

Volumen 3, Número 9 – Octubre – Diciembre -2016

ISSN 2410-3993

# Revista de Tecnología e Innovación

**ECORFAN®**

## Indizacion

Google Scholar



**ECORFAN-Bolivia**

## **ECORFAN-Bolivia**

### **Directorio**

#### **Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

#### **Director Regional**

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC

#### **Director de la Revista**

ESPINOZA-GÓMEZ, Éric. MsC

#### **Relaciones Institucionales**

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

#### **Edición de Logística**

DAZA-CORTEZ, Ricardo. BsC

#### **Diseñador de Edición**

LEYVA-CASTRO, Iván. BsC

Revista de Tecnología e Innovación, Volumen 3, Número 9, de Octubre - Diciembre 2016, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD. ISSN-2410-3993. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 31 de Diciembre 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional del Derecho de Autor.

## **Consejo Editorial**

**GALICIA-PALACIOS, Alexander. PhD**

*Instituto Politécnico Nacional, México*

**NAVARRO-FRÓMENTA, Enrique. PhD**

*Quimica Azizbekow, Rusia*

**BARDEY, David. PhD**

*University of Besançon, Francia*

**COBOS-CAMPOS, Amalia, PhD**

*Universidad de Salamanca, España*

**ALVAREZ-ECHEVERRÍA, Francisco, PhD**

*University José Matías Delgado, El Salvador*

**BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe, PhD**

*Universidad de Concepción, Chile, Chile*

**BELTRÁN-MIRANDA, Claudia, PhD**

*Universidad Industrial de Santander Colombia, Colombia*

## **Consejo Arbitral**

RRS, MsC

*Universidad de Londres, México*

ZM, MsC

*Universidad de Londres, México*

BCL, MsC

*Universidad Autónoma de Yucatán, México.*

CCN, MsC

*Universidad Autónoma de Yucatán, México.*

TSJ, PhD

*Universidad de la Habana, Cuba*

VGJ, PhD

*Universidad de Granada, España*

OGE, PhD

*Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, México*

QME, PhD

*El Colegio de México, México*

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en las áreas de: Sociología Contemporánea.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión del Editor en Jefe.

En el primer número es presentado el artículo *Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil* por SANDOVAL, Sergio, RUIZ-, Daniel, TOPETE, Juan, GONZÁLEZ, Juan a, como segundo artículo está *Las leyes de Newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro* por GARCÍA, José, RAMÍREZ, Luis, SIORDIA, Xóchitl, MARTÍNEZ, como tercer capítulo está *Aplicación del Software Thermo-Calc Prisma en el Análisis de la Precipitación de un Acero Ferrítico* por RODRÍGUEZ, Mario, LÓPEZ, Víctor, MIRANDA, Valeria, ESCAMILLA, Cristobal y ÁVILA, Osiris, como cuarto esta *Aplicación del Software Thermo-Calc y Dictra en el Diseño de Tratamientos Térmicos de Acero* por SAUCEDO, Maribel L., SORIANO, Tania, SERRANO, Eumir, AVILA-Erika como quinto artículo está *Estudio comparativo de las películas de carbón como si fuera diamante, hidrogenado y con silicio* por SOLIS, José, ROBLERO, Sandra, CORTES, Sergio, CASTELLANOS, Víctor como sexto artículo está *Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual* por DÍAZ, Sergio, GUTIÉRREZ, Citlalih, como séptimo está *Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado* por CAMACHO, Aldo, PALACIOS, Luis, RAMÍREZ, Ignacio, VERA, Edgar, ANCHONDO, Lourdes, como octavo artículo está *Prueba de nodos CAN por medio de un SoC Cyclone V* por MORALES, Salvador, CASTAÑEDA, Josefina, MINO, Gerardo, como noveno artículo está *Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo* por CABALLERO, Carlos, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina como siguiente artículo está *Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal* por ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino.

# Contenido

Artículo	Pág.
Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil. SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan, GONZÁLEZ, Juan	1-10
Las leyes de Newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro GARCÍA, José, RAMÍREZ, Luis, SIORDIA, Xóchitl, MARTÍNEZ, Trinidad	11-19
Aplicación del Software Thermo-Calc Prisma en el Análisis de la Precipitación de un Acero Ferrítico. RODRÍGUEZ, Mario, LÓPEZ, Víctor, MIRANDA, Valeria, ESCAMILLA, Cristobal y ÁVILA, Osiris.	20-27
Aplicación del Software Thermo-Calc y Dictra en el Diseño de Tratamientos Térmicos de Acero SAUCEDO, Maribel L., SORIANO, Tania, SERRANO, Eumir, AVILA, Erika	28-36
Estudio comparativo de las películas de carbón como si fuera diamante, hidrogenado y con silicio SOLIS, José, ROBLERO, Sandra, CORTES, Sergio, CASTELLANOS, Víctor	37-48
Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual DÍAZ, Sergio, GUTIÉRREZ, Citlalih.	49-60
Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado CAMACHO, Aldo, PALACIOS, Luis, RAMÍREZ, Ignacio, VERA, Edgar, ANCHONDO, Lourdes	61-66
Prueba de nodos CAN por medio de un SoC Cyclone V. MORALES, Salvador, CASTAÑEDA, Josefina, MINO, Gerardo.	67-75
Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo CABALLERO, Carlos, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina.	76-84
Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal JIMÉNEZ, Isamar, ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino	85-94

*Instrucciones para autores*

*Formato de originalidad*

*Formato de Autorización*

## Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil

SANDOVAL, Sergio\*†, RUIZ-,Daniel, TOPETE, Juan, GONZÁLEZ, Juan

Recibido Abril 17, 2016; Aceptado Octubre 03, 2016

### Resumen

En los sistemas de control diseñados para la estabilidad del automóvil es de suma importancia tener algunas dinámicas del vehículo las cuales no se pueden medir. Para este artículo de investigación se propone un observador lineal de dos grados de libertad para la velocidad lateral controlada, además de utilizar una función de Lyapunov para determinar la estabilidad del sistema controlado con respecto al observador mediante la estimación de errores de estado. En este trabajo se muestra el desarrollo matemático para las estimaciones que se enviarán al algoritmo de un control lineal activo utilizando los resultados de las simulaciones en Matlab-Simulink-CarSim de las velocidades lateral y longitudinal, a partir de la medición en la velocidad angular de viraje mediante ganancias dinámicas, como respuesta a diferentes maniobras de volanteo por parte del conductor con normas internacionales ISO 3888-1 e ISO 7401/2011, concluyendo que el observador es robusto, aún con condiciones de fricción neumático-suelo variables.

**Función de Lyapunov, Observador lineal, velocidad lateral.**

### Abstract

In systems designed to control the stability of a car, it is extremely important to take into account some dynamics of the vehicle which sometimes can not be measured. In this research paper, a two- degrees of freedom linear observer is proposed for the controlled lateral velocity, in addition to using a Lyapunov's function to determine the stability of the system with respect to the observer by means estimating state errors. This paper shows the mathematical development to obtain the estimates which will be sent to the algorithm of an active linear control using the results of the lateral and longitudinal velocities from the Matlab-Simulink-CarSim simulator based on the measurement of the angular rate of turn by dynamic gains, as response to different turning maneuvers by the driver and in accordance to ISO 3888-1 and ISO 7401/ 2011 international standards, concluding that the observer is robust, even with variable tire-road conditions.

**Lyapunov Function, linear Observer, lateral velocity**

**Citación:** SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan, GONZÁLEZ, Juan. Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil. Revista Tecnología e Innovación 2016. 3-9 : 1-10

\*Correspondencia al Autor (ssandoval@itcg.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El control activo puede establecer una ayuda al conductor en el vehículo, sumando acciones futuras al incrementar la maniobrabilidad y seguridad, especialmente en situaciones críticas. Estas acciones activas incluyen la estabilidad de viraje o por sus siglas en inglés yaw, ver Acosta et al. (2008) y Pan (2014) y el control integrado del automóvil en Lam et al. (2010) y Zakaria (2014). Estas acciones de control utilizan los actuadores como el sistema frontal activo AFS y el vector de torque trasero (RTV). Estos modifican las dinámicas del vehículo imponiendo fuerzas y momentos en el automóvil como en Bianchi et al. (2010), Earl (2013) y Nam (2015). Por lo tanto las velocidades lateral y de viraje son usualmente consideradas en la síntesis del control, mientras que otras dinámicas son despreciadas. Por ejemplo las perturbaciones del viento son ignoradas en controles activos, donde estos disturbios del aire no son analizados y deberían tomarse en cuenta para el diseño del control. Sin embargo otro problema que es considerado en este trabajo es el factor de algunas variables de estado necesarias para implementar las estrategias de control que no son usualmente medidas, por el costo y espacio de los sensores que se ocupan en el automóvil. Por un instante la velocidad lateral es raramente medida. Aunque con el propósito para obtener un control satisfactorio robusto, esta variable de estado debe ser determinada de otras mediciones tal como la aceleración longitudinal y lateral, velocidad longitudinal, velocidad angular de viraje y ángulo de maniobra del volante del conductor. Para un observador la velocidad lateral es tomada en cuenta para reconstruir las variables que no se pueden medir. En trabajos anteriores sobre observadores, limitados a la estimación de la velocidad lateral, son principalmente basados sobre técnicas lineales en Mudaliar et al. (2004), técnicas casi lineales como en Yacine et al. (2015).

Un observador no lineal, realizado para la linealidad de los errores dinámicos es propuesto en Guo et al. (2013). Otro observador similar es presentado en Hiemer et al. (2005), forzando los términos de errores dinámicos no lineales estimados a los de un sistema de referencia lineal. Los observadores lineales y no lineales usan técnicas de modos deslizantes, los cuales son propuestos en Stephant et al. (2007) y Zhao (2014). Otra propuesta de observador está basada en filtros extendidos Kalman como en Ren et al. (2014).

También un control activo de un vehículo es realizado en Ohara et al. (2008), mediante un controlador para activar el ángulo frontal de la rueda del automóvil, utilizando un modelo de referencia, basado en el método de un observador lineal. En algunos de estos trabajos la influencia de las dinámicas de velocidades lateral y longitudinal es considerada para la estimación y control de las variables del vehículo, pero sin las perturbaciones de viento hacia el chasis del automóvil, por lo que una propuesta de esta investigación es mostrar un observador lineal considerando los disturbios de aire para poderlo utilizar en un control activo el cual puede ser diseñado en el futuro con diferentes teorías de control.

En la parte uno se muestra el modelo matemático del automóvil a utilizar con sus dinámicas de velocidad lateral, velocidad longitudinal y velocidad angular de viraje, para la sección dos se analizan las perturbaciones del viento sobre el automóvil, en la parte tres se diseña el observador, para la sección de resultados se puede ver las simulaciones en Matlab-Simulink-CarSim del observador lineal de dos grados de libertad, además de los anexos, agradecimientos, las conclusiones y referencias.

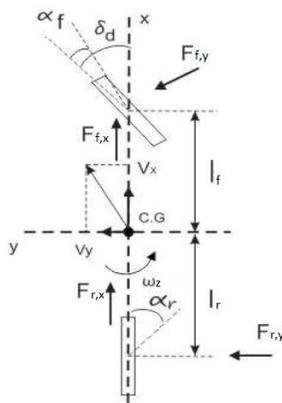
**Modelo Matemático del Vehículo**

El modelo matemático del vehículo puede ser en general un cuerpo rígido moviéndose en un espacio libre, de dos grados de libertad, conectado con la superficie terrestre a través de las llantas, el cual otorga un modelo de comportamiento lineal. Los actuadores para esta aplicación son: Conducción frontal activo (AFS, Active Front Steer) o conducción por cable (SbW, Steer by Wire) y frenos activos. Esta complejidad de los sistemas lineales puede ser disminuida realizando las siguientes consideraciones: para estudiar la estabilidad y/o la maniobrabilidad se estudiarán solo las dinámicas de la velocidad lateral,  $[\dot{v}]_y$ , y velocidad longitudinal,  $[\dot{v}]_x$ . Por lo tanto, tomando en cuenta la Figura 1, y las dinámicas lineales del vehículo que se generan en el llamado modelo de la bicicleta (Pacejka (2005));

$$m(\dot{v}_x - v_y \omega_z) = ma_x + F_{dx} \tag{1}$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \omega_z) = ma_y + F_{dy} \tag{2}$$

$$J\dot{\omega}_z = \mu[l_f F_{f,y}(\delta_c + \delta_d, x, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)] + M_z + M_{dz} \tag{3}$$



**Figura 1** Modelo lineal del vehículo (modelo de la bicicleta).

Donde; m, masa del vehículo [kg], J, momento de inercia del vehículo [kg m<sup>2</sup>], l<sub>f</sub>, l<sub>r</sub>, longitud desde el centro del vehículo hacia la llanta frontal y trasera [m], v<sub>x</sub>, velocidad longitudinal del vehículo [m/s], v<sub>y</sub>, velocidad lateral del vehículo [m/s], x=[v<sub>y</sub>,v<sub>x</sub>], vector compacto del estado del vehículo, α<sub>f</sub>,α<sub>r</sub>, ángulos de deslizamiento lateral frontal con control activo y trasero [rad], α<sub>(f,o)</sub> ángulo de deslizamiento lateral frontal, δ<sub>c</sub>,δ<sub>d</sub>, componente del ángulo de la llanta impuesto por el controlador y conductor respectivamente [rad], M<sub>z</sub>,

Al Momento de viraje resultado de los frenos activos [N m], F<sub>(f,y)</sub>, F<sub>(r,y)</sub> son la fuerza lateral frontal y trasera de las llantas [N], μ coeficiente de fricción entre el suelo y el neumático, F<sub>(f,x)</sub>, F<sub>(r,x)</sub> son la fuerza longitudinal frontal y trasera de las llantas [N], F<sub>dx</sub>,F<sub>dy</sub>, Fuerza aerodinámica longitudinal y lateral [N], M<sub>dz</sub>, momento aerodinámico de viraje [N m],y donde la fuerza lateral F<sub>(f,y)</sub>, F<sub>(r,y)</sub> son funciones del ángulo impuesto a la llanta frontal,  $[\delta = \delta]_d + \delta_c$ , a los ángulos de deslizamiento lateral de las llantas definidos de la siguiente manera :

$$\alpha_f = \delta_c + \alpha_{f,o} = \delta_c + \delta_d - \frac{v_y + l_f \omega_z}{v_x} \tag{4}$$

$$\alpha_r = -\frac{v_y - l_r \omega_z}{v_x} \tag{5}$$

La fuerza lateral puede ser definida utilizando la conocida fórmula Mágica de Pacejka:

$$F_{(j,i)} = D_{(j,i)} \sin(C_{(j,i)} \arctan(B_{(j,i)} \alpha_{(j,i)})) \tag{6}$$

Con j=f,r,i=x,y. Las constantes B<sub>(j,y)</sub>, [C]<sub>(j,y)</sub>,D<sub>(j,y)</sub> en (2) y (3) son determinadas de manera experimental en Tabla 1 (excepto para las fuerzas longitudinales).

### Perturbaciones del viento externas

El modelo matemático en ecuaciones (1), (2), y (3), con disturbios de viento (Acosta et al. (2008)), puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\dot{v}_x = v_y \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,x}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,x}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (7)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_z = \left(\frac{\mu}{J}\right) (l_f F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \left(\frac{1}{J}\right) M_z + \frac{M_{dz}}{J} \quad (9)$$

### Metodología

#### Diseño del Observador

Continuando se supone que la  $a_x$ ,  $\omega_z$ ,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $\omega_z$ ,  $v_x$ , son medidas. Esta es una hipótesis aceptable en vehículos modernos, usualmente equipados con los sensores necesarios. La propuesta del observador lineal (Yacine et al. (2015) se realiza como una copia de la planta en ecuación (1) y (2):

$$\dot{\hat{v}}_x = \hat{v}_y \omega_z + a_x + k_{o1}(v_x - \hat{v}_x) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{v}}_y = -\hat{v}_x \omega_z + a_y + (k_{o2} - \omega_z)(v_y - \hat{v}_y) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (11)$$

En donde,  $k_{o1}$  y  $k_{o2}$  son las ganancias del observador, que son determinadas utilizando la ecuación (7), (8) y (10), (11), mediante la estimación de los errores;

$$e_{vx} = v_x - \hat{v}_x \quad (12)$$

$$e_{vy} = v_y - \hat{v}_y \quad (13)$$

### Siendo fácilmente calculados

$$\dot{e}_{vx} = -k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy} \quad (14)$$

$$\dot{e}_{vy} = -k_{o2} e_{vy} \quad (15)$$

Para las ecuaciones (14) y (15), es lineal y variante en el tiempo el término  $\omega_z$ , además se debe asegurar la convergencia exponencial de la estimación de errores, mediante asumir que la velocidad angular de viraje  $\omega_z \neq 0$ , considerando  $|\omega_z| \leq \omega_{z,max}$ , un cierto valor máximo  $\omega_{z,max}$ , para todo tiempo en un instante  $t \geq 0$ . Estas consideraciones físicas, son razonables, porque el vehículo es un sistema de energía finita, donde la máxima velocidad angular de viraje es acotada. Por lo tanto el diseño de este observador se considera, para  $\omega_z > 0$ . Además durante la maniobra de volanteo del automóvil,  $\omega_z$  puede pasar a través del cero, pero no puede ser cero, en un intervalo finito de tiempo, siempre y cuando las fuerzas laterales no sean cero, mencionando con esto que el vehículo esta estacionario. Sin embargo la dinámica que es cercana a cero teniendo el automóvil en movimiento es  $a_x$ , por lo cual las fuerzas longitudinales para esta investigación no son consideradas. Para las ecuaciones (7) y (11), el termino de la aceleración  $a_y$ , tiene a las fuerzas laterales definidas en (6) estableciendo que las funciones seno y arco tangente no tienen mayor impacto utilizando ángulos de deslizamiento ( $\alpha_f, \alpha_r$ ) no mayores a 10 grados, resultando con estos conceptos la siguiente ecuación:

$$F_{j,i} = D_{j,i} \cdot C_{j,i} \cdot B_{j,i} \cdot \alpha_j \quad (16)$$

Los ángulos  $\alpha_f, \alpha_r$  son los utilizados para estimar los ángulos de deslizamiento de las llantas;

$$\hat{\alpha}_f = \delta_c + \hat{\alpha}_{f,o} = \delta_c + \delta_d - \frac{\hat{v}_y + l_f \omega_z}{\hat{v}_x} \quad (17)$$

$$\hat{\alpha}_r = -\frac{\hat{v}_y - l_r \omega_z}{\hat{v}_x} \quad (18)$$

Por lo tanto las aceleraciones estimadas son las siguientes.

$$\hat{\mathbf{a}}_x = \boldsymbol{\mu} \frac{(\hat{\mathbf{F}}_{f,x} + \hat{\mathbf{F}}_{r,x})}{m} \approx \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{a}}_y = \boldsymbol{\mu} \frac{(\hat{\mathbf{F}}_{f,y} + \hat{\mathbf{F}}_{r,y})}{m} \quad (20)$$

Y las fuerzas frontales y traseras estimadas del automóvil son:

$$\hat{\mathbf{F}}_{f,y} = \mathbf{C}_f \hat{\boldsymbol{\alpha}}_f \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{r,y} = \mathbf{C}_r \hat{\boldsymbol{\alpha}}_r \quad (22)$$

Donde

$$\mathbf{C}_f = \mathbf{D}_{f,y} \cdot \mathbf{C}_{f,y} \cdot \mathbf{B}_{f,y} \quad (23)$$

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{D}_{r,y} \cdot \mathbf{C}_{r,y} \cdot \mathbf{B}_{r,y} \quad (24)$$

Con estas nuevas fuerzas laterales en (21) y (22), el observador lineal en (10) y (11) cambia, proponiendo un nuevo modelo matemático del observador lineal de dos grados, como se muestra en (25) y (26), además de tomar en cuenta que también las fuerzas anteriores ( $\hat{\mathbf{F}}_{f,y}, \hat{\mathbf{F}}_{r,y}$ ) sin estimar se utilizan para la aceleración lateral ( $\mathbf{a}_y$ ).

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}}_x = \hat{\mathbf{v}}_y \boldsymbol{\omega}_z + \mathbf{k}_{o1} (\mathbf{v}_x - \hat{\mathbf{v}}_x) + \frac{\mathbf{F}_{dx}}{m} \quad (25)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}}_y = \left( \frac{-\mu c_f - \mu c_r}{m v_x} \right) \mathbf{v}_y + \left( \frac{\mu c_r l_r - \mu c_f l_f}{m v_x} - \mathbf{v}_x \right) \boldsymbol{\omega}_z + \left( \frac{\mu c_f}{m} \right) \boldsymbol{\delta}_d + \mathbf{k}_{o2} (\mathbf{v}_x - \hat{\mathbf{v}}_x) + \frac{\mathbf{F}_{dy}}{m} \quad (26)$$

El diseño de las ganancias  $\mathbf{k}_{o1}, \mathbf{k}_{o2}$  en (25) y (26), se obtiene mediante una función candidata de Lyapunov, utilizando los errores dinámicos en (14) y (15) en forma de matriz;

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{e}}_{vx} \\ \dot{\mathbf{e}}_{vy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{k}_{o1} & \boldsymbol{\omega}_z \\ -\mathbf{k}_{o2} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{vx} \\ \mathbf{e}_{vy} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{e}}_{vx} \\ \dot{\mathbf{e}}_{vy} \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{k}_{o1} & \boldsymbol{\omega}_z \\ -\mathbf{k}_{o2} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{vx} \\ \mathbf{e}_{vy} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Y observando que  $|\mathbf{A}| = \mathbf{k}_{o2} \boldsymbol{\omega}_z \neq \mathbf{0}$ . Por lo tanto se puede proponer la función candidata de Lyapunov:

$$\mathbf{V} = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (29)$$

Teniendo las siguientes particularidades;

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{11} & \mathbf{p}_{12} \\ \mathbf{p}_{12} & \mathbf{p}_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{P}^T > \mathbf{0} \quad (30)$$

$$|\mathbf{P}| = \mathbf{p}_{11} \mathbf{p}_{22} - \mathbf{p}_{12}^2 > \mathbf{0} \quad (31)$$

Linealizando los errores mediante la función candidata de Lyapunov propuesta en (29), se obtiene;

$$\mathbf{V} = \mathbf{e}_{vx}^2 \mathbf{p}_{11} + \mathbf{e}_{vy}^2 \mathbf{p}_{22} + 2 \mathbf{e}_{vx} \mathbf{e}_{vy} \mathbf{p}_{12} \quad (32)$$

Proponiendo valores de acotación para esta función candidata (32), de la forma:

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\gamma}_1 \mathbf{e}_{vx}^2 + \mathbf{e}_{vy}^2 - 2 \boldsymbol{\kappa}_1 \text{sign}(\boldsymbol{\omega}_z) \mathbf{e}_{vx} \mathbf{e}_{vy} \quad (33)$$

Con  $\boldsymbol{\gamma}_1 > \boldsymbol{\kappa}_1^2 > 0$ ,  $\boldsymbol{\kappa}_1 \neq \mathbf{0}$ , y  $\text{sign}(\cdot)$  la función signum:

$$\text{sign}(\boldsymbol{\omega}_z) = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si } \boldsymbol{\omega}_z > \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{si } \boldsymbol{\omega}_z = \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} & \text{si } \boldsymbol{\omega}_z < \mathbf{0} \end{cases}$$

Derivando la función candidata de Lyapunov en (33), y usando los errores dinámicos de (14) y (15), se obtiene;

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & 2 \boldsymbol{\gamma}_1 \mathbf{e}_{vx} (-\mathbf{k}_{o1} \mathbf{e}_{vx} + \boldsymbol{\omega}_z \mathbf{e}_{vy}) + 2 \mathbf{e}_{vy} (-\mathbf{k}_{o2} \mathbf{e}_{vx} - 2 \boldsymbol{\kappa}_1 \text{sign}(\boldsymbol{\omega}_z) \mathbf{e}_{vx} (-\mathbf{k}_{o2} \mathbf{e}_{vx}) - 2 \boldsymbol{\kappa}_1 \text{sign}(\boldsymbol{\omega}_z) \mathbf{e}_{vy} (-\mathbf{k}_{o1} \mathbf{e}_{vx} + \boldsymbol{\omega}_z \mathbf{e}_{vy}) - 2 \boldsymbol{\kappa}_1 \boldsymbol{\delta}_D(\boldsymbol{\omega}_z) \dot{\boldsymbol{\omega}}_z \mathbf{e}_{vx} \mathbf{e}_{vy}. \end{aligned} \quad (34)$$

Donde la derivada,  $\frac{d}{dt} \text{sign}(\omega_z) = 2\delta_D(\omega_z)\dot{\omega}_z$

En  $\delta_D(\omega_z)$  la distribución de Dirac, para  $|\omega_z| > 0$ , la  $\delta_D(\omega_z) = 0$

### Obteniendo

$$\dot{V} = (-2k_{o1}\gamma_1 + 2\kappa_1 k_{o2} \text{sign}(\omega_z))e_{vx}^2 - 2\kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 + (2\gamma_1 \omega_z - 2k_{o2} + 2\kappa_1 k_{o1} \text{sign}(\omega_z))e_{vx} e_{vy}. \quad (35)$$

Esta ecuación (35), se resuelve por el método de Cramer para determinar las ganancias del observador;

$$k_{o1} = \frac{\kappa_1 \omega_{z,\max} + \kappa_1 \gamma_1 \omega_z}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \quad (36)$$

$$k_{o2} = \frac{\kappa_1^2 \text{sign}(\omega_z) \omega_{z,\max} + \gamma_1^2 \omega_z}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \quad (37)$$

Estableciendo las ganancias de las ecuaciones (36) y (37), en la derivada de la función candidata de Lyapunov (35);

$$\dot{V}(t, e) = -\kappa_1 \omega_{z,\max} e_{vx}^2 - \kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 \quad (38)$$

Donde se proponen los siguientes valores para ecuación (38);

$$\kappa_1 = \frac{1}{\omega_{z,\max}} \lambda_s \quad (39)$$

Acotando en (38), con las condiciones de (39), la derivada de la función de Lyapunov será estable:

$$\dot{V}(t, e) \leq -\lambda_s (e_{vx}^2 + e_{vy}^2) < 0 \quad (40)$$

Por lo tanto, el sistema de errores en (14) y (15) tiene el origen exponencialmente estable y la estimación de errores (12) y (13) tiende exponencialmente a cero con una constante de tiempo,  $\tau = 1/\lambda_s$

La propuesta por el diseñador ( $\lambda_s > 0$ ), además para el observador (25) y (26) con las ganancias en (36) y (37), asegura globalmente exponencialmente la conversión a cero de la estimación de los errores.

### Resultados

**A. Maniobra doble volanteo:** Para una maniobra ISO 3888-1 y el coeficiente de fricción neumático-suelo es  $\mu = 0.9$  (superficie seca) y  $\mu = 0.5$  (superficie mojada) a los 3.5 segundos (ver Figura 2). Además los resultados obtenidos que se muestran en las Figuras 3-4, con  $k_{o1}$ ,  $k_{o2}$  en (25) y (26) considerando  $\gamma_1 = 100$ ,  $\lambda_s = 10$  en (36) y (37), además de las perturbaciones de viento en Figura 5. La velocidad longitudinal inicial es  $v_x(0) = 28$  m/s (100 km/h). Los valores iniciales del observador son:  $\hat{v}_x(0) = v_x$ ,  $\hat{v}_y(0) = 0$ .

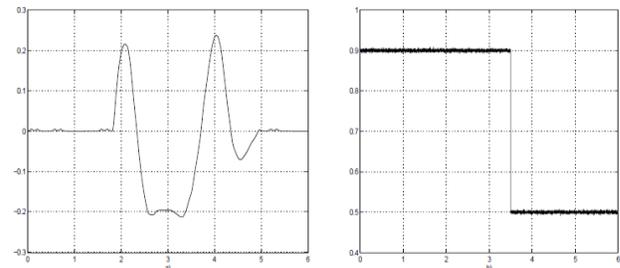


Figura 2 a) Señal  $\delta_d$  delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción  $\mu$ .

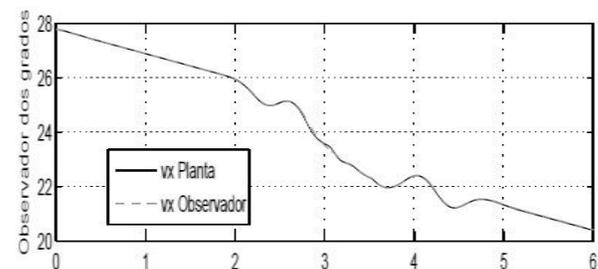
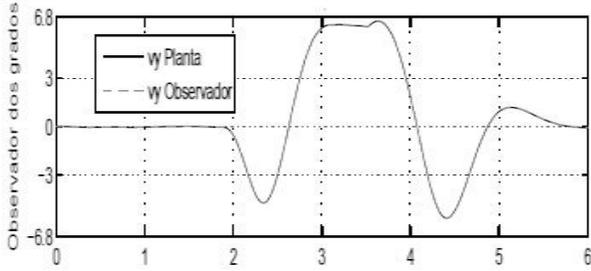
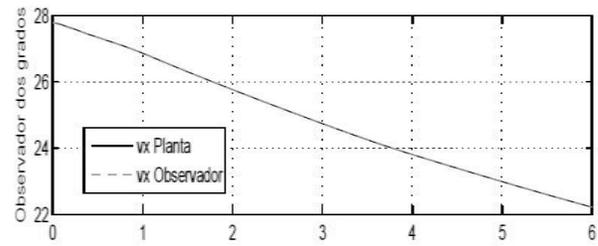


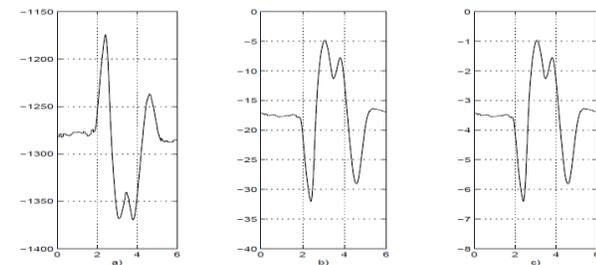
Figura 3 Velocidad longitudinal  $v_x$  (sólida) y  $\hat{v}_x$  (interlínea) [m/s vs s].



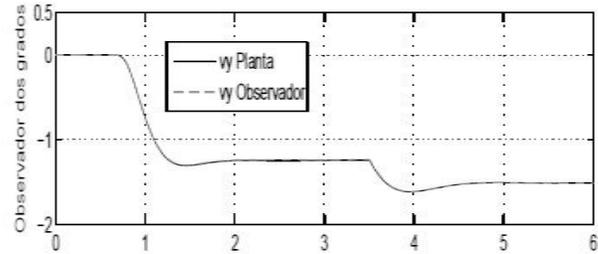
**Figura 4** Velocidad lateral  $v_y$  (sólida) y  $\hat{v}_y$  (interlínea) [m/s vs s].



**Figura 7** Velocidad longitudinal  $v_x$  (sólida) y  $\hat{v}_x$  (interlínea) [m/s vs s].



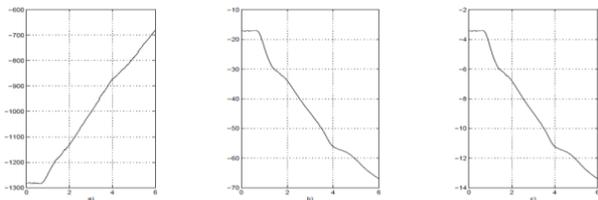
**Figura 5** a) Fuerza de perturbación  $F_{dx}$  [N vs s]; b) Fuerza de perturbación  $F_{dy}$  [N vs s]; c) Momento de perturbación  $M_{dz}$  [N·m vs s].



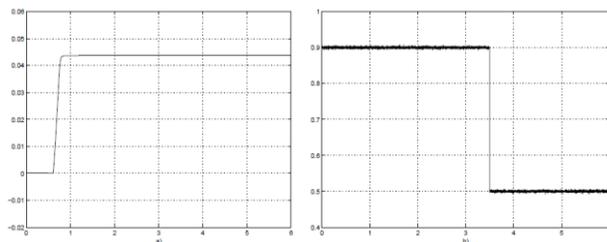
**Figura 8** Velocidad lateral  $v_y$  (sólida) y  $\hat{v}_y$  (interlínea) [m/s vs s].

**Maniobra en una dirección:**

Por lo tanto con los valores de las ganancias y condiciones anteriores, también se simula el observador con una maniobra ISO-7401/2011 y el coeficiente de fricción neumático-suelo (ver Figura 6). Obteniendo las Figuras 7-8, analizando la velocidad longitudinal del observador  $\hat{v}_x$ , y la velocidad lateral del observador  $\hat{v}_y$ , con las perturbaciones de viento  $F_{dx}, F_{dy}, M_{dz}$ , vistas en la Figura 9.



**Figura 9** a) Fuerza de perturbación  $F_{dx}$  [N vs s]; b) Fuerza de perturbación  $F_{dy}$  [N vs s]; c) Momento de perturbación  $M_{dz}$  [N·m vs s].



**Figura 6** a) Señal  $\delta_d$  delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción  $\mu$ .

**Anexos**

$m = 1550 \text{ Kg}$	$D_{r,y} = 7834N$
$J = 3552 \text{ Kg} \cdot m^2$	$B_{f,y} = 6.9$
$l_r = 1.53 \text{ m}$	$C_{f,y} = 1.78$
$l_f = 1.38 \text{ m}$	$D_{f,y} = 7240N$
$B_{r,y} = 10$	$C_{r,y} = 1.32$

**Tabla 1** Parámetros para observador.

## Agradecimiento

Se agradece al Dr. C. Acosta Lúa por todos los conceptos obtenidos en la utilización del Software CarSim.

## Conclusiones

Este trabajo se realiza con la finalidad de proponer un observador para el automóvil con velocidad lateral, partiendo del modelo matemático de la bicicleta, estableciendo las consideraciones antes mencionadas. El objetivo del observador será buscar la estimación de la velocidad longitudinal y velocidad lateral del vehículo utilizando ganancias, las cuales, también se pueden cambiar para ampliar o disminuir la estimación de las dinámicas del observador. Con estas simulaciones en CarSim de diferentes señales de entrada del conductor, se puede mencionar que la estimación de la velocidad lateral y longitudinal utilizando el observador propuesto lineal de dos grados de libertad trabaja en condiciones aceptables.

## Referencias

C. Acosta Lúa, B. Castillo Toledo, S. Di Gennaro., (2008). Nonlinear Output Robust Regulation of Ground Vehicle in Presence of Disturbances and Parameter Uncertainties, Proceedings of the [17] ^th IFAC World Congress, pp. 141-146.

D. Bianchi, A. Borri, G. Burgio, S. Di Gennaro., (2010). Adaptive Integrated Vehicle Control Using Active Front Steering and Rear Torque Vectoring, International Journal of Vehicle Autonomous Systems, Special Issue on: "Autonomous and Semi-Autonomous Control for Safe Driving of Ground Vehicles, Vol. 8, No. 2/3/4, pp. 85-105.

C. Earl Beal, J. Christian Gerdes., (2013). Model Predictive Control for Vehicle Stabilization at the Limits of Handling, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 1258-1269.

H. Guo, H. Chen, D.Cao, W. Jin., (2013). Design of a reduced- order non- linear observer for Vehicle Velocities Estimation, IET Control Theory and Applications, Vol. 7, Iss. 17, pp. 2056-2068.

M. Hiemer, A. VonVietinghoff, U. Kiencke, T. Matsunaga., (2005). Determination of Vehicle Body Slip Angle with Non-Linear Observer Strategies, Proceedings of the SAE World Congress, Paper No. 2005-01-0400.

T. L. Lam, H. Qian, Y. Xu., (2010). Omnidirectional Steering Interface and Control for a Four-Wheel Independent Steering Vehicle, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, No. 3, pp. 329-338.

N. Mudaliar, D. Leblanc, H. Peng., (2004). Linear Estimator for Road Departure Warning Systems, Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, pp. 2104-2109.

H. Ohara, T. Murakami., (2008). A Stability Control by Active Angle Control of Front-Wheel in a Vehicle System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, pp. 1277-1285

H. B. Pacejka., (2005). Tyre and Vehicle Dynamics, Elsevier Butterworth.

H. Pan, Y. Zhang, W. Sun., (2014). Robust Tracking Control for Vehicle Lateral Dynamics with Uncertain Parameters and External Nonlinearities, Shock and Vibration, Vol. 2014, pp. 12.

H. Ren, S. Chen, G. Liu, K. Zheng., (2014). Vehicle State Information Estimation with the Unscented Kalman Filter, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2014, pp.11-20.

J. Stephant, A. Charara, D. Meizel., (2007). Evaluation of Sliding Mode Observer for Vehicle Sideslip Angle, *Control Engineering Practice*, Vol. 15, pp. 803-812.

K. Nam., (2015). Application of Novel Lateral Tire Force Sensors to Vehicle Parameter Estimation of Electric Vehicles, *Sensors-Open Access*, Vol. 15, No.1, pp. 28385-28401.

Z.Yacine, D. Ichalal, N. Ait-Oufroukh, S. Mammam, S. Djennoune., (2015). Takagi-Sugeno Observers: Experimental Application for Vehicle Lateral Dynamics Estimation, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 754-760.

M. Zakaria, A. Dwijotomo, M. Azman Abdullah, N. Tamaldin., (2014). Development Motor Control Unit for Electronic Steering System Test Rig, 2014 IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 42-47.

L. Zhao, Z. Liu., (2014). Vehicle State Estimation with Friction Adaptation for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle. *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 4527-4531.

## Las leyes de Newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro

GARCÍA, José\*†, RAMÍREZ, Luis, SIORDIA, Xóchitl, MARTÍNEZ, Trinidad

Recibido Abril 26 , 2016; Aceptado Octubre 5, 2016

### Resumen

Este artículo expone el sustento teórico y metodológico de la aplicación de las leyes de la dinámica de Newton en el modelado y control de un sistema péndulo invertido sobre un carro. Se plantea la obtención de un modelo matemático para encontrar las ecuaciones que rigen la dinámica no lineal del sistema y una representación en espacio de estados usando el método de asignación de polos para el diseño del controlador. Para demostrar la no linealidad del sistema se desarrolló un algoritmo computacional utilizando la función ODE45 de MATLAB. La validación del controlador diseñado se realizó usando la planta rectilínea 210 de la compañía Educational Control Products (ECP) que forma parte del Laboratorio de Control del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California México, comprobando su estabilidad sobre la vertical al implementar un diagrama de la planta y del controlador en Simulink/MATLAB. Los resultados demuestran que el método empleado en el diseño del controlador logra el objetivo de control. Este trabajo aporta una base teórica para el diseño de un controlador lineal aplicado a un sistema no lineal y también una metodología adaptable para el diseño de otro tipo de controladores lineales.

