

ISSN 2410-3993

Volumen 4, Número 11 – Abril – Junio 2017

Revista de Tecnología e Innovación

ECORFAN®

Indización



ECORFAN-Bolivia

Latindex

Research Gate

Hispana

Universia

Google Scholar

REBID

Mendeley

ECORFAN-Bolivia

Directorio

Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Regional

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

Director de la Revista

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Edición de Logística

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD

Diseñador de Edición

SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC

Revista de Tecnología e Innovación, Volumen 4, Número 11, de Abril – Junio 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: www.ecorfan.org, 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 30 de Junio 2017.

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
Química 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: Tecnología e Innovación

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.

Como primer artículo tenemos, *Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source*, por VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José, con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, como siguiente artículo tenemos, *Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo*, por ESQUEDA-ELIZONDO, José Jaime, CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos Alberto, JIMÉNEZ-BERISTÁIN -Laura, BERMÚDEZ-ENCARNACIÓN, Enrique Guadalupe, con adscripción en la Universidad Autónoma de Baja California, como siguiente artículo tenemos, *Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja*, por SILVA-JUÁREZ Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo, con adscripción en la Universidad Tecnológica de Puebla, como siguiente artículo tenemos, *Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel*, por ALONSO-PEREZ, Jorge, REYNOSO-SOTO, Edgar, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter, CAZAREZ-CASTRO Nohe, con adscripción en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, como siguiente artículo tenemos, *Producción híbrida de biodiesel solar con aceite vegetal usado en un concentrador cilíndrico parabólico*, por PÉREZ-BRAVO, Sheila Genoveva, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y SÁNCHEZ –BENAVIDES, Carlos Osvaldo, adscripción en la Universidad Politécnica De Altamira, y como último artículo tenemos, *Diseño de sistema de control automatizado con sistemas embebidos, aplicaciones móviles y el internet de las cosas*, por CALDERA, Carlos, LOPEZ, Jesús, OLIVAS, Héctor y GALLEGOS, José.

Contenido

Artículo	Página
Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José	1-13
Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo ESQUEDA-ELIZONDO, José Jaime , CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos Alberto, JIMÉNEZ-BERISTÁIN - Laura, BERMÚDEZ-ENCARNACIÓN, Enrique Guadalupe	14-23
Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja SILVA-JUÁREZ Alejandro , SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo	24-35
Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel ALONSO-PEREZ, Jorge, REYNOSO-SOTO, Edgar, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter, CAZAREZ-CASTRO Nohe	36-42
Producción híbrida de biodiesel solar con aceite vegetal usado en un concentrador cilíndrico parabólico PÉREZ-BRAVO, Sheila Genoveva , BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y SÁNCHEZ –BENAVIDES, Carlos Osvaldo	43-50
Diseño de sistema de control automatizado con sistemas embebidos, aplicaciones móviles y el internet de las cosas CALDERA, Carlos , LOPEZ, Jesús, OLIVAS, Héctor y GALLEGOS, José	51-62

Insturcciones para Autores

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source

VERGARA-BETANCOURT, Angel* †, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José

C.A, Instrumentación y Control, Div. Ing. Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla. Carr. Acuaco-Zacapoaxtla, Km 8, Col. Totoltepec, Zacapoaxtla, Puebla. C.P. 73680

Recibido Agosto 04, 2017; Aceptado Febrero 02, 2017

Resumen

En este artículo, se reporta el diseño e implementación de un controlador PI para regular la velocidad de un motor de DC. A partir de la respuesta del motor ante una entrada escalón, se observa la respuesta en lazo abierto y lazo cerrado y se determinan los parámetros a regular. La atenuación en la ganancia y la velocidad en respuesta, sugieren la implementación de un controlador clásico PI. Los parámetros de ganancia del controlador proporcional y controlador Integral, se calculan mediante la técnica de reubicación de polos y ceros. Con los valores calculados anteriormente, se diseña el controlador y se simula mediante las herramientas Open Source de Scilab/Xcos y con interfaz mediante Arduino. La respuesta observada en simulación corresponde con lo deseado y permite ajustar los valores de las ganancias, para implementar físicamente en un sistema de motor de DC. Los resultados obtenidos permiten mantener constante la velocidad del motor dependiendo los valores previamente establecidos, incluso para perturbaciones externas o cambios en la entrada de excitación.

Control PI, Reubicación de polos y ceros, Motor DC, Scilab/Xcos, Arduino

Abstract

In this article, we report the design and implementation of a PI controller to regulate the speed of a DC motor. From the response of the motor to a step input, the response in open loop and closed loop is observed and the parameters to be regulated are determined. The attenuation in the gain and the speed in response, suggest the implementation of a classic PI controller. The gain parameters of the proportional controller and Integral controller are calculated using the poles and zeros relocation technique. With the previously calculated values, the controller is designed and simulated using the Open Source tools of Scilab / Xcos and with interface through Arduino. The observed response in simulation corresponds to the desired and allows to adjust the values of the gains, to implement physically in a DC motor system. The results obtained allow to keep the motor speed constant depending on the previously established values, even for external disturbances or changes in the excitation input.

PI Control, Zero-Pole Relocation, DC Motor, Scilab/Xcos, Arduino

Citación: VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José. Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 1-13

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: a.vergara@live.itsz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

Introducción

En la actualidad, los sistemas de control son parte fundamental de la automatización de procesos (Arántegui, 2011), y a pesar de que en las últimas décadas se han desarrollado nuevas estrategias de control, tales como control moderno (Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, 1996), (Sandoval, 2016), control difuso (Kevin M. Passino, 1998), (Mandujano-Venegas, 2016), control adaptivo (Francisco Rodríguez Rubio, 1996), control óptimo, control mediante redes neuronales, etc. El control clásico PID (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010), (Ezeta, 2013), aún sigue siendo el más utilizado en la industria y otros campos de la ingeniería (Manfred Schleicher, 2003), esto debido a su sencillez, costo y fácil implementación.

En lo que respecta al campo de control de motores de DC, el control clásico sigue siendo una alternativa accesible que permite el diseño de controladores para regular posición y velocidad de forma inmediata e intuitiva (Henández, 2015). La implementación es sencilla y requiere componentes de bajo costo en el caso de controladores analógicos o bien de hardware-software al alcance de la mayoría, ya sea privativo o bien “*open source*”, si se trata de controladores digitales.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de control al motor de DC EMG49, con ayuda de herramientas “*open-source*”, en este caso Scilab/Xcos y Arduino. Para este propósito, el trabajo que aquí se presenta, muestra en primer lugar y a través de la función de transferencia (F.T.), el modelo matemático del moto-reductor EMG49, el cual ha sido obtenido experimentalmente y discutido en otros trabajos (Vergara Betancourt, Salazar Hidalgo, & Zapata Nava, 2017).

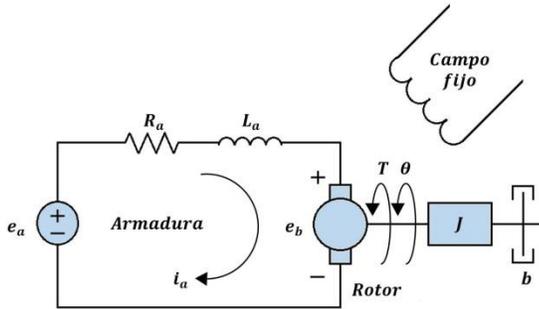
Posteriormente se analiza mediante simulación la respuesta en velocidad, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado y considerando perturbaciones al sistema. En base a los resultados observados se realiza una revisión de los sistemas de control clásico, y sus efectos en los rubros de estabilidad, ganancia y sensibilidad de la respuesta. Sustentados en las observaciones, se prosigue a diseñar y sintonizar el sistema de control correspondiente utilizando el método de reubicación de polos y ceros y se exponen los resultados en simulación como en respuesta real del desempeño del sistema ante cambios en la entrada y cuando este es perturbado de forma externa.

A continuación se implementa de manera física el sistema del motor de DC en lazo abierto y lazo cerrado utilizando herramientas “*open source*” (Scilab/Xcos y Arduino) y se observa su respuesta transitoria y en estado estable ante una perturbación escalón. Los resultados obtenidos demuestran que un control PI correctamente sintonizado es capaz de mantener la velocidad establecida al motor aun cuando existen perturbaciones que tienden a modificarla. Los alcances de este trabajo permitirán en un futuro implementar sistemas que requieran regular y mantener determinada velocidad en sistemas que se hallen en constante perturbación, tales como bandas transportadoras, robots móviles, impresoras 3D, seguidores solares, etc.

Modelo Matemático del Motor de DC

El primer paso para diseñar un sistema de control, es determinar el comportamiento dinámico de la planta a controlar, es decir, conocer su modelo teórico, en este caso, la F.T. de un motor de DC controlado por armadura.

Para el caso del motor representado por la figura 1, la función de transferencia en lazo abierto que relaciona la posición angular $\theta(t)$ del eje del motor como variable de salida, respecto al voltaje de armadura $e_a(t)$ como variable de entrada, queda definida por la ecuación 1 (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010).



por armadura

Fuente: Diseño propio, basado en (Nise, 2004)

Figura 1 Diagrama de cuerpo libre de un motor de DC controlado

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[(R_a + sL_a)(Js + b) + KK_b]}; \quad (1)$$

Donde K es la constante del par del motor, K_b es la constante de la fuerza contra-electromotriz del motor, R_a es la resistencia de armadura, L_a es la inductancia de armadura y será considerada despreciable para fines prácticos, J es el momento de inercia del motor, carga y tren de engranes y b es el coeficiente de fricción viscosa también de la combinación de motor, carga y tren de engranes.

Tomando en cuenta de que lo que se requiere es la F.T. que relacione la velocidad angular $\omega(t)$ de salida del motor respecto al voltaje de entrada $e_a(t)$, entonces, si se considera que $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, en el dominio de Laplace $\Omega(s) = s\Theta(s)$, por lo que la F.T. al despreciar L_a ahora se describe por la ecuación 2.

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{R_a(Js + b) + KK_b}; \quad (2)$$

Esta ecuación puede reescribirse a una forma más simple e intuitiva, si se realizan algunas simplificaciones tales como: $B = (b + \frac{KK_b}{R_a})$, $K_m = \frac{K}{R_a B}$, y $T_m = \frac{J}{B}$. Por lo cual la F.T. se reduce a la expresión de la ecuación 3.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1}; \quad (3)$$

La expresión anterior es característica de sistemas de primer orden, donde K_m representa la ganancia del sistema y T_m la constante de tiempo en el cual se logra alcanzar el 63.2% de salida total. Para diferentes valores de T_m , el sistema presenta comportamientos dinámicos como los descritos en el gráfico 1.

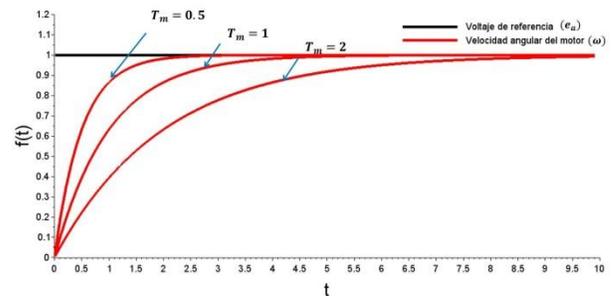


Gráfico 1 Respuesta dinámica del modelo del motor de DC para diferentes constantes de tiempo (T_m)

Fuente: Diseño propio

Respuesta en velocidad del motor de DC EMG49

Respuesta en Lazo Abierto

Para la mayoría de los motores los parámetros K_m y T_m de la expresión (3) son desconocidos y por lo tanto, no es posible conocer la respuesta exacta del motor. Para el caso específico de interés en este trabajo, la F.T. en lazo abierto del motor EMG49 (figura 2), ha sido obtenida con anterioridad (Vergara Betancourt, Salazar Hidalgo, & Zapata Nava, 2017) y está representada por la ecuación 4.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{143}{0.115s + 1} e^{-0.05s}; \quad (4)$$

La F.T. de la ecuación (4) se simula utilizando Xcos, considerando una entrada escalón unitario, que corresponde a una alimentación de 24V. Los resultados que se obtienen se presentan en el gráfico 2.

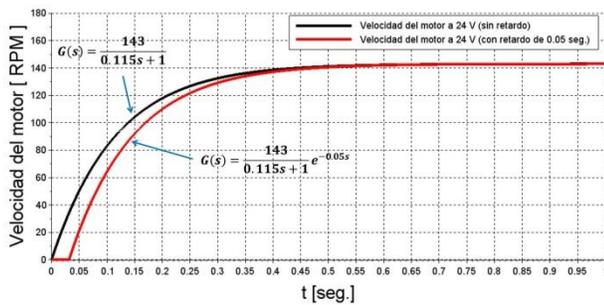


Gráfico 2 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 considerando la expresión con retardo y sin retardo

Fuente. Diseño propio

En la gráfica 2 se puede apreciar, que al aplicar un voltaje máximo al motor $E_a(s) = 24 V$, la velocidad de salida que se alcanza $\Omega(s)$ es de aproximadamente 140 RPM, velocidad que está determinada por la ganancia $K_m = 143$ y que se comprueba experimentalmente. Por otra parte, para alcanzar dicha velocidad, se requiere de aproximadamente 0.5 segundos.

También se puede apreciar que el término de retardo de la ecuación 4, no afecta la curva de respuesta del sistema, salvo por el retardo en el tiempo de carga, por lo que puede omitirse en los análisis subsecuentes y contemplar solo una respuesta de primer orden en lazo abierto, como el representado por la figura 2 y expresada por la ecuación 3. De esta manera $K_m = 143$ y $T_m = 0.115$ seg.

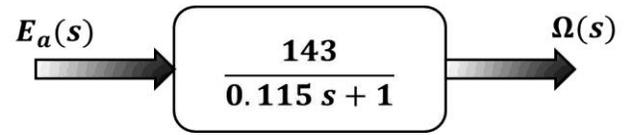


Figura 2 Diagrama a bloques en lazo abierto del motor EMG49

Fuente: Diseño propio

Respuesta en Lazo Cerrado

Con el propósito de controlar un sistema, es necesario que este sea realimentado, para comparar salida respecto a entrada, para ello, es necesario representar la entrada por medio de una velocidad de referencia, es decir, $\Omega_R(s)|_{E_a(s)=24V}$, de esta manera el diagrama de bloques en lazo cerrado queda descrito por la figura 3.

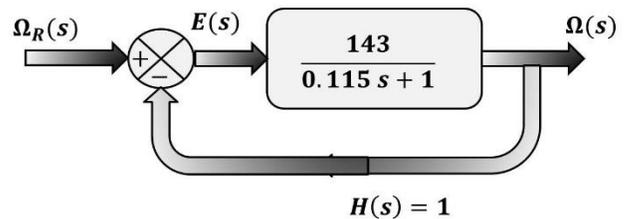


Figura 3 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria

Fuente: Diseño propio

Al realimentar el sistema, la velocidad de salida es comparada con la velocidad de entrada y se produce una señal de error $E(s) = \Omega_R(s) - \Omega(s)$. Esta señal de error por realimentación genera efectos sobre el desempeño del sistema (Kuo, 1996), ya sea incrementando o disminuyendo la ganancia global del sistema (velocidad), reduciendo la estabilidad del sistema, afectando la sensibilidad y contribuyendo a reducir los efectos de perturbaciones externas. Para efecto de análisis, la F.T. del motor será normalizada a la velocidad máxima, y la respuesta queda expresada en unidades normalizadas (u.n.), así que la ganancia de referencia para las simulaciones subsecuentes, será la unidad.

Por lo tanto, la F.T. de la ecuación 4, sin el término de retardo queda descrita por la ecuación 5.

$$G_n(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega_R(s)} = \frac{1}{0.115s + 1}; \quad (5)$$

De esta manera, un sistema realimentado queda descrito por la ecuación 6.

$$G_R(s) = \frac{G_n(s)}{1 + G_n(s)H(s)}; \quad (6)$$

Así y aplicando la ecuación (5), con una realimentación unitaria ($H(s) = 1$), la F.T. del motor en lazo cerrado queda descrita por la ecuación 7.

$$G_R(s) = \frac{1}{0.115s + 2}; \quad (7)$$

Al comparar mediante simulación la respuesta normalizada en lazo abierto (ecuación 5) con la respuesta normalizada en lazo cerrado (ecuación 7), se puede observar que la realimentación afecta inicialmente la ganancia y reduce la velocidad de salida, lo cual produce un error en estado estacionario (e_{ss}) del 50% en referencia a la velocidad deseada tal y como se aprecia en el gráfico 3.

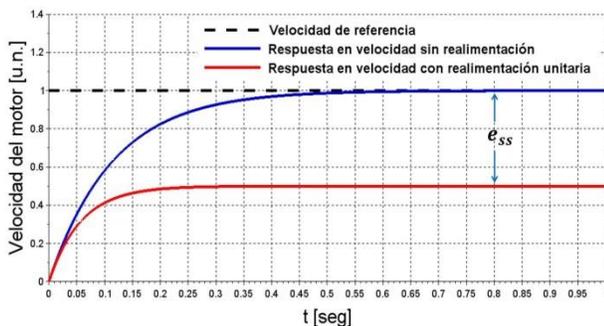


Gráfico 3 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria

Fuente: Diseño propio

Con los resultados antes mostrados, se plantea la necesidad de integrar al sistema un bloque que permita regular la velocidad a la salida y reducir el e_{ss} de tal forma que se mantengan las 140 RPM originales, a pesar de que el sistema sea realimentado.

Respuesta ante perturbaciones externas

Otro caso de estudio es cuando el sistema es perturbado con una señal externa, (figura 4), ya sea por una variación eléctrica o por una carga mecánica que modifique las revoluciones del motor (e_{ss}), por ejemplo en un 10% adicional a la salida del sistema realimentado, como se puede observar en el gráfico 4.

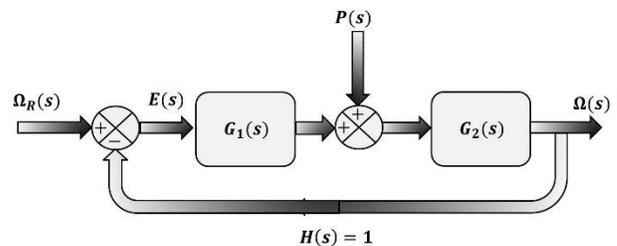


Figura 4 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria y perturbación externa

Fuente: Diseño propio

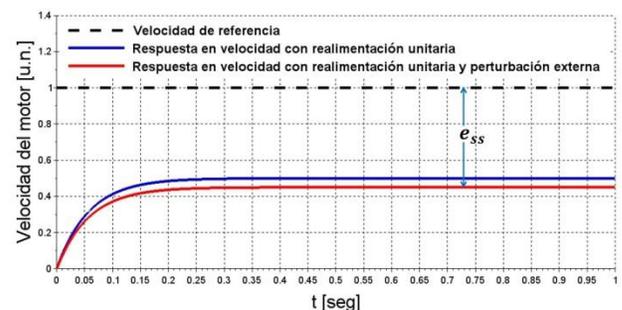


Gráfico 4 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y está sujeto a una perturbación externa. Existe un error en estado estable

Fuente: Diseño propio

Bajo esta circunstancia, también es necesario, implementar un bloque que compense estas variaciones y elimine o al menos reduzca el e_{ss} y mantenga constantes las RPM establecidas por el usuario para todo instante de tiempo. Además de que este bloque también debe permitir regular la respuesta transitoria, de tal manera que responda en tiempos cortos, evite grandes oscilaciones y mantenga la estabilidad del sistema.

Acciones de Control

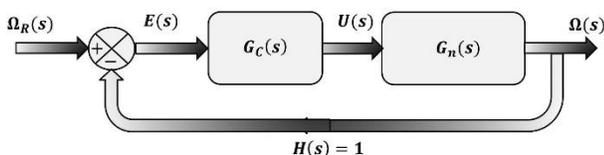


Figura 5 Diagrama a bloques en lazo cerrado del motor EMG49 con retroalimentación unitaria y con la inserción de un bloque de control ($G_C(s)$)

Fuente: Diseño propio

El bloque que se integra al sistema para regular la velocidad, es un bloque de control ($G_C(s)$), como se muestra en la figura 5.

Con la inserción de este bloque de control, la F.T. de lazo cerrado se modifica según la ecuación 8.

$$G_{CR}(s) = \frac{G_C(s)G_n(s)}{1 + G_C(s)G_n(s)H(s)}; \quad (8)$$

Para el caso de control clásico, este bloque $G_C(s)$, podría ser uno de los modos de control y sus F.T. que se están descritas en la literatura (Kuo, 1996), (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2010), tales como: control proporcional – P (ecuación 9), control integral – I (ecuación 10), la combinación de controles proporcional-integral – PI (ecuación 11), o el control proporcional-integral-derivativo – PID (ecuación 12).

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p; \quad (9)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}; \quad (10)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right); \quad (11)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right); \quad (12)$$

Donde K_p , es la ganancia proporcional, $T_i = K_p/K_i$, es el tiempo integral y $T_d = K_d/K_p$ es el tiempo derivativo y pueden ser constantes ajustables que definen la acción y tipo de respuesta del sistema controlado.

Diseño y sintonización del controlador PI por ubicación algebraica de polos

Después de varios experimentos mediante simulación (gráficos 6 al 7), utilizando la F.T. en lazo cerrado sin control (ecuación 7) y lazo cerrado con controlador (ecuación 8) y aplicando sintonización heurística de controladores, se determinó que el controlador que mejor respuesta ofrece y que no lleva a inestabilidad al sistema, es el control PI.

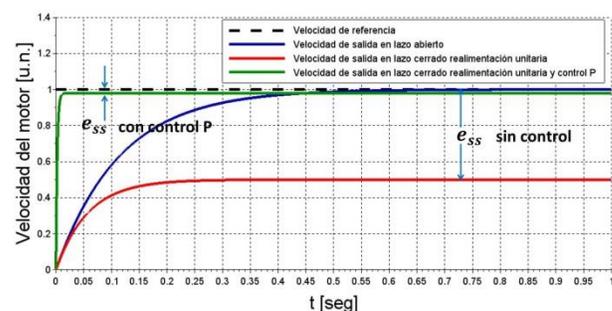


Gráfico 5 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo P. El error en estado estable se reduce

Fuente: Diseño propio

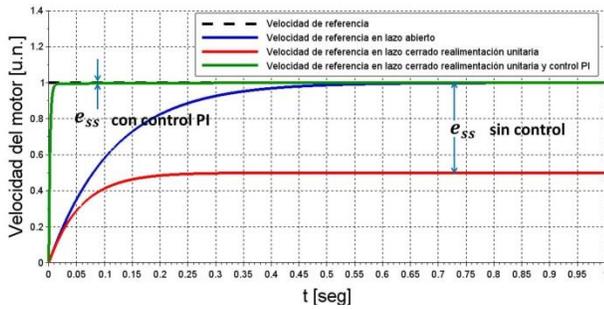


Gráfico 6 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo PI. El error en estado estable se elimina
Fuente: Diseño propio

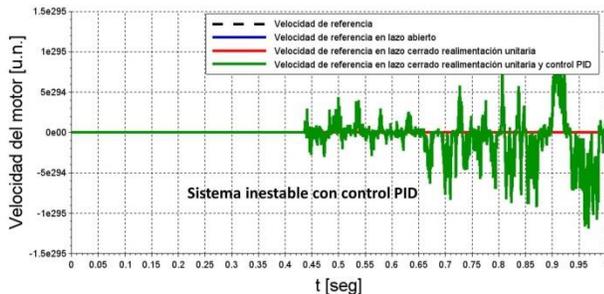


Gráfico 7 Respuesta dinámica del modelo del motor EMG49 cuando el sistema es realimentado con ganancia unitaria y se agrega un controlador tipo PID. El sistema se vuelve inestable
Fuente: Diseño propio

Con los resultados anteriormente mostrados se propone agregar un bloque de control con la F.T. correspondiente al control PI, tal y como se muestra en la figura 6.

