

ISSN 2523-6873

# Revista de Ingeniería Innovativa

Volumen I, Número I — Enero — Marzo - 2017

**ECORFAN®**



**ECORFAN-Republic of Peru**

## **Indización**

- RESEARCH GATE
- GOOGLE SCHOLAR
- HISPANA
- MENDELEY

## **ECORFAN-Perú**

### **Directorio Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

### **Director Regional**

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD.

### **Director de la Revista**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC.

### **Edición Tipográfica**

TREJO-RAMOS, Iván. BsC.

### **Edición de Logística**

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC.

Revista de Ingeniería Innovativa, Volumen 1, Número 1, de Enero a Marzo 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No.- Santa Ana, Cusco-Perú. Postcode:11500. WEB: [www.ecorfan.org/republicofperu](http://www.ecorfan.org/republicofperu), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. ISSN 2523-6873. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 31 de Marzo 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 de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

## **Consejo Editorial**

BELTRÁN-MIRANDA, Claudia. PhD  
Universidad Industrial de Santander, Colombia

BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe. PhD  
Universidad de Concepción, Chile

RUIZ-AGUILAR, Graciela. PhD  
University of Iowa, U.S.

SOLIS-SOTO, María. PhD  
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia

GOMEZ-MONGE, Rodrigo. PhD  
Universidad de Santiago de Compostela, España

ORDÓÑEZ-GUTIÉRREZ, Sergio. PhD  
Université Paris Diderot-Paris, Francia

ARAUJO-BURGOS, Tania. PhD  
Universita Degli Studi Di Napoli Federico II, Italia

SORIA-FREIRE, Vladimir. PhD  
Universidad de Guayaquil, Ecuador

## **Consejo Arbitral**

VGPA. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIIG. PhD

Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC

Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD

Universidad Panamericana, México

CAF. PhD

Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC

Universidad Panamericana, México

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Revista de Ingeniería Innovativa.

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 de la Editora en Jefe.

Como primer artículo está *Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de CO2* por ESCOTO-SOTELO, E. A., ZAPIEN-RODRÍGUEZ, J. M., BURGARA-MONTERO, O. y BALLESTEROS-PACHECO, J. C. con adscripción en la Universidad Politécnica de Lázaro Cárdenas Michoacán, como siguiente artículo está *Implementación de eficiencia energética en la industria manufacturera en aserradero mediante la implementación de banco de capacitores* por OVANDO-SIERRA, Juan, HUCIN-MISS, Mauricio, LEZAMA-ZARRAGA, Francisco Román y ACOSTA-PECH, Israel Del Jesús, como siguiente artículo está *Eficiencia energética en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche a través del diagnóstico energético* por LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita y ANDRADE-DURÁN, Juan Edgar como siguiente artículo está *Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación* por ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel con adscripción en la Universidad Autónoma de Zacatecas, como siguiente artículo está *Reingeniería en el diseño de productos* por CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás con adscripción en el Tecnológico Nacional De México y el Instituto Tecnológico de Morelia, como siguiente artículo está *Sistema de medición de la calidad de suministro eléctrico para planta solar fotovoltaica* por AQUINO-ROBLES, José Antonio, FERNÁNDEZ-NAVA, Cecilia, y CORONA-R., Leonel G. con adscripción en el Instituto Politécnico Nacional, como siguiente artículo está *Diseño de un sistema de adquisición de variables articulares mediante sensores IMU* por HERNANDEZ-SANTOS, C. y HERNÁNDEZ-TAFOYA, María Susana con adscripción en el Instituto Tecnológico de Nuevo León.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub></b> ESCOTO-SOTELO, E. A., ZAPIEN-RODRÍGUEZ, J. M., BURGARA-MONTERO, O. y BALLESTEROS-PACHECO, J. C.	1-8
<b>Implementación de eficiencia energética en la industria manufacturera en aserradero mediante la implementación de banco de capacitores</b> OVANDO-SIERRA, Juan, HUCIN-MISS, Mauricio, LEZAMA-ZARRAGA, Francisco Román y ACOSTA-PECH, Israel Del Jesús	9-15
<b>Eficiencia energética en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche a través del diagnóstico energético</b> LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita y ANDRADE-DURÁN, Juan Edgar	16-27
<b>Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación</b> ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel	28-36
<b>Reingeniería en el diseño de productos</b> CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás	37-52
<b>Sistema de medición de la calidad de suministro eléctrico para planta solar fotovoltaica</b> AQUINO-ROBLES, José Antonio, FERNÁNDEZ-NAVA, Cecilia, y CORONA-R., Leonel G.	53-73
<b>Diseño de un sistema de adquisición de variables articulares mediante sensores IMU</b> HERNANDEZ-SANTOS, C. y HERNÁNDEZ-TAFOYA, María Susana	74-84

*Instrucciones para Autores*

*Formato de Originalidad*

*Formato de Autorización*

## Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>

ESCOTO-SOTELO, E. A. \*†, ZAPIEN-RODRÍGUEZ, J. M., BURGARA-MONTERO, O. y BALLESTEROS-PACHECO, J. C.

*Universidad Politécnica de Lázaro Cárdenas Michoacán, Av. Galeanas Col. Las 600 Casas, Michoacán, México*

Recibido 2 de Enero, 2017; Aceptado 1 de Marzo, 2017

### Resumen

En México existen casi cuatro toneladas métricas per cápita de emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales están afectando la atmosfera deteriorándola cada vez más. El estado de Michoacán ocupa el quinto lugar con mayor contaminación vehicular, en el 2016 la cantidad de vehículos totales fue de 2,349,799 de los cuales, el de mayor índice es para los automóviles particulares, seguido de los camiones de carga, camiones de pasajeros y motocicletas. Las ciudades más afectadas son: Morelia, Lázaro Cárdenas, Zamora, Sahuayo, La Piedad, Zitácuaro y Uruapan. Los vehículos son el principal factor de emisiones contaminantes a la atmosfera, y anualmente se incrementa en un 2%. Se pronostica que Michoacán en el 2020 tendrá 500,000 vehículos mas circulando en el estado. Para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> se instalara un sistema de control inteligente que permita una mejora en el flujo vehicular por medio de detección vehicular, esto con el objetivo de agilizar y reducir el tiempo de tránsito en los semáforos. Este sistema procesa la señal vehicular que toma como muestra, posteriormente da un pre-tratamiento a la información adquirida y el análisis de flujo vehicular junto con la red neuronal permite al sistema tomar decisiones.

**Procesamiento de Señales, Inteligencia Artificial, Sistema de Control, Flujo Vehicular, Emisiones de CO<sub>2</sub>**

### Abstract

In Mexico there are almost four metric tons per capita emissions of CO<sub>2</sub>, which is affecting and destroying our atmosphere. Michoacan, holds the fifth place with the higher vehicle pollution, in 2016 they had the amount of 2,349,799 vehicles in total, of which the higher index is for; private cars, trucks, bus trucks and motorcycles. Therefore, the most affected cities are; Morelia, Lazaro Cardenas, Zamora, Sahuayo, La Piedad, Zitacuaro, and Uruapan. Vehicles are the main emission factor of pollutants to the atmosphere, and yearly increase a 2%. Michoacan is predicted to have 500,000 more vehicles driving along on the state in 2020. To decrease the emissions of CO<sub>2</sub> it will be installed an intelligent control system that allow an enhancement vehicle flow by detection, our goal is to speed up and reduce the transit on the traffic light. This system process a vehicle sampling signal, so far a pre-processing is made on the acquired sample, and the flow vehicle analysis together with in to the Neural Network enables the system to make decisions.

**Signal Processing, Artificial Intelligence, Control Systems, Vehicle Flow, CO<sub>2</sub> Emissions**

**Citación:** ESCOTO-SOTELO, E. A., ZAPIEN-RODRÍGUEZ, J. M., BURGARA-MONTERO, O. y BALLESTEROS-PACHECO, J. C. Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1:1-8

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: escoto@uplc.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor



## Introducción

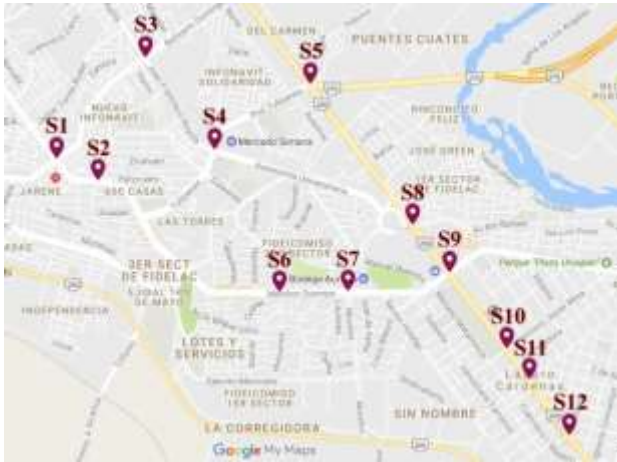
Una de las grandes preocupaciones de nuestro tiempo es la preservación ambiental. A partir de los efectos en torno al cambio climático, ha surgido un consenso sobre la urgencia de reducir las emisiones a la atmósfera de sustancias reconocidas como precursoras del calentamiento global, llamadas “gases de efecto invernadero”. El bióxido de carbono CO<sub>2</sub> es un gas que se encuentra naturalmente en la atmósfera, sin embargo actividades tales, como la quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo, deforestación, entre otros, aumentan significativamente su concentración en la atmósfera contribuyendo al calentamiento global [1]. El CO<sub>2</sub> es liberado a la atmósfera por el consumo de la energía que proviene de todo tipo de actividades económicas, incluidos el transporte, el sector agropecuario, el comercio, el consumo del sector público y el doméstico [2].

De acuerdo al inventario preliminar de emisiones de CO<sub>2</sub>, los automóviles constituyen la principal fuente de contaminación atmosférica debido a que no se asegura o se genera una buena combustión interna en los motores, objeto que ocasiona una pérdida de potencia en el torque y un menor rendimiento de combustible.

Uno de los principales objetivos en este proyecto es reducir el congestionamiento, y promover un flujo vehicular seguro, eficiente, competitivo y sustentable que garantice la disminución de emisiones atmosféricas vehiculares de acuerdo a la dinámica actual de una ciudad.

Según la INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) las emisiones de CO<sub>2</sub> varían de acuerdo al tipo de combustible utilizado, ya que cada combustible tiene una concentración específica de carbono por litro, en una escala de 0-10 se le otorga la mejor evaluación de 10 a aquel vehículo con mejor rendimiento y menores emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que a un vehículo con menor rendimiento y mayores emisiones de CO<sub>2</sub> se le asigna un 0, estos valores de rendimiento de combustible es información obtenida por la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), la NOM-042-SEMARNAT-2003, y la NORMA-163-SEMARNAT-ENER-S CFI-2013 [3] y [4].

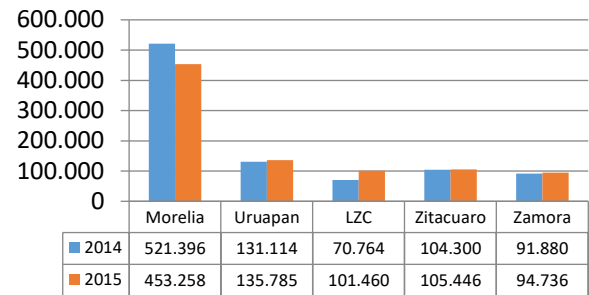
En la primera sección se describirá el análisis de flujo vehicular y de emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto al Marcador de Semáforo asignado en la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán. En la segunda sección tocaremos temas sobre el diseño, arquitectura, dispositivos de control, programación y funcionamiento del sistema de flujo vehicular en la toma de decisiones para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto en la tercera sección hablaremos sobre los resultados obtenidos, así como el impacto social y ambiental al tener un semáforo inteligente controlador de tráfico vehicular en la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán.



**Figura 1** Marcadores de semáforos en la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán

### Análisis de flujo vehicular por marcadores de semaforización

El análisis de flujo vehicular, ayuda a entender el comportamiento de tránsito, la forma en que circulan los vehículos y el nivel de eficiencia. Lázaro Cárdenas es una Ciudad Industrial perteneciente al Estado de Michoacán, a su alrededor cuenta con una gran variedad de empresas públicas y privadas, sin embargo el flujo vehicular esta controlado por 12-Semaforos ubicados estrategicamente, en la Figura 1, se puede observar la distribucion geografica con la que cuenta actualmente la Ciudad. El crecimiento demografico, social y economico de la region provoca la adquisición de nuevos automóviles tanto particulares, como de servicios e industriales, ocasionando congestión en algunas partes de la ciudad. Por lo que es necesario agilizar el flujo vehicular, al realizar un diagnostico por medio del análisis de tiempos, frecuencias, líneas de espera y las horas pico de la ciudad; esto con el objetivo de reducir el congestión en la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán. Es importante mencionar que al reducir el congestión y mejorar los tiempos de flujo vehicular, se disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera [5] y [6].



**Gráfico 1** Vehículos de motor en circulación según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía-INEGI

Siendo Michoacán un estado comprometido a nivel nacional en la disminución de emisiones contaminantes a la atmosfera, la implementacion de este proyecto a corto plazo es inminente, según la INEEC el empleo de combustibles fósiles en los vehículos automotores es la fuente antropogénica individual más importante en la generación de gases de efecto invernadero (Bióxido de Carbono-CO<sub>2</sub>). Actualmente todos los medios de transporte utilizan como combustible el diésel y la gasolina, por ello es importante analizar la contribución de CO<sub>2</sub> que generan los vehículos en la quema de este combustible al cambio climático. El grafico 1, muestra las 5 ciudades de Michoacán con el mayor número de vehículos automotores en circulación, dato adquirido por la INEGI.

Las variables relacionadas con el flujo vehicular, hacen referencia a la frecuencia con la que pasan los vehículos por una intersección, esto significa que se tomara el comportamiento del flujo por la cantidad de vehículos automotores según la ecuacion 1 y 2; donde  $q$  habla sobre la tasa de flujo vehicular,  $N$  del numero de vehiculos,  $T$  del tiempo especifico y  $h_i$  del intervalo simple [7].

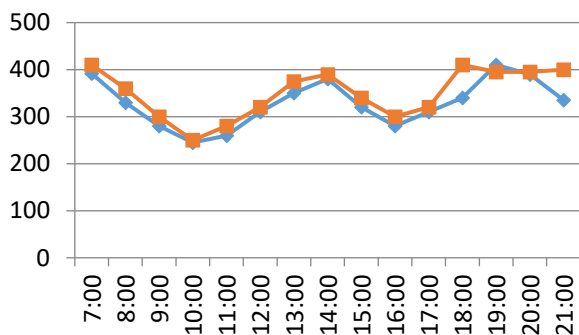
$$q = N / T \quad (1)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1} \quad (2)$$

$$Q_n = \frac{(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n)(t_m)}{t_M} \quad (3)$$

$$k = N / d \quad (4)$$

$$q = vk \quad (5)$$



**Gráfico 2** Comportamiento horario de la tasa de flujo vehicular y el máximo flujo porcentual de vehículos

El Gráfico 2, se obtuvo por medio del cálculo de volumen horario  $Q_n$ , la densidad o concentración  $k$  y la ecuación fundamental de flujo vehicular; que son dadas por la ecuación 3, 4 y 5. Esta gráfica muestra el comportamiento horario de tránsito de flujo vehicular en el Semaforo-1, dato estimado por el total de vehículos registrados en el estado. También se pueden observar los tiempos de hora pico en la ciudad y el posible congestionamiento de circulación por avenidas y calles principales.

Considerando que es un modelo lineal y para establecer las condiciones de operación en función del flujo vehicular en los semaforos, se calculo la velocidad media espacial  $v_e$ , la relación entre el flujo  $q$  y la densidad  $k$ ; parametros dados por las ecuaciones 6 – 11 [8].

$$\bar{v}_e = \frac{d}{t} = \frac{d}{\sum_{i=1}^m f_i v_i} \quad (6)$$

$$\bar{v}_e = v_l - \left( \frac{v_l}{k_c} \right) k \quad (7)$$

$$q = \left[ v_l - \left( \frac{v_l}{k_c} \right) k \right] k \quad (8)$$

$$k = k_c - \left( \frac{k_c}{v_l} \right) \bar{v}_e \quad (9)$$

$$q = \bar{v}_e / k \quad (10)$$

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} + \frac{\sqrt{v_l^2 - 4 \left( \frac{v_l}{k_c} \right) q}}{2} \quad (11)$$

Según un estudio realizado por la CONUEE, el consumo anual de combustible se puede calcular con la ecuación 12; donde  $C_{ca}$  se refiere al consumo de combustible anual,  $ci$  y  $ca$  al porcentaje de uso del automovil en la ciudad y carretera,  $Ra$  se refiere a la estimación de recorrido anual,  $Rci$  y  $Rca$  establecen el nivel de rendimiento en la ciudad y la carretera [9].

$$C_{ca}(L) = \frac{\%ci \times Ra(km)}{Rci(km/L)} + \frac{\%ca \times Ra(km)}{Rca(km/L)} \quad (12)$$

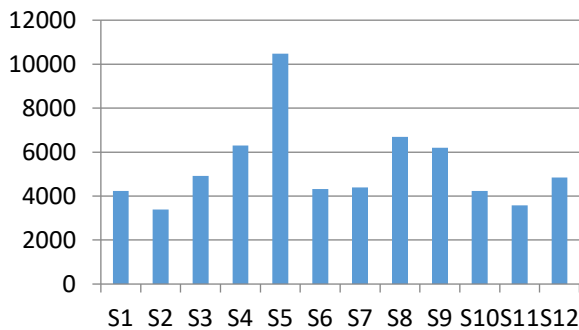
$$Costo_{ca} = c_{ac}(L) \times p_{ci} (\$/L) \quad (13)$$

Para determinar el costo anual estimado de combustible, se calcula por medio de la ecuación 13; donde  $Costo_{ca}$  se refiere al costo de combustible al año,  $c_{ac}$  denota el consumo anual de combustible y el  $p_{ci}$  establece el valor comercial por litro de combustible [10] y [11]. Una vez obtenido el costo de combustible anual, se prosigue, a calcular las emisiones de CO2 que genera el motor de combustión interna de un vehículo, para ello se aplica la ecuación 14 para las emisiones en el caso de gasolina y la ecuación 15 para el caso de diésel;

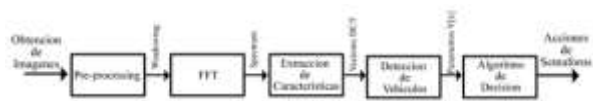
$$emisionCO2_a(kg) = 2.4 \times C_{ac}(L) \quad (14)$$

$$emisionCO2_a(kg) = 2.7 \times C_{ac}(L) \quad (15)$$

Por ejemplo, si un vehículo consumiera un total de 720 L/anuales, su factor de emisión anual sería de 1,728kg de CO2 [12] y [13]. El estado de Michoacán en el año 2015 registro un total de 1,986,837 vehículos en circulación, por lo tanto la emisión anual de CO2 sería un factor importante a calcular.



**Gráfico 3** Tasa de flujo de semáforos y límite de congestión



**Diagrama 1** Diagrama de bloques del sistema de semáforo inteligente controlador de tráfico

El Gráfico 3, muestra el flujo total de vehículos que circulan e interactúan con los Semáforos (S1, S2, S3, ..., Sn) de la ciudad.

Con este tipo de análisis se logro observar el **nivel de flujo vehicular, congestionamiento**, tránsito, circulación e impacto de emisiones de CO2 en la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán. Y como dato importante mencionar que el tiempo de espera de un vehículo en un semáforo genera más emisiones de CO2 a la atmosfera, que aquellos vehículos que mantienen un flujo constante de circulación, en otras palabras, le toma mas tiempo a un vehiculo llegar a su destino y por ende aumenta la quema de combustible [14], [15] y [16].

**Desarrollo y funcionamiento del sistema de detección vehicular**

El análisis de flujo vehicular es un tema importante de estudio, en el diseño, programación y desarrollo del sistema de control. Para diseñar el funcionamiento del sistema se debe de analizar y observar el flujo vehicular en las diferentes partes de la ciudad para establecer los parámetros de programación y la decisión del sistema.

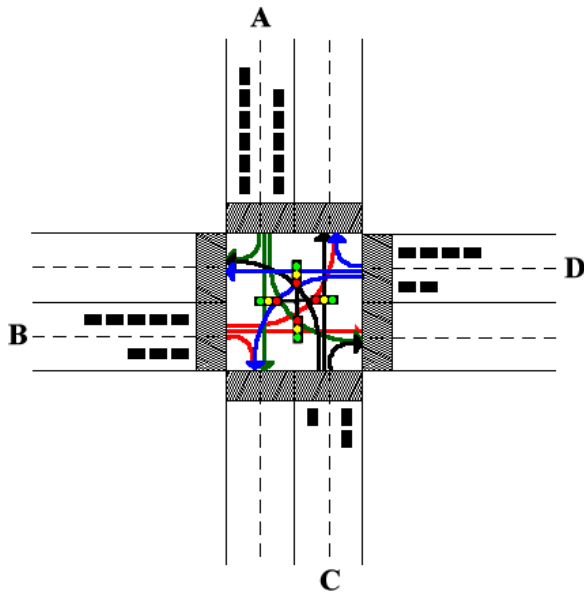
Como se muestra en el Diagrama 1, el semáforo inteligente controlador de tráfico, tomara decisiones del flujo vehicular por la adquisición de imágenes y la visión que obtenga al interactuar con el flujo vehicular en tiempo real, en el pre-procesamiento las imágenes que entran al sistema se analizan de tal manera que se eliminan muestras innecesarias de la imagen esto para acelerar el tiempo de computo en el sistema, por medio de la Transformada Rápida de Fourier.

Se obtiene el vector característico por medio del análisis y aplicación de la Transforma Discreta del Coseno II, por lo que el proceso de extracción de características se da por la ecuación 16.1, 16.2 y 16.3; donde  $f(x,y)$  es el valor de pixel de la imagen,  $N$  el tamaño de ventana y  $\beta(u,v)$  es el calculo de la parte real [17], [18], [19] y [20].

$$C(u,v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\beta(u,v) \quad (16.1)$$

$$\alpha(u)|\alpha(v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \alpha(u)|\alpha(v) = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \alpha(u)|\alpha(v) = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (16.2)$$

$$\beta(u,v) = \cos\left(\frac{(2x+1)\pi u}{2N}\right) \cos\left(\frac{(2y+1)\pi v}{2N}\right) \quad (16.3)$$



**Figura 2** Semáforo Inteligente Controlador de Tráfico en la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán

La detección vehicular se obtiene por medio del procesamiento de imágenes simultaneas (fotogramas), dichas imagen contienen la información relevante de flujo vehicular, asi como su vector característico.

Por lo tanto el bloque de decisión dará una acción al semáforo dependiendo de los parámetros de entrada.

Este algoritmo ayuda a agilizar el flujo vehicular en una interseccion, cada semaforo se programa de forma automatica de acuerdo a la dimension de flujo. Une vez determinado los parametros de tiempo se programa de la siguiente manera, donde *SI* corresponde al cruce de cuatro semaforos (A, B, C y D) con sus respectivos tiempos de transicion, cada luz verde tiene un tiempo maximo de *40 segundos* y una luz amarilla de *10 segundos*.

---

*Algoritmo Semaforo1-12:*

---

```

funcion semaforo(int A, int B, int C, int D)
acum=0;
for(int
circulacion=1;circulacion<=200;circulacion++)
    acum = acum + circulacion;
if(acum<=40) B = rojo;C = rojo;D = rojo;
else if(acum>40 && acum<50) A = Amarillo;
else B=verde;
if(acum>=90) A = rojo;C = rojo;D = rojo;
else if(acum>90 && acum<100) B = Amarillo;
else C=verde;
if(acum>=140) A = rojo;B = rojo;D = rojo;
else if(acum>140 && acum<150) C = Amarillo;
else D=verde;
if(acum>=190) A = rojo;B = rojo;C = rojo;
else if(acum>190 && acum<200) D =Amarillo;
else A = funcion semaforo(verde,0,0,0);
    else printf("Algoritmo de Decision");
Fin

```

---

En la Figura 2, Se observa el flujo vehicular que toman los automóviles al interactuar con cada semáforo de la ciudad, la programación es distinta en cada uno de ellos con respecto al tiempo, ya que la cantidad de vehículos que transitan por ese semáforo es proporcional al límite del congestionamiento.

Las acciones serán controladas por una Red Neuronal de Inteligencia Artificial, este dará la instrucción al módulo para realizar el cambio de luces en el semáforo [21].

La toma de decisión de flujo vehicular se concentra en la lógica que fue programada en el Microchip de High-Performance PIC18F4550, el objetivo de programarlo en este MicroChip es para replicarlo en cada una de los semáforos y dar una solución de tráfico vehicular.

### Conclusión

Este sistema tiene como objetivo disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera mediante la implementación de un módulo de control de tráfico vehicular. La programación, los algoritmos y el modulo de decision permiten al sistema tener un buen control y flujo de los vehículos en una ciudad; esto con el objetivo de agilizar los tiempos de espera en el semaforo. En otras palabras tener un flujo vehicular constante, para disminuir la emisión de efecto invernadero de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

### Referencias

[1] Vivanco Casamadrid A., Atlas de almacenamiento Geologico de Co<sub>2</sub> en Mexico, Comision federal de Electricidad y Secretaria de Energia.

[2] Fernande Lopez M.A., Fernández Fernández Y., González Hernandez D., Olmedillas Blanco B., El factor regulación como determinante del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cuadernos de Economia 2014  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cesjef.2013.12.002>.

[3] Ardavin Ituarte J.R. Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, Diario Oficial de la Federacion, 7 de Septiembre de 2005.

[4] C. Ochoa Fernandez, O. de buen Rodriguez y A.U. Esteban Marina, NORMA-163-SEMARNAT-ENER-S CFI-2013, Diario Oficial de la Federacion, 21 de Junio de 2013.

[5] Saje Aloysius. Vehicle emissions, the consumer and industry: finding the balance. The Science of the Total Environment, 134(1993) 353-359 Elsevier Science Publisher Amsterdam. ISSN: 0048-9697.

[6] Martinez Salgado H., Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades mexicanas, Centro de Transporte Sustentable de Mexico A.C. 27 de Octubre de 2011.

[7] Cal R., Reyes Spindola M y Cardenas Grisales J., Ingenieria de Transito Fundamentos y Aplicaciones 7ma Edicion, Universidad del Valle, Alfaomega, 1994.

[8] Orozco O.A., Llano G., Optimal Speed Advisory: a Vehicular Networks Application focused on decreasing CO<sub>2</sub> emissions, IEEE Latin America Transactions, Vol 14, No.6, June 2016.

[9] The International Council on Clean Transportation. Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: a Global, Cars and Climate Change, Update July 2007.

[10] Comision Nacional para el Uso Eficiente de la Energia, Guia para el uso eficiente de la Energia en el Transporte; Automovilista Eficiente, Secretaria de Energia.

[11] Cambio Climatico, C.I.(Marzo de 2011). Guia Practica para el Calculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero(GEI).

- [12] Registro Nacional de Emisiones para el Reporte de Emisiones de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ramirez Bautista A. de J., Maldonado Martinez M.A. y Morales Paredes G.
- [13] Hula A., Maguire A., and Alson J. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 through 2016. United States Environmental Protection Agency November 2016.
- [14] Williams M.L. Atmospheric Pollution: Contribution of automobiles, 8<sup>th</sup> Journee's parisiennes d allergie, Paris, January 12-14 2000.
- [15] Zhende Xiao, Zhu Xiao, Dong Wang, Xiaohong Li., An Intelligent Traffic Light Control Approach for Reducing Vehicles CO2 Emissions in VANET,. 2015 12<sup>th</sup> International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery ISBN: 978-1-4673-7682-2.
- [16] Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle, Office of Transportation and Air Quality, United States Environmental Protection Agency.
- [17] Sanjit Kumar M. Procesamiento de senales digitales: Un enfoque basado en computadora, Mc Graw-Hill Higher Education, 3ra Edicion, 2007.
- [18] Rao K.R., Yip P., Discrete Cosine Transform Algorithms, Advantages, Applications, Digital Signal Processing, 1990.
- [19] Watson A.B., Image Compression Using the Discrete Cosine Transform, Mathematical Journal, 1994, p 81-88.
- [20] Rodriguez Morales R., Sossa Azuela J.H., Procesamiento y Analisis Digital de Imágenes, Editorial Alfaomega, 2012.
- [21] Martin del Brio B., Sanz Molina a., Redes Neuronales y Sistemas Borrosos, Editorial Alfaomega, 2007.

## Implementación de eficiencia energética en la industria manufacturera en aserradero mediante la implementación de banco de capacitores

OVANDO-SIERRA, Juan\*†, HUCIN-MISS, Mauricio, LEZAMA-ZARRAGA, Francisco Román y ACOSTA-PECH, Israel Del Jesús

Recibido 3 de Enero, 2017; Aceptado 2 de Marzo, 2017

### Resumen

El objetivo del trabajo es realizar un análisis sobre las corrientes parásitas que afectan el factor de potencia en las industrias debido a los motores de inducción instalados en los sistemas eléctricos de baja tensión, (Caso de estudio sector manufacturero aserradero), para esto se realizó una auditoría energética de primer nivel en el aserradero ubicado en la comunidad del Ejido Constitución, Silvituk, Campeche México, dentro de la auditoría se percató un bajo factor de potencia 50%, así mismo el sistema tiene motores trifásicos de 1hp hasta 75 hp y 15 años de antigüedad. Además, se encontraron incongruencias relacionadas a demanda máxima, reflejadas en las facturaciones eléctricas emitidas por la compañía suministradora que mostraban un comportamiento erróneo de las mediciones efectuadas por el kilowattímetro, para el análisis se instaló un analizador de redes AEMC power pad 3945-B donde se monitoreo el sistema antes y después de corregir el factor de potencia, con los dos análisis de los parámetros eléctricos se logró comparar el sistema y las mejoras que se tuvo en relación a las corrientes parásitas.