**Modelo matemático, Péndulo Invertido, Diseño del controlador.**

### Abstract

This article exposes the theoretical and methodological support of the application of the laws of Newtonian dynamics in the modelling and control of an inverted pendulum system on a cart. It arise obtaining a mathematical model for find the equations governing the nonlinear dynamics of the system and a representation in the state space using the pole-placement method for controller design. The validation was performed of the controller designed using computational tool applied to the plant the rectilinear floor 210 of the Educational Company Control Products (ECP) with accessory inverted pendulum it is part of Control Laboratory of Ensenada Center for Scientific Research and Higher Education (CICESE) in Baja California, Mexico, proving its stability on vertical to implement a diagram of the plant and controller in Simulink / MATLAB. The results demonstrate that the method employed in the controller design achieves the control objective. This study provides a theoretical basis for the design of a linear controller applied to a nonlinear system and an adaptive methodology for designing other linear controllers.

**Mathematical model, Inverted Pendulum, Controller Desig**

**Citación:** GARCÍA, José, RAMÍREZ, Luis, SIORDIA, Xóchitl, MARTÍNEZ, Trinidad Las leyes de Newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro. Revista Tecnología e Innovación 2016. 3-9 : 11-19

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: asoto110@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Al intentar balancear el palo de una escoba sobre la palma de la mano se hace necesario ajustar constantemente el movimiento de la palma para lograr mantener al palo de la escoba sobre la vertical. En un sistema de péndulo invertido sucede básicamente lo mismo sólo que en nuestro caso su movimiento está restringido a dos dimensiones. El péndulo invertido constituye un exitoso banco de pruebas para la evaluación de una amplia gama de estrategias y métodos de control lineal y no lineal, la flexibilidad de su modelo matemático permite el diseño y validación de controladores óptimos y robustos aplicados al modelado de brazos robóticos de alta precisión, lanzadores de cohetes espaciales, controladores de despegue y aterrizaje vertical sólo por mencionar algunas aplicaciones (Reid, 2010). El sistema péndulo invertido sobre un carro (PIC), que se analiza en este artículo pertenece a la clase de los sistemas mecánicos subactuados los cuales tienen un número menor de entradas de control que grados de libertad. Este sistema consiste de una barra cilíndrica o plana (péndulo) de longitud  $\ell$  con libertad de rotar  $360^\circ$  sobre su propio eje. Dicha barra se encuentra montada sobre un carro que se desplaza en una trayectoria lineal (Ogata, Dinámica de Sistemas, 1987). El PIC es considerado un sistema SIMO (Single Input, Multiple Output) el cual es inherentemente inestable, ya que al posicionar el péndulo con un ángulo menor o igual a  $90^\circ$  sobre la vertical superior, es imposible que permanezca recto, debido a que no existe alguna fuerza aplicada que lo mantenga sobre la vertical superior (Kurdekar & Borkar, 2013) (Warak, 2013). En este contexto el desarrollo de la metodología se centra en encontrar las ecuaciones que rigen el movimiento del PIC para así desarrollar un controlador por medio del espacio de estados que logre estabilizar el péndulo sobre la vertical en un tiempo  $t > 0$ .

La organización de este trabajo se presenta de la siguiente manera.

La sección 1 provee una breve introducción al estudio del péndulo invertido.

En la sección 2 se presenta el modelado matemático del péndulo invertido sobre un carro, derivando una representación en el espacio de estado y la metodología de diseño para el controlador.

En la sección 3, se presentan los parámetros utilizados para el diseño del controlador de la planta rectilínea 210 de la compañía Educational Control Products (ECP) con accesorio de péndulo invertido ECP-51 que forma parte del Laboratorio de Control del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California, México. La cuarta sección presenta el desarrollo del diseño del controlador usando el método de asignación de polos. En la quinta sección se presenta el algoritmo en MATLAB para implementar una función ODE45 (ODE: Ordinary Differential Equations) basada en la resolución de ecuaciones diferenciales aplicando el método de Runge-Kutta y la aplicación de Simulink del diagrama de bloques del sistema PIC, así como los resultados de la simulación.

**La sección 6 presenta las conclusiones de este trabajo**

## Metodología

El sistema PIC se analiza a partir de la aplicación de las leyes de movimiento de Newton, donde las fuerzas y variables que actúan en el sistema se observan en la figura 1. Se considera la barra con masa despreciable y en su extremo superior se posiciona una masa ( $m$ ) que oscila libremente alrededor de un pivote fijo ( $P$ ) montado en el carro de masa ( $M$ ) que se desplaza sobre una trayectoria lineal.

Los coeficientes de fricción del pivote y las ruedas se consideran despreciables (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1998).

La Tabla 1 presenta una breve descripción de las variables del sistema PIC mostradas en la Figura 1, las cuales se utilizan en la obtención del modelo (García Martínez, 2015)

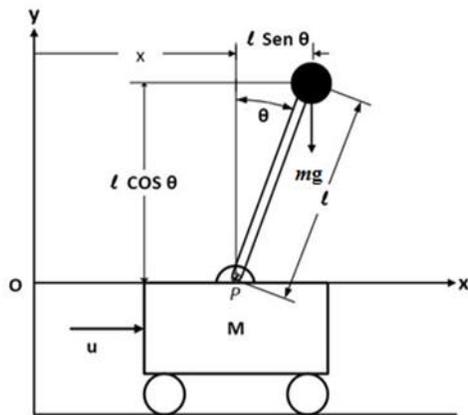


Figura 1 Sistema Péndulo Invertido sobre un Carro (PIC).

Símbolo	Descripción
$M$	Masa del carro
$m$	Masa del centro de gravedad
$l$	Longitud de la barra
$I$	Inercia del péndulo
$u$	Fuerza aplicada al carro
$x$	Posición del carro
$\theta$	Ángulo del péndulo desde la vertical superior
$g$	Constante gravitacional
$P$	Pivote

Tabla 1 Simbología y breve descripción de las variables del sistema PIC.

Las ecuaciones (1) y (2) representan el punto  $C_{cg}(x_{cg}, y_{cg})$  en el sistema de coordenadas cartesianas referentes al centro de gravedad del péndulo. La posición del centro de gravedad en el extremo del péndulo se obtiene a partir de la Figura 1.

$$x_{cg} = x + l \text{sen} \theta \quad (1)$$

$$y_{cg} = l \text{cos} \theta \quad (2)$$

Donde se observa que el carro de masa  $M$  se desplaza de forma horizontal sobre el eje  $x$  y al aplicar la segunda Ley de Newton en la dirección horizontal, se obtiene la ecuación del movimiento del sistema PIC, la cual queda definida por la ecuación (3).

$$M\ddot{x} + F_x = u(t) \quad (3)$$

Donde  $F_x$  representa el movimiento horizontal del péndulo y  $u(t)$  representa la fuerza de entrada. Por otro lado, al aplicar la segunda Ley de Newton al movimiento rotacional con referencia al centro de gravedad  $C_{cg}$  del péndulo se obtiene la ecuación (4).

$$I\ddot{\theta} = F_y l \text{sen} \theta - F_x l \text{cos} \theta \quad (4)$$

Siendo  $I$  el momento de inercia del péndulo alrededor de su centro de gravedad,  $F_x$  representa el movimiento horizontal del péndulo y  $F_y$  representa el movimiento vertical del mismo. El movimiento  $F_x$ , queda expresado por la ecuación (5).

$$F_x = m\ddot{x}_{cg} \quad (5)$$

La ecuación (5) depende de la abscisa  $x_{cg}$  del punto de coordenada del centro de gravedad  $C_{cg}$ , representada por la ecuación (1). El movimiento sobre el eje  $x$  del péndulo (6) se encuentra a partir de las ecuaciones (1) y (5), quedando expresada de la siguiente manera:

$$F_x = m\ddot{x} + m\ddot{a} \quad (6)$$

Se obtiene el término  $\ddot{a} = \frac{d^2}{dt^2} \text{sen} \theta$  para simplificar (6).

$$a = (\text{cos} \theta)\ddot{\theta} - (\text{sen} \theta)\dot{\theta}^2 \quad (7)$$

$$F_x = m\ddot{x} + m l \ddot{\theta} \text{cos} \theta - m l \dot{\theta}^2 \text{sen} \theta \quad (8)$$

El movimiento vertical  $F_y$  del péndulo está representado en la ecuación (9) en donde se observa la relación de la ordenada del punto del centro de gravedad ( $y_{cg}$ ) del péndulo.

$$F_y = m\ddot{y}_{cg} + mg \quad (9)$$

Relacionando las ecuaciones (2) y (9), se obtiene el movimiento vertical del péndulo (10):

$$F_y = m\ell\ddot{b} + mg \quad (10)$$

Siendo el término  $\ddot{b} = \frac{d^2}{dt^2} \cos \theta$ :

$$\frac{d^2}{dt^2}(\cos \theta) = (-\sin \theta)\ddot{\theta} - (\cos \theta)\dot{\theta}^2 \quad (11)$$

Con las ecuaciones (10) y (11) se obtiene la representación del movimiento vertical del péndulo (12):

$$F_y = -m\ell\ddot{\theta}\sin \theta - m\ell\dot{\theta}^2\cos \theta + mg \quad (12)$$

Usando las ecuaciones (4), (8) y (12), se representa el movimiento rotacional del péndulo (13):

$$I\ddot{\theta} = [-m\ell\ddot{\theta}\sin \theta - m\ell\dot{\theta}^2\cos \theta + mg]\ell\sin \theta - [m\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta}\cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2\sin \theta]\ell\cos \theta \quad (13)$$

Debido a que la masa ( $m$ ) se encuentra posicionada en el extremo superior del péndulo, se puede suponer que el momento de inercia es igual a cero, es decir  $I\ddot{\theta} = 0$  y manipulando algebraicamente la ecuación (13) ahora se expresa (14):

$$(mg\ell)\sin \theta = m\ell^2\ddot{\theta} + (mg\ddot{x})\cos \theta \quad (14)$$

La ecuación (14) representa el movimiento rotacional del péndulo. Para obtener la ecuación del movimiento traslacional del sistema PIC se relacionan las ecuaciones (3) y (8) obteniendo (15).

$$u(t) = (M + m)\ddot{x} - m\ell^2\dot{\theta}^2\sin \theta + m\ell\ddot{\theta}\cos \theta = \quad (15)$$

El movimiento del sistema PIC está limitado a dos grados de libertad y su modelo matemático no lineal se representa por las ecuaciones (14) y (15). La expresión (16) representa las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales del sistema PIC en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} m\ell & m\cos \theta \\ m\ell\cos \theta & (M + m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg\sin \theta \\ u(t) + m\ell\dot{\theta}^2\sin \theta \end{bmatrix}$$

El objetivo de control para el sistema PIC es mantener el péndulo sobre la vertical. Considerando a  $\theta$  y  $\dot{\theta}$  pequeños, es posible linealizar las ecuaciones (14) y (15) al sustituir  $\sin \theta = \theta$  y  $\cos \theta = 1$  respectivamente, despreciándose el término  $\theta\dot{\theta}^2$  de la ecuación (15) y con las expresiones anteriores se obtienen las ecuaciones (17) y (18).

$$mg\theta = m\ell\ddot{\theta} + m\ddot{x} \quad (17)$$

$$(M + m)\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta} = u(t) \quad (18)$$

Se relacionan las ecuaciones (17) y (18) para obtener los términos  $\ddot{x}$  y  $\ddot{\theta}$  respectivamente, y así se obtienen las ecuaciones (19) y (20).

$$\ddot{x} = -\frac{m}{M}g\theta + \frac{1}{M}u(t) \quad (19)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(M - m)}{M\ell}g\theta - \frac{1}{M\ell}u(t) \quad (20)$$

Aplicando la Transformada de Laplace a la ecuación (20) se obtiene la función de transferencia del péndulo (21):

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = -\frac{1}{M\ell} \cdot \frac{1}{s^2 - g\frac{(M + m)}{M\ell}} \quad (21)$$

Una representación en el espacio de estados del sistema PIC se realiza con la asignación de las variables de estados en términos de  $\theta$  y  $x$ :

$$x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}, x_3 = x, x_4 = \dot{x} \tag{22}$$

Se sustituyen las variables de estado (22) en las ecuaciones (19) y (20), para obtener las ecuaciones (23) y (24):

$$\dot{x}_2 = \frac{(M+m)}{M\ell} g x_1 - \frac{1}{M\ell} u(t) \tag{23}$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{m}{M} g x_1 + \frac{1}{M} u(t) \tag{24}$$

Finalmente se obtienen las ecuaciones de estado y salida del sistema PIC (25) y (26) respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ g \frac{(M+m)}{M\ell} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -g \frac{m}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ \frac{1}{M\ell} \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} u(t) \tag{26}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Figura 1

**Controlador por Asignación de Polos**

Para el diseño del controlador por asignación de polos es necesario demostrar que el sistema PIC es de estado completamente controlable, esto es posible resolviendo la ecuación (27) en donde  $|M| \neq 0$ :

$$M = [B : AB : \dots : A^{n-1}B] \tag{27}$$

Al demostrar que el sistema es controlable, se determinan los polos en lazo cerrado (28):

$$s = \mu_1, s = \mu_2, \dots, s = \mu_n \tag{28}$$

La ecuación característica de los polos en lazo cerrado se representa mediante la expresión (29)

$$s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \tag{29}$$

El método para obtener los polos del controlador, es por medio de la Fórmula de Ackermann (30):

$$K = [0 \ 0 \dots \ 0 \ 1][B : AB : \dots : A^{n-1}B]^{-1} \phi(A) \tag{30}$$

Donde  $\phi(A)$  es la ecuación de Cayley-Hamilton (31).

$$\phi(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I = 0 \tag{31}$$

La Figura 2 representa el controlador por medio del espacio de estados, se aprecia que  $u$  es retroalimentada por el controlador, la ecuación (32) se denomina ley de control:

$$u(t) = -Kx \tag{32}$$

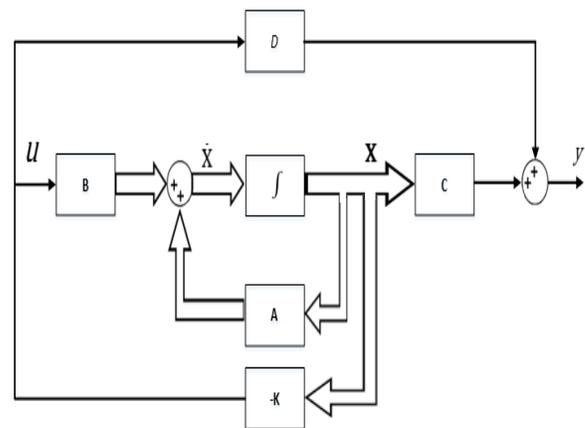


Figura 2 Diagrama de bloques del controlador.

## Identificación de los Parámetros del Modelo

Los parámetros utilizados para el diseño del controlador y la validación del modelo se eligieron de la planta rectilínea 210 de la compañía Educational Control Products (ECP) con accesorio de péndulo invertido, se muestran en la Tabla 2. El manual de la planta hace referencia a un sistema subactuado que representa una planta rectilínea (masa-resorte-amortiguador, Modelo 210) mostrado en la Figura 2 y es ampliamente utilizada para la obtención de modelos matemáticos y simulación de los mismos, además presenta un accesorio de péndulo invertido desplazable de masa ( $m$ ) mostrado en la Figura 3 que se ajusta a uno de los carros de masa ( $M$ ) de la planta 210 (Bishop, 2010). Cada uno de los tres carros tiene un desplazamiento de  $-3\text{ cm} \leq x \leq 3\text{ cm}$ .



Figura 2 ECP Planta rectilínea, Modelo 210.



Figura 3 Accesorio ECP-51 Péndulo invertido para planta rectilínea modelo 210.

Parámetros	Valores Numéricos	Unidades
M	0.77	Kg
m	0.089	Kg
g	9.81	m/s <sup>2</sup>
$\ell$	0.32	m
t	13	Seg.

Tabla 2 Parámetros de la planta rectilínea modelo 210 con accesorio péndulo invertido ECP-51 para el sistema PIC.

## Diseño del Controlador

Se sustituyen los parámetros de la Tabla 2 dentro de la ecuación de estado del sistema PIC (25):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 34.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.13 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -4.05 \\ 0 \\ 1.3 \end{bmatrix} u(t) \quad (33)$$

Se demuestra que el sistema es de estado completamente controlable, sustituyendo los términos de la ecuación (33) dentro de la matriz de controlabilidad (27), al aplicar el determinante al resultado de la matriz de controlabilidad se obtiene  $M = 2.59 \times 10^{-4}$  por lo que el sistema es controlable. En el diseño del controlador se propone la ubicación de los polos en  $s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = 10$ . La ecuación característica de los polos elegidos ecuación (34):

$$s^4 + 40s^3 + 600s^2 + 4000s + 10000 = 0 \quad (34)$$

A partir de la ecuación característica, se aplica la fórmula de Ackermann para obtener la matriz de ganancias del controlador ecuación (35).

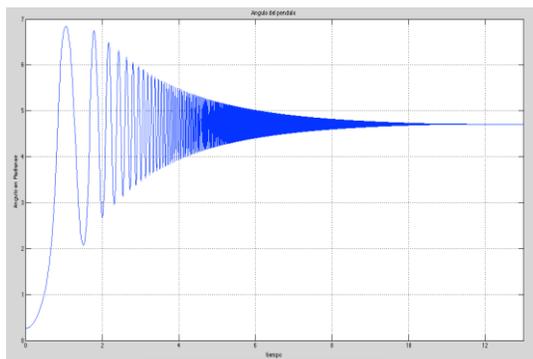
$$K = [-74.13 \quad 16.26 \quad 204.01 \quad 81.60] \quad (35)$$

## Simulación y Resultados

En esta sección se realiza la simulación en el entorno computacional MATLAB/Simulink para presentar los resultados del PIC obtenidos mediante un algoritmo realizado en la versión R2013a y una representación del diagrama a bloques realizado en Simulink.

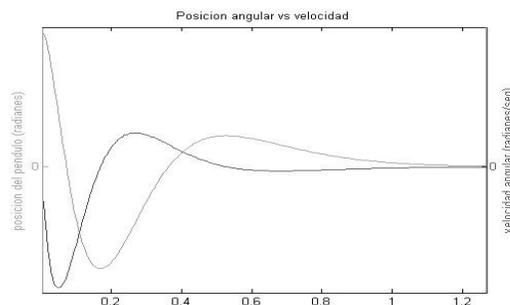
Se desarrolla el algoritmo en MATLAB para implementar una función ODE45 (ODE: Ordinary Differential Equations) basada en la resolución de ecuaciones diferenciales aplicando el método de Runge-Kutta (RK) (Houcque) la cual resuelve la ecuación (16) que caracteriza el modelo matemático del sistema péndulo invertido sobre el carro aplicando las leyes de movimiento de Newton.

Se utilizó un ángulo de  $15^\circ$  de separación entre el péndulo y la vertical superior y un tiempo de  $0 \leq t \leq 13$  segundos que permite la correcta visualización del movimiento oscilatorio del péndulo. El Gráfico 1 muestra el comportamiento oscilatorio del péndulo cuando este se separa de la vertical superior. El sistema PIC es inestable en su totalidad hasta que el péndulo llega a la posición vertical inferior, la cual representa un punto de equilibrio.

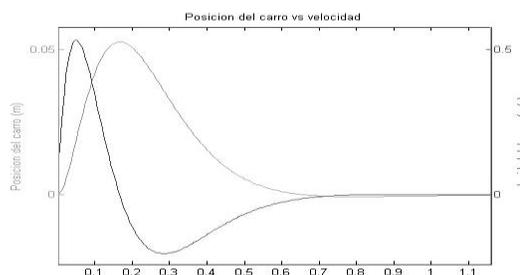


**Gráfico 1** Simulación numérica en MATLAB del modelo no lineal observándose la oscilación con un ángulo de partida de  $15^\circ$  a partir de la vertical

En los Gráficos 2 y 3 se aprecia que el péndulo se estabiliza en un tiempo menor a 1.2 segundos con un intervalo de variación del ángulo de  $-85^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$  respecto de la vertical superior y con un desplazamiento del carro de  $-2.8 \text{ cm} \leq x \leq 2.8 \text{ cm}$ .

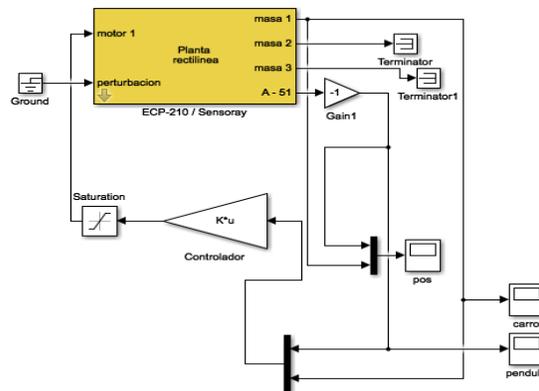


**Gráfico 2** Respuesta del controlador de la posición y velocidad del péndulo.



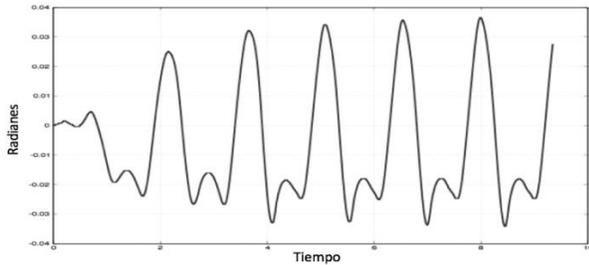
**Gráfico 3** Respuesta del controlador de la posición y velocidad del carro.

La Figura 4 muestra el diagrama de bloques implementado en Simulink/Matlab para la planta y el controlador del PIC.

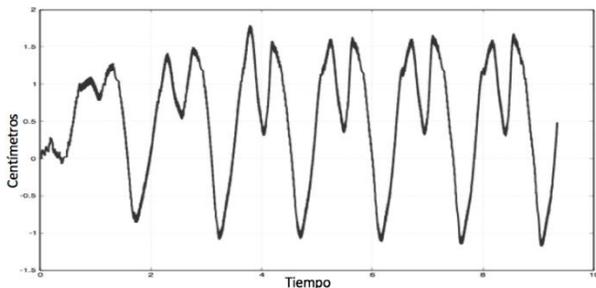


**Figura 4** Diagrama en Simulink/Matlab para las pruebas experimentales realizadas en tiempo real con la planta y el controlador del PIC.

Los Gráficos 4 y 5 son el resultado del sistema en tiempo real del diagrama a bloques de la Figura 4.



**Gráfico 4** Respuesta en tiempo real de la velocidad del péndulo.



**Gráfico 5** Respuesta en tiempo real de la velocidad del carro.

## Conclusiones

En este artículo se obtuvieron las ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales que caracterizan el modelo matemático del sistema péndulo invertido sobre un carro (PIC) a partir del análisis y la aplicación de las leyes de la dinámica de Newton. Con el modelo matemático se demostró que el sistema es controlable lo que permitió diseñar el controlador por una representación en el espacio de estados con el método de asignación de polos logrando balancear y estabilizar el péndulo invertido sobre la vertical superior a un ángulo de  $-5 \text{ grados} \leq \theta \leq 5 \text{ grados}$  y con un margen de desplazamiento del carro de  $-2.8 \text{ cm} \leq x \leq 2.8 \text{ cm}$ .

De todo lo mencionado en este artículo hay dos aspectos importantes, el primero es la investigación del péndulo invertido acerca de sus múltiples aplicaciones que existen y las ventajas de su estudio mediante los diferentes métodos y estrategias de la teoría de control lineal y no lineal, lo segundo, es que es posible afirmar que la retroalimentación por espacio de estados puede controlar cualquier aproximación lineal de un modelo matemático no lineal, lo que permite demostrar que el péndulo llega al punto de estabilización lográndose mantener sobre la vertical superior. Por lo tanto se proporciona la base teórica para el diseño de un controlador lineal del sistema péndulo invertido inherentemente no lineal, y en consecuencia este método también podrá ser adaptable al diseño de otros tipos de controladores lineales aplicados a otros sistemas no lineales.

## Agradecimiento

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California México por el apoyo prestado en la realización experimental y validación del diseño del controlador del sistema péndulo invertido sobre un carro (PIC).

El primer autor agradece a la Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones de la Universidad Veracruzana por todo el apoyo brindado a esta investigación.

## Referencias

- Bishop, R. (2010). *Control System Laboratory*. Houston, Texas: Rice University .
- García Martínez, J. R. (2015). *Análisis y Diseño de un Controlador para un Péndulo Invertido Usando los Métodos de Espacio de Estados*. Poza Rica, Ver.: Universidad Veracruzana

Houcque, D. (n.d.). *Applications of MATLAB: Ordinary Differential Equations (ODE)*. Evanston: Robert R. McCormick School of Engineering .

Kurdekar, V., & Borkar, S. (2013, Sep-Oct). *Inverted Pendulum Control: A Brief Overview*.

Ogata, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. Distrito Federal: Prentice Hall

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Distrito Federal: Prentice Hall.

Reid, K. (2010). *Fuzzy Logic of an Inverted Pendulum Robot*. San Luis Obispo: California Polytechnic State University.

Warak, P. (2013, April). *Mathematical Modelling of Inverted Pendulum with Disturbance Input*.

## Aplicación del Software Thermo-Calc Prisma en el Análisis de la Precipitación de un Acero Ferrítico

RODRÍGUEZ, Mario\*†, LÓPEZ, Víctor, MIRANDA, Valeria, ESCAMILLA, Cristobal, ÁVILA, Osiris

Recibido Abril 26 , 2016; Aceptado Octubre 03, 2016

### Resumen

En el presente trabajo se llevó a cabo el estudio de la evolución microestructural del acero 2.25Cr-1Mo tanto de material nuevo como envejecido por tratamiento de envejecido isotérmico a 550°C por hasta 1000 h. Todas las muestras se caracterizaron microestructuralmente por microscopía óptica, electrónica de barrido convencional y de alta resolución para analizar la evolución de los carburos. Los contenidos de cromo y molibdeno en los precipitados se analizaron por EDS. También se utilizaron los programas de simulación numérica Thermo-Calc y PRISMA para analizar numéricamente la precipitación de carburos. La caracterización mecánica se hizo mediante el ensayo de microdureza Vickers. Los resultados de caracterización microestructural mostraron que la ferrita y bainita en el material original transforman a ferrita equiaxial. La precipitación de carburos ocurrió de forma transgranular e intergranular durante el envejecido. La cinética de precipitación predicha numéricamente concuerda con la observada experimentalmente. La dureza disminuyó durante el envejecido como resultado del incremento en tamaño de los precipitados.

**Aceros, Envejecido, Precipitación, PRISMA**

### Abstract

The present work studied the microstructural evolution of 2.25Cr -1Mo steel, both new material and aged for different times that simulated actual operating conditions. The aging was at for times upto 1000 h. All samples were microstructurally characterized by optical light microscope, conventional and high-resolution scanning electron microscope to analyze the evolution of the carbides. The contents of chromium and molybdenum in the precipitates were analyzed by EDS. Numerical simulation program Thermo-Calc and PRISMA were also used to predict the precipitation of carbides. The mechanical characterization was done by microhardness Vickers. The results of the microstructural characterization showed that bainite and acicular ferrite in the unaged material, transformed to equiaxed ferrite. Carbide precipitation occurred transgranular and intergranular during aging. The precipitation kinetics predicted by PRISMA showed good agreement with the experimental one. The steel hardness decreased with aging time due to the increase in precipitate size.

**Steels; Aging, Precipitation, PRISMA**

**Citacion:** RODRÍGUEZ, Mario, LÓPEZ, Víctor, MIRANDA, Valeria, ESCAMILLA, Cristobal y ÁVILA, Osiris. Aplicación del Software Thermo-Calc Prisma en el Análisis de la Precipitación de un Acero Ferrítico. Revista de Tecnología e Innovación 2016 3-9 : 20-27

\*Correspondencia al Autor (osirisavila77@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los aceros ferríticos de baja aleación son los materiales predominantes en la fabricación de tubos para intercambiadores de calor y calentadores a fuego directo, debido a su bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Los aceros ferríticos son los materiales empleados para ambientes no corrosivos en un intervalo de temperatura entre 30°C y 700°C en refinerías y plantas de generación de energía eléctrica [1-2]. El código ASME permite el uso de este tipo de aceros para temperaturas mayores de 425°C. Además de la variable de temperatura, también se debe considerar la exposición prolongada que puede resultar en el engrosamiento de los carburos presentes en la matriz de este tipo de materiales [2-3]. Este fenómeno es un proceso acumulativo que se presenta en materiales que se mantienen a una temperatura igual o mayor a 425°C. La disminución de propiedades mecánicas, como la dureza es el resultado de la exposición del acero 2.25Cr-1Mo a estas temperaturas por largos periodos de tiempo, que incluso pueden ser años [3]. Cuando los componentes que se fabrican de este acero están en operación, es común que estén sometidos a calentamientos cíclicos debido a los programas de mantenimiento. Es decir, que al hacer un paro del equipo, éste puede enfriarse hasta temperatura ambiente y una vez que reinicia su operación, llegar a temperaturas por arriba de los 550°C. Con esto, el material estaría sufriendo un sobrecalentamiento y por lo tanto una transformación de la microestructura, lo que conlleva a una aceleración en el deterioro de las propiedades mecánicas y en consecuencia llegar a la falla antes de cumplir su vida útil. Por tal razón es necesario estudiar el fenómeno de precipitación, no solo de manera continua, sino con calentamientos y enfriamientos cíclicos que simulen condiciones reales de operación. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es caracterizar microestructuralmente mediante las técnicas de EDS, MEB.

El programa de simulación numérica Thermo-Calc y PRISMA, la precipitación de carburos en el acero 2.25Cr-1Mo, y determinar el efecto sobre las propiedades mecánicas, como resultado de su exposición térmica en procesos isotérmicos continuos, cíclicos y con sobrecalentamientos

## Métología Numérica

Thermo-Calc es un software flexible para todos los tipos de cálculos de propiedades termodinámicas, incorpora una interfaz de línea de comandos (Console Mode) así como un interfaz gráfica moderna (Graphical Mode), donde se puede escoger libremente el modo de operación que sea el más apropiado para lo que se desea realizar.

Existen módulos especiales para cálculos específicos, como simulación Scheil-Gulliver para la solidificación de aleaciones, cálculos de diagramas de Pourbaix, etc. Los cálculos de Thermo-Calc están basados en una base de datos termodinámica de alta calidad desarrollada por evaluaciones críticas y sistemáticas de diversos datos experimentales y de información teórica. El programa Thermo-Calc consta de una serie de módulos especiales y sub-módulos. Una interfaz de programación utiliza una rutina estructurada que está vinculada con varios módulos especiales para la inicialización del sistema, definiciones del sistema, manipulaciones de datos, realización de cálculos y tratamiento de resultados; y a través de una interfaz de programación una puede construir otros módulos especiales (los cuales son similares a los existentes en los módulos especiales) para cierto tipo de cálculos/simulaciones.

El módulo TDB permite seleccionar la base de datos correcta y la definición de un sistema químico y lee de la base de datos al área de datos global.

El módulo GES permite acceder a los modelos de forma interactiva y escribir o modificar datos. El módulo POLY permite establecer las condiciones de presión-temperatura-composición y realizar el cálculo de diagramas equilibrio y de fase.

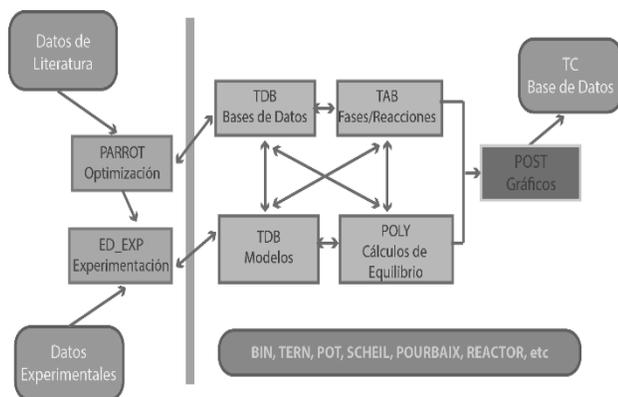
El módulo POST puede calcular varios diagramas de equilibrio y diagramas de propiedades que resultan de cálculos de equilibrio. El módulo TAB permite la tabulación de propiedades termoquímicas para sustancias o reacciones químicas bajo ciertas condiciones.

El módulo PARROT puede ajustar parámetros termodinámicos disponibles de los datos experimentales.

El modulo ED-EXP puede ayudar a editar puntos de datos experimentales con el fin de hacer una optimización de confianza.

El módulo SYS se usa para interacciones con varios sistemas de operación y para la creación y ejecución de archivos MACRO.

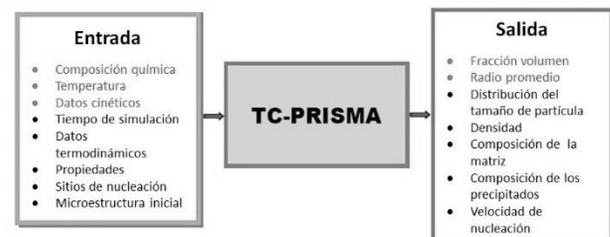
La figura 1 muestra la forma en que los módulos están interconectados y como trabajan entre si.



**Figura 1** Interacción de los módulos de Thermo-Calc para el desarrollo de las simulaciones.

Adicionalmente se utilizó el software TC PRISMA, que es una herramienta computacional para la simulación de la cinética del proceso de precipitación de múltiples partículas controlada por difusión en sistemas de multicomponentes. La precipitación, formación de partículas de una segunda fase, es un mecanismo de endurecimiento que se ha utilizado para mejorar la resistencia y tenacidad de varias aleaciones estructurales durante siglos. Este proceso es controlado completamente por la termodinámica y cinética (en el volumen y la interfaz). Por lo general, un proceso de precipitación tiene tres etapas distintas: nucleación, crecimiento y engrosamiento. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, podrían ocurrir de forma simultánea.

Con TC PRISMA, la cinética de nucleación concurrente, el crecimiento y engrosamiento se pueden simular mediante el cálculo de la evolución de la distribución de probabilidad de las densidades de número de partículas, generalmente llamados distribución de tamaño de partícula. Los resultados de la simulación se pueden utilizar para entender la obtención de precipitados deseables o para evitar precipitados indeseables durante los tratamientos térmicos de aleaciones tales como el envejecido y revenido. Un resumen de los datos de entrada y salida de TC- PRISMA se muestra en la figura 2.



**Figura 2** Datos de entrada y salida en el software TC Prisma.

Thermo-Calc y TC PRISMA son programas complementarios, donde casi todas las fases de equilibrio y transformación de fase, tales como fuerza motriz para la nucleación y crecimiento, alteración del equilibrio local en la interfaz debida a la fricción, movi­lidades atómicas o difusividad en la fase de matriz, etc., se pueden calcular sin aproximaciones innecesarias o inexactas.

### Metodología Experimental

El material de estudio es un acero 2.25Cr-1Mo con designación de ASTM A-387. La composición química del acero en estudio se esquematiza en la tabla 1.

A partir de una placa, se cortaron 8 muestras de tamaño de 1 cm<sup>3</sup> y fueron rectificadas para obtener superficies completamente planas. Posteriormente, las muestras se desbastaron de 2 caras con lijas de agua a partir del grado 80 hasta el 600. Las muestras se envejecieron a 550 °C por 10, 100, y 1000 horas.

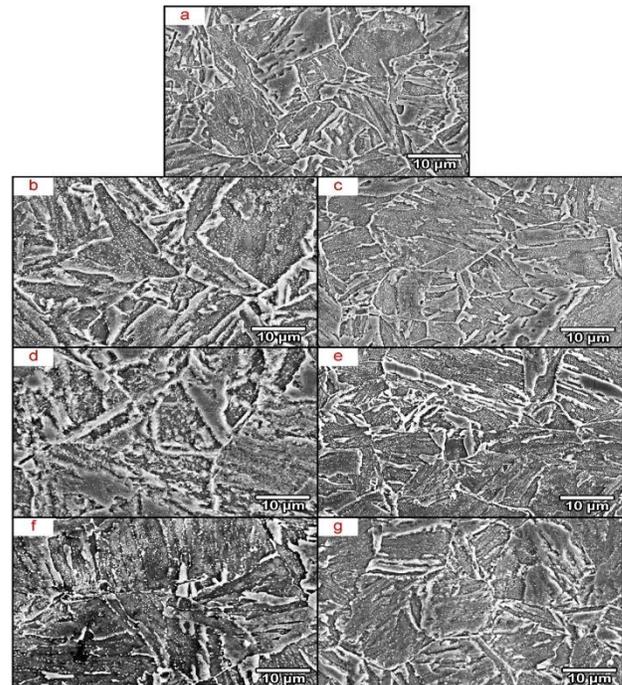
Las muestras se prepararon metalográficamente y se atacaron con Nital 5 para su observación por microscopía electrónica de barrido (MEB JSM6300) y para microanálisis se utilizó (MEB JEOL 6701F Emisión de Campo Frio). Se midieron las durezas de los especímenes en escala Vickers para microdureza con 100 g y 12 s.

Tabla 1. Composición Química en % peso del acero 2.25Cr-1Mo

C	Cr	Mo	Mn	Si	Fe
0.133	2.408	0.911	0.522	0.078	Balance

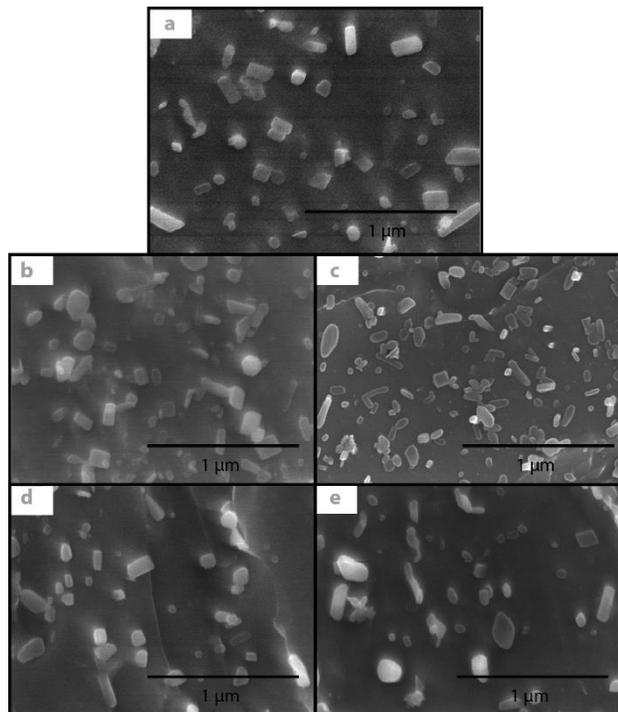
### Resultados y Discusión

En la figura 3 se muestran las microestructuras obtenidas por microscopía electrónica de barrido convencional para el tratamiento isotérmico continuo a 550°C por tiempos de 50 h, 100 h, 300 h, 500 h, 700 h y 1000 h. La muestra en condiciones iniciales se observa en la figura 3-a) y hay presencia de ferrita equiaxial con carburos finos en una forma casi esférica y dispersos homogéneamente sobre la matriz. A 100 h de envejecido, 3-c), comienza la precipitación en la matriz presentando tres morfologías distintas: placas, cubos y esferas. En 1000 h, 3-g), se observa un incremento en la precipitación cerca de los límites por lo que hay algunas zonas ausentes de precipitación dentro de los granos. En la figura 4 se muestran las microestructuras obtenidas por microscopía.