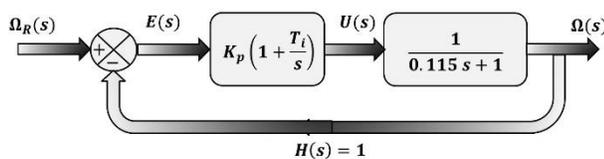


Figura 6 Esquema de Control PI para regular la velocidad del motor EMG49
Fuente: Diseño propio

De tal manera que la F.T. en lazo cerrado correspondiente (ecuación 8), sustituyendo los valores de la F.T. del motor, se reduce a la ecuación 13.

$$G_{CR}(s) = \frac{143(K_p s + K_i)}{0.115s^2 + (1 + 143K_p)s + 143K_i}; \quad (13)$$

El sistema en lazo cerrado tiene la forma de un sistema de segundo orden, cuya F.T. canónica es representada por la ecuación 14, sin considerar el cero de la expresión.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}; \quad (14)$$

La ubicación de los polos en el plano complejo, de la ecuación 14, determinan la estabilidad del sistema, como se observa en la figura 7 (Patiño, 2016).

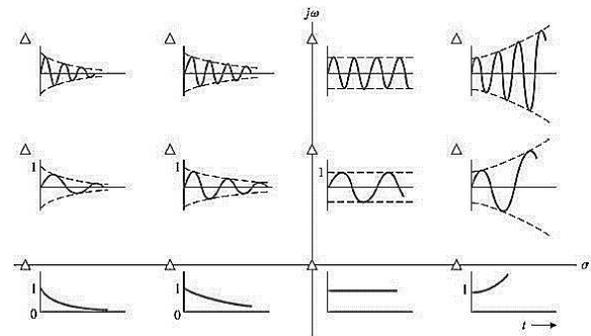


Figura 7 Estabilidad de sistemas en el plano complejo ante una entrada impulso
Fuente: (Patiño, 2016)

Polos en el semiplano izquierdo del plano s, aseguran la estabilidad del sistema, mientras que polos en el semiplano derecho, producen un sistema sería inestable, y polos sobre el eje imaginario, determinan un sistema críticamente estable.

Los parámetros que definen la expresión de la ecuación 14 están descritos en la tabla 1. Representan la ubicación de polos y ceros en el plano complejo. Por otro lado, su respuesta transitoria se muestra en el gráfico 8.

Parámetro	Relación matemática
Frecuencia natural del sistema	ω_0
Factor de Amortiguamiento	$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\ln^2(M_p)}}}$;
Frecuencia natural amortiguada	$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$;
Tiempo de levantamiento	$t_r = \frac{1}{\omega_d} \arctan\left(\frac{-\omega_d}{\zeta\omega_0}\right)$;
Tiempo pico	$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$;
Sobre paso máximo	$M_p = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$;
Tiempo de establecimiento (criterio del 2% y del 5%)	$t_s(2\%) = \frac{4}{\zeta\omega_0}$; $t_s(5\%) = \frac{3}{\zeta\omega_0}$;

Tabla 1 Parámetros característicos en la curva de respuesta transitoria de un sistema sub-amortiguado
Fuente: (Ezeta, 2013)

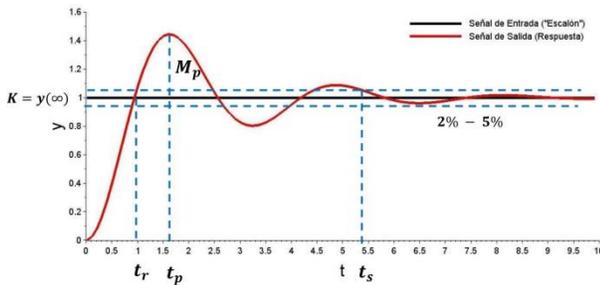


Gráfico 8 Parámetros que definen la respuesta transitoria del sistema controlado
Fuente: Diseño propio

A continuación se procede al diseño del controlador de velocidad, para ello en la tabla 2 se proponen condiciones que debe cumplir la respuesta transitoria del sistema controlado:

Parámetro	Condición
Tiempo de establecimiento	$t_s(2\%) < 1 \text{ seg}$
Tiempo pico	$t_p < 0.5 \text{ seg}$
Sobrepaso máximo	$M_p < 20 \%$

Tabla 2 Parámetros que se desean cumplir en la curva de respuesta transitoria del sistema controlado
Fuente: Diseño propio

Considerando las condiciones de la tabla 2, se procede al cálculo de las constantes K_p y T_i , para lo cual, se utilizó el método algebraico de reubicación de polos en el plano complejo.

Utilizando las ecuaciones 13 y 14, se obtienen las relaciones entre las ganancias de control y la ubicación deseada de los polos determinados por σ y ω_d (ecuación 15 y 16).

$$\frac{1 + 143K_p}{0.115} = 2\zeta\omega_n = 2\sigma; \tag{15}$$

$$\frac{143K_i}{0.115} = \omega_n^2 = \sigma^2 + \omega_d^2; \tag{16}$$

De las expresiones anteriores se obtienen los valores: $\sigma > 4$, $\omega_d > 6.28$ y $\zeta > 0.45$. Con esto, y considerando que $\zeta = \cos(\beta)$, se calcula que $\beta < 62.3^\circ$. Todos estos parámetros de grafican y se muestran en el gráfico 9.

En relación con el gráfico 9, se eligieron los polos en lazo cerrado igual a $-7 \pm 7j$ los cuales se encuentran dentro del área que cumple con las especificaciones del sistema. Se tomara el valor absoluto de dichos polos para despejar los valores de K_p y K_i . Por lo tanto $\sigma = 7$ y $\omega_d = 7$, de esta manera y mediante las sustituciones pertinentes, se obtienen las constantes del controlador: $K_p = 0.0042$ y $K_i = 0.078$.

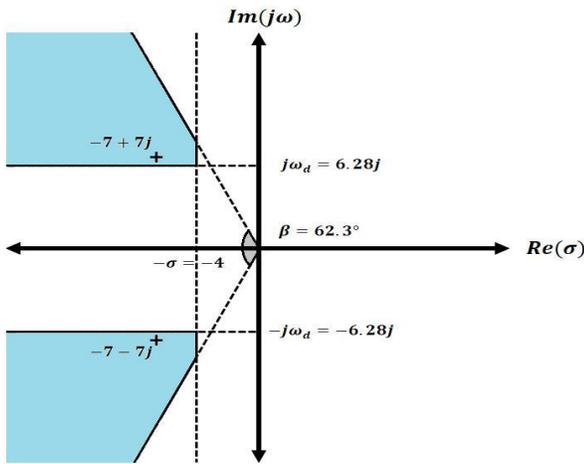


Gráfico 9 Parámetros de la respuesta deseada descritos en el plano complejo. El área en azul, contiene los valores que satisfacen los requerimientos de estado transitorio establecidos

Fuente: Diseño propio

Implementación del sistema de control

El sistema que se va a controlar como se ha mencionado anteriormente, es un motor de DC EMG49, el cual tiene una velocidad nominal de 122 RPM cuando es alimentado con una fuente de 24 V. Para la implementación del sistema de control, el motor es conectado a la computadora a través de la tarjeta Arduino Uno como se esquematiza en la figura 8.

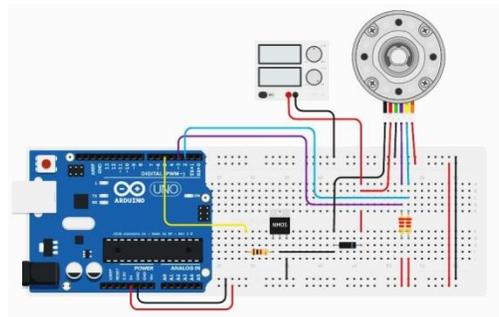


Figura 8 Esquema de conexiones entre el motor y la computadora, utilizando como interfaz la tarjeta Arduino Uno

Fuente: Diseño propio

El sistema de control se diseña utilizando Xcos y se basa en el modelo de la figura 9.

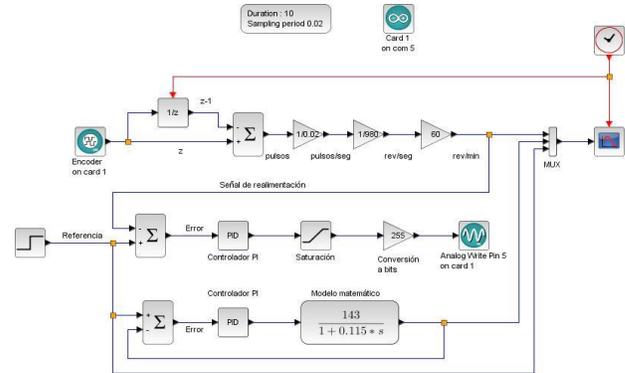


Figura 9 Modelo en Xcos de Scilab para la implementación del controlador PI de un motor de DC EMG49 con interfaz mediante Arduino Uno

Fuente: Diseño propio

El modelo de la figura 9, permite implementar y observar la respuesta del sistema físico con y sin la integración del sistema de control, así como comparar la respuesta simulada utilizando el la F.T. que describe a este sistema.

El sistema implementado permite que a través de pulsos PWM, se proporcione voltaje al motor. De esta manera, al introducir los valores de K_p y K_i calculados previamente en el bloque PID, se modifica el porcentaje del ciclo de trabajo de los pulsos PWM, consecuentemente, la velocidad también se modifica y según disminuya o se incremente el controlador PI permitirá regular la velocidad del motor. La velocidad se regula según la referencia establecida y para los experimentos presentados en este reporte, la referencia es de 100 rpm.

Resultados

Utilizando el modelo de la figura 9, se implementó y comprobó la respuesta del sistema con la integración del control PI. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en los gráficos 10, 11 y 12.

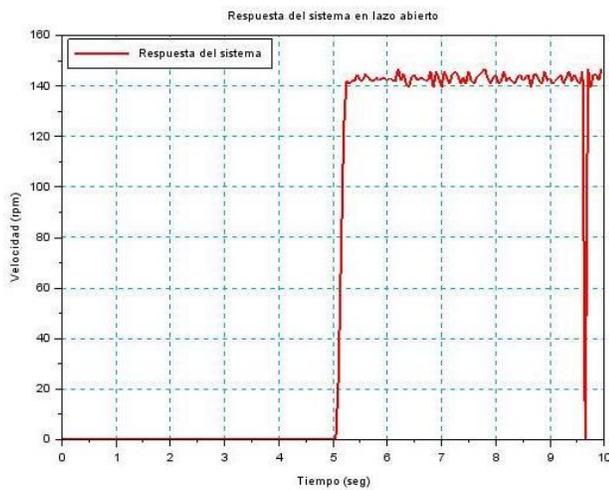


Gráfico 10 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo abierto y sin control cuando al sistema se le indica un “set point” de 140 RPM
Fuente: Diseño propio

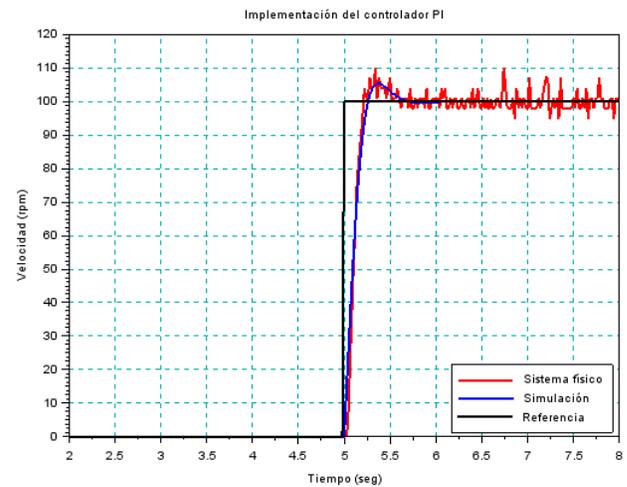


Gráfico 12 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado con control PI cuando al sistema se le indica un “set point” de 100 RPM
Fuente: Diseño propio

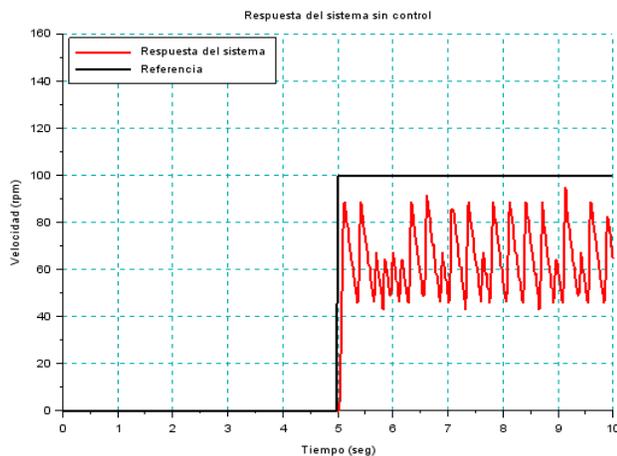


Gráfico 11 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado y sin control cuando al sistema se le indica un “set point” de 100 RPM
Fuente: Diseño propio

Como se puede apreciar en el gráfico 12, la velocidad establecida se mantuvo a pesar de que el sistema se halla realimentado.

Es importante hacer notar que las curvas que representan la respuesta del sistema en físico, y representadas en color rojo, de los gráficos 10, 11, 12 y subsecuentes, presentan un comportamiento no suavizado, esto se debe a efectos de ruido y variaciones en la corriente de salida al motor y que no se consideraron o se despreciaron en el modelo teórico y que condujeron a la construcción del modelo de simulación (líneas en color azul).

De igual manera se realizaron otras pruebas considerando diferentes valores de referencia en la velocidad de salida. Los resultados se presentan en el gráfico 13.

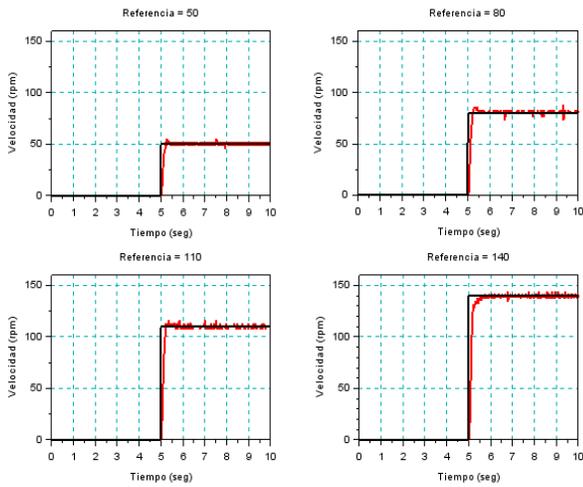


Gráfico 13 Respuesta experimental de la velocidad controlada del motor EMG49, ante diferentes valores de referencia

Fuente: Diseño propio

Al igual que en el primer caso, la velocidad del motor que se establece se alcanza en un tiempo mínimo y se mantiene, logrando un error en estado estacionario prácticamente nulo. Otra de las pruebas que se hicieron, es cuando el sistema es perturbado por una señal externa, como se explicó en la figura 4.

En este caso, esta perturbación se simula, intentando detener el avance del motor, aplicando un torque en sentido contrario al del giro del motor, lo que implicaría una reducción en la velocidad del mismo. Sin embargo, con la inclusión del control PI, la velocidad logra mantenerse, como se aprecia en el gráfico 14.

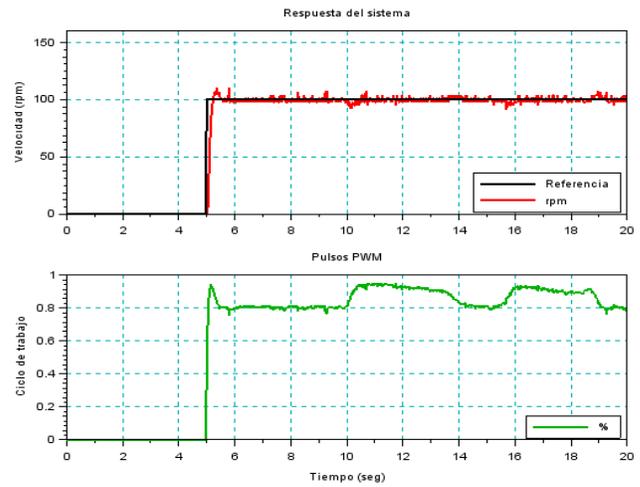


Gráfico 14 Respuesta experimental de la velocidad del motor EMG49, en lazo cerrado con control PI (en rojo) cuando al sistema es perturbado con una entrada externa. La velocidad de 100 RPM se logra mantener gracias a un incremento en la corriente del motor (en verde) que permite compensar las pérdidas debidas a la perturbación

Fuente: Diseño propio

En la parte superior del gráfico 14 se puede observar que el motor mantiene la velocidad de referencia que en este caso es de 100 rpm a pesar de la perturbación aplicada. En la parte inferior de esta gráfica, se observa como el porcentaje de los pulsos PWM aumenta cuando la perturbación es aplicada, es decir, el sistema aumenta el voltaje aplicado al motor y con ello la corriente que permite contrarrestar la carga externa.

Conclusión

El desarrollo de este proyecto, implicó una serie de retos, entre los cuales se encuentran, el análisis de la respuesta del sistema, la integración de software y hardware “open source”, el cálculo de los parámetros del controlador y la implementación experimental del sistema. Sin embargo, al final el controlador propuesto y que fue implementado permitió controlar la velocidad del motor a un valor de “set point” definido por el usuario.

Para el caso que aquí se ha presentado, este valor ha sido de 100 rpm, sin embargo, se puede variar desde una velocidad de 1 rpm hasta una velocidad nominal máxima del motor de 143 rpm. De esta manera, el motor es capaz de alcanzar la velocidad de referencia incluso si hubiese alguna perturbación, es decir, el sistema automáticamente se encarga de eliminar el error para mantener la referencia establecida.

Por otra parte, se concluye también que el modelo experimental que se tiene, representa una aproximación muy adecuada al modelo ideal. A pesar de que existen algunas diferencias, principalmente derivadas de efectos de ruido y/o despreciar términos de fricción y otros factores, este modelo permite diseñar un sistema de control y los resultados obtenidos son muy adecuados a lo que se esperaba obtener. Con el control de velocidad del motor se pueden pensar en distintas aplicaciones. Por ejemplo, la implementación del motor a una banda transportadora para regular la velocidad de la misma, cuando una perturbación externa (objeto de mayor peso puesto sobre ella), tienda a reducir la velocidad, o bien, un sistema de robot móvil, donde una pendiente pueda inducir a incrementar o reducir la velocidad del mismo. Con el sistema de control, se espera que estas variaciones de velocidad sean compensadas y se logre tener sistemas estables, fiables y de alta precisión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al TecNM, así como al PRODEP por el apoyo recibido para la ejecución de proyectos y por respaldar el trabajo de CA's, en particular el del CA de Instrumentación y Control, ya que permiten el desarrollo de investigación e integración de alumnos para estas actividades. De igual manera le agradecen al ITS Zacapoaxtla, ya que a través del financiamiento para proyecto con registro PLIM-17-03, se han logrado los resultados aquí reportados.

Referencias

- Arántegui, J. (2011). *Control de procesos*.
- Burns, R. S. (2001). *Advanced Control Engineering*. Butterworth Heinemann.
- Ezeta, R. F. (2013). *Análisis y Diseño de Sistemas de Control Digital*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill.
- Francisco Rodríguez Rubio, M. J. (1996). *Control Adaptivo y Robusto*. España: Universidad de Sevilla.
- Geir E. Dullerud, F. G. (s.f.). *A Course in Robust Control Theory*. Springer.
- Guillén, M. E. (2017). *Escuela de Ingeniería Electrónica Tecnológico de Costa Rica*. Recuperado el 2016, de Escuela de Ingeniería Electrónica Tecnológico de Costa Rica: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Laboratorio/3.7Identificacion%20de%20sistemas.PDF#page=1&zoom=auto,-107,248>
- Hernandez-Carlos, Peza-Edebaldo, Garcia-Enrique, Torres-José. Simulación de los Sistemas de Control Proporcional Derivativo y Proporcional Integral Derivativo de un Servomecanismo de segundo orden bajo la plataforma de LabVIEW. *Revista de Tecnología e Innovación* 2015, 2-4:688-700.
- K.M. Hangos, J. B. (2004). *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer.
- Kevin M. Passino, S. Y. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley Longman, Inc.
- Kunusch, C. (2003). *Identificación de Sistemas Dinámicos. Cátedra de Control y Servomecanismos*. Universidad Nacional de la Plata.
- VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José. Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source. *Revista de Tecnología e Innovación* 2017.

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (Séptima ed.). México: Prentice Hall.

Madujano-Venegas, Claudia, Velázquez-Trujillo, Sabino, Escobar-Gómez, Elías Y Rios Rojas, Carlos. Diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor en la producción de tejas, utilizando lógica difusa apoyada con LabVIEW. *Revista de Sistemas Experimentales* 2016, 3-9: 29-36

Manfred Schleicher, F. B. (2003). *Control Engineering: A guide for Beginners*. Germany: JUMO GmbH & Co.

Melanie, M. (1999). *An Introduction to Genetic Algorithms*.

Nise, N. (2004). *Control Systems Engineering*. USA: John Wiley & Sons.

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

Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. México: Pearson Education.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5ta. ed.). Madrid, España: Pearson Educación.

Patiño, D. (2016). *Diego Patiño WebSite*. Recuperado el Octubre de 2017, de <https://www.dropbox.com/s/m8m2feohrh016hz/clase2cont.pdf?dl=0>

Sandoval, Sergio, Ruiz, Daniel, Topete, Juan, González, 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

Vergara Betancourt, A., Salazar Hidalgo, E., Zapata Nava, O. J. (2017). Obtención de la función de transferencia de un motor de DC mediante el análisis de la curva de reacción. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*.

Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo

ESQUEDA-ELIZONDO, José Jaime *†, CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos Alberto, JIMÉNEZ-BERISTÁIN -Laura, BERMÚDEZ-ENCARNACIÓN, Enrique Guadalupe

Universidad Autónoma de Baja California

Recibido Enero 07, 2017; Aceptado Junio 13, 2017

Resumen

Se presenta el análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo. Todos los sujetos contemplados en la muestra tienen habilidades para el dibujo y artes plásticas. Se inicia adquiriendo las señales electroencefalográficas mediante la plataforma Epoc Emotiv, mientras el sujeto se encuentra en reposo. Se tomaron tres minutos de muestras con los ojos cerrados y se solicitó al mismo mantener la mente en blanco. Se tomó el registro electroencefalográfico al realizar el bosquejo elegido por el, sobre una hoja en blanco, durante los primeros tres minutos. Se suspendió el registro de la señal hasta que el dibujo estuvo avanzado, se le solicitó que comenzara a detallarlo para continuar la toma del registro durante otros tres minutos. Posteriormente, las señales adquiridas se procesan en Matlab mediante la Transformada Wavelet Continua y el Teorema de Wiener Khinchine con el fin de determinar los momentos en los que se presentó mayor actividad electroencefalográfica, así como la potencia total, respectivamente.

Dibujo, Señales Electroencefalográficas, Transformada Wavelet, Teorema de Wiener Khinchine

Abstract

The analysis of electroencephalographic signals of people developing drawing activities is presented. All the subjects considered in the sample have skills for drawing and plastic arts. The test starts by acquiring electroencephalographic signals while the individual rests through the Epoc Emotiv platform; this step is important to determine a reference. Three minutes of samples are taken with closed eyes and the subjects are asked to keep the mind blank. Subsequently, the electroencephalographic record is taken while sketching what the subject wish to draw on a blank sheet for three minutes. While the sketch is developed the record is suspended and once it is advanced the user is asked to start detailing the drawing and the data acquisition continues during three minutes. Then, the acquired signals are analyzed in Matlab by using Wavelet Transform in order to determine the moments in which the electroencephalographic activity was high and the power registered from each electrode is determined with the Wiener Khinchine Theorem also in Matlab.

Drawing, Electroencephalographic Signals, Wavelet Transform, Wiener Khinchine Theorem

Citación: ESQUEDA-ELIZONDO, José Jaime, CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos Alberto, JIMÉNEZ-BERISTÁIN -Laura, BERMÚDEZ-ENCARNACIÓN, Enrique Guadalupe. Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 14-23.