### Corrientes parásitas, motores, capacitores, potencia

### Abstract

The objective of the work is to perform an analysis on the parasitic currents affecting the power factor in the industries due to the induction motors installed in the low voltage electrical systems, (Case study sawmill manufacturing sector). A first level energy audit at the sawmill located in the comunidad of the Ejido Constitution, Silvituk, Campeche México, Within the audit realized a low power factor of 50%, also the system has 3 phase motors of 1hp up to 75 hp and 15 years old. In addition, there were inconsistencies related to maximum demand, reflected in the electric billings issued by the supply company that showed a wrong behavior of the measurements made by the kilowattimeter, for the analysis was installed a network analyzer AEMC power pad 3945-B where it was installed Monitoring the system before and after correcting the power factor, with the two analyzes of the electrical parameters was able to compare the system and the improvements that was had in relation to the parasite currents. It realized an energy diagnosis.

### Parasitic currents, engines, capacitor, power

**Citación:** OVANDO-SIERRA, Juan , HUCIN-MISS, Mauricio, LEZAMA-ZARRAGA, Francisco Román y ACOSTA-PECH, Israel Del Jesús. Implementación de eficiencia energética en la industria manufacturera en aserradero mediante la implementación de banco de capacitores. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 9-15

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jcovando@uacam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor



## Introducción

Las PyME manufactureras conforman el 11% de establecimientos en la entidad de Campeche (INEGI, 2009). Los incrementos en los costos de energía eléctrica aplicados al sector de manufactura tuvieron un incremento del 4.5% en el mes de enero 2017 en comparación a diciembre 2016 (Reyna Quiroz, 2017) lo que representa un gasto adicional a los medianos productores de las PyME y más aún, los incrementos en los costos futuros generados por las variaciones internacionales en los precios de los combustibles utilizados para la generación de energía eléctrica. Ante dichos cambios los sectores de manufactura decidieron implementar medidas de ahorro energético con la finalidad de afrontar los nuevos precios en las tarifas eléctricas del año 2017.

Una de las medidas efectuadas para un caso particular consistió en aumentar el factor de potencia (FP) en un aserradero ubicado en el ejido Constitución, Silvituk, Campeche perteneciente al municipio de Escárcega. El cuál presentaba un FP máximo promedio de 51% y en ocasiones menor, generando penalización por parte de Comisión Federal de Electricidad (CFE) con montos mensuales de \$3,000 hasta \$13,000 pesos. Aunado a lo anterior, se encontró, durante el diagnóstico energético, incongruencias relacionadas a la medición de demanda máxima que impactaban en el costo total de energía.

Para dar solución a los inconvenientes en dicha instalación se optó por un banco de capacitores y corregir las lecturas de demanda máxima desde el medidor de energía.

Las secciones que conforman el artículo son: Características de la instalación, parámetros eléctricos mediante analizador de redes, cálculo de banco de capacitores, análisis de demanda máxima y resultados obtenidos.

## Características de la instalación

El estudio se realizó en un aserradero ubicado en el ejido Constitución, Silvituk, Campeche perteneciente al municipio de Escárcega.



**Figura 1** Aserradero

*Fuente:* (Ovando Sierra & Huchin Miss, 2016)

Las características del servicio contratado ante CFE se muestran en a tabla 1

Sistema trifásico 3F-4H	
Número de servicio	793-110-601-051
Tarifa	OM
Carga conectada	80 kw
Demanda contratada	80 kw

**Tabla 1** Servicios contratados

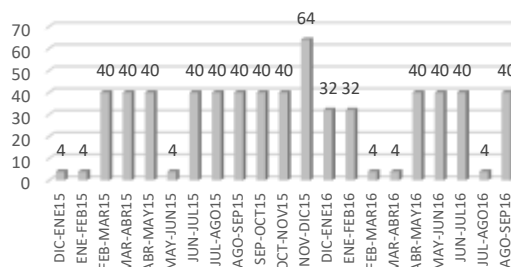
*Fuente:* (Ovando Sierra & Huchin Miss, 2016)

Además, el inmueble esta formado por cargas de fuerza, iluminación y equipos eléctricos varios como se muestran en la tabla 2 y 3 respectivamente.

Motor	Cantidad
75 HP	1
30 HP	1
25 HP	1
7.5 HP	1
3.0 HP	1
1.0 HP	2

**Tabla 2** Cargas de fuerza

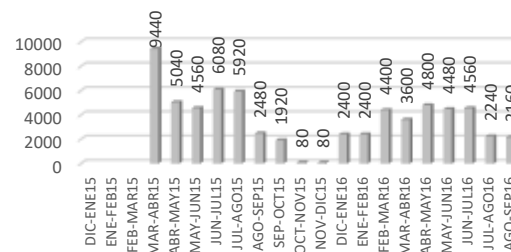
*Fuente:* (Ovando Sierra & Huchin Miss, 2016)



**Gráfico 2** Demanda máxima 2015-2016

*Fuente:* CFE

Equipos	Carga W
Lamparas de 75 W	900
Lamparas Fluorescentes de 9 W	27
Lamparas Fluorescentes de 9 W	60
Refrigerador	400
Televisión	200
Caja digital	12
Parrilla eléctrica	750
Ventilador de techo	120
Total	2469



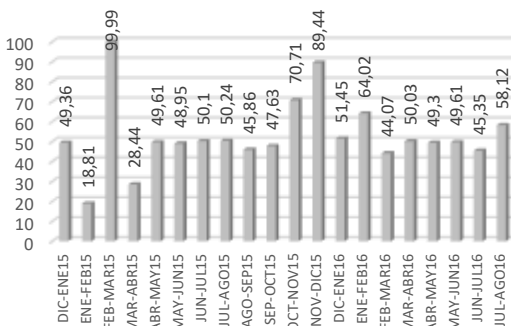
**Gráfico 3** Energía reactiva 2015-2016

*Fuente:* CFE

**Tabla 3** Cargas de iluminación y equipos

*Fuente:* (Ovando Sierra & Huchin Miss, 2016)

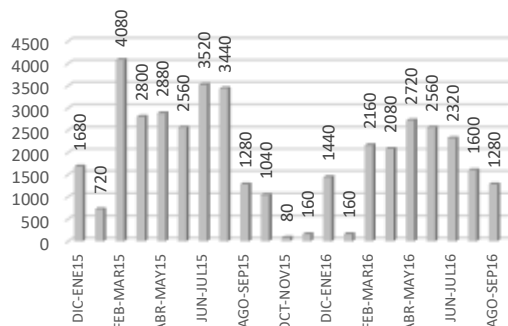
De acuerdo a las facturaciones eléctricas emitidas por CFE se analizaron los consumos de energía, demanda máxima, energía reactiva y factor de potencia.



**Gráfico 4** Factor de potencia 2015-2016

*Fuente:* CFE

Se pueden observar valores considerables de energía reactiva demandada por la instalación que impactan en el bajo factor de potencia como se observa en el gráfico 4.



**Gráfico 1** Kilowatts hora 2015-2016

*Fuente:* CFE

## Parámetros eléctricos mediante analizador de redes



**Figura 2** Analizador de redes instalado

*Fuente:* (Ovando Sierra & Huchin Miss, 2016)

Para verificar los datos emitidos en las facturas eléctricas, se colocó un analizador de redes power pad 3945-B durante una semana. Los resultados arrojados se resumen en las siguientes tablas.

Voltajes RMS						
Fase	A	B	C	A-B	B-C	C-A
Máx.	134.1	133.3	138.1	229.4	236.1	237.4
Mín.	127.0	126.6	129.2	217.8	222.9	222.7
Med.	131.3	130.6	134.4	224.7	230.4	231.5

**Tabla 4** Valores promedios de tensión registrados

*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

AMPERAJE POR FASE				
Fase	A	B	C	Neutro
Máximo	159.9	167.6	187.3	14.90

**Tabla 5** Amperajes máximos promedio

*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

FACTOR DE POTENCIA %				
Fase	A	B	C	Medio
Máximo	43	62	68	51

**Tabla 6** Factor de potencia promedio máximo registrado por fase

*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

Potencia reactiva KVAR				
Fase	A	B	C	Total
Máximo	17.8	16.07	20.39	53.88

**Tabla 7** Valores promedio máximos de potencia reactiva registrados

*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

Potencia activa KW				
Fase	A	B	C	Total
Máximo	9.492	13.94	13.04	36.47

**Tabla 8** Valores promedios máximos de potencia activa registrados

*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

De acuerdo a las lecturas registradas por el analizador se pudo corroborar si eran correctos los valores de FP (Factor de Potencia) y potencia reactiva por parte de CFE. Sin embargo, las diferencias entre los valores de demanda máxima eran considerables. Por lo anterior, se procedió a verificar los reseteos con los que contaba el medidor. De esta forma se llegó a la conclusión que el medidor sólo tenía tres reseteos a lo largo de cinco años de operación, causando acumulación de valores de demanda máxima erróneos y cobrados mediante facturación eléctrica al cliente.

## Cálculo de banco de capacitores

El factor de potencia mínimo permitido por CFE es de 90% (CFE, 2012). El sobrepeso estimado para un factor de potencia de 50% es de:  $90/50=1.8$ , lo que significa que el cliente paga un 80% adicional de la facturación normal (Garduño Fernandez, 1982).

En dichas condiciones conviene mejorar el factor de potencia.

Se optó por corregir el FP mediante la instalación de un banco de capacitores considerando el precio y la facilidad de aplicación en la instalación.

Se tomaron en cuenta los siguientes datos registrados por el analizador:

$$KWh = 164$$

$$KVARh = 282.62$$

Aplicando las ecuaciones 1, 2, 3 (Garduño Fernandez, 1982) se determina la carga capacitiva:

$$\cos \varphi = \frac{KWH}{\sqrt{KWH^2 + KVARH^2}} \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \text{factor de potencia}$$

$$KWH = \text{Kilowatts hora}$$

$$KVARH = \text{kilovolts ampereactivos hora}$$

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}}{\cos \varphi} \quad (2)$$

$$\varphi = \text{ángulo de desfase}$$

$$KVAC = KW(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3)$$

$$KVAC = \text{Kilovolts amper capacitivos}$$

$$KW = \text{Kilowatts}$$

$$\varphi_1 = \text{ángulo de desfase 1}$$

$$\varphi_2 = \text{ángulo de desfase 2}$$

Sustituyendo valores en (1):

$$\cos \varphi_1 = \frac{164}{\sqrt{164^2 + 282.62^2}} = 0.5$$

Para corregir el factor de potencia a  $\cos \varphi_2 = 0.94$ , se procede:

$$\text{Demanda media} = \frac{164000 \text{ W}}{30 \text{ días} \times 24 \text{ H}} = 278 \text{ KW}$$

Sustituyendo valores en (2):

$$\tan \varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - 0.5^2}}{0.5} = 1.73$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - 0.94^2}}{0.94} = 0.36$$

Por lo tanto, la carga capacitiva se calcula sustituyendo valores en (3):

$$KVAC = 278(1.73 - 0.36) = 380.86$$

### Parámetros eléctricos con banco de capacitores



**Figura 3** Banco de capacitores en operación

*Fuente: Diagnóstico energético*

Se procedió a instalar un banco de capacitores y posterior a una semana de la instalación se realizó el monitoreo de las instalaciones mediante el analizador 3945-B, los resultados fueron los siguientes:

Voltajes RMS						
Fase	A	B	C	A-B	B-C	C-A
Máx.	132.8	132.7	134.7	229.3	231.5	232.3
Mín.	128.8	128.3	130.8	221.5	225.3	225.2
Med.	130.5	130.2	132.4	224.7	228.1	228.1

**Tabla 9** Valores promedios de tensión registrados

*Fuente: Analizador de redes 3945-B*

Amperaje por fase				
Fase	A	B	C	Neutro
Máximo	96.8	103.3	109.8	11.70

**Tabla 10** Amperajes máximos promedio*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

Factor de potencia %				
Fase	A	B	C	medio
Máximo	82.2	90	86.5	86.3

**Tabla 11** Factor de potencia promedio máximo registrado por fase*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

Potencia reactiva KVAR				
Fase	A	B	C	Total
Máximo	6.2	5.1	7.6	18.9

**Tabla 12** Valores promedio máximos de potencia reactiva registrados*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

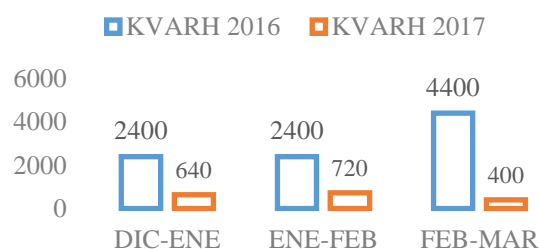
Potencia activa KW				
Fase	A	B	C	Total
Máximo	9.8	11.94	12.22	34.03

**Tabla 13** Valores promedios máximos de potencia activa registrados*Fuente:* Analizador de redes 3945-B

Las principales diferencias se encuentran en la tabla 10, 11 y 12 ya que se observa una disminución de amperajes por fase, un incremento del FP hasta un valor promedio de 86% y una disminución de 35 KVAR. Cabe mencionar que el con el analizador se realizó el monitoreo de las instalaciones durante un día.

Los resultados obtenidos se muestran por medio de comparaciones en los siguientes gráficos.

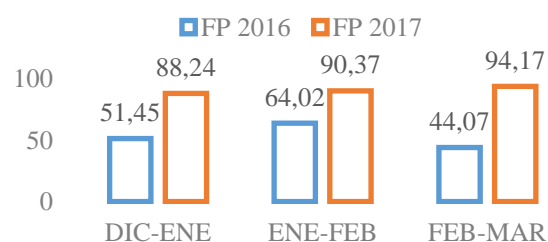
## Energía reactiva

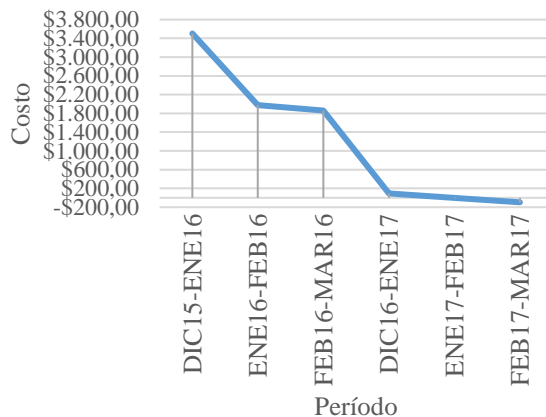
**Gráfico 5** Energía reactiva 2016-2017*Fuente:* Diagnóstico energético

De acuerdo a la facturación de CFE, se observa en el gráfico V, una disminución del consumo de energía reactiva para los diferentes períodos. Las diferencias entre los consumos se han reducido significativamente en promedio 77.6% desde la entrada en operación del banco de capacitores.

Respecto al factor de potencia, ha aumentado en los inicios del año 2017 llegando a alcanzar hasta 94% en comparación con el año 2016 en el mismo período.

## Factor de potencia

**Gráfico 6** Factor de potencia 2016-2017*Fuente:* Diagnóstico energético



**Gráfico 7** Cargo por FP 2016-2017

*Fuente:* Diagnóstico energético

De igual forma los cargos generados por bajo factor de potencia han ido a la baja de \$3,503 en el período DIC15-ENE16 hasta alcanzar bonificación de \$95.38 en la última facturación de FEB17-MAR17.

Derivado de los anteriores resultados el total a pagar por el consumo de energía eléctrica ha disminuido desde costos por \$68,341 hasta \$29, 074 de acuerdo al período FEB17-MAR17.

## Conclusiones

La propuesta de eficiencia energética implementada en el aserradero a través de la implementación del banco de capacitores fue importante y valiosa ya que se logró el objetivo de disminuciones de consumo y demanda y mejorar el factor de potencia y se vió reflejado en la disminución de la factura mensual de la CFE.

La siguiente etapa que se pretende implementar es el cambio de tecnologías de alta eficiencia en los motores que operan en el aserradero para continuar con las acciones de eficiencia energética.

## Referencias

CFE. (Septiembre de 2012). *Ahorro de energía*. Obtenido de <http://www.cfe.gob.mx/industria/ahorroenergia/lists/ahorro%20de%20energia/attachments/3/factordepotencial.pdf>

Garduño Fernández, J. (1982). *Equipos eléctricos modernos*. México: Continental.

INEGI. (2009). *Industrias manufactureras*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/parque/manufacturas.html#tema4>

Ovando Sierra, J. C., & Huchin Miss, M. I. (2016). *Auditoría energética industrial*. Campeche.

Reyna Quiroz, J. (Martes de Enero de 2017). La CFE aumenta 4.5% la tarifa de energía eléctrica para industrias. *La Jornada*.

Hassaine, L. (2010). *Implementación de un control digital de potencia activa y reactiva para inversores. Aplicación a sistemas fotovoltaicos conectados a red*. Leganés.

Horikoshi, I. (2009). *Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red*. Leganés.

Ley del servicio público de energía eléctrica. (02 de Diciembre de 1975). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lsp ee/LSPEE\\_abro.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lsp ee/LSPEE_abro.pdf)

Melero Millán, I. (2013). *Metodos de inyección de potencia reactiva en redes de baja tensión*. 6.

## Eficiencia energética en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche a través del diagnóstico energético

LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román\*†, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita y ANDRADE-DURÁN, Juan Edgar

*Universidad Autónoma De Campeche, Campus V, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cardenas  
Unidad Habitacional Ecológica Ambiental, Col. Ex-Hacienda Kala, San Francisco de Campeche, Cam., México*

Recibido 4 de Enero, 2017; Aceptado 6 de Marzo, 2017

### Resumen

El presente artículo tiene como objetivo fundamental crear una metodología de diagnóstico energético como herramienta para determinar el ahorro y el uso eficiente de la energía en las instalaciones eléctricas en baja tensión de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. Se evalúan y analizan todas las áreas de trabajo y edificios con cargas lineales y no lineales que presentan disturbios recurrentes en las señales de: tensión, corriente, potencia y frecuencia. Mediante la utilización de mediciones localizadas es posible obtener un banco de datos suficientemente confiable que contengan la información concerniente al problema y que al analizarlos proporcionen un diagnóstico energético confiable y así definir las estrategias a aplicar e incluirse en la metodología propuesta, con el fin de eliminar la problemática, cumpliendo con las normas oficiales mexicanas y normas IEEE vigentes. Con esta metodología es posible crear alternativas para lograr una real eficiencia energética e implementar acciones de mejora continua y un programa permanente de mantenimiento al sistema eléctrico en baja tensión.

**Eficiencia energética, diagnóstico energético, instalaciones eléctricas, mediciones eléctricas**

### Abstract

This paper has as main objective to create a methodology of energy diagnosis as a tool to determine the savings and efficient use of energy in the low voltage electrical installations at the Faculty of Engineering of the Universidad Autonoma de Campeche. All the work areas and building with linear and nonlinear loads that present recurrent disturbances in the signals of: voltage, current, power and frequency are evaluated and analyzed. Through the use of localized measurements, it is possible to obtain a sufficiently reliable database containing the information concerning to the problem and to analyze them provide a reliable energy diagnosis and thus define the strategies to be applied and included in the proposed methodology, in order to eliminate the problem by complying with Mexican Official Standards and IEEE current standards. With this methodology it is possible to create alternatives to achieve real energy efficiency and implement continuous improvement actions and a permanent maintenance program to the low voltage electric system.

**Energy efficiency, energy diagnosis, electrical installations, electrical measurements**

**Citación:** LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita y ANDRADE-DURÁN, Juan Edgar. Eficiencia energética en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche a través del diagnóstico energético. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 16-27

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jcovando@uacam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

En los últimos años, el desarrollo tecnológico y económico ha propiciado una mayor demanda de energía eléctrica en México y en el mundo. Esto tiene como consecuencia la creación y uso de nuevos equipos electrónicos de alta eficiencia diseñados para acciones específicas los cuales son cargas usadas de manera irracional y que aumenta el consumo de la energía eléctrica teniendo como consecuencia un importe mayor en la factura de la misma.

Ante la necesidad mundial de contrarrestar el cambio climático debido al desmedido crecimiento económico y tecnológico, resulta fundamental buscar alternativas que disminuyan el excesivo e irracional uso de la energía eléctrica y lograr la sustentabilidad energética con el uso de las energías renovables, no sin antes crear acciones encaminadas para hacer un uso eficiente de la energía sin sacrificar condiciones de confort a través de la eficiencia energética (DOF, 6 de junio de 2012). Asimismo, se impulsa la concientización de la ciudadanía sobre un uso más racional de los recursos (Presidencia de la República, 2012).

De acuerdo a lo propuesto en el documento *Prospectiva del sector eléctrico 2013-2027* de la Secretaría de Energía (SENER), en México hay una gran preocupación por implementar acciones que incrementen la eficiencia energética para el aprovechamiento racional y sustentable de la electricidad en los sectores industrial, comercial, residencial, servicios y bombeo agrícola.

El uso irracional de la energía eléctrica trae como consecuencia mayores cantidades de gases de efecto invernadero expulsado a la atmósfera y un costo elevado al pagar el servicio de dicha energía a la empresa proveedora de este servicio denominada Comisión Federal de Electricidad (CFE).

De aquí parte la importancia de realizar un estudio de eficiencia energética a través de la identificación y el análisis integral de la problemática presente, desde la investigación metodológica y aplicada sobre las condiciones a las que una instalación eléctrica en baja tensión se ve sometida respecto al uso de sistemas y equipos eléctricos, seguida de una propuesta para su solución. Este procedimiento se denomina diagnóstico energético, el cual proporciona las propuestas de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica.

En este artículo, el estudio de eficiencia energética se realiza en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche con el fin de obtener un diagnóstico del consumo energético en sus instalaciones eléctricas en baja tensión que ofrezca las soluciones a la problemática mediante una metodología de diagnóstico energético para determinar las acciones que deben aplicarse en lo referente a las cargas que operan tales como iluminación, alumbrado público, las cargas misceláneas, equipo de aire acondicionado y equipo eléctrico. Verificar si se requiere un cambio de tecnología en iluminación, motores eléctricos y equipos de aire acondicionado; de igual manera cambio en los hábitos de consumo, crear conciencia e implementar acciones de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica dentro del personal administrativo, docente y alumnado.



Los beneficios de aplicar una metodología de eficiencia energética se verá reflejada en el uso racional de la energía eléctrica, la disminución del consumo energético y de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Este estudio tendrá el objetivo de sentar las bases para implementar un modelo de eficiencia energética en nuestra Universidad que sea capaz de evaluar de manera integral el diagnóstico energético para proporcionar soluciones óptimas.

En México, el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), a través de su página en internet [www.fide.org.mx](http://www.fide.org.mx), establece una serie de programas sustantivos de "Eficiencia Energética" mismos que promueven el uso eficiente de la energía eléctrica mediante proyectos de innovación tecnológica.

Los programas del FIDE no tienen proyectos que apoyen a la práctica de diagnóstico energético que no requieren inversión sino simplemente cambio de hábitos en el consumo e incluso cambio de horario de trabajo con el fin de reducir costos por energía eléctrica.

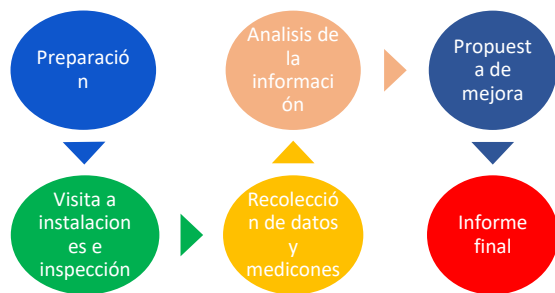
En la primera sección, se hace una breve introducción del diagnóstico y la eficiencia energética y evitar el uso irracional. En la segunda sección, se describe la metodología propuesta para tener resultados significativos de eficiencia energética. En la tercera sección, se realiza el análisis de la información recabada para definir cuáles son las estrategias de eficiencia energética. Más adelante, en la cuarta sección se discuten los resultados obtenidos de mediciones e implementación de algunas estrategias de eficiencia energética. Finalmente, en la sección de conclusiones se indica la importancia de este estudio y los resultados obtenidos, además de los trabajos futuros.

### Metodología propuesta

Tomando como referencia la metodología de Checkland (Checkland, P. 1994), la propuesta consta de las siguientes etapas:

1. Preparación de materiales, equipo de medición y del personal que realizará el trabajo de campo.
2. Visita a las instalaciones para iniciar la inspección, con ayuda de los planos eléctricos de cada edificio.
3. Levantamiento físico en las instalaciones. Asimismo, recopilar la información de consumos, demandas y costos mensuales durante un año a través de la factura. En adición, medir potencia y energía, factor de potencia y armónicos.
4. Analizar la información requerida con ayuda de hojas de cálculo, y técnicas de cómputo.
5. Definir las propuestas de mejora que optimizarán los procesos internos.
6. Realizar un informe final del diagnóstico energético.

Con el fin de tener resultados significativos en un diagnóstico energético, se debe cumplir con el procedimiento plasmado en la figura 1, la cual se muestra a continuación.



**Figura 1** Etapas de un diagnóstico energético

*Fuente:* Elaboración propia

El informe final debe de incluir:

- Objeto y alcance técnico de la auditoría realizada.
- Metodología utilizada y desarrollo de la misma.
- Análisis de las propuestas de mejora.

La implementación de las mejoras que se proponen para lograr un ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica no se incluyen en esta metodología, se concluye con el informe final.

### Domótica en la eficiencia energética

Las tendencias actuales en el tema del confort, seguridad, telecomunicaciones y ahorro energético aplicadas a las viviendas y edificios han propiciado el desarrollo de nuevas áreas del conocimiento como la Domótica (Zamora-Izquierdo, M. 2010).

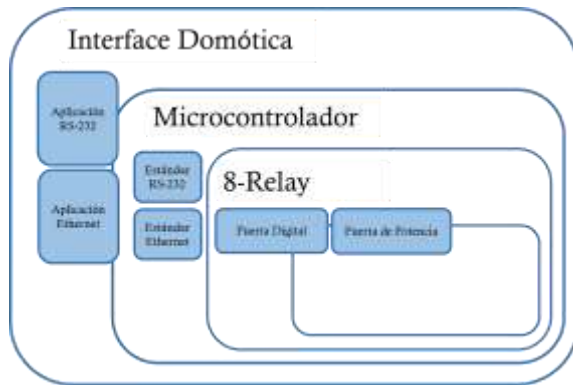
La domótica es la utilización de un conjunto de tecnologías para controlar y automatizar de forma inteligente una vivienda, permitiendo una mejor comunicación entre el usuario y todos los sistemas de su hogar (Fundación UNAM, 2016).

Dado que los equipos de aire acondicionado (minisplit) son los mayores consumidores de energía eléctrica, en este estudio se incluyó el análisis de la implementación de un sistema de control de los equipos de aire acondicionado a través de dispositivos móviles (tabletas y teléfonos) como una propuesta de mejora. Este dispositivo fue creado por alumnos y docentes de la especialidad de Ingeniería en Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería y se explica en la propuesta de Quej (Quej, H. 2016).

Se trata del diseño de una interfaz domótica utilizando embebidos presentes en la industria electrónica, ensamblados y programados según especificaciones requeridas e interactuando con diversos estándares de comunicación obteniendo un sistema de hardware-software de bajo costo para el control ON-OFF de los aires acondicionados de las aulas académicas instalados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. Dicho control, se lleva a cabo de forma automática según la programación de horarios de clases mediante la interfaz computacional (véase figura 2).

### Análisis de la información

El estudio se realizó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche y es parte fundamental del Proyecto de la convocatoria 2015 del Programa del Mejoramiento al Profesorado (PRODEP 2015) denominado Modelado de Eficiencia Energética en Instituciones de Educación Superior aplicado como prueba piloto a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.



**Figura 2** Elementos del diseño de interfaz doméstica con embebido

*Fuente:* Quej, 2016

La Facultad de Ingeniería cuenta con tarifa HM (ver página en internet [www.cfe.gov.mx](http://www.cfe.gov.mx)), seis subestaciones cada una con capacidad de 175 kVA trifásicos de distribución que alimentan a los edificios A, B, C, D, E y F, y la planta de tratamiento de aguas negras y bomba de agua potable. Se realiza un análisis de los consumos y demandas de los 15 meses recabados a través de los recibos factura de la CFE, incluyendo el mes de marzo de 2017 en el que se implementaron las acciones de mejora.

En la tabla 1 se encuentra el concentrado de los consumos (kWh) y el factor de potencia (%FP) y en la tabla 2 se presentan las demandas (kW) obtenidos de tales recibos factura.

Derivado de los censos de carga, el gráfico 1 muestra la distribución de las cargas que operan en la Facultad de Ingeniería y se observa que la carga que más energía eléctrica consume es el aire acondicionado y se le dió prioridad dentro de las estrategias de eficiencia energética.

**Resultados**

Se implementó el control ON-OFF para los aires acondicionados, se realizaron pláticas de concientización y se utilizó la luz natural en las aulas durante el día en vez de cerrar las cortinas y usar iluminación artificial.