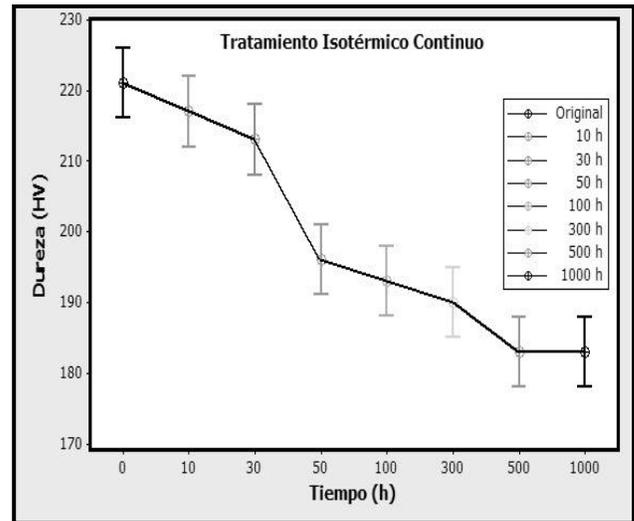


**Figure 3** Micrografías del MEB para el acero 2.25Cr-1Mo con tratamiento isotérmico cíclico a 550°C obtenidas por MEB a 2000X; a) original, b) 5 h, c) 10 h, d) 50 h, e) 100 h, f) 200 h y g) 300 h.

La electrónica de barrido de alta resolución para el tratamiento isotérmico continuo a 550 °C por tiempos de 100 h, 300 h, 500 h y 1000 h. La muestra inicial se observa en la figura 4-a) y principalmente hay carburos de forma de cubos y esferas. De acuerdo a la literatura los carburos en forma de cubos son  $M_6C$  y las esferas  $M_{23}C_6$  [4-6]. A 100 h de envejecido, figura 4-b), comienza la precipitación en la matriz presentando tres morfologías distintas: placas, cubos y esferas. En 1000 h, figura 4-e), se observa un incremento en el tamaño evidente, siendo los carburos en forma de cubos y esferas los que más incrementaron su tamaño a expensas de los carburos más alargados presentes al inicio. La figura 5 muestra la variación de la dureza Vickers con el tiempo de envejecido. Aquí se observa como la dureza disminuye conforme avanza el tiempo de envejecido lo cual se atribuye principalmente al crecimiento o engrosamiento de los carburos [4].

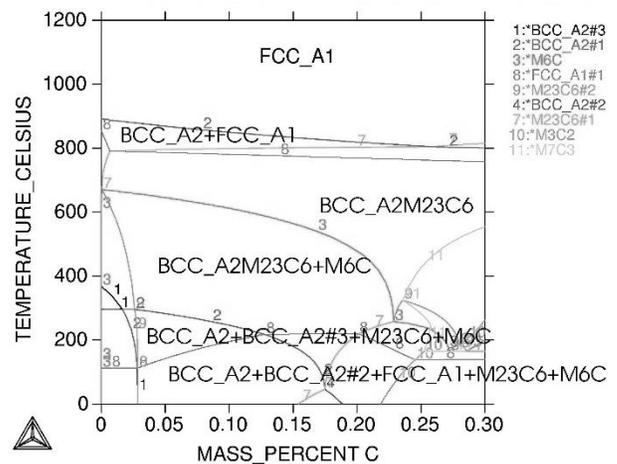


**Figura 4** Microestructuras del acero 2.25Cr-1Mo con tratamiento isotérmico cíclico a 550 °C obtenidas por MEB-AR a 50,000X; a) original, b) 50 h, c) 100 h, d) 200 h y e) 300 h.



**Figura 5** Gráfica de dureza Vickers versus tiempo de envejecido.

Por otra parte, la figura 6 ilustra el diagrama pseudobinario Fe-C calculado con el programa Thermo-Calc para el acero 2.25Cr-1Mo. Este muestra que para un contenido de carbono de 0.133 % C, las fases en equilibrio que se formarán serán ferrita, BCC\_A2, y carburos  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ .



**Figura 6** Diagrama pseudobinario Fe-C del acero 2.25Cr-1Mo simulado con Thermo-Calc.

El primero es rico en cromo y el segundo en molibdeno. Esto concuerda con la microestructura observada en las figuras 3 y 4, las cuales muestran la matriz ferrítica con dos tipos de carburos esferas y cubos que corresponden a  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ . El microanálisis del MEB indicó que el contenido de molibdeno es mayor en el  $M_6C$  y el de cromo es mayor para el  $M_{23}C_6$ .

Para el análisis de la precipitación por PRISMA se consideró que esta ocurre por nucleación heterogénea sobre el límite de grano y que los precipitados que se forman de acuerdo a la literatura son  $Fe_3C$ ,  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$  con las siguientes energías interfaciales con la matriz ferrítica 0.334, 0.370 y 0.270 J/mol, respectivamente, determinados mediante Thermo-Calc. Asimismo, se considero un tamaño de grano promedio de 30  $\mu m$ . La figura 6 ilustra el ciclo térmico aplicado para la simulación de la precipitación, el cual corresponde al tratamiento térmico real; es decir, normalizado al aire desde 950 °C, revenido a 700 °C por 16 min y entonces envejecido a 550 °C por 2000 h.

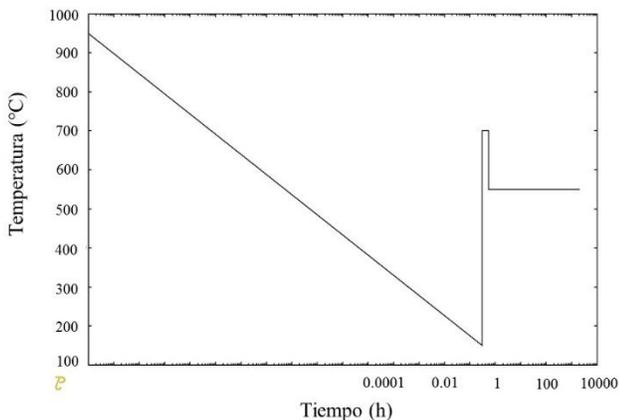


Figura 6 Ciclo térmico de simulación.

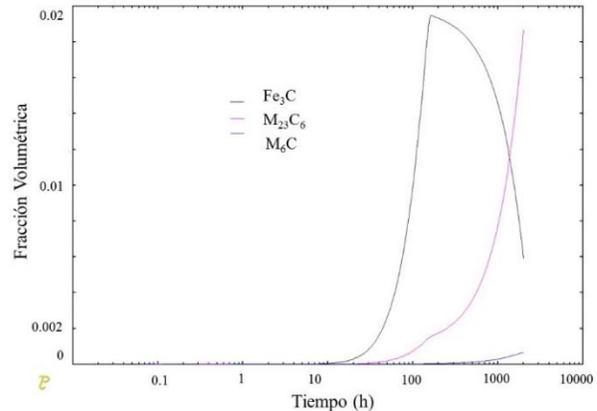


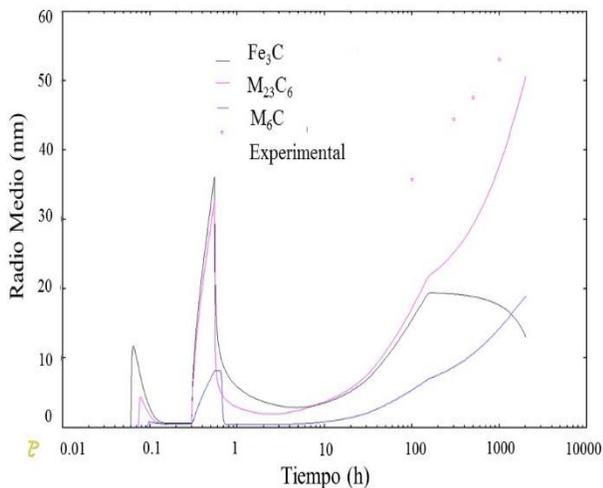
Figura 7 Gráfica de fracción volumétrica de precipitados contra tiempo.

La figura 7 muestra la gráfica de la fracción volumétrica de cada una de las fases precipitadas se observa que la primera fase que se forma es la  $Fe_3C$  y posteriormente la de  $M_{23}C_6$ . La última que se forma es el carburo  $M_6C$ . También se observa que la presencia de la cementita  $Fe_3C$  disminuye con el tiempo. Por lo anterior, la reacción de precipitación es como sigue:



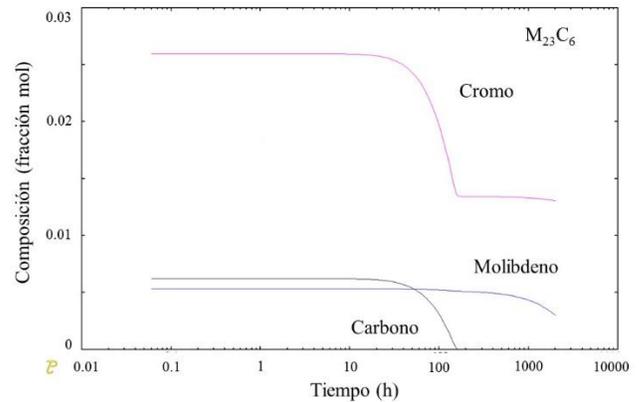
Esta reacción de precipitación ha sido reportada en la literatura por diferentes autores [6-8]. La variación del radio medio de los precipitados como una función del tiempo se muestra en la figura 8. Aquí también se muestran los datos experimentales del carburo  $M_{23}C_6$ . Se observa que los radios calculados son menores, pero el orden numérico es similar entre los valores calculados y el real. Otra concordancia es que el tamaño real y fracción volumétrica reales de  $M_6C$  es menor a la de  $M_{23}C_6$ . El programa PRISMA permite la simulación simultánea de los tres procesos más importantes para la formación de precipitados; es decir, nucleación, crecimiento y engrosamiento y siempre inicia con la etapa de nucleación.

Es importante resaltar que de acuerdo al análisis de densidad de partículas calculadas por prisma, que muestra que ésta todavía no disminuye con el tiempo, no mostrada aquí. El aumento de tamaño mostrado en la figura 8 corresponde a la etapa de crecimiento y no a la de engrosamiento. Asimismo, la figura 8 muestra que los precipitados se forman durante el normalizado e incrementan su tamaño, pero el incremento es mayor en el revenido. En ambos ciclos térmicos el tamaño de los precipitados se incrementa y luego disminuye. Esto sugiere que después del envejecido la precipitación se encuentra presente y se formó durante el enfriamiento al igual que durante el revenido.



**Figura 8** Gráfica de radio medio de precipitados contra tiempo.

La figura 9 muestra la variación de la composición química con el tiempo de los precipitados  $M_{23}C_6$ . Esta figura indica claramente que este carburo tiene cromo y molibdeno, pero el cromo domina lo que concuerda con las observaciones experimentales descritas anteriormente. Asimismo, se observa que la composición de estos elementos disminuye con el tiempo hasta llegar a un valor estable.



**Figura 9** Variación con el tiempo de la composición química del precipitado  $M_{23}C_6$ .

## Conclusiones

Este trabajo mostró que los programas Thermo-Calc y PRISMA permiten analizar el proceso de la precipitación de carburos en aceros ferríticos de baja aleación. La secuencia de precipitación indica que el primer precipitado es la cementita  $Fe_3C$  y posteriormente se forman los precipitados  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ . El crecimiento de tamaño de los precipitados se demostró numérica y experimentalmente y que éste provoca la disminución de la dureza del acero por su exposición isotérmica a  $550\text{ }^{\circ}C$ .

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de SIP-BEIFI-Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE) y Conacyt.

## Referencias

- Torsten, U. & Viswanathan, R. (2008). Creep Resistant Steels. England: Woodhead Publishing. pp. 18-64.
- Viswanathan, R. (1993). Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components. Ohio: ASM International. pp 233-237.

Tan, J., Chao, Y. (2005). Effect of service exposure on the mechanical properties of 2.25Cr–1Mo pressure vessel steel in a hot-wall hydrofining reactor. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 405A. pp. 214-220.

Kostorz, G. (2001). *Phase transformation in Materials*. Wiley-VHC. pp. 311-402.

Krauss, g. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. Ohio: ASM International. pp. 554.

Baltušnikas, G., Lukošiušė, I., (2010). *Transformation Kinetics of M23C6 Carbide*

*Lattice Parameters in Low Alloyed Steel*. *Materials Science*. Vol. 16, No. 4. pp. 320-323.

Andersson, J-O., Helander, T., Höglund, L., Shi P. & Sundman, B. (2002). *Thermo-Calc & Dictra, Computational Tools For Materials Science*. *Thermo-Calc Software*. *Calphad*, Vol. 26, No. 2, pp. 273-312.

Costa, A. Silva, a., Nakamura, L., & Rizzo, F. (2012). *Application of Computational Modeling to the Kinetics of Precipitation of Aluminum Nitride in Steels*. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. Vol.48, No. 3, pp. 471-476.

## **Aplicación del Software Thermo-Calc y Dictra en el Diseño de Tratamientos Térmicos de Acero**

SAUCEDO, Maribel L\*†, SORIANO, Tania, SERRANO, Eumir, AVILA, Erika

Recibido Abril 05, 2016; Aceptado Octubre 04, 2016

### **Resumen**

Los programas Thermo-Calc y Dictra se utilizaron para diseñar el tratamiento térmico de homogeneización de un acero inoxidable martensítico AISI 420 en estado de colada. Los resultados de simulación indicaron que la temperatura adecuada es 1040°C por un tiempo de  $4 \times 10^4$  s. Así mismo, con el módulo Scheil se obtuvieron las fases presentes de no equilibrio que se formaron durante la solidificación para este acero,  $\alpha$  + dos tipos de carburos. Lo anterior confirmó lo observado por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para las muestras de colada. También se verificó experimentalmente que el tratamiento de homogeneización destruyó la estructura de colada del acero, uniformizando la composición química y dureza del material.

**Aceros, Homogeneización, Thermo-Calc.**

### **Abstract**

Thermo-Calc and Dictra softwares were used to design the homogenizing heat treatment of the as-cast martensitic stainless steel AISI 420. Simulation results indicated that the suitable homogenizing temperature and time were 1040°C and  $4 \times 10^4$  s, respectively. Likewise, the no equilibrium phases, ferrite and two carbides, of the as-cast steel were determined using the Scheil module of Thermo-Calc which was confirmed experimentally with the SEM observation of the as-cast steel. The observation of homogenized steel also verified that the as-cast microstructure was destroyed obtaining a uniform chemical composition and hardness of material.

**Steels; Homogenizing, Thermo-Calc.**

**Citación:** SAUCEDO, Maribel L., SORIANO, Tania, SERRANO, Eumir, AVILA, Erika. Aplicación del Software Thermo-Calc y Dictra en el Diseño de Tratamientos Térmicos de Acero. Revista Tecnología e Innovación 2016. 3-9 : 28-36

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: orisavila77@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los aceros inoxidable martensíticos son aleaciones que contienen elementos aleantes como cromo, carbono, molibdeno y manganeso, los que les confieren propiedades mecánicas específicas de acuerdo al contenido de los mismos mejorando su desempeño dependiendo de la aplicación para la cual fueron fabricados. Estas aleaciones se utilizan ampliamente en la industria automotriz y metal-mecánica.

Este acero se obtiene por procesos de fusión y vaciado, la microestructura que se obtiene de colada es dendrítica y presenta microsegregación. Por lo que tienen propiedades mecánicas no homogéneas provocando la disminución de las mismas.

Por lo tanto es necesario realizar un tratamiento térmico de recocido de homogeneización para uniformizar la microestructura, mejorando las propiedades mecánicas y preparar el material para tratamientos térmicos posteriores. Para el diseño del tratamiento térmico se utilizan diagramas de equilibrio los cuales hoy en día pueden calcularse por medio de software de simulación para disminuir el costo y tiempo de experimentación.

Thermo-Calc y Dictra son dos de los programas que hoy en día se utilizan para la simulación de diagramas de fase binarios, ternarios y para sistemas de multicomponentes así como para determinar el tiempo de tratamiento térmico en una aleación.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es estudiar el acero AISI 420 en estado de colada y después de un recocido de homogeneización, mediante la simulación numérica, usando los programas de simulación Thermo-Calc y Dictra.

Así como en forma experimental mediante la caracterización microestructural y mecánica de los aceros homogeneizados para obtener aceros con mejores propiedades mecánicas.

## Métología Numérica

Thermo-Calc es un software flexible para todos los tipos de cálculos de propiedades termodinámicas, incorpora una interfaz de línea de comandos (Console Mode) así como un interfaz gráfica moderna (Graphical Mode), donde se puede escoger libremente el modo de operación que sea el más apropiado para lo que se desea realizar.

Existen módulos especiales para cálculos específicos, como la simulación de Scheil-Gulliver para la solidificación de aleaciones, cálculos de diagramas de Pourbaix, etc.

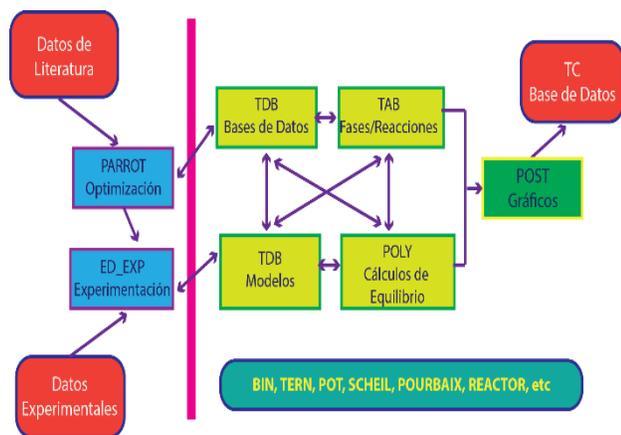
Los cálculos de Thermo-Calc están basados en una base de datos termodinámica de alta calidad desarrollada por evaluaciones críticas y sistemáticas de diversos datos experimentales y de información teórica.

El programa Thermo-Calc consta de una serie de módulos especiales y sub-módulos. Una interfaz de programación utiliza una rutina estructurada que está vinculada con varios módulos especiales para la inicialización del sistema, definiciones del sistema, manipulaciones de datos, realización de cálculos y tratamiento de resultados; y a través de una interfaz de programación una puede construir otros módulos especiales (los cuales son similares a los existentes en los módulos especiales) para cierto tipo de cálculos/simulaciones.

El módulo TDB permite seleccionar la base de datos correcta y la definición de un sistema químico y lee de la base de datos al área de datos global. El módulo GES permite acceder a los modelos de forma interactiva y escribir o modificar datos. El módulo POLY permite establecer las condiciones de presión-temperatura-composición y realizar el cálculo de diagramas equilibrio y de fase. El módulo POST puede calcular varios diagramas de equilibrio y diagramas de propiedades que resultan de cálculos de equilibrio. El módulo TAB permite la tabulación de propiedades termoquímicas para sustancias o reacciones químicas bajo ciertas condiciones.

El módulo PARROT puede ajustar parámetros termodinámicos disponibles de los datos experimentales. El módulo ED-EXP puede ayudar a editar puntos de datos experimentales con el fin de hacer una optimización de confianza. El módulo SYS se usa para interacciones con varios sistemas de operación y para la creación y ejecución de archivos macro.

La figura 1 muestra la forma en que los módulos están interconectados y como trabajan entre sí.



**Figura 1** Interacción de los módulos de Thermo-Calc para el desarrollo de las simulaciones.

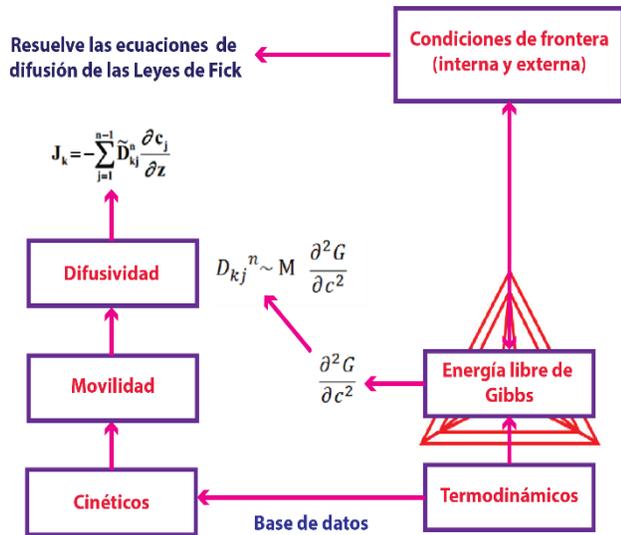
DICTRA que por sus siglas en inglés significa **D**iffusion **C**ontrolled **T**RANSformations es un software único para la simulación de transformaciones controladas por difusión en aleaciones de multicomponentes. El programa DICTRA se basa en una solución numérica de las ecuaciones de difusión para multicomponentes.

En el desarrollo de DICTRA, se ha puesto énfasis en vincular los métodos fundamentales a los datos termodinámicos y cinéticos evaluados críticamente, permitiendo que se lleven a cabo simulaciones en condiciones reales en aleaciones de importancia.

Las simulaciones son en una dimensión y pueden utilizarse tres geometrías diferentes, cilíndrica, esférica y plana. La geometría cilíndrica puede utilizarse por ejemplo para la modelación de difusión a través de la pared de un tubo, así como en la disolución de precipitados en forma circular.

Algunos ejemplos de las aplicaciones del programa DICTRA es en la homogeneización de aleaciones, carbonización y descarburización de aceros, nitrocarburoización de aceros, microsegregación durante la solidificación, engrosamiento de precipitados, etc. Como se puede observar en la figura 2 DICTRA está interconectado con Thermo-Calc, el cual realiza todos los cálculos termodinámicos necesarios. La simulación de difusión está basada en la evaluación de datos cinéticos y termodinámicos, los cuales han sido almacenados en una base de datos.

DICTRA utiliza datos termodinámicos como la energía libre de Gibbs que obtiene del Thermo-Calc y una base de datos de movilidad y difusividad para resolver la ecuación de la primera ley de Fick, pero es necesario establecer condiciones de frontera externa e interna.



**Figura 2** Procedimiento básico que lleva a cabo DICTRA para realizar los cálculos de difusión.

Una de las ventajas del programa DICTRA es que maneja coeficientes de difusión para multicomponentes, por lo tanto se usa la ecuación de Onsager, Ec. (1) en la cual podemos hacer la difusión para sistemas de multicomponentes. Onsager postuló que cada flujo termodinámico se relaciona linealmente con toda fuerza termodinámica, por lo tanto, en la dirección  $z$  para un sistema isobárico isotérmico tenemos:

$$J_k = - \sum_{i=1}^n L'_{ki} \frac{\partial \mu_i}{\partial z} \quad (1)$$

$\mu_i$  = potencial químico para varias especies y se puede suponer que son funciones únicas de la composición. Ejemplo:  $\mu_i = f(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$

$L'_{ki}$  = factor de proporcionalidad el cual depende de la movilidad de las especies individuales.

Generalmente, es más conveniente expresar los flujos en función de gradientes de concentración en lugar de gradientes de potencial químico, para que DICTRA posteriormente convierta las difusividades en movilidades atómicas almacenando estos datos en el programa y realizar los cálculos de simulación para multicomponentes.

$$D_{kj} = - \sum_{i=1}^n L'_{ki} \frac{\partial \mu_i}{\partial c_j} \quad (2)$$

Los valores de  $\frac{\partial \mu_i}{\partial c_j}$  con cantidades puramente termodinámicas, algunas veces se refieren a factores termodinámicos.

La razón para almacenar las movilidades individuales en la base de datos, en lugar de los coeficientes de interdifusión es que en un sistema de  $n$ -componentes, hay  $n-1$  movilidades y  $(n-1)^2$  coeficientes de interdifusión.

Por lo tanto, para sistemas con más de dos componentes, hay menos movilidades que difusividades que necesitan ser almacenadas. El coeficiente de interdifusión siempre puede calcularse de las movilidades si se conocen los elementos termodinámicos.

$$L'_{kj} = \sum_{i=1}^n (\delta_{ik} - c_k V_i) c_i y_{va} M_i \quad (3)$$

dónde  $\delta_{ik}$  es delta Kronecker; por ejemplo,  $\delta_{ik} = 1$  cuando  $j=k$  y de otra manera  $\delta_{ik} = 0$ . Los términos  $c_k$  y  $c_i$  son las cantidades de  $i$  y  $k$  por unidad de volumen,  $V_i$  es el volumen molar parcial del elemento  $i$ , y  $y_{va}$  es la fracción de sitios vacantes en la red en la subred donde  $i$  se disuelve. El término  $M_i$  es la movilidad de  $i$  cuando  $i$  es intersticial y la movilidad dividida por  $y_{va}$  cuando  $i$  se disuelve substitutionalmente. Ver apéndice A.

Las bases de datos termodinámicos son las mismas que se usan en el programa Thermo-Calc. Las bases de datos de movilidad se crean a través de un procedimiento de evaluación similar al de las bases de datos termodinámicos. Los datos experimentales se obtienen y seleccionan de la literatura.

DICTRA contiene un módulo para la optimización de información de movilidad, PARROT. Este módulo permite al usuario ampliar las bases de datos de movilidad existentes, así como crear sus propias bases de datos.

DICTRA se divide en 4 módulos:

- Solución de ecuaciones de difusión
- Cálculo del equilibrio termodinámico
- Solución de ecuaciones de balance-flujo
- Desplazamiento de las posiciones de la fase de la interfaz y el ajuste de los puntos del mallado.

Además hay un post procesador que permite al usuario graficar y obtener los datos de los cálculos de la simulación, por ejemplo perfiles de concentración, tamaños de partícula en función del tiempo, y también un módulo de base de datos para el manejo de datos cinéticos y termodinámicos.

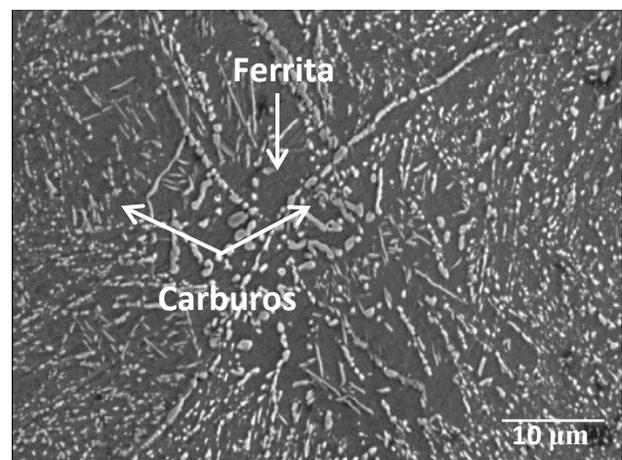
### Metodología Experimental

Las piezas de estudio son unas pinzas de punta de electricista de un acero inoxidable AISI 420 en estado de colada, las muestras se cortaron y montaron para su preparación metalográfica. La composición química consiste de 0.32 %C, 13.41 % Cr, 0.81 % Mn, 0.63 % Si, 0.17 % Mo y 0.36 %Ni.

El acero se desbastó con papel abrasivo de carburo de silicio hasta el grado 1500 y posteriormente se pulió con alúmina de 0.05 micras y finalmente se atacó con el reactivo Villela. Se tomaron fotografías por microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido en estado de colada y después del tratamiento térmico, así mismo, se realizó la prueba de dureza.

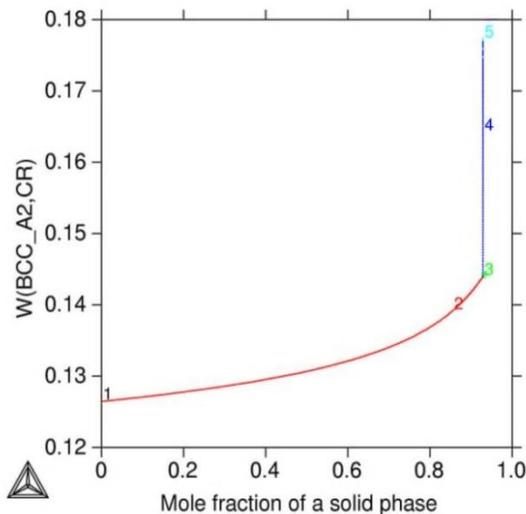
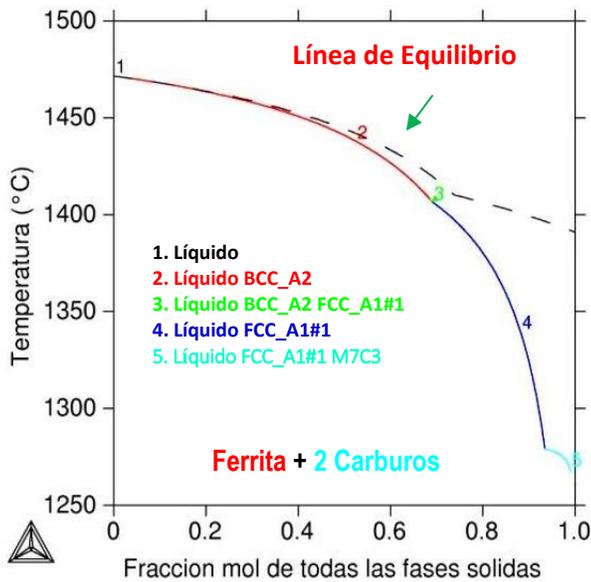
### Resultados y Discusión

Para el acero AISI 420 en la figura 3 (a) se presenta el diagrama de Scheil, temperatura vs. fracción mol del sólido formado, calculado con el programa de simulación Thermo-Calc. La primera fase que solidifica es la ferrita, BCC\_A2 y después se forman dos tipos de carburo de cromo, M7C3 y el FCCA1#1. Lo anterior se comprobó con micrografías obtenidas por la técnica de microscopia electrónica de barrido las cuales se presentan en la figura 3 (b), donde se confirma la presencia de la matriz ferrítica y una gran cantidad de carburos. La mezcla de fases provoca la disminución en las propiedades mecánicas de este componente.



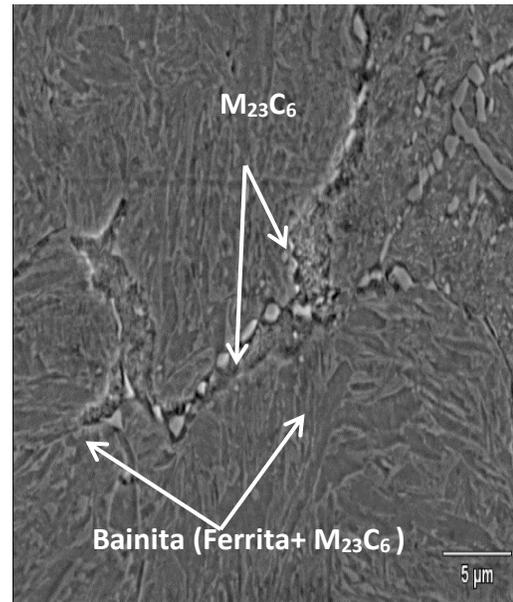
(b)

**Figura 3** (a) Diagrama de Scheil y (b) microestructura obtenida por microscopia electrónica de barrido para el acero AISI 420.



**Figura 4** Diagrama de microsegregación del cromo para el acero AISI 420.

En la figura 4 se observa el diagrama de microsegregación del elemento cromo y se aprecia como es la distribución del cromo en la ferrita, la primera ferrita que se forma tiene un porcentaje de cromo de aproximadamente 13% aproximadamente y conforme aumenta la solidificación el contenido de cromo en ferrita aumenta hasta llegar a la región interdendrítica en donde el contenido es de 18% aproximadamente.

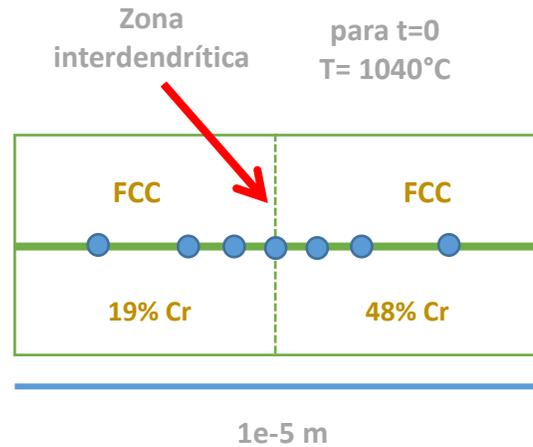


**Figura 5** (a) Diagrama pseudobinario Fe-C y (b) microestructura de un acero AISI 420 homogeneizado.

En la figura 5(a) se presenta el diagrama de equilibrio pseudobinario calculado para el acero AISI 420. De acuerdo al porcentaje de carbono de este acero que es de 0.32%, se observa que la temperatura adecuada para realizar el tratamiento térmico es de 1040 °C ya que a esa temperatura se tiene una completa austenización. Esto concuerda con la temperatura reportada en la literatura para este acero. Las fases presentes. En equilibrio que se forman después del tratamiento de recocido son ferrita y carburos  $M_{23}C_6$ .

Esto se confirmó con las micrografías obtenidas con la técnica de microscopía electrónica de barrido, figura 5 (b), donde se aprecia la formación de agujas de bainita así como la presencia de carburos en los límites de grano. Es importante señalar que estos diagramas pseudobinarios calculados con Thermo-Calc representan una forma confiable para determinar la temperatura de tratamiento térmico en aleaciones con multicomponentes.

En la figura 6 (a) se aprecian las condiciones iniciales para la simulación del acero AISI 420, se establecieron zonas pobres en cromo de 12% aproximadamente y zonas ricas de 18% aproximadamente y una distancia interdendrítica de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$  ( $10 \mu\text{m}$ ). La figura 6 (b) muestra el gráfico que se obtiene con el programa DICTRA después de la simulación cada curva corresponde a un tiempo de tratamiento térmico establecido al introducir todas las condiciones iniciales para realizar la simulación, conforme va aumentando el tiempo la variación en concentración va disminuyendo hasta llegar a la homogeneización del material. En la figura 7 (b) se observa la variación en concentración de cromo que se tomó para el cálculo, la concentración fue de 19-48% aproximadamente en porcentaje peso y una distancia de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$  ( $10 \mu\text{m}$ ). Por lo tanto, para  $1040^\circ\text{C}$  el tiempo que tarda en homogeneizarse la aleación es de  $7 \times 10^4 \text{ s}$  (19 h).



La figura 7 presenta la microestructura obtenida por microscopía óptica del acero AISI 420, la cual se obtuvo después del tratamiento térmico de recocido de homogeneización, se observa que para el acero la microestructura se homogeneizó

Para el acero inoxidable AISI 420 se obtuvo una microestructura de Ferrita + Carburos del tipo  $M_{23}C_6$ , como se espera en un acero inoxidable de este tipo.

El hecho de que el diagrama pseudobinario indica que se trata de ferrita y en las micrografías de la figura 7 se muestra que se trata de agujas de bainita no significa que el diagrama pseudobinario calculado sea incorrecto. Esto simplemente se atribuye al hecho de que el programa no determina microconstituyentes. Por lo tanto, para este acero inoxidable la ferrita indica la formación de agujas de bainita lo cual se confirma con la dureza obtenida después del tratamiento térmico la cual fue de 43  $\text{HR}_C$  y concuerda con la requerida que es de 45  $\text{HR}_C$ , lo anterior indica que el material se homogeneizó y mejoró en sus propiedades mecánicas para posteriormente ser llevado a otro tratamiento térmico para cumplir con el funcionamiento para el cual se manufacturó este componente de acero inoxidable.

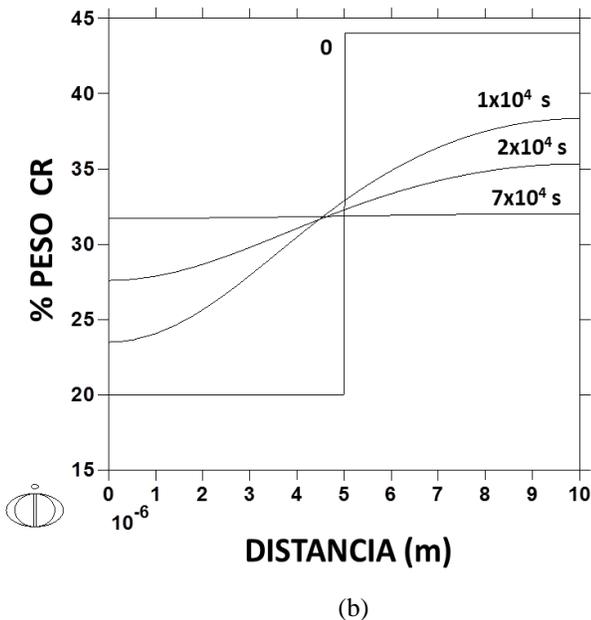
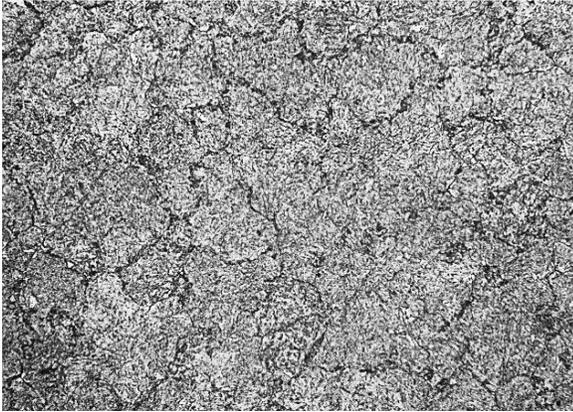


Figura 6 (a) Esquema de la simulación y (b) evolución con el tiempo de la concentración de cromo del acero AISI 420 homogeneizado



**Figura 7** Micrografía del microscopio óptico del acero homogeneizado.

### Conclusiones

Con el programa Thermo-Calc se calculó el diagrama pseudobinario para determinar la temperatura de tratamiento térmico, que para el acero AISI 420 fue 1040°C. Con el programa DICTRA se determinó el tiempo de tratamiento térmico utilizando los perfiles de la microsegregación determinados de forma experimental, el cual fue  $7 \times 10^4$  s (19 h). Las fases presentes en las piezas provenientes de colada se determinaron con los diagramas de Scheil, calculados con el programa Thermo-Calc el acero AISI 420 las fases de Ferrita + Carburos y concuerdan con la caracterización microestructural experimental. Las fases que se formaron después del tratamiento térmico se determinaron con los diagramas pseudobinarios calculados con el programa Thermo-Calc acero AISI 420 las fases de Ferrita + Carburos  $M_{23}C_6$  y concuerdan con la caracterización microestructural experimental. Los programas de simulación numérica, Thermo-Calc y DICTRA, son una herramienta importante para calcular diagramas de fase de multicomponentes y para el diseño de tratamientos térmicos, reduciendo tiempo y costo de experimentación.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de SIP-BEIFI-Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE) y Conacyt.