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jjesqueda@uabc.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El cerebro humano es el órgano encargado de controlar y regular las acciones y reacciones del cuerpo, contiene alrededor de cien mil millones de neuronas las cuales interactúan y envían información mediante impulsos eléctricos y reacciones químicas (Tortora et al., 2016). Su estudio y análisis es una tarea compleja, pero de mucho interés en áreas médicas, tales como el diagnóstico de los trastornos cerebrales. En la actualidad se cuenta con diversas técnicas para su observación principalmente los métodos autorregresivos, en concreto, este trabajo se centra en el uso de la Transformada Wavelet Continua, entre otros.

El electroencefalograma (EEG) es una herramienta clínica no invasiva capaz de monitorear y registrar la actividad eléctrica producida en la corteza cerebral, lo cual nos permite observar cambios de voltaje generados de las señales recibidas en cualquier instante de tiempo.

La función integradora del sistema nervioso es procesar los datos procedentes de estímulos externos, la percepción, la cual tiene una importante relación con las actividades artísticas asociadas al hemisferio derecho del cerebro, que relaciona las emociones, la creatividad y el aprendizaje no verbal. Precisamente, el dibujo, es una de estas actividades artísticas que además tiene evidencia electrofisiológica de activar más grandes redes neuronales en el cerebro en comparación con otras actividades, tal como la escritura. (Van der Meer et al., 2017).

La secuencia de eventos que desemboca la actividad creativa implica la participación de múltiples funciones mentales dando pie a variaciones de voltajes que pueden ser monitoreados mediante el método electroencefalográfico.

Las pruebas realizadas fueron analizadas mediante la Transformada Wavelet Continua, la cual ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de señales EEG, debido a las características no estacionarias de la señal, además de reflejar sus coeficientes en el dominio del tiempo-frecuencia y su capacidad de descomposición multiresolución. (Medina et al., 2017).

Se solicitó a 7 estudiantes de entre 18 y 25 años, los cuales poseen habilidades artísticas de dibujo, que realizaran un dibujo a libre elección mientras se les realizaba un encefalograma, las muestras fueron tomadas con un dispositivo Headset EPOC cuyo software graficaba las señales encefalográficas y a su vez, permitía el almacenamiento de los datos para su posterior procesamiento en Matlab. Al aplicar los métodos previamente mencionados se espera identificar zonas de activación o de mayor potencia registradas durante el proceso.

Metodología

Adquisición de las señales electroencefalográficas

En la figura 1a se muestra la diadema (headset) EPOC utilizada y en la figura 1b se presenta la distribución de los catorce electrodos (canales), más dos electrodos que se utilizan como referencia. Los electrodos se distribuyen en la parte occipital, parietal y frontal de la cabeza, su nomenclatura indica la región de la misma donde están ubicados: frontal (F), central (C), parietal (P), occipital (O), temporal (T) y fronto-parietal (FP). En la figura 1b se muestra la posición de los electrodos de la diadema EPOC y Matthieu (2012) presenta la comparación con la distribución de los electrodos de un encefalógrafo tradicional de 64 electrodos.

Hay que resaltar que los electrodos CMS y DRL son usados como alución de este equipo comercial es capaz de adquirir señales encefalográficas con muy buena calidad, tal como lo muestran Kridsakron (2012) y Matthieu (2012). Asimismo, el headset tiene un ADC de 16 bits, con una resolución de $0.51 \mu\text{V}$ y descarta los dos bits menos significativos para minimizar los efectos del ruido instrumental.

La herramienta EPOC tiene una frecuencia fija de muestreo de 128 Hz, aunque de forma interna se sobremuestra a 2048 Hz por canal, pero este ancho de banda se usa para eliminar señales de muy alta frecuencia de otros aparatos que pueden generar alias a las señales del cerebro. Posteriormente, la señal es filtrada y reducida a un ancho de banda de 128 Hz para la transmisión inalámbrica, finalmente la señal se limita con un filtro digital (de 0.2 a 45 Hz) a un ancho de banda de 43 Hz para evitar interferencias de 50 y 60 Hz. En Esqueda Elizondo (2015, 2017) se presentan los rangos de frecuencia en los que se clasifican las señales encefalográficas.

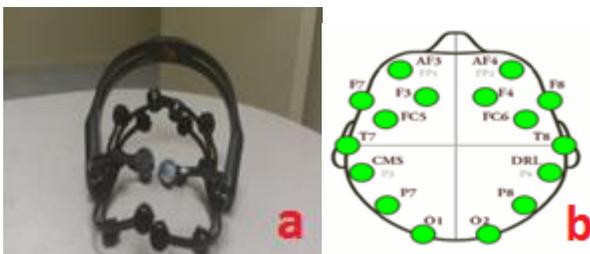


Figura 1 a) Diadema (headset) Epoc Emotiv y 1b) la distribución de los electrodos en la cabeza

Fuente: a) Propia, b) Emotiv.com

En Duvinage (2012) se presenta una comparación del headset Epoc Emotiv con un dispositivo de grado médico con una muestra de siete sujetos, desarrolladas tanto sentados en una silla como de caminando a 3 km/hr en una caminadora y encontraron una alta concordancia en las mediciones y relaciones señal a ruido similares."

Algoritmos empleados para el análisis de señales EEG

Las muestras obtenidas en cada prueba se procesan en Matlab, primero mediante una metodología basada en el Teorema de Wiener Khintchine, el cual permite encontrar la Densidad Espectral de Potencia, es decir, cómo se distribuye la potencia de la señal EEG en función de la frecuencia para cada electrodo, como lo presenta Esqueda Elizondo (2015).

De esta forma se puede determinar cuáles electrodos registraron mayor actividad eléctrica para así encontrar valores de potencias significativas que representen de manera general la energía presente en cada uno de los hemisferios cerebrales (izquierdo o derecho). Asimismo, se puede determinar qué banda de frecuencia fue la más activa en cada hemisferio, electrodo o región (figura 1b). Sin embargo, para este caso sólo se requiere conocer la potencia total.

Teorema de Wiener Khintchine

El Teorema de Wiener-Khintchine presentado por Proakis (2007) expresa que la Densidad Espectral de Potencia y la Correlación son pares Transformados de Fourier, es decir:

$$S_{xx}(f) = F[R_{xx}(\tau)] \quad (2)$$

$$S_{xx}(\tau) = F^{-1}[R_{xx}(f)] \quad (3)$$

Dónde $S_{xx}(f)$ es el autoespectro o Densidad Espectral de Potencia y $R_{xx}(\tau)$ es la Autocorrelación, ambas referidas a la señal $x(t)$.

Densidad Espectral de Potencia $S_{xx}(f)$

La Densidad Espectral de Potencia se calcula aplicando la operación de autocorrelación a nuestra señal de entrada.

$$P_T = R_{xx}(0) \quad (4)$$

Primero, se calculó la autocorrelación numérica de las N muestras con N/4 atrasos y de la muestra N/4 + 1 hasta N-1 se insertaron ceros para lograr una interpolación en el dominio de la frecuencia, ésto para mejorar la estimación. A la secuencia generada con los ceros insertados se calculó la Transformada Discreta de Fourier (TDF) y el resultado fue una nueva secuencia en el dominio de la Frecuencia, como lo presenta Esqueda Elizondo (2015).

Transformada Wavelet Continua

Se analizan las muestras mediante la Transformada Wavelet Continua, para el análisis tiempo-frecuencia de las señales obtenidas. Se define matemáticamente mediante la expresión:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (5)$$

Donde $\psi_{s,\tau}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ es la wavelet madre; en el presente artículo se utilizó la Wavelet Haar.

La Transformada Wavelet Continua es utilizada en las señales EEG para disminuir el ruido y con ello obtener una señal mucho mas clara y precisa, además es una herramienta que permite observar la relación Tiempo-Frecuencia en una señal (Guevara, 2014).

Para este trabajo se obtiene la Transformada Wavelet Continua con la función *cwt* de Matlab y se trabajó con diez niveles de descomposición que muestran los momentos con mayor potencia en función de la frecuencia y el tiempo representados gráficamente en escalogramas. El escalograma es una representación gráfica de la Transformada Wavelet donde se muestra el tiempo en el eje horizontal y la escala de frecuencias en el eje vertical y está dado por la ecuación:

$$\iint |CWT(\tau, \alpha)|^2 \frac{d\tau, d\alpha}{\alpha^2} = E_x \quad (7)$$

Donde $E_x = \int |x(t)|^2 dt$

La distribución de energía en el escalograma está representada por cambios de tonalidad (figura 2), donde el color azul oscuro representa las potencias más bajas y conforme aumenta la potencia, la tonalidad cambia hasta el color rojo que indica la máxima potencia.

Posteriormente, se realiza el muestreo en tiempo por eventos de forma manual y por sujeto, considerando como eventos a los momentos en que se registraron mayores potencias según el escalograma que resulta de la transformada de Wavelet implementada en Matlab. Obteniendo gráficamente los eventos de mayor actividad durante cada proceso correspondiente.



Figura 2 Barra de color que ilustra al escalograma.

Fuente: Generada en Matlab, mapa de color

Resultados

Pruebas realizadas

Para estas pruebas se tomaron muestras de siete personas, identificadas como sujetos, ajustando previamente los catorce electrodos para proceder al registro electro-encefalográfico. En la Tabla 1 se muestra la edad y el sexo de los sujetos a analizar.

Sujeto	Sexo	Edad
1	Femenino	19
2	Femenino	24
3	Masculino	24
4	Femenino	20
5	Femenino	20
6	Masculino	20
7	Masculino	24

Tabla 1 Descripción de la muestra

Fuente: Propia

Inicialmente, se le pide al sujeto mantener su mente en blanco. Posteriormente, se toma el registro de la primera prueba que consiste en realizar un bosquejo seleccionado por el mismo en una hoja en blanco durante los primeros tres minutos.

La segunda prueba consistió en detallar el dibujo, se tomó registro durante tres minutos.

Una vez adquiridas las señales se procesaron en Matlab mediante el Teorema de Wiener Khintchine para determinar la potencia total por canal. Posteriormente se utiliza la Transformada Wavelet Continua para determinar los eventos, mediante inspección visual, en los que se presenta mayor actividad desplegada de forma gráfica en un escalograma para cada canal.

En el gráfico 1 se presentan las potencias por canal de todos los sujetos, para la prueba uno, correspondiente a la etapa de bosquejo.

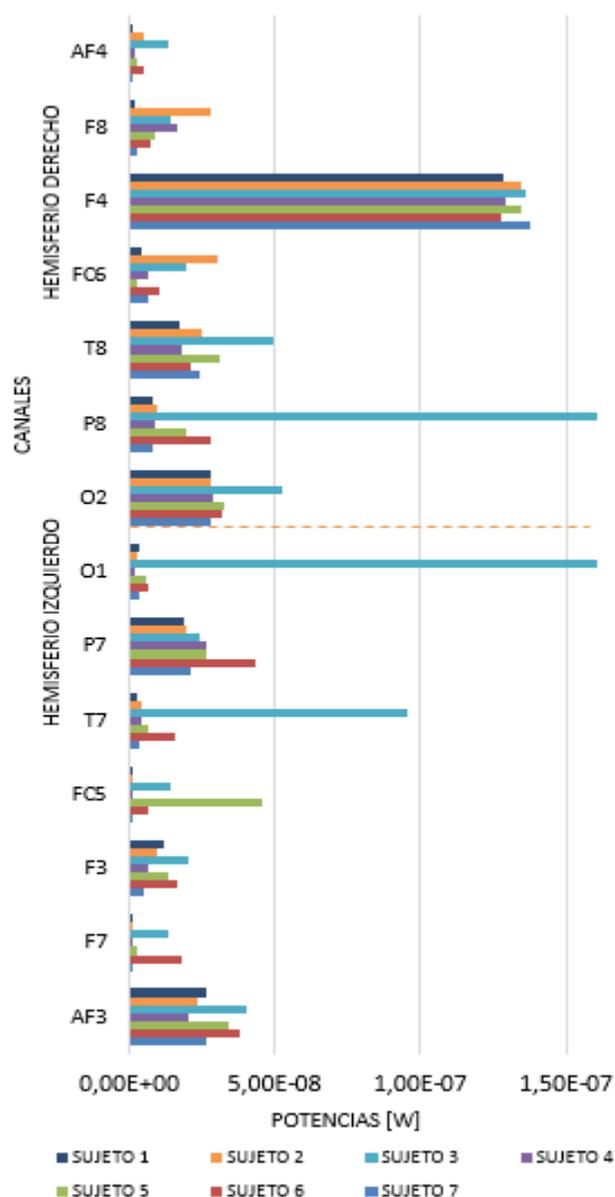


Gráfico 1 Comparación de las potencias de cada sujeto para todos los canales, prueba 1

Fuente: Propia

En el gráfico 2 se grafican las potencias por canal de todos los sujetos para la prueba 2 que corresponde a la etapa de detallado del dibujo.

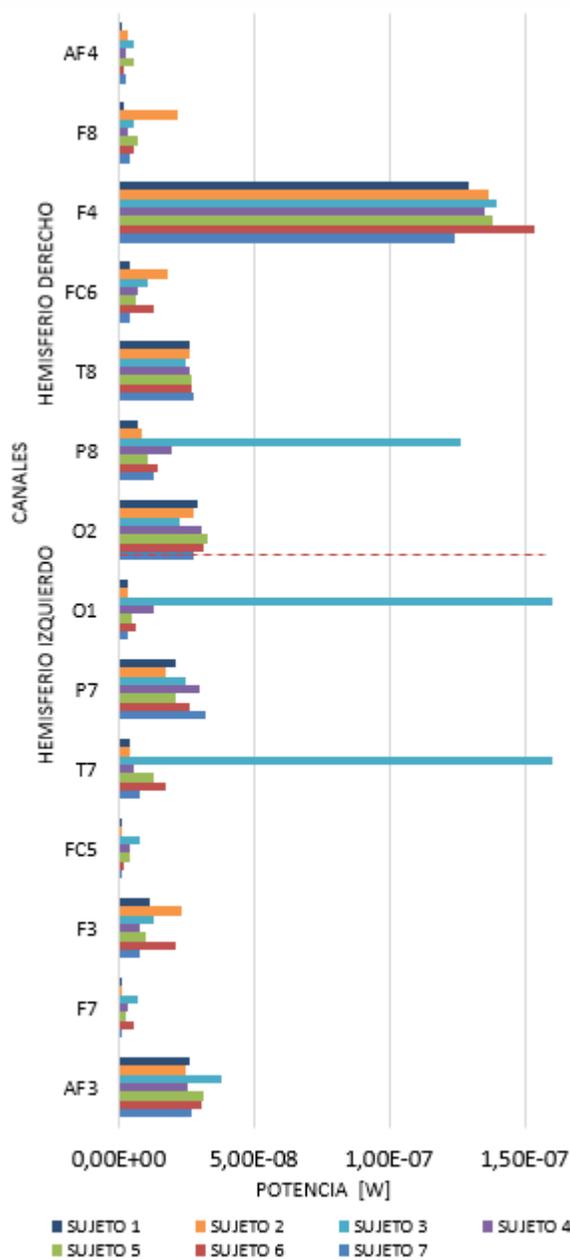


Gráfico 2 Comparación de las potencias de cada sujeto para todos los canales, prueba 2
Fuente: propia

Del gráfico 1 se observa que la mayor parte de las potencias altas se concentra en los canales F4, O2, P7, T8 y AF3, se seleccionaron estos canales para el análisis ya que las potencias más altas de la mayoría de los sujetos coincidieron en éstos.

Cabe resaltar que para el sujeto 3 sus potencias de los canales P8, O1 y T7, sobresalen notablemente en comparación con los demás sujetos, por fines de practicidad, se manejarán los canales en los que coinciden la mayoría de los sujetos. De igual forma, para el gráfico 2, seleccionamos los canales que concentran las potencias más altas de la mayoría de los sujetos, los cuales fueron F4, O2, P7, T8 y AF3, los mismos canales seleccionados para la prueba 1.

De ambos gráficos se observa que los canales del hemisferio derecho registran potencias más altas en comparación con el hemisferio izquierdo inclusive, el canal F4 correspondiente al lóbulo frontal derecho presentó la mayor cantidad de energía de todos los sujetos en ambas pruebas, a excepción del sujeto 3.

En la tabla 2 se muestran numéricamente las potencias en nanoWatts de los canales seleccionados para el análisis de la prueba 1, bosquejo, mientras que en la tabla 3 se muestran para la prueba 2, correspondiente al detallado del dibujo.

Sujeto	Potencia por electrodo [nW]				
	F4	O2	P7	T8	AF3
1	127.984	28.025	18.630	17.532	26.138
2	134.663	27.871	19.404	24.805	23.229
3	136.137	52.145	24.016	49.158	40.550
4	128.780	28.527	26.816	18.019	20.302
5	134.640	32.949	26.472	31.173	33.763
6	127.500	31.649	43.618	20.951	37.880
7	137.330	28.080	21.047	23.943	26.552

Tabla 2 Potencias por sujeto de los canales con mayor actividad para la prueba 1
Fuente: Propia

Sujeto	Potencia por electrodo [nW]				
	F4	O2	P7	T8	AF3
1	129.204	29.237	20.799	25.946	26.047
2	136.355	28.114	17.477	26.207	24.976
3	139.945	22.891	24.599	24.720	37.725
4	134.920	30.962	29.746	26.081	25.327
5	138.400	33.036	21.192	26.873	31.312
6	153.410	31.490	26.509	27.167	30.500
7	123.940	27.846	32.270	27.860	27.134

Tabla 3 Potencias por sujeto de los canales con mayor actividad para la prueba 2

Fuente: Propia

Con el gráfico 3 se muestra una comparación entre las potencias totales del canal F4 (el de mayor potencia) en ambas pruebas para cada sujeto.

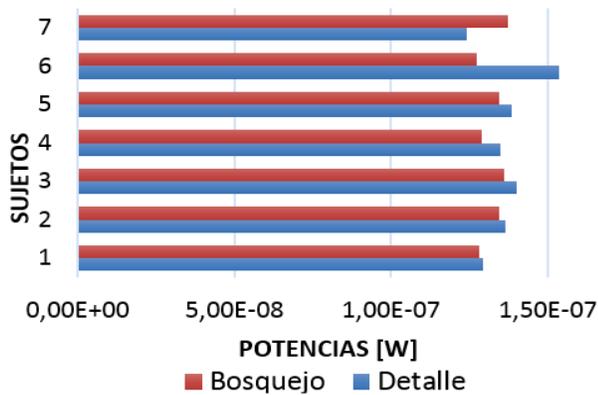


Gráfico 3 Potencias del canal F4 de ambas pruebas para cada sujeto

Fuente: propia

Este gráfico se utilizó para comparar la potencia total registrada por cada sujeto en ambas pruebas, sin mostrar la distribución de la energía en el tiempo y la frecuencia en cada una, para lograr lo anterior se emplearon los escalogramas. En seguida, se presentan dos escalogramas por cada sujeto, uno por cada prueba, para visualizar lo antes descrito.

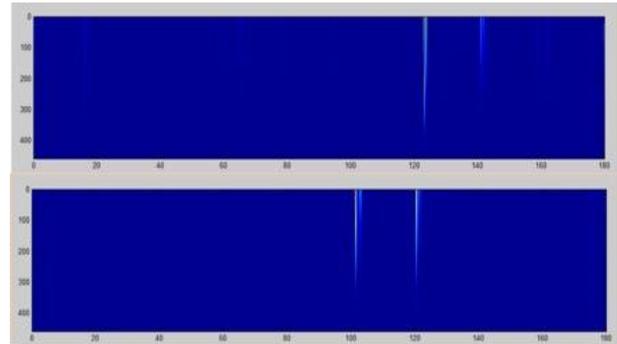


Figura 3 Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal T8 Sujeto 1. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)

Fuente: Elaboración propia

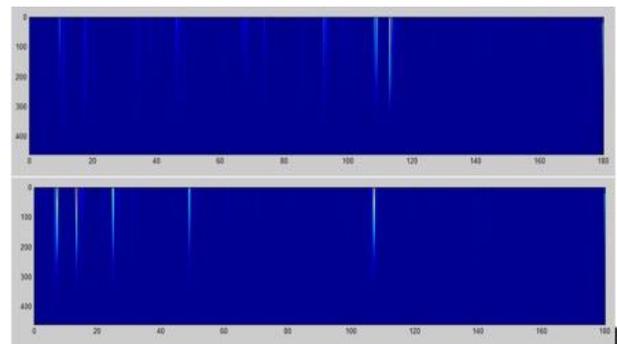


Figura 4 Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal T8 Sujeto 2. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)

Fuente: Elaboración propia

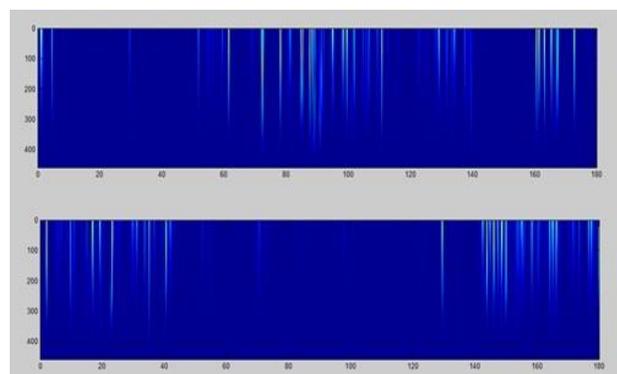


Figura 5 Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal AF3 Sujeto 3. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)

Fuente: Elaboecacion propia

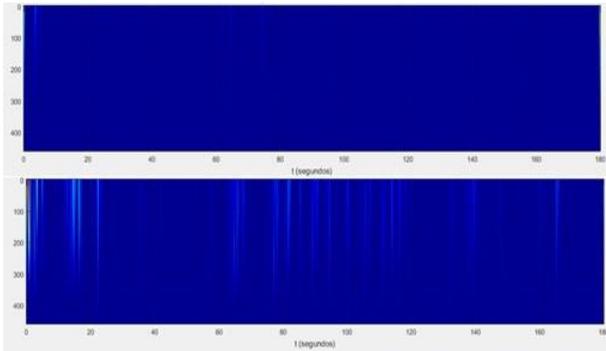


Figura 6 Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal AF3 Sujeto 4. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)
Fuente: *Elaboración propia*

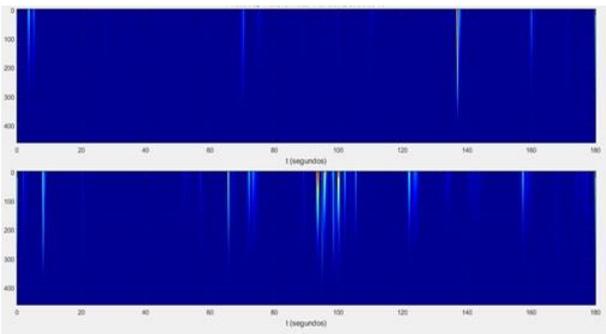


Figura 7. Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal T8 Sujeto 5. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)
Fuente: *Elaboración propia*

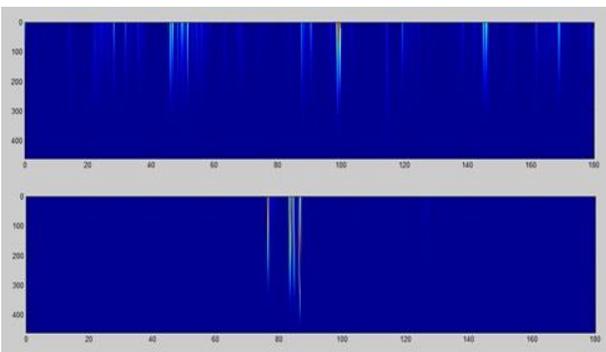


Figura 8. Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal O2 Sujeto 6. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)
Fuente: *Elaboración propia*

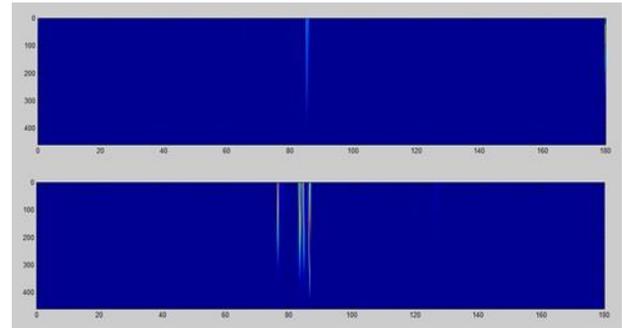


Figura 9 Escalograma de la Transformada Wavelet, del canal T8 Sujeto 7. (Arriba Prueba 1. Abajo Prueba 2)
Fuente: *Elaboración propia*

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma por el apoyo para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, se agradece la importante participación de los alumnos: Erik Omar González Ramírez y Sara Jessica Brito Calvo. Asimismo, se agradece la participación de los alumnos del Programa de Verano Científico Delfín: María Jesús Cárdenas Chávez (Instituto Tecnológico Superior de Cajeme), Brian David Espinosa Dorado (Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez), Anhaid Hernandez Barragán (Instituto Politécnico Nacional), Sarai López Quezada (Instituto Politécnico Nacional), Mónica Montes Gaspar (Instituto Politécnico Nacional), Julio Gabriel Ramos Fierro (Instituto Politécnico Nacional) y del Dr. José Ismael de la Rosa Vargas (Universidad Autónoma de Zacatecas), cuya participación fue definitiva e imprescindible para la elaboración de este artículo.