Mes	Consumo (kWh)				FP %
	Base	Intern.	Punta	Total	
Ene-16	5,932	11,970	3,136	21,038	87.40
Feb-16	5,698	16,144	3,334	25,176	90.52
Mar-16	6,845	16,155	4,728	27,728	92.44
Abr-16	6,460	31,190	1,972	39,622	94.49
May-16	6,737	35,904	2,168	44,809	94.28
Jun-16	5,853	27,291	1,553	34,697	93.53
Jul-16	6,682	26,710	1,570	34,962	94.68
Ago-16	6,930	28,139	1,581	36,650	93.60
Sep-16	6,849	41,436	1,763	50,048	94.32
Oct-16	6,672	38,524	2,591	47,787	94.45
Nov-16	6,397	29,010	4,353	39,760	92.91
Dic-16	6,155	16,515	3,467	26,137	89.69
Ene-17	5,749	13,532	2,986	22,267	85.10
Feb-17	5,588	18,791	3,391	27,770	89.20
Mar-17	5,643	14,023	4,223	33,889	91.50

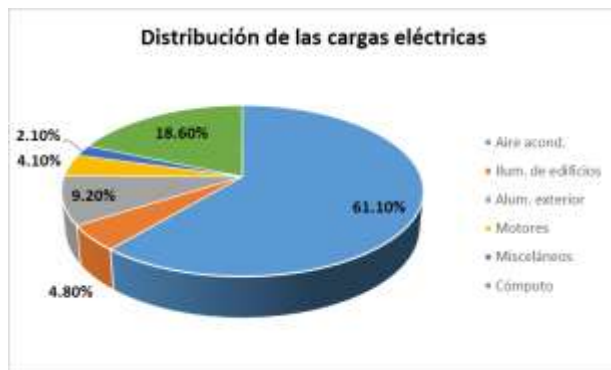
**Tabla 1** Consumos y demandas de energía eléctrica de la Facultad de Ingeniería analizados

*Fuente:* Elaboración propia

Mes	Demanda (kW)			
	Base	Intern.	Punta	Fact.
Ene-16	32	67	57	60
Feb-16	32	148	77	99
Mar-16	41	181	110	132
Abr-16	60	248	106	149
May-16	56	236	97	139
Jun-16	34	157	63	92
Jul-16	49	145	67	91
Ago-16	59	220	97	134
Sep-16	40	231	85	129
Oct-16	41	189	102	129
Nov-16	33	194	129	149
Dic-16	38	134	81	97
Ene-17	42	109	75	86
Feb-17	33	166	73	101
Mar-17	36	173	95	110

**Tabla 2** Demandas de energía eléctrica de la Facultad de Ingeniería analizados

*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 1** Distribución de las cargas eléctricas que operan en la Facultad de Ingeniería

*Fuente: Elaboración propia*

### Implementación de control ON-OFF

El ahorro energético en los equipos de aire acondicionado con control ON-OFF se muestra en la tabla 3, y se implementó en el edificio B, primer nivel, como la prueba piloto.

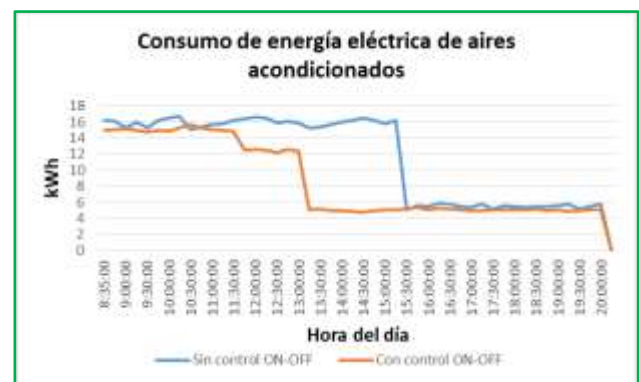
Se tomó 2.75 kW como valor de referencia de potencia de un aire acondicionado de 2 Toneladas de Refrigeración (TR) sucio.

Edificio C, 1er. nivel	Anterior		Actual Control ON-OFF	
	Salón No.	Horas de uso	Consumo (kWh)	Horas de uso
3	8	22	6	16.5
4	8	22	6	16.5
5	8	22	6	16.5
6	13	35.75	8	22
7	13	35.75	8	22
8	8	22	4	11
Totales		159.5		104.5

**Tabla 3** Comparación de consumo de energía eléctrica en la prueba piloto

*Fuente: Elaboración propia*

Se instaló el analizador de redes trifásico en el Tablero de Aire Acondicionado Trifásico y se obtuvieron los resultados mostrados en el gráfico 2 en el cual se observa la disminución en el consumo de energía al implementar el control ON-OFF.



**Gráfico 2** Comparación entre el consumo de aires acondicionados sin estrategia de ahorro de energía (línea azul) y con estrategia de ahorro de energía (línea naranja)

*Fuente: Elaboración propia*

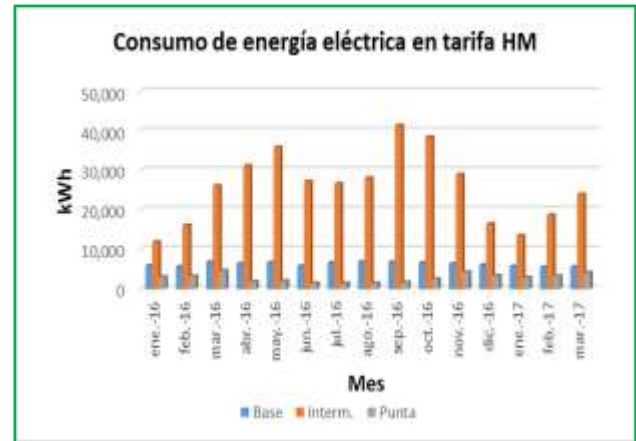
El gráfico 3 muestra una comparación entre el consumo acumulado de aires acondicionados, en la que se observa resultados de ahorro de energía con el control ON-OFF representada por la línea naranja.



**Gráfico 3** Comparación entre el consumo acumulado de aires acondicionados  
*Fuente: Elaboración propia*

Con la implementación de estrategias de ahorro y uso eficiente de la energía que estuvieron al alcance de nuestros recursos económicos derivados del proyecto PRODEP, los beneficios se vieron reflejados en la facturación del mes de marzo de 2017.

En el gráfico 4 se observa la disminución del consumo en los horarios base, intermedio y de punta de acuerdo a la tarifa HM comparando los meses de marzo de los años 2016 y 2017. De igual manera, el gráfico 5 ilustra una disminución en la demanda máxima en los mismos horarios que son regidos por la tarifa HM. Esto también se observa con claridad en las tablas 1 y 2.



**Gráfico 4** Consumo de energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería  
*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 5** Demanda máxima de energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería  
*Fuente: Elaboración propia*

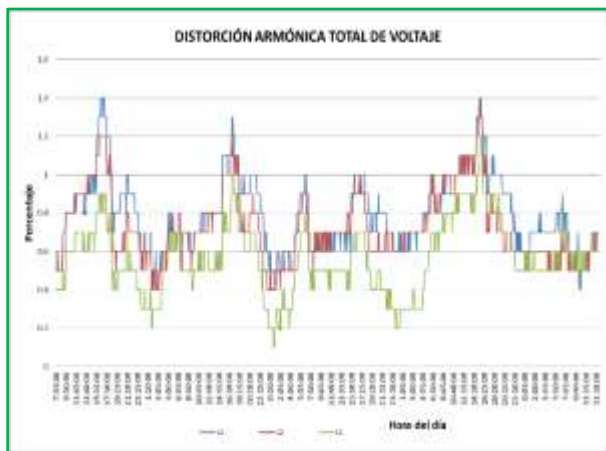
**Calidad de la energía**

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los valores máximos, mínimos y promedios medidos durante el período de monitoreo. La variación del voltaje se encuentra dentro de los límites establecidos en la Ley del Servicio Público de Energía eléctrica. De igual manera, el desbalanceo de tensión máximo entre fases es del 0.6%, siendo el máximo permitido del 5%, según la NOM-001-SEDE-2012.

Tensiones RMS (V)						
FASE	A	B	C	A-B	B-C	C-A
MÁXIMO	134.8	135.0	135.6	233.3	234.8	234.0
MÍNIMO	132.1	132.1	133.1	228.3	230.2	229.8
MEDIO	133.4	133.5	134.3	230.8	232.5	231.9

**Tabla 4** Tensiones en el sistema eléctrico de baja tensión  
*Fuente: Elaboración propia*

De acuerdo al Reglamento CFE L0000-45 y la Norma IEEE 519, el límite de distorsión armónica total en voltaje para una tensión menor a 1kV es del 5% del voltaje nominal. En el gráfico 6 se observa que se cumple con dichas normativas.



**Gráfico 6** Niveles de Distorsión armónica total de tensión  
*Fuente: Elaboración propia*

De igual manera, el Reglamento CFE L0000-45 y la norma IEEE 519, indica que el límite de distorsión armónica total en corriente para armónicos es de 20% de la corriente nominal por lo que se cumple con el reglamento de acuerdo al gráfico 7.



**Gráfico 7** Niveles de distorsión armónica total de corriente  
*Fuente: Elaboración propia*

Tarea visual del puesto de trabajo	Área de trabajo	Niveles mínimos (luxes)
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajo de oficina	Talleres: áreas de empaque y ensamble; aulas y oficinas.	300
En interiores	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera; salas de descanso; cuartos de almacen; plataformas; cuartos de calderas.	100
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimientos de vehículos.	Exteriores generales; patios y estacionamientos.	20

**Tabla 5** Niveles mínimos en oficina  
*Fuente: NOM-025-STPS-2008*

Durante el diagnóstico energético realizado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, se realizaron mediciones de los niveles de iluminación en todos los edificios.

Se encontró que los niveles de iluminación de cada edificio, en general se encuentran por debajo del mínimo indicado por la NOM-025-STPS-2008, tal como se muestra en la tabla 6.

Área de trabajo	Nivel de iluminación promedio (Luxes)	Cumple la Norma NOM-025-STPS-2008
Edificio A	320	Sí
Edificio B	210	No
Edificio C	286	No
Edificio D	310	No
Edificio E	230	No
Edificio F	245	No
Laboratorios	312-318	Sí
CADETRAA*	280	No
Centro de cómputo	320	Sí
Biblioteca	315	Sí
Pasillos	175	Sí
Estacionamiento	35	Sí
Patios	40	Sí

**Tabla 6** Niveles de iluminación en las diferentes áreas

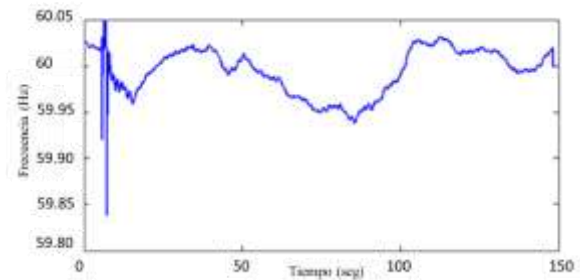
**Fuente:** Elaboración propia. \*Laboratorio de Capacitación y Desarrollo Tecnológico en Refrigeración y Aire Acondicionado (CADETRAA)

Es de observarse que debe aplicarse medidas para cumplir con los niveles mínimos de iluminación en algunas áreas.

### Análisis no lineal de los parámetros eléctricos

En adición a los resultados anteriores, la transformada de Hilbert-Huang (Huang, 1998) proporciona un análisis no lineal y no estacionario del comportamiento oscilatorio de cualquier señal existente en una instalación o sistema eléctrico.

En esta ocasión tomamos la señal de Frecuencia, la cual se muestra en el gráfico 8. Esta señal oscila alrededor de los 60 Hz.

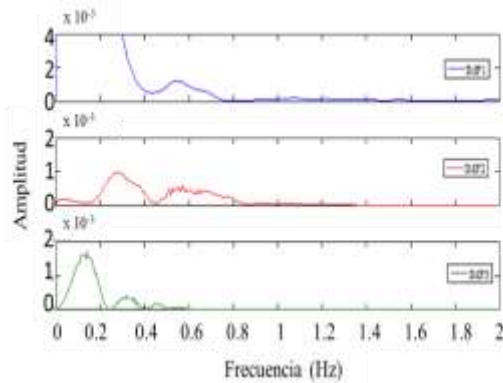


**Gráfico 8** Oscilaciones de la Frecuencia en el dominio del tiempo

**Fuente:** Elaboración propia

La señal es multicomponente, por lo que requiere ser descompuesta a través de la descomposición modal empírica (EMD) dada por Huang (Huang, N. 1998). Esto nos proporciona funciones modales intrínsecas (IMFs) y tomamos las tres primeras IMFs de mayor energía que se emplean para el análisis con la transformada de Hilbert (HT), la cual realiza una caracterización de la amplitud, la fase y la frecuencia instantáneas.

Seguidamente a cada función intrínseca modal IMF1, IMF2 e IMF3 se le aplica el análisis espectral a través de la transformada de Fourier y nos proporciona el contenido de frecuencia para cada una de ellas. Esto se observa en el gráfico 9, en el cual para la IMF1 se tiene una frecuencia de 0.55 Hz, para la IMF2, el mayor pico de la frecuencia es de 0.30 Hz y para la frecuencia de la IMF3 tenemos un valor de 0.18 Hz.

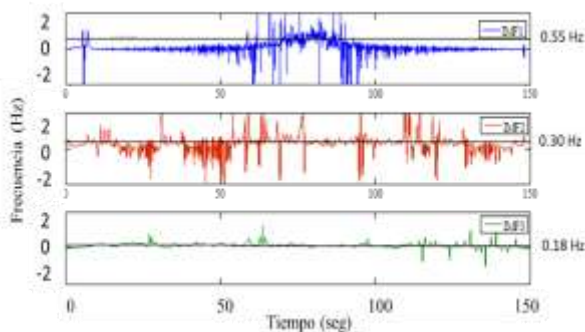


**Gráfico 9** Espectro de Fourier de las IMFs  
**Fuente:** Elaboración propia

Estos valores de frecuencia se comparan con los valores obtenidos con el análisis tiempo-frecuencia no lineal vía transformada de Hilbert y se muestran en el gráfico 10.

Los resultados obtenidos en el gráfico 10 nos muestran que el análisis con la técnica no lineal proporciona resultados equivalentes a la técnica lineal. Se observan muchos picos que se deben a errores propios del algoritmo iterativo empleado en Matlab.

Esto puede corregirse en estudios posteriores, trabajando en el refinamiento del algoritmo de la descomposición empírica modal (EMD).



**Gráfico 10** Frecuencia instantánea de las IMFs mediante la Transformada de Hilbert  
**Fuente:** Elaboración propia

La técnica será empleada para la disminución de armónicos de corriente en el sistema a través de unos filtros para mejorar la calidad de la energía eléctrica en el Centro de Cómputo de la Facultad de Ingeniería.

### Medidas de eficiencia energética

Las principales medidas de eficiencia energética que se recomendaron en el informe final y que pueden ser aplicadas son:

- Aire Acondicionado. Fijar la temperatura a 24°C que es temperatura de confort en el Sureste de México y sustituir equipos de baja eficiencia por los de alta eficiencia, los tipos Inverter, con la capacidad adecuada de acuerdo al área que se va a acondicionar.
- Iluminación. Sustituir lámparas dañadas y de baja eficiencia por lámparas fluorescentes tipo LED. Se van a instalar sensores de movimiento para el control de las luminarias en las diferentes áreas del centro de cómputo y oficinas.
- Resolver el problema de bajo nivel de iluminación a través del cambio de luminarias o modificando la cantidad de luminarias en cada área que no cumplió con los niveles mínimos.
- Instalar UPS (Uninterruptible Power Supply) para proteger a los equipos electrónicos sensibles como los equipos de cómputo y de telecomunicaciones.
- Instalar Filtros de armónicas, basados en la transformada de Hilbert-Huang, para disminuir la distorsión armónica total de la corriente en las cargas no lineales del sistema.



- Realizar un estudio de los sistemas de tierra para verificar si cumplen con los niveles mínimos de resistencia.
- Implementar un sistema de generación de energía eléctrica que, de acuerdo a estudios climatológicos y de factibilidad de nuestra Facultad, el más viable es un sistema fotovoltaico interconectado a la red de CFE de 90 kW que también alimentará al alumbrado del estacionamiento. De esta manera la Facultad de Ingeniería iniciará un proceso hacia la sustentabilidad.
- Crear un programa de mantenimiento preventivo en las instalaciones eléctricas para evitar el deterioro y el uso irracional de la energía eléctrica.
- Implementar un programa que se encargue de monitorear y supervisar que se cumpla con las medidas de eficiencia energética, a través de un sistema de gestión ambiental como el ISO 50001.

### Agradecimiento

Los autores agradecen el soporte proporcionado por la Secretaría de Educación Pública y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) a través del proyecto DSA/103.5/15/7107 para la realización del presente trabajo y un profundo agradecimiento a las autoridades de la Universidad Autónoma de Campeche por las facilidades brindadas.

### Conclusiones

En esta sección se concluye que la metodología empleada fue fundamental para desarrollar este trabajo ya que fue una guía de las acciones que se deben realizar de manera ordenada y con un orden cronológico.

Los objetivos planteados se cumplieron y nos proporciona un panorama amplio de acciones y actividades que podemos ir agregando a las que ya se realizan buscando la mejora continua en esta metodología. Los autores coincidimos que con estas medidas de eficiencia energéticas implementadas en la propuesta, la Facultad de Ingeniería llegará a ser sustentable.

Se pretende como trabajo futuro la implementación de la Transformada de Hilbert-Huang en un filtro para reducir los armónicos presentes en el sistema eléctrico con el fin de mejorar la calidad de la energía dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, principalmente del Centro de Cómputo.

### Referencias

- Brillinger, D. (1981). *Time Series Data Analysis and Theory: Expanded Edition*. Estados Unidos de América: Holden Day. 540 p.
- Checkland, P. & Scholes J. (1994). *Metodología de los sistemas suaves en acción*. México: Megabyte, Noriega Editores. 352p.
- Especificaciones CFE L0000-45. (2005). *Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica*. México: CFE.

Especificaciones Std IEEE-519. (1992). *Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Estados Unidos de América: IEEE.

Estevez L. (2012) *NOM 001 Sede 2012 Instalaciones Eléctricas (Utilización)*, México: Limusa.

Estrada, Hernández, Ontiveros & Jaime. (2013). *Prospectiva del sector eléctrico 2013-2027*. (Digital). México: SENER. 230 p. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/Prospectiva\\_del\\_Sector\\_El\\_ctrico\\_2013-2027.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/Prospectiva_del_Sector_El_ctrico_2013-2027.pdf) . Consultado el 16/05/17; 9:58 am.

Fundación UNAM. Domótica. La Ciencia de hacer hogares inteligentes. (Digital). México: UNAM. Recuperado de: <http://www.fundacionunam.org.mx/mi-tecnologia/domotica/> . Consultado el 28/05/17; 3:32 pm.

Huang, Sheng, Long, Wu, Shih, Zheng, Yen, Tung & Liu. (1998). *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*. Reino Unido: Proceedings of the Royal Society of London. A, vol. 454, pp. 903–995.

Ley General de Cambio Climático. (Junio, 2012). *Titulo Cuarto: Política Nacional de Cambio Climático. Capítulo III: Mitigación* México: DOF.

Messina, Vittal & Heydt. (2009). *Nonstationary Approaches to Trend Identification and Denoising of Measured Power System Oscillations*. Estados Unidos de América: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4. pp. 1798-1807.

Messina, Vittal, Ruiz-Vega & Henriquez-Harper. (2006). *Interpretation and visualization of wide-area PMU measurements using Hilbert analysis*. Estados Unidos de América: IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, pp. 1763-1771.

Presidencia de la República. (2012). *Sexto Informe de Gobierno: Desarrollo Sustentable y Cambio climático*. (Digital) .México: SEGOB. Eje 4, Tema 4.6. Recuperado de [http://calderon.presidencia.gob.mx/informe/sext\\_o/pdf/INFORME\\_ESCRITO/04\\_CAPITULO\\_DESARROLLO\\_SUSTENTABLE/4\\_06\\_Cambio\\_Climatico.pdf](http://calderon.presidencia.gob.mx/informe/sext_o/pdf/INFORME_ESCRITO/04_CAPITULO_DESARROLLO_SUSTENTABLE/4_06_Cambio_Climatico.pdf) Consultado el 30/07/17, 8:19 pm.

Quej, Durán, Estrada, Castillo & Ovando. (2016). *Diseño de interfase domótica utilizando embebido de bajo costo para el control de aires acondicionados en aulas académicas: Memorias de Congreso IX Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica*. (Digital). Santa Clara, Cuba: Editorial Feijoo.

Rey F. & Velasco E. (2006). *Eficiencia energética en Edificios: certificación y auditorías energéticas*. España: Paraninfo, 2006.

Weideman, J. (1995). *Computing the Hilbert Transform On The Real Line*. Estados Unidos de América: Transactions on Mathematics of Computation, Vol 64, No. 10, pp. 745-762.

Zamora, Santa, & Gomez. (2010). *An integral and networked home automation solution for indoor ambient intelligence*. IEEE Pervasive Computing. Vol. 9, 2010.

[http://www.fide.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=121&Itemid=219](http://www.fide.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=219)  
Consultado el 23/05/17; 12:14 pm.

[http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas\\_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2017&mes=6](http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2017&mes=6) Consultado el 28/05/2017; 7:43 pm.

## Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación

ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel\*†, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica (UAIE, Universidad Autónoma de Zacatecas. Av. Ramón López Velarde #801, Zacatecas, México

Recibido 5 de Enero, 2017; Aceptado 7 de Marzo, 2017

### Resumen

Las celdas solares de perovskitas se basan en la fórmula  $\text{MAPbX}_3$  donde MA corresponde al metilamonio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) y X puede ser I, Cl o Br. Este compuesto es un material semiconductor que en los últimos años ha generado gran interés como material fotovoltaico debido a su alta eficiencia de fotoconversión energética (~20%) además de su bajo costo de fabricación. En este trabajo se realizó la simulación y modelado por computadora de perovskitas para obtener sus propiedades optoelectrónicas. Se simularon diferentes estructuras de perovskita ( $\text{MAPbX}_3$  y  $\text{CsPbX}_3$ ) y se obtuvieron propiedades ópticas como la brecha energética. Se compararon los resultados obtenidos con resultados experimentales. Para esta investigación, se utilizó el simulador Materials Studio para el diseño de las estructuras cristalinas de perovskita ( $\text{MAPbX}_3$  y  $\text{CsPbX}_3$ ). Adicionalmente, el módulo CASTEP, permitió estimar la brecha energética de las diferentes estructuras de perovskita mediante un algoritmo basado en la teoría funcional de la densidad (DFT). Con estos resultados se pretende optimizar los procesos de fabricación de celdas de perovskita de diferentes estructuras.

**Perovskita, propiedades ópticas, brecha energética, Materials Studio**

### Abstract

Perovskite solar cells are based on the formula  $\text{MAPbX}_3$  where MA corresponds to methyl-ammonium ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ ) and X can be either I, Cl or Br. This compound is a semiconductor material that has recently received much interest as a photovoltaic material due to its high photo-conversion efficiency (~20%) in addition to its low fabrication cost. In this work, simulations and computer modeling were developed to obtain optoelectronic properties of perovskites. Several structures of perovskites were simulated ( $\text{MAPbX}_3$  and  $\text{CsPbX}_3$ ) to obtain optical properties such as the energy band gap. These results were compared to experimental values. For this research, the Materials Studio simulation package was used to design the crystal structures of perovskites ( $\text{MAPbX}_3$  and  $\text{CsPbX}_3$ ). Additionally, the CASTEP module allowed the estimation of the band gap of the different structures of perovskite using an algorithm based on density functional theory (DFT). These results would aid the optimization of the fabrication processes of perovskite solar cells with different structures.

**Perovskite, optical properties, band gap, Materials Studio**

**Citación:** ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel, Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 28-36

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: 35162018@uaz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

En la actualidad, uno de los principales problemas es el calentamiento global, producido por el aumento de gases contaminantes que provocan el efecto invernadero. Debido a esto, la política global es impulsar una transición energética hacia fuentes de energía sustentables, renovables y menos dependiente de combustibles fósiles (Vargas, 2015). Debido a lo anterior, la energía solar es una atractiva opción para generar energía eléctrica por medio de radiación solar y la interacción con la materia (tecnología fotovoltaica). Esta tecnología permite aprovechar la radiación del sol mediante el uso de celdas fotovoltaicas convirtiendo la energía del sol en energía eléctrica. Por lo tanto la energía solar es una alternativa viable para solucionar problemas energéticos en nuestro país (Duran, 2016), como el incremento de los costos en los combustibles fósiles (Venegas-Trujillo, 2016); también el satisfacer la demanda energética según el aumento poblacional junto con su bienestar económico (Rangel, 2017).

El estudio de celdas solares está clasificado según los materiales de las cuales están fabricadas:

- Celdas orgánicas (utilizan materiales orgánicos para su fabricación) (Brabec, 2001; Ma, 2005; Saunders, 2008; Scharber, 2006). Las celdas solares orgánicas tienen también su importancia debido a su flexibilidad, delgadez y fácil fabricación (Fung, 2013). Las celdas solares orgánicas pueden ser flexibles o ultraligeras para aplicaciones en recubrimientos de casas o edificios en donde se pueden amoldar a la estructura deseada.
  - Inorgánicas (fabricadas con materiales inorgánicos) (Kamat, 2008; Lopez, 2008; Robel, 2006). El material inorgánico más utilizado para fabricar celdas solares es el silicio, que por muchos años este tipo de celdas han dominado el mercado a nivel mundial (Noh, 2015), debido a que absorben gran cantidad de luz del espectro solar (400 nm hasta 1100 nm) (Sark, 2012) y su facilidad para dopar el material y facilitar el flujo de electrones (Nelson, 2003).
  - Híbridas (fabricadas por una parte orgánica y una inorgánica) (Goh, 2007; Van Hal, 2003). En este tipo de celdas se busca combinar las propiedades orgánicas con las inorgánicas y aumentar la absorción de luz y el transporte de electrones en el material activo. Actualmente, una celda solar híbrida de la forma  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  tiene el record mundial de eficiencia con un 21%, son llamadas celdas de perovskita debido a la estructura cristalina de perovskita que presentan (Giordano, 2016; Jacobsson, 2016; NREL, 2017; Saliba, 2016).
- Las celdas de perovskita se basan principalmente de la forma  $\text{ABX}_3$  donde A es un material orgánico, comúnmente yoduro de metilamonio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ), B es un material inorgánico comúnmente plomo (Pb) y X es un halogenuro comúnmente yodo (I). La investigación sobre estos materiales utilizados en aplicaciones fotovoltaicas es muy interesante debido a la gran cantidad de potenciales aplicaciones optoelectrónicas que presenta, por ejemplo: diodos emisores de luz, aplicaciones biomédicas y por supuesto en celdas solares (Sanchez, 2016, Huang, 2015; Song, 2015; Wei, 2016, Sidhik, 2017), etc.

Para ello, se estudiaron experimentalmente las propiedades optoelectrónicas de diferentes materiales, cambiando el material orgánico  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  por cesio (Cs), así como el halogenuro yodo (I), por cloro (Cl) y bromo (Br).

En el presente trabajo se obtienen las propiedades optoelectrónicas de la estructura de perovskita de la configuración  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , donde  $X = \text{Cl}, \text{I}, \text{Br}$  y  $\text{CsPbX}_3$  por medio de la teoría funcional de la densidad (DFT por sus siglas en inglés). En esta técnica, por medio de una celda unitaria se simula por computadora, obteniendo como resultado la brecha energética para cada uno de los materiales estudiados.

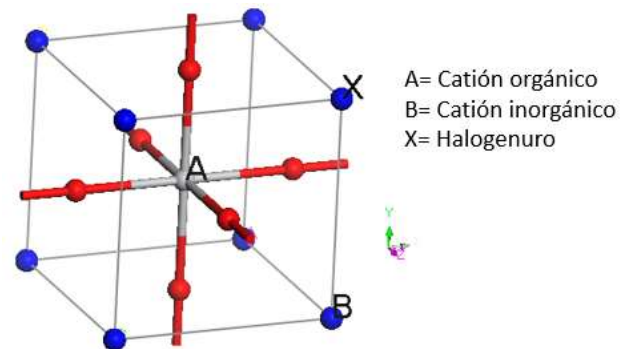
### Metodología

En este proyecto se utilizó como herramienta de trabajo el software de computadora Materials Studio 4.4, con el módulo CASTEP se simularon los materiales semiconductores para esta investigación. Esta herramienta trabaja con estructuras atómicas en 3D para obtener resultados como la estructura de bandas. Se calculó la densidad de estados mediante las energías en Monkhorst-pack (Accelerlys, 2014). Aquí se utiliza el método de la teoría funcional de la densidad (DFT).

### Estructura cristalina de perovskita

La estructura cristalina de perovskita se basa principalmente de la forma  $\text{ABX}_3$  donde A y B son átomos con carga positiva (cationes) y X son átomos con carga negativa (anión); comúnmente A es  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ , Cs o yoduro de formamidinium ( $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{I}$ ). B es un material inorgánico puede ser plomo (Pb), estaño (Sn) o bismuto (Bi) y X es un halogenuro yodo (I), bromo (Br) o cloro (Cl) (Swarnkar, 2017).

Este material puede ser un material híbrido, parte orgánica-inorgánica ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) o inorgánico completamente ( $\text{CsPbI}_3$ ). Las propiedades ópticas y electrónicas de este material dependen directamente de la combinación de los diferentes materiales utilizados. La figura 1 muestra el modelo atómico de la estructura cristalina cúbica en forma perovskita.



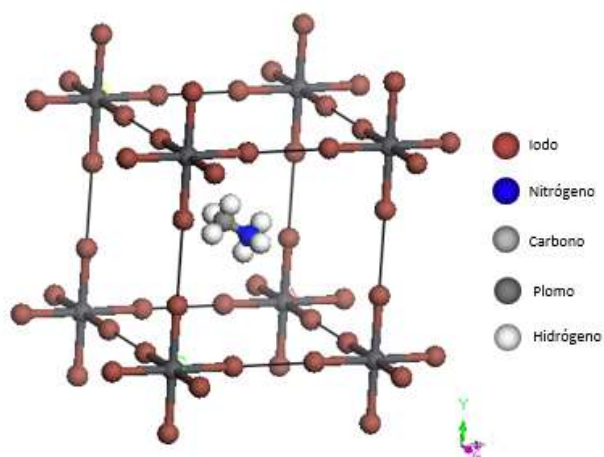
**Figura 1** Estructura cristalina cúbica del tipo perovskita  
*Fuente: elaboración propia*

La perovskita presenta tres diferentes tipos de estructuras: cúbica, tetragonal y ortorómbica, dependiendo de la temperatura de calcinado se obtienen estas estructuras (Oku, 2015). Diferentes resultados se han publicado los cuales presentan estructura cúbica obteniendo hasta 15% de eficiencia (Oku, 2015). Sin embargo la estructura con mejores resultados obtenidos es la estructura tetragonal.

Con esta estructura se han logrado eficiencia de hasta 18% (Sidhik et al., 2017) o una combinación de ambas con eficiencias mayores a 20% (Saliba et al., 2016) o bien con la combinación de cationes y aniones, obteniendo hasta 22% de eficiencia (Saliba et al., 2016).