### Referencias

Barlow, L. & Toit, M.. (2012). Effect of Austenitizing Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of Martensitic Stainless Steel AISI 420. *Journal of Materials Engineering and Performance*. ASM International, Vol. 21, No. 7, pp. 1327-1328.

Wu, K. & Mason, P. (2012). Introduction to Thermo-Calc. Thermo-Calc Software Inc. Calculating Thermodynamic Properties. pp.3-101.

Bramfitt, B. & Benschoter, A. (2002). *Metallographer's Guide. Practices and Procedures for Irons and Steels*. ASM International, pp.4-6.

Andersson, J-O., Helander, T., Höglund, L., Shi P. & Sundman, B. (2002). Thermo-Calc & Dictra, Computational Tools For Materials Science. Thermo-Calc Software. *Calphad*, Vol. 26, No. 2, pp. 273-312.

Prat, O., Garcia, J., Rojas, D., Carrasco, C., & Inden, G., (2010). Investigations on the growth kinetics of Laves phase precipitates in 12% Cr creep-resistant steels: Experimental and DICTRA calculations. *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 18, pp.6142–6153.

Garcia, J. & Prat, O. (2011). Experimental investigations and DICTRA simulations on formation of diffusion-controlled fcc-rich surface layers on cemented carbides. *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 21, pp. 8894–8900.

Sozinov, A. & Gavriljuk, V. Estimation of Interaction Energies Me-(C, N) in f.c.c. Iron-Based Alloys using Thermo-Calc Thermodynamic Database. (1999). Scripta Materialia, Vol. 41, No. 6, pp. 679–683.

## Estudio comparativo de dos películas de carbono hidrogenado cuasidiamante, sobre dos tipos de acero

SOLIS, José\*†, ROBLERO, Sandra, CORTES, Sergio, CASTELLANOS-Víctor.

Recibido Enero 06, 2016 Aceptado Octubre 03, 2016

### Resumen

En las compañías relacionadas con la extracción de crudo y automovilística, muchos componentes están sujetos tanto a desgaste como ambientes corrosivos. El desarrollo de recubrimientos protectores en estas partes es de considerable interés para preservar su integridad estructural y por tanto la eficiencia. En la presente investigación, se realiza una comparación microestructural y mecánica entre las películas delgadas de carbono hidrogenado cuasidiamante (a-C:H o H-DLC) con la intención de reconocer la aplicabilidad en componentes de dichas industrias. La deposición se realizó con el proceso por deposición química de vapores por plasma mejorado (PECVD) sobre aceros API X65 y AISI 52100. La arquitectura de las películas está compuesta por una capa adherente de Cr, otra capa de WC y una última de H-DLC con un contenido de 20-40 % at. de H. La estructura de las películas se evaluó con espectroscopía Raman. Otras técnicas y aparatos como SEM, AFM, GDOES, Nano-indentación y scratch tests se emplearon para la caracterización microestructural y mecánica. Se investigó el comportamiento mecánico de las películas en términos de fricción y desgaste mediante los procedimientos de bola-sobre-placa y perno sobre placa. El revestimiento hidrogenado exhibió mejor comportamiento tribológico cuando se depositó sobre acero AISI 52100 que el que se depositó sobre el acero API X65.

**H-DLC, tribología, acero API X65, acero AISI 52100**

### Abstract

In oil and gas and motor companies many components are subjected to wear and corrosive environments. The development of protective coatings on these parts is of high interest to preserve its structural integrity and so its performance. In the present work, a structural and mechanical comparison of a hydrogenated diamond-like carbon (a-C:H or H-DLC) coating is carried out to acknowledge if one or both could be candidates to be used in such industries. The coatings were deposited by the plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) methodology on API X65 and AISI 52100 steels. The films included an adherent Cr interlayer followed by the DLC coating, namely, Cr/WC/a-C:H, with 20-40 at.% of H content. A Raman spectrometry was used to characterise the bonding structure of the H-DLC films. SEM, AFM, GDOES, Nano-indentation and scratch testing were also used to evaluate the microstructural and mechanical features. The mechanical behaviour of the coatings in terms of the friction and wear was assessed using a ball-on-plate and pin-on-plate methodologies. The H-DLC coating exhibited a better tribological performance when deposited on AISI 52100 than that film when deposited on API X65.

**H-DLC, Si-DLC, tribology, API X65, AISI 52100**

**Citación:** SOLIS, José, ROBLERO, Sandra, CORTES, Sergio, CASTELLANOS, Víctor. Estudio comparativo de las películas de carbono como si fuera diamante, hidrogenado y con silicio. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9: 37-48

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico:jsoliso@ittla.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La calidad y características funcionales de muchas aplicaciones ingenieriles se determina por las cargas mecánicas superimpuestas y los requerimientos particulares de su superficie, tales como la resistencia al desgaste, los niveles del coeficiente de fricción (CoF) y/o la resistencia a la corrosión. El uso de películas delgadas como la de carbón hidrogenado (a-C:H), también conocida como película hidrogenada de carbón como si fuera diamante (DLC), se ha venido consolidando por la mejora en la vida útil/rendimiento cuando se aplica sobre componentes de acero (Grill, 1999; Roth et al., 1995), en los cuales se requieren propiedades específicas en sitios particulares sin que se comprometa la resistencia del material de bulto. Por si fuera poco, estos recubrimientos se están utilizando en la industria como lubricantes sólidos para mejorar el comportamiento tribológico de los componentes de máquinas o elementos de transporte de fluidos bajo atmósferas limpias o donde no se permiten los fluidos lubricantes, tales como donde se procesan alimentos, bombeo de químicos, aplicaciones biológicas, tecnología espacial, discos duros, etc. (Robertson, 2008).

De la variedad de recubrimientos que se relacionan bajo la expresión DLC, una importante subclase es la de los recubrimientos tipo a-C:H. Básicamente, la película a-C:H es una red amorfa que se compone de carbón e hidrógeno. Esta red consiste de átomos de carbón fuertemente entrelazados principalmente con uniones sp<sup>2</sup> (cuasi-grafítico) y sp<sup>3</sup> (cuasi-diamante). La estructura de la película es metaestable debido a que todos los métodos por deposición son procesos de no-equilibrio que se basan en el enfriamiento térmico rápido de iones energéticamente cargados que impactan sobre una superficie fría.

Las propiedades de estos recubrimientos dependen fuertemente del contenido de hidrógeno y la relación sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup>, la cual a su vez, depende del proceso de deposición y sus parámetros. Los valores de dureza de las películas a-C:H se encuentran en el rango de 15-50 GPa (Martin et al., 2001).

La deposición de los H-DLC's se obtiene comúnmente por arco catódico, plasma mejorado (PECVD por las siglas en inglés del proceso por deposición química de vapores con plasma mejorado), deposición por haz de iones, pulverizado por corriente directa o radio frecuencia, etc. (Zhang et al., 1997). El proceso PECVD se utiliza extensivamente debido a la naturaleza del gas hidrocarbón que se usa ya que los recubrimientos incorporan más uniones sp<sup>2</sup> e hidrógenos, los cuales producen películas más suaves que la mayoría de los recubrimientos tetrahédricos (Clay et al., 1998).

Las ventajas que ofrecen los recubrimientos DLC son su alta dureza, su bajo coeficiente de fricción (CoF) y sus bajas tasas de desgaste. Usualmente, bajo condiciones tribológicas, el material más suave en el par que hace contacto se desgastaría mucho. Sin embargo, en el caso de los DLC, se observa un comportamiento diferente.

Los productos por desgaste de las películas, que tienen una naturaleza grafítica (Erdemir et al., 1996), se transfieren a la contraparte para formar lo que se conoce como capa de transferencia sobre la superficie de la contraparte. Entonces, la película DLC se desliza sobre la capa de transferencia que protege al desgaste a la superficie de la contraparte más suave y la película DLC más dura se desgasta a una tasa extremadamente baja.

En esta situación, los productos por desgaste gráfico del DLC también actúan como un lubricante sólido. La formación y especialmente la adhesión de esta capa de transferencia depende de la condición química de la superficie de la contraparte y las condiciones tribológicas y ambientales (Holmberg et al., 2000).

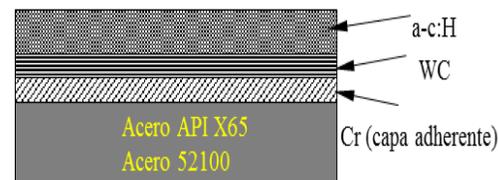
Aunque se han llevado a cabo varios estudios relacionados con las propiedades friccionales y los mecanismos por desgaste de las películas DLC, los comportamientos tribológicos de dichas películas deslizando sobre contrapartes que no están recubiertas (aceros por ejemplo) continúan investigándose continuamente. El propósito del presente trabajo fue el de conocer algunas características microestructurales y mecánicas de un recubrimiento dúplex de carbón hidrogenado cuasidiamante depositado sobre dos tipos de acero que tienen aplicación industrial. El conocimiento del comportamiento tribológico de estos recubrimientos específicos empleando las condiciones de trabajo apropiadas permitirá la expansión de aplicación en componentes mecánicos recubiertos con películas funcionales.

## Materiales y metodología experimental

### Materiales

Los recubrimientos H-DLC se produjeron para la presente investigación utilizando la tecnología PECVD, mediante el empleo del gas acetileno ( $C_2H_2$ ) bajo una presión aproximada de 0.3 Pa. El sustrato (material base) se mantuvo con temperaturas por debajo de los 200 °C, con un voltaje bias de 780 V y frecuencia de 40 kHz para la generación de plasma. La velocidad para depositar las especies fue de aprox. 0.8  $\mu m$  min<sup>-1</sup>. El proceso para deposición fue continuo con duración aproximada de 126 min. para las intercapas y 140 min. para la película DLC.

La deposición incluyó una intercapa adherente de Cr (por medio del pulverizado con magnetrones y corriente directa) seguida por una capa intermedia de carburo de tungsteno (también con pulverizado con magnetrones y una introducción gradual a la cámara de gas  $C_2H_2$ ) y la capa de a-C:H, con 20-40% de hidrógeno (ver Fig. 1).



**Figura 1** Representación esquemática del arreglo multicapa depositado sobre dos diferentes tipos de acero.

Los recubrimientos se depositaron sobre dos tipos de acero: a) acero al carbón API X65 con dimensiones de 25 mm de diámetro y 6 mm de espesor, y el acero AISI 52100 con dimensiones de 7x7x3 mm<sup>3</sup>. La rugosidad de la superficie para ambos sustratos antes de la deposición fue de  $R_a = 0.08 \mu m$ .

Todas las probetas se lavaron ultrasónicamente con inmersión en acetona por 10 min. y se utilizó aire seco a propulsión. Previo a la deposición, las probetas se limpiaron dentro del reactor conteniendo gas argón y mediante un ataque de pulverizado.

### Caracterización de las películas

Tanto la dureza como el módulo elástico de las películas sobre cada uno de los aceros se llevó a cabo empleando Nano-indentación con indentador de punta Berkovich (MicroMaterials, Ltd. Wrexham, U.K.), a través de carga incremental de 1 a 50 mN y en total se utilizó una matriz de 50 indentaciones.

La resistencia adhesiva de las deposiciones se midió con un aparato comercial de rayado (Scratch-test, millenium 200, TRIBOTechnique, France) con un indentador de diamante esférico Rocwell (radio de la punta de 500  $\mu\text{m}$ ) y equipado con monitoreo de emisión acústica. Las mediciones se realizaron con carga progresiva desde 0.1 hasta 80 N con una tasa de 100 N/min y una longitud de rayado de 8 mm en condición seca. Por otro lado, mediante la espectroscopía Raman se identificó la estructura química local presente en la superficie de la película, al igual que en las pistas desgastadas después de las pruebas de fricción y desgaste.

El aparato fue un dispositivo comercial Renisaw Invia, equipado con un laser de longitud de onda  $\lambda = 488 \text{ nm}$ . Se utilizó el modo estático y extendido para detectar la formación de los compuestos y los picos de carbón (pico desordenado D y pico amorfo grafitico G). El rango de barrido fue desde 800 a 1800  $\text{cm}^{-1}$ . Los datos se ajustaron a una forma Gaussiana para mostrar las posiciones de los picos G y D y determinar las relaciones de intensidad de picos ID/IG, lo que se consideró como un indicador de la estructura de carbón  $\text{sp}^2/\text{sp}^3$ . Todas las mediciones se realizaron en seco bajo una temperatura de  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y 35-50 % de humedad relativa.

Las películas así como las zonas desgastadas después de las pruebas tribológicas se estudiaron utilizando un microscopio de barrido Zeiss EVO MA15 V de presión variable y emisión de campo en modo directo. Este aparato viene equipado con el sistema de análisis por energía dispersa de rayos X (EDX), con el cual se analizó tanto cuantitativa como cualitativamente la presencia de C y Cr/W de las películas antes y después de las pruebas tribológicas, así como para determinar la presencia de material transferido (ocurrencia de la capa de transferencia).

Después de las pruebas tribológicas se empleó la interferometría de luz blanca (NPFLEX Bruker) para determinar las características de las áreas desgastadas tanto en las películas como en las contrapartes.

### Pruebas tribológicas

Las pruebas tribológicas se trabajaron con dos diferentes procedimientos. Para el acero recubierto API X65 se usó el método bola-sobre-placa. La bola (contraparte y con movimiento recíprocante) fue una de cerámica  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (62 % en peso de Si y 37.5 % en peso de N) con diámetro de 12 mm, una rugosidad superficial de 0.02  $\mu\text{m}$  y una dureza de  $\text{HV}50\text{g} = 1600$ . La presión de contacto fue de 150 MPa y 400 MPa por 6 hrs. a una frecuencia de 1 Hz y una velocidad de deslizamiento de 0.02  $\text{ms}^{-1}$  con una longitud de movimiento recíprocante de 10 mm.

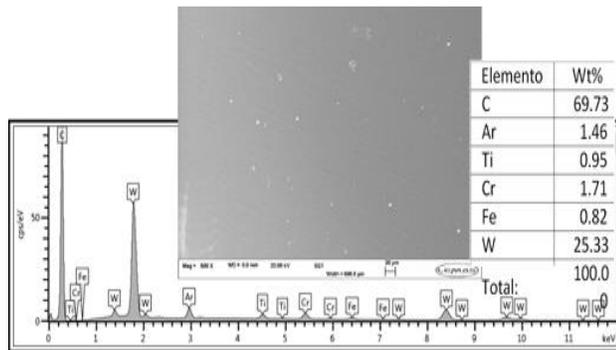
Las presiones de contacto se definieron con estas magnitudes para simular las condiciones reales a las cuales los componentes de la industria del gas y petróleo están sujetos. Las pruebas se realizaron en un rango de temperaturas de 18-23  $^\circ\text{C}$  bajo condición seca con humedad relativa de aproximadamente 25 % y también bajo condición húmeda en solución salina de 3.5 % NaCl y pH 6.5. Para el acero AISI 52100 se utilizó el método perno-sobre-placa con un tribómetro recíprocante Cameron Plint TE77. La longitud de recorrido fue de 6 mm y el diámetro de los pernos de 6 mm, con un radio en la punta de contacto de 110 - 120 mm. Las cargas o presiones máximas contacto Hertziano fueron desde 110, 140, 160, 170 y 190 MPa. La frecuencia de movimiento fue de 10 Hz y con una velocidad lineal de 0.1  $\text{ms}^{-1}$ . La duración de las pruebas fue de 6 h. Todas las pruebas se realizaron con tres repeticiones. Estas condiciones se eligieron con la intención de emular las condiciones de deslizamiento de un contacto de un anillo de pistón de una máquina de combustión interna (Johansson et al., 2011).

**Resultados y discusión**

**Caracterización microestructural de la película sobre acero AISI 52100**

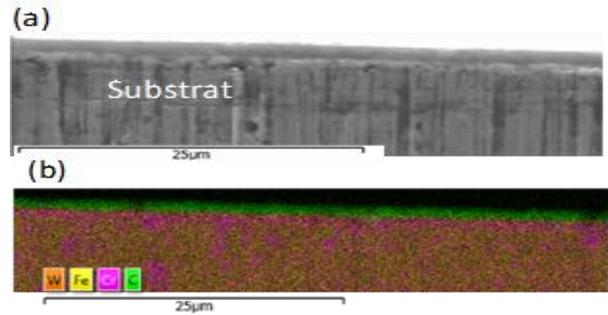
La superficie del H-DLC es prácticamente una copia de la superficie inicial del sustrato, por ello es que en ocasiones se encuentra en la literatura que la película de cualquier DLC es una mímica de la superficie del sustrato. Con la finalidad de elucidar el contenido químico del recubrimiento bajo estudio, se utilizó el complemento del SEM, es decir, el EDX, representado en la Fig. 2.

En la gráfica se aprecia el contenido de cada elemento, evidenciando los elementos que son los ingredientes principales del H-DLC, es decir, el C, W, y Cr. No aparece el H debido a que el equipo no tiene capacidad para detectar la difracción de este elemento. En la fotomicrografía se observan las burbujitas características de los DLC's.



**Figura 2** Contenido químico del H-DLC obtenido mediante EDX.

Una mirada a la sección transversal del H-DLC se ilustra en la Fig. 3 (a). La distribución de los elementos que contiene el revestimiento se muestra en la Fig. 3 (b).



**Figura 3** (a) Imagen de SEM del H-DLC sobre el acero AISI 52100. (b) Mapeo de la zona recubierta mostrando los elementos, obtenido por EDS.

El espesor total del H-DLC se validó mediante la prueba rápida de Calotest.

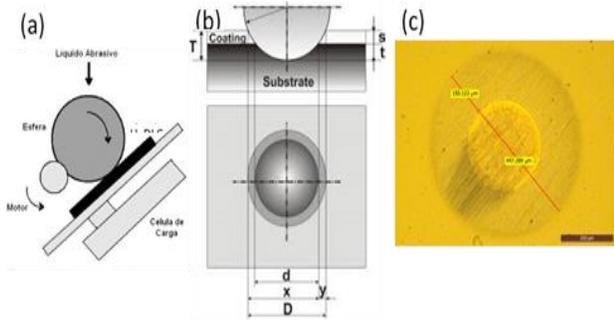
El procedimiento tecnológico es la realización de un pequeño cráter en el revestimiento utilizando una bola de geometría conocida produciendo una sección cónica en la película al visualizarla en un microscopio óptico, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 4 (c).

En la Fig. 4 (a) se muestra esquemáticamente la colocación de una bola de acero inoxidable de 0.02 m de diámetro que gira deslizándose sobre el H-DLC. En la Fig. 4 (b) se observan las dimensiones necesarias para determinar el espesor de dicho revestimiento. La relación matemática está dada por:

$$\text{espesor} = \frac{xy}{2R}, \text{ por lo que, utilizando los valores de la Fig. 4}$$

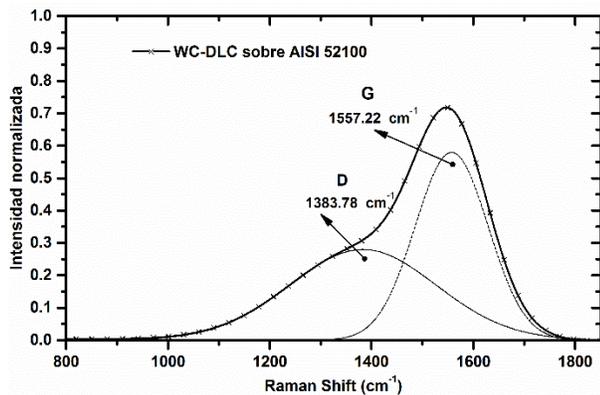
$$(c),$$

$$= \frac{(150.123 \text{ mm})(447.289 \text{ mm})}{0.02 \times 10^6 \text{ mm}} = 3.3 \text{ mm}.$$



**Figura 4** (a) Representación esquemática de la prueba Calotest, (b) Geometría del cráter que se forma y las dimensiones requeridas para la determinación del espesor, y (c) cráter formado en el H-DLC bajo estudio.

En la Fig. 5 se muestra el espectro Raman del recubrimiento como se depositó sobre la placa de acero AISI 52100. El espectro se ajustó usando las funciones Gaussianas y Lorentzianas.



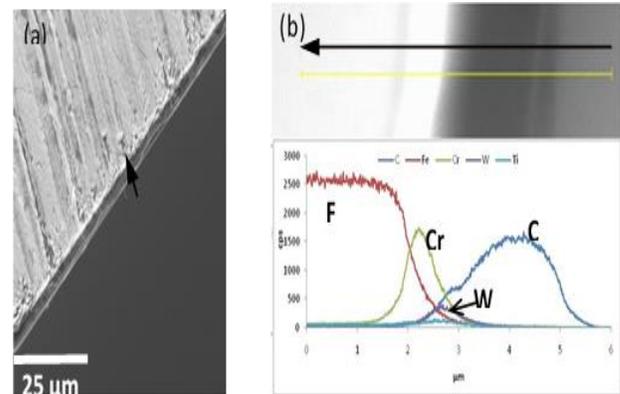
**Figura 5** Espectro Raman del recubrimiento H-DLC sobre acero AISI 52100.

En la gráfica, las dos bandas están bien definidas como la banda desordenada (D) y la gráfica (G) que inician como los sitios sp<sup>2</sup>, debido al hecho de que la excitación láser de 488 nm resuena con las transiciones  $\pi - \pi^*$  en los sitios sp<sup>2</sup>, y en este caso la banda D domina sobre la contribución de los sitios sp<sup>3</sup>. La banda gráfica (G) está centrada en 1557.22 cm<sup>-1</sup> con excitación visible.

La banda de hombro (D) en 1383.78 cm<sup>-1</sup> se atribuye al enlace de ángulo desordenado del micro-dominio cuasigrafito afectado por el enlace sp<sup>3</sup>. La amplitud de las líneas confirma las moléculas amorfas del hidrocarbón de esta película, en particular, debido al hecho de que no hay bandas y picos por debajo de los 800 cm<sup>-1</sup>. La intensidad integrada de la relación de la forma lineal Gaussiana del espectro fue ID/IG = 0.49.

### Caracterización microestructural de la película sobre acero API X65

El espesor del recubrimiento fue de  $2.69 \pm 0.2$  determinado con Calotest. Como complemento, se utilizó SEM al igual que el espectro EDS en la sección transversal de una muestra para evaluar la penetración de las capas depositadas, como se puede apreciar en la Fig. 6.



**Figura 6** Imagen SEM de la sección transversal del H-DLC (a) y el barrido en la sección transversal de la dirección y sentido indicados por las flechas, dando información de la composición a lo largo de la longitud (b).

La interfaz entre el recubrimiento y el material de bulto (substrato) aparece como aceptable dado que las estructuras no presentan defectos visibles.

La película exhibió una superficie compuesta de hierro (el acero al carbón), las capas de adhesión de Cr (2.2  $\mu\text{m}$ ) y W (1.4  $\mu\text{m}$ ) y la capa final de H-DLC (2.7  $\mu\text{m}$ ).

En cuanto a la estructura, de acuerdo con los reportes en la literatura (Pang et al., 2010), la estructura con enlaces C-C, siendo la cuasidiamante ( $\text{sp}^3$ - banda D) y que se observa en el rango de 1200-1450  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que la estructura cuasigrafito ( $\text{sp}^2$ - banda G) se observa en el rango 1500-1700  $\text{cm}^{-1}$ .

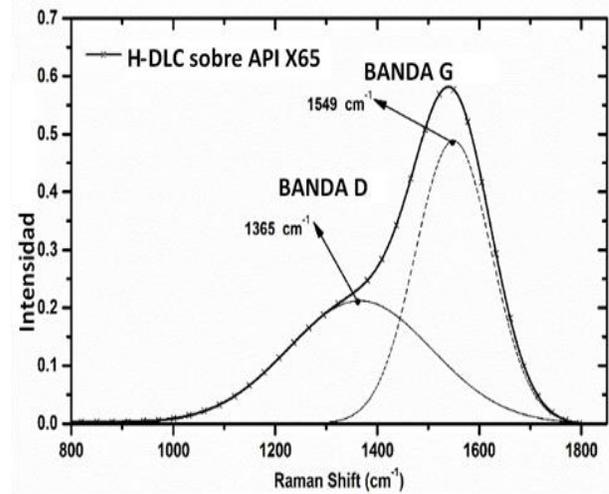
En la Fig. 7, se presenta el espectro del revestimiento H-DLC sobre API X65, en donde se debe notar a las bandas D y G, relacionadas con la estructura gráfitica y cuasidiamante. El espectro de la película DLC hidrogenado muestra dos bandas, la D y la G con picos (Raman shifts) 1365  $\text{cm}^{-1}$  y 1549  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente. Por lo que, la relación de picos D y G se conformó como .

$$\frac{I_D}{I_G} = 0.42$$

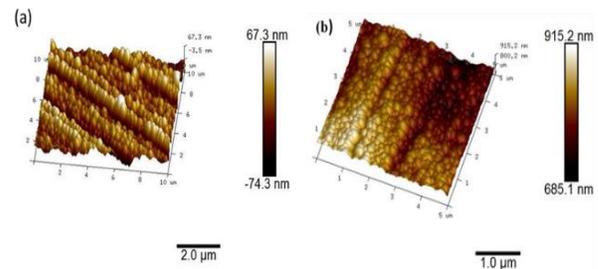
La topografía superficial se analizó mediante microscopía de fuerza atómica (AFM).

Los revestimientos H-DLC (Fig. 8) revelaron una superficie con rugosidad conteniendo una gran cantidad de granos pequeños pero a la vez compactos y homogéneos.

Se observó una distribución de granos con una rugosidad máxima de 63.7 nm para el caso del depósito sobre acero API X65 y 915.2 nm sobre AISI 52100, determinada en un área de 10 x 10  $\mu\text{m}$  y 5 x 5  $\mu\text{m}$ , respectivamente.



**Figura 7** Espectro Raman de la estructura carbonosa H-DLC antes de las pruebas de desgaste.

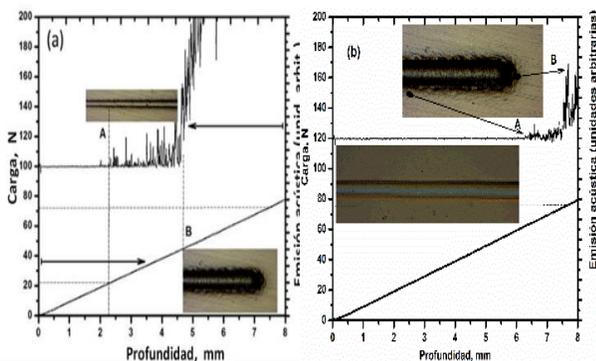


**Figura 8** Imágenes del AFM del recubrimiento como se depositó sobre: (a) API X65 y (b) AISI 52100.

### Caracterización mecánica

Las pruebas de adherencia (scratch) sobre el H-DLC revelaron una adhesión aceptable sobre el acero al carbón API X65 hasta una carga crítica de 22.99 N de la carga incremental (~2.3 mm de profundidad del surco) sin un signo de agrietamiento (ver Fig. 9-a). El punto A indica el inicio de las micro-grietas angulares en las orillas del surco ocasionadas por el incremento de la carga hasta los 40 N por la parte de atrás del contacto pero sin evidenciar falla adhesiva.

La alta amplitud de los picos de emisión acústica (EA) en el punto B, a una profundidad de 4.8 mm y la carga de 50 N, es evidencia de la actividad material que con ayuda de las fotografías insertadas se puede observar la presencia de grietas semi-circulares en el sustrato. La situación se sostiene hasta que la prueba se completa. Este comportamiento podría ser un indicativo de insuficiente adhesión.



**Figura 9** Comportamiento de la prueba de rayado (scratch) de la película sobre el acero (a) API X65 y (b) AISI 52100.

Por su parte, el recubrimiento H-DLC se adhirió extremadamente bien al sustrato AISI 52100 con muy poco agrietamiento sin evidencia de falla adhesiva y no se observó la falla crítica ni a los 80N, como puede apreciarse en la Fig. 9-b.

La emisión acústica proporcionó ciertos picos indicando solo agrietamiento transversal semi-circular microscópico causado por la carga de 75N por detrás del extremo que contacta (véase las flechas A y B) hasta la terminación de la carrera.

Entonces, se consideró que la carga crítica es  $> 80\text{N}$  lo que representa un resultado más que aceptable para aplicaciones industriales (Buijnsters et al., 2005).

A pesar de la alta dureza del recubrimiento, está claro que existió deformación plástica a lo largo de la ranura y debido a que no hay evidencia de fragmentación o falla adhesiva se puede sugerir que el depósito de Cr como capa de adhesión entre la capa DLC y el sustrato consiguió relajar los esfuerzos residuales compresivos hasta un punto que la ductilidad para resistir la fractura interfacial mejoró.

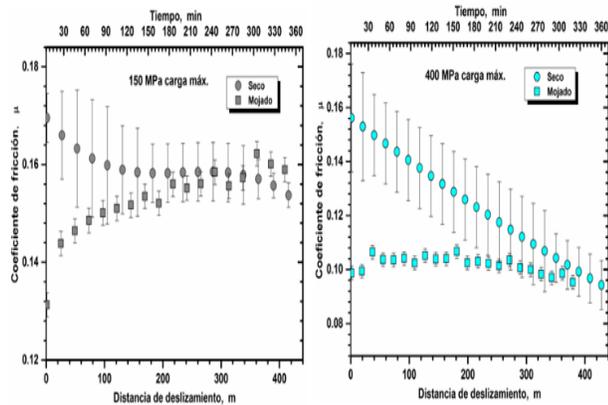
## Comportamiento tribológico en términos de fricción

### H-DLC sobre acero API X65

Los resultados de los experimentos tribológicos en términos de las fuerzas friccionantes para cada condición de deslizamiento del revestimiento H-DLC se muestran en la gráfica de la Fig. 10. La diferencia en el running-in de cada evolución es notable por los diferentes medios y para la misma presión máxima.

Mientras que el coeficiente de fricción (CoF) disminuye con el deslizamiento para la condición seca, para la condición mojada, el mismo CoF se incrementa casi en la misma proporción que lo hace la condición seca. Ambos CoF alcanzan un estado estable después de los 200 m.

La ligera tendencia a la baja del CoF se vincula, por un lado, a la baja magnitud de la carga normal aplicada, la cual produce una cierta cantidad de fricción inducida por calentamiento localizado y que funde las asperezas en el contacto, lo que puede generar lenta pero progresivamente una capa de transferencia amorfa capaz de contribuir en la reducción del CoF (Liu et al., 1996).

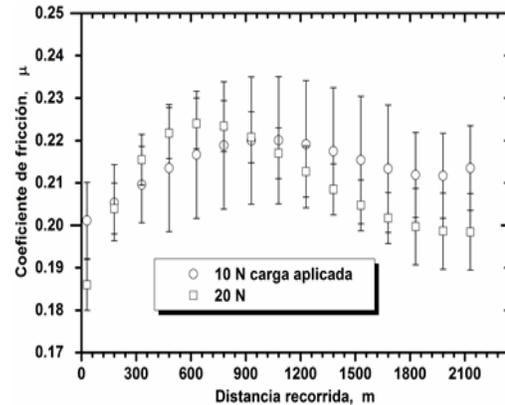


**Figura 10** Evolución del CoF del par tribológico Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/H-DLC con sustrato API X65 para una presión máxima Hertziana de (a) 150 MPa y (b) 400 MPa.

Está claro que los valores de CoF disminuyeron con el aumento en la presión ejercida sobre la superficie carbonosa. Esta es una característica que generalmente se observa en el comportamiento de los materiales ferrosos con recubrimiento DLC hidrogenado (Erdemir, 2001). Es importante observar que los comportamientos con presiones aplicadas en la condición mojada no guardan una correlación, a diferencia del comportamiento bajo condición seca, donde la fricción disminuye con el incremento de la carga aplicada.

### H-DLC sobre acero AISI 52100

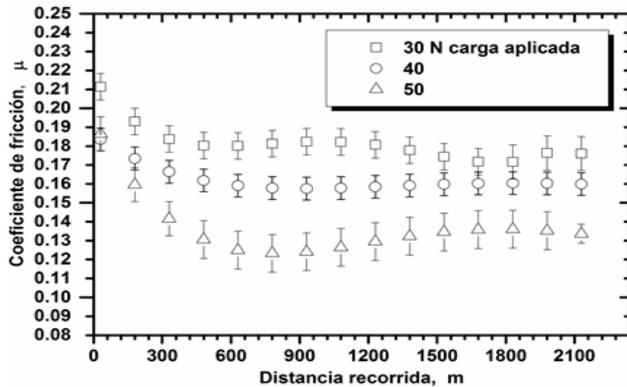
Al comienzo de la prueba (running-in), el CoF para cargas de 10 y 20 N se incrementó progresivamente con el incremento de la distancia de deslizamiento hasta que alcanzó un valor promedio superior de  $\mu_{10N} = 0.22$  y  $\mu_{20N} = 0.225$ , para luego descender ligeramente hasta que se alcanza aproximadamente una estabilidad con valores promedio de  $\mu_{10N} = 0.21$  y  $\mu_{20N} = 0.20$ , como se puede ver en la Fig. 11. El incremento inicial que se observa para el CoF se atribuye a la rugosidad que presenta la superficie revestida y por tanto, al área de contacto reducida entre las interfaces (perno-H-DLC).



**Figura 11** Evolución del CoF del perno de AISI 52100 sobre el acero 52100 recubierto con H-DLC, sujeto a dos diferentes presiones de contacto con movimiento bidireccional. Las barras de error son la desviación de 3 repeticiones.

Debido al deslizamiento, las rugosidades superficiales se suavizan como resultado de los efectos plástico y elástico de las fuerzas friccionantes que actúan sobre el recubrimiento, el cual, a su vez, incrementa el área de contacto, que está fuertemente asociada con el CoF, específicamente por su apariencia y dureza superficial que corresponde a la resistencia por deformación del área de contacto. En cuanto continúa el deslizamiento, la ligera tendencia hacia abajo del CoF se vincula, por un lado, a la baja magnitud de la carga normal aplicada, la cual produce una cierta cantidad de fricción inducida por calentamiento localizado y que funde las asperezas en el contacto, lo que puede generar lenta pero progresivamente una capa de transferencia amorfa capaz de contribuir en la reducción del CoF (Liu et al., 1996). Por otro lado, la eliminación de los enlaces libres  $\sigma$  sobre la superficies deslizándose también determina los niveles de reducción en los valores de fricción. Aquí, el hidrógeno atómico y/o molecular dentro del recubrimiento (acomodado intersticialmente dentro de la estructura el H-DLC), se rellena continuamente y termina los enlaces  $\sigma$  que estuvieron expuestos por el contacto dinámico (Erdemir, 2001).

En contraste, las características friccionales correspondientes a cargas mayores, es decir, 30-50 N exhibieron una tendencia descendente en el CoF desde el inicio del deslizamiento, como se puede observar en la gráfica de la Fig. 12.



**Figura 12** Evolución del CoF para las cargas de 30, 40 y 50 N.

Para las cargas de 30 a 50 N (160 a 190 MPa), la presión de contacto es más alta y la temperatura entre el perno y el recubrimiento se eleva debido a las fuerzas de empuje que son más grandes, y así, las asperezas rugosas se deforman plásticamente con doblez y estampados dando como resultado el desarrollo de una tribocapa lúbrica como si fuera grafito.

Adicionalmente, cuando se aplican cargas más altas sobre la superficie del recubrimiento, se reporta en la literatura que el auto alineamiento de la tribocapa grafitizada/amorfizada y la pasivación efectiva de los enlaces sueltos por los átomos de hidrógeno y/o moléculas en el medio ambiente contribuye a la reducción del CoF (Lin et al., 2004).

Sin importar las diferencias en el inicio de la prueba tribológica, claramente se distingue que los niveles de fricción para un estado estable comienzan en el rango de los 1740-1800 m de tallado para todas las cargas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología así como a la Secretaría de Educación Pública/ Tecnológico Nacional de México por los apoyos económicos y permisos para realizar la experimentación en México e Inglaterra (Universidad de Leeds a quien JSR está profundamente agradecido por las facilidades otorgadas durante una estancia por investigación).

## Conclusiones

Debido a la complejidad de los mecanismos de contacto, realmente la investigación en este campo se encuentra lejos de una situación en la que el coeficiente de fricción o la velocidad de desgaste se puedan predecir para condiciones particulares de contacto basadas únicamente en análisis teóricos.

O sea, se puede encontrar en varios artículos una indicación de cómo se comportará una superficie tratada, donde se describen mediciones experimentales de la fricción y desgaste del recubrimiento aplicado, pero debido a la escasa estandarización de los métodos tribológicos de prueba.

No es sencillo encontrar resultados comparables con una serie de condiciones de contacto, porque las mediciones se realizaron con aparatos diferentes (acondicionados o comerciales), diferentes geometrías de contacto (diferentes radios de perno, materiales de perno, longitud de deslizamiento, etc), diferentes parámetros de prueba (velocidades y temperaturas) y diferentes ambientes (diferentes humedades relativas y condiciones seco o mojado).

Basado en los resultados experimentales y las observaciones de los efectos encontrados, se pueden hilvanar las siguientes conclusiones:

Se caracterizó microestructural y mecánicamente un revestimiento o película delgada de carbón cuasidiamante hidrogenado (H-DLC) del tipo dúplex, es decir, con Cr como capa de adherencia, y carburo de tungsteno (WC) como capa intermedia para una última capa de carbón. La deposición se realizó utilizando el sistema por deposición química de vapores con plasma mejorado (PECVD).

