procedimiento de parametrizado del seguidor. Donde para el caso de la viga auxiliar se ajustará para cumplir las diferentes solicitaciones en los siguientes parámetros: longitud de la viga, dimensiones del perfil, posición y dimensiones de los agujeros, opcionalmente se puede variar el material.

Se realizaron los análisis numéricos correspondientes empleando el método de elementos finitos (MEF), aprovechando las ventajas que ofrece el *Solidworks*®, con el objetivo de comprobar el dimensionamiento obtenido. Para ello se le colocan las cargas determinadas en los cálculos anteriores, las restricciones fijas y el mallado tipo sólido, según se muestra en la Figura 3.

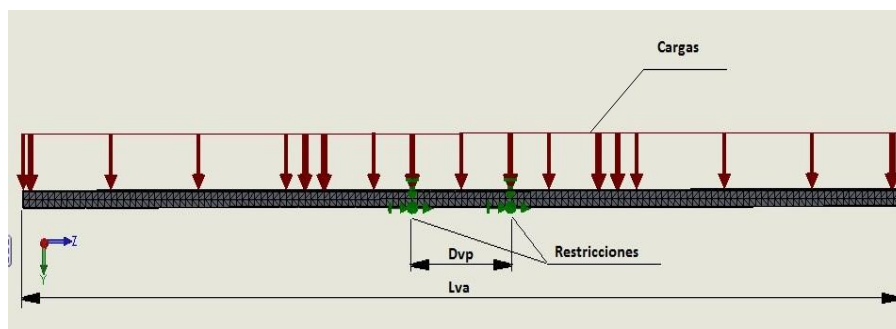


Figura 3. Viga auxiliar, cargas, restricciones y mallado.

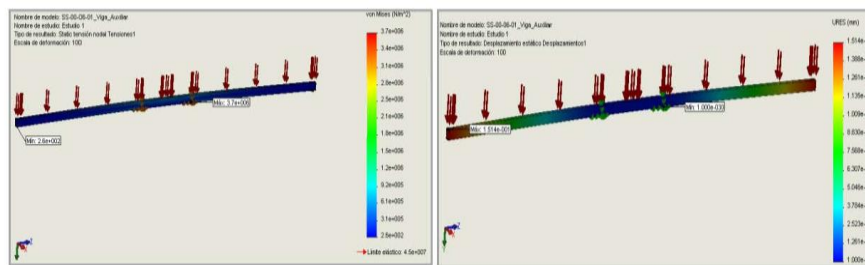
Análisis de los resultados

Caso de estudio I

Datos iniciales: cantidad de módulos: 6; tipo: XH-140, $A_{tp} = 6 \text{ m}^2$; $P_{tp} = 81 \text{ kg}$; $V = 27 \text{ m/s}$; $\sigma_f = 90 \text{ Mpa}$ coeficiente de seguridad: 2.

Datos calculados: cantidad de vigas: 6; longitud de la viga: 2 m ; distancia de las vigas principales (restricciones): 0.336 m ; fuerza del viento sobre el panel: 3175.3 N ; carga sobre cada viga: 264.7 N/m ; perfil Ancho, alto y espesor (B,H,e): 26x40x2mm.

Como se puede apreciar en la Figura 4 (a), las tensiones mínimas ocurren en los extremos, mientras que las tensiones máximas surgen en las restricciones, que es donde se apoya la viga auxiliar en la principal. El valor máximo de la tensión no supera el límite permisible, por lo que se comprueba que la viga resiste.



a) Tensiones en la viga

b) Desplazamientos en la viga

Figura 4. Tensiones y desplazamientos en el caso de estudio I.

En la Figura 4 (b) se muestran los desplazamientos mínimos que ocurren en las restricciones, mientras que los desplazamientos máximos ocurren en los extremos. El valor máximo es de 0.15 mm , siendo esta una deformación admisible.

Caso de estudio II

Datos iniciales: Cantidad de módulos: 16; Tipo: XH-140, $A_{tp} = 16\text{ m}^2$; $P_{tp} = 213\text{ kg}$; $v = 27\text{ m/s}$; $\sigma_f = 90\text{ Mpa}$; coeficiente de seguridad: 2.

Datos calculados: cantidad de vigas: 8; longitud de la viga: 4.01 m ; distancia de las vigas principales (restricciones): 0.336 m ; fuerza del viento sobre el panel: 8467.52 N ; carga sobre cada viga: 263.75 N/m ; perfil: 60 mm de ancho, 39 mm de altura y 3 mm de espesor.

En la Figura 5 a) se aprecian que las tensiones mínimas ocurren en los extremos, mientras que las tensiones máximas surgen en las restricciones. El valor máximo de la tensión no supera el límite admisible, con un margen razonable, por lo que se comprueba que la viga resiste las cargas aplicadas.

Como se puede apreciar en la Figura 5 (b), para el segundo caso de estudio, los desplazamientos mínimos ocurren en las restricciones, que es donde se apoya la viga auxiliar en la principal, mientras que los desplazamientos máximos ocurren

en los extremos. El valor máximo del desplazamiento es de 0.65mm, pero aún el desplazamiento es admisible.