Conclusiones

La transformada de Wavelet presentó ventajas con respecto al Teorema de Wiener Khintchine en el estudio aquí presentado, ya que éste último sólo muestra la potencia de todo el periodo de observación, por lo que no se puede saber si la potencia se distribuyó uniformemente a través del periodo de observación ó si se presentó sólo en ciertos momentos, a diferencia de la transformada Wavelet que permite conocer la distribución de las potencias en función del periodo de observación y de la frecuencia de nuestra señal.

También se observó que, aunque el electrodo haya registrado mayores potencias, no necesariamente se registraron picos significativos, lo que sugiere que la potencia se distribuyó uniformemente en dichos electrodos. La Transformada Wavelet, para conocer los momentos de mayor actividad eléctrica por electrodo, complementó al Teorema de Wiener Khintchine que se utilizó para determinar la potencia total por electrodo.

En la prueba correspondiente al bosquejo, se observa actividad eléctrica distribuida uniformemente, es decir, no se encontraron cambios en los colores del escalograma (predomina el color azul), mientras que en la prueba de detalle se observan colores brillantes (presencia de amarillos y rojos) en momentos particulares, lo cual indica un mayor número de eventos significativos en donde la energía se presenta de manera dispersa, es decir, existe mayor actividad eléctrica en pequeñas ventanas de tiempo.

La zona cerebral que presentó mayor actividad durante la realización del dibujo fue el lóbulo frontal, lo cual es congruente con la literatura que generalmente vincula esta zona al desarrollo y la ejecución de planes de acción, así como la memoria de trabajo necesaria para el procesamiento de las actividades cognitivas.

Además, en este estudio, los electrodos que reportaron mayor potencia fueron los mismos para los sujetos de prueba 1 y 2. Asimismo, los valores de potencia fueron similares tanto en la prueba 1 como en la prueba 2 y el hemisferio derecho registró la mayor actividad eléctrica en comparación del hemisferio izquierdo.

Referencias

Başar, E., y Düzgün, A. (2015). The brain as aworking syncytiumand memory as a continuum in a hyper timespace: Oscillations lead to a new model. *International Journal of Psychophysiology*.

Bermúdez Cicchino, A. N. (2013). Técnicas de procesamiento de EEG para detección de eventos. Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería.

Chávez, V., Torres, D., Herrera, J., & Hernández, A. (2016). Adquisición y análisis de señales encefalográficas utilizando el dispositivo Emotiv EPOC+. (ECOFAN, Ed.) *Revista de Tecnología e Innovación*.

Duvinage, M., Castermans, T., Dutoit, T., Petieau, M., Hoellinger, T., De-Saedeleer, C., Seetharaman, K. y Cheron, g. (2012). “AP300-Based quantitative comparison between the Emotiv EPOC headset and a medical EEG device” *Proc. Biomedical Engineering*, 764-071.

Esqueda, J. J., Jimenez Beristain, L., Reyes Martinez, R. A., Camacho Parales, A., Mena Quevedo, E. y Roque Sandoval, J. A. (2014). “Metodología para el análisis de señales encefalográficas en actividad lúdicas”. Congreso Internacional de Investigación.

Esqueda, J. J., Bermúdez, E. E., Jiménez Beristáin, L., Rojas Ramírez, Y., Mungía, P. E. y Zaragoza Villa, J. M. (2015). "Análisis de señales electroencefalográficas en un niño con autismo realizando diferentes actividades de aprendizaje". Vol. 37, pp 181-186 Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Mexico: Chihuahua, chih.

Esqueda J., Chávez C., Jiménez L., Bermúdez E. (2017). Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo. Tecnología e Innovación.

Esqueda, J., Hernandez, D., Bermudez, E., Jiménez, L., & Pinto, M. (2016). Manipulación de un brazo robótico mediante señales electroencefalográficas. (ECOFRAN, Ed.) Revista de Tecnología e Innovación, 89-98.

Gavilán, G. M., & Egido, I. P. (2013). Estudio sobre técnicas de análisis de encefalogramas basados en redes neuronales.

Goleman, D. (2015). Cerebro y la inteligencia emocional. Barcelona, España: Ediciones B.

Jorge Luís Dahik Cabrera. (2015). Factores que determinan el desarrollo de la habilidad para dibujar. Revista de ciencia e investigación, Vol. 1, 26-29.

Kridsakron, Y., Seth, P. y Pasin Irasena, N. A. (2012) "Brian Signal Detection Methodology for Attention Training using minimal EEG channels". tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering.

Luna Guevara, G. (2014). Reducción de ruido en señales de electroencefalograma: una aplicación para mejorar las imágenes de mapeo cerebral. Electronic Journal of Biomedicine

Morales, L. N., Ríos, J. A., Hernández, J., & Martínez, P. (2016). Actividad encefalográfica cuantitativa y sueño en estudiantes de medicina Campus Durango de la UJED. (ECOFRAN, Ed.) *Revista de Ciencias de la Salud*, 1-10.

Planton, S., Longcamp, M., Perán, P., Jean-François, D., y Jucla, M. (2016). How specialized are writing-specific brain regions? An fMRI study of writing, drawing and oral spelling. ELSEVIER.

Proakis, J. G. y Manolakis, D. G. (2007). Digital Signal Processing principles, algorithms, and applications, PRENTICE HALL /PEARSON I.S.B.N. 0-13-187374-1.

Sepúlveda, R., Montiel, O., Díaz, G., Gutierrez, D., & Castillo, O. (2015). Clasificación de señales encefalográficas mediante redes neuronales artificiales. *Computación y Sistemas*, 19(1), pp. 69-88.

Tortora, G. y Derrickson, B. (2016). Principios de anatomía y fisiología. (11ª ed.) México: Panamericana.

Van der Meer, A. L., y Van der Weel, F. R. (2017). Only Three Fingers Write, but the Whole Brain Works: A High-Density EEG Study Showing Advantages of Drawing Over Typing for Learning. *Front. Psychol.*

Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja

SILVA-JUÁREZ Alejandro *†, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo

Universidad Tecnológica de Puebla

Recibido Enero 09, 2017; Aceptado Junio 14, 2017

Resumen

Mantenimiento Predictivo es conocer el estado general de una máquina cuando está en función mediante el uso de tecnologías, las más utilizadas son: análisis de vibraciones, ultrasonido y termografía infrarroja. Esta última se emplea en la inspección de sistemas eléctricos ya que pueden indicar el estado de funcionamiento de estos equipos. Respecto a los trabajos de supervisión y mantenimiento la termografía ofrece mayor seguridad ya que nos permite medir temperaturas a distancia, conservando exactitud y sin tener contacto físico con los objetos a estudiar. Por lo anterior se presenta un procedimiento para realizar la inspección de tableros eléctricos. Se explica a detalle la configuración de los parámetros de medición, esto comprende la determinación de: el grado de emisividad de los cuerpos, la temperatura reflejada, distancia de medición, humedad relativa, temperatura atmosférica y compensación de ventana. Para realizar las pruebas se ha empleado una cámara de infrarrojos de la serie E de FLIR. Por último, se muestran las características para generar reportes de termografía, se utilizó FLIR TOOLS, software propio de la cámara. La principal contribución es mostrar el procedimiento en base a la norma ISO 18434-1:2008, Condición de vigilancia y diagnóstico de máquinas-termografía, Parte 1: Procedimientos generales.

Termografía Infrarroja, Mantenimiento Predictivo, Grado de Emisividad

Abstract

Predictive Maintenance is to know the general state of a machine when it is in function by the use of technologies, the most used are: vibration analysis, ultrasound and infrared thermography. The latter is used in the inspection of electrical systems as they can indicate the state of operation of this equipment. Regarding the work of supervision and maintenance thermography offers greater security since it allows us to measure temperatures at a distance, retaining accuracy and without having physical contact with the objects to be studied. Due to the above, a procedure for the inspection of electrical boards is presented. The configuration of the measurement parameters is explained in detail, this includes the determination of: the degree of emissivity of the bodies, the reflected temperature, measurement distance, relative humidity, atmospheric temperature and window compensation. A FLIR E-series infrared camera has been used for the tests. Finally, the characteristics to generate thermography reports are shown, using FLIR TOOLS, own camera software. The main contribution is to show the procedure based on ISO 18434-1: 2008, Condition of monitoring and diagnosis of machine-thermography, Part 1: General procedures

Infrared Thermography, Predictive Maintenance, Emissivity Degree

Citación: SILVA-JUÁREZ Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo. Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja. Revista de Tecnología e Innovación. 2017, 4-11:24-35.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alejandro.silva@utpuebla.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En cuanto a las tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo, la inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja es la técnica ideal utilizada por técnicos, ingenieros y profesionales del mantenimiento, ya que esta técnica hace posible determinar gran cantidad de fallas en una extensa gama de maquinaria a un costo inicial razonable.

La termografía infrarroja en mantenimiento predictivo (FLIR Systems, 2011), es relativamente nueva en la industria, por las ventajas ofrecidas, ha ganado importancia en los programas de mantenimiento de forma creciente, esta tecnología demanda personal calificado que realice inspecciones de manera acertada, es por esto, que en la Universidad Tecnológica de Puebla se desarrolló un manual técnico donde se describe el procedimiento de configuración de una cámara termográfica de la firma FLIR.

La termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva y sin contacto, está basada en la radiación infrarroja que los cuerpos emiten o reflejan, todo cuerpo que tenga una temperatura por encima del cero absoluto (0°K), irradiará luz infrarroja, esta energía se emite en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz de forma de radiación o por cualquier otro medio de conducción y está en relación directa con su temperatura, es decir cuánto más caliente está el objeto, mayor cantidad de radiación infrarroja emite y menor longitud de onda menor temperatura (Franck P. Incropera, 1999). En general, la emisión se hace en longitudes onda mayor a las que el ojo humano es capaz de percibir.

Por medio de esta técnica se puede obtener una imagen térmica llamada termograma, en la cual se obtiene la distribución térmica de todos los componentes de un sistema y establece la temperatura presente en cada punto de la superficie del objeto, ya sea, estacionario o en movimiento de forma instantánea y a una distancia segura, lo cual es de gran importancia cuando existen altas temperaturas, gases venenosos, corriente eléctrica, entre otras situaciones, que son de alto riesgo en el sitio donde se realiza la medición. Otra cualidad de esta técnica, es que las inspecciones pueden realizarse sin pérdida o reducción de la productividad porque se realizan en pleno funcionamiento del sistema. La aplicación de la técnica de termografía infrarroja se puede aplicar mediante dos diferentes métodos, técnica activa y la técnica pasiva.

Técnica activa

La termografía activa necesita de una estimulación externa (fuente de radiación infrarroja externa) que incida en el objeto de estudio y que produzca en él un flujo de calor, estas estimulaciones sirven como perturbaciones de flujo de calor sobre la superficie del objeto, de manera que, un defecto interno puede alterar ese flujo, provocando una distribución anómala de la temperatura, generando patrones de temperatura en la superficie, los cuales se pueden medir y estudiar para establecer el estado del objeto.

Técnica pasiva

La termografía pasiva no necesita de una estimulación externa para inspeccionar un objeto, el propio objeto a estudiar por su funcionamiento, o por la interacción con su entorno, genera o elimina calor, produciendo patrones de temperatura que se pueden medir, de esta manera un defecto se podría determinar con una distribución anormal de temperaturas.

Termograma

Es una imagen térmica, producto de la captura de emisiones naturales de radiación, por medio de un equipo que integra una combinación de, sistemas de video, termómetros ópticos por radiación infrarroja y complejos algoritmos; en esta imagen térmica se puede observar la diferenciación de colores del cuerpo estudiado, con el fin de determinar y leer en forma precisa las temperaturas de la imagen.

La norma ISO 18434-1 define un termograma como: mapa térmico o imagen de un blanco donde los tonos grises o tonalidades de color representan la distribución de infrarrojos energía térmica radiante sobre la superficie del blanco.

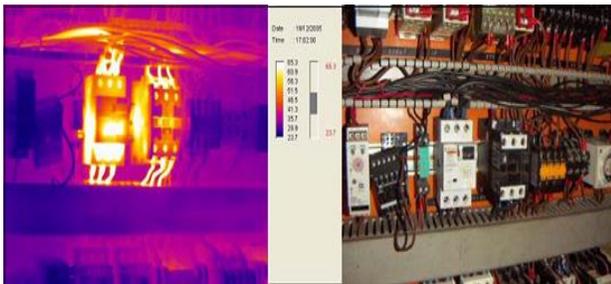


Figura 1 Termograma de dispositivo de protección sobrecargado

Características de los sistemas termográficos

Los sistemas de termografía cuentan con una serie de características tecnológicas que varían de acuerdo a la aplicación, (Fillit, C. Estour, B, Fillit. & R, 2007), estas características determinan la calidad de la información que se obtiene para su posterior interpretación. Las características más importantes son:

- Alta resolución en temperaturas: tan fina como 0.1°C.
- Amplia resolución espacial: se pueden 8.

- Medición en un amplio rango de temperaturas: -20°C hasta 2500°C.
- Seguridad y velocidad en las inspecciones.
- Exactitud para localizar problemas.
- Software para el análisis de termogramas.

Cámara termográfica

Una cámara termográfica (ver Figura 2), es un equipo complejo que tiene como función medir la emisión natural de radiación infrarroja de un objeto, determinar su temperatura y generar una imagen térmica, realizando un procesamiento digital de las señales sensadas.



Figura 2 Cámara termográfica FLIR E60

Clasificación de cámaras termográficas

Según su respuesta espectral

Esta clasificación se realiza estableciendo las longitudes de onda que la cámara termográfica puede captar, ver tabla 1.

Onda Corta	0.8 μm a 2.5 μm
Onda Media	2.5 μm a 5.5 μm
Onda Larga	7.5 μm a 14 μm

Tabla 1 Respuesta espectral cámaras termográficas

Según el tipo de detector

Esta clasificación de las cámaras termográficas está basada en las características del detector que utilizan.

Cámaras infrarrojas con detectores criogenizados

Los detectores están contenidos en un estuche sellado al vacío y enfriado muchos grados Celsius bajo cero por un voluminoso y costoso equipo criogénico. Esto aumenta enormemente su sensibilidad con respecto a los detectores al ambiente, debido a su gran diferencia de temperatura con respecto al cuerpo emisor detectado. Si el detector no fuese enfriado criogénicamente, la temperatura ambiental interferiría las lecturas de temperatura recibidas por el detector.

Aun así el uso de detectores criogenizados presenta unas desventajas como son:

- Su alto consumo de energía para enfriar.
- El alto costo para fabricar y sellar al vacío los estuches.
- Varios minutos para enfriar el sensor del detector a la temperatura óptima de operación.

Cámaras infrarrojas con detectores al ambiente

Utilizan sensores que operan a temperatura ambiente o que están estabilizados mediante pequeños elementos de control a una temperatura cercana a la temperatura ambiente; los detectores más modernos usan sensores que funcionan cambiando sus propiedades eléctricas cuando se calientan por la radiación infrarroja. Estos cambios son medidos y comparados a los valores de temperatura de operación del sensor.

Los sensores pueden estabilizarse a una temperatura de operación para reducir las interferencias de percepción de imagen, y es por eso que no requiere equipos de enfriamiento. Los detectores al ambiente están hechos en su mayoría a base de materiales ferroeléctricos y piroeléctricos o tecnología del microbolómetro.

Según la técnica de termografía utilizada

Las cámaras termográficas también se pueden clasificar de acuerdo a la utilización o no de un estímulo infrarrojo en el objeto a estudiar. Cámaras infrarrojas activas: Su funcionamiento se basa en la estimulación de la respuesta térmica del objeto a estudiar, un elemento auxiliar emite radiación infrarroja con un reflector (integrado a la cámara o ubicado en otro sitio); este haz infrarrojo ilumina el objeto a estudiar (o a detectar), para que pueda ser percibido por la cámara e interpretado en una imagen monocromática.

El reflector tiene un filtro para prevenir que la cámara sea interferida por la luz visible. Así, si el reflector tiene mayor alcance mayor será el tamaño, el peso de su filtro y el tamaño de la batería, porque aumenta su consumo de energía. Por eso la mayoría de las cámaras activas portátiles tienen un reflector con alcance de 100 metros, pero algunos fabricantes llevan el alcance de las cámaras hasta varios cientos de metros para mejorar su desempeño.

Cámaras infrarrojas pasivas: este tipo cámaras termográficas carecen de reflectores, y perciben la radiación infrarroja tal cual como es emitida por un cuerpo. No detectan cuerpos a la misma temperatura del detector, por lo cual suelen enfriarse criogénicamente. Algunas de estas cámaras pueden tener sensibilidad a temperaturas de 0,01 °C, y se utilizan para rastrear personas en áreas de visibilidad reducida (tinieblas, humo o niebla).

Para encontrar rastros recientes de alguien que ha dejado un lugar, seguir un automóvil, ver rastros de humedad en ciertas superficies, etc. A continuación se nombran algunas de sus características.

- Alta Resolución de temperaturas, consecuentemente termogramas muy contrastados.
- Fácil manejo, con el software integrado
- Escala de temperatura lineal
- Visualización rápida de una imagen.
- Posibilidad de controlar la cámara a largas distancias vía Ethernet.
- Portátil y operación independiente con acumulador de Li-ION intercambiable

¿Cómo funciona una cámara termográfica?

Cuando se hace una inspección termográfica y se pone la cámara delante del objeto a estudiar, ésta absorbe energía infrarroja que luego es procesada con el fin de obtener una imagen térmica donde se pueda leer la temperatura real.

La lectura de temperatura que se observa en la pantalla de la cámara se calcula teniendo en cuenta una serie de parámetros que están presentes en el ambiente donde se realiza la inspección termográfica.

Desarrollo

La inspección termográfica es un análisis instrumental para definir y precisar las condiciones específicas de un equipo y sus partes, a través del comportamiento de las temperaturas de operación. Esta es una prueba no destructiva que mediante la implementación de un programa mensual, trimestral, semestral o anual de inspecciones, minimiza la probabilidad de fallas.

El informe resultante de una inspección termográfica incluye la descripción de los equipos o elementos que están operando en condiciones anormales de temperatura, una imagen digital y térmica de su ubicación, en la que se incluye el cuadro de temperaturas de referencia, la clasificación del tipo de falla si aplica, las recomendaciones a seguir para eliminarla, y adicionalmente si se tiene el historial se entregarían las curvas de tendencia.

Un programa de inspección termográfica tiene por objetivo reducir el riesgo de paradas no programadas, aumentar la productividad, mejorar la seguridad, clasificar y definir tendencias de los historiales sobrecalentamientos en equipos críticos (Infrared Training Center, 2009).

Usualmente una falla tiene un tiempo de deterioro lento, debido a esfuerzos a los que es sometido el material y a las curvas de carga no uniformes que se deben llevar a cabo en un proceso. Esto permite clasificar e identificar los componentes deficientes, por medio de una comparación de las temperaturas de operación del equipo, frente a la temperatura del medio ambiente o de un equipo similar en las mismas condiciones de trabajo.

Los sistemas candidatos para una inspección termográfica son los sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos y térmicos (Infraspection Institute, 2008). Para realizar una inspección termográfica exitosa, es necesario seguir una metodología de manera general.

Procedimiento para la toma de termogramas en un tablero eléctrico

Paso 1 Descubrir el tablero eléctrico

Para efectuar un termograma en un tablero eléctrico, se debe, como primer paso, retirar cualquier tapa o protección ajena al circuito eléctrico, cuidando que todo el circuito del tablero eléctrico esté libre de cualquier protección, esto es para mejorar la toma de lecturas con la cámara termográfica, ver figura 3.

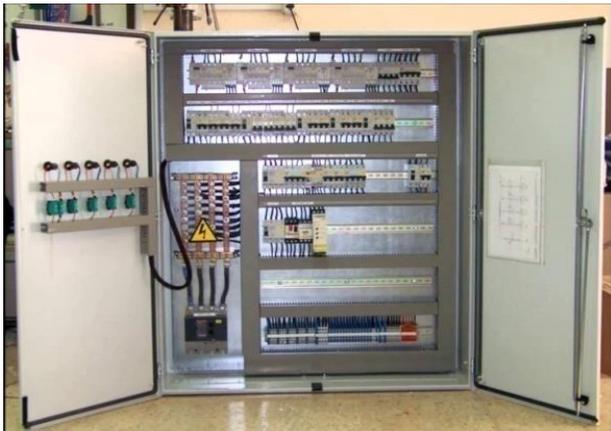


Figura 3 Apertura del tablero eléctrico

Paso 2 Calibración de la cámara termográfica

Como segundo paso, es el ajuste de los parámetros de medición de la cámara termográfica a utilizar. En este caso, se utilizó una cámara termográfica de la firma FLIR, para lograr el objetivo de la calibración se seguirá los siguientes pasos:

Nos dirigimos a ajustes, posteriormente a parámetros de medición y en esta sección encontraremos los parámetros a ajustar, ver Figura 4.

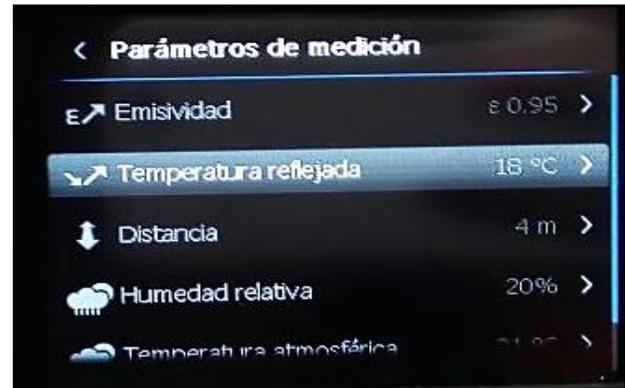


Figura 4 Parámetros de medición

Paso A Ajuste del coeficiente de Emisividad

El primer parámetro a ajustar es el coeficiente de Emisividad. Para poder ajustarlo nos dirigimos a la sección de parámetros de medición, ver Figura 5, (Fenercom, 2011). Para elegir el coeficiente de emisividad realizaremos los siguientes pasos.

- 1 Colocar una tira de cinta de aislar de 3 cm, sobre la superficie de cuerpo a medir, ver Figura 7.
- 2 Se recomienda que el coeficiente de emisividad inicial tenga un valor 1.
- 3 Tomar dos termogramas con la cámara termográfica del cuerpo a medir, la primera lectura se efectuará con la cinta de aislar ya colocada previamente, posteriormente se tomara la segunda lectura, en este caso se efectuara en una parte del cuerpo sin cinta de aislar. En cada lectura realizada se registrará la temperatura mostrada en cada termograma.
- 4 Comparar las temperaturas de las dos lecturas tomadas, si estas dos tienen el mismo valor, el coeficiente de emisividad es el adecuado, en el caso contrario, se deberá cambiar el coeficiente de emisividad y repetir el paso 3 hasta que las temperaturas tengan el mismo valor.