### Estructura cristalina cúbica de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$

La Figura 2 muestra el arreglo atómico de la celda unitaria de la forma  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , donde X es I, Br o Cl. Como se puede observar, es una estructura cúbica, en el centro se encuentra la parte orgánica  $\text{CH}_3\text{NH}_3$ , en las aristas del cubo esta la parte inorgánica Pb y sobre de ella se encuentran los halogenuros (I, Br o Cl).



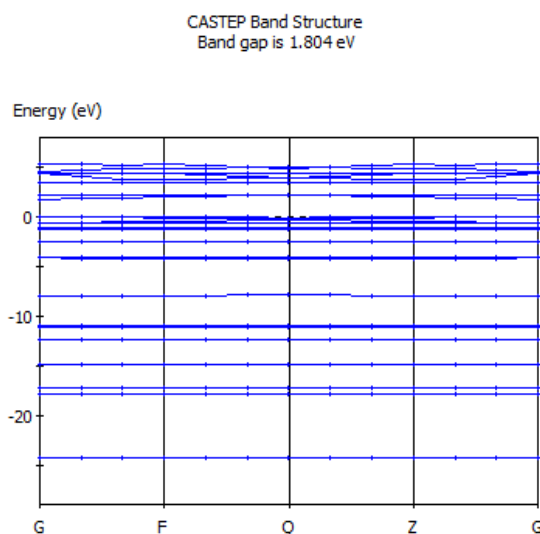
**Figura 2** Estructura cristalina  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , donde X= Cl, Br o I

*Fuente: elaboración propia*

La Figura 3 muestra la estructura de bandas característica de la configuración  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Para obtener esta simulación se utilizaron los siguientes parámetros de red:  $a = 8.839 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.839 \text{ \AA}$  y  $c = 12.69 \text{ \AA}$ .

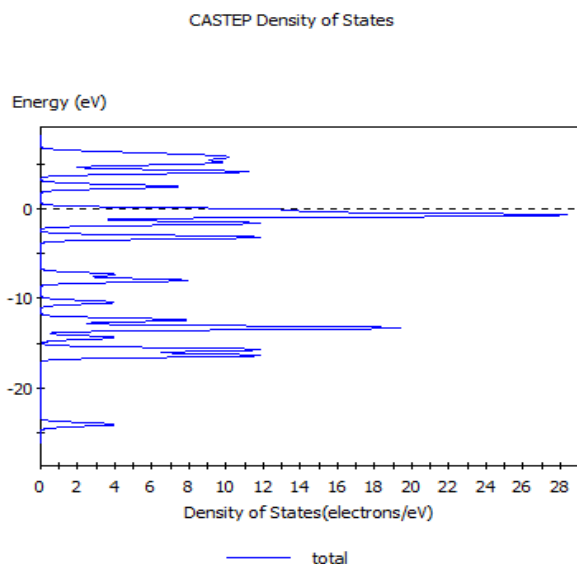
La estructura de bandas nos da información acerca de la conductibilidad en los materiales; mediante las bandas de conducción (electrones que participan en las uniones atómicas) y la banda de valencia (electrones libres para la conducción), cuando se cruzan o se acercan, hay la posibilidad de que los electrones en la banda de valencia pasen a la de conducción, con un pequeño estímulo de temperatura o energía esto permitirá la conducción eléctrica.

Para determinar la brecha energética de un semiconductor depende de la resistividad que se tiene en el material y del dopaje que se encuentra de tipo N (electrones) o tipo P (huecos), generando una zona de polaridad positiva y otra negativa. Según la densidad de estados, como se muestran en las figuras, se obtiene donde hay la mayoría de portadores que pueden ser utilizados para generar la corriente eléctrica, pasando de la banda de valencia a la de conducción.



**Figura 3** Estructura de bandas de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

*Fuente: elaboración propia*



**Figura 4** Densidad de estados de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$   
**Fuente:** elaboración propia

Utilizando este método, obtuvimos la brecha energética de la estructura cúbica de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , donde  $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}$  o  $\text{I}$ . En la tabla 1 se muestran los resultados.

Estructura	Brecha energética
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	1.58 eV
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$	1.804 eV
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$	2.2 eV

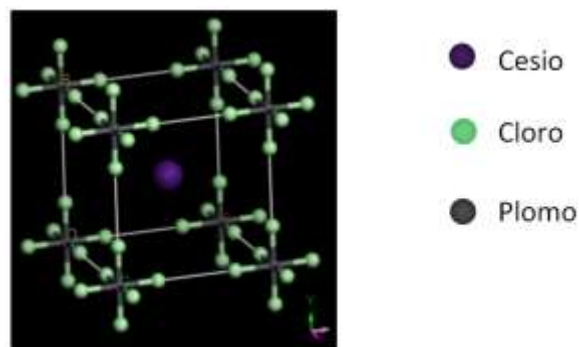
**Tabla 1** Brecha energética de estructuras  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$   
**Fuente:** elaboración propia

Como se puede observar, al cambiar el halogenuro, la brecha energética cambia, obteniendo menor brecha energética para el caso de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (1.58 eV). Esta brecha energética aumenta para el caso de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  (1.804 eV) y es aún mayor para  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$  (2.2 eV).

Utilizando la hipótesis de Planck,  $E = hf$  donde  $E$  es la energía de la brecha energética,  $h$  es la constante de Planck ( $h = 4.136 \times 10^{-15}$  eV/s) y  $f$  es la frecuencia de radiación, se puede calcular la longitud de onda a la cual absorben luz este tipo de semiconductores, la estructura  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  absorbe luz hasta  $\sim 790$  nm,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  hasta  $\sim 690$  nm y la estructura  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$  hasta  $\sim 563$  nm.

### Estructura cristalina de $\text{CsPbX}_3$

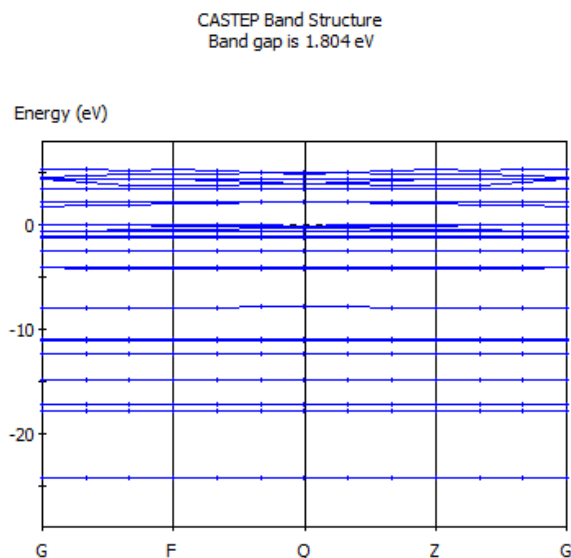
Uno de los principales problemas de estos materiales es que no son estables, algunos autores atribuyen este problema a la parte orgánica del material. Una posible solución es remplazar el ioduro de metilamonio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ) por cesio (Cs), este material es completamente inorgánico, por lo que la estructura final es completamente inorgánica. La figura 5 muestra el arreglo atómico de la celda unitaria de la forma  $\text{CsPbX}_3$ , donde  $\text{X}$  es  $\text{I}, \text{Br}$  o  $\text{Cl}$ , utilizando la estructura cúbica. Como se puede observar se sustituye la parte central formada anteriormente por  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  por Cs.



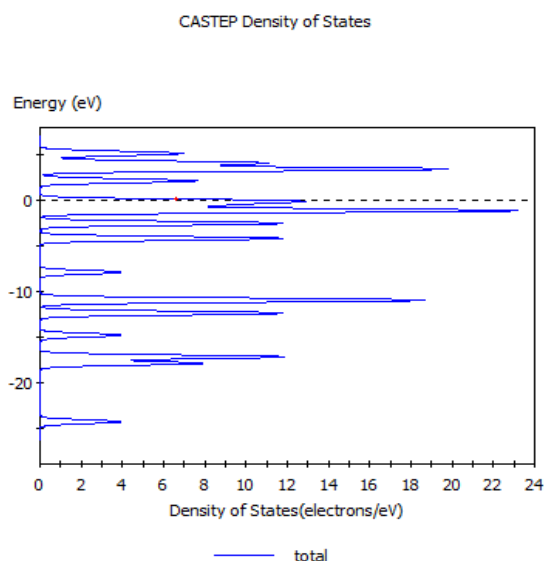
**Figura 5** Estructura cristalina de  $\text{CsPbI}_3$   
**Fuente:** elaboración propia

La estructura de bandas (figura 6) nos da información sobre la brecha energética.

Para este caso se obtuvo la brecha energética utilizando la estructura  $\text{CsPbI}_3$ , además ampliamos el estudio utilizando también cloro y bromo. La figura 7 muestra la densidad de estados característico para la estructura  $\text{CsPbI}_3$ .



**Figura 6** Estructura de bandas de  $\text{CsPbI}_3$   
*Fuente: elaboración propia*



**Figura 7** Densidad de estados  $\text{CsPbI}_3$   
*Fuente: elaboración propia*

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos utilizando la estructura  $\text{CsPbX}_3$ , ampliando el estudio utilizando las siguientes estructuras: cúbica, tetragonal y ortorómbica.

Estructura	Cúbica	Tetragonal	Ortorómbica
$\text{CsPbI}_3$	1.83	1.84	1.99
$\text{CsPbBr}_3$	2.39	2.54	2.38
$\text{CsPbCl}_3$	3.51	2.80	2.52

**Tabla 2** Comparación de la brecha energética entre estructura cúbica, tetragonal y ortorómbica de la estructura  $\text{CsPbX}_3$  en eV

*Fuente: elaboración propia*

Estructura	Brecha energética en la literatura
$\text{CsPbI}_3$	1.73 eV
$\text{CsPbBr}_3$	2.36 eV
$\text{CsPbCl}_3$	2.98 eV

**Tabla 3** Brecha energética de las estructuras cristalinas de  $\text{CsPbX}_3$  encontradas en la literatura

*Fuente: elaboración propia*

Como se puede observar en la tabla 2, sigue existiendo la misma tendencia al cambiar el halogenuro en la estructura, para el caso de  $\text{CsPbI}_3$  obtenemos una brecha energética de 1.829 eV, mientras que  $\text{CsPbBr}_3$  presenta 2.39eV y  $\text{CsPbCl}_3$  tiene una brecha energética de 3.51 eV, esta tendencia es similar que en el caso de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ . La tabla 3 muestra valores de la brecha energética de  $\text{CsPbX}_3$  reportados en la literatura.

Cuando se cambia de estructura, existen cambios en la brecha energética, estos cambios pueden estar asociados a las estructuras geométricas de cada una de las estructuras, esto debido a que al realizar el cambio de estructura cambian los parámetros de la red. Cambiando la distancia entre cada uno de los átomos de la estructura cristalina, mas aun entre la interacción del Pb-X (X=I, Br o Cl) el cual se observa en un cambio en la brecha energética. (Mosconi, 2013).



## Conclusiones

Se realizó el análisis por medio de la teoría funcional de la densidad de la estructura perovskita  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  y  $\text{CsPbX}_3$ . Se mostró que con el cambio en el halógeno se obtienen diferentes propiedades ópticas, para el caso  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , donde X es Cl, Br o I. Se obtuvieron brechas energéticas de 1.58, 1.804 y 2.2 eV respectivamente, mostrando que la estructura  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  presenta mejores propiedades de absorción y es el material más ideal para aplicarse en celdas solares, mientras que las configuraciones  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  y  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$  pueden tener aplicaciones directas en la fabricación de diodos emisores de luz.

En el caso de la estructura  $\text{CsPbX}_3$ , presenta resultados similares, la estructura  $\text{CsPbI}_3$  es la que presenta mejores condiciones de absorción para ser aplicada en celdas solares, mientras que las otras estructuras  $\text{CsPbBr}_3$  y  $\text{CsPbCl}_3$  presentan absorción y emisión en la parte visible, con potenciales aplicaciones en LEDs. Por otra parte, se mostró que el cambio de estructura (de cúbica a tetragonal u ortorrómbica) cambia las propiedades ópticas de cada material cambiando directamente la brecha energética.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por una beca en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad, CONACyT (I. A. D.) y por el programa para el desarrollo profesional docente del nivel superior (Prodep) número de proyecto F-PROME-38/Rev-04 SEP-23-005 (D. E. S.)

## Referencias

- Accelerys. (2014). *CASTEP GUIDE*.
- Brabec, C. J., Cravino, A., Meissner, D., Sariciftci, N. S., Fromherz, T., Rispen, M. T., . . . Hummelen, J. C. (2001). Origin of the open circuit voltage of plastic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 11(5), 374-380.
- Duran Pino, Barbosa J. Gabriel, Quinto Gabriel. (2016). Concentrador Solar PDR Con Seguimiento Solar. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 98-108.
- Fung, D. D. S. (2013). Introduction to solar cells. *Green energy and technology*, 1 - 16.
- Giordano, F., Abate, A., Baena, J. P. C., Saliba, M., Matsui, T., Im, S. H., . . . Graetzel, M. (2016). Enhanced electronic properties in mesoporous  $\text{TiO}_2$  via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells. *Nature communications*, 7.
- Goh, C., Scully, S. R., & McGehee, M. D. (2007). Effects of molecular interface modification in hybrid organic-inorganic photovoltaic cells. *Journal of Applied Physics*, 101(11), 114503-114503.
- Huang, H., Zhao, F., Liu, L., Zhang, F., Wu, X.-g., Shi, L., . . . Zhong, H. (2015). Emulsion Synthesis of Size-Tunable  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  Quantum Dots: An Alternative Route toward Efficient Light-Emitting Diodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(51), 28128-28133. doi:10.1021/acsami.5b10373
- Jacobsson, T. J., Correa-Baena, J.-P., Pazoki, M., Saliba, M., Schenk, K., Grätzel, M., & Hagfeldt, A. (2016). Exploration of the compositional space for mixed lead halogen perovskites for high efficiency solar cells. *Energy & Environmental Science*, 9(5), 1706-1724.

Kamat, P. V. (2008). Quantum dot solar cells. Semiconductor nanocrystals as light harvesters†. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(48), 18737-18753.

Lopez-Luke, T., Wolcott, A., Xu, L.-p., Chen, S., Wen, Z., Li, J., . . . Zhang, J. Z. (2008). Nitrogen-doped and CdSe quantum-dot-sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> films for solar energy conversion applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(4), 1282-1292.

Ma, W., Yang, C., Gong, X., Lee, K., & Heeger, A. J. (2005). Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology. *Advanced Functional Materials*, 15(10), 1617-1622.

Mosconi, E., Amat, A., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M., & De Angelis, F. (2013). First-Principles Modeling of Mixed Halide Organometal Perovskites for Photovoltaic Applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(27), 13902-13913. doi:10.1021/jp4048659

Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial College Press.

Noh, J. H., & Seok, S. I. (2015). Steps toward efficient inorganic–organic hybrid perovskite solar cells. *MRS Bulletin*, 40(08), 648-653.

NREL. (2017). *Efficiency chart*. Retrieved from Oku, T. (2015). Crystal structures of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> and related perovskite compounds used for solar cells *Solar Cells-New Approaches and Reviews*: InTech.

Rangel-Hernández Víctor Hugo, Niño-Avendaño Andrés Mauricio, Ornelas-Jacobo Ruben. Panorama general de las celdas SOFC en la generación de energía eléctrica. *Aplicación científica y técnica*, 3, 61-73.

Robel, I., Subramanian, V., Kuno, M., & Kamat, P. V. (2006). Quantum Dot Solar Cells. Harvesting Light Energy with CdSe Nanocrystals Molecularly Linked to Mesoscopic TiO<sub>2</sub> Films. *Journal of the American Chemical Society*, 128(7), 2385-2393. doi:10.1021/ja056494n

Saliba, M., Matsui, T., Seo, J.-Y., Domanski, K., Correa-Baena, J.-P., Nazeeruddin, M. K., . . . Hagfeldt, A. (2016). Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency. *Energy & Environmental Science*, 9(6), 1989-1997.

Sanchez, R. S., de la Fuente, M. S., Suarez, I., Muñoz-Matutano, G., Martinez-Pastor, J. P., & Mora-Sero, I. (2016). Tunable light emission by exciplex state formation between hybrid halide perovskite and core/shell quantum dots: Implications in advanced LEDs and photovoltaics. *Science advances*, 2(1), e1501104.

Sark, W. v., Meijerink, A., & Schropp, R. (2012). Solar spectrum conversion for photovoltaics using nanoparticles. *CIER-E-2012-8*, 1-28.

Saunders, B. R., & Turner, M. L. (2008). Nanoparticle–polymer photovoltaic cells. *Advances in colloid and interface science*, 138(1), 1-23.

Scharber, M. C., Mühlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A. J., & Brabec, C. J. (2006). Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—Towards 10% energy-conversion efficiency. *Advanced Materials*, 18(6), 789-794.

Sidhik, S., Esparza, D., Martínez-Benítez, A., Lopez-Luke, T., Carriles, R., Mora-Sero, I., & de la Rosa, E. (2017). Enhanced Photovoltaic Performance of Mesoscopic Perovskite Solar Cells by Controlling the Interaction between CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Films and CsPbX<sub>3</sub> Perovskite Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(8), 4239-4245. doi:10.1021/acs.jpcc.7b00861

Song, J., Li, J., Li, X., Xu, L., Dong, Y., & Zeng, H. (2015). Quantum Dot Light-Emitting Diodes Based on Inorganic Perovskite Cesium Lead Halides (CsPbX<sub>3</sub>). *Advanced Materials*, 27(44), 7162-7167.

Swarnkar, A., Ravi, V. K., & Nag, A. (2017). Beyond Colloidal Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals: Analogous Metal Halides and Doping. *ACS Energy Letters*, 2(5), 1089-1098.

Van Hal, P. A., Wienk, M. M., Kroon, J. M., & Janssen, R. A. (2003). TiO<sub>2</sub> sensitized with an oligo (p-phenylenevinylene) carboxylic acid: a new model compound for a hybrid solar cell. *Journal of Materials Chemistry*, 13(5), 1054-1057.

Vargas Suárez, R. (2015). Reforma energética: De servicio público a modelo de negocios. *Política y cultura*(43), 125-145.

Venegas-Trujillo Tiberio, Contreras-Aguilar Luis, Villagrán-Villegas Luz, Laguna-Camacho Juan. (2016). Universidad Sustentable: hacia la transición energética mediante generación de energía eléctrica fotovoltaica y eficiencia energética. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 131-139.

Wei, M., Sun, W., Liu, Y., Liu, Z., Xiao, L., Bian, Z., & Chen, Z. (2016). Highly luminescent and stable layered perovskite as the emitter for light emitting diodes. *physica status solidi (a)*.

## Reingeniería en el diseño de productos

CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel\*†, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás

*Tecnológico Nacional De México / Instituto Tecnológico de Morelia, Departamento de posgrado e investigación, maestría en Ingeniería Mecánica e Industrial. Av. Tecnológico 1500, col Lomas de Santiaguito, Morelia, Michoacán. México*

Recibido 6 de Enero, 2017; Aceptado 8 de Marzo, 2017

### Resumen

Existen nuevas tecnologías de diseño y mejora continua que ayudan al diseño de productos: QFD-CAD-TRIZ-CAE-CFD-CAM-FEA-AMEF, Ing. Concurrente, Ingeniería Inversa, entre otras. También hay herramientas en aspecto de los procesos, como los administrativos; “la Reingeniería”, por ejemplo se centra de acuerdo a libro del mismo nombre (CHAMPY, 2005) dice: “Hacer totalmente nuevo un proceso para rediseñar la empresa”. Siendo nuestro objetivo “Implementar la metodología de reingeniería en el diseño de productos”; pero en el proceso de diseño es compleja esta acción, la pregunta ¿Cómo se hace reingeniería en diseño de productos? para responder: Se seleccionan herramientas de diseño geométrico, materiales, cargas, manufactura y mejora continua; así como las bases del conocimiento científico; Aunque esto es rediseño, para que sea una reingeniería se necesitan las nuevas tecnologías anteriormente mencionadas; para buscar soluciones diferentes en los campos de las ciencias y tecnologías actuales, que resuelvan problemas diversos y generar soluciones particulares por reingeniería para el diseño de productos, sin modificar su funcionalidad, más bien mejorarla y optimizarla, obteniendo una metodología flexible de acuerdo al tipo y tamaño de empresa institución o capacidad de cada individuo que la utilice y con una mente abierta para hacerlo diferente. Investigación llevada con Ser SA de CV.

### Nuevas tecnologías, reingeniería, TRIZ-CAD-CAE

### Abstract

There are new design and continuous improvement technologies that help the design of products: QFD-CAD-TRIZ-CAE-CFD-CAM-FEA-AMEF, Concurrent Engineer, Reverse Engineering, among others. There are also tools in aspect of processes, such as administrative; "Reengineering," for example, focuses on a book of the same name (CHAMPY, 2005) says: "Make a whole new process to redesign the company." Being our objective "To implement the methodology of reingeniería in the design of products"; but in the process of design is complex this action, the question How is reengineering in product design? to answer: Geometric design tools, materials, loads, manufacturing and continuous improvement are selected; as well as the bases of scientific knowledge; Although this is a redesign, to be a reengineering the new technologies mentioned above are needed; to find different solutions in the fields of current sciences and technologies, to solve diverse problems and generate particular solutions for reengineering for product design, without modifying its functionality, rather to improve and optimize it, obtaining a flexible methodology according to the type and size of company institution or capacity of each individual who uses it and with an open mind to make it different. Research carried out with Ser SA de CV.

### New technology, reengineering, TRIZ-CAD-CAM

**Citación:** CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás. Reingeniería en el diseño de productos. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 37-52

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ahuani@itmorelia.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

A través del tiempo se han creado diversos tipos de metodologías en el proceso del diseño de productos, que utilizan la tecnología y el conocimiento en cada momento de la línea del tiempo.

Desde el uso de objetos cercanos al entorno del ser humano y empezando por dar su propia personalización en el diseño de los mismos; de acuerdo a los materiales existentes en cada región geográfica de los seres.

De ahí provienen los diseños de objetos específicos de cada región y el uso de materiales en diversos artículos denominados artesanías; como por ejemplo:

- Objetos de cobre de Sta. Clara del Cobre, Michoacán, México.
- Las lacas de Pátzcuaro, Michoacán, México.
- La joyería de plata de Taxco, Edo. De México, México.
- La porcelana y el jade de China.
- El oro de Alaska, E.E.U.U.
- Los autos Alemanes.
- La Electrónica Japonesa.
- Entre miles de productos a nivel global.

Pero el tema es Reingeniería en el diseño de productos; lo cual después de que se empezó a generar el conocimiento técnico por medio del estudio de las ciencias; y se comenzó ese conocimiento a utilizar para la construcción de objetos de uso cotidiano de los seres desde una etapa artesanal hasta las etapas industriales actuales; se han utilizado un sin número de nuevas tecnologías para una mejora continua; que ayudan en el diseño de productos como son: QFD-CAD-TRIZ-CAE-CFD-CAM-FEA-AMEF, Ing. Concurrente, Ingeniería Inversa, entre otras. Pero también hay herramientas de actualidad en el aspecto de los procesos, como la Reingeniería de procesos; esta última es aplicada principalmente a los procesos administrativos y de desarrollo de software; adaptando esta herramienta al proceso de diseño y rediseño de objetos y productos; obteniendo totalmente mejoras en los mismos; y hasta nuevos productos para su innovación, para usos en diversas áreas del conocimiento productivo, y de todos los sectores sociales.

Es importante para entender que las metodologías de mejora y diseño; pueden ser combinadas y no necesariamente se contraponen unas a otras, siendo esto una ingeniería concurrente de diversas filosofías metodológicas de nuestros procesos productivos.

El valor agregado es el saber adecuadamente cuales metodologías técnicas de mejora continua existentes en los sistemas productivos y de diseño de objetos, fusionar para un mejor resultado, y tomar decisiones de acuerdo a los solución obtenida en corridas de simulaciones y diseños virtuales por computadora; utilizando los conocimientos básicos en cada etapa para realizar el diseño de productos; logrando de esta manera una reingeniería en el proceso de diseño de productos. Comentemos algunas de estas herramientas metodológicas.

### Reingeniería

“Es la revisión fundamental y el rediseño radical de procesos para alcanzar mejoras espectaculares en medidas críticas y contemporáneas de rendimiento, tales como calidad, servicio y rapidez” (CHAMPY, 2005)

### Despliegue de la Función de Calidad (QFD)

“El QFD (por sus siglas en inglés) es un sistema estructurado que facilita la identificación de las necesidades y expectativas de los clientes (Calidad o voz del cliente {Q}) y su traducción al lenguaje de la organización. Esto es, permite trasladar lo que necesita y busca el cliente a requerimientos de calidad internos de la organización. El concepto que denota esta particularidad se denomina despliegue {D} y se logra mediante la planificación de las acciones necesarias para lograr esa satisfacción, con la participación de todas las personas y departamentos de la organización (aquí denominadas funciones {F}) que intervienen en el diseño y desarrollo del producto o servicio.” (LORENZO, MIRA, OLARTE, GUERRERO, & MOYANO, 2004)

### TRIZ

“La teoría de la solución de problemas de inventiva TRIZ (por sus siglas en ruso) fue desarrollada por Genrich Altshuller y sus colegas en la ex URSS a comienzos de 1946, y, actualmente, se desarrolla y practica en todo el mundo.

Altshuller estudió más de 200 mil patentes buscando cómo fueron resueltos los problemas inventivos y concluyó que de estas 200 mil patentes solo 40 mil tenían soluciones algo inventivas; el resto solamente eran mejoras directas. Una re categorización de estas soluciones demostró que muchos de los problemas habían sido resueltos muchas veces mediante la aplicación de solo cuarenta principios fundamentales de inventiva.” (Córdova Ames, 2008)

### Diseño asistido por computadora. CAD (por sus siglas en ingles)

Es el uso de software para el diseño y modelado de piezas, productos componentes, ensamblajes y todo lo necesario para desarrollar virtualmente nuevos productos. (Dassault systemes, 2017)

### Ingeniería asistida por computadora. CAE (por sus siglas en ingles)

Es el uso de software para simulación de un modelo matemático de diversas ramas de la ingeniería y análisis de resultados de manera computacional y como aliado en el diseño de objetos y productos. (Dassault systemes, 2017)

### **Manufactura asistida por computadora CAM (por sus siglas en inglés)**

a) Complemento para determinar el proceso de manufactura con equipos CNC o Impresoras 3D, b) Sistema para controlar los procesos de manufactura en las empresas desde la entrada de materia prima hasta la salida del producto final; por medio de software especializado, (Dassault systemes, 2017).

### **CFD, La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés)**

Es una ciencia relativamente reciente y ha encontrado una tremenda aplicación en la solución de diversos problemas de ingeniería en donde intervienen flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas y fenómenos relacionados. El CFD ha demostrado ser una herramienta valiosa en el diseño y análisis de fuentes de iluminación, evitando el trabajo por ensayo y error y reduciendo enormemente el tiempo requerido en el diseño e investigación de nuevos prototipos.” (Cahue Díaz & Camacho Arriaga, 2014), utilizado principalmente con el método de volúmenes finitos.

### **Análisis por elementos finitos. FEA (por sus siglas en inglés)**

Método matemático de matriz de ecuaciones para solucionar problemas de diseño de productos y definir las zonas más críticas que son necesarias en correcciones para evitar fallas. (Dassault systemes, 2017)

### **Análisis de modo efecto de falla**

AMEF, metodología que se basa en determinar todas las fallas posibles que tenga un producto, incluyendo las de diseño, las de manufactura, los vendedores y los usuarios finales de acuerdo a los usos adecuados e inadecuados que se le den a este producto. (SOLUTIONS, 2017)

### **Ingeniería Concurrente**

“La ingeniería concurrente se enfoca en que los desarrolladores de los productos tengan en cuenta todos los elementos del ciclo de vida del producto, abarcando desde el diseño conceptual, hasta su introducción al mercado, incluyendo calidad, costo y necesidades de los clientes”. (PEÑA REYES & CERVANTES CABELLO, 2015)

### **Ingeniería Inversa**

“La Ingeniería Inversa es el proceso de diseñar un sustituto, el cual reemplace de forma aceptable a un producto o parte. En este caso, Ingeniería Inversa es un caso particular de rediseño que se fundamenta en diversos aspectos del producto original y en el análisis de un ejemplar y se aplica cuando el proceso de diseño o la documentación original no está disponible. La Ingeniería Inversa consiste en obtener la geometría completa de una pieza real, sin necesidad de sus planos técnicos. Se trata de adaptarla a los sistemas CAD/CAM/CAE para que, una vez integrada en estos sistemas, se pueda obtener rendimiento de todas las operaciones que se ofrecen: modelado, mecanizado y análisis. Es también un proceso de duplicación de objetos, sin la ayuda de su documentación técnica que contiene las especificaciones de diseño y fabricación.” (MONTOYA QUEZADA & JIMÉNEZ, 2013)

## Nuevas tecnologías

Son las que se van generando en el día a día de nuestros tiempos, así como aquellas que se actualizando a los tiempos modernos y sirven para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto de innovación, computadoras, impresoras 3D, sistemas, filosofías tecnológicas, entre otras.

## Contenido

Cabe destacar que existen otra gran cantidad de metodologías diversas que se pueden integrar a esta metodología. Y algunas que todavía no se conocen. En la primera sección se establece como a través del tiempo se han tenido; Usos de la reingeniería anteriormente; sin que se identificarla como tal aun. En la segunda sección tenemos; El uso de ingeniería concurrente y como metodología para el diseño de productos por reingeniería y definir quienes trabajan en el proyecto La tercera sección se define los requerimientos del proyecto por QFD y TRIZ y si existen soluciones similares en otras áreas del conocimiento para proyecto de diseño de productos. La cuarta sección realizamos los cálculos matemáticos iniciales para los bosquejos CAD preliminares. En la cuarta sección se realiza por medio de modelado matemático con FEA e ingeniería inversa por medio de CAD-CAM1-CAE-CFD-AMEF, el diseño del producto con simulaciones. En la sección de resultados se obtiene el producto final y sus limitaciones de uso para la manufactura CAM2. En la última sección se dan las conclusiones.