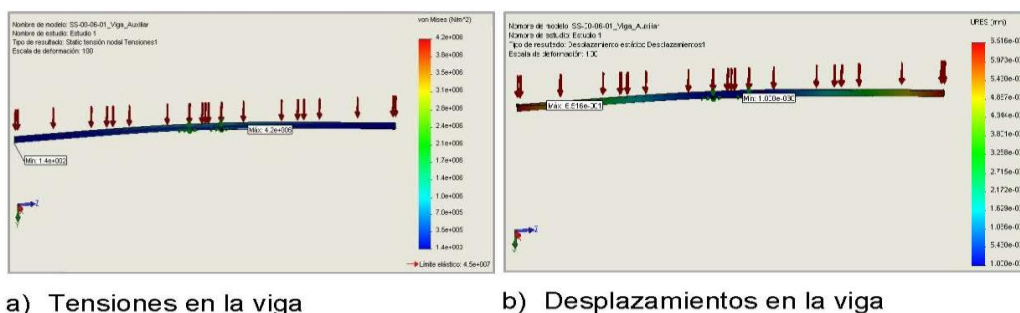


Figura 5. Tensiones y desplazamientos en el caso de estudio II.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo un procedimiento para el diseño paramétrico de un seguidor polar a un eje solar.
2. Los cálculos previos de dimensionamiento, realizados por la teoría clásica de Resistencia de Materiales y los resultados obtenidos mediante la simulación numérica son similares, lo que demuestra la validez del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Iglesias, J.M., Morales, J. (2013). Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética. *Ingeniería Energética*, 34(1), 55-65. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S181559012013000100006&script=sci_arttext
2. Neha, H., Gugri, S., Mishra S. & Dubey, G. (2013). Advancements in solar based LED street light. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2(5),1880-1884. http://www.ijareeie.com/upload/may/20_Advancements.pdf
3. Escobar, A., Holguín, M. y Osorio, J.C. (2010). Diseño e implementación de un seguidor solar para la automatización de un sistema fotovoltaico. *Scientia et Technica*. 16(44), 245-250. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4566789>

4. Anusha, K., Chandra, S. (2013). Design and development of real time clock based efficient solar tracking system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(1), 1219-1223. www.ijera.com
5. Panait, M.A, Tudorache, T. (2008). *A simple neural networks solar tracker for optimizing conversion efficiency in off-grid solar generators*. Santander : ICREPQ.
6. Morales, L.A. (2012). Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en base a modelos de experimentación en el diseño arquitectónico. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, Vol. 6, Núm. 3, pp. 1-11. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193926410002>
7. Grassi, F., Salum, G.M., Ansaldi, J.C. (2013). Diseño de un seguidor solar de dos ejes parametrizado por PC. *Revista Era Solar*, Septiembre – octubre, Núm. 5, Año I. Disponible en: <http://erasolar.es/WEB-AMERICA-5/ResumenAMERICA-5.html>
8. Pineda-Arciniega, M., Manríquez-Chávez, J.D., Hernández, C., Arjona, M.A.(2014). *Diseño Mecánico del Seguidor Solar TPF-ITL*. 3er Congreso Nacional de Electromecánica y Electrónica: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Durango, México.
9. González, J.M., Palacios, C., Flores, J.A. (2013). Analytical synthesis for four-bar mechanisms used in a pseudo-equatorial solar tracker. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 33, Núm. 3, pp. 55 - 60. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092013000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=en
10. Pisarenko, S.G., Yákovlev, P.A., Matreev (1989). *Manual de Resistencia de Materiales*. Moscú: Editorial Mir.

Síntesis curricular de los Autores

Luis Yoandri Noa-Diéguez tecnologia@turei.co.cu * Ingeniero Mecánico, Dirección Técnica y de Desarrollo, Empresa de Cigarros “Lázaro Peña”, Cursista en la Maestría de CAD/CAM, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Ha trabajado en el diseño mecánico y la aplicación de los sistemas CAD/CAE.

Vladimir Álvarez-Sánchez vladimir@facing.uho.edu.cu ** Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Posee más de 30 años de experiencia en el diseño mecánico, investiga en temas relacionados con el diseño y la mecanización agrícola. Ha desarrollado varios proyectos con el antiguo Ministerio de la Azúcar (MINAZ) y el actual grupo empresarial AZCUBA.

Roberto Pérez-Rodríguez, roberto.perez@facing.uho.edu.cu *** Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudios CAD/CAM, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Investiga en temas relacionados con la Ingeniería Concurrente, la teoría y metodología de diseño y los sistemas CAD/CAM en la industria.

Institución de los autores

* Empresa de cigarros “Lázaro Peña”

, * Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”

Fecha de Recepción: 11 de diciembre 2014

Fecha de Aprobación: 15 de abril 2015

Fecha de Publicación: 29 de mayo 2015