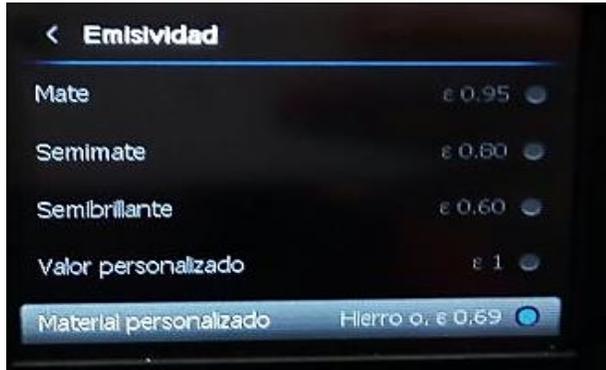


Figura 5 Ajuste de emisividad

Paso B. Temperatura reflejada

El segundo parámetro es la temperatura reflejada, ver Figura 6, (Fenercom, 2011). Para poder ajustar este parámetro utilizaremos los siguientes pasos.

- 1 Colocar un trozo de papel aluminio de 3 cm^2 sobre la superficie del cuerpo, procurando que la cara brillante del papel este adherida a la superficie, ver Figura 7.
- 2 La temperatura reflejada inicial que se recomienda es la del medio en el que se encuentra el cuerpo a medir.
- 3 Tomar dos termogramas con la cámara termográfica del cuerpo a medir, la primera lectura se efectuará con el papel aluminio ya colocada previamente, posteriormente se tomará la segunda lectura, en este caso se efectuará en una parte del cuerpo sin el papel aluminio. En cada lectura realizada se registrará la temperatura mostrada en cada termograma.
- 4 Comparar las temperaturas de las dos lecturas tomadas, si estas dos tienen el mismo valor, la temperatura reflejada es la adecuada, en el caso contrario, se deberá cambiar la temperatura reflejada y repetir el paso 3 hasta que las temperaturas tengan el mismo valor.

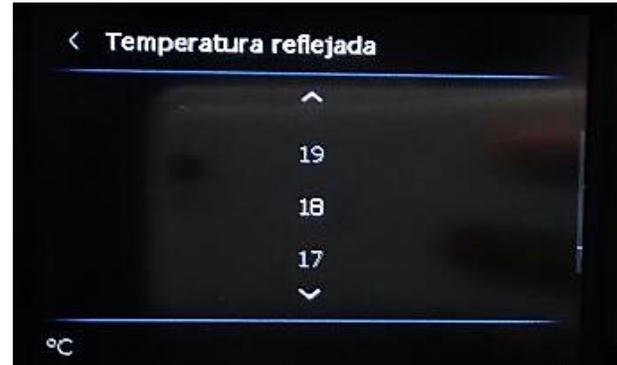


Figura 6 Ajuste de temperatura reflejada

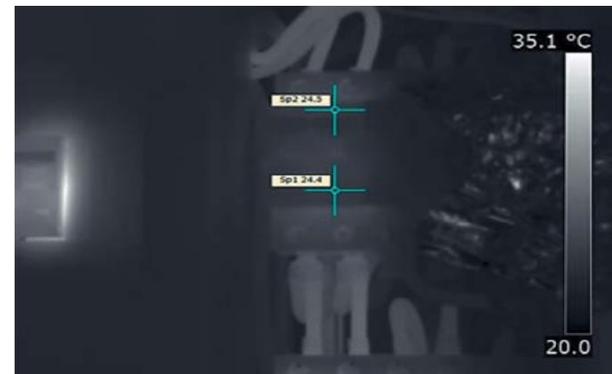


Figura 7 Imagen infrarroja con cinta negra y papel aluminio

Paso C. Distancia al objeto

La distancia seleccionada será la longitud entre la cámara termográfica y el cuerpo a medir, ver Figura 8.

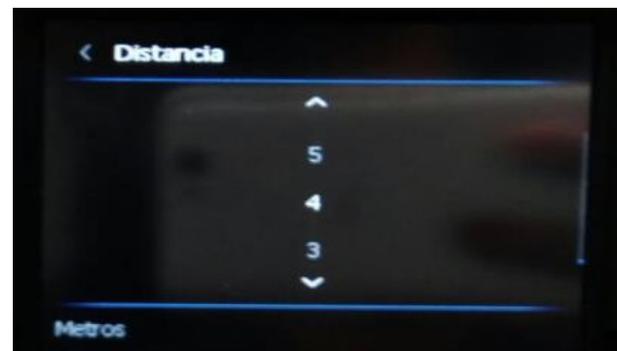


Figura 8 Ajuste de distancia

Paso D. Humedad relativa y Temperatura atmosférica

Esta será la del medio en el que se encuentra el cuerpo a medir. Para este parámetro se puede utilizar la del medio ambiente, ver Figura 9 y 10.

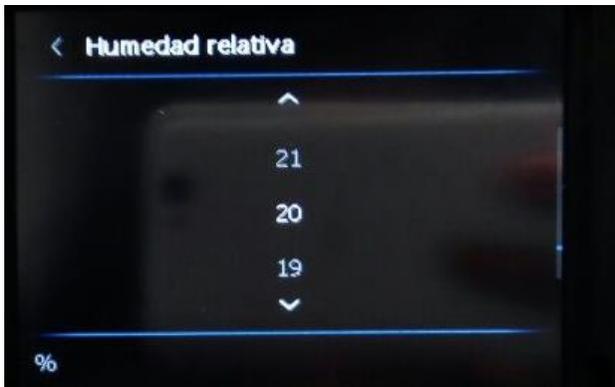


Figura 9 Ajuste de humedad relativa



Figura 10 Ajuste de temperatura atmosférica

Paso E. Compensación de ventana

Para este parámetro se deberá tomar la temperatura del medio ambiente, en caso de que en la superficie haya un reflejo, se deberá ajustar la temperatura agregando la temperatura del cuerpo reflejado, Ver figura 11.

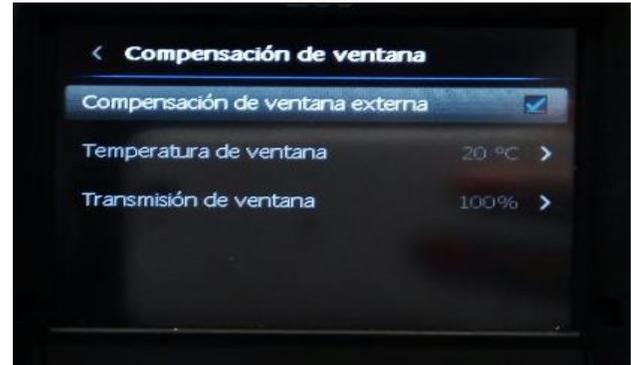


Figura 11 Ajuste de compensación de ventana

En cualquier caso, si no se está seguro de los valores de los parámetros de la cámara termográfica, los siguientes pueden ser recomendables y suelen aparecer por defecto en algunas cámaras, Ver tabla 2 (Fenercom, 2011).

Emisividad	0.95
Temperatura reflejada	+20 °C
Distancia	1 metro
Humedad relativa	50%
Temperatura atmosférica	+20 °C
Temperatura de ventana	+20 °C

Tabla 2 Valores recomendados para la cámara termográfica

Informe de prueba

El reporte de la inspección realizada con la cámara termográfica deberá proporcionar informes para todas las inspecciones por infrarrojos. A menos que se acuerde lo contrario con el cliente, el informe deberá contener, pero no limitarse a, la siguiente información de acuerdo con la norma ISO 18434-1:

- El nombre de cada termógrafo.
- La calificación de cada termógrafo.
- El nombre y la dirección del cliente.
- El nombre de cada asistente que acompañe al termógrafo infrarrojo durante la inspección, si corresponde.

- e. El fabricante, el modelo y la fecha de calibración del equipo de infrarrojos utilizado.
- f. Una lista de todos los equipos a inspeccionar y anotaciones del equipo de la lista que no fue inspeccionado.
- g. Detalles de todas las anomalías térmicas detectadas.
- h. Detalles de las condiciones de funcionamiento y medio ambiente de cada máquina en el momento de la inspección.
- i. Fecha (s) y hora (s) de la (s) inspección (es).
- j. Fecha en que se preparó el informe.
- k. Al realizar una inspección cualitativa por infrarrojos, el termógrafo debe proporcionar la siguiente información para cada anomalía identificada:
 - l. La ubicación exacta de cada anomalía.
 - m. Una descripción de cada anomalía.
 - n. Detalles de cualquier medio atenuante.
 - o. Cuando sea significativo, las condiciones ambientales que rodean la anomalía; p.ej. la temperatura del aire, la velocidad del viento, la dirección del viento y las condiciones climáticas.
 - p. Copias impresas del (de los) termograma (s) de la (s) anomalía (s) y la correspondiente imagen (es) de luz visible.
 - q. Detalles de cualquier ventana, filtro u óptica externa utilizada.
 - r. Una calificación de evaluación o una declaración de la importancia de la anomalía para el funcionamiento seguro y continuo del sistema.
 - s. Referencia o declaración de los criterios de evaluación utilizados.
 - t. Cualquier otra información o condiciones especiales que puedan afectar los resultados, repetitividad o interpretación de la anomalía. Al realizar una inspección cuantitativa por infrarrojos, el termógrafo debe proporcionar la siguiente información adicional.
 - u. La distancia desde la cámara IRT a la anomalía.
 - v. Siempre que sea posible, la carga nominal máxima del artículo y su carga medida en el momento de la inspección.
 - w. La emisividad, la temperatura aparente reflejada y los valores de transmisión utilizados para calcular las temperaturas.
 - x. Cuando se utilizan los criterios ΔT , la temperatura superficial del elemento, la temperatura de una referencia definida y su diferencia de temperatura relativa. Además del contenido técnico anterior, el informe también debe contener una notación de las condiciones o prácticas inseguras observadas y las acciones emprendidas.

Software para Análisis de Termogramas

Existen múltiples softwares para el análisis de imágenes térmicas, estos dependen de la cámara y del fabricante, lo que también marca las diferencias que existen entre ellos.

El software tiene como función ayudar al termógrafo a realizar el análisis e interpretación de la información obtenida en los termogramas y a generar los informes sobre la inspección termográfica realizada (FLIR Systems, 2011).

Un software de análisis de termogramas debe tener la posibilidad de medir temperaturas en puntos, áreas, en línea recta, determinar isoterma, cambiar paletas de colores, realizar histogramas para mirar tendencias, y generar informes con toda la información relevante encontrada en la imagen térmica.

El Software FLIR Quick Report desarrollado por la empresa FLIR Systems es utilizado para el análisis de termogramas y la generación de informes de inspección, sus principales características son: de fácil manejo, permite capturar y almacenar imágenes infrarrojas JPEG estándar, cambiar el tamaño y el ajuste de PIP (Fusión de imagen en imagen, muestra la termografía superpuesta sobre una imagen digital) y permite crear informes de inspección. Además, es compatible con Microsoft Windows®. A continuación, se mencionan algunas características de este software:

Maneja imágenes térmicas y digitales, ver Figura 12.

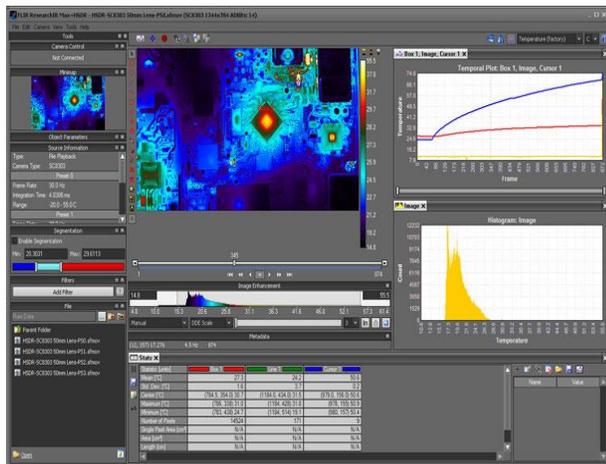


Figura 12 Interfaz del software FLIR

Este software cuenta con una serie de herramientas útiles a la hora de realizar el análisis, la Figura 11 muestra una imagen del de la interfaz donde se realiza el análisis de los termogramas, a continuación, se mencionan algunas de las tareas que se pueden realizar a las imágenes térmicas.

- Descripción de la imagen en un cuadro de texto, puede editarse o realizarse una nueva descripción.

- Editar parámetros de compensación.
- Tabla de resultados.
- Medir temperaturas en puntos, áreas, líneas.
- Crear isotermas.
- Cambiar la paleta de colores en una imagen.
- Auto ajuste.
- Zoom.
- Escuchar comentarios de voz asociados a la imagen.
- Exportar a Excel el valor de temperatura de cada pixel.

Se pueden crear informes de inspección que incluyen uno o más imágenes de infrarrojos y fotos digitales, los cuales se almacenan en formato PDF. La Figura 13 muestra un informe realizado en el software FLIR Quick Report.

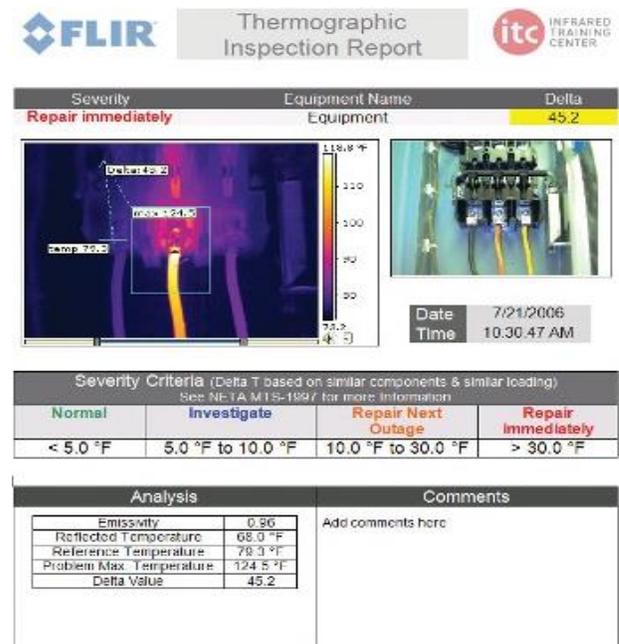


Figura 13 Informe termográfico con el software FLIR

Pruebas de campo

En la empresa INDUSTRIAS COBITEL S.A. de C.V. Se realizó una inspección a un tablero eléctrico de media tensión, ver Figura 14. Otra prueba en campo fue realizada en la empresa KAYSER automative Systems S.A. de C.V. en ella se efectuó un análisis termográfico a pistolas de calentamiento BOSCH. En ambos casos se utilizó una cámara termográfica de la firma FLIR Systems, la cual está diseñada para tomar termogramas de diferentes cuerpos, como; tableros eléctricos, motores eléctricos, calderas, rodamientos, entre otros.

En INDUSTRIAS COBITEL S.A. de C.V. una vez realizado la toma de los termogramas pertinentes, se encontró una falla en los 2 interruptores termomagnéticos.

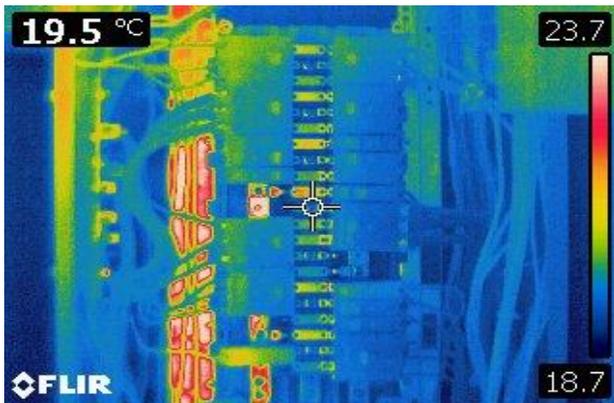


Figura 14 Tablero eléctrico de la empresa INDUSTRIAS COBITEL S.A. de C.V

Conclusiones

Con base en el desarrollo y los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones, así como algunas de las futuras líneas de investigación y proyecciones alrededor de este trabajo.

1. La adquisición de un producto de termografía roja conlleva a una inversión alta, pero, en un futuro posterior ofrecerá una remuneración al reducir fallas imprevistas o imposibles de detectar con un equipo ordinario de mantenimiento, ya que, la termografía infrarroja es una técnica predictiva de nueva generación, lo que permite tener nuevas y más eficientes formas de analizar los equipos.
2. Los análisis que se efectúan con una cámara termográfica es un 80% más rápido, precisas y eficientes, que al realizarlos con otro equipo de mantenimiento no predictivo.

Proyecciones

Con este proyecto, la Universidad Tecnológica de Puebla podrá ofrecer servicios de Termografía Infrarroja como parte del mantenimiento predictivo a empresas del ramo industrial como: papeleras, siderúrgicas, cementeras, ingenios azucareros, automotrices a un costo mucho menor en comparación a los que se ofrecen en el mercado nacional e internacional.

Referencias

- Adams, A, Nelson R, Bell D. & Egoavil, C (2000). Use of Infrared Thermographic Calorimetry to Determine energy Expenditure in Preterm Infants. *Journal for Clinical Nutrition*, 71(4), 969- 977.
- Fillit, C, Estour, B, Fillit. & R. (2007). Quantitative Thermography Studies of Body Surface Temperature for Medical Diagnosis Linked to Chronic Disease. *Proceedings InfraMation 2007*.
- Franck P. Incropera, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- SILVA-JUÁREZ Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo. Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja. *Revista de Tecnología e Innovación 2017*.

Fenercom. (2011). Guía de la termografía infrarroja, Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética . *Madrid Ahorra con Energía* , 189.

FLIR, Systems. (2011). Guía de termografía para el mantenimiento predictivo . *FLYR* , 45.

FLIR, Systems. (2011). Guía sobre termografía para aplicaciones y energía renovable. *FLIR*, 68.

Infrared Training Center. Course Manual Thermography Basics, 2009.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of Machines — Thermography.

Infraspection Institute. Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, 2008.

Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel

ALONSO-PEREZ, Jorge*†, REYNOSO-SOTO, Edgar, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter, CAZAREZ-CASTRO Nohe

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana

Recibido Enero 09, 2017; Aceptado Junio 13, 2017

Resumen

La fabricación de celdas solares (SC) ha mejorado de una generación a otra. La primera generación esta basada en monocristales de silicio, estos poseen una eficiencia alta, pero tienen un costo alto de obtención. La segunda se clasifica como a-Si, CdTe, CIGS, los métodos de fabricación son de un costo menor de producción; sin embargo, poseen una toxicidad mayor que la primera. La tercera generación surge en décadas recientes como una alternativa viable: unos costos menores de fabricación, uso de materiales compatibles con el medio ambiente y eficiencias de conversión energética aceptables. Uno de los objetivos principales de la fabricación de SC es utilizar técnicas sencillas para obtener áreas mayores de captación solar con un costo bajo y reproducible. Los procesos basados en solución son candidatos idóneos para lograr este propósito, donde destaca la deposición por rocío, la cual se ha aplicado con éxito. En este trabajo se reporta la implementación de un robot con una arquitectura de LinuxCNC, el cual fue utilizado para la fabricación automatizada de películas delgadas y compactas de TiO₂ de orden nanométrico. Estas se utilizaron para fabricar celda solar de tercera generación tipo Grätzel. Los resultados en el factor de llenado (FF) son prometedores.

Celdas solares, LinuxCNC, Película delgada compacta, Factor de llenado

Abstract

The manufacture of solar cells (SC) has improved from one generation to another. The first generation is based on monocrystals of silicon, these have a high efficiency, but have a high cost of procurement. The second is classified as a-Si, CdTe, CIGS, manufacturing methods are of lower production cost; however, they have greater toxicity than the former. The third generation emerged in recent decades as a viable alternative: lower manufacturing costs, use of environmentally compatible materials and acceptable energy conversion efficiencies. One of the main objectives of SC manufacturing is to use simple techniques to obtain larger areas of solar pickup with a low and reproducible cost. The solution-based processes are suitable candidates to achieve this purpose, where dew deposition stands out, which has been successfully applied. This paper reports the implementation of a robot with a LinuxCNC architecture, which was used for the automated manufacture of thin and compact TiO₂ films of nanometric order. These were used to make third-generation Grätzel solar cell. The results on the fill factor (FF) are promising.

Solar cells, LinuxCNC, Compact thin film, Fill factor

Citación: ALONSO-PEREZ, Jorge, REYNOSO-SOTO, Edgar, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter, CAZAREZ-CASTRO Nohe. Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätze. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 36-42.

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jalonso@tectijuana.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Unos de los principales objetivos en la investigación y desarrollo de celdas solares de tercera generación es el desarrollo de técnicas sencillas, de bajo costo y escalables de producción. Los métodos en solución han resultado ser candidatos para llevar a cabo estos objetivos, lo cuales fueron investigados en trabajos previos [1,2], en donde la solución fue depositada por la técnica de rocío, la cual ha sido empleado para producir películas delgadas y resulta ser una técnica muy versátil con la posibilidad de adaptarse con relativa facilidad a sistemas de automatización de alta velocidad [3].

Uno de los objetivos de esta investigación es la evaluación del factor de llenado (FF) [4], el cual es una medida de la calidad de la celda solar. Se calcula comparando la potencia máxima con la potencia teórica (P_T) que se produciría tanto a la tensión de circuito abierto como a la corriente de corto circuito. El FF también se puede interpretar gráficamente como la proporción de las áreas rectangulares representadas.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{P_T} = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (1)$$

Por lo cual se tomó como base la investigación de Wang y colaboradores [5] referente a la mejora de las propiedades de las celdas solares tipo Grätzel, utilizando películas delgadas compactas, en donde se menciona que se puede tener impacto en el rendimiento de este tipo de celda solar, ya que la capa compacta de TiO_2 es el primer material que encuentra la luz transmitida a través del vidrio TCO. Además, el tinte desempeña funciones multifuncionales en una serie de tareas: absorber la luz incidente, inyectar electrones en la banda de conducción del semiconductor, reaccionar con la pareja redox, etc [5,6].

Para llevar a cabo la fabricación automatizadas de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel de una manera económica, no solo basta la manipulación de los materiales químicos, sino también la maquinaria utilizada en los procesos, por lo cual, con la asistencia de un robot cartesiano con una arquitectura de software del tipo LinuxCNC [7,8] desarrollado en el laboratorio, se tendrían los siguientes rendimientos: la implementación de películas delgadas de diversas áreas y formas con buena uniformidad y reproducibilidad. Se investigó el uso de aerografía utilizando la técnica de deposición por rocío para la fabricación de películas (compactas) delgada de (isoporpoxico) sobre sustratos de vidrio para la construcción de una celdas solar de tercera generación de tipo Grätzel.

La organización de este documento es la siguiente: En la sección I se ha dado una introducción al lector del problema a resolver y los conceptos principales; en la sección II se presentan los antecedentes teóricos, en la sección III se presentan la parte experimental para la construcción de la celda solar tipo Grätzel, mientras que en la sección IV se presentan las pruebas y resultados obtenidos; finalmente en la sección V se presentan las conclusiones.

Clasificación de Celdas Solares

Actualmente, las celdas solares en el mercado utilizan una gama de materiales diversos con diferente grado de madurez comercial. Las diferencias han permitido precisar tres generaciones de celdas solares [9]:

La primera generación fue introducida en la década de 1950, se caracterizan por utilizar monocristales de oxido silicio (SiO_2).

La eficiencia media de los módulos comerciales es de alrededor del 16%, con una vida útil de aproximadamente 20 años [10,11]. El inconveniente principal es el uso de láminas de SiO₂ con un alto grado de pureza que requieren altas temperaturas (> 1000°C) e instalaciones al vacío. Estos requisitos ocasionan el incremento de los costos de fabricación [12].

La segunda generación esta basada en el uso de películas delgadas de silicio amorfo (a-Si), selenuro de cobre indio-galio (CIGS), telururo de cadmio (Cd-Te) o arseniuro de galio (GaAs). La película es depositada sobre un sustrato (p.ej., vidrio, polímero o metal) y se encuentra en un rango de 1 a 4 µm.

La eficiencia de estas celdas solares oscila entre 7% (a-Si) y 16,3% (CdTe) [13,11]. Los costos de fabricación son menores debido a la cantidad menor de material empleado [9,10]. Sin embargo, el uso de elementos químicos, p.ej., Cd, In y As aumenta su toxicidad, lo que supone un riesgo para la salud y el ambiente [11].

Finalmente, la tercera generación son celdas solares aun en fase de desarrollo [14,15]. Dentro de las cuales sobresalen las celdas solares tipo orgánicas, de perovskita y Grätzel (también conocidas como celda solar sensibilizada con colorante).