## Objetivo general

Implementar la metodología de reingeniería de procesos en el diseño de productos.

## Justificación

Se justifica porque en las empresas e instituciones, al momento de trabajar con expertos de diferentes áreas del conocimiento, cada uno trae sus propios estándares y muchas veces tienen que trabajar en equipos multidisciplinarios, por lo cual es necesario dar una solución en el diseño de un producto realizando solamente un mejora, sino reinventarlo desde el principio; obteniendo un nuevo producto innovador que salga a los mercados y totalmente certificado desde diversas áreas del conocimiento y diversos usos.

## Hipótesis

Es posible utilizar varias herramientas de mejora continua, modelado e ingeniería asistidos por computadora, así como bases matemáticas para realizar un diseño de productos y donde todas aporten para tener un producto más integral desde diversos tipos de áreas del conocimiento y para su manufactura posterior.

## Metodología

Primero se define cual es el producto a diseñar; De una forma concurrente diferentes expertos que pueden intervenir en el desarrollo del proyecto para diseñar un producto. Se determinan los alcances de acuerdo al tamaño del proyecto; mencionando que a veces el problema puede ser grande y la solución pequeña o viceversa. Ver figura 1. Siendo de relevancia esto último: porque la playera puede quedar grande o puede quedar pequeña. Lo idea es saber que las tecnologías funcionan igual y es necesario adaptar las nuevas tecnologías con los sistemas tradicionales y de acuerdo al tamaño más adecuado de las capacidades de cada proyecto, empresa, diseño entre otros.





**Figura 1** Analogía de problema grande y solución pequeña o viceversa  
**Fuente:** (CONEJO, 2017)

Se usa QFD para determinar cuáles son las variables principales que tenemos que de acuerdo a los requerimientos del cliente. Algunos de los cuales pueden ser:

- Material
- Forma
- Tamaño
- Acabado
- Peso
- Costo
- Función
- Tendencias

El TRIZ es usado para identificar productos o soluciones posibles existentes en algún campo de la ciencia al proyecto planteado; que cumplan con los requerimientos de QFD, se realizan con la información anterior los primeros bosquejos y cálculos matemáticos necesarios, y definir un diseño inicial en CAD. Con la ingeniería inversa se define el Modelo CAD; se realizan análisis CAE con parámetros matemáticos por medio de FEA iniciales; implementando análisis CFD de ser necesario. Para mejorar el diseño del proyecto realizamos los prototipos iniciales con CAM1 y con las nuevas tecnologías; como impresoras 3D y CNC.

Y con los resultados anteriores realizar un AMEF del producto; para ver sus posibles problemáticas para definir los límites y manuales de uso.

### Usos de la reingeniería anteriormente: Caso Rueda

Por medio del tiempo se han visto las diversas evoluciones de la rueda y como con aspectos tecnológicos de cada periodo de tiempo ha ido evolucionando Figura 2



**Figura 2** Usos de la rueda Egipto  
**Fuente:** (PINO, 2017)

En el uso de molinos de agua, para mover ruedas de piedra y moler semillas para crear harinas.



**Figura 3** Rueda en el los molinos  
**Fuente:** (LA VERDAD, 2017)

Pero principalmente se ha utilizado la rueda en el transporte de vehículos y actualmente les se llaman llantas, que tecnológicamente han cambiado de acuerdo a su uso.

Se comienza comentando que las ruedas de carrozas, carretas, los primeros automóviles, las primeras bicicletas; por mencionar algunos ejemplos; eran de madera totalmente con algunos remaches de metal, posteriormente se utilizaron llantas con piezas metálicas; bastante resistente pero transmitían muy fuertemente las vibraciones al vehículo; luego con la tecnología del descubrimiento de los cauchos y polímeros ingenieriles se comenzaron a utilizar llantas de caucho solidas que mejoraron el desempeño de las mismas; después se integró las llantas que se podían inflar con aire y actualmente las que no requieren aire. Ver figuras 4, 5, 6, 7 a continuación. (SOLUTIONS, 2017)



**Figura 4** Llanta de carreta de madera  
*Fuente: (pzaxe, 2017)*



**Figura 5** Llanta de caucho solido con rin de plástico  
*Fuente: (BAIVE, 2017)*



**Figura 6** Llanta continental SportContact™6  
*Fuente: (CONTINENTAL, 2017)*



**Figura 7** Artículo “Reinventing the wheel: The airless tyre”  
*Fuente: (Inwood, 2017)*

Lo cual se deduce que se están utilizando grandes recursos tecnológicos para el diseño de nuevos tipos de llantas y es diseñando desde cero un nuevo modelo y poniendo como principal característica el que no tenga aire, pero que cumpla con los parámetros de una llanta totalmente funcional, para decir adiós a las pinchaduras. Y de esta manera se realiza la reingeniería de llantas; siendo este un ejemplo como muchos.

Dentro de la labor de investigación aplicada con el sector industrial se han realizado diversos tipos de desarrollos de esta manera, de los cuales ahora no podemos comentar por aspectos de confidencialidad y otros por estar en proceso de desarrollo y de patentamiento; que es otro de los aspectos que tenemos que tomar en cuenta para proteger los derechos patrimoniales de los nuevos productos.

De esta manera se entiende que cualquier producto ha tenido su evolución con el avance de las nuevas tecnologías; que no ayudan a lograr nuevos de productos por reingeniería.

Esto proceso de reingeniería y uso de nuevas tecnologías se puede realizar por tener dentro de la institución a expertos de diferentes áreas del conocimiento y donde todos aportan para un buen diseño de productos.

A continuación se analiza el caso de uso de la rueda, en un desarrollo sencillo donde se aplicó esta metodología de reingeniería.

Con las herramientas mencionadas Anteriormente, pero destacando que con los avances de nuevas tecnologías cada día hay nuevas herramientas y nuevas versiones de las herramientas de todos los ámbitos industriales y tecnológicos que se pueden usar dentro de esta metodología, porque lo principal es que la reingeniería nos dice que siempre hay nuevas formas de hacer los procesos.

Se analiza lo que está en boga con los niños y jóvenes actualmente, los llamados fidget spinner (rotador para personas inquietas o rotador que no para). Y que en México se le llama solo spinner (rotador), mostrado en la figura 8.



**Figura 8** Fidget Spinner básico

*Fuente:* (CONEJO, 2017)

### **El uso de ingeniería concurrente como metodología para el diseño de productos por reingeniería**

Se trabaja en grupo de profesionistas de diferentes áreas del conocimiento, 1 ingeniero industrial-mecánico, 1 ingeniera en sistemas computacionales, 1 diseñador industrial, 1 ingeniero mecánico 1 master en ingeniería-sistemas de manufactura y 1 ingeniero industrial eléctrico.

En curso de uso de nuevas tecnologías SolidWorks Básico y Manufactura Aditiva. Estando en un curso se decide realizar el diseño de estos rotadores.

Primero se define que los rotadores ya existen como juguetes para los mexicanos que mostramos en la figura 9.



**Figura 9** Rotadores mexicanos. Churumbela, pirinola, trompo, yoyo y pirinola de apuesta

*Fuente: (CONEJO, 2017)*

### Requerimientos del proyecto por QFD y TRIZ

El comentar de los Rotadores Mexicanos es por el TRIZ; por que en todas las culturas existen diversos juegos rotadores que entretiene, ruletas ruedas de la fortuna, hula-hula, etc.

Ya con la parte de QFD se determina cuáles son los requerimientos que tenga el rotador como son:

- Material del cuerpo principal
- Sistema de rotación.
- Material Contrapesos.
- Dimensiones de acuerdo al usuario.
- Indicaciones de seguridad y limitaciones de uso.

- Geometría del producto.

En el material del cuerpo se definen diferentes tipos que son:

- Acero.
- Polímeros.
- Aluminio.
- Madera.
- Cartón.

En el sistema de rotación se define cuáles son los diferentes tipos de sistemas:

- Eje plástico.
- Eje de madera.
- Eje metálico.
- Balero de bolas acero.
- Balero de bolas cerámicas.

En la parte de geometría y material de contrapeso es muy amplia y con una gran cantidad de combinaciones, haciendo más coleccionables estos productos. Figura 10



**Figura 10** Algunos tipos de spinner  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

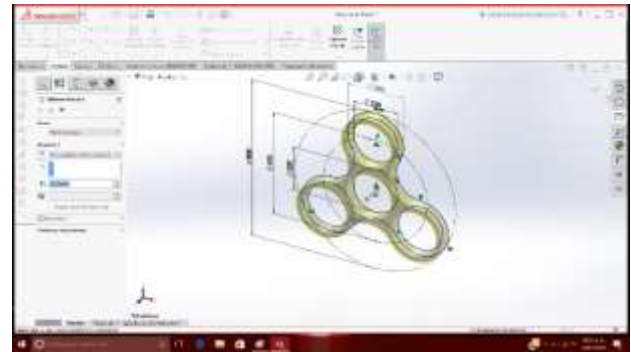
### Cálculos matemáticos y bosquejos CAD preliminares

En este proceso, no se realizan para este caso en particular cálculos matemáticos; se determina de inicio un análisis dimensional con instrumento para determinar las medidas que nos ayudaran en los primeros bosquejos CAD. Figura 11



**Figura 11** Inicio de análisis dimensional  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

Se genera el prototipo virtual con SolidWorks edición estudiantil 2015-1017, se graba el archivo CAD, ver figura 12



**Figura 12** Modelación CAD  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

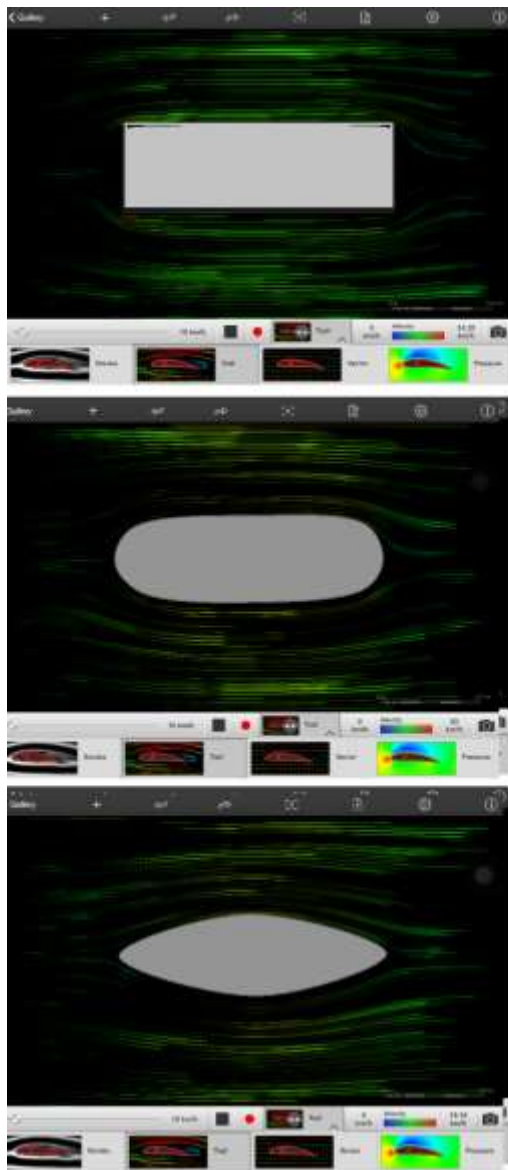
Para la parte de baleros se determina por el tipo de balero estándar de las medidas dimensionales. Y es elegido el balero central que cumple con la medida determinada anteriormente, ver de la figura 13.



**Figura 13** Baleros disponibles  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

### Modelado matemático con FEA e ingeniería inversa por medio de CAD-CAM-CAE-CFD-AMEF

Se realiza una ingeniería inversa con CFD y CAE simple. Y se muestra cómo afecta la geometría del perfil en rotación. Figura 14 se tiene una simulación básica de CFD del perfil de los alabes del rotador.



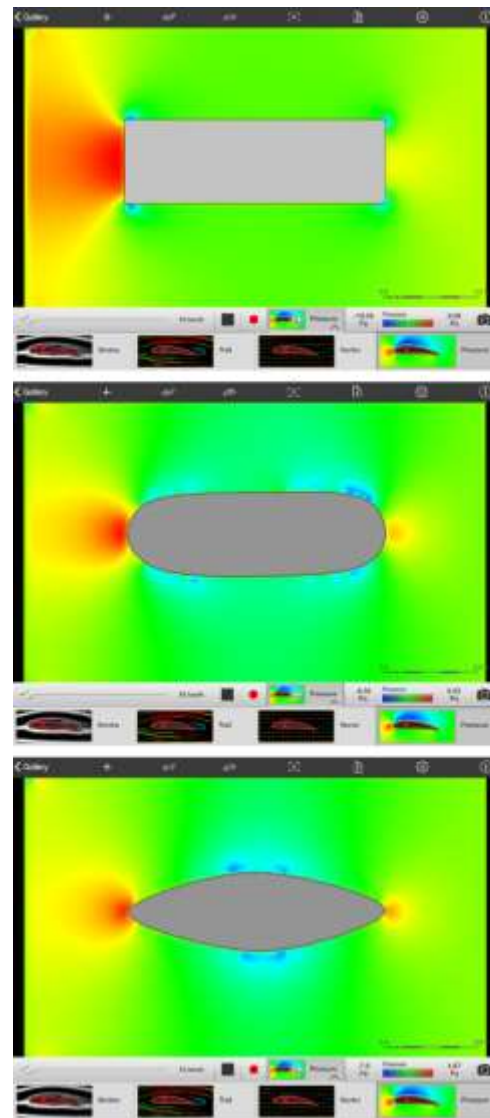
A

B

C

**Figura 14** CFD en perfil de alabes de rotador  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

En la figura 15 se ve que de acuerdo al CAE nos muestra que en cada perfil se hay diferentes tipos de resultados con las mismas condiciones y todo por el tipo de geometría.



A

B

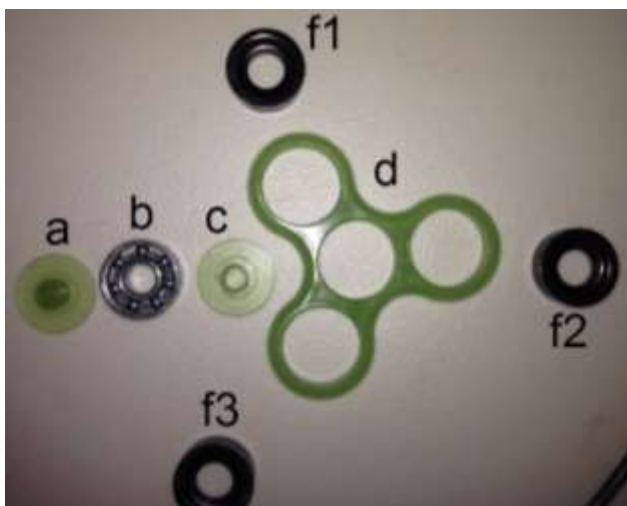
C

**Figura 15** CAE de perfiles  
*Fuente: (CONEJO, 2017)*

Se observa en las figuras anteriores que el perfil si afecta en la resistencia al girar en la simulación y la mejor opción es la C, pero de acuerdo a un análisis de AMEF tienen un peligroso filo, por lo que se elige la opción B.

Se procede de igual manera el análisis de los materiales para determinar que los más adecuados son los de aluminio y los de polímeros sin dejar de excluir los otros por costos.

También se analizan los componentes de un rotador comercial y mostramos a continuación sus piezas del rotador en la figura 16



**Figura 16** Piezas rotador a) tapa superior, b) balero, c) tapa posterior, d) cuerpo del rotador, f1, f2, f3) contrapesos

*Fuente: (CONEJO, 2017)*

Y continuando con el AMEF se determina que hay piezas pequeñas que se pueden remover y no es recomendable para niños pequeños, ni que se coloque en ningún orificio corporal por peligro de asfixia. Y deben tener vigilancia parental durante su uso.

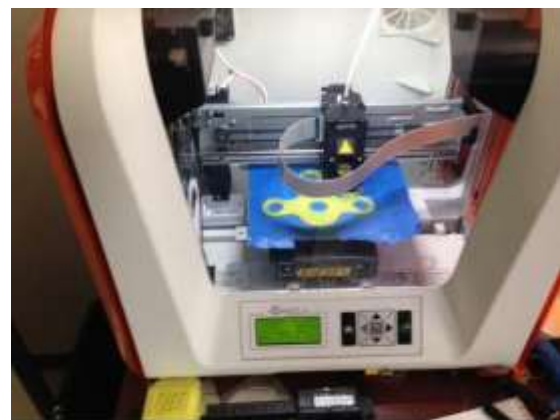
## Manufactura CAM2

En este caso se evalúa las formas de manufactura CNC (control Numérico por computadora) torno y fresado tradicional e impresora 3D, decide que la manufactura de un primer prototipo será con una impresora 3D de fácil manejo, para analizar el producto y realizar cambios pertinentes en el diseño para realizar un segundo prototipo aplicando la retroalimentación de todo lo anteriormente expuesto y crear un producto óptimo. Ver figuras 17, 18 y 19.



**Figura 17** Uso de software STL de la impresora, para iniciar el prototipo

*Fuente: (CONEJO, 2017)*



**Figura 18** Impresión 3D

*Fuente: (CONEJO, 2017)*



**Figura 19** Resultado de primer prototipo ensamblado con su balero seleccionado

*Fuente:* (CONEJO, 2017)

Particularmente con más tecnología se pueden realizar proyectos como el modelo iron-spinner de aluminio. Mostrado en la figura 20



**Figura 20** Iron-spinner

*Fuente:* (CONEJO, 2017)

Cabe mencionar que en la actualidad se tiene un proyecto de diseño de un generador de hidrogeno que se está desarrollando con reingeniería, pero por cuestiones de confidencialidad y posibilidades de patentamiento no se pueden mostrar en esta ocasión los resultados de dicha investigación, pero que buscamos informa como se usa la metodología con un ejemplo como el de los rotadores.

Como el trabajo que describe mediante técnicas de CAD, y la simulación de una PEMFC de hidrógeno diferentes geometrías propuestas de flujo de gases mediante técnicas de CFD, para establecer una metodología de trabajo que permita el estudio sistemático de la influencia de las distintas variables de operación en el rendimiento de la pila. Para ello se analizará un modelo 3-D de pila PEMFC, acoplando fluido dinámica (CFD; ANSYS versión 14.5 y procesos específicos de transporte y reacciones electroquímicas en una PEMFC. (ZAMORA-ANTUÑO, 2016)

Por otro lado; El Manual de Oslo, 3ª Edición define a la innovación como la introducción de un nuevo o significativamente mejorado, producto (bien o servicio), de un proceso, de un nuevo método de comercialización o de un nuevo método organizativo, en las prácticas internas a la empresa, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores. Debido al cambio, a la nueva cultura de consumo, y a las tecnologías que se disponen (MENDEZ, RODRÍGUEZ, & DÍAZ, 2016)

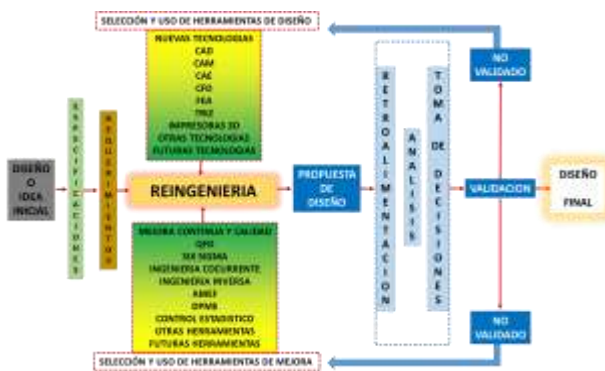
## Resultados

Las fortalezas Resolver problemas diversos y generar soluciones, Aplicando reingeniería; pasos:



- Tener el diseño o idea inicial
- Conocer especificaciones y requerimientos.
- Seleccionar herramientas de mejora y calidad a usar.
- Seleccionar herramientas de diseño a usar.
- Realizar propuesta de diseño.
- Retroalimenta, analizar y toma de decisiones con el diseño propuesto.
- Validación: no validado retornamos a definir la selección de herramientas de diseño o de mejora y calidad; continuamos con el proceso otra vez.
- Validación: si validado se realiza diseño final.

Ver figura 21.



**Figura 21** Esquema Metodología de Reingeniería en el diseño de un producto  
 Fuente: (CONEJO, 2017)

La reingeniería ayuda a buscar soluciones diferentes en los campos de las ciencias y tecnologías actuales, que resuelvan problemas diversos y generar soluciones particulares por esta metodología para el diseño de productos, sin modificar su funcionalidad, más bien mejorarla y optimizarla, obteniendo una metodología flexible de acuerdo al tipo y tamaño de empresa institución o capacidad de cada individuo que la utilice y con una mente abierta para hacerlo de una o varias maneras diferentes.

**Agradecimientos**

Se agradece al Tecnológico Nacional de México por financiar la investigación y a unidad Instituto Tecnológico de Morelia; para dar las facilidades en la investigación del uso de la reingeniería como metodología de diseño de productos.

También agradezco a mi equipo trabajo multidisciplinario y decirles vamos Bien. A la empresa Ser SA de CV, sede Morelia, por darnos el objeto de esta investigación.

A los autores de ecorfan por servirme de referencia para saber cómo escribir un artículo Y a los revisores por hacerme entender que siempre se debe perfeccionar lo que uno realiza.

**Conclusiones**

- La reingeniería de procesos se puede adaptar para el diseño y rediseño de productos de todas las áreas del conocimiento.
- Es importante saber que se deben olvidar lo ya hecho para iniciar desde cero y buscar una nueva forma de hacer las cosas, evitando en caer en los mismos errores de nada mas copiar.

- Hay muchas herramientas de los procesos de mejora continua y calidad; y nuevas tecnologías que se debe aprender a adaptar y seleccionar de acuerdo a la capacidad y necesidad de cada proceso de diseño de productos.
- Las empresas requieren se integre con las instituciones por tener más personal multidisciplinario para así desarrollar mejores investigaciones y con opciones de bajar recursos para el desarrollo de nuevos productos innovadores.
- Se tiene que tener una mente flexible a tener soluciones por diferentes metodologías y que todas sean correctas o no.

## Referencias

- Cahue Díaz, D., & Camacho Arriaga, J. C. (ENERO de 2014). Diseño óptimo de un disipador de calor para la luminaria LED mediante moderación modelación computacional. *Recibe*, 3(1), 1-16. (D. A.
- Negrón, Ed.) GUADALAJARA, JALISCO, MÉXICO: CUCEI UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA. Recuperado el 28 de 07 de 2017, de <http://recibe.cucei.udg.mx/Recibe/index.php/Recibe/article/view/25/37>
- CHAMPY, M. H. (2005). *REINGENIERÍA, Olvide lo que usted sabe sobre cómo debe funcionar una empresa. ¡Casi todo esta errado!* (M. D. G., Ed., & J. C. NANNETTI, Trad.) BOGOTA, COLOMBIA: NORMA. Recuperado el 28 de julio de 2017
- LORENZO, S., MIRA, J., OLARTE, M., GUERRERO, J., & MOYANO, S. (15 de mayo de 2004). Analisis matricial de la voz del cliente: QFD aplicado a la gestión sanitaria. *Gac. Sanitaria {online}*, 18(12), 464-471. Recuperado el 28 de 07 de 2017
- MONTOYA QUEZADA, M. N., & JIMÉNEZ, L. E. (JUNIO de 2013). ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA INTEGRACIÓN DE LA INGENIERÍA INVERSA, EL CAD Y LOS PROTOTIPOS RÁPIDOS. *TESIS*. CDMX, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO: UNAM. Recuperado el 28 de 07 de 2017, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6450/tesis.pdf?Sequencia=1>
- PEÑA REYES, V. L., & CERVANTES CABELLO, J. J. (MARZO de 2015). TENDENCIAS DE LA MANUFACTURA. *TESIS*. CDMX, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO: UNAM. Recuperado el 28 de 07 de 2017, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7>
- ALBITER RODRÍGUEZ, G., TORRES RICO, L., & GARCIDUEÑAS ORTEGA, G. (2016). DISEÑO Y ANÁLISIS CAD/CAE EN ALA DE AERONAVE BAJO RÉGIMEN SUBSÓNICO. *Pistas Educativas*, 38(121). Recuperado de <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/533/575>
- Manual CAD de solidworks 2016-2017. Dassault systemes
- Manual CAE de solidworks 2016-2017. Dassault systemes

Manual CFD de solidworks 2016-2017. Dassault systemes.

Manual impresora 3D, xyzprinting Jr. 1.0

ZAMORA-ANTUÑANO, Marco, OLIVARES-RAMÍREZ, Juan, RAMÍREZ-BALTAZAR, José, SANTOSCRUZ, José y OROZCO-GAMBOA, Germán. Simulación de platos colectores para su aplicación en celas de combustible Tipo PEM. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-8: 70-77

MENDEZ, José, RODRIGUEZ, Lisandro y DIAZ, Eyran. Diseño de máquina especial para barrenado de precisión a cuatro posiciones. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2016. 3-7: 8-14

HORNILLA, Mario, JUÁREZ, Carlos y MARTÍNEZ, Irma. Diseño e implementación de colorímetro para la clasificación de tela por tonalidad en su proceso final de fabricación. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 1-8

JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS FARFÁN, Christian. Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 9-25

BAIVE. (2017). [Http://www.wheelbarrow-wheel.es](http://www.wheelbarrow-wheel.es). Obtenido de <http://www.wheelbarrow-wheel.es/2-8-solid-wheel.html>

CONTINENTAL. (2017). [Https://www.continental-tires.com](https://www.continental-tires.com). Obtenido de <https://www.continental-tires.com/car/tires/car/summer-plt/sportcontact-6>

LA VERDAD. (2017). [Http://servicios.laverdad.es](http://servicios.laverdad.es). Obtenido de LA VERDAD:

[http://servicios.laverdad.es/murcia\\_agua/cap8.5.htm](http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/cap8.5.htm)

Pzaxe. (2017). *123RF*. Obtenido de [https://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/rueda\\_de\\_carreta.html](https://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/rueda_de_carreta.html)

PINO, F. (2017). [Https://patentscope.wipo.int](https://patentscope.wipo.int). Obtenido de VIX INC.: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4239/como-construyeron-las-piramides-de-egipto> SOLUTIONS, LEAN 2017, [www.leansolutions.co](http://www.leansolutions.co)

SERIE DE FIGURAS DEL AUTOR DEL ARTÍCULO Gilberto Daniel conejo magaña. 2017

## Sistema de medición de la calidad de suministro eléctrico para planta solar fotovoltaica

AQUINO-ROBLES, José Antonio\*†, FERNÁNDEZ-NAVA, Cecilia, y CORONA-R., Leonel G.

*Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional UPIITA IPN*

Recibido 6 de Enero, 2017; Aceptado 9 de Marzo, 2017

### Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y validación de un sistema de medición de calidad de suministro eléctrico para planta fotovoltaica. En esta investigación se utilizó un sistema embebido (NI CompactRIO 9074). Mismo que fue programado en LabVIEW. El sistema es autónomo para adquirir y procesar las señales del inversor, calculando y almacenando la información generada, en la NI CompactRIO. Comparándola con los parámetros básicos normalizados que son considerados en la medición de la calidad de la energía a nivel internacional. El proceso para el desarrollo de este equipo, comienza con el conocimiento y las habilidades adquiridas mediante estancias de investigación en el Instituto Nacional de electricidad y energías limpias y culmina con la implementación de un equipo que permite flexibilidad en su programación y escalamiento en su sistema de monitoreo. A ese respecto se busca que el sistema tenga la capacidad de registrar eventos, y cuando se desee, descargar y analizar los datos registrados con opción a crear informes a través de una interfaz gráfica. Brinda también la función de osciloscopio en línea, con ello pudiendo visualizar las señales y sus parámetros en una computadora personal.

**Calidad del suministro eléctrico, medidor de calidad del suministro eléctrico, Instrumentación virtual, Energías renovables**

### Abstract

This paper presents the design, implementation and validation of a system of measurement of quality of electricity supply for photovoltaic plant. In this research, an embedded system (NI CompactRIO 9074) is used. Same as it was programmed in LabVIEW. The system is autonomous to acquire and process the signals of the inverter, calculating and storing the generated information, in the NI CompactRIO. Comparing it with the basic standard parameters that are considered in the measurement of quality power. The process for the development of this object begins with the knowledge and a skill acquired through research stays at Instituto de Investigaciones en Electricidad y Energías Limpias and culminates with the implementation of object that allows flexibility in its programming and scaling in its system of Monitoring. In this regard, it was sought that the system has the ability to record events, and when desired, download and analyze the recorded data with the option to create reports through a graphical interface. It also provides the online oscilloscope function, allowing you to view the signals and their parameters on a personal computer.

**Power quality, power quality measurements, virtual instrumentation, renewable energies**

**Citación:** AQUINO-ROBLES, José Antonio, FERNÁNDEZ-NAVA, Cecilia, y CORONA-R., Leonel G. Sistema de medición de la calidad de suministro eléctrico para planta solar fotovoltaica. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 53-73

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

El consumo de la energía eléctrica, salvo por contadas excepciones, no ha dejado de crecer y en la actualidad se está viviendo una nueva revolución con la automatización digital de los procesos y el sector eléctrico lo está aprovechando para evolucionar hacia una red eléctrica inteligente. Para que la red eléctrica sea inteligente, necesita que se apliquen tecnologías, herramientas y técnicas, muchas de ellas ya disponibles en otras aplicaciones industriales, que ayuden a obtener mayor información y conocimiento de la red para que esta sea más eficiente y responda rápidamente a cambios de carga y de gestionar con ello la generación. En México existe la norma (CFE-G0100-04) que contribuye a la evolución del sistema eléctrico, bajo dicha norma se han conectado y se conectarán los que decidan interconectarse a la red eléctrica nacional mediante sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, esto provocará llegado su momento una congestión en la generación de energía eléctrica, resultado de que el pico de generación eléctrica no coincida con la curva de demanda máxima, afectando la calidad de la energía.