La película delgada alcanzó aproximadamente las 3  $\mu\text{m}$  de espesor total. Con un nivel de esfuerzo residual  $< 1$  GPa, con el substrato AISI 52100 y 2.6  $\mu\text{m}$  con el substrato API X65.

Los valores promedio máximos del CoF después de una distancia de deslizamiento de 2160 m fueron 0.21 para una presión máxima de contacto de 100 MPa a una velocidad lineal de 0.1 m/s, y los valores de CoF mínimos de 0.13 para una presión máxima de contacto de 190 MPa con la misma velocidad. Estos valores son considerablemente más bajos que los que presentaría el acero AISI 52100, cuyos CoF promedio se encuentran por 0.6-0.9.

La resistencia adhesiva alcanzó más de 80 N de resistencia en la prueba de rayado, lo que representa un valor más que aceptable para aplicaciones industriales y que fue considerablemente mayor que la película de carbón depositada sobre el acero API X65

El revestimiento se estudió desde el punto de vista tribológico en términos de su evolución de las fuerzas friccionantes cuando se deslizó el par H-DLC/acero bidireccionalmente en condiciones secas y bajo la acción de diferentes presiones normales a la temperatura ambiente sin control atmosférica.

En la etapa de estabilidad del coeficiente de fricción (CoF), los valores disminuyeron con el incremento de la presión normal aplicada.

Esta correlación se da, porque dependiendo del incremento en la carga normal aplicada, la composición química de la película se vió alterada en la forma de una superficie desgastada y grafitizada con un grado de transferencia carbonosa para formar una tribocapa en el perno de acero, tal y como lo reveló el análisis realizado con el instrumento Raman.

De acuerdo con los productos y efectos de la presente investigación científica, el revestimiento bajo estudio teniendo como substrato el AISI 52100 podría ser utilizado en un amplio rango de aplicaciones industriales, tales como la automotriz, la aeronáutica, y componentes de maquinaria.

## Referencias

- J. G. Buijnsters, P. Shankar, W. J. P. van Enckevort, J. J. Schermer, & J. J. ter Meulen. (2005). Adhesion analysis of polycrystalline diamond films on molybdenum by means of scratch, indentation and sand abrasion testing. *Thin Solid Films*, 474(1-2), 186-196
- K. J. Clay, S. P. Speakman, N. A. Morrison, N. Tomozeiu, W. I. Milne, & A. Kapoor. (1998). Material properties and tribological performance of rf-PECVD deposited DLC coatings. *Diamond and Related Materials*, 7(8), 1100-1107.
- A. Erdemir. (2001). The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 146-147, 292-297.
- K. Holmberg, H. Ronkainen, & A. Matthews. (2000). Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, 26(7), 787-795.

A. Erdemir, C. Bindal, G. R. Fenske, C. Zuiker, & P. Wilbur. (1996). Characterization of transfer layers forming on surfaces sliding against diamond-like carbon. *Surface and Coatings Technology*, 86–87, Part 2, 692-697.

Alfred Grill. (1999). Diamond-like carbon: state of the art. *Diamond and Related Materials*, 8(2–5), 428-434.

Staffan Johansson, Per H. Nilsson, Robert Ohlsson, & Bengt-Göran Rosén. (2011). Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact. *Wear*, 271(3–4), 625-633.

Jen Fin Lin, Pal Jen Wei, Jing Chang Pan, & Chi-Fong Ai. (2004). Effect of nitrogen content at coating film and film thickness on nanohardness and Young's modulus of hydrogenated carbon films. *Diamond and Related Materials*, 13(1), 42-53.

Y. Liu, A. Erdemir, & E. I. Meletis. (1996). An investigation of the relationship between graphitization and frictional behavior of DLC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 86–87, Part 2, 564-568.

P. J. Martin, & A. Bendavid. (2001). Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition. *Thin Solid Films*, 394(1–2), 1-14.

Hua Pang, Xingquan Wang, Guling Zhang, Huan Chen, Guohua Lv, & Size Yang. (2010). Characterization of diamond-like carbon films by SEM, XRD and Raman spectroscopy. *Applied Surface Science*, 256(21), 6403-6407.

J. Robertson. (2008). Comparison of diamond-like carbon to diamond for applications. *Phys. Status Solidi A*, 205(9), 2233-2244.

D. Roth, B. Rau, S. Roth, J. Mai, & K. H. Dittrich. (1995). Large area and three-dimensional deposition of diamond-like carbon films for industrial applications. *Surface and Coatings Technology*, 74–75, Part 2, 637-641.

S. Zhang, B. Wang, & J. Y. Tang. (1997). Processing and characterisation of diamondlike carbon films. *Surface Engineering*, 13(4), 303-309.

## Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual

DÍAZ, Sergio\*†, GUTIÉRREZ, Citlalih, VALDÉS, Daniel, HERNÁNDEZ, Bany

Recibido Febrero 14, 2016; Aceptado Octubre 7, 2016

### Resumen

En México las Instituciones de Educación Superior públicas no cuentan con todos los recursos humanos, ni equipo suficiente, para atender la demanda y la formación de nuevos ingenieros. Las escuelas que tienen equipo para el desarrollo de prácticas de robótica, corresponde a equipos didácticos comerciales con arquitecturas cerradas, emulando aplicaciones industriales, que no pueden ser modificadas; dificultando el aprendizaje y limitando la creatividad del estudiante. El objetivo del presente trabajo, consistió en diseñar y desarrollar el control de un brazo de robot de 5 GDL de arquitectura abierta, mediante una interfaz con prototipo virtual, integrando CAD y electrónica embebida, emulando y controlando los movimientos de un brazo de robot físico en tiempo real. La metodología que sirvió de base en esta investigación, se constituye del método científico, combinado con modelos de ciclo de vida de Ingeniería de Software, como: cascada e incremental. Entre los resultados obtenidos, se ha podido verificar que el brazo de robot responde a los movimientos del prototipo virtual, con un retardo de milisegundos. La principal aportación es el control del brazo con arquitectura abierta permitiendo la interacción máquina-estudiante e impulsa el desarrollo de la creatividad del alumno, aplicando sus conocimientos teóricos, adquiridos en clase.

**Prototipo virtual, arquitectura abierta, interfaz, brazo de robot, CAD.**

### Abstract

In Mexico the Public Higher Education Institutions, do not have all the human resources nor sufficient equipment to meet demand and the training of new engineers. The Schools with equipment for the development of robotics practical, are trademarks teaching equipment with closed architectures, emulating industrial applications, which can not be modified; hindering learning and limiting student creativity. The objective of this work was to design and develop control of a robot arm 5 DOF open architecture, using an interface with virtual prototype, integrating CAD and embedded electronics, emulating and controlling the movement of a physical robot arm in real time. The methodology was the basis for this research, it is the scientific method, combined with the models software engineering life cycle, such as waterfall and incremental. Among the results, it has been able to verify that the robot arm responds to movements of the virtual prototype, with a delay of milliseconds. The main contribution is the control robot arm with open architecture, allowing the machine-student interaction and development of student creativity, applying their theoretical knowledge acquired in class.

**Virtual prototype, Open architecture, Interfaz, Arm robot, CAD.**

**Citación:** DÍAZ, Sergio, GUTIÉRREZ, Citlalih, et al. Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual. Revista Tecnología e Innovación 2016. 3-9: 49-60

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: sergio\_diazz@yahoo.fr)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Dentro del campo de la robótica, se han desarrollado varios proyectos de control de brazos de robot. Su funcionalidad se basa en el control y teleoperación a distancia tanto de robots móviles como manipuladores. En México, existe poca investigación en el control de brazos de robot con interfaces virtuales aplicados a la enseñanza educativa, aplicando la teoría aprendida en las aulas, permitiendo al estudiante adquirir conceptos y habilidades para la manipulación de un robot, comprender su funcionamiento, detectar las fallas para tener una preparación y lograr las competencias que le permitan solucionar problemas reales que se le presenten en este campo.

En México, no todas las instituciones de educación superior públicas, cuentan con recursos humanos ni equipos suficientes para atender la demanda de estudiantes en la formación de nuevos ingenieros y/o investigadores. Los principales problemas que presentan las instituciones de nivel superior en materia de prácticas de laboratorio son: La carencia de equipo por limitaciones económicas, horarios restringidos para realizar las prácticas (dada la carencia de personal y espacio en el laboratorio durante las horas de atención) y los equipos de robótica con software de arquitectura cerrada.

Las escuelas que cuentan con equipo para el desarrollo de prácticas de robótica, o equipos comerciales didácticos para este tipo de actividades, tiene el inconveniente de contar con elementos de arquitecturas cerradas, en muchos casos emulando aplicaciones industriales, y no pueden ser modificados, para implementar diferentes prácticas para las que fueron diseñadas originalmente, dificultando el aprendizaje del funcionamiento interno de los elementos que componen la arquitectura, limitando la creatividad del estudiante.

Por lo que en este trabajo se plantea una alternativa donde los diferentes investigadores en esta área, han presentado para resolver este problema, recursos didácticos, empleando brazos de robot realizados por los alumnos, o empleando brazos de robot didácticos e integrando sistemas embebidos.

A continuación se mencionan algunos de los términos que se utilizarán en el presente trabajo:

**Prototipo virtual.** Según Gowda et al. de la universidad del estado de Michigan un prototipo virtual es una tecnología que implica el uso de realidad virtual y otras tecnologías informáticas para crear prototipos digitales [1], en este caso se utiliza para representar un producto físico a escala de un brazo de robot, con movimientos similares.

**Arquitectura abierta.** Según Aiman Alabdo et al. de la Universidad de Alicante España, menciona, que hoy en día se puede encontrar una clasificación de controladores para robots conocidos como propietarios, híbridos y abiertos. En la mayoría de los controladores propietarios presentan una estructura cerrada, es decir que para adicionar hardware o modificar el software del controlador, resulta difícil o imposible. En las arquitecturas híbridas en la mayoría de sus características donde incluyen leyes de control implementadas son cerradas, sin embargo a nivel de hardware permite incluir dispositivos o sensores. Finalmente en una arquitectura abierta, permite al usuario modificar tanto el hardware como el software sin ninguna dificultad [2].

**Interfaz.** En este caso se utiliza como la comunicación entre el diseño realizado en CAD con Labview y la comunicación entre Labview y Arduino.

Dentro del campo de la robótica, se han desarrollado varios proyectos de control de brazos de robot. Su funcionalidad se basa en el control y teleoperación a distancia tanto de robots móviles como manipuladores. En México, existe poca investigación en el control de brazos de robot con interfaces virtuales aplicados a la enseñanza educativa, aplicando la teoría aprendida en las aulas, permitiendo al estudiante adquirir conceptos y habilidades para la manipulación de un robot, comprender su funcionamiento, detectar las fallas para tener una preparación y lograr las competencias que le permitan solucionar problemas reales que se le presenten en este campo.

En México, no todas las instituciones de educación superior públicas, cuentan con recursos humanos ni equipos suficientes para atender la demanda de estudiantes en la formación de nuevos ingenieros y/o investigadores.

Los principales problemas que presentan las instituciones de nivel superior en materia de prácticas de laboratorio son: La carencia de equipo por limitaciones económicas, horarios restringidos para realizar las prácticas (dada la carencia de personal y espacio en el laboratorio durante las horas de atención) y los equipos de robótica con software de arquitectura cerrada.

Las escuelas que cuentan con equipo para el desarrollo de prácticas de robótica, o equipos comerciales didácticos para este tipo de actividades, tiene el inconveniente de contar con elementos de arquitecturas cerradas, en muchos casos emulando aplicaciones industriales, y no pueden ser modificados, para implementar diferentes prácticas para las que fueron diseñadas originalmente, dificultando el aprendizaje del funcionamiento interno de los elementos que componen la arquitectura, limitando la creatividad del estudiante.

Por lo que en este trabajo se plantea una alternativa donde los diferentes investigadores en esta área, han presentado para resolver este problema, recursos didácticos, empleando brazos de robot realizados por los alumnos, o empleando brazos de robot didácticos e integrando sistemas embebidos.

A continuación se mencionan algunos de los términos que se utilizarán en el presente trabajo.

Prototipo virtual. Según Gowda et al. de la universidad del estado de Michigan un prototipo virtual es una tecnología que implica el uso de realidad virtual y otras tecnologías informáticas para crear prototipos digitales [1], en este caso se utiliza para representar un producto físico a escala de un brazo de robot, con movimientos similares.

Arquitectura abierta. Según Aiman Alabdo et al. de la Universidad de Alicante España, menciona, que hoy en día se puede encontrar una clasificación de controladores para robots conocidos como propietarios, híbridos y abiertos. En la mayoría de los controladores propietarios presentan una estructura cerrada, es decir que para adicionar hardware o modificar el software del controlador, resulta difícil o imposible.

En las arquitecturas híbridas en la mayoría de sus características donde incluyen leyes de control implementadas son cerradas, sin embargo a nivel de hardware permite incluir dispositivos o sensores. Finalmente en una arquitectura abierta, permite al usuario modificar tanto el hardware como el software sin ninguna dificultad.

Interfaz. En este caso se utiliza como la comunicación entre el diseño realizado en CAD con Labview y la comunicación entre Labview y Arduino.

Brazo de robot. Un brazo de robot o manipulador se define como un conjunto de elementos electromecánicos que originan el movimiento de un elemento terminal (herramienta o gripper).

CAD. Diseño Asistido por Computadora es una herramienta, que permite hacer dibujos bidimensionales y modelos tridimensionales de forma precisa mediante el uso de una computadora. El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño.

### Trabajos previos

Actualmente la tecnología web y los laboratorios virtuales, han sido una ayuda como herramienta de apoyo en la educación, especialmente para reforzar las materias donde las prácticas son esenciales para el desarrollo de habilidades de los alumnos en la solución de problemas. A continuación se presentan algunos trabajos similares al desarrollado en este trabajo de Investigación:

Rafael Castillo et al. del departamento de Ingeniería Industrial, de la Universidad de Sonora y el Departamento de Investigación de Física de la Universidad Popular de Puebla, desarrollaron el proyecto “Diseño de un laboratorio remoto de robots y procesos de manufactura industriales”, es un proyecto compartido entre las universidades mencionadas, que emula un sistema de manufactura flexible para diversos procesos, controlando un robot tipo Gantry de 6 ejes y 2 CNC, así como otros procesos de transporte y almacenamiento. El proceso es controlado a través de una página web, donde utilizan un servidor LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP y Python).

Para visualizar el funcionamiento del sistema utiliza TeamViewer, programa especial para equipos de cómputo, cuya finalidad es compartir y controlar escritorios, reuniones en línea, videoconferencias y transferencia de archivos entre otras funcionalidades. Para su desarrollo emplearon tecnología National Instruments en combinación con Arduino y PLC's, Una desventaja de este sistema es que no tienen acceso a la programación origen de los equipos (Robot y CNC), es decir están limitados a la programación de origen o de fabricación [7].

Bajo este mismo tenor, Eric Rodríguez et al. de la universidad Académica de Ingeniería y la Unidad Académica de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Guerrero, en su proyecto titulado “Ambiente de experimentación remota de robótica móvil”, desarrollaron un aplicación para robótica móvil con algoritmos en Java, se trata de un laboratorio remoto, desarrollado bajo una arquitectura genérica; es decir cliente-servidor para controlar un robot móvil usando protocolo estándar TCP/IP.

Para el desarrollo de esta aplicación se utilizó Java como lenguaje de programación, obteniéndose un sistema independiente de la plataforma y orientado a objetos. Por esta razón el usuario puede trabajar con cualquier sistema operativo y ser capaz de acceder a la página del laboratorio para interactuar con el robot.

El software de control fue desarrollado de manera multiplataforma, sin embargo una limitante para los usuarios es el conocimiento de programación en Java, para el desarrollo de los algoritmos de control del robot y además no cuenta con un simulador.

Por otra parte también se necesita de un servidor cárcel, sistema operativo Linux/GNU con kernel 2.6.18 o superior.

Utiliza una plataforma de experimentación para prototipado de diseños mediante Arduino, para la compilación del servidor necesita de C++, los script de instalación y ejecución están escritos para distribuciones Red Hat o compatibles y requieren tener instalado xinetd. Para tener una interacción completa con el sistema, se necesita de un navegador con Java script y soporte para applets Java 1.5. El sistema funciona para FireFox, Internet explorer y Chrome.

En conclusión, algunos de los trabajos encontrados mencionados en esta sección, han permitido hasta el momento generar información que integra varios aspectos como el diseño, desarrollo y funcionamiento de un brazo de robot y su control.

Es importante señalar que una vez realizada la búsqueda del Estado del Arte, no se encontraron documentos, que consideren la simulación y el control de un brazo de robot en tiempo real a partir de un CAD, dónde se integren herramientas de simulación, de adquisición y control del mismo para realizar prácticas de la materia de robótica.

Dentro del campo de la robótica, se han desarrollado varios proyectos de control de brazos de robot. Su funcionalidad se basa en el control y teleoperación a distancia tanto de robots móviles como manipuladores.

En México, existe poca investigación en el control de brazos de robot con interfaces virtuales aplicados a la enseñanza educativa, aplicando la teoría aprendida en las aulas, permitiendo al estudiante adquirir conceptos y habilidades para la manipulación de un robot, comprender su funcionamiento, detectar las fallas para tener una preparación y lograr las competencias que le permitan solucionar problemas reales que se le presenten en este campo.

En México, no todas las instituciones de educación superior públicas, cuentan con recursos humanos ni equipos suficientes para atender la demanda de estudiantes en la formación de nuevos ingenieros y/o investigadores. Los principales problemas que presentan las instituciones de nivel superior en materia de prácticas de laboratorio son:

La carencia de equipo por limitaciones económicas, horarios restringidos para realizar las prácticas (dada la carencia de personal y espacio en el laboratorio durante las horas de atención) y los equipos de robótica con software de arquitectura cerrada.

Las escuelas que cuentan con equipo para el desarrollo de prácticas de robótica, o equipos comerciales didácticos para este tipo de actividades, tiene el inconveniente de contar con elementos de arquitecturas cerradas, en muchos casos emulando aplicaciones industriales, y no pueden ser modificados, para implementar diferentes prácticas para las que fueron diseñadas originalmente, dificultando el aprendizaje del funcionamiento interno de los elementos que componen la arquitectura, limitando la creatividad del estudiante. Por lo que en este trabajo se plantea una alternativa donde los diferentes investigadores en esta área, han presentado para resolver este problema, recursos didácticos, empleando brazos de robot realizados por los alumnos, o empleando brazos de robot didácticos e integrando sistemas embebidos. A continuación se mencionan algunos de los términos que se utilizaran en el presente trabajo:

Prototipo virtual. Según Gowda et al. de la universidad del estado de Michigan un prototipo virtual es una tecnología que implica el uso de realidad virtual y otras tecnologías informáticas para crear prototipos digitales [1], en este caso se utiliza para representar un producto físico a escala de un brazo de robot, con movimientos similares.

Arquitectura abierta. Según Aiman Alabdo et al. de la Universidad de Alicante España, menciona, que hoy en día se puede encontrar una clasificación de controladores para robots conocidos como propietarios, híbridos y abiertos. En la mayoría de los controladores propietarios presentan una estructura cerrada, es decir que para adicionar hardware o modificar el software del controlador, resulta difícil o imposible.

En las arquitecturas híbridas en la mayoría de sus características donde incluyen leyes de control implementadas son cerradas, sin embargo a nivel de hardware permite incluir dispositivos o sensores. Finalmente en una arquitectura abierta, permite al usuario modificar tanto el hardware como el software sin ninguna dificultad. Interfaz. En este caso se utiliza como la comunicación entre el diseño realizado en CAD con LabVIEW y la comunicación entre LabVIEW y Arduino.

Brazo de robot. Un brazo de robot o manipulador se define como un conjunto de elementos electromecánicos que originan el movimiento de un elemento terminal (herramienta o gripper). CAD. Diseño Asistido por Computadora es una herramienta, que permite hacer dibujos bidimensionales y modelos tridimensionales de forma precisa mediante el uso de una computadora. El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño.

### Trabajos previos.

Actualmente la tecnología web y los laboratorios virtuales, han sido una ayuda como herramienta de apoyo en la educación, especialmente para reforzar las materias donde las prácticas son esenciales para el desarrollo de habilidades de los alumnos en la solución de problemas.

A continuación se presentan algunos trabajos similares al desarrollado en este trabajo de Investigación:

Rafael Castillo et al. del departamento de Ingeniería Industrial, de la Universidad de Sonora y el Departamento de Investigación de Física de la Universidad Popular de Puebla, desarrollaron el proyecto “Diseño de un laboratorio remoto de robots y procesos de manufactura industriales”, es un proyecto compartido entre las universidades mencionadas, que emula un sistema de manufactura flexible para diversos procesos, controlando un robot tipo Gantry de 6 ejes y 2 CNC, así como otros procesos de transporte y almacenamiento.

El proceso es controlado a través de una página web, donde utilizan un servidor LAMP (Linux, Apache, MySQL, Perl, PHP y Python).

Para visualizar el funcionamiento del sistema utiliza TeamViewer, programa especial para equipos de cómputo, cuya finalidad es compartir y controlar escritorios, reuniones en línea, videoconferencias y transferencia de archivos entre otras funcionalidades. Para su desarrollo emplearon tecnología National Instruments en combinación con Arduino y PLC's, Una desventaja de este sistema es que no tienen acceso a la programación origen de los equipos (Robot y CNC), es decir están limitados a la programación de origen o de fabricación [7]. Bajo este mismo tenor, Eric Rodríguez et al. de la universidad Académica de Ingeniería y la Unidad Académica de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Guerrero, en su proyecto titulado “Ambiente de experimentación remota de robótica móvil”, desarrollaron un aplicación para robótica móvil con algoritmos en Java, se trata de un laboratorio remoto, desarrollado bajo una arquitectura genérica; es decir cliente-servidor para controlar un robot móvil usando protocolo estándar TCP/IP.

Para el desarrollo de esta aplicación se utilizó Java como lenguaje de programación, obteniéndose un sistema independiente de la plataforma y orientado a objetos. Por esta razón el usuario puede trabajar con cualquier sistema operativo y ser capaz de acceder a la página del laboratorio para interactuar con el robot. El software de control fue desarrollado de manera multiplataforma, sin embargo una limitante para los usuarios es el conocimiento de programación en Java, para el desarrollo de los algoritmos de control del robot y además no cuenta con un simulador.

Por otra parte también se necesita de un servidor cárcel, sistema operativo Linux/GNU con kernel 2.6.18 o superior. Utiliza una plataforma de experimentación para prototipado de diseños mediante Arduino, para la compilación del servidor necesita de C++, los script de instalación y ejecución están escritos para distribuciones Red Hat o compatibles y requieren tener instalado xinetd.

Para tener una interacción completa con el sistema, se necesita de un navegador con Java script y soporte para applets Java 1.5.

El sistema funciona para FireFox, Internet explorer y Chrome.

En conclusión, algunos de los trabajos encontrados mencionados en esta sección, han permitido hasta el momento generar información que integra varios aspectos como el diseño, desarrollo y funcionamiento de un brazo de robot y su control.

Es importante señalar que una vez realizada la búsqueda del Estado del Arte, no se encontraron documentos, que consideren la simulación y el control de un brazo de robot en tiempo real a partir de un CAD, dónde se integren herramientas de simulación, de adquisición y control del mismo para realizar prácticas de la materia de robótica.

Por otra parte, en el mercado existen distintas herramientas CAD y software de simulación que permiten el modelado 3D utilizados principalmente el área de animación, diseño gráfico, desarrollo de videojuegos entre otras aplicaciones.

Los software más reconocidos y más utilizados en las áreas mencionadas son los siguientes [10]: Maya, SoftImage, 3D StudioMax, LightWave Blender, Cinema 4D, Modo. Se identificaron las ventajas y desventajas de cada uno considerando algunas características que son óptimas para este proyecto como son:

Precio, tiempo requerido para su aprendizaje, scripting, herramientas de modelado, cinemática inversa técnicas de animación, soporte para cuerpos rígidos y cuerpos blandos, simulación de fluidos entre otras.

También se buscó una herramienta que fuese compatible en formatos con SolidWorks pues esta herramienta sería usada en el modelado de las piezas para una mayor facilidad, encontrando similitudes entre los distintos software analizados.

Además de la posibilidad manipular los objetos 3D por medio de programación y de esta forma lograr una simulación más robusta y teniendo en mente que los modelos de control se realizarán sobre Labview. Para ello se hizo una comparación entre los software más usados en el área.

### **Desarrollo de la propuesta**

El método empleado para el desarrollo del proyecto fue método científico, combinado con modelos de ciclo de vida de Ingeniería de Software, como: cascada e incremental, como se muestra en la figura 1.

Se realizaron 3 incrementos, Diseño y desarrollo del prototipo virtual, desarrollo de la programación y la integración de todo el sistema de simulación y comunicación con el prototipo físico. 1er Incremento. Para el primer incremento se planteó el siguiente modelo de desarrollo.

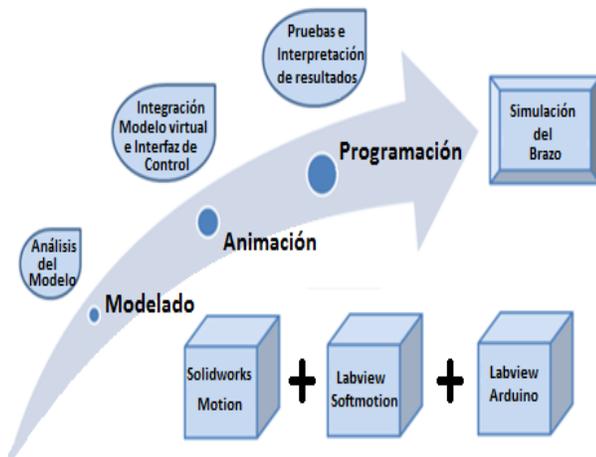


Figura 1 Modelo para el desarrollo del trabajo.

### Análisis del modelo

En el análisis del modelado se tomó en cuenta el tamaño, la forma, los grados de libertad del brazo, así como el material y el peso del mismo, para realizar los cálculos, y elegir el software que ayudaría a diseñarlo y simularlo, además de funcionar como una herramienta de control desde donde se manipulara el brazo del prototipo físico en tiempo real.

Por otra parte se analizó la manera de integrar software y/o herramientas compatibles entre un modelo virtual diseñado y desarrollado en CAD con un prototipo físico, para ser controlado con los movimientos en tiempo real del modelo virtual, basado en el análisis de diferentes software de modelado comercial incluyendo 3D, con herramientas de interfaces y/o periféricos y el modelo físico, así como electrónica embebida que soportara y reconociera estas herramientas de software.

La estructura del brazo de robot se constituye de 5 grados de libertad, con pinza o gripper como elemento terminal, y se utilizó Solidworks como CAD, Labview para el control e interface entre el modelo virtual, la electrónica embebida (Arduino) y el prototipo físico del brazo.

### Modelado 3D

En esta etapa se tomaron en cuenta las características del brazo de robot como dimensiones, grados de libertad, textura, materiales, derivadas del análisis, como se observa en la figura 2. El proceso de modelado involucra distintas técnicas propias del uso del software SolidWorks en general del CAD.

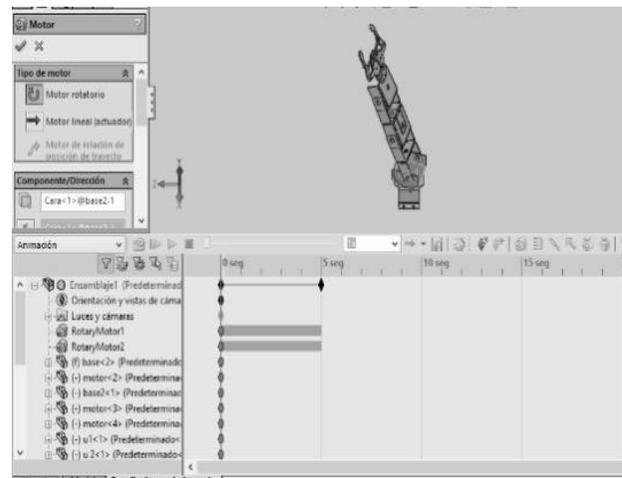


Figura 2 Modelado del prototipo virtual.

Para realizar los movimientos se utilizó la herramienta motion manager, que incluye: Animación: para el movimiento de ensamblajes; Movimiento básico: para simular los efectos de motores, resortes contacto y gravedad; finalmente Análisis de movimiento, para simular y analizar de forma precisa en un ensamblaje los efectos de elementos de movimiento, incluyendo fuerzas, resortes, amortiguadores y fricción. 2º Incremento, para el segundo incremento se comenzó con la animación y la programación del prototipo virtual.

## Animación

Una vez que se finalizó con el modelado del brazo de robot se comenzó con la fase de animación y movimiento de acuerdo al prototipo físico (ver figura 3). Para realizar esto, en SolidWorks es necesario el complemento SolidWorks Motion y SolidWorks Simulation, ya que estos complementos dan pauta para el análisis de movimiento.



Figura 3 Prototipo virtual a partir del brazo físico.

## Programación

Para controlar los movimientos del brazo de robot se realizó una interfaz gráfica que permite ingresar parámetros de movimiento como: articulación a mover, ángulo, distancia entre otros, para lograr una ágil manipulación del modelo virtual y de esta forma realizar las pruebas necesarias. Para esta tarea se utilizó como lenguaje de programación el lenguaje G ya que se integra nativamente con solidworks y compatible con Labview, sin embargo se deja abierta la posibilidad a utilizar el modelo 3D en algún otro lenguaje de programación o software de simulación como Microsoft Robotics. *Figura 4: Interface de solidworks y labview* 3er Incremento, En esta etapa se integró el modelo virtual y el prototipo físico, a través de solidworks, Labview y Arduino.

En la comunicación SolidWorks-Labview es necesario el complemento SolidWorks Motion y SolidWorks Simulation, para el análisis de movimiento.

Para Labview es necesario contar con el módulo Softmotion para configurar SolidWorks y realizar la interface entre solidworks y Labview. Una vez instaladas las herramientas complementarias, se desarrolla la programación Labview creando una nueva interfaz para tener el control del prototipo físico. Los perfiles de movimiento para la simulación con el ensamble de SolidWorks se crean usando los bloques funcionales de NI SoftMotion como se observa en la figura 4.

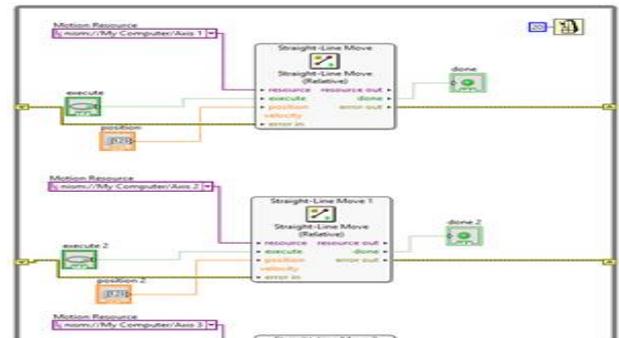


Figura 4 Interface de solidworks y labview.

Se continúa con la comunicación de las interfaces con el prototipo físico a través de arduino. Arduino es considerada como una plataforma de software y hardware de código abierto, que utiliza un microcontrolador Atmel, con entradas, salidas, analógicas y digitales, su programación se basa en el lenguaje de programación arduino (basado en wiring) [11]. Para la comunicación entre Labview y arduino fue necesaria la herramienta LIFA, herramienta gratuita que se descarga desde el servidor de NI (National Instruments).

Así mismo para la programación de la comunicación entre la tarjeta arduino y Labview fue necesario la herramienta NI VISA, con conexión a través del puerto USB, usando un protocolo de comunicación como se muestra en la figura 5.

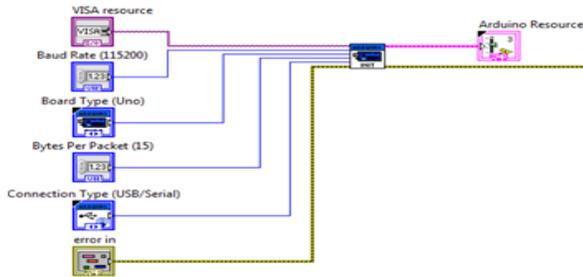


Figura 5 Protocolo de comunicación arduino

Finalmente se realizó la integración del proyecto entre las interfaces Solidworks-Labview y Labview-Arduino, como se muestra en la figura 6. Para tener el control completo desde el CAD, primero se simula los movimientos del brazo de robot de 5 grados de libertad, para asegurar que son los deseados por el usuario y evitar colisiones, después se envía la orden a través de Labview y ésta a su vez envía la señal a los servomotores del brazo de robot físico por medio de la tarjeta de adquisición arduino, emulando así los movimientos del prototipo virtual.

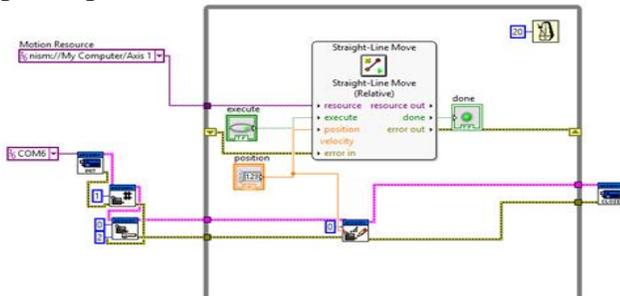


Figura 6 Integración de las interfaces.

Una vez asegurados los movimientos del brazo en la simulación, el brazo físico, sigue a los movimientos del prototipo virtual con un retardo de 37 a 40 ms, por cada articulación.

El retardo se debe a la respuesta de la ejecución de las instrucciones y a la velocidad de la computadora donde se instale el software, cabe hacer mención que todavía se sigue trabajando para disminuir el tiempo de retardo, los resultados presentado en este trabajo, son las primeras pruebas de funcionamiento del sistema.

Con este sistema, el alumno podrá tener acceso tanto al software como al hardware para poder modificarlo, de acuerdo a las necesidades de la materia de robótica, debido a que se trata de arquitectura abierta.

### Resultados

Los primeros resultados obtenidos en este trabajo de investigación fueron los esperados, primero porque se cumplió el objetivo de diseñar y desarrollar un sistema de control en tiempo real del prototipo físico de un brazo de robot de 5 GDL, a partir de un prototipo virtual desarrollado en CAD.

Segundo por desarrollar un sistema de control con arquitectura abierta que le permitiera al alumno desarrollar prácticas, donde pudiera programar su propio control o agregar un nuevo hardware o sustituir el que se utilizó en este trabajo, sin la limitante de una arquitectura cerrada, que le impidiera hacer modificaciones, limitándole su creatividad.

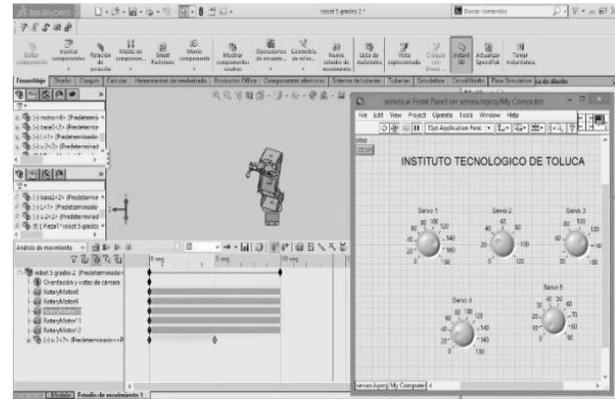


Figura 7 Interface de solidworks y labview.

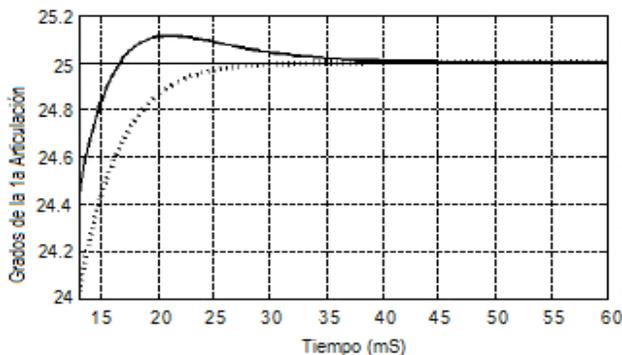
El primer resultado significativo obtenido fue la interfaz entre Solidworks y Labview, permitiendo obtener el movimiento de las articulaciones del prototipo virtual, como se muestra en la figura 7.

Otro resultado importante, fue el acoplamiento entre Solidworks, Labview y Arduino, para la manipulación del brazo de robot físico, a partir de los movimientos del brazo virtual, con movimientos similares con algún retardo entre ellos, como se ve en la figura 8.



**Figura 8** Manipulación del robot desde la interfaz.

Finalmente se realizaron pruebas de todo el sistema para medir el tiempo de respuesta de los movimientos de prototipo del brazo de robot físico, con respecto a los movimientos del prototipo virtual.



**Figura 9** Tiempo de respuesta de la articulación 1.

En la figura 9 se puede observar el resultado del tiempo de respuesta de la articulación 1 del brazo de robot para llegar al ángulo consigna de  $25^\circ$ , el tiempo de la simulación fue de 37 ms (línea punteada) y el tiempo real del movimiento del brazo físico hasta los  $25^\circ$  fue de 40 ms (línea física).

## Conclusiones

Se puede concluir que se cumplió el objetivo de obtener un sistema de control de un prototipo de un brazo de robot físico a partir de los movimientos de un prototipo de un brazo de robot virtual, a través de un software CAD.

Por otra parte se pudo comprobar que el tiempo de retardo, se puede reducir, modificando la programación, para disminuir los comandos y por consecuencia el tiempo, también es importante la velocidad del microprocesador de la computadora donde se ejecute el sistema.

Es importante verificar las versiones tanto del sistema operativo como de solidworks, porque aunque existe una versión de Labview de 64 bits, ésta no es compatible con los módulos de labview.

Finalmente utilizando la interfaz SolidWorks-Labview y Labview-Arduino, los desarrolladores de tecnología de pequeña escala tienen acceso a nuevas formas de control abierto para elaborar prototipos robóticos de menor costo y con una interfaz de usuario muy intuitiva.

## Referencias

Gowda, S., Jayaram, S., and Jayaram, U., 1999, "Architectures for Internet-based Collaborative Virtual Prototyping," Proceedings of the 1999 ASME Design Technical Conference and Computers in Engineering Conference, DETC99/CIE-9040, Las Vegas, Nevada, September 11-15.