La cuales son áreas de investigación actuales con retos como la disminución de los costos de fabricación, obtención de eficiencias mayores, la simplicidad de manufactura y la producción en serie.

Metodología

Materiales utilizados

Todos los productos químicos se usaron tal como se recibieron sin purificación adicional y se compraron a Sigma-Aldrich: peróxido de hidrógeno (H₂O₂, 30%), etanol (C₂H₅O, 96%), oxido de titanio (TiO₂), isopropoxido de titanio (C₁₂H₂₈O₄Ti, 99%), acetilacetona (C₅H₈O₂, 99%), tetracloruro de titanio (TiCl₄, 98%). Los vidrios recubiertos con película de conductor transparente de óxido de estaño (SnO₂) dopado con flúor (FTO, 30 Ω). Estos se usaron tal como se recibieron sin tratamiento adicional y se compraron a Solaronix®. Todas las disoluciones se prepararon usando agua MilliQ® (18 MΩ, Millipore), al igual que los lavados del material.

Deposición por rocío

Debido a su versatilidad en la fabricación de películas delgadas, se ha utilizado la técnica de deposición por rocío, la cual se realiza en varias etapas entre ellas esta; la atomización de la solución precursora sobre la superficie a depositar, evaporación del vehículo o solvente, difusión del precursor sobre la superficie, secado y adhesión del material [16].

Un diagrama esquemático del aparato de deposición por rocío se muestra en la Figura 1. El sistema de deposición por rocío contiene tres boquillas, una conectada a una entrada para el aire comprimido y las otras para la solución de transporte. La boquilla central esta conectada a una bomba de inyección empleada para acarrear la solución de precursora y las boquillas periféricas se conectan al aire comprimido que actúa como gas acarreador. En la Figura 2 se muestra el prototipo de sistema de deposición por rocío desarrollado.

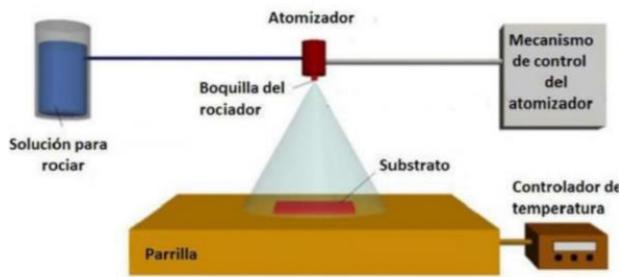


Figura 1 Componentes esenciales de un sistema de deposición por rocío

Fuente: [1,2]

La etapa de traslación de los ejes X, Y y Z es controlada por una computadora que tiene el sistema LinuxCNC. Las condiciones de la deposición por rocío fueron optimizadas para reducir la rugosidad de la superficie. Esto se llevo a cabo mediante la variación del flujo de inyección de la solución precursora (2 - 6 mL/min), el flujo de gas acarreador (25 - 30 lbf/pulg²), la distancia entre la boquilla-sustrato (30 - 20 cm) y la velocidad de deposición (205 pulg/min).

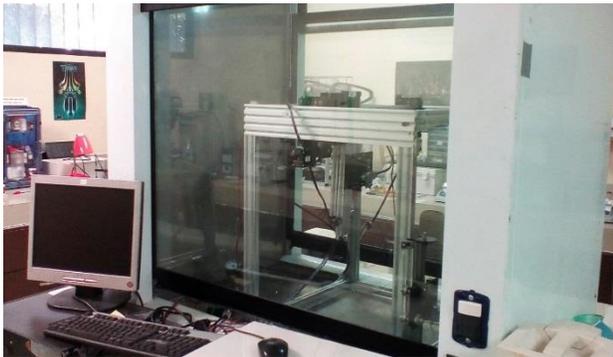


Figura 2 Sistema para la deposición por rocío (prototipo)

Fuente: *Elaboración Propia*

Preparación de fotoelectrodos

La parte experimental consistió en la deposición de una película compacta de TiO₂ sobre vidrio FTO para la obtención de fotoanodos. Previamente, se realizó la limpieza de los vidrios FTO, seguida por la deposición.

Para la deposición de la capa compacta, se utilizó una mezcla de 20 mL de etanol con 0.8 mL acetilacetona y 1.2 mL de isopropóxido de titanio a temperatura ambiente. La solución se dejó en agitación magnética constante durante 10 minutos.

La solución se roció 10 veces sobre el lado conductor, la temperatura se incrementó a 450 °C por 30 min. Los vidrios FTO tratados con la capa compacta se utilizaron como la base de los fotoánodos. Posteriormente, se depositaron también 10 capas de TiO₂ (Pasta de TiO₂ marca Solaronix®), por el método de serigrafía.

Los fotoánodos se sensibilizaron con el colorante de rutenio denominado N719, a partir de una solución de terbutanol: acetonitrilo (50:50) por 24 h a una concentración de 3x10⁻⁴ M a temperatura ambiente y en oscuridad.

Finalmente, los fotocátodos se fabricaron utilizando vidrios FTO. Se deposita una capa de Platisol T/SP Solaronix Sobre el lado conductor por el método de Dr. Blade. Seguido, se aplicó un tratamiento térmico en una mufla, utilizando una rampa de 3°C/min hasta alcanzar 450 °C manteniéndose 30 minutos dejándose a enfriar a temperatura ambiente.

Ensamble de las celdas tipo Grätzel

Los fotoelectrodos se unieron por medio de un acomodo tipo sándwich. Se procedió a llenar las celdas con electrolito preparado de I⁻/I³⁻: 0.05 M I₂, LI 0.1 M, TBP 0.5 M (tertbutil piridina), TBAI 0.6 M (yoduro de tetrabutilamonio) en 3-metoxipropionitrilo / acetonitrilo (50:50) para posteriormente sellarlas.

Por último, se procedió a evaluar la eficiencia de conversión energética utilizando un simulador solar (Solar Oriel, LCS-100) con calibrador Newport bajo irradiación 100 mW/cm² y un 1 sol de distancia.

Resultados y discusión

Se llevo a cabo la deposición por rocío pirolítico con una solución de isopropoxido para la fabricación de películas compactas sobre vidrio conductor FTO como componente del anodo de celdas solares tipo Grätzel.

Los parámetros empleados en este trabajo para el proceso de deposición por rocío pirolítico para las películas compactas de isopropoxido fueron: una distancia aproximada de 20, 25 y 30 cm la boquilla de aerógrafo y el sustrato caliente cuya temperatura se mantuvo a 450 °C, un flujo de inyección de 2 mL/min y una presión de 25 psi, velocidad de despejamiento horizontal de 205 in/min; variando el número de veces que se deposita en el sustrato.

Cada capa depositada del aerosol se aplicó después de aproximadamente 10 segundos de pausa, lo cual es necesario para completar la pirólisis de la capa anterior y restaurar la temperatura original del sustrato.

Id. de la celda solar	C1	C2	C3	C4	C5
Número de deposiciones por rocío	0	10	10	10	10
Distancia de la boquilla al sustrato	0	20 cm	20 cm	25 cm	25 cm
Número de deposiciones por serigrafía	10	10	10	4	10

Tabla 1 Condiciones de fabricación de las celdas solares tipo Grätzel

Fuente: Elaboración propia

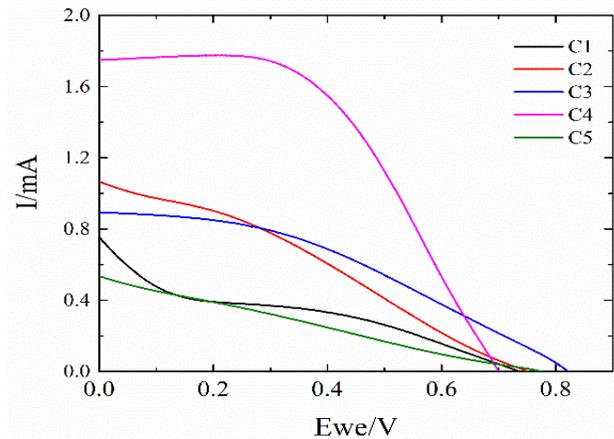


Figura 3 Resultados de la caracterización de las celdas solares

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, se depositaron series de 4 y 10 capas de TiO₂ por el método de serigrafía respectivamente, como se muestra en la Tabla 1.

La función de la capa compacta es llevar a cabo la pasivación de los oxidos conductores transparentes del soporte (TCO) en una celda solar tipo Grätzel. Lo cual reduce la perdida electrica ocasionado por la recombinación TCO-electrolito en la interface. Esto debido al contacto entre TCO y el fotoánodo [17].

Se evaluaron celdas solares tipo Grätzel fabricados con la capa compacta de TiO₂ y sin capa compacta utilizando un simulador solar. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 3. En comparación con la celda solar sin capa compacta, la capa compacta incrementó el FF. El calculo del valor de FF esta basado en la ecuación 1.

Id. de la celda solar	C1	C2	C3	C4	C5
Corriente de corto circuito (Isc)	0.755 mA	1.067 mA	0.893 mA	1.749 mA	0.536 mA
Voltaje de circuito abierto (Eoc)	0.737 V	0.752 V	0.822 V	0.700 V	0.775 V
Potencia teorica (PT)	0.557mW	0.802mW	0.734mW	1.22 mW	0.415mW
Potencia maxima Pmax	0.136mW	0.245mW	0.279 mW	1.224 mW	0.100mW
Factor de llenado (FF)	24.5 %	30.5 %	38 %	51 %	24.2 %
Eficiencia (%)	0.02 %	0.05%	0.06 %	0.12 %	0.02 %

Tabla 2 Caracterización de las celdas solares tipo Grätzel
Fuente: *Elaboración propia*

El incremento en el valor FF se puede atribuir a la disminución de la resistencia en la interfaz TCO-electrolito. Lo cual atribuimos a la disminución de las resistencias en series entre el TCO y el fotoánodo mejorando el contacto eléctrico [17].

Por otra parte, el efecto del número de capas depositadas es evidente en el desempeño de la celda solar tipo Grätzel. Las diferencias significativas entre 4 y 10 capas son muestra de esto. Por lo que se sugiere continuar con futuros experimentos donde se analice detalladamente dicho efecto.

Conclusiones

En el presente trabajo, se reporta la investigación y desarrollo de celdas solares tipo Grätzel en donde se implementó un prototipo de deposición por rocío controlado vía una arquitectura de software de tipo LinuxCNC.

El cual fue desarrollado en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, en el laboratorio de energías renovables. Dicho prototipo fue utilizado para la deposición de películas compactas de Isopropóxido de Titanio.

En este estudio, las celdas solares producidas con capa compacta automatizada presentan un incremento en el FF con respecto a aquellas sin capa compacta. Los resultados obtenidos son alentadores pero se requiere una serie de cambios importantes que deben hacerse. Por ejemplo, la deposición de la capa comercial de TiO₂ del ánodo y del plastisol del cátodo, los cuales se realizaron de forma artesanal y deben ser automatizados para tener un control riguroso del proceso de elaboración de la celda solar.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT), al Tecnológico Nacional de México y al Apoyo a la Incorporación de NPTC por el financiamiento de este proyecto (PN-92-2015), (5625.15-P y 6177.17-P) y (511-6/17-8768) respectivamente. J.L. Alonso Pérez agradece el apoyo de su beca doctoral en ciencias de la ingeniería. También agradecemos el apoyo brindado a la M.C. M. A. Rojas Villalobos y Dr. J. C. Calva Yañez.

Referencias

[1] Reynoso-Soto, E., Alonso-Perez, J., Trujillo-Navarrete B., Cazarez-Castro, N. (2016). Automatización en la deposición de películas delgadas de nanomateriales para la posible utilización en celdas solares, CIERMMI, 1er. Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática

- [2] Alonso, J., Cazarez-Castro, N., Reynoso, E. (2016). Diseño de un robot cartesiano para la deposición de películas delgadas de nanomateriales, CIINDET, XIII International Congress on Innovation and Technology Development.
- [3] Seshan, K. (2012). Handbook of thin film deposition. William Andrew. . pp 14
- [4] Photovoltaic Cell, I. V. (2012). Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code. *Tutorial, National Instruments*.
- [5] Wang, H. F., Chen, L. Y., Su, W. N., Chung, J. C., & Hwang, B. J. (2010). Effect of the compact TiO₂ layer on charge transfer between N3 dyes and TiO₂ investigated by Raman spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(7), 3185-3189.
- [6] Gao, K.; Wang, D., Phys. Status Solidi RRL 2007, 1 (2).
- [7] Staroveški, T., Brezak, D., & Udiljak, T. (2013). LinuxCNC—the enhanced machine controller: application and an overview. *Technical Gazette*, 20(6), 1103-1110
- [8] J. Valentino and J. Goldenberg. "Introduction to computer numerical control (CNC) ". Englewood Cliffs: Prentice Hall, pp 203-213. 2003.
- [9] International Renewable Energy Agency (IRENA). Solar photovoltaics. Technical Report 4, 2012.
- [10] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaics Report; 2015
- [11] Roth, B. (2016). Operational stability of large scale OPV modules: interfaces, materials selection and stack design.
- [12] Xakalashé, B. S., & Tangstad, M. (2012). Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells. *Chem Technol*, 32-7.
- [13] International Energy Agency Photovoltaic Power System Program. Trends 2015 in Photovoltaic Applications; 2015.
- [14] Bagher, A.M., Vahid, M.M.A. and Mohsen, M. (2015) Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 94-113.
- [15] Srinivas, B., Balaji, S., Nagendra Babu, M. and Reddy, Y.S. (2015) Review on Present and Advance Materials for Solar Cells. *International Journal of Engineering Research-Online*, 3, 178-182.
- [16] Reale, A., La Notte, L., Salamandra, L., Polino, G., Susanna, G., Brown, T. M. & Di Carlo, A. (2015). Spray Coating for Polymer Solar Cells: An Up-to-Date Overview. *Energy Technology*, 3(4), 385-406.
- [17] Kovash, C. S., Hoefelmeyer, J. D., & Logue, B. A. (2012). TiO₂ compact layers prepared by low temperature colloidal synthesis and deposition for high performance dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*, 67, 18-23.

Producción híbrida de biodiesel solar con aceite vegetal usado en un concentrador cilíndrico parabólico

PÉREZ-BRAVO, Sheila Genoveva †*, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y SÁNCHEZ –BENAVIDES, Carlos Osvaldo

Universidad Politécnica De Altamira

Recibido Enero 07, 2018; Aceptado Junio 13, 2017

Resumen

En el mundo actual con la creciente demanda energética es necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energía, a un bajo costo. La energía solar en sus diversas formas de captación es una alternativa, así como la biomasa. El objetivo de la presente investigación es la producción del biodiésel por medio de un sistema híbrido que lleva consigo un beneficio ambiental y económico. Para ello, se utiliza un aceite vegetal usado de coste nulo, sometién dose a transesterificación con catalizador alcalino KOH y el 15% V/V de metanol; se utilizó un concentrador solar para dar la energía necesaria a la conversión, concentrándose en el reactor como punto focal, la transferencia de masa es realizada por los cambios en la densidad de las materias primas dentro del reactor cerrado, el tiempo de reacción fue de 3 horas, monitoreando las temperaturas máximas alcanzadas por el sistema, obteniéndose un rendimiento volumétrico del 90% de biodiésel, con una densidad de 0.890 gr/cm³. Este tipo de procedimiento beneficia, haciendo más sustentable el proceso de obtención de un biocombustible, a partir de un residuo, evitando la contaminación de aguas.

Biodiésel solar, biomasa, Transesterificación, sustentable

Abstract

In today's world with increasing energy demand is necessary to search for new sources of energy, at a low cost, solar energy in its various forms of capture is an alternative, as well as biomass. The production of the solar biodiésel is the combination of both and carries with it an environmental and economic benefit, a used vegetable oil of zero cost is used avoiding the contamination of waters, undergoing transesterification with alkaline KOH catalyst and 15% V / V of methanol, the energy required for the conversion is provided by the radiant energy of the sun, concentrating on the reactor as a focal point, mass transfer is carried out by changes in the density of the raw materials inside the closed reactor, the reaction time was 3 hours, monitoring the maximum temperatures reached by the system, obtaining a volumetric yield of 90% of biodiesel, with a density of 0.890 gr / cm³. This type of procedure benefits by making the process of obtaining a biofuel more sustainable, from a waste, avoiding the contamination of water.

Solar biodiesel, biomass, transesterification, sustainable

Citación: PÉREZ-BRAVO, Sheila Genoveva, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y SÁNCHEZ –BENAVIDES, Carlos Osvaldo. Producción híbrida de biodiesel solar con aceite vegetal usado en un concentrador cilíndrico parabólico. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 43-50.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: zamoraju@hotmail.com)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

México es uno de los países atrasados en la implementación de alternativas bioenergéticas en materia de combustibles para autotransporte, la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos es promulgada en 2008, tiene por objeto la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de coadyuvar la diversificación energética y el desarrollo sustentable, establece las bases para: promover la producción de insumos para bioenergéticos, desarrollar la producción, comercialización y uso de los bioenergéticos, promover en términos de la ley de planeación, el desarrollo rural, procurar la reducción de emisiones de contaminantes a la atmósfera y gases de efecto invernadero, coordinar acciones entre los Gobiernos, Federal, Estatales, Distrito Federal y Municipales para el desarrollo de los bioenergéticos. (DOF, 2008), cuando USA y Brasil son líderes en materia de bioenergéticos desde los años 70's (González y Castañeda, 2011).

México cuenta con una infraestructura tecnológica para el procesamiento de las semillas oleaginosas; sin embargo, depende de la importación de estas para la producción de aceites, principalmente maíz, soya, algodón y cártamo. Estados Unidos es el principal proveedor de granos de maíz, y el mayor destino de los aceites vegetales mexicanos registrando en 2014 un 60% de las ventas externas, seguido de la India con 9.2%, Alemania con un 6%, entre otros con porcentajes menores. En 2014, el aceite de Palma fue el más importado por México con un 44.42% (IICA, 2010).

La bioenergía, se refiere a la energía obtenida de la biomasa (González *et al.*, 2011), la cual es la fracción biodegradable de productos o residuos de origen animal, vegetal o industrial.

El biodiesel, es un bioenergético, se obtiene de los aceites vegetales nuevos o usados de semillas oleaginosas tales como la colza - canola, higuierilla – ricino, soja, jatropha – piñón, girasol y topinambur.

Es conocido por sus siglas en inglés FAME (Fatty Acid Methyl Ester) cuando es producido por la reacción de los triglicéridos con alcohol en presencia de un catalizador, generando como subproducto la glicerina, este procedimiento se denomina transesterificación. Los catalizadores más utilizados en el proceso de transesterificación son el hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH), alcanzan conversiones hasta del 98% (Riveros y Molano, 2006). La humedad, es un factor de riesgo en el proceso de transesterificación, ya que puede realizarse la saponificación de los triglicéridos produciéndose jabón y glicerina, si se utiliza la catálisis heterogénea con NaOH o KOH.

El biodiesel es el sustituto idóneo del diesel por sus características fisicoquímicas, una respuesta inmediata a la crisis energética mundial y precios al alza de hidrocarburos, así como la necesidad de proteger al ambiente. Una alternativa al desarrollo sostenible es el uso de aceites vegetales usados para la producción de biodiésel, ayudando a disminuir los factores exógenos que contribuyen a la contaminación.

El aceite vegetal usado (AVU) es un residuo que contamina recursos hídricos, un litro de AVU contamina 10 000 litros de agua (Echavarría, 2012). Su uso como materia prima en la producción de biodiesel, reduciría los costos del producto final. La producción de biodiésel solar a partir de AVU contribuye a garantizar la seguridad alimentaria, disminuir contaminación hídrica, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y emisiones contaminantes, además de ser una alternativa para la reducción de la dependencia energética.

La meta es hacerlo de calidad y competitivo económicamente, en comparación con el diésel de petróleo. El uso del potencial solar existente en México permitirá reducir los costos energéticos necesarios en la etapa de producción.

La fuente de energía radiante es el sol, el cual proporciona energía electromagnética en distintas longitudes de onda a la tierra, impactando de manera directa, difusa y reflejada, fuente considerada inagotable y no contaminante, de ahí parte el interés de utilizarla como alternativa al abastecimiento energético de la sociedad, se han realizado mapas solares desde 1975 hasta la actualidad por diferentes métodos, cada uno con diferente metodología y grado de exactitud (Estrada, 2008).

En el caso particular de la zona Altamira, se muestran los datos referenciados en la tabla 1, donde observamos la temperatura mínima de 14°C en el mes de enero y la máxima 39.9°C en el mes de agosto.

Las formas de aprovechamiento del recurso solar son la captación fotovoltaica y térmica de baja, media y alta temperatura, para la conversión directa a energía eléctrica o térmica utilizable directa o bien en centrales termosolares para generación de energía eléctrica.

Los colectores solares cilíndrico-parabólicos son clasificados como colectores solares de alta temperatura, de concentración puntual en el foco de la parábola, estimándose que alcanzan una temperatura superior a 500°C, el material de fabricación del CCP es el factor determinante para la reflexión al punto focal.

Mes	Radiación Global Diaria Promedio kWh/m ² .día	Tmin °C	Tmax °C	Tprom °C
Enero	3.538	14	18.43	18.46
Febrero	4.317	15.21	24.31	19.73
Marzo	5.201	17.3	26.19	21.7
Abril	6.318	20.19	28.79	24.48
Mayo	6.782	22.59	31	26.79
Junio	6.561	23.54	31.61	27.54
Julio	6.268	23.31	31.63	27.43
Agosto	6.241	23.5	31.9	27.7
Septiembre	5.393	22.8	31.09	26.9
Octubre	4.477	20.99	29.7	25.3
Noviembre	3.853	17.51	26.31	21.91
Diciembre	3.327	14.79	23	19.3

Tabla 1 Energía Solar en Tamaulipas

Fuente: http://qgiscloud.com/solartronic/radiacion_solar

Metodología

Previo al proceso de transesterificación solar de la biomasa residual (AVU), se realiza un pretratamiento al aceite, determinación de la acidez, determinación de reactivos y transesterificación.

Pretratamiento del AVU

El AVU se hace fluir por un dispositivo filtrante con retención de partículas de 8 micras, posteriormente es sometido a calentamiento hasta alcanzar los 100°C, manteniéndose constante la temperatura mientras se evapora el agua contenida en el AVU.

Determinación de acidez

En el AVU se encuentra una mayor cantidad de ácidos grasos libres, se requiere una valorización de ellos, previo al proceso de transesterificación, suele hacerse mediante titulación ácido base con NaOH al 0.1% e indicador fenolftaleína, se miden los mililitros necesarios para alcanzar un pH entre 8-9.

El volumen gastado indica la cantidad excedente de catalizador necesaria para el proceso de transesterificación con catalizador alcalino homogéneo, para un litro de aceite nuevo se requieren 3.5 gr de catalizador, la suma de los 3.5 gr y el excedente necesario será la cantidad necesaria para el proceso de transesterificación y neutralización de los ácidos grasos libres (Calero, 2007).

Al realizar la determinación de acidez del AVU a transesterificar, se determinó una acidez de 0.93, este resultado implica que deben utilizarse 4.43 gr de KOH / L de AVU.

Determinación de reactivos

Para la obtención de los FAME, se requiere un alcohol y un catalizador, dependiendo del reactivo seleccionado el proceso se conoce como metanolisis o etanolisis (Rodríguez 2008). Dependiendo del catalizador utilizado, se denomina catálisis ácida, básica o enzimática. (Cifuentes, 2010)

Las cantidades específicas de los reactivos varían acorde a cada investigador, en experimentos realizados con metanol y KOH se encontró que los mejores rendimientos se obtienen realizando la transesterificación en un rango de 60-65°C, no observándose variación a una temperatura superior, una óptima relación molar metanol/aceite de 6 y una concentración del 0.5-2% de catalizador. (Luz y Kaiser 2014).

En otros experimentos se ha realizado la técnica sin utilizar una relación molar, solo un volumen del 25% de metanol con respecto al volumen de aceite a tratar a una temperatura de 60°C, con agitación continua, durante 1 h, con catalizador NaOH.

Las investigaciones antes mencionadas fueron realizadas en aceites vegetales puros, sin usar previamente. Debido a la naturaleza diversa de nuestra materia prima, se decidió estandarizar el proceso y utilizar un 20% V/V de metanol anhidro marca Analytica, con el catalizador previamente calculado.