La calidad del suministro eléctrico engloba a la continuidad del servicio eléctrico, como la calidad del producto, esto es la forma de la onda senoidal y la frecuencia (Saucedo & Taxis 2008).

Con el fin de corroborar los principales parámetros de la calidad de la energía o producto, es necesario considerar un sistema de medición para un convertidor electrónico, también conocido como inversor, interconectado a la red que esté expuesto ante las siguientes perturbaciones:

- Desbalance en la carga (conexión de diferentes niveles de cargas monofásicas en el inversor).

- La cantidad de distorsión armónica que produce su funcionamiento.
- La conexión de cargas no lineales monofásicas.
- La conexión de cargas predominantemente inductivas
- La conexión de cargas predominantemente capacitivas
- Respuesta del inversor antes perturbaciones externas en la red como:
- Depresiones de tensión
- Variaciones lentas de tensión
- Escalones de tensión que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en sentido positivo, como negativo
- Cortes breves.

Existen analizadores de la calidad de la energía que monitorean las variables eléctricas para conocer si la inyección de energía a la red de distribución no compromete o degrada la seguridad de la misma, sin embargo, dichos dispositivos no presentan flexibilidad a cambios de hardware y software (Luna Valdes, 2007).

A ese respecto el marco regulatorio de la todavía compañía suministradora tradicional de energía eléctrica, necesita que un sistema interconectado a la red trabaje con parámetros estables y rangos definidos, para no afectar el funcionamiento general del sistema eléctrico (CFE-G0100-04), debido a esto, es necesaria la intervención de un sistema de monitoreo que permita conocer el correcto funcionamiento de los inversores y proporcionar información para un futuro análisis de la calidad del suministro. En la actualidad, es necesario contar con información en tiempo real del funcionamiento de la red eléctrica, así como el registro de datos para la toma de decisiones, permitiendo un rápido análisis o la detección previa de problemas potenciales y la minimización del impacto de un fallo.

La finalidad de este sistema es almacenar dicha información de manera oportuna, autónoma, y posteriormente visualizarla para efectuar un análisis y remediar el problema.

Los medidores de calidad de la energía que pueden llegar a cumplir con parte de los objetivos planteados, están diseñados para algunas aplicaciones en específico y mientras la demanda de energía se incrementa, los parámetros de calidad de la misma serán más estrictos, lo que implica el reemplazo del dispositivo por alguno más novedoso. Debido a lo anterior y a los gastos que esto podría conllevar, el uso de sistemas reprogramables como la NI CompactRIO muestra una de las grandes ventajas (Monroy, 2006).

Las necesidades, aplicaciones y requerimientos durante la elaboración del sistema de pruebas pueden variar, y la instrumentación virtual es flexible para crear soluciones propias.

Se puede adaptar un instrumento virtual a las necesidades particulares sin necesidad de reemplazar todo el instrumento dado que posee el software de aplicación instalado en la computadora y un amplio rango disponible de hardware para instalar en ella (Fernandez, 2003).

Utilizando soluciones basadas en la instrumentación virtual, se puede desarrollar sistemas y realizar su mantenimiento al mismo tiempo, mejorando el tiempo de comercialización y la calidad del producto. La productividad del software de instrumentación virtual es tal que incluye el conocimiento de la integración del hardware diseñado para crear ensayos, mediciones y control de sistemas, el software de instrumentación virtual incluye una extensa funcionalidad para entradas y salidas prácticamente de cualquier tipo.

LabVIEW posee bibliotecas listas para ser utilizadas con el objeto de integrar instrumentos autónomos, equipos de adquisición de datos, productos para el control de movimientos y de visión, lo cual permite construir una solución completa de medición y automatización (NI corp 2003).

### Proceso de Diseño

El sistema desarrollado en este proyecto es capaz de adquirir, analizar y proveer información de las señales de tensión e intensidad de salida de un inversor solar fotovoltaico.

A través del módulo de entradas analógicas NI 9205 conectado a la NI CompactRIO, se realiza la adquisición de las señales, sin embargo, estas deben ser acondicionadas empleando transformadores de potencial y corriente para adquirirlas cumpliendo con los requerimientos del módulo NI 9205. Para interpretar los datos que lee este módulo, se ejecuta un instrumento virtual en el módulo FPGA integrado al chasis de la NI CompactRIO, que adquiere muestras a una frecuencia específica, la cual es calculada en base al teorema de Nyquist. Los datos adquiridos por medio del módulo FPGA son trasladados al controlador en tiempo real de la NI CompactRIO a través de un buffer de comunicación para su procesamiento. El resultado de ejecutar ambas tareas (adquisición y procesamiento) es la obtención de los parámetros:

- Fases de la señal de tensión e intensidad.
- Frecuencia fundamental de la onda de tensión e intensidad.
- Valor eficaz de las ondas de tensión e intensidad.
- Distorsión armónica de las ondas de tensión e intensidad.
- Potencia activa.
- Potencia reactiva.
- Factor de potencia.

Posteriormente, con base a la norma CFE-G0100-04, se identifica el momento en que los parámetros incumplen dicha norma y son almacenados en el disco duro de la NI CompactRIO.

El usuario tiene 2 opciones para la visualización de la información que es generada por la NI CompactRIO:

### Interfaz gráfica

Esta interfaz extrae mediante el protocolo TCP/IP los datos generados en la NI CompactRIO y almacena una copia en la PC del usuario, estos archivos son decodificados para tener una visualización de gráficos y los parámetros calculados y posteriormente generar informes de prueba en Excel.

### Osciloscopio en línea

Ofrece la visualización de gráficos y parámetros.

### Procesamiento de las señales de tensión e intensidad

Se realizó un algoritmo destinado a la adquisición de las señales eléctricas en el módulo FPGA y otro encargado del procesamiento de dichas señales implementado en el módulo *Real-Time*; ambos algoritmos son dependientes uno del otro comunicándose a través de variables generadas en la FPGA y empleadas en *Real-Time*. Los códigos se implementaron mediante programación gráfica en la plataforma y entorno de desarrollo NI LabVIEW.

Con el fin de obtener 512 muestras (2<sup>9</sup>) de un ciclo de 60 Hz se calculó la frecuencia de muestreo a la que debe adquirir la NI CompactRIO.

$$T_s = \frac{1}{60 \text{ Hz} * 512 \text{ muestras}} = 32.5083 \mu\text{s} \quad (1)$$

$$F_s = \frac{1}{T_s} = 30.72 \text{ kHz} \quad (2)$$

Trabajando a una frecuencia de muestreo de 30.72 kHz, se cumple con lo establecido por el teorema de Nyquist. El cual manifiesta que:

Una muestra de la señal de tensión es adquirida por el canal AI0 del módulo NI 9205 y la señal de corriente por el canal AI1.

El algoritmo para el cálculo de la frecuencia, amplitud y ángulo de fase de cada armónico se realizó mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Al aplicar el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier a las señales de tensión y corriente muestreadas, arroja como resultado vectores complejos que contienen el espectro de cada señal, del cual se obtienen los vectores de magnitud (vMagnitud) y de ángulo de fase (vFase). En el vector de magnitud se encuentra la componente sinusoidal fundamental de la señal en la frecuencia más baja y con la amplitud mayor, es menester la obtención del índice (indFrecFun) que contenga dicha amplitud.

La extracción de los datos requeridos para el cálculo de la amplitud, ángulo de fase y frecuencia, necesita del índice de la componente sinusoidal fundamental, pues cada una de las armónicas que componen la señal se localiza en un múltiplo entero  $k$  de la frecuencia fundamental, sin embargo, éstas podrían oscilar, por lo que se estableció un rango de tolerancia de  $\pm 12$  Hz para que sea considerada como una armónica de la señal. El siguiente análisis muestra como se establece dicho rango:

$$\text{ind2frec} = \frac{f_s}{L} = \frac{30721.96621}{8191} = 3.75069 \quad (3)$$

$$\text{indFrecFun} = \frac{f_0}{\text{ind2frc}} = \frac{60 \text{ Hz}}{3.75069} = 15.997 \quad (4)$$

$$\text{Ind}_{1 \text{ Hz}} = \frac{1 \text{ Hz}}{3.7506978} = 0.266617 \quad (5)$$

$$\text{tolerancia} = \pm 12 * 0.266617 = \pm 3.1994046 \quad (6)$$

Donde:

$f_s$ ; es la frecuencia de muestreo en Hz

$L$  muestras procesadas por la FFT

$\text{indFrecFun}$ ; índice del vector de magnitud donde se encuentra la amplitud de la frec. fund.

$f_0$  frecuencia fund. ideal de la red eléctrica.

$\text{Ind}_{1 \text{ Hz}}$ ; índice donde se encuentra la amplitud de la frecuencia de 1 Hz

$\text{tolerancia}$ ; intervalo superior e inferior que se le asignará al índice que contiene la amplitud de la armónica.

Por ejemplo, si una señal sinusoidal de 60 Hz con amplitud de  $179 V_p$  contiene la armónica número 5 con una amplitud de  $3 V_p$ , el índice en el que se encontraría la amplitud de ésta armónica es 80, pero las señales que se adquirirán no serán puras y la frecuencia de la armónica será diferente a  $f_0 * k$ , provocando que su amplitud se localice en un índice no conocido, por esta razón, se debe realizar un barrido del vector (vArmonicos) en el rango de  $80 \pm \text{tolerancia}$  (Hart, 2001).

$$\text{vArmonicos} = 80 \pm 7 = [73:87] \quad (7)$$

Se consideró que una armónica existe si y solo si la amplitud es mayor o igual a  $0.1 V_p$ , obteniendo así su respectivo índice ( $\text{indArmEspectro}(k)$ ).



El valor de  $0.1 V_p$  introduce una distorsión armónica individual de 0.02793%, y suponiendo que las 49 armónicas restantes existieran con el mismo porcentaje, la distorsión armónica total (DAT) resultaría de 0.195530%, por lo que armónicas con amplitudes inferiores a  $0.1 V_p$  pueden ser discriminadas, ya que el porcentaje límite establecido por la norma CFE-G0100-04 de la distorsión armónica total debe ser 8%.

La frecuencia fundamental y la frecuencia de cada armónica se calculan mediante las siguientes relaciones:

$$f_0 = indFrecFun * ind2frec \quad (8)$$

$$f_k = ampArmEspectro(k) * ind2frec \quad (9)$$

$$f_0 = 16 * 3.75069 \approx 60 \text{ Hz} \quad (10)$$

$$f_k = 80 * 3.75069 \approx 300 \text{ Hz} \quad (11)$$

El ángulo de fase en radianes de la frecuencia fundamental es obtenido a partir del valor extraído en el índice *indFrecFun* del vector de fase (*vFase*), a este valor se le suma  $\pi/2$  y se multiplica  $180/\pi$  para visualizar el resultado en grados.

$$anguloAmpReal(1) = \left( vFase(indFrecFun) + \frac{\pi}{2} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (12)$$

Posteriormente, para el cálculo de distorsión armónica es necesario obtener el ángulo de fase en cada armónica y éste se calcula de manera similar al de la frecuencia fundamental.

$$anguloAmpReal(k) = \left( vFase(indArmEspectro(k)) + \frac{\pi}{2} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (13)$$

El valor de las amplitudes de cada armónica (*ampArmonico* (*k*)) en el espectro de la señal resultado de aplicar la Transformada Rápida de Fourier Rápida mantiene la siguiente relación:

$$ampArmonico(k) = ampArmReal(k) * \frac{N}{2} \quad (14)$$

El análisis de la amplitud de la señal de entrada (*ampArmonico* (*k*)), necesita un factor de  $1/2$ , ya que el espectro está compuesto por una parte negativa y otra positiva que contienen casi la misma información. En la parte positiva se puede encontrar la componente en directa de la señal, necesaria para cálculos posteriores, por lo que en esta sección del espectro es en la que nos enfocaremos. Sin embargo, las amplitudes que se desean conocer son las de la señal original, por lo que *ampArmReal* debe ser despejada.

$$ampArmReal(k) = ampArmonico(k) * \frac{2}{N} \quad (15)$$

El sistema diseñado trata con señales conocidas como señales “distorsionadas”, o que en la composición de la señal existen armónicos de orden superior al armónico fundamental. El cálculo del “valor eficaz total” de una señal distorsionada implica la raíz cuadrática de la suma del valor rms elevada al cuadrado de cada uno de los armónicos existentes y de la componente en directa (*dirTension*), elevado al cuadrado (Rashid, 2004).

$$rmsTension = \sqrt{dirTension^2 + \sum_{n=1}^k \left( \frac{ampArmT(k)}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (16)$$

En ese mismo contexto una señal sinusoidal distorsionada es aquella que está compuesta por el armónico fundamental y el aporte de armónicos de orden superior. La amplitud de cada uno de los armónicos se refleja en el porcentaje de distorsión de la señal, debido a esto, el cálculo de la distorsión de cada uno de los armónicos de orden  $k$  se realizará de la siguiente manera:

$$disXArmT(k) = \frac{rmsArmT(k)}{rmsArmT(1)} * 100 \quad (17)$$

$$disXArmC(t) = \frac{rmsArmC(k)}{rmsArmC(1)} * 100 \quad (18)$$

La distorsión armónica total (DAT) de la señal, está compuesta por la distorsión de cada uno de los armónicos calculados, a pesar de esto, la DAT no puede ser calculada como una suma algebraica directa, debido a que los coeficientes de la serie de Fourier pueden ser positivos o negativos. El cálculo de la distorsión armónica total se realiza de la siguiente manera:

$$DAT_T = \sqrt{\sum_{n=2}^k disXArmT(n)^2} \quad (19)$$

El ángulo de desfasamiento ( $desfase(k)$ ) se calcula con la diferencia entre el ángulo de fase de la frecuencia fundamental de la señal de tensión y el ángulo de fase de la señal de corriente en cada armónica.

La potencia activa (P) se calcula:

$$P = rmsArmT \times rmsArmC \times \cos(desfase(k)) \quad (20)$$

La potencia reactiva (Q) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q = rmsArmT \times rmsArmC \times \sin(desfase(k)) \quad (21)$$

La potencia aparente (S) es:

$$S = rmsTension \times rmsCorriente \quad (22)$$

y el factor de potencia (fp) es:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (23)$$

donde:

$rmsArmT$ ; valor eficaz de la señal de tensión

$rmsArmC$ ; valor eficaz de la señal de corriente

$desfase$ ; ángulo de desfasamiento entre las señales de tensión y corriente.

Así mismo, la norma de Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de Sistemas fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW establece que, para no afectar el funcionamiento de la red eléctrica, la frecuencia de la señal de tensión debe encontrarse en el rango de 59.2 Hz a 60.8 Hz. Si la frecuencia fundamental se encuentra fuera del rango establecido, será información que se almacenará en una base de datos, caso contrario continuará la ejecución del programa realizado. La misma norma señala que para no alterar la red eléctrica la tensión eficaz, debe permanecer en un rango de  $\pm 10\%$ . Si la tensión eficaz se encuentra fuera del rango establecido, será información que se almacenará en una base de datos, caso contrario continuará la ejecución del programa. Si la distorsión por armónica THD o DAT tiene un porcentaje mayor a 8%, el valor será almacenado en la base de datos, de no ser así el programa continuará su ejecución.

La norma también indica que el factor de potencia debe ser mayor a 0.9. Si el factor de potencia es menor, el valor será almacenado en la base de datos, de no ser así el programa continuará su ejecución. La base de datos es necesaria para almacenar información adquirida durante el funcionamiento del sistema de medición de variables. Los datos serán guardados en un archivo de texto cifrado (.txt), generado y guardado de manera autónoma en el disco duro de la NI CompactRIO. El archivo contiene la información necesaria para reconstruir la señal de tensión y corriente, los parámetros eléctricos calculados y alarmas.

### Implementación

En el apartado anterior se describieron los requerimientos y el diseño del sistema para el acondicionamiento de la señal se utilizó un transformador de potencial, el cual se muestra en la Figura 1. Cuyo cálculo detallado fue realizado por (Illescas, Osorio & Tokunaga, 2015).



**Figura 1** Transformador de tensión para acondicionamiento de la señal  
*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

El transformador reduce una tensión de 120 v con frecuencia de 60 Hz a 5 v. En el primario tiene 1200 vueltas y en el secundario 50 vueltas, ambas de alambre de cobre (Oliva, 1994). El acondicionamiento de la señal de corriente se hizo con el sensor de corriente C-CT-10. (Illescas et al, 2015), dan mayores detalles de sus especificaciones.

El circuito para amplificar la salida del C-CT-10 ver Figura 2, es alimentado con la fuente de la cRIO a 24 v, con un divisor de tensión se obtienen -12 v y 12 v para que opere el amplificador de instrumentación AD620AN.



**Figura 2** Circuito Amplificador  
*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

La adquisición de las señales se realiza a través del módulo de la NI 9205 que se empotra al chasis de la NI CompactRIO. El sistema integrado NI CompaqRIO-9074 combina un controlador industrial en tiempo real y una FPGA, también cuenta con un chasis industrial para aplicaciones de control y monitoreo.

La NICompactRIO-9074 ver Figura 3, cuenta con las siguientes características:

- FPGA Spartan-3 2M
- Hasta 2M de compuertas
- 8 slots para módulos I/O
- Procesador de hasta 400 MHz en tiempo real
- Hasta 256 MB de memoria DRAM, 512 MB de almacenamiento no volátil
- 2 puertos Ethernet 10/100BASE-TX
- Puerto serial RS232

Alimentación de 19 a 30 VDC



**Figura 3** NI CompactRIO 9074

**Fuente:** (Illescas et al, 2015)

El *NI 9205* es un módulo de la serie C, para usarse con chasis NI CompactDAQ y *CompactRIO*. Cuenta con 32 entradas de una sola terminal o 16 entradas analógicas diferenciales, resolución de 16 bits y velocidad máxima de muestreo de 250 kS/s. Cada canal tiene rangos de entrada programables de  $\pm 200$  mV,  $\pm 1$ ,  $\pm 5$  y  $\pm 10$  V. Para protegerse contra señales transitorias, el *NI 9205* incluye protección contra sobrevoltajes de hasta 60 V entre canales de entrada y común (COM).

Además, el *NI 9205* incluye doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje en modo común. Está diseñado para protección de sobrevoltaje transitorio de 1,000 Vrms. Hay dos opciones de conector para el *NI 9205*; un conector de terminal de resorte de 36 posiciones para conectividad directa o un conector D-Sub de 37 posiciones. Para procurar la liberación de tensión y protección de alto voltaje a la terminal de 36 posiciones del *NI 9205*, se recomienda el accesorio *NI 9940* de liberación de tensión.

El *NI 9205* con opción D-Sub tiene un conector D-Sub estándar en la industria de 37 posiciones que brinda una opción de cableado de bajo costo a una variedad de accesorios de *NI* o de terceros. Algunos vendedores que ofrecen servicios de fabricación personalizada de cable D-Sub, pueden proporcionar cables con pin-out que satisfaga las necesidades de su aplicación.

El *NI 9933* (u otro conector de D-Sub de 37 pines) se requiere para usarse con el *NI 9205* ver Figura 4 con D-Sub. El *NI 9933* incluye un conector de terminal de tornillo con liberación de tensión, así como un conector D-Sub para crear montajes de cables personalizados (Illescas et al, 2015).



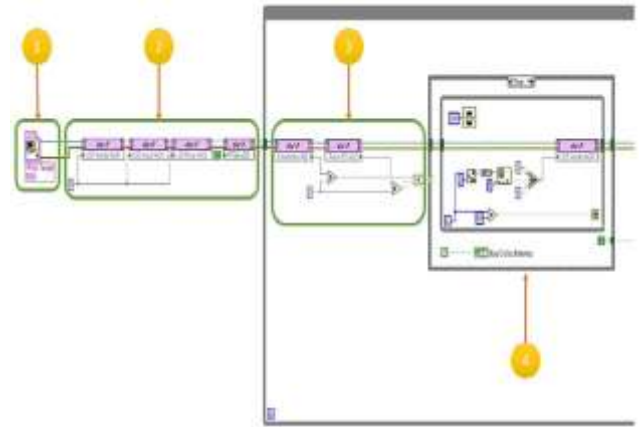
**Figura 4** Módulo de entradas analógicas Serie C NI 9205

**Fuente:** (Illescas et al, 2015)

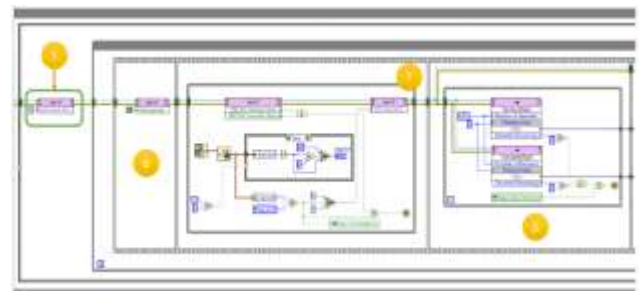
La implementación descrita en los apartados anteriores se realizó en el entorno de desarrollo *LabVIEW*. El instrumento virtual (VI) que se ejecuta en el módulo *Real-Time* se puede visualizar en las Figuras 5, 6 y 7. A continuación se explicará el código.

- Los módulos *FPGA* y *Real-Time* son independientes, sin embargo, al estar integrados en un solo chasis (NI CompactRIO) permite que un instrumento virtual ejecutado en *Real-Time* lea el valor de un indicador o modifique el valor de un control que estén definidos en un instrumento virtual ejecutado en *FPGA*. Esta interacción es posible cuando el VI de *Real-Time* hace referencia al VI de *FPGA* mediante la herramienta “*Open FPGA VI Reference*” que *LabVIEW* proporciona.

- Al crear un “*LabVIEW FPGA Project*”, los canales de los módulos de entrada y salida (*NI 9205* y *NI 9263*) de la *NI CompactRIO* solo pueden ser instanciados por la *FPGA*, esto conlleva que en el *VI* de *FPGA* a los canales de salida (“*A0X*”) y a los canales de entrada (“*AIX*”) se les deba crear un control y un indicador respectivamente, solo así el *VI* de *Real-Time* podrá leer o escribir en los canales mediante “*Read/Write Control*”.
- “*Led Verde*” es el canal 0, “*Led Azul*” el canal 1 y “*Led Rojo*” el canal 2 del módulo de salidas analógicas *NI 9263* a dichos canales se le conecta indicadores luminosos (*LEDs*) para que el usuario identifique el funcionamiento del sistema. “*FPGA Led*” es una salida digital del chasis que también se puede modificar en el *VI* de *Real-Time* si en el *VI* de *FPGA* se le conecta un control.
- A los canales de entrada “*AI2*” y “*AI3*” están conectados interruptores electrónicos. El interruptor “*Encender*” está destinado para iniciar la adquisición y el procesamiento de las señales de tensión y corriente; el interruptor “*Parar RT*” detiene la ejecución del *VI* en *Real-Time*, éste es necesario para una posible conexión de la *NI CompactRIO* a una computadora personal.
- Se realiza un parpadeo en el “*Led Verde*” para indicar que la adquisición y el procesamiento de las señales empezará. El control “*Stop Ciclos Internos*” es una variable local que se usa para detener todos los ciclos *While* en el *VI* de *Real-Time*.

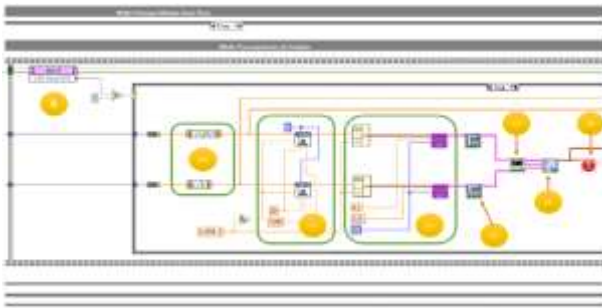


**Figura 5** VI ejecutado en el módulo Real-Time, parte 1  
Fuente: (Illescas et al, 2015)



**Figura 6** VI ejecutado en el módulo Real-Time, parte 2  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

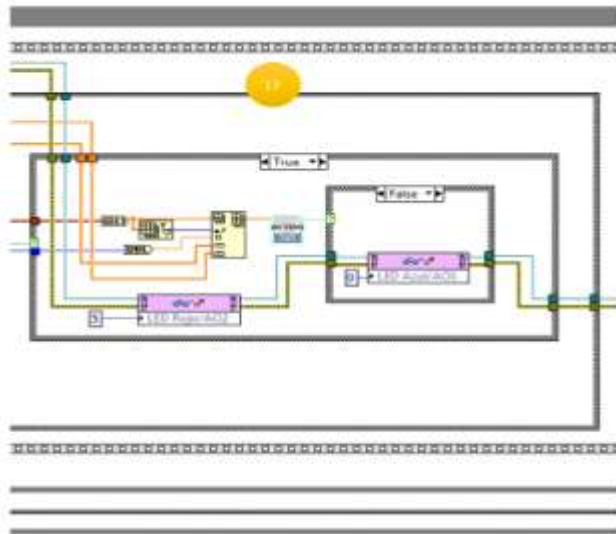
- Se asignan 5 v al canal “*A01*” (“*Led Azul*”) para indicar que el *VI* de *Real-Time* ha hecho referencia al *VI* de *FPGA* y que mantienen una comunicación (Illescas et al, 2015).
- “*Interrupción*” es un control booleano que ha sido declarado en el *VI* de *FPGA* y su valor es manipulado en el *VI* de *Real-Time*, pausa el *VI* de *FPGA* cuando éste ha adquirido el número de muestras deseadas para que el *VI* de *Real-Time* realice el procesamiento de las señales muestreadas.



**Figura 7** VI ejecutado en el módulo Real-Time, parte 3  
**Fuente:** (Illescas et al, 2015)

- La cantidad de muestras adquiridas por el VI de *FPGA* es 16382 (8191 muestras de la señal de tensión y 8191 de la señal de corriente), se podría almacenar esta cantidad de datos en la memoria de la *FPGA*, sin embargo, este módulo puede enviar información a *Real-Time* sin ser almacenada en memoria mediante un buffer de comunicación llamado *FIFO*, *Fisrt In-First Out*. Se crearon dos *FIFO* donde se ingresan 8191 muestras para cada señal; *Real-Time* debe saber cuándo *FIFO* contiene el número de datos deseados por lo que en el VI de *FPGA* se declaró dos indicadores booleanos (“*FIFO De Tension Llena*” y “*FIFO De Corriente Llena*”) que *Real-Time* monitorea, si ambos indicadores son verdaderos significa que los buffers están llenos y deben ser vaciados.
- Se establece un tiempo de holgura de 10 segundos para que los *FIFO* se llenen con las 8191 muestras, si el tiempo es excedido significa que hay un error de ejecución en el módulo *FPGA* y se deben detener los *Vis* de *FPGA* y *Real-Time* mediante la variable local “*Stop Ciclos Internos*”.
- Al canal “*AOI*” se le asigna 5 v si el ingreso de datos a los *FIFO* no tuvo errores o 0 v para indicar que ha ocurrido un error.
- El vaciado de los *FIFO* se realiza mediante la función “*Invoke Method*” que proporciona *LabVIEW*.
- Se inicia el procesamiento de las señales muestreadas, antes se verifica que el programa no haya tenido errores de ejecución por lo que “*Led Azul*” debe estar a 5 v, de lo contrario el programa debe de pararse.
- En la etapa de acondicionamiento se reduce la amplitud de las señales de tensión y corriente, es menester escalar las señales adquiridas para que sean procesadas con su amplitud original.
- La frecuencia de la señal de tensión y corriente idealmente es de 60 Hz y el último armónico que se analizará es el quincuagésimo estando a una frecuencia de 3000 Hz, para eliminar frecuencias que no son necesarias para el presente estudio se aplica un filtro pasa bandas a las señales muestreadas.
- Las señales adquiridas se reconstruyen mediante sus muestras y se ejecuta el algoritmo explicado.
- Se hace el cálculo de la frecuencia fundamental, el valor eficaz y la DAT de cada señal, con los algoritmos programados.
- Realiza el cálculo de la potencia activa, reactiva, aparente y el factor de potencia mediante el algoritmo explicado anteriormente.

- Se encapsulan todos los parámetros calculados en un cluster para que un único cable contenga toda la información de las mediciones.
- Se implementa el código de alarmas.
- Si algunos de los parámetros se encuentran fuera de rango la salida "AO2" tendrá 5 v para que el usuario se percate de que un parámetro eléctrico esta fuera del rango establecido por la CFE G0100-04. Cuando esto sucede las señales de tensión y corriente muestreadas, así como sus parámetros medidos se almacenan en el disco duro de la NI CompactRIO en un archivo .txt que el usuario puede extraer y analizar en una interfaz gráfica ver Figura 8, (Illescas etl al, 2015).



**Figura 7** VI ejecutado en el módulo Real-Time, parte 3

*Fuente:* (Illescas et al, 2015)

## Interfaz Gráfica para la extracción y visualización de información del disco duro de la NI CompactRIO

Cuando la NI CompactRIO se conecta a una computadora personal mediante *Ethernet* el usuario puede extraer el archivo con extensión *.txt* del disco de la NI CompactRIO, el cual contiene la información de las mediciones realizadas, mediante la interfaz gráfica descrita a continuación el usuario podrá visualizar la información que contiene el archivo en un formato amigable y generar reportes de prueba editados en *Excel* (Illescas etl al, 2015).

### Inicio

Pantalla de bienvenida.

### Menú de ventanas

En esta sección se indica la ventana en la que se encuentra el usuario, para visualizar el proceso, ver Figura 9.

### Botones de Siguiente y Anterior

En cada ventana se encuentran estos botones, estos te llevan a la ventana anterior o siguiente, según corresponda. En algunas ocasiones estos botones son deshabilitados si existe algún proceso en ejecución o la información solicitada es incorrecta.

### Botón Cerrar

Cuando se presiona el botón cerrar emerge una ventana ver Figura 10, preguntando si realmente se desea cerrar el programa, en caso de optar por la opción SI los procesos serán detenidos y se cerrará el programa en caso de elegir la opción NO, la ventana emergente desaparecerá y la ejecución del programa continuará de manera normal.