Aiman Alabdo et al. "Arquitectura abierta de control visual directo sobre FPGA", Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia España, Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC), ISBN-13: 978-84-697-0589-6, 2014.

Mendoza Sánchez Eduardo Augusto, “Control de un Robot Manipulador”, Tesis Profesional, Marzo 2004, Universidad de las Américas, Puebla. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/mendoza\\_s\\_ea/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendoza_s_ea/capitulo2.pdf)

González Víctor R, “Curso 2007: Fundamentos de Robótica”, Centro de Formación del Profesorado e Innovación Educativa Valladolid II, Valladolid, España. Disponible en: [http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl\\_rob/robotica/sistema/morfologia.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm)

Duggal Vijay, "CADD Primer, A general guide to computer aided design and drafting CADD, CAD, CADD” Primer Education, EU, Oct. 2001 issue.

Rojas Lazo Oswaldo, Rojas Rojas Luis, "Diseño asistido por computador", Portal Revistas Peruanas, Perú, 2006.

Rafael Castillo Ortega, María del Rubí Salazar Amador, Milka del Carmen Acosta Enríquez, “Diseño de un laboratorio remoto de robots y procesos de manufactura industriales”, Revista EPISTEMUS de la Universidad de Sonora, Pág.: 48-56, UNISON No. 15, Año 7 2013, Sonora México. Recibido: 10 de Septiembre de 2013 Aceptado: 14 de Noviembre de 2013 ISSN: 2007-4530.

Eric Rodríguez y Uzziel Quiroz, “Ambiente de experimentación remota de robótica móvil”, Revista vínculos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, vol. 10 número 2, julio de 2013, pp. 455-460, Fecha de recepción: 30 de mayo de 2013 Fecha de aceptación: 15 de abril de 2013, Colombia 2013.

Teresita Barrios y María Bianca Marin, “Aprendizaje mixto a través de laboratorios virtuales, Signos Universitarios”: Revista de la Universidad del Salvador, Pág. 65-80, periodicidad trimestral, ISSN: 0326-3932, España.

Benoit saint-Moulin, “The 3D Software comparison” (Marzo 2011). Disponible en: [http://www.tdt3.com/articles\\_viewer.php?art\\_id=99](http://www.tdt3.com/articles_viewer.php?art_id=99) (artículo).

Arduino. (2016). ARDUINO. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>.

Manual LabVIEW Básico. AUTOR: National Instruments.

## Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado

CAMACHO, Aldo\*†, Aldo, PALACIOS, Luis, RAMÍREZ, Ignacio, VERA, Edgar, ANCHONDO, Lourdes

Recibido Abril 25, 2016; Aceptado Octubre 08, 2016

### Resumen

En las compañías relacionadas con la extracción de crudo y automovilística, muchos componentes están sujetos tanto a desgaste como ambientes corrosivos. El desarrollo de recubrimientos protectores en estas partes es de considerable interés para preservar su integridad estructural y por tanto la eficiencia. En la presente investigación, se realiza una comparación microestructural y mecánica entre las películas delgadas de carbón hidrogenado cuasidiamante (a-C:H o H-DLC) con la intención de reconocer la aplicabilidad en componentes de dichas industrias. La deposición se realizó con el proceso por deposición química de vapores por plasma mejorado (PECVD) sobre aceros API X65 y AISI 52100. La arquitectura de las películas está compuesta por una capa adherente de Cr, otra capa de WC y una última de H-DLC con un contenido de 20-40 % at. de H. La estructura de las películas se evaluó con espectroscopía Raman. Otras técnicas y aparatos como SEM, AFM, GDOES, Nano-indentación y scratch tests se emplearon para la caracterización microestructural y mecánica. Se investigó el comportamiento mecánico de las películas en términos de fricción y desgaste mediante los procedimientos de bola-sobre-placa y perno sobre placa. El revestimiento hidrogenado exhibió mejor comportamiento tribológico cuando se depositó sobre acero AISI 52100 que el que se depositó sobre el acero API X65.

**H-DLC, tribología, acero API X65, acero AISI 52100**

### Abstract

In oil and gas and motor companies many components are subjected to wear and corrosive environments. The development of protective coatings on these parts is of high interest to preserve its structural integrity and so its performance. In the present work, a structural and mechanical comparison of a hydrogenated diamond-like carbon (a-C:H or H-DLC) coating is carried out to acknowledge if one or both could be candidates to be used in such industries. The coatings were deposited by the plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) methodology on API X65 and AISI 52100 steels. The films included an adherent Cr interlayer followed by the DLC coating, namely, Cr/WC/a-C:H, with 20-40 at.% of H content. A Raman spectrometry was used to characterise the bonding structure of the H-DLC films. SEM, AFM, GDOES, Nano-indentation and scratch testing were also used to evaluate the microstructural and mechanical features. The mechanical behaviour of the coatings in terms of the friction and wear was assessed using a ball-on-plate and pin-on-plate methodologies. The H-DLC coating exhibited a better tribological performance when deposited on AISI 52100 than that film when deposited on API X65.

**H-DLC, Si-DLC, tribology, API X65, AISI 52100**

**Citación:** CAMACHO, Aldo, PALACIOS, Luis, RAMÍREZ, Ignacio, VERA, Edgar, ANCHONDO, Lourdes. Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9: 61-66

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: aldocamacho\_17@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En lo que respecta a equipos rotatorios industriales, dada la naturaleza de los mismos, se pueden presentar diversos tipos de fallas en estos, como es el caso de desalineamiento, desbalance, pandeo, presencia de fisuras, por mencionar algunas [1]. Las consecuencias de fallas no previstas en equipos rotatorios, se pueden clasificar en accidentes o pérdidas económicas, dada la necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento, diseño y fabricación, la detección de fallas en equipos es un factor fundamental para lograr este objetivo. Conocer las características y los efectos de las fisuras permitirá realizar modelos de ejes más precisos, con lo cual se pueda obtener datos más ciertos sobre los parámetros de daño, la confiabilidad y el ciclo de vida del producto.

Las máquinas con ejes fisurados serán cada vez más frecuentes en la industria nacional conforme los lapsos entre mantenimientos mayores del equipo rotatorio se incrementen.

Afortunadamente en las turbomáquinas una fisura puede crecer de manera estable, sin explotar súbita y catastróficamente, gracias a las altas temperaturas de operación, sin embargo, en equipo que opera a temperatura ambiente, una fisura se propaga más rápidamente

El problema que se presenta en un eje de turbo-maquinaria es la presencia de fisuras en este, dado que este tipo de fisuras puede generar daños irreparables y cuantiosos. Dentro de las causas principales que generan las fisuras se menciona la aparición de la ortotropía en la microestructura del eje. Sobre todo, considerando que resulta casi imposible controlar los procesos de fabricación para lograr aceros totalmente homogéneos. Otro de los aspectos que influye en la generación de fisuras son los desbalances (estáticos o dinámicos).

Cuando la masa se concentra en un punto, por pequeña que sea esta concentración, la fuerza tangencial a la que se somete el eje es muy elevada [2]. Esta fuerza será un múltiplo escalar del vector de aceleración, por lo que la probabilidad de que se presente una fisura aumenta en función de los ciclos de trabajo a los que se somete el material.

Se presentan resultados orientados a cuantificar y caracterizar el cambio en la respuesta vibratoria del eje a medida que la fisura incrementa su tamaño, es importante mencionar que adicionalmente se ha obtenido la variación en la rigidez del rotor producida por la evolución de este mismo fenómeno.

## Desarrollo

En esta sección se presentará el desarrollo de los modelos matemáticos que servirán para caracterizar el comportamiento del sistema estudiado, de manera que a partir de dichos modelos se puedan realizar los programas computacionales necesarios para efectuar los cálculos y predicciones.

El estudio se basará en el modelo de "Rotor Jefcott". Este consiste en un modelo de rotor básico que posee las características fundamentales de los modelos de los rotores más complejos en las respuestas al desequilibrio [4].  
Fisura

Se sabe que cuando en un rotor de una máquina se genera una fisura, la forma de esta es impredecible. Sin embargo, la existencia de una fisura en un eje rotatorio necesita ser modelada para ser considerada en las ecuaciones de movimiento del sistema en estudio.

Fundamentalmente se trabaja con dos tipos de fisuras. Las de frente plano, o recto, y las de frente elíptico. La mayoría de autores trabaja con fisuras de frente de recto.

Aunque hoy en día se sabe que la realidad no se corresponde exactamente con esta hipótesis, es una buena aproximación. En este estudio se utilizarán fisuras rectas .

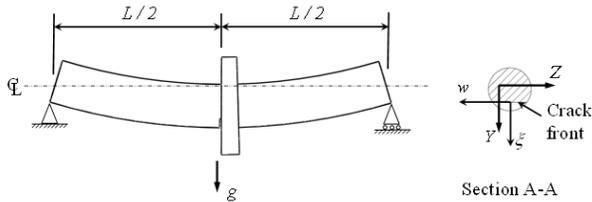


Figura 1 Sistema de rotor y la sección transversal modelo de fisura.

**Modelo de Mayes y Davies**

Mayes y Davies propusieron una función cosenoidal que representa muy bien el comportamiento de fisuras profundas se muestra en la figura 1. Con esta función se logra evitar el cambio brusco durante el proceso de apertura y cierre de la fisura, obteniendo una transición más suave, tal como ocurre en la realidad, sobre todo para fisuras profundas. La función propuesta por Mayer y Davies se presenta a continuación:

$$G(\theta) = \frac{1+\cos \theta}{2} \tag{1}$$

**Modelo analítico**

Para modelar el comportamiento de un eje fisurado se utiliza el razonamiento expuesto en el punto anterior, teniendo en cuenta que desde el momento en el que aparece la fisura, la flexibilidad del eje ya no es única. Esta tomará diferentes valores dependiendo de la posición relativa del eje en su movimiento de rotación.

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + (K_{\xi} + K_{\eta})\frac{Y}{2} + \frac{G}{2}\{(K_{\xi} - K_{\eta}) \cos 2\theta - 2k_{\xi\eta} \sin 2\theta\}Y + \frac{G}{2}\{(K_{\xi} - K_{\eta}) \sin 2\theta - 2k_{\xi\eta} \cos 2\theta\}Z = me\omega^2 \cos(\theta + \beta) - mg \tag{2}$$

$$m\ddot{Z} + c\dot{Z} + (K_{\xi} + K_{\eta})\frac{Z}{2} + \frac{G}{2}\{(K_{\xi} - K_{\eta}) \cos 2\theta - 2k_{\xi\eta} \sin 2\theta\}Z + \frac{G}{2}\{(K_{\xi} - K_{\eta}) \sin 2\theta + 2k_{\xi\eta} \cos 2\theta\}Y = me\omega^2 \cos(\theta + \beta) \tag{3}$$

**Resultados y análisis**

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en los diferentes casos analizados. Para resolverlos, se ha realizado un programa basado en la herramienta informática MatLab, que resuelve las ecuaciones de movimiento, proporcionando los desplazamientos del centro del eje, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior.

**Comparación de órbitas**

De esta manera se han resuelto casos diferentes, para distintas condiciones de fisura. El programa desarrollado tarda alrededor de medio minuto (dependiendo del equipo informático que lo haga) en resolver cada uno de ellos. Para los casos particulares que requieren un estudio más a fondo. Estos casos se verán más adelante. En la siguiente tabla se muestran los parámetros físicos y geométricos que caracterizan el sistema en estudio.

Longitud del eje	0.69 m
Masa	1.495 Kg
Radio del eje	6.35e-3 m
Excentricidad de desbalance	30e-6 m
Modulo de Young	210e9 Pa
Amortiguamiento Adimensional	0.05
Profundidad de la fisura	a/D= 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
Gravedad	9.81 m/s <sup>2</sup>

Tabla 1 Geometría y parámetros físicos del sistema.

Fue posible cuantificar la depreciación de la rigidez que sufre un eje cuando tiene una fisura transversal. se muestra la tendencia de la rigidez del eje fisurado conforme se aumenta el tamaño de la fisura.

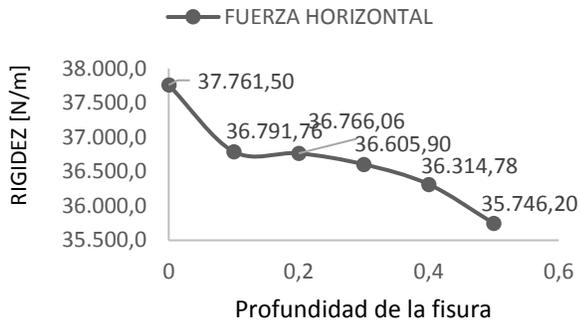


Figura 2 Respuesta hotizontal de la rigidez de eje fisurado.

### Fuerza vertical

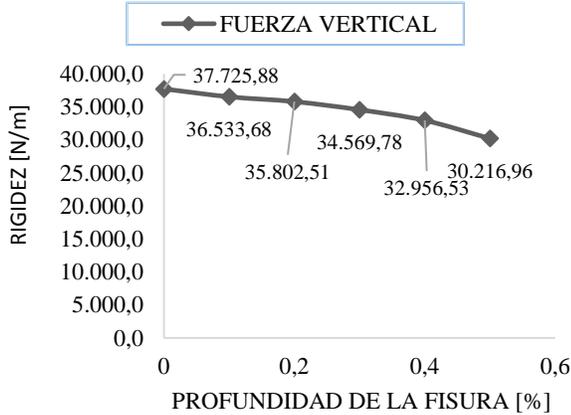


Figura 3 Respuesta vertical de la rigidez de eje fisurado.

La rigidez del eje aumenta no-linealmente con la profundidad de la grieta, mientras que las amplitudes de las resonancias locales aumentan más drásticamente con tal profundidad de grieta; por ejemplo, variando la profundidad de la grieta dos veces (25% a 50%) aumenta el cambio de rigidez asimensional más de cuatro veces, mientras que las amplitudes a la mitad de la resonancia crítica llegan a ser 5.4 veces más grandes.

Lo anterior explica porqué en operación en campo donde se monitorean las vibraciones de los cojinetes, la presencia de una grieta generalmente llega a ser clara solamente después de que alcanza del 30% al 40% del diámetro del eje.

En las siguientes graficas se presenta un caso donde haciendo uso de los parámetros de la configuración y manteniendo fija la velocidad de giro del rotora se procede a variar la magnitud del desbalance residual. En este análisis se puede observar la influencia de la magnitud del desbalance residual en la respuesta vibratoria de un rotor agrietado; además, aunque el caso cuando el porcentaje de fisura es 0% en la práctica representaría un caso irreal este permite la caracterización de la respuesta vibratoria debida a la sola presencia de la grieta.

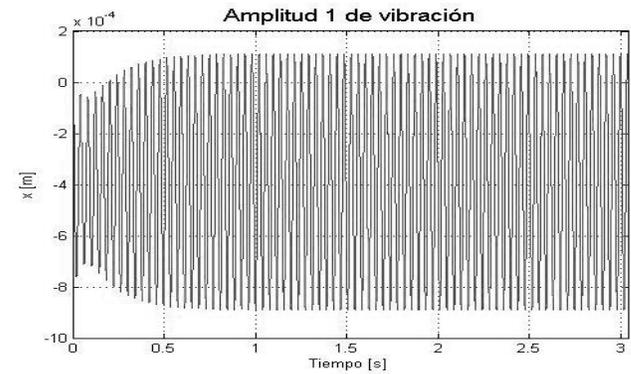


Figura 4 Respuesta amplitud de vibración a 10% de fisura.

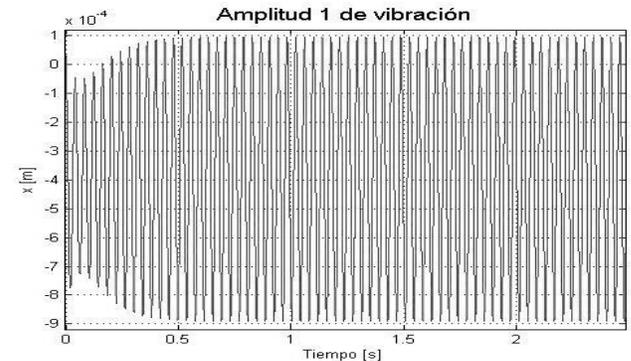
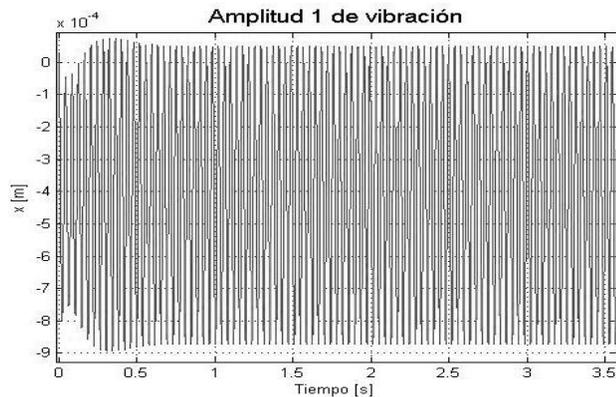
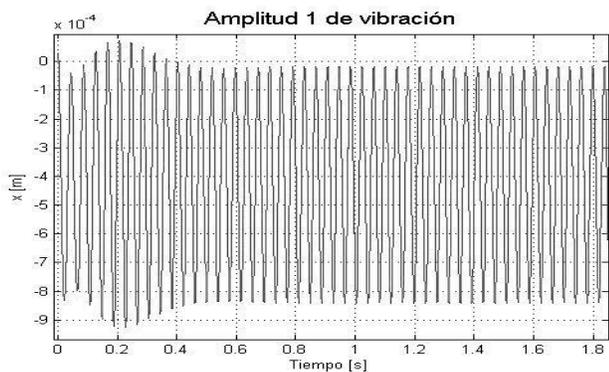


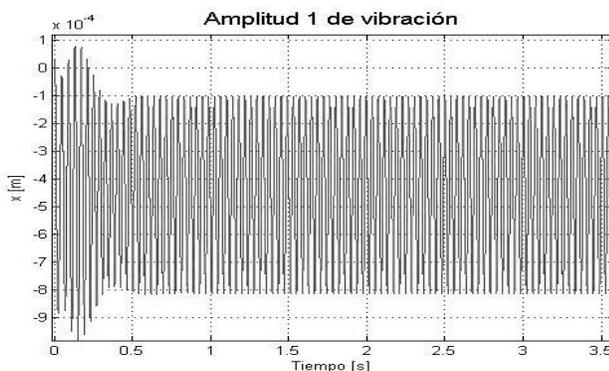
Figura 5 Respuesta amplitud de vibración a 20% de fisura.



**Figura 6** Respuesta amplitud de vibración a 30% de fisura.



**Figura 7** Respuesta amplitud de vibración a 40% de fisura.



**Figura 8** Respuesta amplitud de vibración a 50% de fisura.

Se presentan y estudio las graficas de la respuesta de amplitud de vibración contra el tiempo en operación ante diferentes profundidades de la grieta.

Por otro lado, se ha constatado que, al aumentar la profundidad de la fisura aumenta también el tamaño de la amplitud de vibración. Este aumento de tamaño es debido a que, al crecer la fisura, disminuye la sección resistente del eje, disminuyendo a su vez la rigidez del mismo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Pachuca y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Instituto de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

### Conclusiones

Se ha desarrollado con éxito el programa de cómputo que resuelve las ecuaciones de movimiento de un rotor fisurado y desequilibrado. De los resultados obtenidos al aplicar dicho programa a casos reales se pueden extraer información que permita una mejor operación de maquinaria rotatoria.

Ha sido posible cuantificar la disminución de la rigidez que sufre un eje cuando tiene una fisura transversal. Además se muestra la tendencia de la rigidez del eje fisurado conforme se incrementa el tamaño de la fisura.

Por otro lado, se ha constatado que, al aumentar la profundidad de la fisura aumenta también el tamaño de amplitud de vibración. Este aumento de tamaño es debido a que, al crecer la fisura disminuye la sección resistente del eje, disminuyendo a su vez la rigidez del mismo. Este efecto está relacionado con el desplazamiento de las frecuencias naturales del sistema.

**Referencias**

Jean- Jacques Sinou., “Effects of a crack on the stability of a non-linear rotor system”, *International Journal of a Non-Linear Mechanics* 42 (2007), pp. 959-972.

Gómez-Mancilla, J.C., García-Illescas, R., “Vibration Stability and Experimental Analysis of Cracked Shafts”, 9th. Int. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, ISROMAC-9, Hawaii, USA, February 2002.

Zambrano-Reyes A., “Estudio Numérico-Analítico de la Respuesta Vibratoria de Ejes Fisurados”, Tesis de Maestría en Ciencias, SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México, 2005, pp.127-135.

Gómez-Mancilla, J., García Illescas, R., “Analysis in the Characterizacion of the Dynamic Behaviour of Cracked Rotating Shafts”, 6th. International Conference on Rotor Dynamics, IFToMM, Sydney, Australia, Oct. 2002.

## Prueba de nodos CAN por medio de un SoC Cyclone V

MORALES, Salvador\*†, CASTAÑEDA, Josefina, MINO, Gerardo

Recibido Abril 07, 2016; Aceptado Octubre 17, 2016

### Resumen

La red controladora de área y su protocolo surge de la necesidad de compartir información entre distintos sistemas electrónicos ahorrando el mayor número de cables posible. En un principio el protocolo CAN fue utilizado en la industria automotriz, pero a través de los años su uso se diversificó haciendo del protocolo un estándar ampliamente aceptado. Cuando se realiza el diseño de una red de nodos CAN el diseñador debe poseer una herramienta con la cual probar de una manera fiable el funcionamiento de cada nodo conectado a la red. En este trabajo se propone el uso de una tarjeta de desarrollo con un SoC Cyclone V, mediante la cual se realiza el envío de tramas CAN por medio de un programa corriendo bajo Linux. El SoC Cyclone V se divide en dos partes; el FPGA de fábrica y el llamado Hard Processor System (HPS) el cual integra un procesador de doble núcleo ARM-A9 bajo el cual se puede correr Linux y periféricos que tienen la posibilidad de interactuar directamente con este. Entre los periféricos disponibles para el uso mediante el HPS se encuentran dos controladores CAN, de los cuales uno es utilizado para el desarrollo de este trabajo.

**SoC Cyclone V, Nodos CAN, Linux.**

### Abstract

The controller area network and its protocol arises from the need of sharing information between the different electronic systems and saving the maximum number of wires. At the beginning the CAN protocol was used by the automotive industry, but through the years its use was diversified making it a standard widely accepted. When a network of CAN nodes is done the designer needs to have a tool with which to test in a reliable way the performance of each node connected to the network. In this paper the use of a development board with a SoC Cyclone V is proposed to realize the sending of CAN frames through a program running under Linux. The SoC Cyclone V is divided in two parts, the FPGA fabric and the Hard Processor System (HPS) which integrates a dual core ARM-A9 processor where you can run a Linux operating system, it also contains peripherals that can interact directly with the HPS. Among the peripherals available to use there are two CAN controllers and one of them is used for the development of this work.

**SoC Cyclone V, CAN Nodes, Linux.**

**Citación:** MORALES, Salvador, CASTAÑEDA, Josefina, MINO, Gerardo. Prueba de nodos CAN por medio de un SoC Cyclone V. Revista Tecnología e Innovación 2016. 3-9 : 67-75

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: [salvador.moralesc@alumno.buap.mx](mailto:salvador.moralesc@alumno.buap.mx))

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad existe un gran número de protocolos de comunicación, los cuales surgen debido a la necesidad de transmitir información de una manera fiable y segura, tal es el caso del protocolo CAN, el cual es uno de los protocolos más utilizados principalmente en la industria automotriz, ya que fue creado con el propósito de reducir el número de cables que sirven como medio de comunicación entre las muchas unidades de control electrónico que existen en el automóvil, con el paso del tiempo ha sido adoptado ampliamente en la industria y en otras ramas.

El protocolo CAN, es utilizado en redes de topología tipo BUS, denominadas en general redes CAN. En la figura 1 se muestra el esquema general de una red CAN de tres nodos.

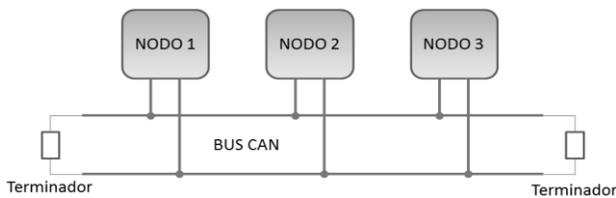


Figura 1 Red CAN.

Como se puede ver en la figura 1, hay tres nodos conectados al bus CAN, lo cual les otorga la posibilidad de enviar información a través del bus, de acuerdo a las reglas establecidas por el protocolo CAN. Dicha información es enviada en forma de tramas de datos seriales, las cuales están divididas en campos bien definidos.

El diseñador de una red CAN define qué información será transmitida por cada nodo y la prioridad que cada nodo tendrá para acceder al bus, por ello es necesario que conozca todos y cada uno de los campos de la trama de datos del protocolo.

Al llevar a cabo el diseño de una red de nodos CAN, es importante poseer una herramienta con la cual probar de una manera fiable, el funcionamiento de cada nodo conectado a la red.

Tramas de datos CAN

El CAN soporta dos diferentes formatos de trama, los cuales están especificados en el CAN 2.0 A o estándar y el CAN 2.0 B o extendido. La diferencia más importante entre estos dos formatos es la longitud del identificador, el cual es de longitud de 11 bits para el CAN 2.0 A y de 29 bits para el 2.0 B, ambos formatos son compatibles entre sí y pueden ser utilizados en una misma red.

La trama de datos estándar se divide en diferentes campos de longitud específica como se muestra en la figura 2.

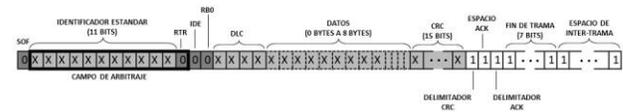


Figura 2 Trama de datos CAN 2.0 A.

Comienza con el bit de inicio de trama (SOF) en estado dominante. El SOF es seguido por el campo de arbitraje, el cual consta de 12 bits; el identificador de 11 bits y el bit de solicitud de transmisión remota (RTR).

En el campo de arbitraje se determina la prioridad del mensaje de acuerdo a una regla simple, “el valor numérico más bajo tiene la mayor prioridad”. Si el bus se encuentra desocupado (en estado recesivo) y los mensajes están disponibles para ser enviados, cada nodo es libre de iniciar el envío de su mensaje. Cuando varios nodos comienzan a transmitir simultáneamente, el sistema responde aplicando un arbitraje para resolver los conflictos resultantes sobre el acceso al bus.

Después del campo de arbitraje sigue el campo de control. En una trama CAN estándar, el campo de control comprende el bit IDE (bit de extensión de identificador), el cual siempre es enviado como dominante, seguido por un bit reservado para extensiones futuras, el cual es enviado como recesivo (RB0), y el campo de código de longitud de datos (DLC); formado por cuatro bits que admite valores del cero al ocho. Debido a que este campo es de cuatro bits se pueden indicar valores más grandes a ocho. Si el valor del DLC es mayor que ocho se asume que la trama contiene ocho bytes.

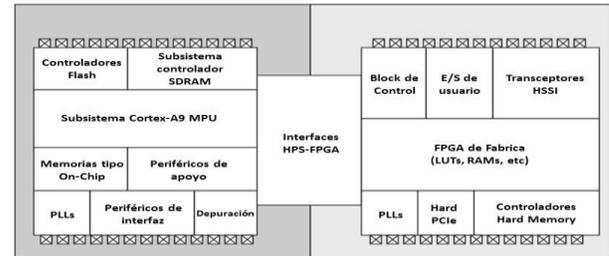
Después sigue el campo de datos, el cual contiene información contenida entre cero y ocho bytes definido por el DLC.

Después sigue el campo de comprobación de redundancia cíclica (CRC); contiene un checksum de quince bits. El bit dieciséis en este campo es recesivo y cierra el checksum. El siguiente campo es el de reconocimiento, el cual no es colocado por el emisor de la trama, sino por un nodo diferente, que es capaz de reconocer la recepción de la trama directamente después del campo de datos. El espacio ACK también se transmite recesivamente por el emisor y es sobrescrito como dominante por un receptor hasta que el mensaje sea recibido correctamente. Solo así es confirmada la correcta recepción.

El campo de fin de trama, marca el final del mensaje y comprende siete bits recesivos. Después sigue un espacio de inter trama, el cual consta de una sucesión de tres bits recesivos para separar los mensajes sucesivos.

### SoC Cyclone V

El SoC (sistema en un chip) Cyclone V es un dispositivo que consiste de dos partes distintas, una porción HPS (Hard processor system) y una porción FPGA.



**Figura 3** Diagrama a bloques del dispositivo Altera SoC FPGA.

En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques de un SoC Altera, cuya principal característica es poseer un procesador ARM-A9, ya sea de núcleo único o de doble núcleo.

### Mapa de direcciones del HPS

El mapa de direcciones del HPS especifica las direcciones de los esclavos, tal y como las ven el Microprocesador (MPU) y otros maestros en el HPS. La interfaz de cada periférico esclavo, tiene un rango de dirección dedicado en la región de periféricos. En la tabla 1 se muestra una lista de algunos de los periféricos del HPS.

IDENTIFICADOR DE ESCLAVO	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN BASE	TAMAÑO
LWFGASLAVES	Esclavos FPGA accedidos a través del puente lightweight HPS-FPGA	0xFF200000	2 MB
EMAC 0	Ethernet Mac 0	0xFF700000	8 KB
EMAC 1	Ethernet Mac 1	0xFF702000	8 KB
SDMMC	SD/MMC	0xFF704000	4 KB
GPIO0	GPIO 0	0xFF708000	4 KB
GPIO1	GPIO 1	0xFF709000	4 KB
GPIO2	GPIO 2	0xFF70A000	4 KB
USB0	Registros del controlador USB 2.0 OTG 0	0xFFB00000	256 KB
USB1	Registros del controlador USB 2.0 OTG 1	0xFFB40000	256 KB
CAN0	Registros del controlador CAN 0	0xFFC00000	4 KB
CAN1	Registros del controlador CAN 1	0xFFC01000	4 KB
UART0	UART 0	0xFFC02000	4 KB
UART1	UART 1	0xFFC03000	4 KB

**Tabla 1** Mapa de direcciones de la región de periféricos del HPS.

El modelo de programación para acceder a los periféricos del HPS de la tabla 1, es mediante la dirección base asignada a cada periférico, en la cual un cierto número de registros puede ser encontrado, de tal modo que se puede leer y escribir a un conjunto de estos registros, para modificar el comportamiento del periférico.

### Controlador CAN

El HPS provee dos controladores CAN, para comunicación serial con el microprocesador ARM. Los controladores CAN cumplen con el ISO 11898-1. Estos controladores pueden almacenar hasta 128 mensajes, el acceso a estos mensajes por parte del procesador, es llevado a cabo a través de la interfaz de mensaje de la RAM. El controlador provee distintos tipos de modos de prueba, los cuales son utilizados principalmente para pruebas de funcionamiento del propio controlador.

#### Modo Silencioso

En modo Silencioso, el controlador CAN es capaz de recibir tramas de datos válidos, pero mantiene el pin CAN\_TXD en alto.

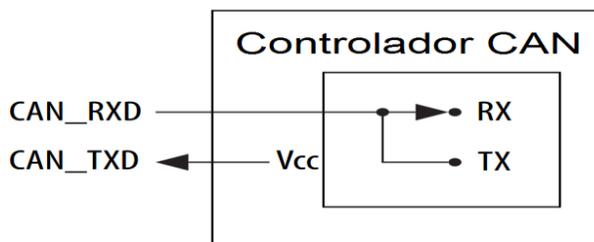


Figura 4 Controlador CAN en modo silencioso.

#### Modo Loopback

En modo Loopback, el controlador CAN trata sus propios mensajes transmitidos como mensajes recibidos y los guarda.

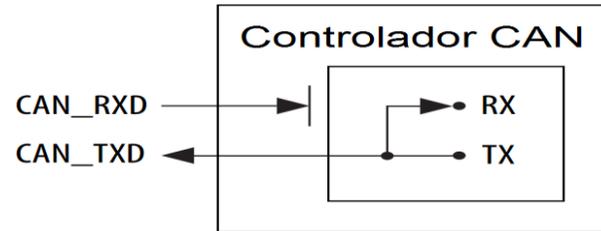


Figura 5 Controlador CAN en modo Loopback.

#### Modo Combinado

Es posible poner el controlador CAN en modo combinado; Loopback y Silencioso. El modo combinado puede ser utilizado para hacer pruebas del hardware del CAN, sin afectar otros dispositivos conectados al bus CAN. En este modo, el pin CAN\_RXD es desconectado del controlador CAN y el pin CAN\_TXD es mantenido en alto.

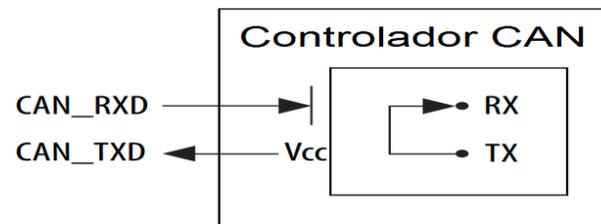
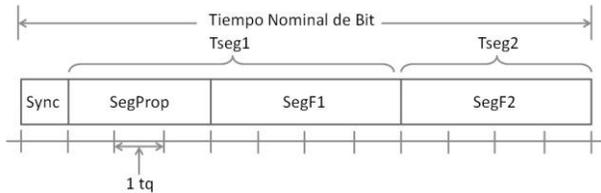


Figura 6 Controlador CAN en modo combinado.

Cuando se realiza un proyecto con nodos CAN se necesitan algunas configuraciones de hardware, tales como son las conversiones de interfaz. Estas incluyen las conversiones entre niveles TTL/CMOS a los niveles de transmisión para todos los bits de mensaje y las conexiones de hardware, por medio de conectores especiales. En el caso de llevar a cabo la implementación física entre dos o más nodos CAN, es necesario cumplir con los requerimientos antes mencionados, es por eso que se optó por utilizar el modo combinado, ya que se puede desarrollar el software que gestiona el funcionamiento del controlador sin la necesidad de agregar hardware extra.

## Tiempo de bit nominal

Para poder transmitir y recibir satisfactoriamente objetos de mensaje a través del bus CAN, el proceso de transmisión y recepción debe ser controlado y sincronizado para hacer que el transmisor y el receptor trabajen en la misma base de tiempo para reducir posibles errores. Por tanto el tiempo de bit nominal (TNB=1/(bit\_rate)), debe ser evaluado lo más exacto como sea posible y asegurar que cada bit pueda ser transmitido y recibido en un rango de tiempo que pueda ser tolerado por el bus CAN. Los parámetros de tiempo de cada TNB pueden ser configurados individualmente para cada nodo, creando una misma tasa de bit aun cuando los nodos CAN puedan utilizar diferentes fuentes de reloj. En la figura 7 se muestra la configuración del TNB.



**Figura 7** Configuración estándar de tiempo de bit.

Cada periodo de TNB está compuesto de cuatro segmentos, los cuales consisten de un número específico y programable de tiempo quanta ( $t_q$ ). La longitud del  $t_q$ , la cual es la unidad básica de tiempo del TNB, se define en términos del reloj de entrada del controlador ( $\lfloor \text{clk} \rfloor_{\text{CAN}}$ ) y la tasa de transferencia del preescaler (BRP).

$$t_q = \text{BRP} / \text{clk}_{\text{CAN}} \quad (1)$$

Estos cuatro segmentos, son utilizados para hacer que el tiempo de bit se ajuste automáticamente al tiempo de bit normal, al agregar o remover algunos números de  $t_q$  para hacerlos coincidir con el tiempo de bit real y prevenir errores de tiempo.

Causados por las variaciones en la temperatura y el ambiente. El número total de  $t_q$  de los cuales está conformado el TNB se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Num}_{t_q} = \text{TNB} / t_q \quad (2)$$

El segmento de sincronización no es programable y está fijado a  $1t_q$ .

El Segmento de Propagación (SegProp) se define como.

$$t_{\text{Prop}} = 2(t_{\text{bus}} + t_{\text{TX}} + t_{\text{RX}}) \quad (3)$$

Donde  $t_{\text{bus}}$  es el tiempo de retardo de propagación a lo largo la longitud más grande del bus entre dos nodos,  $t_{\text{TX}}$  es el retardo de propagación de la parte transmisora de la interfaz física y  $t_{\text{RX}}$  es de la parte receptora.

Entonces se tiene que el número de  $t_q$  que contiene este segmento se calcula como:

$$\text{SegProp} = \text{round\_up}(t_{\text{SegProp}} / t_q) \quad (4)$$

Los dos segmentos de fase, SegF1 y SegF2 se obtienen de la siguiente ecuación:

$$\text{SegF1} + \text{SegF2} = \text{Num}_{t_q} - \text{SegProp} - 1 \quad (5)$$

Si el resultado es 3 entonces:  $\text{SegF1} = 1$  y  $\text{SegF2} = 2$ .

El ancho de salto de sincronización (SJW) ajusta el reloj de bit como sea necesario entre 1 y 4  $t_q$  (como sea configurado) para mantener la sincronización con el mensaje transmitido.

El SJW se elige como el menor de 4 y SegF1.

A continuación se listan los requerimientos que se deben cumplir al término de los cálculos.

$$\begin{aligned}
 SegProp + SegF1 &\geq SegF2 \\
 SegProp + SegF1 &\geq t_{Prop} \\
 SegF2 &> SJW
 \end{aligned}$$

### Inicialización del controlador CAN

Para inicializar el controlador CAN, el microprocesador debe programar el registro de tiempo de bit del CAN (CBT) y configurar los objetos de mensaje que serán utilizados para la comunicación CAN, previo a la configuración de los objetos de mensaje es necesario inicializar la RAM de mensaje.

Una vez que el controlador CAN es inicializado, se sincroniza a si mismo con el bus CAN y comienza la transferencia de mensajes.

Los mensajes recibidos son almacenados con sus objetos de mensaje apropiados. El procesador central puede leer o actualizar cada mensaje en cualquier momento, utilizando los registros de interfaz de mensaje.

### Archivo de imagen Linux

Se utilizó un archivo de imagen provisto por Altera, el cual contiene todos los elementos necesarios para correr Linux en la tarjeta de desarrollo.

Dicho archivo de imagen es vaciado en una tarjeta micro SD.

Es primordial generar un preloader y un device tree de acuerdo a las necesidades del proyecto y reemplazar los existentes en la tarjeta micro SD por medio de las herramientas de altera como se ve en la figura 8.