Transesterificación

Se ensayaron muestras de 100 ml de AVU, 0.443 gr de KOH y 20 ml de metanol, vertidas en un matraz Erlenmeyer de 250 ml tapado con un tapón horadado y un termómetro; dicho matraz es colocado en el punto focal de un concentrador cilíndrico parabólico fabricado de aluminio, en una zona expuesta a la radiación solar durante 3 horas, proporcionándole la energía necesaria para la reacción (Figura 1).



Figura 1 Transesterificación

Fuente: Propia

En la Figura 2, se observa que, durante el transcurso de la exposición a la radiación solar, se realiza la transferencia de masa provocada por el incremento de temperatura, y la deposición de la glicerina.



Figura 2 Transferencia de masa
Fuente: Elaboracion Propia.

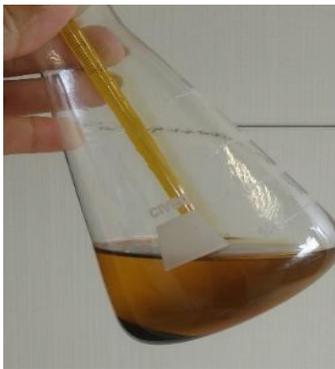


Figura 3 Reacción finalizada
Fuente: Elaboracion Propia

Al término del tiempo de exposición a la energía radiante, se observan la separación de fases, biodiesel y glicerina, las cuales observamos en la figura 3.

La disponibilidad del equipo de laboratorio, sólo nos permite medir la densidad, siendo esta 0.890 gr/cm³, encontrándose dentro del rango aceptable.

Resultados

En la Tabla 2, se muestran los datos recolectados durante los ensayos realizados en el mes de abril; se determinó el incremento de temperatura en cada muestra, el rendimiento volumétrico y el registro de las pérdidas por volatilidad.

E	T ₁	T ₂	ΔT	Biodiésel	Glicerina	Rendimiento	Perdidas por volatilidad
E1	29	52	23	104	8	90.435	3
E2	28	62	34	105	8	91.304	2
E3	27	67	40	104.5	8.3	90.870	2.2
E4	28	60	32	105	8	91.304	2
E5	28	55	27	103	8.3	89.565	3.7
E6	28	34	6	103.5	7.5	90.000	4
E7	30	60	30	103	7.5	89.565	4.5
E8	28	54	26	106	8.5	92.174	0.5
E9	29	56	27	103	8.6	89.565	3.4
E10	29	60	31	105	8.5	91.304	1.5
E11	29	55	26	101.5	9.5	88.261	4
E12	29	59	30	104	7.5	90.435	3.5
E13	29	60	31	105	7.5	91.304	2.5
E14	29	51	22	103	8	89.565	4
E15	29	50	21	105	8	91.304	2
E16	28	47	19	106	8	92.174	1
E17	29	57	28	105	8	91.304	2
E18	30	59	29	106	9	92.174	0
E19	30	54	24	106	7.8	92.174	1.2
E20	29	54	25	105	7.9	91.304	2.1
E21	29	51	22	103	8	89.565	4
E22	29	50	21	105	8	91.304	2
E23	28	47	19	106	8	92.174	1
E24	29	57	28	105	8	91.304	2
E25	30	59	29	106	9	92.174	0
E26	30	54	24	106	7.8	92.174	1.2
E27	29	59	30	105	7.9	91.304	2.1

Tabla 2 Registro de datos
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3, se muestra el análisis de datos realizado en el software Minitab 18. En los datos se muestran, donde localizar los valores mínimos, máximos y medias de las variables registradas.

Variable	Media	MediaRec	Desv.Est.	Mínimo	Máximo	Rango
T1	28.852	28.880	0.770	27.000	30.000	3.000
T2	54.93	55.28	6.29	34.00	67.00	33.00
ΔT	26.07	26.32	6.26	6.00	40.00	34.00
Biodiesel	104.61	104.68	1.24	101.50	106.00	4.50
Glicerina	8.1148	8.0840	0.4817	7.5000	9.5000	2.0000
Rendimiento	90.966	91.026	1.074	88.261	92.174	3.913
Perdidas por volatilidad	2.274	2.276	1.277	0.000	4.500	4.500

Tabla 3 Estadísticas descriptivas
Elaboración: Elaboracion Propia

El Gráfico 1, muestra la gráfica de caja de las variables temperatura inicial, temperatura final e incremento de temperatura de cada muestra, este tipo de gráfica sirve para identificar los valores dentro de cada cuartil y observar los errores estadísticos.

Como se puede observar la temperatura inicial de las muestras se mantenían en un promedio de 28.88°C, alcanzando la temperatura final de 55.28°C, el incremento de temperatura proporcionado por el concentrador solar cilíndrico parabólico fue de 26.32°C, en las tres horas de exposición de cada muestra.

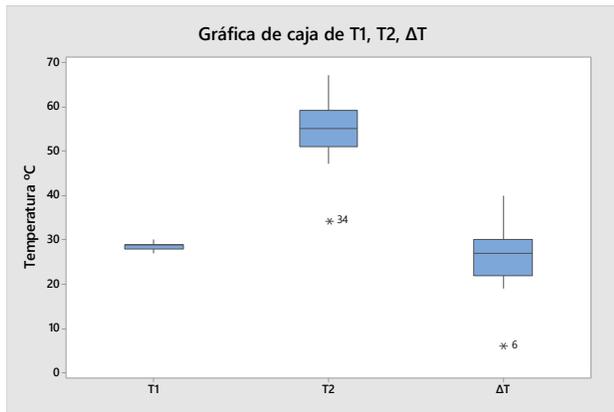


Gráfico 1 Gráfica de caja T₁, T₂, ΔT
Elaboración: Propia

En el gráfico 2 se puede observar, mediante una gráfica de intervalos, al nivel de confianza del 95% para la media, los valores correspondientes al rendimiento volumétrico, siendo el 90.5413% el rendimiento mínimo y 91.3011% el rendimiento máximo, calculándose el promedio en 90.9662%.

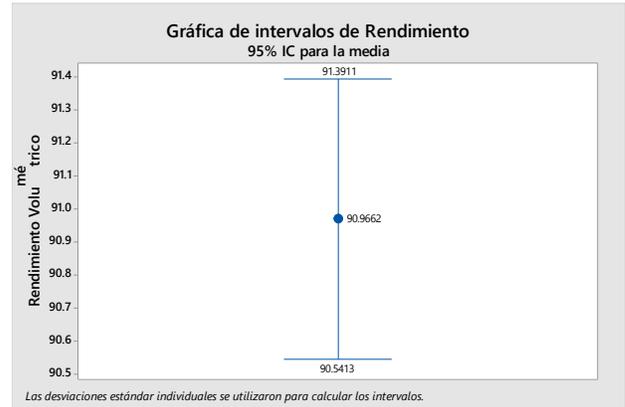


Gráfico 2 Gráfica de intervalos de Rendimiento
Fuente: Elaboración propia

Durante la investigación se observó la disminución del volumen final en el reactor, registrándose y analizando los datos en el software estadístico, mismos que se muestran en el Gráfico 3, determinándose en el rango de 1.76883-2.77932 ml, promediándose en 2.27407 ml.

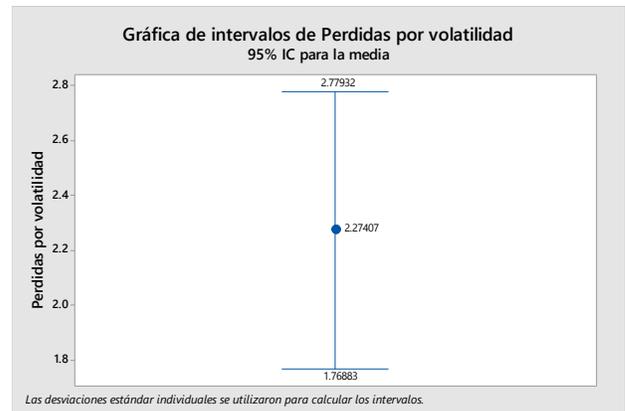


Gráfico 3 Gráfica de intervalos de perdidas por volatilidad
Elaboración: Propia

Respecto a la caracterización del biodiesel sólo se determinó la densidad, siendo de 0.890 gr/cm³, encontrándose dentro del rango 0.800 – 0.900 gr/cm³ establecidos en la norma europea EN14214.

Agradecimiento

Al Laboratorio de propiedades Físicoquímicas del programa de Ingeniería en Energía de la Universidad Politécnica de Altamira por todas las facilidades prestadas al desarrollo de esta investigación.

Conclusiones

Al término de la investigación denominada Producción Sustentable de Biodiesel con Aceite Vegetal Usado en un Concentrador Cilíndrico Parabólico, concluimos que el proceso de producción de Biodiesel Solar es posible de realizar con la radiación electromagnética de la zona de estudio, en este caso: Altamira, Tamaulipas; dicha radiación aporta la energía necesaria para una transferencia de masa por diferencia de densidades, sin la necesidad de utilizar un agitador, eliminando el costo energético que normalmente se proporciona con parrillas de agitación magnética, obteniendo un rendimiento volumétrico promedio de 90.96%, se observan pérdidas de volumen, atribuidas a la volatilidad del metanol, a pesar de que el reactor es cerrado.

El uso de aceites vegetales usados y la energía solar en el proceso de transesterificación para la obtención de Biodiesel Solar es un proceso híbrido y sustentable, su costo de producción es inferior a otros al eliminar el costo de energía eléctrica utilizada para proporcionar calor y agitación al proceso, disminuye la contaminación de recursos hídricos por AVU, la disminución de emisiones por la combustión del biodiesel, además de beneficiar a la sociedad en los impactos ambientales, ofrece una oportunidad de disminuir la dependencia energética.

Referencias

Calero Cáceres W.; Chicaiza E.; Chicaiza W. y Vizuete D. (2007). “Síntesis y refinación de biodiesel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal”, Universidad Central del Ecuador, Facultad de ciencias químicas, Quito D.M.

Cataño Conde C., Narváez Martínez R., Quintero P., Yaber Bernal G., (2012). “Importancia e impacto del Biodiesel como energía renovable a partir de aceites vegetales reciclados en Barranquilla”, Revista Académica libre-Universidad Libre-Barranquilla, año 9, No.10.

Cifuentes Guerrero M. (2010). “Obtención de biodiesel a partir de aceite usado de cocina por transesterificación en dos etapas, con dos tipos de alcoholes”, tesis de maestría en ingeniería con énfasis en energías alternativas, Universidad libre, facultad de ingeniería, Santa Fe, Bogotá.

DOF (2008) Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. Diario Oficial de la Federación. [En línea] http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5029330&fecha=01/02/2008. Consultado 12/06/2017

Duran Julio C., Godfrin Elena M. (2004). “Aprovechamiento de la Energía Solar en Argentina y en el Mundo”. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie de publicaciones científicas N°1.

Echavarría Restrepo J. (2012). “El desarrollo sostenible y el reciclaje del aceite usado de cocina a la luz de la jurisprudencia y el ordenamiento jurídico colombiano”. P + L, Producción + Limpia, enero – junio. Vol.7. No. 1. ISSN: 109-122.

Estrada Cajigal V. (2008). “Fuentes de información de datos de radiación solar” SOLARTRONIC S.A.DE C.V. abril 2008.

González A. y Castañeda Y. (2011) “Biocombustibles, Estados Unidos, su estrategia hegemónica competitiva y la influencia en la política energética de México”, Vol. II, No. 21.

Luz Lugo M.; Bergolla D. y Rodríguez K. (2014). “Producción de Biodiesel a partir de la transesterificación de aceites vegetales residuales con KOH como catalizador” *Scientific Journal* from the experimental faculty of sciences, at the Universidad e Zulia, Vol. 22. No. 2.

Martinez Herrera José, (2007). “El piñon mexicano; una alternativa bioenergética para México”, revista digital universitaria, volumen 8, ISSN: 1067-6079.

Mapa Solar [En línea]
http://qgiscloud.com/solartronic/radiacion_solar/?bl=ROADMAP&st=tamaulipas&e=11674902%3B2532636%3B10283137%3B3196721&t=radiacion_solar&l=Areas_Naturales_Protegidas%2Clineas_de_transmision%2CGHI_T Consultado 25/06/2017

Riveros S. L. M. y Molano M. A. (2006). “Transesterificación del aceite de palma con metanol, por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido”. *Revista de Ingeniería*, Universidad de los Andes, ISSN: 0121-4993.

Diseño de sistema de control automatizado con sistemas embebidos, aplicaciones móviles y el internet de las cosas

CALDERA, Carlos *†, LOPEZ, Jesús, OLIVAS, Héctor y GALLEGOS, José

Recibido Enero 07, 2017; Aceptado Marzo 13, 2017

Resumen

El internet de las cosas nace de la necesidad de que cada instrumento, dispositivo u objeto de uso cotidiano pueda estar interconectado por medio de internet, de modo que permita ser monitoreado y/o controlado desde cualquier lugar en tiempo real. En base a lo anterior se diseña una aplicación móvil e interfaces que, mediante internet, se conecta a una base de datos, la cual recibe parámetros desde un sistema embebido acerca del proceso que se está controlando y es capaz de gestionar variables del sistema. Para efectos de experimentación se aplicó el sistema mencionado en el control de una caldera, utilizando un PLC 1200 SIEMENS el cual se encarga de accionar los distintos elementos de control de la caldera y de recopilar información de los diferentes sensores para enviarla hacia un sistema embebido que funge como intermediario en la comunicación con una base de datos alojada en la nube. Se desarrolló también una aplicación para dispositivos móviles bajo el sistema operativo Android, la cual con solo tener una conexión a internet puede extraer y/o modificar información ubicada en la base de datos. Este sistema puede adaptarse para el control de cualquier proceso que se desee gestionar vía remota.

Internet, Embebidos, Interfaz, Control, Móviles

Abstract

The Internet of things born from the need to each instrument, device or daily objects can be interconnected via internet, and can be monitored and/or controlled from anywhere in real-time. Based on the above, a mobile application and different interfaces are designed that, via internet, connect with a data base, it receive parameters from an embedded system about the process that is being controlled and it is able to manage system variables. As experimentation was applied the system mentioned in the control of a boiler, using a PLC 1200 SIMENS which is responsible for operating the various control elements of the boiler and to collect information from different sensors to send it to an embedded system that acts as an intermediary in communication with a data base hosted in the cloud. An application for mobile devices with Android operating system was developed which can get and/or modify information located in the data base by simply having an internet connection. This system can be adapted to control any process that is desired to be managed remotely.

Internet, Embedded, Interface, Control, Mobiles

Citación: CALDERA, Carlos, LOPEZ, Jesús, OLIVAS, Héctor y GALLEGOS, José. Diseño de sistema de control automatizado con sistemas embebidos, aplicaciones móviles y el internet de las cosas. Revista de Tecnología e Innovación 2017, 4-11: 51-62.

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: ccaldera@itchihuahua.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El uso del Internet está en constante crecimiento dentro de los diferentes ámbitos sociales (Evans, 2011). Hoy en día, existen miles de dispositivos conectados a la red que dan origen al concepto de Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT por sus siglas en inglés), el cual sugiere una tendencia hacia un mundo conectado completamente a internet (Morgan, 2014), un ejemplo de esto es que, el 39.2% de los hogares mexicanos tienen acceso a internet.

En los últimos años el alza en la producción de dispositivos electrónicos con la capacidad de conectarse a internet y que además, cuentan con características que les permiten interactuar entre sí, nos habla del impacto que tiene la corriente del internet de las cosas en segmentos de la sociedad más relacionados a la vida cotidiana, por lo que es un hecho que un alto porcentaje de la población actual tenga acceso a internet y a uno o más de este tipo de dispositivos electrónicos, dentro de los más comunes están los Smartphone (teléfonos inteligentes), las computadoras portátiles, las Tablet, los Televisores, etc. Estadísticamente se registró que para inicios del año 2016 alrededor de 77.7 millones de personas en México cuentan con un teléfono celular, de los cuales 51.8 millones cuentan con un Smartphone, además para ese mismo año el 57.4% de la población total en México a partir de los 6 años se declaró usuario activo de Internet (INEGI, 2016).

No es de sorprender que con tal crecimiento el internet este presente, no solo en los hogares, sino también en el sector industrial (Arroyo, 2015), el cual se encuentra en una constante búsqueda por desarrollar nuevas y mejores técnicas que logren una mayor eficiencia y facilidad en los procesos de manufactura o de producción.

En este caso se abordará el término de Industria 4.0, el cual establece que la base fundamental del internet de las cosas y las nuevas tecnologías será empleada para mejorar el rendimiento de los procesos llevados a cabo dentro de la industria (Gradiant, 2016). Dado lo anterior se acuña el concepto de I2oT (Industrial Internet of Things, por sus siglas en inglés), el cual es el fundamento base para el desarrollo de sistemas de control, en los que los distintos elementos del proceso se encuentren interactuando por medio de internet para obtener la información del estado actual, y lograr una mayor eficiencia (IOTSENS, 2016).

Para efectos de experimentación se realizó la automatización de una caldera, en la cual se utilizan los conceptos anteriores incluyendo el desarrollo de una aplicación móvil, esto con el fin de aprovechar las ventajas que nos ofrece el internet de las cosas. El proceso funcional de la caldera se lleva a cabo de manera automatizada con el uso de un controlador lógico programable marca SIEMENS modelo 1200, el cual nos provee de entradas digitales suficientes para el manejo de las señales de control básicas como lo son el encendido y apagado del sistema, el abrir o cerrar de la válvula para el paso de gas o bien la activación o desactivación del circuito generador de chispa para encender el quemador, además hizo uso de un módulo extensor para lectura de señales análogas, con el fin de monitorear el nivel de presión que se produce durante el proceso.

Para facilitar el procesamiento de la información al PLC y el envío de la misma a la base de datos, se optó por utilizar un sistema embebido, el cual toma función como interprete entre el PLC, el proceso automatizado y la aplicación móvil.

Este sistema embebido está conformado por una tarjeta de desarrollo Arduino, el cual debido a su característica comercial se hace accesible y en relación a su arquitectura de hardware nos da la oportunidad de procesar las señales básicas del proceso. La principal razón para implementar un sistema que englobe estas tecnologías busca disminuir, de manera considerable, la necesidad de que el usuario esté presente en el lugar donde se lleva a cabo un proceso específico, utilizando para ello tecnología accesible, en este caso un dispositivo móvil, volviendo más cómodo para el usuario el control de dicho proceso. De manera esquemática el sistema se divide en las siguientes partes:

- Aplicación móvil para sistema operativo Android.
- Base de datos en la nube.
- Prototipo de una caldera pirotubular.
- Microcontroladores.
- Controlador programable.

La figura 1 muestra la distribución de las partes que conforman todo el sistema de control desde la aplicación móvil hasta el proceso a controlar.

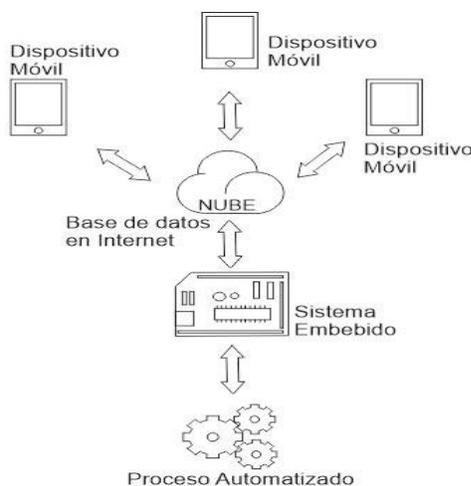


Figura 1 Esquema del sistema completo de control

Proceso automatizado para una caldera Pirotubular

La caldera es un dispositivo que genera vapor de agua a través de una transferencia de calor. El proceso normal de una caldera pirotubular en general se basa en el calentamiento del agua que hay dentro de la misma, para cambiar de fase llevándola a vapor saturado. La caldera que se automatizó tiene una presión de 2 bares (29.0065 psi) como límite máximo.

Para tener el control de dicha presión, es necesario monitorear variables como: presencia de flama, combustible, chispa y la ventilación para aumentar la eficiencia en la combustión y expulsar los gases remanentes que se encuentran dentro de la cámara. Dado que no en todo momento es necesario que se esté generando chispa, ya que puede significar un riesgo, el monitoreo de presencia de flama proporciona información al controlador para que interrumpa la generación de chispa una vez producida una flama estable.

A partir de esto comienza a calentarse el agua que se encuentra dentro de la caldera para producir vapor. Las variables de temperatura y presión juegan un papel muy importante durante la generación de vapor, por lo que se deben medir constantemente para evitar algún accidente que signifique un riesgo para el usuario o dañe algún elemento de la caldera.

Para el proceso de automatización de la caldera se utilizó la secuencia que se muestra en la figura 2.

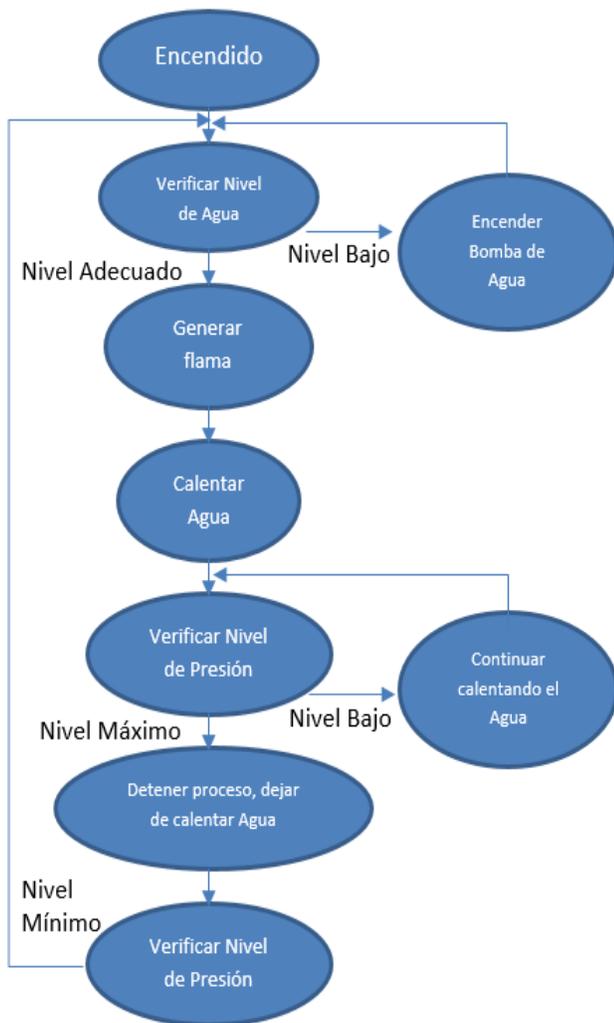


Figura 2 Flujo del proceso funcional de la caldera

Sistema Embebido

Para el monitoreo de estas variables que son complejas y cuyas lecturas provienen de sensores que no solo están enfocados en detectar la presencia o no de la variable física, sino que nos proporcionan una medición que está dentro de un rango de valores, la información de estos sensores es recopilada por un sistema embebido.

El cual se encarga de hacer el procesamiento de los datos un tanto más sencillo y de esta manera facilitar al controlador la toma de decisiones y, a la vez, el envío de las lecturas a la base de datos que se encuentra sincronizada con la aplicación móvil.

Al obtener las lecturas requeridas de las variables durante el proceso, se puede monitorear el estado de la caldera de manera que se cuente con un control de seguridad en caso de que exista algún riesgo en su operación.

Cuando el sistema embebido recopiló y procesó la información, ésta es enviada al usuario por medio de la aplicación móvil. Para lograr esto, el sistema embebido debe realizar una conexión con una base de datos alojada en la nube y, al mismo tiempo, sincronizarla con el dispositivo móvil del usuario, donde, además de poder monitorear las variables, el usuario tiene la capacidad de obtener las lecturas en tiempo real del sistema por medio de los sensores.

En base a lo anterior, el usuario tiene la oportunidad de realizar acciones básicas de control y monitoreo desde la aplicación móvil en su dispositivo, como iniciar o detener el proceso en el momento que sea necesario.