**Figura 9** Inicio  
 Fuente: (Illescas et al, 2015)



**Figura 10** Inicio  
 Fuente: (Illescas et al, 2015)

**Copiar Carpeta**

Si se desea hacer uso de las funciones de esta ventana (Copiar) es necesaria tener conexión con la NI CompactRIO. Ver Figura 11.



**Figura 11** Copiar carpeta  
 Fuente: (Illescas et al, 2015)

**Botón Copiar**

El botón *Copiar* sirve para realizar un respaldo en la PC del usuario de la carpeta *Registro* almacenada en la *NI Compact RIO*. Esta carpeta contiene la información que se produjo a causa de un evento, es decir, si los parámetros eléctricos de la señal salieron del rango establecido por la norma CFE G0100-04.

**Botón Ayuda**

En distintas ventanas aparecerá este botón, indicando que utilidad tiene la ventana en la que se encuentra o muestra consejo para el correcto uso de dicha ventana.

**Fecha de archivo**

Se proporciona un calendario en el cual se debe seleccionar una fecha en donde se espera un registro. Para verificar que existe un registro en dicha fecha, se muestra una ventana de comprobación,

**Calendario**

Con la ayuda del calendario se puede seleccionar una fecha de posible perturbación, empezando por el mes y posteriormente el día.

**Indicador de Fecha**

Se muestra en formato DD/MM/AAAA la fecha seleccionada en el calendario.

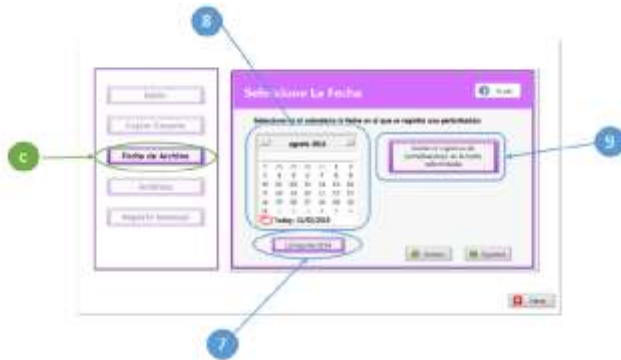
**Indicador**

Muestra si existen archivos guardados del día seleccionado y cuantos archivos hay. Si existen archivos el botón *Siguiente* se activará y podrá continuar con su ejecución, caso contrario se debe elegir una fecha diferente.



## Indicador

En caso de que no existan archivos el día seleccionado, se mostrará que no hay y el botón Siguiente se bloquea hasta que el usuario cambie la fecha ver Figura 12.



**Figura 12** Fecha de archivo  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

## Archivos

Permite elegir uno de los archivos existentes en la fecha señalada para un análisis posterior o se puede optar por generar un reporte del mes seleccionado. El nombre de los archivos corresponde a un formato donde indican la hora en la que se generó el evento. Según sea el caso (abrir un archivo o generar un reporte mensual).

### Archivo que desee visualizar

Esta barra permite elegir un archivo en el que se encuentra la información correspondiente a la perturbación, de acuerdo al día seleccionado con anterioridad. Ver Figura 13.



**Figura 13** Archivos  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

## Norma

Los parámetros eléctricos deben encontrarse entre los rangos establecidos por la CFE, de acuerdo a la norma CFE-G0100-04.

## Alarma

Parpadea en caso que los parámetros eléctricos estén fuera de rango.

## Botón inicio

Al pulsar este botón regresa al usuario a la ventana de Copiar Archivo.

## Parámetros de tensión

Se muestran los parámetros relacionados con la tensión: tensión eficaz, amplitud, frecuencia fundamental y distorsión armónica total. En caso de que alguno de los parámetros se encuentre fuera de rango, se mostrará un indicador de color rojo.

## Parámetros de corriente

Se muestran los parámetros relacionados con la corriente, corriente eficaz, amplitud, frecuencia fundamental y distorsión armónica total. En caso de que alguno de los parámetros se encuentre fuera de rango, se mostrará un indicador de color rojo.

### Parámetros de potencia

Se encuentran los parámetros relacionados con la potencia, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. En caso de que alguno de los parámetros se encuentre fuera de rango, se mostrará un indicador rojo, ver Figura 14.

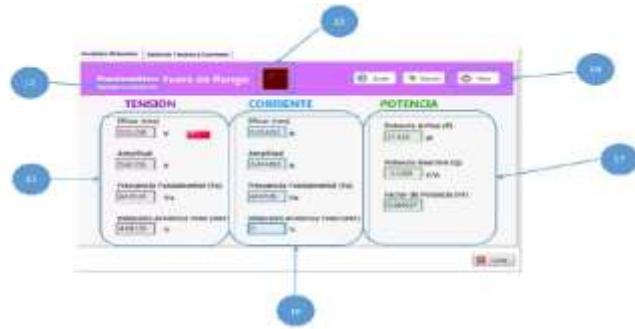


Figura 13 Archivos  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

### Pestañas

Para tener una mejor visualización de los parámetros y por qué se generaron, se proporciona la opción de cambiar entre ver los parámetros eléctricos y observar la señal (señal de tensión y señal de corriente) que está relacionada a estos parámetros.

### Gráfico de la señal de tensión

La grafica muestra la señal de tensión que se obtuvo desde el inversor, el eje horizontal indica el tiempo que duro la adquisición y en el eje vertical se señala la amplitud (Illescas etl al, 2015).

### Gráfico de la señal de corriente

La grafica muestra la señal de corriente que se obtuvo desde el inversor, el eje horizontal indica el tiempo que duro la adquisición y en el eje vertical se señala la amplitud, vea figura 15.

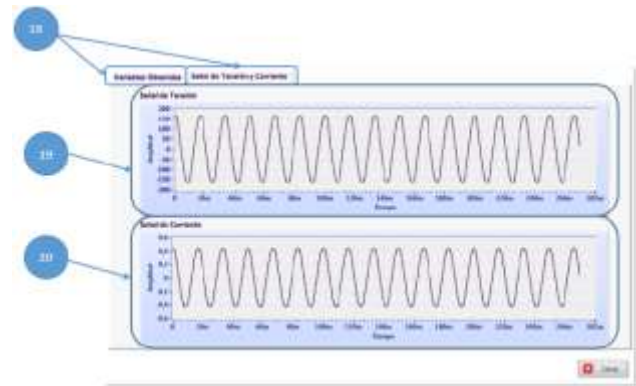


Figura 13 Archivos  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

### Selector

Indica si se desea generar un reporte mensual, en caso de ser tildado es deshabilitada la opción para elegir solo un archivo.

### Directorio

Señala la dirección donde se creará el reporte mensual, dicha carpeta está situada en una carpeta llamada Reportes, la cual incluye la carpeta del año, que a su vez contiene una carpeta de mes, vea figura 16.



Figura 16 Archivos  
Fuente: (Illescas et al, 2015)

## Reporte mensual

Se observa el progreso de la creación del reporte mensual.

## Ventana inicio de reporte

Esta ventana emergente pregunta si realmente se desea crear un reporte mensual, en caso de optar por la opción *SI*, la ventana emergente será cerrada y dará inicio la generación del archivo, en caso contrario se cancela la operación y se permite regresar a otras actividades.

## Barra de progreso

Señala en qué fase se encuentra la elaboración del reporte.

## Botones de regresar, inicio, cerrar

Mientras se genera el reporte mensual se desactivan los botones de Regresar, Inicio, Cerrar, cuando acabe se reanudan las funciones de estos botones ver Figura 17.

## Ventana Final de Reporte

Indica que se ha terminado de elaborar el reporte mensual.



**Figura 17** Reporte mensual  
*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

## Resultados

### Medición Carga Capacitiva

La carga capacitiva conectada al convertidor fue una televisión, en la Figura 18 se visualizan las mediciones obtenidas por Nombre del sistema y en la Figura 19 las de su homólogo, con las cuales se puede realizar una comparativa y observar la similitud de los resultados.

En las Figuras 20 y 21 se observan los gráficos de las señales de tensión y corriente tomadas en el mismo instante por ambos dispositivos, es notable la calidad con la que se muestran las ondas en Nombre del sistema en comparación a METREL (Illescas et al, 2015).

Mediciones Eléctricas	
Frecuencia Fundamental Señal de Tensión	60.0066 Hz
Frecuencia Fundamental Señal de Corriente	60.0068 Hz
Amplitud Señal de Tensión	167.073 Vp
Amplitud Señal de Corriente	0.215274 Ap
Valor Eficaz Señal de Tensión	118.155 V
Valor Eficaz Señal de Corriente	0.165561 A
Distorsión Armónica Total Señal de Tensión	1.65019 %
Distorsión Armónica Total Señal de Corriente	42.7724 %
Potencia Activa (P)	-17.1638 W
Potencia Reactiva	-5.30527 VAR
Potencia Aparente	19.5619 VA
Factor de Potencia	-0.877414

**Figura 18** Mediciones de carga capacitiva  
*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

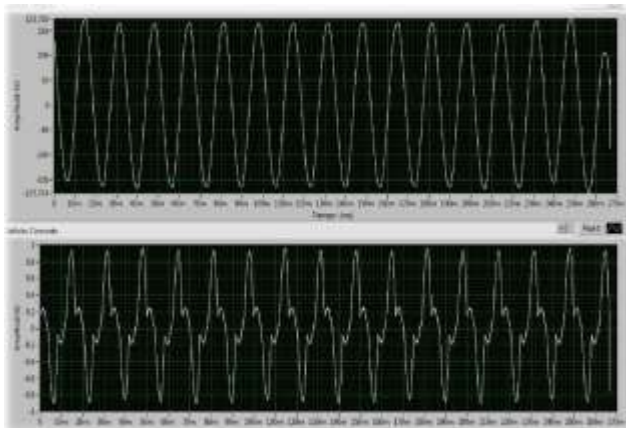


**Figura 19** Señales de Tensión y corriente de carga capacitiva

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

### Medición Carga Inductiva

La conexión de una carga inductiva arroja mediciones semejantes a las calculadas por el analizador de la calidad de la energía, la discrepancia de resultados es causa de la instalación de las sondas de corriente del dispositivo METREL, pues éste presenta oscilaciones entre cada medición por lo que se desconoce el valor exacto de un parámetro, sin embargo, el sistema realizado muestra los parámetros medidos sin cambios bruscos, permitiendo al usuario elegir un valor con menos incertidumbre, ver Figuras 22, 23, 24 y 25.



**Figura 20** Señales obtenidas del sistema

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*



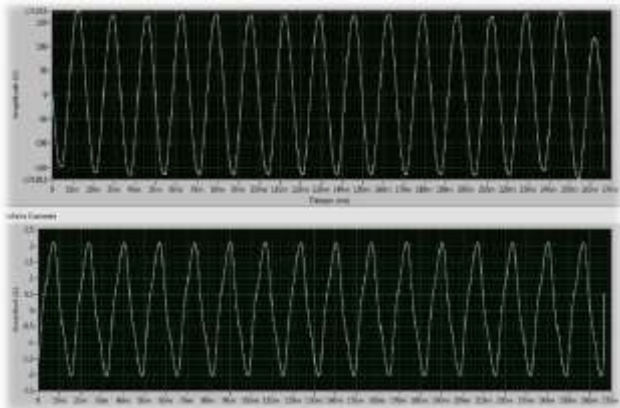
**Figura 22** Mediciones de carga inductiva

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*



**Figura 21** Señales de tensión y corriente vistas en el Metrel, carga capacitiva

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*



**Figura 23** Señales de Tensión y corriente de carga inductiva

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

P	-0.030 kW	PF	-0.52i
Q	-0.048 kVAr	DPF	-0.54i
S	0.057 kVA		
U		I	
RMS	118.9 V		0.486 A
THD	1.80 V		0.054 A
THD	1.5 %		11.2 %
CF	1.39		1.71

**Figura 24** Medición de carga inductiva Metrel

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*



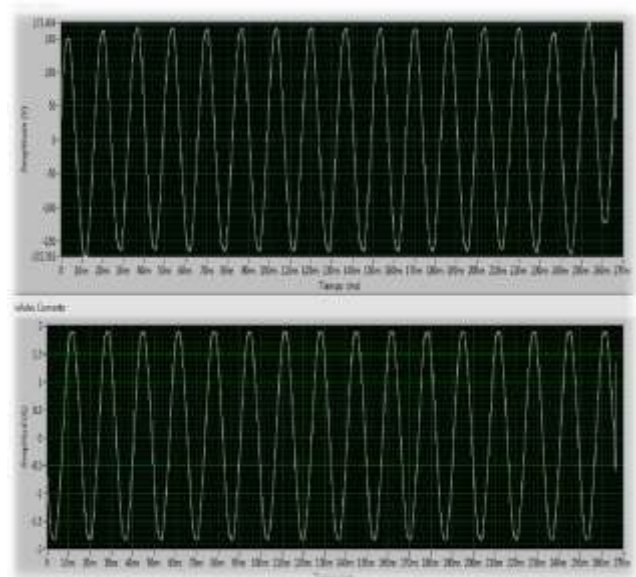
**Figura 25** Señales de tensión y corriente vistas en el Metrel carga inductiva

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*

### Medición Carga Resistiva

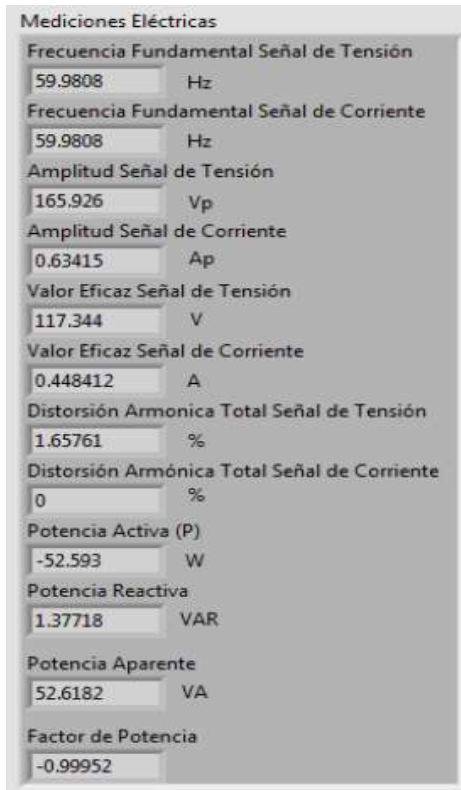
La carga utilizada para la prueba del funcionamiento de los sistemas con carga resistiva, se realizó con un foco incandescente marcado con una potencia nominal de 60 Watts.

En las Figuras 26, 27, 28 y 29, se puede observar una similitud de los valores calculados, en Potencia y corriente, asimismo se nota la diferencia entre la potencia nominal presentada por el fabricante de la bombilla y la potencia real (Illescas et al, 2015).



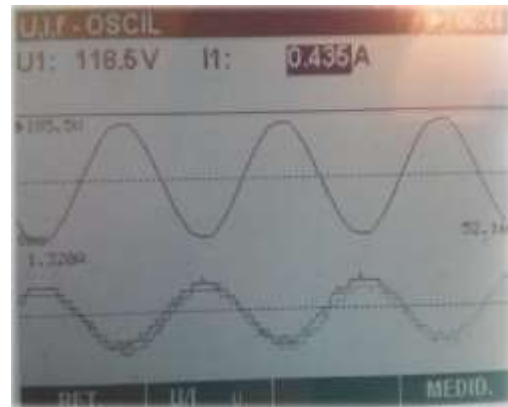
**Figura 26** Señales de Tensión y corriente de carga resistiva.

*Fuente: (Illescas et al, 2015)*



**Figura 26** Señales de Tensión y corriente de carga resistiva

*Fuente:* (Illescas et al, 2015)



**Figura 29** Señales de tensión y corriente en carga resistiva, Metrel

*Fuente:* (Illescas et al, 2015)

Los gráficos mostrados en la Figura 26 y Figura 29, son similares en fase, amplitud y forma de onda, permitiéndonos validar el sistema construido con el analizador de la calidad de la energía METREL.

### Conclusiones

El monitoreo de las señales generadas por un inversor, requiere de una adquisición de datos en tiempo real, esto con el fin de obtener una copia fiel de la señal incluyendo sus perturbaciones. Con ayuda de la instrumentación virtual, dispositivos electrónicos y tarjetas de desarrollo, se ha logrado una adquisición y un procesamiento de señales con resultados apegados a los requerimientos del proyecto.

Para implementar el procesamiento de los datos en una computadora, es necesario contar con bases matemáticas para el Análisis de Señales, como la serie y la transformada de Fourier.



**Figura 28** Medición carga resistiva Metrel

*Fuente:* (Illescas et al, 2015)

Debido a la dificultad que presenta la aplicación de la Transformada de Fourier sin ayuda de una computadora, existen algoritmos como la *FFT* que ayudan a realizar los cálculos de manera rápida, sin embargo, su aplicación a señales muertas reconstruidas con un número limitado de muestras, hace de los cálculos requeridos con la precisión mencionada un inconveniente. La toma de un mayor número de muestras conlleva un mayor tiempo de espera entre cada análisis, así como un mayor consumo de recursos computacionales, por lo que fue necesario el cálculo del tiempo que durará la adquisición, frecuencia de muestreo y número de muestras, para optimizar los recursos con los que se cuentan.

El uso de la Transformada de Fourier en aplicaciones de electrónica de potencia fue fundamental para el cálculo de los parámetros requeridos por la norma CFE G0100-04.

El acondicionamiento de las señales debe ser abordado cuidadosamente, ya que, si las señales no son adquiridas de manera correcta o son alteradas en el proceso, los resultados se verán afectados de manera significativa.

### Agradecimiento

Los autores agradecen a la SIP del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para la realización de este trabajo el cual es parte del proyecto de investigación registro SIP No. 20170814. Y también a la fundación Carolina, al COTEBAL- IPN y al IIEEL de México, por las facilidades otorgadas para los cursos doctorales.

### Referencias

C.F.E. “Especificación CFE G0100-04 para la Interconexión a la Red Eléctrica de B.T de Sistemas Fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW”, consultado en nov de 2016, disponible en: [https://www2.ineel.mx/proyectofotovoltaico/D-ESCARGAS/1ER\\_COLOQUIO\\_2007/Especificaciones%20tecnicas%20CFE.pdf](https://www2.ineel.mx/proyectofotovoltaico/D-ESCARGAS/1ER_COLOQUIO_2007/Especificaciones%20tecnicas%20CFE.pdf)

Saucedo Martinez D. A. y Taxis Villagran, “Factores que afectan la calidad de la energía y su solución, Tesis de Ingeniería Eléctrica ESIME IPN México D.F., 2008, consultado en enero de 2017, disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/429/FINALsauicedomtz.pdf?sequence=1>

N. I. Corp., La Instrumentación Virtual, 2003 Consultado en diciembre 2016, disponible en: [https://www.academia.edu/17218962/Instrumentacion\\_virtual\\_national\\_instruments](https://www.academia.edu/17218962/Instrumentacion_virtual_national_instruments).

Monroy P. F. P., “Desarrollo de un sistema de medición de variables eléctricas para un sistema de baja tensión tipo industrial”, Tesis de posgrado SEPI ESIME IPN México D.F., 2006. Consultado en agosto del 2016, disponible en: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/15477>

Fernández U. R., Instrumentación virtual de un generador síncrono de laboratorio con LabVIEW, CDMX, 2003. Tesis de posgrado, consultado en enero 2017, disponible en: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/16004>

Torres B. J. D., “Medidor de energía mediante un procesador de señales digitales”, Tesis de posgrado, SEPI; ESIME IPN México, 2009. Consultado en enero de 2016, disponible en: <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/3222>

Rodriguez R. J. Instrumentación, Desarrollo un prototipo industrializable de un inversor fotovoltaico de 1 kVA para interconexión a red eléctrica, 2009. Instituto de investigaciones en electricidad y energías limpias, Consultado en enero 2016, disponible en [https://www2.ineel.mx/proyectorfotovoltaico/D/ESCARGAS/2DO\\_COLOQUIO\\_INTERNACIONAL/29\\_SEPTIEMBRE\\_2009/03\\_AVANCES\\_TECNOLOGICOS/01\\_INVERSOR\\_IIE\\_DE\\_1KWP\\_x\\_Joaquin\\_Rodriguez/INVERSOR\\_IIE\\_DE\\_1KWP.pdf](https://www2.ineel.mx/proyectorfotovoltaico/D/ESCARGAS/2DO_COLOQUIO_INTERNACIONAL/29_SEPTIEMBRE_2009/03_AVANCES_TECNOLOGICOS/01_INVERSOR_IIE_DE_1KWP_x_Joaquin_Rodriguez/INVERSOR_IIE_DE_1KWP.pdf)

Rashid, M. *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Pearson Prentice Hall, 2004.

Oliva E. R. *Transformadores de potencia, de media y de protección*, Barcelona: S.A Marcombo, 1994.

Vazquez J. R. *Medidas eléctricas*, CEAC, 1992.

Martín J. R. *Diseño de subestaciones eléctricas*, 1 ed., McGRAW-HILL, 1987.

S. H. & B. V. Veen, *Señales y Sistemas*, 1 ed., LIMUSA WILEY, 2001.

Roberts, M.J. *Señales y sistemas: análisis mediante métodos de transformada y MATLAB*. México: McGraw Hill, 2005. ISBN 9701050673.

Hart. D. W. *Electrónica de Potencia*, Madrid: Prentice Hall, 2001.

IEEE, *Recommended Practice For Monitoring Electrical Power Quality*, 1995.

Illescas G. O., Osorio G. B.C., Tokunaga H. O.F., "Diseño de un sistema de prueba de convertidores electrónicos para la planta solar" Proyecto Fin de Carrera en ingeniería Mecatrónica, UPIITA, IPN 2015

Luna Valdes, L. E. *Metodología para análisis de las perturbaciones armónicas en los sistemas industriales en baja tensión*, 2007. Tesis de posgrado, SEPI, ESIME IPN. Consultado en enero de 2016, disponible en [http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4151/luna\\_valdes\\_luisqnrique.pdf?sequence=1](http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4151/luna_valdes_luisqnrique.pdf?sequence=1)

Lopez V. W.E & Moyón A.N.F. *Desarrollo de un sistema Scada para la medición de temperatura con sistemas embebidos para el laboratorio de mecatrónica de la facultad de mecánica*, Tesis de Ingeniería. E.S.P. de CH. Riobamba, 2011, Ecuador. Consultado en enero de 2016, disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/1145/1/25T00148.pdf>

Widmer, T. «*Sistemas digitales. Principios y Aplicaciones*,» 8a ed., Prentice Hall, p. 791.



## Diseño de un sistema de adquisición de variables articulares mediante sensores IMU

HERNANDEZ-SANTOS, C.†\* y HERNÁNDEZ-TAFOYA, María Susana

*División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Av. Eloy Cavazos 2001, Guadalupe, Nuevo León, México*

Recibido 6 de Enero, 2017; Aceptado 9 de Marzo, 2017

### Resumen

El modelado y simulación de la marcha humana es un tema que se ha venido estudiando durante varios años. Las necesidades humanas relacionadas a la limitación motriz, han llevado a los científicos a investigar sobre las causas más comunes que propician este problema, así como a desarrollar técnicas que permitan a los usuarios la recuperación del movimiento para una posible reincorporación a su vida cotidiana. En este artículo se presenta el análisis del ciclo de marcha humana, utilizando dispositivos de Unidades de Medición Inercial (IMU), los cuales bajo técnicas de programación lógica desde un controlador ATmega328 y una interfaz gráfica en LabVIEW, describen la trayectoria de las articulaciones de una pierna correspondientes a la cadera, rodilla y tobillo, en un ciclo de caminado. También se presenta el análisis matemático necesario para obtener la caracterización en cada articulación de la pierna con el objetivo de implementarlo en un dispositivo robótico que asista a pacientes con alguna dificultad motriz en las piernas, y le ayuden a recuperar paulatinamente su movilidad intentando copiar los movimientos naturales humanos.

**Caminata bípeda, ciclo Gait, Acelerómetro, Unidad de Medición Inercial**

### Abstract

Modeling and simulation of gait cycle is a topic that has been studied for a few years ago. The human needs related to motor limitation have to led researchers to study the most common causes of this problem, as well as to develop techniques that allow users to recover their self from the movement for a possible reincorporation into their daily lives. In the following lines, an analysis of a human gait cycle will be shown by using Inertial Movement Units (IMU's), which under logic programming techniques by an ATmega328 controller and a graphical interface in LabVIEW, show the path of one leg joints corresponding to hip, knee and ankle during a gait cycle. We also present the mathematical analysis needed to get the characterization in each leg joint, whose goals is the applying in a robotic device that assists patients with some motor disabilities in legs and help them to recover their mobility gradually, trying to emulate natural human movements.

**Bipedal walk, Gait cycle, Accelerometer, Inertial Measurement Unit**

**Citación:** HERNANDEZ-SANTOS, C. y HERNÁNDEZ-TAFOYA, María Susana Diseño de un sistema de adquisición de variables articulares mediante sensores IMU. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-1: 74-84

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: carlos.hernandez@itnl.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su censo del 2012 registro que el 6.6% de la población total nacional presenta algún problema de discapacidad motriz con limitaciones para caminar o trasladarse, en donde la causa más común deriva de secuelas de alguna enfermedad, seguida por accidentes cerebrovasculares que afectan directamente al sistema nervioso de las personas, ocasionando al paciente disminuciones en los rangos de movimiento de sus extremidades inferiores (INEGI (2013)).

El ciclo de marcha se divide principalmente en dos etapas: el simple apoyo que comprende el 40% y el doble apoyo que es el 60% restante del ciclo. Se empieza a contabilizar el ciclo en el instante en el que el talón de uno de los pies hace contacto inicial con el suelo, y finaliza cuando el mismo talón reincide en este contacto (Mannini (2015); Harlaar (2014); Hebenstreit (2015); Hamacher (2017)).

Al estudiar el ciclo de marcha humana, se deben tener en cuenta aspectos básicos como la velocidad de marcha, la cadencia, que es el número de pasos ejecutados en la unidad de tiempo, y las dimensiones de las zancadas. En la Tabla 1 se muestra un resumen de datos obtenidos por varios autores que han analizado la marcha humana. (Mannini (2015); Harlaar (2014); King (2017)).

La obtención de estos parámetros del ciclo de marcha se pueden lograr por diferentes métodos ya sea a través de cálculos con fórmulas como las mostradas en las Ecuaciones 1, 2 y 3, que determinan el tiempo de ciclo o velocidad de marcha.

$$\text{cycle time (s)} = 120/\text{cadence (steps/min)} \quad (1)$$

$$\text{speed (m/s)} = \text{stride length (m)} \times \text{cadence (steps/min)/12} \quad (2)$$

$$\text{speed (m/s)} = \text{stride length (m)}/\text{cycle time (s)} \quad (3)$$

Fuente	Cadencia (p/m)		Velocidad (m/s)		Zancada larga (m)	
	H	M	H	M	H	M
Murray (1964,1970)	117	117	1.53	1.30	1.57	1.33
Chao (1983)	102	108	1.20	1.10	1.42	1.22
Kadaba (1990)	112	115	1.34	1.27	1.41	1.30
Perry (1992)	111	117	1.43	1.43	1.46	1.28

**Tabla 1** Consideraciones al analizar el ciclo de marcha  
*Fuente:* Mannini (2015), Harlaar (2014), King (2017)

Otros métodos de obtención de dichos parámetros, es con técnicas antropométricas para determinar longitudes y ángulos corporales, así como el uso de tecnologías de visión artificial, técnicas de análisis cinético y cinemático con plataformas dinamométricas y fotométricas, o mediciones basadas en cálculos de dinámica inversa con sensores de GRF (Ground Reaction Force) (Yang (2015); Kitagawa (2016)).

También se pueden obtener los parámetros con la implementación e interpretación de sensores de fuerza colocados en los talones del pie humano, sensores Electromiógrafos, lecturas y análisis de señales electroencefalografías (Esqueda-Elizondo, Hernández-Manzo, Bermudez-Encarnación, Jiménez-Beristáin, & Pinto-Ramos, (2016); Chávez-Saenz, Torres-Ramírez, Herrera-Ogaz, & Hernández-Rodríguez, (2016)) o análisis con sensores inerciales colocados en las extremidades inferiores de una persona, cuyos datos son recolectados y procesados con herramientas dinámicas y matemáticas como Lagrange, para ser simuladas luego con softwares como Matlab o LabVIEW (Yang (2013); Yuan (2014); Marinero (2014); Hebenstreit (2015); Díaz, Gutiérrez, Valdés, & Hernández, (2016)).

Además de los sensores de medición inercial, las trayectorias del ciclo de marcha pueden obtenerse a través de sensores de fuerza colocados en los talones del pie humano o sensores Electromiógrafos, sin embargo, estos equipos representan costos altos de manufactura e instrumentación. En el presente artículo se emplean IMU debido a que se desarrolló un sistema para obtención de variables para la caracterización de la marcha humana de bajo costo.

Es claro que cada persona presenta un patrón propio de marcha, mismo que varía y se adapta a lo largo de su vida, sin embargo, para los fines de esta investigación, se toman las medidas estándares de una persona adulta joven (menor a 30 años), así como los rangos de movimiento de la pierna humana en condiciones normales, en la Tabla 2 se muestran estos rangos (Gonz (2016)).

Articulación/movimiento	Cadera (°)	Rodilla (°)	Tobillo (°)
Flexión	145	-	
Extensión	30	-	
Abducción	60	-	25
Aducción	31	-	25
Extensión	-	10	50
Flexión	-	120	30

**Tabla 2** Rangos de movimiento en extremidades inferiores

*Fuente: Gonz (2016)*

El presente trabajo utilizará un sistema de 3 sensores de medición inercial para obtener las posiciones angulares de las 3 articulaciones principales de una pierna humana en movimientos de flexión y extensión en cadera, rodilla y tobillo.

En la sección II se hace una descripción del proceso de diseño y ensamble del prototipo para adquirir las señales correspondientes a la posición angular de las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo de una pierna humana durante el ciclo de marcha normal.

La sección III describe el proceso matemático para obtener la interpretación gráfica de las señales adquiridas de las IMU. La sección IV muestra los resultados obtenidos a partir de la implementación del prototipo propuesto en un sujeto de prueba.