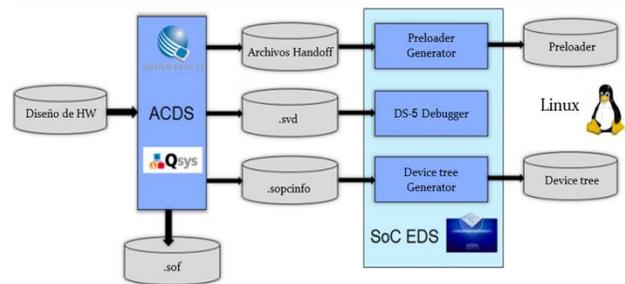


Figura 8 Esquema de diseño.

### Configuración del HPS en Qsys

Como primer paso, fue necesario configurar adecuadamente el HPS mediante Qsys.

Como se puede ver en la figura 9 se utilizó el controlador CAN1, el cual comparte pines con uno de los periféricos SPI y las entradas/salidas de propósito general 59 y 60.

CAN Controllers				
CAN0 pin multiplexing:	Unused			
CAN0 mode:	N/A			
CAN1 pin multiplexing:	HPS I/O Set 1			
CAN1 mode:	CAN			
Trace Port Interface Unit				
Peripherals Max Table				
TRACE_D4	CAN1_RX (Swd)	SPI0_CLK (Swd)	TRACE_D4 (Swd)	GPIO3
TRACE_D5	CAN1_TX (Swd)	SPI0_MOSI (Swd)	TRACE_D5 (Swd)	GPIO4
TRACE_D6	GPIO_S0A (Swd)	SPI0_SS0 (Swd)	TRACE_D6 (Swd)	GPIO5
TRACE_D7	GPIO_S0L (Swd)	SPI0_MISO (Swd)	TRACE_D7 (Swd)	GPIO6
SPI00_CLK	UART0_CTR (Swd) (Set1)	GPIO_S0A (Swd)	SPI00_CLK (Swd)	GPIO7
SPI00_MOSI	UART0_RTS (Swd) (Set1)	GPIO_S0L (Swd)	SPI00_MOSI (Swd)	GPIO8
SPI00_MISO	CAN0_RX (Set1)	SPI00_MISO (Swd)	SPI00_MISO (Swd)	GPIO9
SPI00_SS0	CAN0_TX (Set1)	SPI00_SS0 (Swd)	SPI00_SS0 (Swd)	GPIO00

Figura 9 Configuración del controlador CAN.

Una vez que se realizó la configuración mediante Qsys, se procedió a generar el código Verilog que describe estas configuraciones, además se instanciaron los periféricos utilizados a través de Quartus II.

```

.hps_0_hps_io_hps_io_can1_inst_RX    (hps_0_hps_io_hps_io_can1_inst_RX),
.hps_0_hps_io_hps_io_can1_inst_TX    (hps_0_hps_io_hps_io_can1_inst_TX),

```

Figura 10 Instanciación del controlador CAN.

Debido a que se utiliza una tarjeta de desarrollo prediseñada, cuenta con la limitante de que esta solo permite el acceso a uno de los controladores CAN, en este caso el CAN1, debido a que los pines dedicados al CAN0 son utilizados para otros dispositivos conectados a la tarjeta y es imposible el acceso a ellos.

El controlador CAN1 comparte pines con uno de los periféricos SPI de los cuales un par de ellos pertenece a un conector denominado LTC, lo cual brinda la posibilidad de comunicar el CAN1 al exterior. En la figura 11 se muestra con más detalle el multiplexaje de dichos pines.

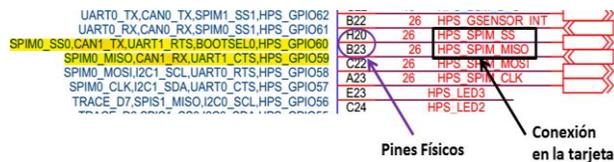


Figura 11 Pines compartidos del CAN1.

### Generación del Preloader

El siguiente paso fue compilar el proyecto, lo cual da como resultado los archivos necesarios para la generación del preloader. En la figura 12 se muestra el diagrama de flujo para la configuración y generación del preloader.

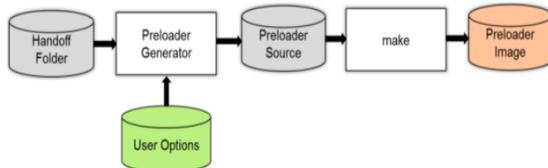


Figura 12 Diagrama de flujo para la generación del preloader.

Por medio de la herramienta EDS se ejecutó el editor bsp (board-suport-package) para la generación del preloader, el cual tiene como entradas los archivos del folder Handoff creado a través de Quartus II y las opciones de usuario, con las que se indica en donde se encuentran los archivos Handoff, el tipo de sistema operativo y la ruta donde se generan los archivos del preloader.

Entre los archivos que se generaron durante esta etapa, se encuentran algunos archivos de cabecera, en donde se indican los periféricos del HPS habilitados, como se muestra en la figura 13.

```

22 | #define CONFIG_HPS_CAN0 (0)
23 | #define CONFIG_HPS_CAN1 (1)

```

Figura 13 Archivo de cabecera generado.

### Generación del device tree

El device tree es utilizado por el Kernel de Linux para determinar que driver de dispositivo cargar a la hora del inicio, por tanto fue necesario la modificación del device tree provisto por altera, para dar de alta el CAN1. En la figura 14 se muestra el diagrama de flujo para la generación del device tree.

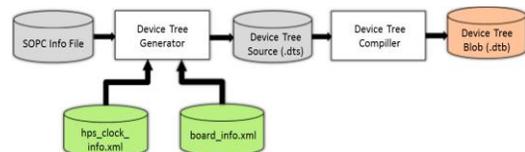


Figura 14 Diagrama de flujo para la generación del device tree.

Al momento de la compilación del proyecto se genera el device tree source, por tanto después de la compilación se procedió a la generación del device tree blob (DTB), el cual es la versión binaria del device tree source. Una vez generado DTB, se colocó directamente en la partición fat de la micro SD, junto con el archivo de configuración *rbf*, el cual contiene la información necesaria para configurar la tarjeta de desarrollo, lo cual es equivalente a cargar un archivo *sof* mediante Quartus II programmer.

```

can1: can1@ffc01000 {
    compatible = "bosch,d_can";
    reg = <0xffc01000 0x1000>;
    interrupts = <0 135 4>, <0 136 4>, <0 137 4>, <0 138 4>;
    clocks = <0x18>;
    status = "okay";
};

```

Figura 15 Device tree generado.

### Cálculo de los parámetros del tiempo de bit

A continuación se muestran los parámetros utilizados para el cálculo del tiempo de bit:

Parámetro	Valor
CLKCAN	100 MHz
Tasa de bit	1 MHz
Longitud del bus	40 mts
Tiempo de propagación del bus	5 ns/m
Retardo de transmisión	50 ns
Retardo de recepción	80 ns

Tabla 2 Parámetros para cálculo del tiempo de bit.

A continuación se muestran los parámetros utilizados para el cálculo del tiempo de bit:

Utilizando la ecuación (3) se tiene:

$$t_{segProp} = 2(50ns + 80ns + 200ns) = 660ns$$

$$t_q = BRP / clk_{CAN}, \quad \text{tomando } BRP = 9$$

$$t_q = 7 / 100MHz = 70ns$$

Utilizando la ecuación (2) se tiene:

$$1000ns / 70ns \approx 14$$

Se ve que el tiempo de bit está formado aproximadamente por 14  $t_q$ . Utilizando la ecuación (4) se tiene:

$$SegProp = 660ns / 70ns = 9.42$$

$$\therefore SegProp = 10$$

Utilizando la ecuación (5) se tiene:

$$Fase1 + Fase2 = 14 - 1 - 10 = 3$$

$$\therefore Fase1 = 1 \text{ y } Fase2 = 2$$

De aquí que:

$$RJW = 1$$

Una vez obtenidos los resultados anteriores y de acuerdo a la figura 7 se tiene que:

$$Tseg1 = 10 + 1 = 11$$

$$Tseg2 = 2$$

En la tabla 3 se muestran los valores que se programan en el registro.

Parámetro	Valor calculado	Valor en el registro
BRP	7	6
Tseg1	11	10
Tseg2	2	1
SJW	1	0

Tabla 3 Parámetros calculados.

### Generación del Código

Como se mencionó antes, se optó por utilizar el modo combinado del controlador CAN para realizar un primer acercamiento de lo que será la implementación del sistema para su uso en redes CAN existentes. El programa fue realizado en lenguaje C y compilado con la ayuda del Embedded Command Shell de EDS Altera Edition. En la figura 16 se muestra el diagrama de flujo del programa desarrollado.

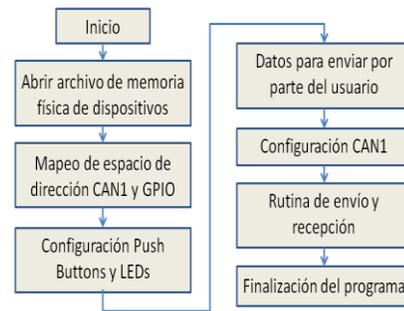


Figura 16 Diagrama de flujo del programa desarrollado.

Se utilizó el método de mapeo de memoria debido a que el desarrollo de un driver para interactuar directamente con el controlador CAN va más allá del objetivo de este trabajo. Para poder mapear en memoria el controlador CAN, es necesario primero abrir la memoria física de los dispositivos y después utilizar la función *mmap()* para mapear el espacio de dirección que ocupa el CAN1 y el GPIO. La manipulación de los registros de configuración del CAN1 y del GPIO1 se realizó por medio de las siguientes funciones de bajo nivel de Altera:

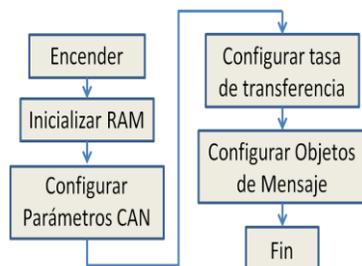
- alt\_write\_byte(dir\_dest, byte)
- alt\_read\_byte(dir\_fuente)
- alt\_setbits\_byte(dir\_dest, byte)
- alt\_clrbits\_byte(dir\_dest, byte)

A partir de estas funciones se implementaron otras para modificar los registros de configuración de una manera más ágil.

Una vez mapeados los periféricos que se utilizaron, se realizó la configuración de dos GPIOs conectadas a pulsadores, uno para dar la orden de envío de trama y otro para finalizar el programa, además de configurar 4 GPIOs conectadas a LEDs para reflejar el contenido del campo de datos de la trama CAN recibida, el número de bits a enviar se acoto por comodidad debido a que la tarjeta de desarrollo cuenta con 4 LEDs conectados directamente al HPS. El programa pide al usuario que ingrese datos de 4 bits que son los que se utilizaran en el campo de datos de la trama, una vez que se ha almacenado esta información, es utilizada para configurar el controlador CAN, después el programa entra a la rutina de envío y recepción, en donde si el usuario presiona un pulsador, la trama de datos es enviada y una vez recibida se reflejan los datos recibidos en los LEDs, si el otro pulsador es presionado se finaliza el programa.

Ya que al monitorear los registros de configuración solo se pueden imprimir en formato decimal o hexadecimal, se implementó una función para convertir los datos hexadecimales a binarios y que fuera más claro ubicar los campos de bits modificados.

En la figura 17 se muestra con más detalle la configuración del controlador CAN1.



**Figura 17** Configuración del controlador.

Al encender se inicializa la RAM de mensaje, mediante este proceso todos los objetos de mensaje son puestos a cero. Después se configuran los parámetros del CAN, en esta etapa se define el modo de funcionamiento combinado. Los parámetros obtenidos al calcular los segmentos de TNB son colocados a continuación en el registro de tiempo de bit. Como último paso fue necesario configurar dos objetos de mensaje uno en modo recepción y uno en modo transmisión, y se finaliza el proceso de configuración del controlador CAN.

### Conclusiones

Se logró configurar adecuadamente el controlador CAN y utilizarlo en modo combinado para enviar tramas CAN personalizadas y evaluar los datos enviados por medio del propio controlador. El siguiente paso es diseñar un circuito impreso el cual contenga un transceptor CAN y pueda ser conectado a la tarjeta de desarrollo para enviar tramas CAN a una red existente. Las modificaciones necesarias al programa son mínimas ya que bastara con omitir la configuración en modo combinado.

### Referencias

Marco Di Natale, Haibo Zeng, Paolo Guisto, Arkadeb Ghosal. (2012). Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol. USA: Springer.

Altera Corporation. (2015). Cyclone V Hard Processor System Technical Reference Manual. USA: Altera.

Microchip Technology Inc. (2001). Understanding Microchip's CAN Module Bit Timing. USA: Microchip Technology Inc.

## Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo

CABALLERO, Carlos\*†, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina.

Recibido Febrero 15, 2016; Aceptado Octubre 07, 2016

### Resumen

El objetivo del presente trabajo es diseñar, construir e implementar un filtro activo de potencia para mitigar la distorsión armónica presente en un sistema fotovoltaico autónomo (SFV). La implementación y la explotación de los SFV Autónomos han puesto en evidencia sus efectos en la calidad de energía debido a que el inversor de un SFV puede introducir armónicos de corriente con las que provoca un mal funcionamiento de las cargas y la reducción de su vida útil. Para solucionar este problema, en este trabajo se plantea la implementación de un filtro activo de potencia, cuya función principal es generar una señal de compensación que corresponde a las armónicas no deseadas e inyectarlas con una fase inversa para mitigar dichas armónicas. Se desarrolló el filtro activo con una potencia de 1.5kW, que incluye las etapas de sensado de las señales, procesamiento digital de las señales, modulación y control del filtro activo con base de la teoría de la potencia instantánea. Después de dimensionar los elementos del filtro activo, se realizó su simulación e implementación.

**Filtro activo de potencia, calidad de la energía, distorsión armónica, inversor monofásico.**

### Abstract

The objective of this work is to design, build and implement an active power filter to mitigate harmonic distortion present in an autonomous photovoltaic system (PVS). Implementation and exploitation of PVS have shown their effects on power quality because the investor of a PVS can introduce current harmonics causing malfunction on the loads and reducing its service life. To solve these problems, in this paper suggest the implementation of an active power filter, whose main function is to generate a compensation signal corresponding to the unwanted harmonics and inject them with a reverse phase to mitigate the arise of these harmonic. An active filter with 1.5kW of output was developed, it includes the steps of sensing signals, digital signal processing, modulation and control of the active filter based on the theory of instantaneous power. After sizing component of active filter is simulation and implementation was performed.

**Active power filter, power quality, harmonic distortion, single-phase invertir.**

**Citación:** CABALLERO, Carlos, CORTEZ, Liliana, MUÑOZ, German, CASTAÑEDA, Josefina. Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9 : 76-84

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: [ccaballero@itla.edu.mx](mailto:ccaballero@itla.edu.mx))

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La necesidad de contar con fuentes de energía no contaminantes es urgente, esto ha incrementado el interés por las fuentes de energía renovable, entre estas destacan los sistemas fotovoltaicos (SFV), que en los últimos años se ha incrementado su implementación en sistemas de mediana y pequeña potencia .

La implementación y la explotación de los SFV han puesto en evidencia sus efectos en la calidad de energía. En los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA) la calidad de la energía depende únicamente del sistema que se tiene instalado. El inversor de un SFV puede introducir armónicos en la red eléctrica que provocan mal funcionamiento de las cargas y la reducción de su vida útil.

Un ejemplo de estos sistemas fotovoltaicos autónomos figura 1 es el instalado en el laboratorio de investigación de sistemas digitales y energías renovables (LISDER) perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP.



Figura 1 Sistema fotovoltaico autónomo.

El SFV instalado consiste en 3 subsistemas, cada subsistema contiene 6 paneles solares de 130 W c/u, para dar una potencia total instalada de 780 W por subsistema. Cada subsistema cuenta con 2 baterías en configuración a 12 VCD. La energía generada por subsistema es de 3.5 KWh/día que es enviada a un controlador de carga y pasa a un banco de baterías. El inversor se encarga de realizar la transferencia de energía [2].

Este SFV tiene la potencia necesaria para dotar al laboratorio de suministro eléctrico autónomo, pero al alimentar el laboratorio con el suministro fotovoltaico las cargas sensibles instaladas en el laboratorio dejan de funcionar o funcionan de forma incorrecta, es por esta razón, que se examinó el suministro eléctrico fotovoltaico con un analizador de calidad de la energía. Las mediciones obtenidas se pueden ver en la figura 2 y la figura 3.

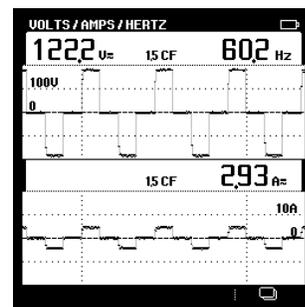


Figura 2 Voltaje y corriente de un subsistema

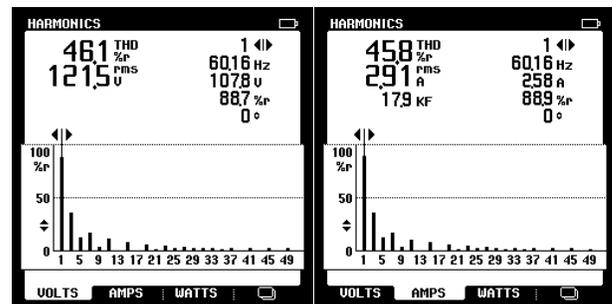


Figura 3 Distorsión armónica total de voltaje y corriente.

Las mediciones se realizaron conectado una carga puramente resistiva de 1KW. Como se puede observar en la figura 2, el voltaje y la corriente no son sinusoidales, presentan una distorsión en su forma de onda y en la figura 3 podemos notar que la distorsión armónica total presente en el voltaje y la corriente es aproximadamente del 46%, es por eso que se determinó que el mayor problema del suministro fotovoltaico son los armónicos, debido a la forma de onda que entrega el inversor.

Para solucionar el problema que se tiene en el laboratorio se propone implementar un filtro activo de potencia. En las siguientes secciones se describe el funcionamiento del filtro activo, sus topologías, la manera en que genera la señal de compensación, el dimensionamiento del filtro activo para un prototipo de 1.5KW de potencia y su instrumentación.

### Solución para compensar armónicos

Generalmente, para solucionar los problemas de armónicos en la red se emplean acondicionadores de señal que van desde los filtros pasivos sintonizados hasta los filtros activos. Si bien, los primeros son más económicos, su selectividad no les permite compensar más allá de su frecuencia sintonizada.

Los filtros activos presentan una solución dinámica que se ajusta a las necesidades de compensación.

Los filtros activos se pueden clasificar según su conexión a la red, puede ser en serie o paralelo con la carga.

Los filtros activos de corriente o filtros activos paralelo, eliminan de la red eléctrica la circulación de armónicos de corriente no deseadas y compensan el factor de potencia de la carga. En la figura 4 se ilustra el diagrama equivalente del filtro activo de corriente, modelado como una fuente de corriente.

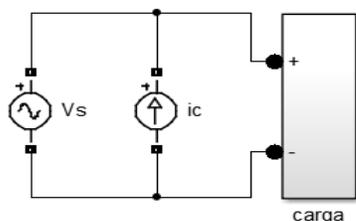


Figura 4 Filtro activo de corriente

Los filtros activos de voltaje o filtro activo serie cancelan armónicos de tensión presentes en la red, logrando que la corriente de línea sea sinusoidal, haciendo que el voltaje en el punto de conexión común también lo sea. En la figura 5 se muestra el diagrama equivalente para un filtro activo de tensión, modelado como una fuente de tensión.

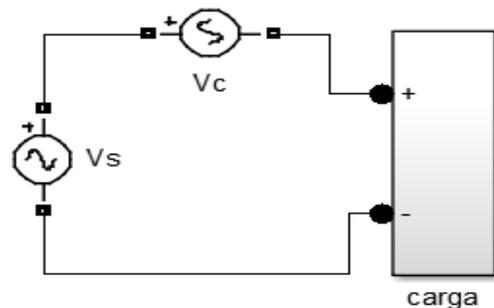


Figura 5 Filtro activo de voltaje

En este trabajo se propone emplear el filtro activo serie por su principal objetivo de eliminar armónicos de tensión, que logra que tanto la corriente como el voltaje sean de forma sinusoidal, la topología de este sistema se muestra en la figura 6, constituida básicamente por un bus de CD, un inversor puente completo, un filtro de salida y un transformador compensador.

Esta topología del filtro activo se puede representar como una fuente de tensión, capaz de proporcionar entre las terminales del transformador compensador la tensión necesaria para atenuar las perturbaciones que no se desean en la red eléctrica, esto se logra mediante una adecuada generación de la señal de compensación y tiene la capacidad de poder generar cualquier señal de tensión mediante un adecuado patrón de conmutación.

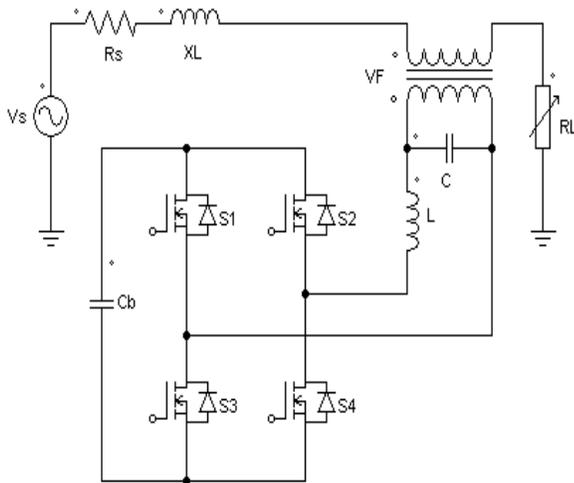


Figura 6 Filtro activo serie propuesto.

**Dimensionamiento del filtro activo**

Para dimensionar los dispositivos del filtro activo para un prototipo que se conecta a un sistema de 1.5KW es conveniente hacerlo con un margen de tolerancia suficiente para que funcione con seguridad.

Los argumentos de diseño que se emplean en esta sección son la tensión y la corriente que maneja ésta etapa [6].

Transformador compensador. El filtro activo se conecta en serie a través de un transformador compensador modelado como un transformador de corriente.

Para una tensión de base de  $V_S=120\text{ V}$  y para una potencia base de  $P_B=1.5\text{ KW}$ , se obtiene una corriente base  $I_S = P_B/V_S = 12.5\text{ A}$ .

La relación del transformador se elige de tal manera, para que el inversor maneje más tensión y menos corriente, para una relación de transformación de 10:1 con una potencia de carga de 1.5KW, la tensión que debe soportar el transformador es de 240 V y la corriente es de 6.25 A.

Inversor. En el filtro activo se emplea inversores o convertidores CD/CA con estructura puente completo, en la selección de los dispositivos semiconductores que se emplean, se necesita calcular la corriente que deben soportar para manejar la potencia de la fase ante la tensión de salida deseada, por lo tanto es necesario conocer la carga que demande esa potencia.

Se considera la potencia del transformador  $P_T = 1500\text{ W}$ , pero como un primer margen de seguridad se considera para el inversor una potencia  $P_F = 3000$  y una tensión  $V_F = 120$ , por lo tanto el valor de la carga.

$$Z_F = \frac{(V_F)^2}{P_F} = \frac{(120)^2}{3000} = 4.8\ \Omega \quad (1)$$

Con la carga se puede calcular la corriente pico y esta es la corriente que debe soportar los dispositivos

$$I_{cp} = \frac{V_{CD}}{Z_L} = \frac{\sqrt{2}(120)}{4.8} = 35.35\text{ A} \quad (2)$$

Filtro de salida LC. A la salida del filtro activo se tiene una señal modulada por ancho de pulso (PWM por sus siglas en ingles) que contiene la información necesaria que se desea reproducir, sin embargo también contiene una componente de alta frecuencia debido a la conmutación de los dispositivos del inversor. Para eliminar la señal de alta frecuencia se emplea un filtro pasivo LC como se observa en la figura 7

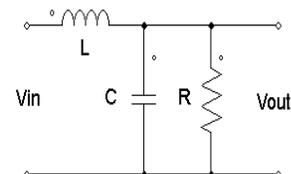


Figura 7 Filtro de segundo orden RLC.

La función de transferencia para el filtro LC está definida por la ecuación 3.

$$H(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + s\frac{\omega_o}{Q} + \omega_o^2} \quad (3)$$

Dónde:

$\omega_o$  es la frecuencia de resonancia

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

$Q$  es el factor de calidad del filtro

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5)$$

Para el cálculo de la inductancia y la capacitancia, se debe conocer la frecuencia de corte la cual la estimamos en  $F_{corte} = 10$  kHz, que es la frecuencia del PWM y así se puede conocer la frecuencia angular  $\omega_{cf}$ .

$$\omega_{cf} = 2\pi F_{corte} = 2\pi(10kHz) = 62831.85 \text{ r/s} \quad (6)$$

A partir de este resultado, empleando la ecuación 4 se tiene que

$$LC = \frac{1}{(\omega_{cf})^2} = 1.5915 \times 10^{-5} \quad (7)$$

De la ecuación 7 se propone un valor de capacitor comercial  $C=100\mu F$ , por lo tanto al sustituir en la ecuación 6 se tiene:

$$L = \frac{1.5915 \times 10^{-5}}{1000 \times 10^{-6}} = 15.915 \times 10^{-3} \approx 16 \text{ mH} \quad (8)$$

Bus de CD. Es necesario dimensionar el condensador con un valor óptimo, que permita mantener la tensión de salida en un nivel adecuado entre las variaciones de carga, para el cálculo del condensador se utiliza la ecuación de la energía asociada a la potencia por el tiempo.

$$E_{in} = S_{in}T \quad (9)$$

También se puede expresar en función de la frecuencia

$$E_{in} = \frac{S_{in}}{f} \quad (10)$$

Dónde:

$E_{in}$  es la energía del inversor  
 $S_{in}$  es la potencia del inversor  
 $f$  es la frecuencia del sistema

Se puede relacionar la energía con el valor del condensador y de la tensión como

$$E_{in} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (11)$$

De la ecuación 11 se puede considerar un porcentaje para el rizo de tensión presente en el bus:

$$E_{in} = \frac{1}{2} C_b (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (12)$$

Dónde:

- $C_b$  es el valor del condensador del bus.
- $V_{max}$  es el valor de tensión máximo deseado.
- $V_{min}$  es el valor de tensión mínimo deseado.

Considerando una potencia máxima de 3000 VA y que en el sistema la mitad del ciclo entrega energía y la otra mitad recibe energía para la frecuencia de la señal fundamental  $f=60\text{Hz}$ , se obtiene de la ecuación 10.

$$E_{in} = \frac{1 S_{in}}{2 f} = \frac{1(3000)}{2(60)} = 25J \quad (13)$$

Para un valor máximo del bus de CD de 240V y para un rizado de tensión de 1.6%, se tiene

$$V_{max} = 240 \text{ V} + 1.6\% = 243.84 \text{ V} \quad (14)$$

$$V_{min} = 240 \text{ V} - 1.6\% = 236.16 \text{ V} \quad (15)$$

Por lo que de las ecuaciones 12, 13, 14 y 15 se obtiene el valor del capacitor

$$C_b = \frac{2E_{in}}{(V_{max}^2 - V_{min}^2)} = 13.57 \text{ mF} \quad (16)$$

### Generación de la señal de compensación

La teoría de compensación es la metodología más utilizada para obtener la corriente de referencia, que inyectada en el punto de conexión anula los efectos armónicos en la red. A continuación, se describe la teoría de compensación que será implementada en el controlador del filtro activo.

Teoría de la potencia instantánea monofásica. La teoría pq monofásica se usa para compensar la potencia reactiva instantánea de cada una de las fases de un sistema trifásico, de forma independiente [8]. La idea básica de la teoría pq original, comienza con la transformación de los vectores espaciales instantáneos de las tensiones de fases (17) y corrientes de carga (18).

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

La potencia real instantánea,  $p(t)$  y la potencia imaginaria,  $q(t)$  se definen como:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

De la ecuación 19 las corrientes de compensación de referencia en coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ ,  $i_{comp\alpha}$  e  $i_{comp\beta}$  están dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -q(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Transformando estas corrientes en a-b-c el resultado que se tiene es:

$$\begin{bmatrix} i_{compa}(t) \\ i_{compb}(t) \\ i_{compc}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde,  $i_{compa}(t)$ ,  $i_{compb}(t)$  e  $i_{compc}(t)$  son las corrientes de compensación en cada una de las fases A, B y C. Considerando un sistema trifásico con carga monofásica en una sola de sus fases, en la fase a, es posible escribir la siguiente expresión:

$$i_b(t) = i_c(t) = 0$$

Sustituyendo la ecuación 19 en la ecuación 20 se tiene:

$$\begin{bmatrix} i_{comp\alpha}(t) \\ i_{comp\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{v_{\beta}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v_{\beta}^2(t)} \begin{bmatrix} -v_{\beta}(t)i_{\alpha}(t) \\ v_{\alpha}(t)i_{\alpha}(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Teniendo en cuenta la transformación de las ecuaciones en coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  a coordenadas a-b-c, se tiene la siguiente expresión para corriente y voltaje en el eje  $\alpha$ :

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a(t); \quad v_{\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}v_a(t) \quad (23); (24)$$

Por lo tanto, a partir de las ecuaciones 18, 20 y 21 tenemos.

$$i_{comp\alpha}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{v_{\alpha}(t)v_{\beta}(t)i_{\beta}(t) - v_{\beta}^2(t)i_{\alpha}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v_{\beta}^2(t)} \quad (25)$$

Teniendo en cuenta el hecho, de que las tensiones y las corrientes en el eje  $\beta$  están desfasadas  $\pi/2$  respecto a las cantidades del eje  $\alpha$ , es posible escribir las siguientes ecuaciones:

$$v_{\beta}(t) = -v'_{\alpha}(t); \quad i_{\beta}(t) = -i'_{\alpha}(t) \quad (26); (27)$$

Sustituyendo las expresiones de los voltajes y las corrientes en los ejes  $\alpha$ - $\beta$  en la ecuación 25 se tiene:

$$i_{comp\alpha}(t) = \frac{v_{\alpha}(t)v'_{\alpha}(t)i'_{\alpha}(t) - v'_{\alpha}{}^2(t)i_{\alpha}(t)}{v_{\alpha}^2(t) + v'_{\alpha}{}^2(t)} \quad (28)$$

La figura 8 muestra el circuito para obtener las corrientes de compensación, en esta figura  $v(t)$ ,  $i(t)$  e  $i_{comp}(t)$  representan la tensión de la fase, la corriente de la carga y la corriente de compensación respectivamente.

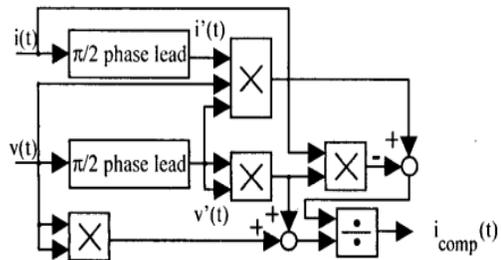


Figura 8 Bloque generador de señal de compensación.

**Simulación**

Una vez que se dimensionaron los componentes del filtro activo y se conoce la forma para generar la señal de compensación, se llevó a cabo su simulación mediante el software SIMULINK-MATLAB, como se observa en la figura 9. Esta simulación se realizó sobre una carga puramente resistiva.

Para generar la señal de compensación se toman las lecturas del voltaje y corriente. La etapa de control realiza el cálculo de la señal a compensar y a la salida de este se tiene una señal PWM, que sirve para activar los dispositivos del inversor del filtro activo, a la salida del filtro activo se tiene la señal a compensar y el transformador de acoplamiento la inyecta a la red.

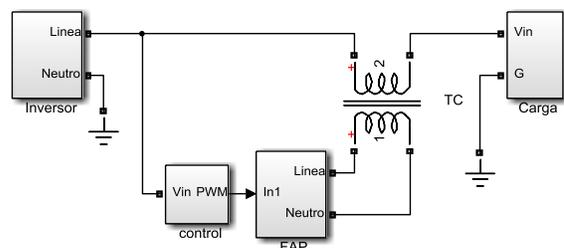


Figura 9 Circuito para compensación de armónicos.

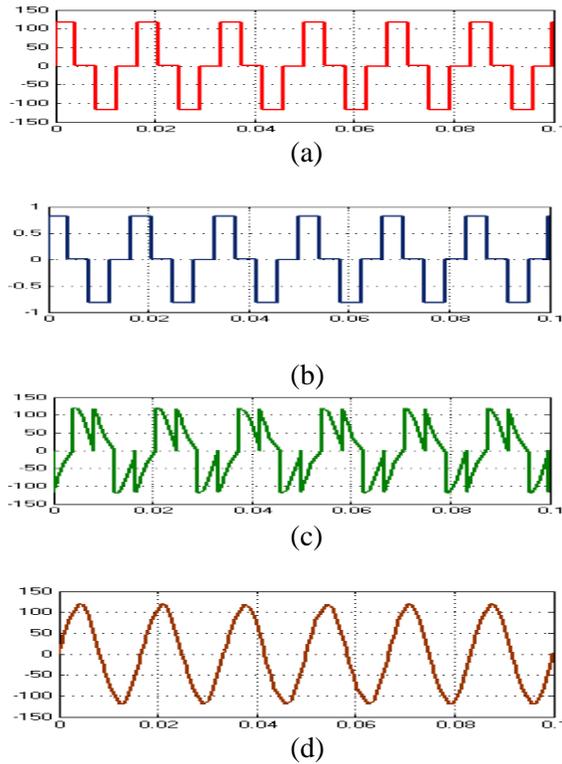
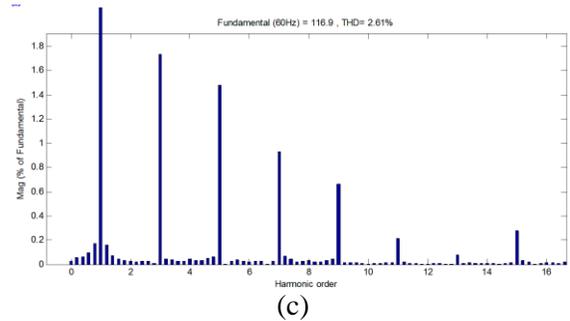


Figura 10 a) Voltaje de la fuente, b) corriente de la fuente, c) corriente de compensación, d) voltaje en la carga resistiva.



Fundamental (60Hz) = 116.9 , THD= 2.61%

Figura 11 a) Distorsión armónica en el voltaje de la fuente, b) distorsión armónica en la señal de compensación, c) distorsión armónica en el voltaje de la carga resistiva.

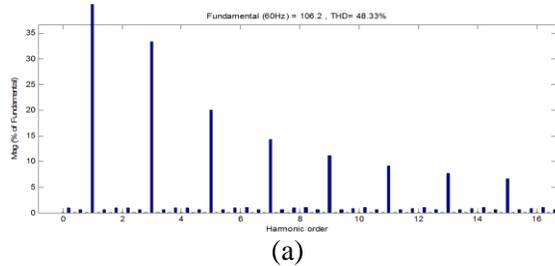
Como se puede observar en la figura 10(d) al inyectar la señal de compensación, producida por el filtro activo figura 10 (c), el voltaje en la carga obtiene una forma sinusoidal.

De la figura 11(c) podemos observar que el contenido armónico se reduce a un 2.61% a comparación de la distorsión inicial que era de un 48.33% figura 11(a).

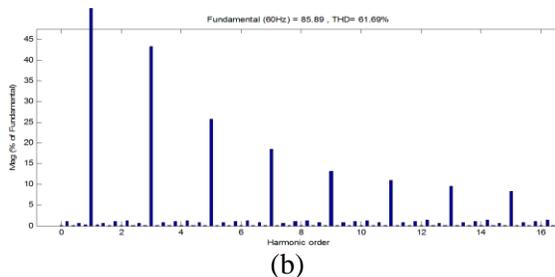
Con la reducción de los armónicos en voltaje se cumple, con la norma IEEE 596 americana y la norma CFE L0000-45 mexicana, que establecen el límite de armónicos presentes en la red eléctrica de voltaje menor al 5% [9].

**Instrumentación del filtro activo**

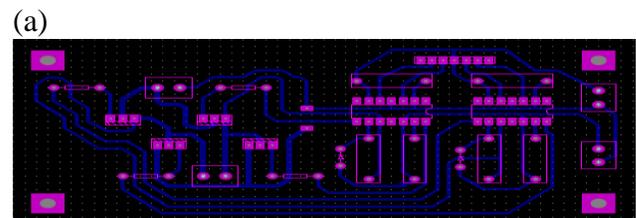
Una vez validados en simulación los valores calculados para el dimensionamiento del filtro activo, se prosiguió con su instrumentación, en las siguientes figuras se presenta el diseño que se ha realizado en el software *ARES-PROTEUS*, en el cual se desarrolló los circuitos impresos para el filtro activo.



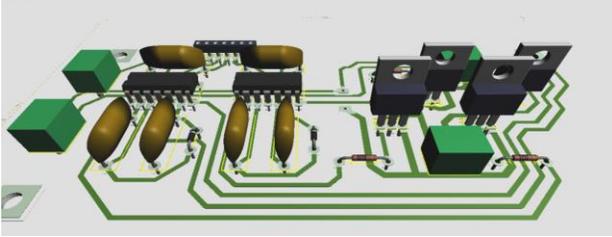
Fundamental (60Hz) = 106.2 , THD= 48.33%



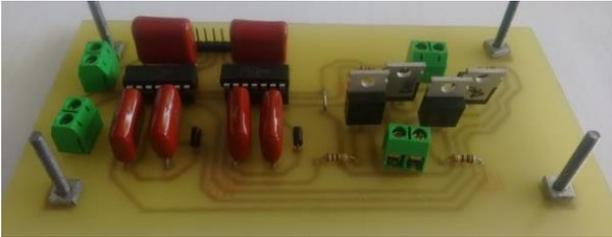
Fundamental (60Hz) = 85.89 , THD= 61.69%



(b)



(c)



**Figura 12** a) diseño de las pistas del inversor del filtro activo, b) representación de los componentes del inversor y su circuito de disparo, c) circuito físico ya instrumentado.

## Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó el filtro activo de potencia, incluyendo las etapas de sensado de la señal y el procesamiento digital de señales para obtener la señal de compensación con base de la teoría de la potencia instantánea. Como resultado de la implementación del filtro activo se demostró en simulación la reducción del contenido armónico de 48.3% originalmente a 2.61%, con lo que se cumple con la norma IEEE596 americana y L0000-45 mexicana.

La relevancia de resolver el problema de los armónicos en el suministro fotovoltaico, radica en el aprovechamiento del SFV instalado en LISDER, de no tener problemas al utilizar los equipos sensibles a la distorsión armónica.