Como se ha comentado, el prototipo utiliza sistemas embebidos, es importante tener en cuenta que un sistema embebido es una combinación de software y hardware, en algunos casos se agregan piezas mecánicas para lograr una función específica y cumplir con un propósito, el cual puede ser modificado acorde a las necesidades mediante software.

Algunas veces un sistema embebido es un componente de un sistema mucho más grande, tal y como sucede en el prototipo propuesto. En este caso se tienen dos sistemas embebidos y cada uno realiza distintas funciones.

Cada sistema embebido cuenta con un procesador, el cual, varía en cuestión de características funcionales dependiendo de la aplicación y los requerimientos que ésta tiene. Con fines de experimentación y a base de una investigación previa acerca de los requerimientos de la caldera, se encontró como mejor opción el uso de una tarjeta de desarrollo Arduino, ya que es una plataforma abierta para creación de prototipos flexibles.

El sistema Arduino es de fácil programación y cuenta con software y hardware libre, además su arquitectura proporciona un desarrollo de hardware mucho más sencillo, como parte importante y esencial de esta plataforma, existe una gran cantidad de complementos para elevar el desempeño del mismo. El módulo utilizado que permite una conexión a internet, es el módulo de interfaz Ethernet mostrado en la figura 3.



Figura 3 Tarjeta Arduino con Modulo Ethernet

Seguridad

El prototipo de caldera diseñado para la fase de experimentación, cuenta con un sistema de seguridad que permite controlar el proceso en caso de que ocurra algún problema con la aplicación móvil o con la conexión que se realiza a través de internet. Esta opción de control refuerza la cuestión de seguridad tanto para el usuario como para el proceso mismo.

Base de datos en la nube

El módulo Ethernet está en constante comunicación con la base de datos alojada en la nube. El primer sistema embebido se encarga de obtener los datos por medio de sensores y almacenarlos en la nube. Para ello usa la conexión a internet y realiza el registro, como se muestra en la figura 4.

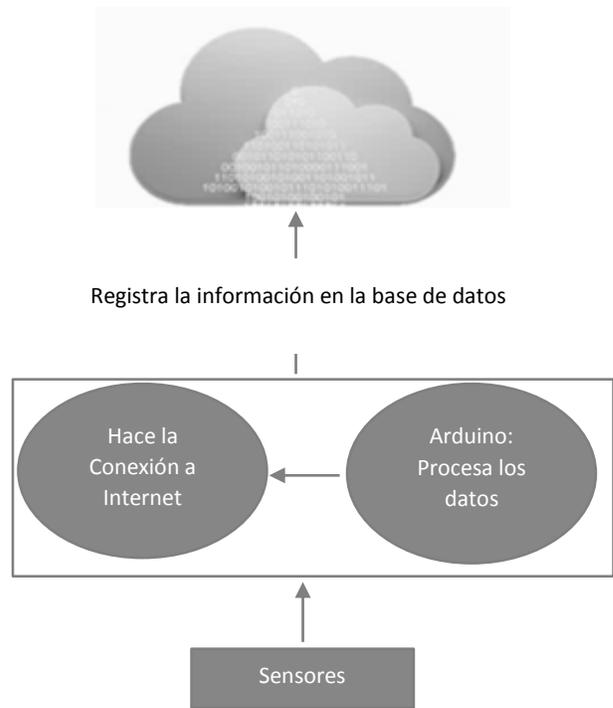


Figura 4 Envío de datos del Sistema embebido a la Nube

La información recolectada a través de los sensores normalmente está en función de voltajes y corrientes, los cuales mediante sistemas de acondicionamiento de señales deben ser procesados, convirtiéndolos en unidades que el usuario pueda interpretar, con la ayuda del módulo Ethernet, se registra dicha información en la base de datos. Todo lo anterior se realiza en tiempo real, es decir, al obtener los datos o cada vez que cambie uno de ellos se realiza el registro.

Para el segundo sistema embebido, la función asignada fue leer desde la base de datos, ya que ésta puede ser modificada desde la aplicación móvil, haciendo esencial tener la lectura de la base de datos en tiempo real para ver las modificaciones que se realizan. La figura 5, expresa la función que tiene el sistema. El Arduino lee, procesa y envía los datos a la unidad central.

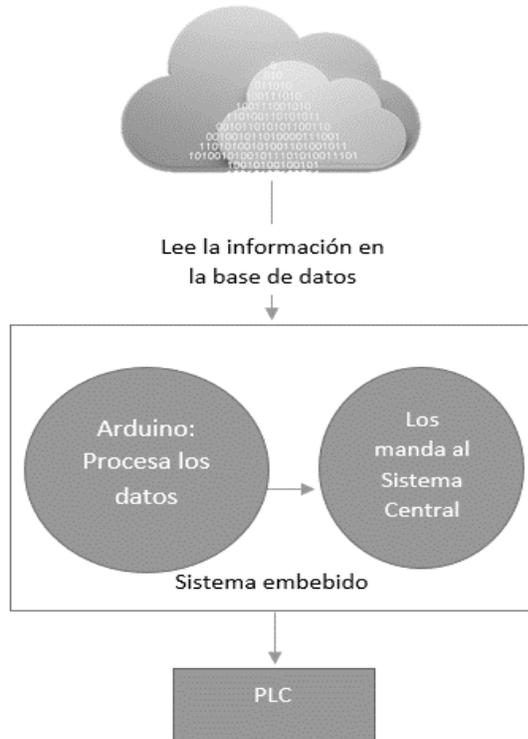


Figura 5 Recepción de datos del Sistema embebido desde la Nube

Ambos sistemas embebidos realizan una interacción en tiempo real manteniendo la comunicación entre el proceso a controlar y el dispositivo móvil.

Aplicación Móvil

La aplicación móvil, es un programa que se puede descargar y acceder desde un sistema operativo diseñado para dispositivos móviles. Existe una gran variedad de usos y diseños para estas aplicaciones y su popularidad crece de manera exponencial entre los usuarios de estos dispositivos. Estas deben ser diseñadas de tal forma que sean cómodas e intuitivas para que el usuario pueda entender y manejar con fluidez y sin complicaciones las utilidades que puedan brindar.

La necesidad de controlar uno o múltiples procesos sin la limitante que la distancia implica, es la razón principal por la que se desarrollan estas aplicaciones y se busca constantemente la evolución de estos dispositivos, convertidos en herramientas cotidianas.

Esta necesidad fue la idea principal que permitió llevar a cabo el prototipo planteado anteriormente, el cual busca crear un control no solo de un proceso en particular, sino una herramienta capaz de adaptarse a las necesidades que el proceso demande, así como otorgar las facilidades que el usuario requiera. Es por eso que el internet de las cosas resulta de gran importancia para este proyecto, el cual busca eliminar en gran medida la limitante que supone la distancia, haciendo prácticamente innecesaria la presencia del usuario en el lugar donde el proceso se efectúa.

De igual manera se ofrece un diseño amigable y fácil de entender al usuario, para que el flujo de información que este recibe no resulte abrumante y el manejo del proceso sea lo más natural posible, tal y como si se encontrara ahí.

El control y monitoreo a distancia empieza a partir del servidor en la nube, el cual se encarga de manejar la información, así como almacenar registros de operaciones que luego puedan ser accesadas de manera ordenada si así se requiere. Cualquier proceso que desee acoplarse a este sistema, tendrá que ser conectado de manera directa a un sistema embebido, el cual se encargará de tomar lectura de toda la información que el proceso pueda brindar por medio de los sensores que éste maneje.

Toda esta información es procesada por el sistema embebido y enviada al servidor donde se crearán los registros, la información se vuelve accesible a los dispositivos que estén autorizados para interactuar con el proceso. Estos dispositivos deben contar con la aplicación correspondiente, que es universal para controlar cualquier proceso, el cual será definido a partir de la información a la que el usuario pueda acceder en la base de datos, para ello se debe contar con un usuario y contraseña.

Una vez que se accede al registro correspondiente la aplicación muestra al usuario todas las lecturas que brinda el proceso, así como todas las variables que se pueden controlar. Cualquier cambio que se haga a partir de la aplicación se envía de manera inmediata al servidor y lo envía al sistema embebido que se encarga de manipular los actuadores del proceso. Existen diferentes plataformas de desarrollo para aplicaciones móviles, desde las más sencillas hasta las que requieren un conocimiento más detallado sobre programación.

Dentro de las plataformas más comunes se analizó cual es la que brinda mayor libertad para el diseño, la primera y más sencilla de utilizar es la llamada App Inventor, la cual es una herramienta de desarrollo creada por el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) con el fin de promover el diseño de aplicaciones móviles desde una perspectiva más amigable, ya que permite crear aplicaciones con el uso de bloques, haciéndola una herramienta más interactiva, la desventaja de dicha herramienta es que la libertad de diseño se resume a lo que esta prediseñado en App Inventor.

Como segunda opción se contempló Android Studio, una plataforma de desarrollo que proporciona más libertad al momento de realizar el diseño de la aplicación, ya que proporciona mayor flexibilidad al ser el usuario quien se encarga de la mayor parte del desarrollo y no la plataforma en sí, la mayor desventaja y el claro hecho por el cual fue descartada la idea del uso de Android Studio, es que solo permite el desarrollo de aplicaciones compatibles con el sistema operativo Android, haciendo que la portabilidad sea más complicada y, además, exista la necesidad de una herramienta de desarrollo extra que permita dar compatibilidad a la aplicación con los distintos sistemas operativos existentes.

Por último se consideró el uso de Visual Studio debido a que actualmente cuenta con un complemento proporcionado por el entorno de desarrollo Xamarin, el cual nos permite desarrollar aplicaciones para un sistema operativo ya sea Android, IOS o Windows Phone y con la ventaja de que puede hacerse compatible con cualquiera de los otros dos sistemas operativos con las mínimas modificaciones.

En este caso se optó por diseñar la aplicación en el sistema operativo Android, debido a que es uno de los más utilizados actualmente en el mundo.

Por otro lado para lograr que la aplicación que se diseñó realizara la conexión con una base de datos alojada en la nube, se contemplaron diferentes opciones, la primera consistía en la implementación y creación de un servidor propio, en el cual se tendría un completo control de los datos, con el inconveniente de que significaba mayor trabajo y una gran disminución en el aspecto de seguridad. Por este motivo se optó por buscar el servicio de algún proveedor externo.

Existe una amplia gama de servicios de alojamiento de datos en la nube tanto gratuitos como de paga, por lo cual fue necesario analizar diferentes opciones de servicios. La primera opción consistía en un servidor gratuito llamado 000WebHost el cual fue descartado debido a las limitantes de espacio y administración que ofrecía.

Como segunda opción se pensó utilizar el servicio de Azure, el cual al estar vinculado con la plataforma en la que se desarrolló la aplicación ofrecía ventajas de desarrollo y una gran libertad en la administración de información dado que es un servicio de paga, la razón por la que no se continuó el trabajo con este servicio fue el alto precio del mismo.

Como última instancia se decidió trabajar con Firebase, el cual es un servicio de alojamiento en la nube perteneciente a Google. Firebase ofrece diferentes tipos de servicios que varían en precio y características. Para fines de experimentación se utilizó el servicio gratuito.

Una vez seleccionado el ambiente de desarrollo para la aplicación y el servicio con el cual se estaría realizando la comunicación vía internet, se diseñó la interfaz visual de la aplicación y se comenzó a trabajar con la base de datos en la que se registra la información que el usuario maneja desde la aplicación, esta información se almacena en el servidor utilizando el formato JSON, el cual es una matriz de caracteres que facilita la transmisión de datos entre los diferentes dispositivos.

Metodología (Experimental)

La comunicación entre la aplicación móvil y el proceso se realizó estando conectado por medio del sistema embebido a una red local con servicio de internet y por medio de la red de un dispositivo móvil, con el fin de simular que el control del proceso se realiza a larga distancia. Se monitoreó el nivel de presión que se producía en la caldera desde el controlador, el sistema embebido, un manómetro y la aplicación móvil en distintos tiempos con el fin de observar las lecturas de presión y verificar si las conversiones eran correctas.

Por medio del controlador y el sistema embebido se compararon los valores de presión obtenidos junto con los valores que arrojaba el manómetro, y desde la aplicación móvil solo se monitoreó cuando la caldera llegaba a producir el nivel de presión máximo para detener el proceso de producción de vapor y cuando se encontraba en el mínimo para reiniciar dicho proceso.

Resultados

Se simuló el programa utilizando el software TIA PORTAL V13, donde se conectó el PLC vía Ethernet, y se usó una fuente de voltaje y un potenciómetro para variar la corriente representando el sensor analógico de presión el cual es estándar 4 mA- 20 mA donde 4 mA equivale 0 bar y 20 mA equivale a 10 bar.

El valor definido de presión máxima del vapor es de 2 bar, en la simulación del sensor entregaría un valor de 7.2 mA obtenido de la siguiente ecuación de interpolación:

$$y = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) + y_0 \tag{1}$$

Despejando:

$$\frac{16}{x - 4} = \frac{10}{2}$$

$$x - 4 = 3.2$$

$$x = 7.2 \text{ mA}$$

Cuando se llegó a este valor se apagó la señal de la electroválvula y el ciclo volvió a empezar cuando la presión alcanzó a 1 bar, el cual usando la ecuación 1 nos dio un valor de 5.6 mA.

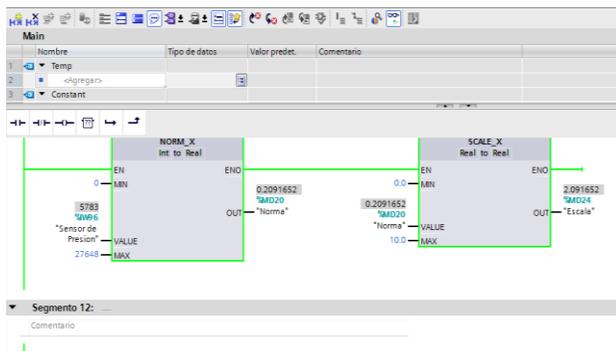


Figura 6 Programa realizado para leer las lecturas de presión en TIA PORTAL V13

Al realizar la prueba físicamente se obtuvieron los siguientes resultados representados en el gráfico de Presión-Tiempo (Gráfico 1) donde la presión tiene un comportamiento exponencial en bares y las lecturas se tomaron cada 20 segundos.

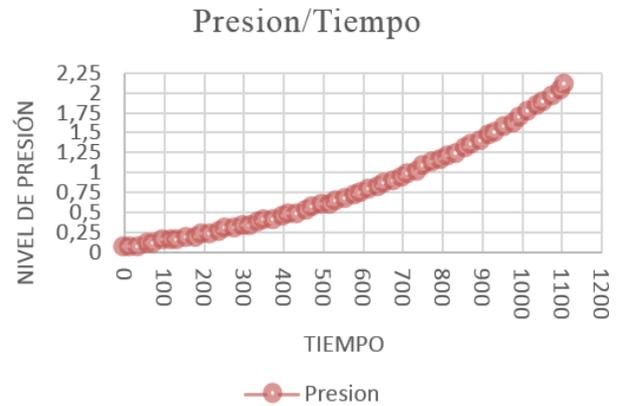


Gráfico 1 Incremento de presión dentro de la caldera con respecto al tiempo

Los datos obtenidos por medio de un sensor CoelMatic PA-21Y se observaron por un valor binario y por medio de un arreglo, se registró el valor binario pasándolo a unidades de presión (bares). Para verificar el monitoreo también se obtuvieron las lecturas de presión por medio de un manómetro (véase Figura 7) instalado en la caldera asegurando que los datos obtenidos en el programa son los correctos.

En relación a las variables de presencia de flama y el generador de chispa solo fueron interpretadas de manera booleana, es decir, solo contemplan dos estados, “ENCENDIDO” o “APAGADO”, por lo que fue posible se verificar las lecturas de manera visual simulando el estado de dichas variables con un LED indicador. En cambio con respecto al generador de chispa, se realizaron pruebas durante el pleno funcionamiento de la caldera.

Dicho actuador nos permitió verificar físicamente el funcionamiento del circuito detector de flama confirmando los resultados obtenidos al realizar las observaciones durante la simulación con el LED.



Figura 7 Manómetro con salida de datos analógica

Mediante el Arduino Mega y el módulo Ethernet se realizó una página de internet la cual monitorea todas las variables de entrada y salida del PLC. Gracias a esto podemos obtener los datos de la caldera y visualizarlo desde nuestra aplicación móvil.

Mediante las salidas y entradas del PLC se obtienen las variables, acoplándolo con un transistor de potencia para que la conexión sea posible. El programa del Arduino recibe todas las variables para monitorearlas y así enviarlas a la página.

Para el caso de la aplicación móvil, se realizó en Visual Studio únicamente para la plataforma Android, como experimentación. La aplicación fue diseñada en la versión API Level 24, es decir para sistemas operativos Android 7.0 Nougat y anteriores.

Durante el desarrollo se utilizaron complementos y componentes para hacer que la aplicación fuera fácil de navegar, entender y que tuviera un buen diseño, tales componentes fueron las librerías Appcompat V7 y Design, las cuales contienen funciones que ayudan a complementar la aplicación de forma estructurada.

Por otra parte, para lograr la conexión hacia la base de datos en Firebase, se utilizó un paquete llamado Firebase.Xamarin, el cual tiene librerías que realizan la conexión hacia la base de datos por medio de funciones, así como las lecturas de las mismas y la modificación de cualquier variable. Otro paquete fue Xamarin.Firebase.Messaging, el cual utiliza los permisos de la aplicación en conjunto con el celular para tomar lecturas en tiempo real de la base de datos, esto quiere decir, que al momento que se realiza un cambio en los datos, la aplicación recibe una alerta sobre dicha modificación.

Finalizada la primera versión de la aplicación, se realizó una simulación de los resultados esperados del proceso por medio de una página web, la cual simulaba la caldera para verificar su correcto funcionamiento. La simulación fue positiva, ya que se ejecutó perfectamente, el siguiente paso fue ejecutar la aplicación con los datos obtenidos desde la caldera por medio del sistema embebido, tal como en la simulación los resultados fueron satisfactorios. Todo funcionó como se esperaba y se pudo tener la información detallada de la caldera en cualquier dispositivo Android con acceso a la aplicación y con los usuarios y contraseñas correctas.



Figura 8 Interfaz gráfica de la Aplicación sistema operativo Android

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México y a Grupo Rosa Automatización y Control por las facilidades otorgadas para realizar este proyecto.

Conclusiones

Se obtuvo satisfactoriamente un sistema de monitoreo y control de una caldera pirotubular, gracias al uso de internet de las cosas, sistemas embebidos y aplicaciones móviles. La aplicación móvil permitió dicho control interactuando con los sistemas embebidos como enlace con el sistema a controlar, este sistema localmente era monitoreado por el PLC.

El diseño logrado del sistema es totalmente adaptable en cualquier equipo del ámbito industrial o doméstico que se quisiera controlar a distancia mediante internet.

Los resultados obtenidos serán el precedente para que se puedan realizar en un futuro próximo modificaciones que harán posible el uso de la aplicación móvil en distintos sistemas operativos, así como iniciar con el desarrollo de un servidor propio que permita el manejo de un mayor número de equipos que justifique el costo-beneficio y la seguridad del sistema.

Referencias

Antonio Ruiz Canales. (2010). Automatización y telecontrol de sistemas de riego. Barcelona: Marcombo.

Android. (2016, Agosto 10). Recuperado de: https://www.android.com/intl/es-419_mx/

Arduino. (2016, Agosto 10). Recuperado de: <https://www.arduino.cc/>

Daneri, P.A. (2008). Automatización y Control Industrial. Buenos Aires, Argentina: HASA.

Dave Evans. (2011). Internet de las cosas Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. 4 abril 2016, de Cisco Internet Business Solutions Group Sitio web: http://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

Domínguez Mateos, F. (2014). Programación multimedia y dispositivos móviles. Madrid: RAMA Editorial.

Domínguez, H. &. (2006). Domótica: Un enfoque sociotécnico. Madrid: Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de las Telecomunicaciones.

EMERSON. (2015). EMERSON. Recuperado de:http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/instruction_manuals/d301396x012.pdf

Samuel Greengard. (2015). The Internet of Things. Cambridge, Massachusetts: The Mit Press.

Francis, P. (2016). Internet Industrial: Máquinas inteligentes en un mundo de sensores. Madrid: Ariel s.a.

G. Proakis, J. & G. Manolakis, D. (2007). Tratamiento digital de señales. (Cuarta ed.) Madrid: Pearson.

Gradiant. (2016). La Industria 4.0: Hacia una cuarta Revolución Industrial. 29 agosto, 2016, de Gradiant Sitio web: <https://www.gradiant.org/noticia/industria-4-0-revolucion-industrial/Iotsens>. (2016). IoT Industrial. 14 marzo 2016, de Iotsens Sitio web: <http://www.iotsens.com/solutions/i2otindustrial-iot/>

INEGI. (2016). Estadísticas a propósito del día mundial de internet (17 de mayo). Aguascalientes: INEGI.

Morgan, J. (2014, Mayo 13). A simple Explanation of Internet of Things. Forbes. Recuperado de: <https://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#2c904df060828>

PABLO, A. (2015, Octubre 20). Cantabria TIC. Recuperado de: <http://www.cantabriatic.com/industria-4-0-sistemas-ciber-fisicos/>

Paolo Gaudiano. (2011). What are “Things” in the Internet of Things? Fundación de la innovación Bankinter, 15, 11-19.

Salas Arriarán, Sergio. (2015). Todo sobre sistemas embebidos. Perú: Editorial UPC.

Instrucciones para Autores

[Titulo en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayusculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor
Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva

(Indicar Fecha de Envio:Mes,Dia, Año); Aceptado(Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen

Titulo

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman
y Negritas No.11**

Keyword

Cita: Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor. Titulo 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]

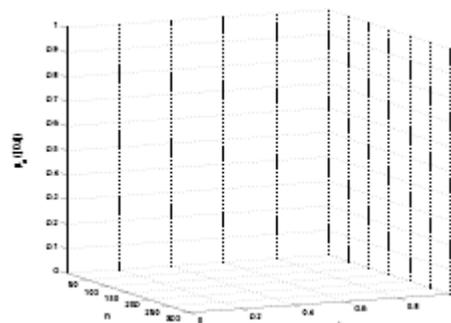


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

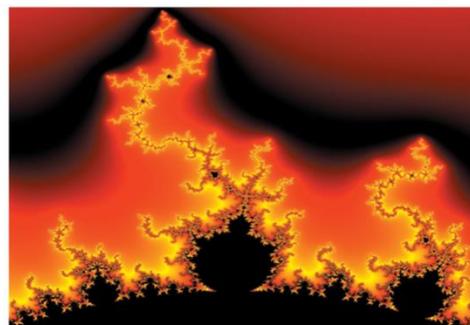


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberan ser imágenes- todo debe ser editable.

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.

Instrucciones para Autores

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 ____ 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 ____ 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 de Tecnología e Innovación

“Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source”

VERGARA-BETANCOURT, Angel, SALAZAR-HIDALGO, Eduardo, RAMIRO-JUÁREZ, José De Jesús y RAMIRO-RAMIRO, José
Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla

“Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo”

ESQUEDA-ELIZONDO, José Jaime, CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos Alberto, JIMÉNEZ-BERISTÁIN -Laura, BERMÚDEZ-ENCARNACIÓN, Enrique Guadalupe
Universidad Autónoma de Baja California

“Procedimiento para inspección de tableros eléctricos con termografía infrarroja”

SILVA-JUÁREZ Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús, PONCE-MELLADO, Juan Jorge, HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo
Universidad Tecnológica de Puebla

“Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel”

ALONSO-PEREZ, Jorge, REYNOSO-SOTO, Edgar, TRUJILLO-NAVARRETE, Balter, CAZAREZ-CASTRO Nohe
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana

“Producción híbrida de biodiesel solar con aceite vegetal usado en un concentrador cilíndrico parabólico”

PÉREZ-BRAVO, Sheila Genoveva, BAUTISTA-VARGAS, María Esther, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán y SÁNCHEZ -BENAVIDES, Carlos Osvaldo
Universidad Politécnica De Altamira

“Diseño de sistema de control automatizado con sistemas embebidos, aplicaciones móviles y el internet de las cosas”

CALDERA, Carlos, LOPEZ, Jesús, OLIVAS, Héctor y GALLEGOS, José