La sección V son las conclusiones a las que se llegaron después del experimento descrito en el presente artículo.

Finalmente la sección VI refiere al trabajo a futuro que se pretende llevar a cabo a partir de la investigación aquí descrita.

## Diseño del sistema de adquisición de variables articulares

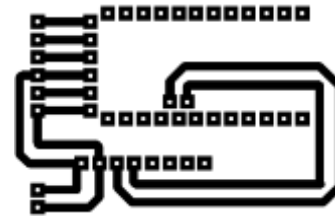
Se utilizaron 3 sensores MPU-6050, uno por cada articulación representada, los cuales cuentan con 6 Grados De Libertad (GDL), 3 ejes (x, y, z) para el acelerómetro y 3 más (x, y, z) para el giroscopio, cuenta también con capacidad de procesamiento de algoritmos de movimiento en 9 ejes dentro del Procesador Digital de Movimiento (DMP), el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C soporta la interface entre varios MPU-6050 a la vez y un sensor de temperatura con salida digital.

En la ejecución de la simulación se dejan los valores de fábrica de los sensores, estos cuentan con 7 Convertidores Análogo-Digital (DAC) de 16 bits para el acelerómetro, giroscopio y sensor de temperatura, la comunicación se establece por el protocolo I<sup>2</sup>C conectando los pines SCL y SDA a las entradas análogas del controlador.

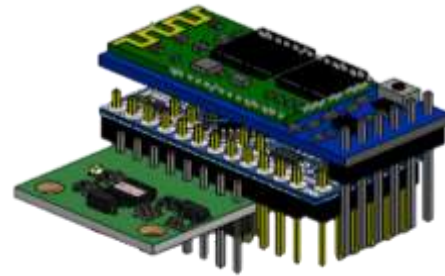
Para la comunicación con el ordenador, se utilizaron módulos de bluetooth RN-41 clase 1, con una potencia máxima de 100 mW y hasta 106 m de rango de operación y la configuración por defecto para trabajar como esclavo a una velocidad de 115200 kbps vía serial.

El control del proceso se hizo con una tarjeta Arduino Pro Mini, esta tarjeta cuenta con un microprocesador ATmega328, 14 pines I/O digitales de los cuales 6 pueden usarse como PWM, 6 análogas y un botón de reinicio.

Las Figuras 1 y 2 muestran el esquema eléctrico con bloques de conectores de los componentes del circuito. En la primera imagen se muestra la vista superior en 2D, mientras que en la segunda se muestra el diseño del acomodo de los componentes en 3D.



**Figura 1** Vista superior del circuito eléctrico  
*Fuente: Elaboración propia*



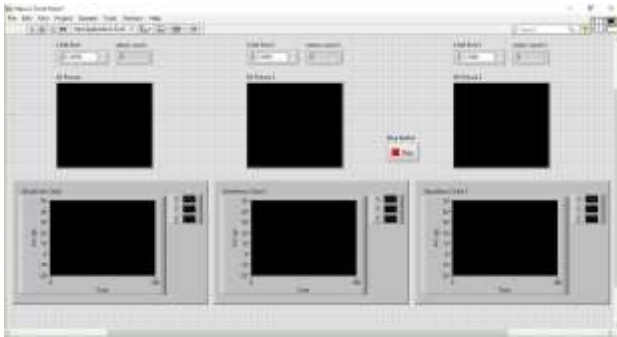
**Figura 2** Vista isométrica del circuito en 3D  
*Fuente: Elaboración propia*

La figura 3 muestra el circuito del prototipo final del sistema de adquisición y procesado de variables articulares.



**Figura 3** Prototipo de adquisición de señales del IMU  
*Fuente: Elaboración propia*

Se realizó una interfaz gráfica en LabVIEW y la programación en arduino para mostrar los tres sensores inerciales de las articulaciones de la pierna (cadera, rodilla y tobillo) como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4** Panel frontal

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 4 (Instrumento Virtual) del LabVIEW se incluyeron bloques de comunicación serial para extraer los datos que el arduino envía vía bluetooth. Al recibir la información recopilada del sensor, el programa inicia un ciclo que tiene como finalidad el detener el proceso por un lapso de tiempo hasta que el bluetooth sea activado correctamente, una vez cumplida la condición, pasa a una secuencia de lectura y procesado del sensor, enseguida envía la información a un nuevo ciclo que tiene como objetivo el filtrado de las señales por medio de los comandos de filtro Kalman y complementarios programados desde arduino.

En el ciclo del filtrado se colocó un selector de parámetros de lectura, donde se puede elegir la aceleración, giro y los filtros Kalman o complementario. La orientación y movimiento del sensor son representados por medio de una animación en 3D con la finalidad de visualizar de manera rápida la respuesta del IMU.

La interfaz gráfica también muestra una gráfica con las trayectorias de movimiento con respecto al tiempo con tres parámetros representativos relacionados a X, Y y Z, tomando el eje horizontal como la variable de tiempo, y el vertical como la posición angular con respecto al eje de referencia.

Se buscó obtener la trayectoria de cada IMU colocado estratégicamente a lo largo de la pierna, cerca de las articulaciones naturales para obtener lecturas similares a los movimientos reales, y obtener la caracterización de la marcha humana.

### Técnicas utilizadas para el cálculo de posición y orientación de la MPU (Motion Process Unit)

Los datos entregados por el sensor inercial son: Aceleración y velocidad rotacional en el eje X, aceleración y velocidad rotacional en el eje Y, y aceleración y velocidad rotacional en el eje Z.

El arreglo de sensores inerciales IMU-6050 se utiliza para determinar las trayectorias del ciclo de marcha humana, donde los ángulos y posiciones son calculados utilizando los siguientes parámetros: Aceleración, Velocidad angular, Filtro complementario y Filtro Kalman.

### Aceleraciones

Este parámetro nos permite conocer la orientación del sensor haciendo uso de la aceleración de la gravedad natural que actúa sobre el circuito integrado en todo momento. La desventaja de este método es que es insensible a rotaciones sobre el eje en el cual actúa el vector de gravedad, así mismo para que el cálculo sea efectivo, la única aceleración que debe estar afectando al sensor deberá ser la gravedad.

Para calcular la aceleración en un espacio tridimensional se utilizan las Ecuaciones 4 y 5:

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (4)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left( \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (5)$$

## Velocidad angular

Los giroscopios son capaces de proporcionar lecturas directamente proporcionales a la rotación angular en cada eje. Realizando una integración de la velocidad angular respecto al tiempo y conociendo el ángulo inicial es posible conocer la orientación del sensor, esto se realiza utilizando las Ecuaciones 6 y 7:

$$\theta_x = \theta_{x0} + \omega_x \Delta t \quad (6)$$

$$\theta_y = \theta_{y0} + \omega_y \Delta t \quad (7)$$

La desventaja de este método, es que es difícil conocer los intervalos de tiempo exacto sobre los cuales se realiza la integración por una serie de factores como el tiempo de ejecución en el procesamiento computacional, y variaciones en la frecuencia del reloj de los dispositivos debido a cambios de temperatura o variaciones en las fuentes de alimentación de voltaje. Este error llamado DRIFT es acumulativo en cada iteración, lo que hace a éste método poco efectivo en cortos periodos de tiempo (Djurić-Jovičić (2012)).

## Filtro complementario

Este método combina los resultados de los ángulos calculados por los acelerómetros y por los giroscopios con la finalidad de compensar el DRIFT y a su vez las fuerzas externas que pueden llegar a actuar sobre la IMU y que afectan la medición en los acelerómetros.

Las proporciones recomendadas oscilan entre un 98% para el giroscopio y un 2% para los acelerómetros. De esta forma el ángulo calculado responderá rápido ante las rotaciones y no será tan sensible a las aceleraciones ocasionadas al desplazar al sensor.

En realidad este filtro es una unión de dos diferentes: un pasa altas para el giroscopio y un pasa bajas para el acelerómetro. La fórmula que viene de esta combinación, se observa en la Ecuación 8 (Llamas (2017)).

$$\theta = 0.96(\text{ángulo} + \omega_{gyro} dt) + 0.04(\alpha_{acel}) \quad (8)$$

## Filtro Kalman

Es un algoritmo de filtrado de datos discretos, utilizado en sistemas en los cuales existe cierta incertidumbre de los datos entregados por los sensores, realiza una predicción del sistema  $f(t + 1)$  y posteriormente se efectúa una corrección con los valores reales medidos de forma iterativa.

Tiene como desventaja que requiere de más capacidad de procesamiento computacional, por lo tanto, su implementación en sistemas con recursos limitados como la plataforma arduino debe ser realizada tomando en cuenta el uso de recursos que esto implica (Mazzà (2012); Djurić-Jovičić (2012)); Jin (2014)).

## Resultados

La figura 5, muestra la colocación del prototipo en las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo para una de las extremidades inferiores, el sujeto de prueba sexo masculino de 22 años de edad y 71 kg de masa y el prototipo de adquisición de señales inerciales.

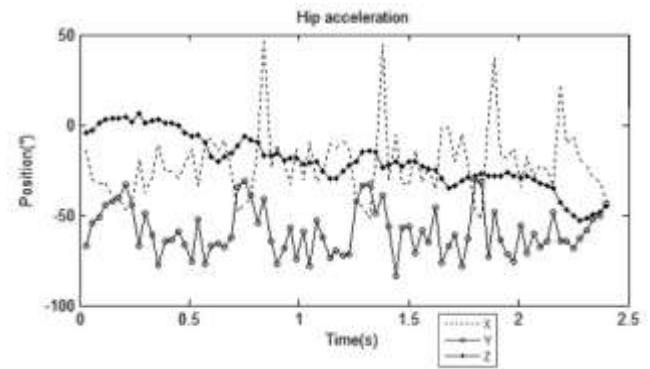


**Figura 5** Prototipo y Montaje del dispositivo  
*Fuente: Elaboración propia*

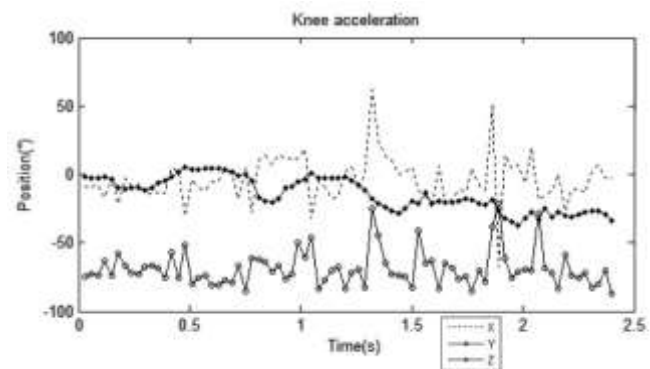
Al realizar un ciclo de caminado, la interfaz gráfica muestra la trayectoria variable correspondientes a los datos recabados en donde el eje vertical representa la orientación en grados del sensor, y el horizontal el periodo de tiempo del muestreo en segundos.

La prueba se realizó en un periodo total de 2.37 s, en el cual se registró la trayectoria de 4 pasos y medio en el sujeto antes descrito.

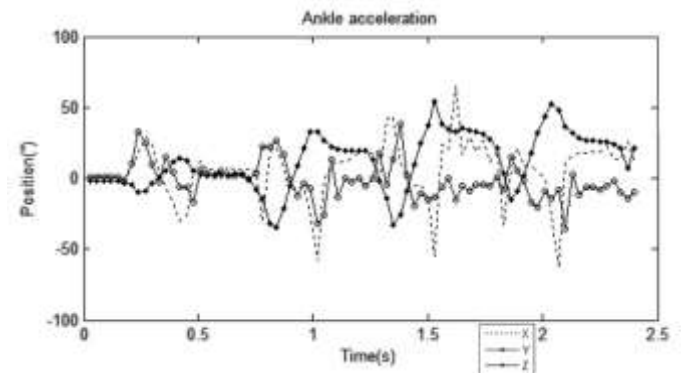
Los gráficos 1, 2 y 3 muestran la estimación de los ángulos de rotación en los tres ejes (x, y, z) por medio de los acelerómetros, se observa como en los tres ejes existen cambios radicales de amplitud debido a las fuerzas externas que actúan sobre el sensor, ya que en el código del programa cargado al procesador, se estipula que solo la fuerza de gravedad sea la que actúe sobre el sensor.



**Gráfico 1** Aceleración cadera  
*Fuente: Elaboración propia*

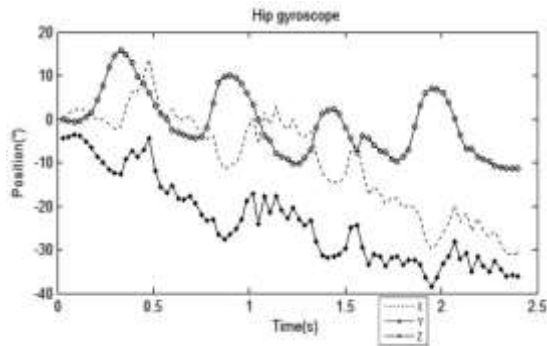


**Gráfico 2** Aceleración rodilla  
*Fuente: Elaboración propia*

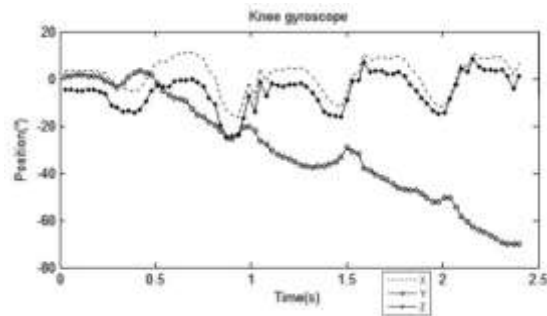


**Gráfico 3** Aceleración tobillo  
*Fuente: Elaboración propia*

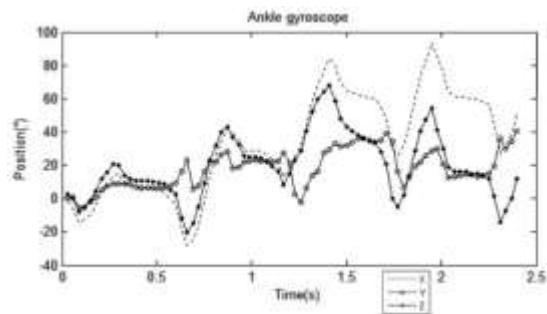
En los gráficos 4, 5 y 6 se muestran los ángulos calculados mediante la información de velocidad angular proporcionados por el giroscopio, se observa que las curvas son más continuas, sin embargo estas muestran el error acumulativo resultado de la integración iterativa sobre el tiempo.



**Gráfico 4** Giro cadera  
*Fuente: Elaboración propia*

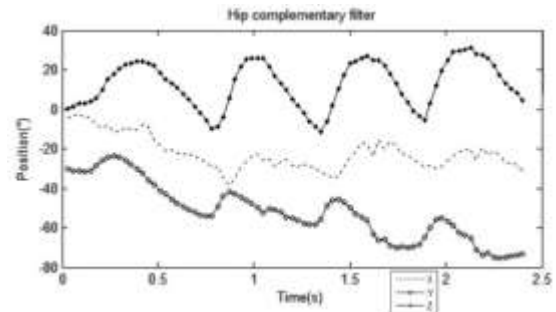


**Gráfico 5** Giro rodilla  
*Fuente: Elaboración propia*

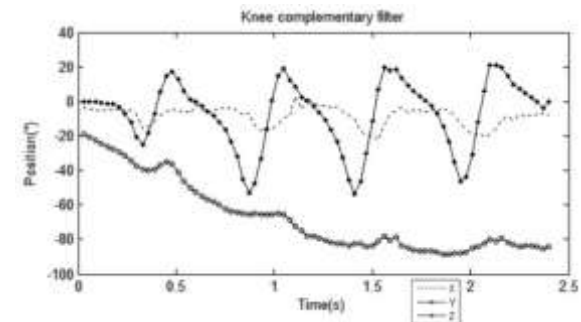


**Gráfico 6** Giro tobillo  
*Fuente: Elaboración propia*

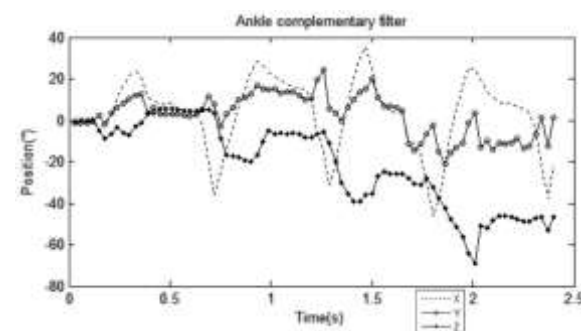
En los gráficos 7, 8 y 9 se puede apreciar el efecto que tiene el filtro complementario al combinar las lecturas de los giroscopios y los acelerómetros, el resultado final es una atenuación en las amplitudes de las curvas y una eliminación parcial del error acumulativo de la integración hecha con los valores de los giroscopios.



**Gráfico 7** Cadera filtro complementario  
*Fuente: Elaboración propia*



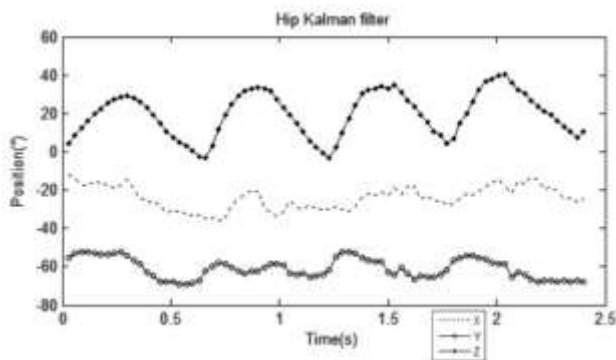
**Gráfico 8** Rodilla filtro complementario  
*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 9** Tobillo filtro complementario  
*Fuente: Elaboración propia*

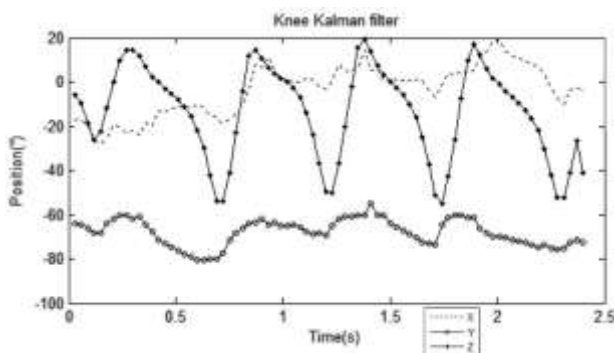


En los gráficos 10, 11 y 12 se muestran los datos ya procesados por el filtro Kalman, se aprecia claramente la acción de dicho filtro ya que el ruido se redujo de una forma considerable. Se observa que el eje con comportamiento uniforme más notorio es el correspondiente al giro en Z, debido a que en la colocación del dispositivo sobre el sujeto portador, se hizo coincidir el giro de este eje con el giro natural de la articulación en el plano sagital.



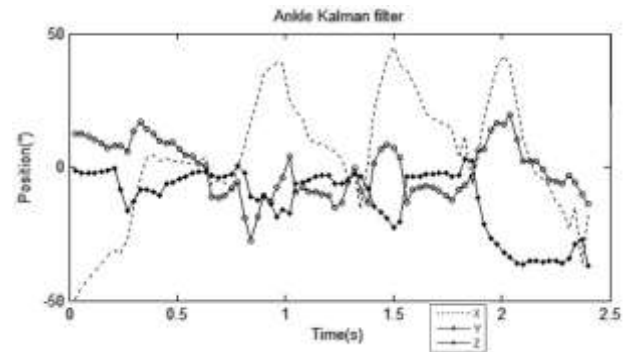
**Gráfico 10** Cadera filtro Kalman

*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 11** Rodilla filtro Kalman

*Fuente: Elaboración propia*



**Gráfico 12** Tobillo filtro Kalman

*Fuente: Elaboración propia*

## Conclusión

El artículo presenta el diseño de un sistema de adquisición de variables articulares para la cadera, rodilla y tobillo mediante sensores inerciales, así como una interfaz gráfica para visualizar los parámetros de posición, angular con respecto al plano sagital.

Se implementaron dos tipos de filtros en los datos obtenidos del IMU, para una apreciación de las señales más atenuadas que las que se observaban sin los filtros, debido al ruido y señales del sensor en su configuración por defecto se mezclan con los datos de interés y podrían llegar a causar confusión en el procesamiento de las señales.

En conclusión, el filtro complementario es simple de implementar pero es menos preciso en los resultados, en cambio el filtro de Kalman procesa los datos de manera más detallada y arroja información más real, sin embargo al ser más complejo, requiere mayores requerimientos de procesado.

Se obtuvieron las trayectorias para las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo con un sistema de 3 sensores inerciales (uno por articulación) conectados a arduino y módulos bluetooth para establecer comunicación con el ordenador de manera inalámbrica.

Además en la implementación del sistema de sensores en un sujeto residente de Nuevo León, México, se obtuvieron lecturas de cadencia que se aproximan a las registradas por los autores consultados, sin embargo se presenta una mínima diferencia, comprobando así la suposición de variación en cadencia en diferentes regiones geográficas.

### Trabajo a futuro

Como trabajo futuro los resultados obtenidos para la posición, velocidad y aceleración, se utilizaran como trayectorias de entrada del sistema de control que manipule un exoesqueleto asistente en rehabilitaciones para pacientes con problemas de paraplejia parcial (Lugo (2014); Geigle (2017); López-Camacho, Serna-Hernández, & Olguín-Camacho, (2016); Aguilar-Pereyra, Alvarado, Alegría, & Sosa, (2015)).

También se implementara un magnetómetro en el prototipo con la finalidad de implementar un filtro adicional a los utilizados y de esta manera obtener señales más atenuadas y precisas.

Se realizará el tratamiento matemático adecuado a las variables angulares obtenidas, para transformar los datos en coordenadas lineales y tener representaciones gráficas de señales filtradas equivalentes a las mostradas en este trabajo.

La información que se presenta en este artículo, también será de utilidad como datos de entrada en el desarrollo de robots bípedos que simulen el caminar humano. Generalmente estos robots tienen un patrón de andado con las rodillas flexionadas, por lo que se busca que su caminar sea más erguido, semejando la marcha humana (Liu (2016)).

### Referencias

Mazzà, C., Donati, M., McCamley, J., Picerno, P., & Cappozzo, A. (2012). An optimized Kalman filter for the estimate of trunk orientation from inertial sensors data during treadmill walking. *Gait and Posture*, 35(1), 138–142.

Mannini, A., & Sabatini, A. M. (2012). Gait phase detection and discrimination between walking–jogging activities using hidden Markov models applied to foot motion data from a gyroscope. *Gait & Posture*, 36(4), 657–661.

Djurić-Jovičić, M. D., Jovičić, N. S., Popović, D. B., & Djordjević, A. R. (2012). Nonlinear optimization for drift removal in estimation of gait kinematics based on accelerometers. *Journal of Biomechanics*, 45(16), 2849–2854.

Bergamini, E., Picerno, P., Pillet, H., Natta, F., Thoreux, P., & Camomilla, V. (2012). Estimation of temporal parameters during sprint running using a trunk-mounted inertial measurement unit. *Journal of Biomechanics*, 45(6), 1123–1126.

Yang, S., Zhang, J. T., Novak, A. C., Brouwer, B., & Li, Q. (2013). Estimation of spatio-temporal parameters for post-stroke hemiparetic gait using inertial sensors. *Gait and Posture*, 37(3), 354–358.

INEGI. (2013). “Estadísticas a Propósito Del Día De Las Personas Con Discapacidad” Datos Nacionales. *Inegi, 2012*(Enigh 2012), 1–17.

Yuan, Q., & Chen, I. (2014). Sensors and Actuators A: Physical Localization and velocity tracking of human via 3 IMU sensors. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 212, 25–33.

Yang, E. C. Y., & Mao, M. H. (2015). 3D analysis system for estimating intersegmental forces and moments exerted on human lower limbs during walking motion. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 171–179.

Lugo, E., Ponce, P., Molina, A., & Castro, S. (2014). Co-simulación del Diseño Biomecánico para un Exoesqueleto Robótico del Miembro Inferior. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 35(2), 145–158.

Jin, M., Zhao, J., Jin, J., Yu, G., & Li, W. (2014). The adaptive Kalman filter based on fuzzy logic for inertial motion capture system. *Measurement*, 49, 196–204.

Harlaar, J. (2014). Phases of gait and gait events: Some redefining. *Gait & Posture*, 39(2014), S100–S101.

Carlos, J., & Marinero, F. (2014). *Sistemas para determinar la posición y orientación de herramientas quirúrgicas en operaciones de cirugía laparoscópica*.

Hebenstreit, F., Leibold, A., Krinner, S., Welsch, G., Lochmann, M., & Eskofier, B. M. (2015). Effect of walking speed on gait sub phase durations. *Human Movement Science*, 43, 118–124.

Aguilar-Pereyra, F., Alvarado, J., Alegria, J., & Sosa, J. (2015). Mechatronic system to assist rehabilitation therapies for shoulder and elbow joints: Design, kinematic analysis, building and HMI . *Revista de Tecnología e Innovación*, 787-798.

Liu, J., & Urbann, O. (2016). Bipedal walking with dynamic balance that involves three-dimensional upper body motion. *Robotics and Autonomous Systems*, 77, 39–54.

Díaz, S., Gutiérrez, C., Valdés, D., & Hernández, B. (2016). Diseño y control en tiempo real de un brazo de robot mediante una interfaz virtual. *Revista Tecnología e Innovación*, 49-60.

Kitagawa, N., & Ogihara, N. (2016). Estimation of foot trajectory during human walking by a wearable inertial measurement unit mounted to the foot. *Gait and Posture*, 45, 110–114.

Chávez-Saenz, V., Torres-Ramírez, D., Herrera-Ogaz, J., & Hernández-Rodríguez, A. (2016). Adquisición y análisis de señales electroencefalográficas utilizando el dispositivo Emotiv EPOC+. *Revista de Tecnología e Innovación*, 107-118.

Esqueda-Elizondo, J., Hernández-Manzo, D., Bermudez-Encarnación, E., Jiménez-Beristáin, L., & Pinto-Ramos, M. (2016). Manipulación de un brazo robótico mediante señales electroencefalográficas. *Revista de Tecnología e Innovación*, 89-98.

Gonz, E. L. (n.d.). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. King, S. L., Barton, G. J., & Ranganath, L. R. (2017). Interpreting sources of variation in clinical gait analysis: A case study. *Gait & Posture*, 52, 1–4.

Hamacher, D., Hamacher, D., Müller, R., Schega, L., & Zech, A. (2017). Exploring phase dependent functional gait variability. *Human Movement Science*, 52, 191–196.

Geigle, P. R., & Kallins, M. (2017). Exoskeleton-Assisted Walking for People With Spinal Cord Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1–3.

## Instrucciones para autores

---

### [Título en Times New Roman y Negritas No.14]

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

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

#### **Resumen**

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

#### **Abstract**

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

#### **Keywords**

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

---

**Cita:** Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor. Título del Artículo. Título de la Revista. 2017, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

# Instrucciones para autores

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

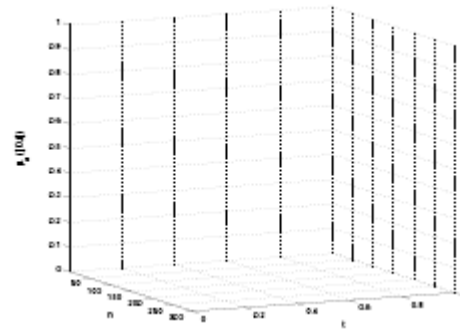
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

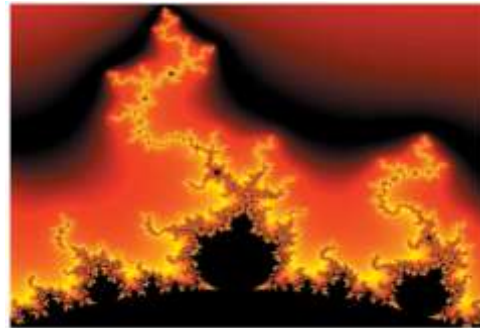
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]



**Grafico 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

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 Titulo 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

Referencias

**Formato de Originalidad**



Cusco, Perú a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

---

Firma (Signature):

---

Nombre (Name)

### Formato de Autorización



Cusco, Perú a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN- Perú 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- Perú 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 Ingeniería Innovativa

“Detección y mejora de tiempos en el flujo vehicular con semáforo inteligente controlador de tráfico para disminuir las emisiones de CO2”

**ESCOTO-SOTELO, E. A., ZAPIEN-RODRÍGUEZ, J. M., BURGARA-MONTERO, O. y BALLESTEROS-PACHECO, J. C.**

*Universidad Politécnica de Lázaro Cárdenas Michoacán*

“Implementación de eficiencia energética en la industria manufacturera en aserradero mediante la implementación de banco de capacitores”

**OVANDO-SIERRA, Juan, HUCIN-MISS, Mauricio, LEZAMA-ZARRAGA, Francisco Román y ACOSTA-PECH, Israel Del Jesús**

“Eficiencia energética en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche a través del diagnóstico energético”

**LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, CASTILLO-TÉLLEZ, Margarita y ANDRADE-DURÁN, Juan Edgar**

“Obtención de propiedades optoelectrónicas de celdas solares de Perovskitas por medio de simulación”

**ALMEIDA-DOMÍNGUEZ, Israel, ESPARSA, Diego y RIVAS-MARTÍNEZ, Jesús Manuel**

*Universidad Autónoma de Zacatecas*

“Reingeniería en el diseño de productos”

**CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás**

*Tecnológico Nacional De México  
Instituto Tecnológico de Morelia*

“Sistema de medición de la calidad de suministro eléctrico para planta solar fotovoltaica”

**AQUINO-ROBLES, José Antonio, FERNÁNDEZ-NAVA, Cecilia, y CORONA-R., Leonel G.**

*Instituto Politécnico Nacional*

“Diseño de un sistema de adquisición de variables articulares mediante sensores IMU”

**HERNANDEZ-SANTOS, C. y HERNÁNDEZ-TAFOYA, María Susana**

*Instituto Tecnológico de Nuevo León*