Solucionar un problema real que puede presentarse en cualquier sistema fotovoltaico autónomo de mediana y baja potencia. Con base al aprovechamiento de la energía renovable se puede sustituir el consumo tradicional de CFE.

## Referencias

Díaz y Carmona. (2013). Instalaciones solares fotovoltaicas.GM. España: McGraw-Hill.

LISDER. (2014). Manual Sistema Fotovoltaico Instalado.

Rashid. (3Ed). (2011). Power electronics handbook. USA: Elsevier.

Dugan y Macgrhanagan. (2DA). (2004). Electrical power system quality, USA: McGraw-Hill.

Djeghloud, Larakeb y Bentounsi. (2014). Laboratory implementation of a hybrid series active power filter system part II: series active filter desing. IEEE power electronics and motion control conference and exposition.

Patricio. (2015). Diseño de un inversor de conexión a la red para paneles fotovoltaicos. Escuela politécnica nacional. España.

Akagi y Nabae. (1996). Control strategy of active power filters using multiple voltaje-source PWM converters. IEEE transactions on industry applications.

Haque y Azan. (2002). Single-phase pq theory for active filters. IEEE conference on computer, communications, control and power engineering.

IEEE std 519-1992. (1993). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE.

## Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal

GÓMEZ, Abdiel, JIMÉNEZ, Isamar, ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino

Recibido Febrero 15, 2016; Aceptado Octubre 07, 2016

### Resumen

Se presenta un estudio teórico-experimental de un horno convencional de producción de ladrillos para mejorar su eficiencia térmica. Se llevó a cabo un análisis de la transferencia de calor en el horno, determinando los perfiles de temperatura dentro del horno, así como el flujo de calor requerido para la cocción adecuada de los ladrillos. Al mismo tiempo se realizaron pruebas experimentales en probetas fabricadas conforme a la norma aplicable, ensayando once formulaciones distintas; para la mejor combinación, los resultados fueron: pérdidas por calcinación: 15%, porosidad: 20%, contracción lineal: 0.52%, módulo de ruptura: 18 MPa y esfuerzo a la compresión: 209.62 kg/cm<sup>2</sup>. Para un flujo de combustible (aserrín) de 0.44 kg/s, la energía perdida del horno hacia el exterior fue de 267.65 kJ/s. Conforme a los datos obtenidos en campo, el rango de temperatura de operación del horno es de 970-1220 °C. Con ayuda del Software ANSYS FLUENT © se obtuvo la geometría más adecuada para el proceso: la adición de canales de encendido y una chimenea a la salida, mejoraron considerablemente los parámetros del horno convencional, resultando un flujo de calor máximo en el horno de 3747.7 W/m<sup>2</sup> y una pérdida total de calor en el horno de 2336.2 W/m<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** Hornos, transferencia de calor, ladrillos, eficiencia térmica.

### Abstract

A theoretical and experimental study of a conventional furnace brick production appears to improve thermal efficiency. An analysis of heat transfer in the furnace were made, determining the temperature profiles in the furnace and the heat flow required for proper firing of the bricks. At the same time experimental tests on specimens manufactured in accordance with the applicable standard were made, tested eleven different formulations; for the best combination, the results were: losses by calcination: 15%, porosity: 20% linear shrinkage: 0.52%, modulus of rupture: 18 MPa and compressive strength: 209.62 kg / cm<sup>2</sup>. For a fuel flow (sawdust) of 0.44 kg / s, the energy lost to the outside of the furnace was 267.65 kJ / s. According to the data obtained in the field, the range of operating temperature of the oven is 970-1220 ° C. With the help of Software ANSYS FLUENT © the most suitable geometry for the process it is obtained: the addition of channels on and a chimney at the exit, greatly improved the parameters of conventional oven, resulting in a maximum heat flux in the oven 3747.7 W / m<sup>2</sup> and a total loss of heat in the oven 2336.2 W / m<sup>2</sup>.

**Keywords:** furnaces, heat transfer, bricks, thermal efficiency.

**Citación:** GÓMEZ, Abdiel, JIMÉNEZ, Isamar, ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino. Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9 : 85-94

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: [agmerca63@gmail.com](mailto:agmerca63@gmail.com)).

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El desarrollo de este proyecto es de gran importancia porque la industria ladrillera sigue teniendo un gran auge en la construcción, al ser un material que continúa usándose para la edificación de viviendas. Los artesanos que se dedican a fabricar este producto tienen ganancias reducidas por lo que no consideran que su proceso de fabricación pueda mejorarse sin verse perjudicada su economía; en nuestro país hay poco más de 16 mil ladrilleras y en nuestro estado existen cerca de 258 (Moreno, 2015).

El impacto que estos artesanos tienen desde la adquisición de sus materias primas y las técnicas tan rudimentarias para elaborar el ladrillo y darle el tratamiento necesario influyen directamente en el producto obtenido. Los combustibles comúnmente utilizados son: madera, aserrín, plástico, llantas, papel, periódicos, entre otros. Resulta evidente que estos materiales no son propios para esta actividad, pero su uso se debe fundamentalmente al bajo costo de adquisición.

Al utilizar estos materiales en el proceso de cocción se puede observar una variación en el tiempo y en la temperatura que se tiene en el interior de estos hornos, ya que no se logra tener un poder calorífico estándar por el tipo tan diverso de combustible empleado. Al terminar el proceso, el enfriamiento es muy lento y por medio de técnicas empíricas han determinado dejar la mitad del tiempo que tardan en la cocción en el reposo (aproximadamente 20 horas).

El tipo de contaminación que estos hornos artesanales emiten es muy alto; sin embargo, los productores se muestran renuentes a invertir recursos para cambiar su método de cocción, ya que consideran que sus ingresos se verán afectados debido al alto costo de fabricación (Juárez, 2015).

Es por ello que el propósito de este trabajo fue realizar un estudio teórico-experimental de un horno convencional de producción de ladrillos para mejorar su eficiencia térmica.

Los hornos utilizados actualmente en el sector ladrillero, básicamente son hornos cúbicos de base rectangular, de tiro ascendente natural, sus capacidades de carga oscilan entre los 10000 a 15000 ladrillos artesanales. La temperatura de calentamiento dentro de la cámara de cocción dentro del horno llega a los 300°C para luego dar lugar a la cocción llegando su temperatura hasta los 990-1000°C, y posteriormente ir al enfriamiento a temperatura ambiente que es de 15 °C; los ladrillos permanecen en el horno por un lapso de 30 horas (Maria, 2011).

Los principales problemas que se presentan durante el funcionamiento de los hornos convencionales son (Gómez et al., 2015):

Combustión incompleta de los combustibles empleados: lo cual produce emisión de gases contaminantes como el CO, CO<sub>2</sub> y gases sulfurosos además de baja eficiencia térmica lo que redundará en un aumento en el costo de las quemaduras con el consecuente encarecimiento de los procesos de producción.

Gradiente de temperaturas considerablemente alto entre la base y la parte alta de la carga: esto se debe a que la mayoría de los hornos son abiertos, este hecho hace que las quemaduras sean deficientes. Además los hornos abiertos pierden la mayor parte de la energía térmica producida por el combustible.

Generación de desperdicios sólidos (mermas): cada quemadura de 500 a 1000 ladrillos son los que no se quemaron al 100%, salen muy quemados o presentan algunas características mecánicas deficientes.

Calidad deficiente de los productos: como consecuencia de las quemas deficientes se ofertan productos de dudosa calidad, pues la mezcla cerámica no llega a la quema completa o a la “sinterización”, quedando con un alto nivel de porosidad, baja resistencia al impacto, cizallamiento, abrasión y tracción

### Caracterización del horno convencional

Con base en la información obtenida en campo (Horno “La Gloria” en Actopan, Hgo.), se procedió a dimensionar el horno utilizando el Software Solidworks©.

Planta baja del horno: Ancho = 3 m, Alto = 2 m, Largo = 5 m, Espesor de las paredes = 0.60 m.

Las dimensiones de las columnas son de 1.2 m x 1.2 m; éstas van colocadas en las esquinas del horno para darle mayor soporte cuando esté en operación.

Posteriormente se modeló la planta alta del horno, la cual tiene las siguientes dimensiones: Alto = 2 m; Espesor de pared = 0.30 m; Ancho = 3 m; Largo = 5 m.

A continuación se modeló el canal de encendido y la puerta de admisión del combustible que lleva el horno. Puerta de admisión del combustible: Ancho = 80 cm; Alto = 80 cm. Canal de encendido: Ancho = 80 cm; Profundidad = 1 m; Largo = 5 m. El canal de encendido es donde se agrega el combustible. Por último se modeló la puerta de admisión para la carga del horno, la cual tiene las siguientes dimensiones: Alto = 1.50 m; Ancho = 1 m; Altura a partir del suelo = 0.80 m. En la Figura 1 se aprecian los elementos del horno.

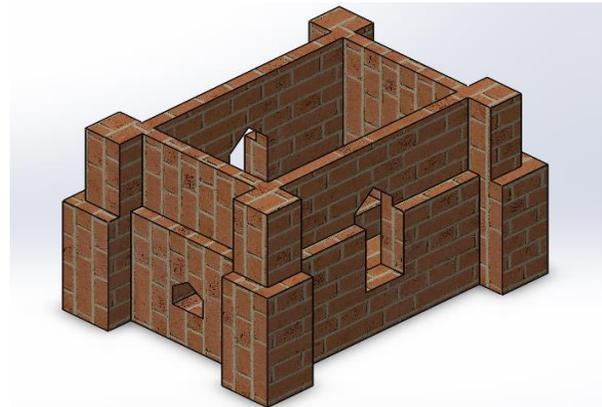


Figura 1 Modelo completo del horno “La Gloria”.

Utilizando la metodología existente en la literatura (Cengel, 2004) se determinaron los coeficientes de transferencia de calor por convección para el horno actual. Los datos disponibles son: Altura = 4 m,  $T_s = 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 950\text{ }^\circ\text{C}$ , emisividad del ladrillo rojo:  $\epsilon = 0.96$ ,  $K = 0.72\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ; las propiedades del aire se toman a  $625\text{ }^\circ\text{C}$ . En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos.

Interior	$h_1 = 5.6788 \frac{W}{m^2\text{ }^\circ\text{C}}$
Exterior	$h_2 = 3.209 \frac{W}{m^2\text{ }^\circ\text{C}}$

Tabla 1 Coeficientes convectivos para el horno actual.

### Análisis numérico del horno actual

A continuación y con ayuda del software ANSYS Fluent ©, se realizó un análisis térmico de flujo permanente (Steady-State Thermal) en 2D para mostrar el efecto de las temperaturas, el flujo de calor total y la dirección del flujo de calor total que se tiene dentro y fuera de la cámara de cocción del horno actual. Con base en los datos proporcionados por el operador del horno “La Gloria”, la temperatura en el interior del horno fue de  $950\text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura exterior, de  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . El análisis se realizó considerando convección natural en el interior y exterior del horno.

En la Figura 2 se presenta la sección transversal del horno en donde se aprecia las temperaturas a las que se somete el horno actual.

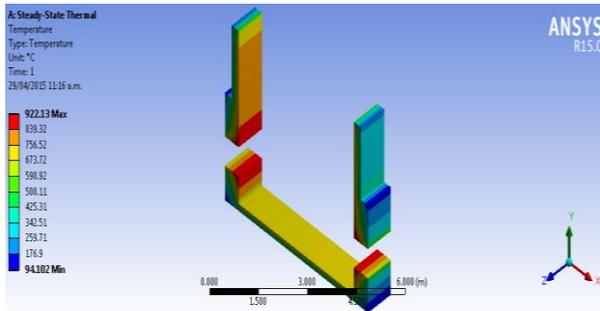


Figura 2 Temperaturas del horno actual en la cámara de cocción y en el exterior (sección trasversal).

Se puede apreciar que la temperatura máxima de 922.13 °C se encuentra en las esquinas de los canales de encendido del horno, la cual no es uniforme en todo el interior del horno. Esto provoca que algunos ladrillos queden muy quemados y otros no alcanzan a quemarse completamente. (Juárez, 2015). En la Figura 3 se muestra la distribución de temperaturas en las paredes (exterior e interior) del horno actual.

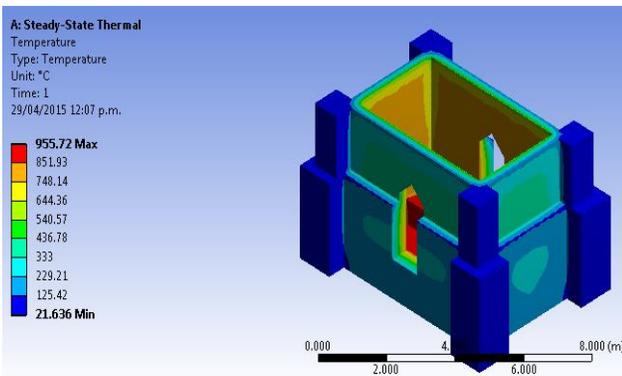


Figura 3 Distribución de temperaturas en las paredes del horno actual.

### Modelado del horno propuesto

Nuevamente se utiliza el Software Solidworks© para realizar el diseño del horno propuesto.

El primer cambio fue la implementación de tres canales de encendido en la parte inferior del mismo, en lugar de uno en los hornos actuales de tipo intermitente.

Su función es distribuir el calor en el interior del horno de manera uniforme en la cámara de cocción de abajo hacia arriba (ascendente).

De esta manera se evita que en las esquinas del horno se presenten temperaturas bajas provocando que los ladrillos se cosan de manera incorrecta. En la Figura 4 se presenta el modelo de los canales de encendido.

La incorporación de un techo con chimeneas, permite un mayor control de la temperatura del horno (mayor estabilidad térmica), esto es porque el horno tiene la capacidad de llegar a una temperatura máxima promedio de 1200 °C (dato proporcionado por ecología). A partir de esta temperatura, el horno ya no permite que se le siga agregando calor, sino que trata de sacarlo a la atmósfera de alguna manera porque la cámara de cocción del horno tiene una capacidad de temperatura máxima promedio predeterminada.

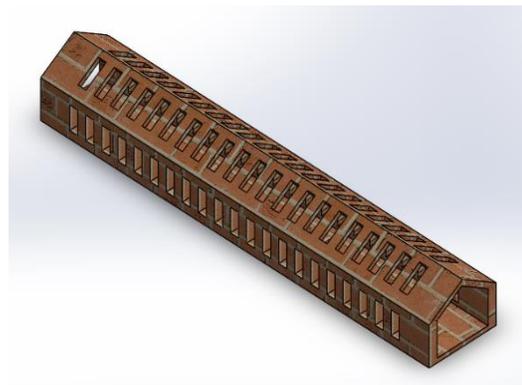
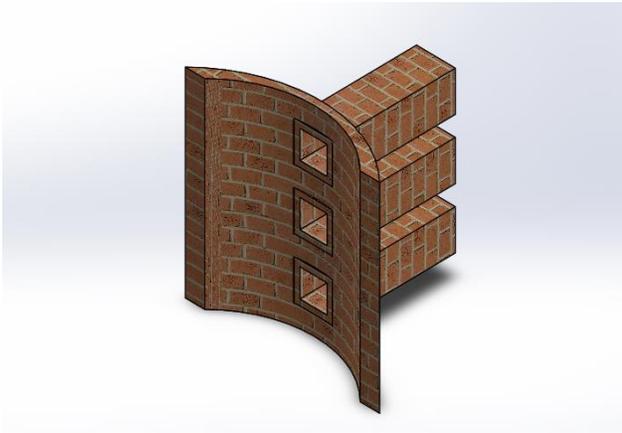


Figura 4 Modelo de los canales de encendido del horno.

La Figura 5 presenta la imagen del modelo de las chimeneas para la salida de los gases del horno gases del horno.



**Figura 5** Modelo del techo mostrando de las tres chimeneas incorporadas al diseño del horno.

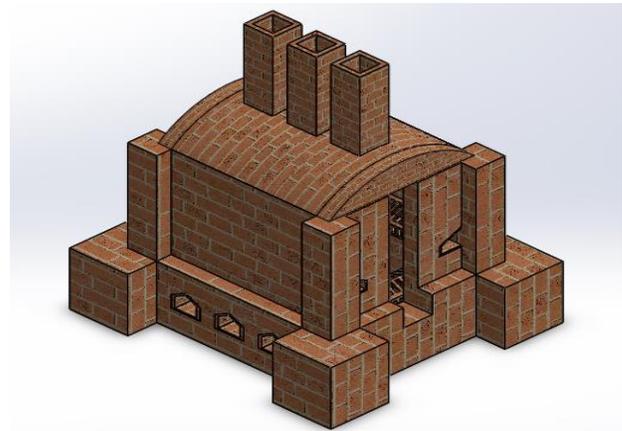
### Medidas del horno

- Altura de la planta alta = 3 m (sólo se le aumenta 1.5 m más para las chimeneas).
- Altura de la planta baja = 1.5 m.
- Altura de la puerta de la planta baja = 0.75 m.
- Altura de la puerta planta alta = 3 m.
- Altura de los cimientos = 0.80 m.
- Altura total de la cámara de cocción = 5.45 m.

Las medidas de los espesores de pared quedaron de la siguiente manera:

- Espesor de las paredes, planta baja: 1 m.
- Espesor de las paredes, planta alta: 0.50 m.

La Figura 6 muestra el diseño del horno completo con los canales de encendido en la planta baja (tres canales de encendido), canales de encendido de ayuda en la planta alta (dos canales de ayuda) y chimeneas en la parte superior del horno (tres chimeneas).

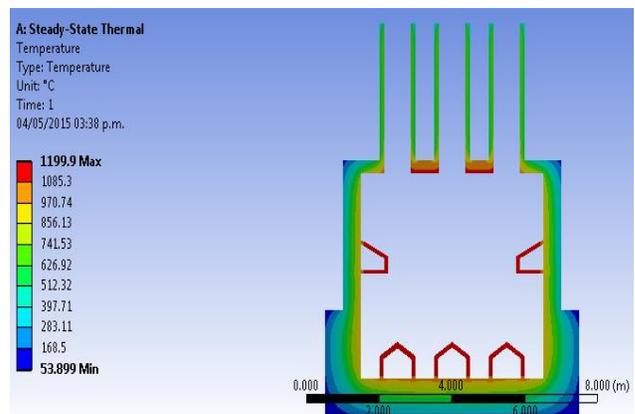


**Figura 6** Diseño completo del horno propuesto.

### Análisis numérico del horno propuesto

Continuando con la metodología utilizada en la sección anterior, se realizó un análisis térmico de flujo permanente (Steady-State Thermal) en 2D con ayuda del software ANSYS Fluent ©, para mostrar el efecto de las temperaturas, el flujo de calor total y la dirección del flujo de calor total para el horno propuesto.

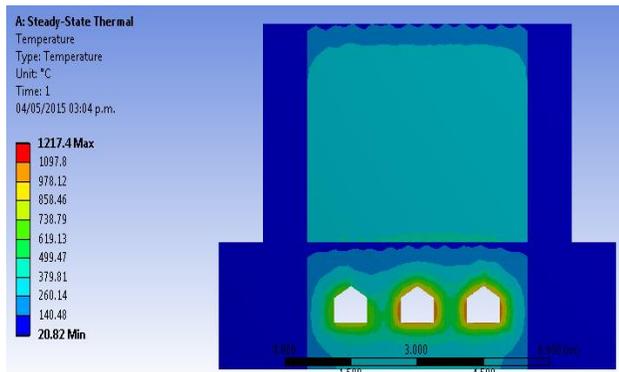
En la Figura 7 se presenta la sección transversal del horno en donde se aprecia la distribución de temperaturas en las paredes del horno.



**Figura 7** Vista de la sección transversal del horno con la distribución de temperaturas.

Se observa que la temperatura tiene una distribución más uniforme en toda la sección transversal del horno: entre 970.74 °C y 1085.3°C, con un valor máximo de 1199.9 °C (color rojo).

La Figura 8 muestra la vista lateral del horno en donde se puede apreciar el efecto de las temperaturas en el exterior del horno.



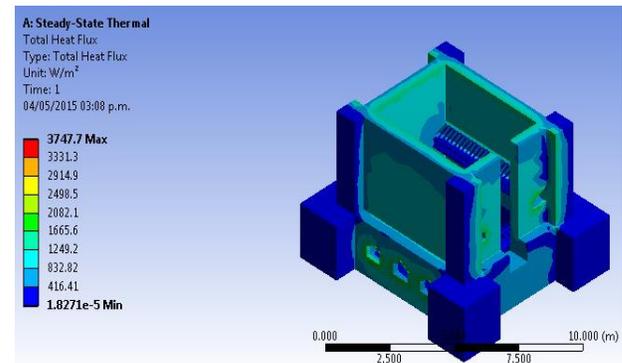
**Figura 8** Vista lateral del horno en donde se aprecia la distribución de temperaturas en el exterior.

También se realizó un análisis de flujo total de calor dentro del horno (análisis en 3D), considerando convección natural en el interior y exterior del horno, tal y como se muestra en la Figura 9. Se puede observar claramente que el flujo de calor máximo en el horno se encuentra en la parte de los canales de encendido.



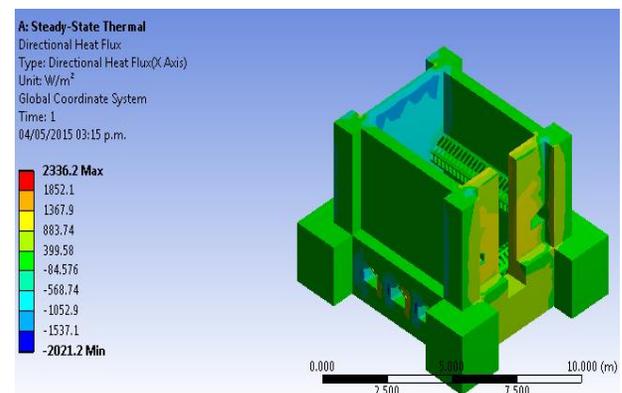
**Figura 9** Vista lateral del horno en 3D con la distribución del flujo de calor total en el exterior.

En la Figura 10 se presenta la vista isométrica del horno, en donde se observa el efecto del flujo total de calor en el horno.



**Figura 10** Vista isométrica con la distribución del flujo de calor total en el exterior e interior del horno.

Por último, se realizó un análisis de la dirección del calor dentro y fuera del horno; en la Figura 11 se muestra la dirección que toma el flujo total de calor del horno cuando se encuentra en operación (de derecha a izquierda).



**Figura 11** Vista isométrica que muestra la dirección del flujo de calor total en el horno.

Al incorporar el techo con chimeneas en el horno, la dirección del calor es de abajo a hacia arriba (ascendente), por lo que la temperatura de la cámara de cocción del horno permanece estable.

### Resultados

Mediante un análisis termodinámico en APDL de ANSYS Fluent© se obtuvieron los perfiles de temperatura en la cámara de cocción del horno actual en operación, tal y como se muestra en la Figura 12.

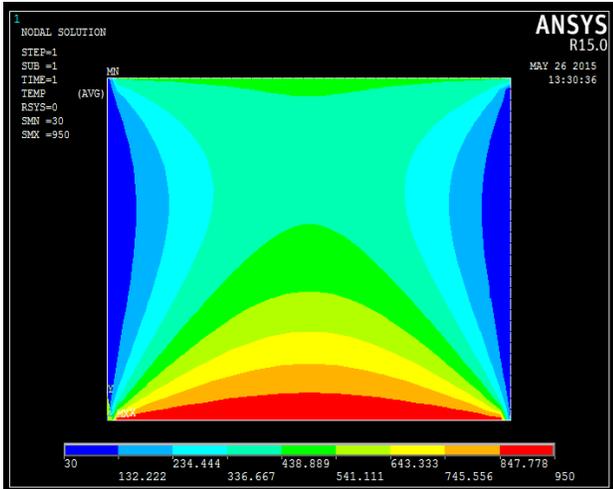


Figura 12 Perfiles de temperaturas del horno actual “La Gloria”.

En forma análoga, se realizó el mismo análisis termodinámico en APDL de ANSYS Fluent© para obtener los perfiles de temperaturas dentro del horno propuesto, para verificar si los ajustes realizados fueron satisfactorios.

Para verificar el funcionamiento óptimo del horno, se realizaron dos análisis:

El primero fue hecho sin tomar en cuenta las chimeneas y los canales de ayuda de encendido en el horno.

La Figura 13 presenta el efecto de la transferencia de calor por convección natural interna dentro del horno (con  $h = 3.27 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en una distribución de temperaturas dentro de la cámara de cocción del horno.

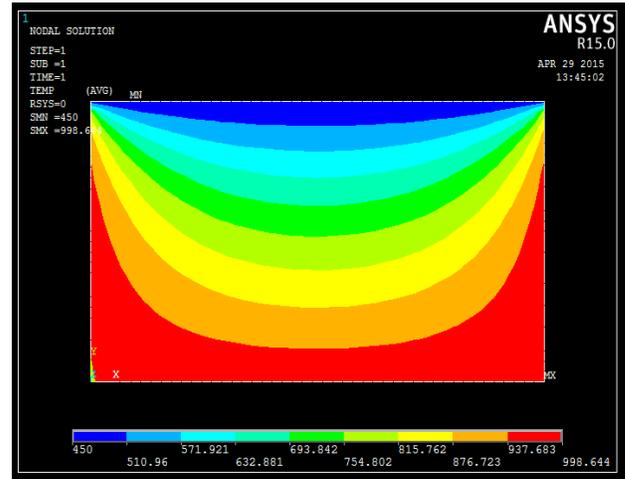


Figura 13 Distribución del calor dentro de la cámara de cocción sin canales de ayuda de encendido.

La temperatura que se utilizó en el interior del horno fue de  $1000^\circ \text{C}$  y la temperatura en la parte superior del horno se consideró de  $450^\circ \text{C}$  (valores obtenidos de la investigación de campo y bibliográfica).

En la Figura 14 se muestra la curva característica de operación del horno sin tomar en cuenta las chimeneas ni los canales auxiliares de encendido, graficándose las temperaturas Vs la distancia vertical del flujo de calor dentro de la cámara de cocción del horno.

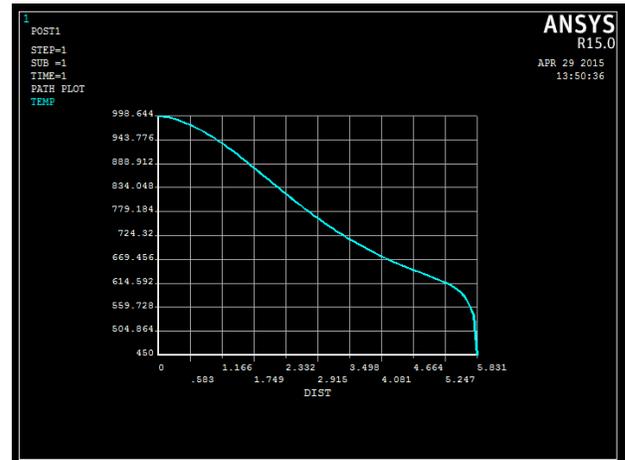


Figura 14 Curva característica de operación del horno.

Se aprecia que la temperatura no permanece uniforme con a lo largo de la cámara de cocción (tiene una caída de temperatura notable); esto se debe a que en el interior del horno no existe una distribución uniforme del calor por lo que se debe tomar en cuenta este fenómeno en la optimización del horno.

El segundo análisis se realizó tomando en cuenta los canales de ayuda de encendido en la parte de la planta alta del horno y el techo con las chimeneas.

En la Figura 15 se muestra el efecto de las temperaturas en un medio convectivo con un valor del coeficiente de calor por convección natural de  $3.27 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , con temperaturas en el interior y en la parte superior del horno de  $1000^\circ\text{C}$  y  $978.12^\circ\text{C}$ , respectivamente (obtenido de ANSYS).

Asimismo se observa que la distribución del calor dentro de la cámara de cocción con los canales de ayuda de encendido es más uniforme; esto permite que la temperatura dentro del horno se mantenga más constante en la mayor parte de la cámara de cocción (color rojo).

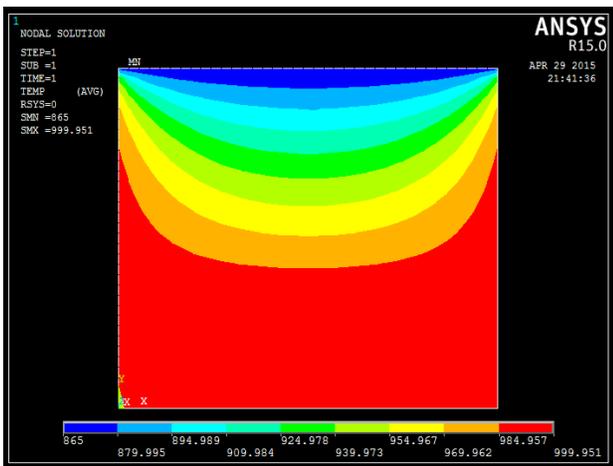


Figura 15 Distribución de temperaturas en el horno, con canales de ayuda de encendido

Cabe mencionar que al emplear un techo en el horno favorece que la temperatura del horno no cambie considerablemente, evitando también que en la parte superior del horno se presenten temperaturas menores a la temperatura de cocción de los ladrillos. En este caso la temperatura que se tiene en la parte superior del horno es de  $978.14^\circ\text{C}$  (dato agregado al programa APDL), mostrado en color azul.

En la Figura 16 se muestra la curva característica de operación del horno tomando en cuenta las chimeneas en el techo del horno y los canales auxiliares de encendido.

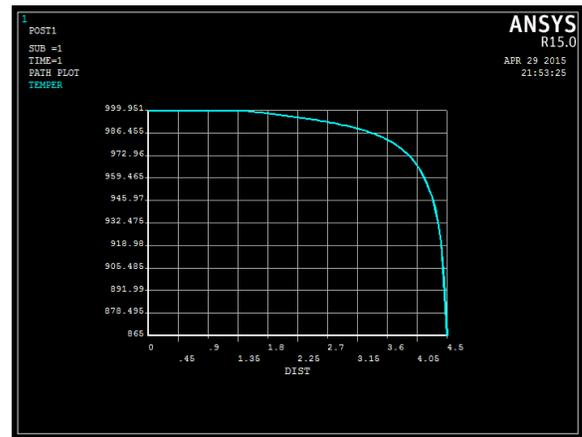


Figura 16 Curva característica de operación del horno con canales de encendido de ayuda y chimeneas.

Se puede observar que la temperatura es más uniforme dentro de la cámara de cocción del horno propuesto en comparación con el horno actual “La Gloria”.

### Pruebas Experimentales

Como un complemento de esta investigación, se realizaron pruebas experimentales para determinar la mejor combinación de materiales para la fabricación de ladrillo artesanal, ensayando 11 formulaciones distintas. Por cuestiones de espacio, sólo se presentan los resultados de dichas pruebas para la formulación óptima, clasificada como la 2B (ver Tabla 2).

Formulación	Prueba	Valor obtenido
Agua, arcilla, barro, dolomita, caliza, alúmina, arena sílica, tezontle	Porosidad	20%
	Pérdidas por calcinación	15.4%
	Pérdidas por contracción lineal	0.52%
	Esfuerzo a la compresión	209.62 kg/cm <sup>2</sup>
	Módulo de ruptura	18 MPa

**Tabla 2** Resultados de las pruebas experimentales realizadas a la probeta 2B.

Los valores obtenidos experimentalmente están dentro del rango que señalan la norma aplicable, e incluso, como en el caso del esfuerzo a la compresión, la superan (Norma NMX-C-404-1997-ONNCCE).

### Conclusiones

La temperatura máxima de operación del horno a la cual se coccionan los ladrillos fue de 1217.4 °C, este valor es similar a los datos obtenidos en el estudio de campo.

El flujo de calor máximo en el horno fue de 3747.7 W/m<sup>2</sup> y se localiza en los canales de encendido. Por lo tanto se determina que en los canales de encendido es donde se debe tomar control para ir incrementando de manera adecuada la temperatura y así permitir que la cocción de los ladrillos sea la adecuada.

El cálculo del flujo total de calor direccional sirvió para determinar el lugar de la salida de los gases de combustión a la atmósfera, el cual tuvo un valor máximo de 2336.2 W/m<sup>2</sup>. Este flujo máximo se localiza en la puerta de admisión de los ladrillos.

Con base en los resultados obtenidos, podemos establecer que la utilización de canales de ayuda de encendido y un techo con chimeneas en el horno es muy conveniente, dado que tales incorporaciones provocan que el calor fluya de manera más constante y uniforme en todo el proceso de cocción del ladrillo. Esto se aprecia perfectamente en la curva característica de operación del horno, mostrada en la Figura 16: a lo largo de la cámara de cocción no se tiene una caída de temperatura, como ocurre cuando no se toman en cuenta los canales auxiliares de encendido y las chimeneas.

### Referencias

- Cengel, Y (2004). Transferencia de calor y masa. México, Mc Graw Hill.
- Gómez, A; Jiménez, I. y Ávila, E. (2015). “Caracterización y Reformulación de Materiales para la Elaboración de Ladrillo Artesanal”. Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 23-25 de Septiembre, 2015. Coatzacoalcos, Ver. pp. 663-669.
- Juárez, L. (2015). “Estudio Teórico-Experimental de la Optimización de un Horno para Fabricar Ladrillos”, Informe de Residencia Profesional, Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Moreno, M. (2015), “Caracterización de un Horno Convencional para la Fabricación de Ladrillo”, Informe Técnico Final de Proyecto de Investigación, Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Álvarez, S. F. (2014). “Optimización del proceso de mezcla de arcilla para la producción de ladrillos, en el sector artesanal”. Universidad de Cuenca. Sitio web: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5529/1/TESIS.pdf>

García, C. A. et al. (2013). “Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales”. *Tecnura*, Vol. 17, núm. 38, pp. 68-81 Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia.

Gomezcoello, J. L. (2012). “Análisis Comparativo de la Contaminación Atmosférica Producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles”. U. P. Salesiana. Sitio web: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5226/1/UPS-CT002748.pdf>

García, A. et al. (2012). “Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería Ciencia e Ingeniería Neogranadina”. Vol. 22, núm. 1, pp. 43-58. Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia.

María G., (2011). "Determinar Los Perfiles De Temperatura De Un Horno Para Ladrillos Del Sector Chambo", Tesis De Grado, Riobamba, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.

Rodríguez, J. et al. (2004). “Perfiles de temperatura en un horno ladrillero”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 3, núm. 2, 2004, pp. 209-217, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa México.

Normas Mexicanas CMT-2-01-001/02 (2012). Características de los materiales. Parte 2 Materiales para estructuras, Título 01 Capítulo 001 Materiales y bloques cerámicos, de Secretaria de comunicación y Transportes. Sitio web: <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-01-001-02.pdf>

Norma Mexicana NMX-C-006-1976, Ladrillos y Bloques Cerámicos de Barro, Arcilla y/o similares.

Norma Mexicana NMX-C-404-1997-ONNCCE. Industria de la Construcción – Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso estructural – Especificaciones y Métodos de Prueba.

**[Título en Times New Roman y Negritas No.14]**

Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor

*Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva*

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

**Resumen**

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

**Abstract**

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

**Keyword**

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.11**

---

**Citación:** Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor. Título del Paper. Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

# Instrucciones para autores

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

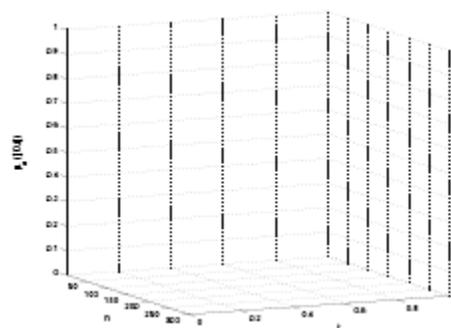
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

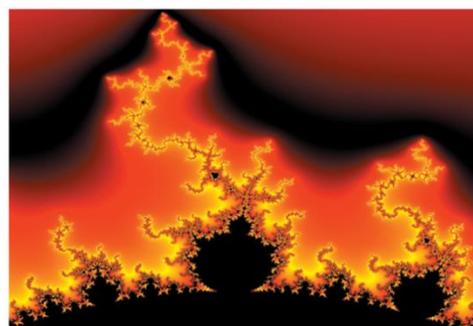
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]



**Grafico 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

## Instrucciones para autores

---

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

**Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:**

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

### Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

### Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

### Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

### Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

### Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

### Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

### Ficha Técnica

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor  
Referencia

**Formato de Originalidad**



Sucre, Chuquisaca a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

---

Firma (Signature):

---

Nombre (Name)

## Formato de Autorización



Sucre, Chuquisaca a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN-Bolivia a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN-Bolivia to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

\_\_\_\_\_  
Firma (Signature)

\_\_\_\_\_  
Nombre (Name)

# Revista Tecnología e Innovación

*“Observador lineal de dos grados de libertad en Matlab-Simulink-CarSim para velocidad lateral del automóvil”*

**SANDOVAL-Sergio, RUIZ-Daniel, TOPETE-Juan, GONZÁLEZ- Juan**

*Las leyes de Newton en el modelado y control del péndulo invertido sobre un carro”*

**GARCÍA-José, RAMÍREZ-Luis, SIORDIA-Xóchitl, MARTÍNEZ-Trinidad**

*“Aplicación del Software Thermo-Calc Prisma en el Análisis de la Precipitación de un Acero Ferrítico”*

**RODRÍGUEZ-Mario, LÓPE-Víctor, MIRANDA-Valeria, ESCAMILLA-Cristobal y ÁVILA-Osiris.**

*“Aplicación del Software Thermo-Calc y Dictra en el Diseño de Tratamientos Térmicos de Acero”*

**SAUCEDO-Maribel L., SORIANO-Tania, SERRANO-Eumir, AVILA, Erika**

*“Estudio comparativo de las películas de carbón como si fuera diamante, hidrogenado y con silicio”*

**SOLIS-José, ROBLERO-Sandra, CORTES-Sergio, CASTELLANOS-Víctor**

*“Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual”*

**DÍAZ-Sergio, GUTIÉRREZ-Citlalih.**

*“Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado”*

**CAMACHO-Aldo, PALACIOS-Luis, RAMÍREZ-Ignacio, VERA-Edgar, ANCHONDO-Lourdes**

*“Prueba de nodos CAN por medio de un SoC Cyclone V. “*

**MORALES-Salvador, CASTAÑEDA-Josefina, MINO-Gerardo.**

*“Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo”*

**CABALLERO-Carlos, CORTEZ-Liliana, MUÑOZ-German, CASTAÑEDA-Josefina.**

*“Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal”*

**JIMÉNEZ-Isamar, ÁVILA-Osiris, RESÉNDIZ-Celerino**

