

Diseño y construcción de un módulo automatizado para simulación de regímenes de carga de un banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel

Design and construction of an automated module for load regimes simulation of an electromechanical biodiesel performance test bench

ORTIZ-MEDINA, Raúl Arturo†*¹, MALDONADO-RUELAS, Victor Arturo¹, AGUIRRE-SÁMANO, Juan Fernando¹ y KAMARAJ - Sathish Kumar²

¹Universidad Politécnica de Aguascalientes

²Instituto Tecnológico el Llano Aguascalientes

ID 1^{er} Autor: Raúl Arturo, Ortiz-Medina / ORC ID: 0000-0002-2052-9003, Researcher ID Thomson: H-7174-2018, CVU CONACYT ID: 619788

ID 1^{er} Coautor: Victor Arturo, Maldonado-Ruelas / ORC ID: 0000-0003-2125-1557, Researcher ID Thomson: I-2774-2018, CVU CONACYT ID: 209649

ID 2^{do} Coautor: Juan Fernando, Aguirre-Sámano / ORC ID: 0000-0002-8064-6199, Researcher ID Thomson: I-4848-2018, CVU CONACYT ID: 246697

ID 3^{er} Coautor: Sathish Kumar, Kamaraj / ORC ID: 0000-0001-5145-6962, Researcher ID Thomson: B-3238-2010 CVU CONACYT ID: 404385

Recibido Enero 20, 2018; Aceptado Marzo 30, 2018

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y construcción del módulo de carga de un banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel. El banco consta de un motor diésel y un generador eléctrico, ambos de 3hp. Las máquinas están acopladas en sus ejes formando un sistema motor-generador, que está limitado a realizar pruebas en vacío. Para aumentar la funcionabilidad del banco, se adiciona un módulo de carga resistiva trifásica capaz de llevar al motor a cinco regímenes de carga con el 15, 22, 30, 45 y 85 por ciento. Las variaciones de carga simulan el esfuerzo mecánico al cual es sometido el motor diésel en aplicaciones cotidianas. El módulo tiene tres resistencias de 50 Ω por fase y un arreglo lógico de relevadores para cambiar la topología del circuito de acuerdo a los regímenes de carga del banco de pruebas. La activación lógica de los relevadores se realiza a través de un microcontrolador dsPIC30F4011 protegido ópticamente. El módulo de carga provee de seguridad y eficiencia al banco de pruebas de biodiesel, dando la posibilidad de observar los parámetros electromecánicos que describen cambios en la combustión del combustible del motor debido a variaciones de carga o del poder calorífico del combustible.

Diésel, Biodiesel, Parámetros Electromecánicos

Abstract

This work presents the design and construction of a load module for a biodiesel electromechanical performance test bench. The bench consists of a diesel engine and an electric generator, both of 3hp. The machines are coupled in their shafts forming a motor-generator system, which is limited to no load tests. To increase the functionality of the bank, a 5-phase three-phase resistive load module is added, which leads the engine to load rates of 15, 22, 30, 45 and 85%, simulating the mechanical stress to which the diesel engine is subjected in normal conditions. The module has three resistors of 50 Ω per phase and a logic set of relays to change the topology of the circuit according to the load regimes of the test bench. The logic activation of the relays take place through an optically protected microcontroller dsPIC30F4011. The load module provides safety and efficiency to the biodiesel test bench, giving the possibility to observe the electromechanical parameters that describe changes in the combustion of the engine fuel due to load variations or to modifications of the calorific value of the fuel.

Diesel, Biodiesel, Electromechanical Parameters

Citación: ORTIZ-MEDINA, Raúl Arturo, MALDONADO-RUELAS, Victor Arturo, AGUIRRE-SÁMANO, Juan Fernando y KAMARAJ - Sathish Kumar. Diseño y construcción de un módulo automatizado para simulación de regímenes de carga de un banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel. Revista del Desarrollo Tecnológico. 2018. 2-6: 8-14.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (raul.ortiz@upa.edu.mx)

Introducción

La diversificación de recursos energéticos se ha convertido en un tema de gran importancia debido a la alta demanda de combustibles fósiles y sus efectos en el medio ambiente, además de su posible escasez en el mediano plazo (Serna et al. 2011). Una alternativa para el reemplazo de los combustibles convencionales es el uso de biodiesel, procedente de fuentes biológicas como la biomasa, éste biocombustible cumple con las nuevas exigencias ambientales que regulan la reducción de emisiones de gases que provocan el efecto invernadero (Serna et al., 2011).

En este trabajo se aborda el diseño y la construcción de un banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel, planteado como un sistema para la evaluación de parámetros electromecánicos que determinan la funcionalidad de los motores diésel, cuando utilizan diferentes concentraciones de biodiesel como combustible (Rodríguez, 2008, Riba 2010).

La funcionalidad, así como el consumo de combustible, se obtienen sometiendo al banco de pruebas a diferentes condiciones de carga que simulan el comportamiento que tendría un motor diésel en un ambiente de trabajo normal (Rodríguez, 2010, Martín et al., 2015). Los motores diésel son los más utilizados en la industria, transporte y, en menor medida, en la generación de energía eléctrica (Jaipraditham, 2016).

El banco de pruebas consta de un motor diésel y un generador síncrono, ambos de 3hp. Las máquinas están acopladas en sus ejes formando un sistema motor-generador, que está limitado a realizar pruebas en vacío, es decir, al 0% de carga. La parte de diseño del presente trabajo, se encuentra en la automatización del sistema de carga trifásica del banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel, dado que un arreglo convencional de resistencias por fase en estrella cubriendo el total de la carga (Guru et al. 2003, Grainger, 1996), sólo soporta dos posibilidades: carga del motor al 100% y en vacío.

Para el banco de pruebas de rendimiento electromecánico del biodiesel se diseñó un sistema de cargas automatizado con variación de carga paulatina, que consta de valores intermedios entre 0 y 100 % con la capacidad de probar biodiesel con diferentes porcentajes de mezcla de combustible convencional con biocombustible, ya que el porcentaje de carga plena de un motor es variable cuando es alimentado por combustibles con diferentes poderes caloríficos (Rojas et al., 2012).

El presente trabajo está constituido de manera que, en la segunda sección de este trabajo se presenta la descripción general del banco de pruebas de rendimiento electromecánico. En la tercera sección se describe el diseño propuesto de la disposición de las cargas y la automatización de las mismas, así como su construcción e integración al banco de pruebas. Se realizan pruebas de funcionamiento con diésel y biodiesel, las cuales son descritas y comparadas en la cuarta sección. Finalmente se concluye el trabajo, con base en los resultados obtenidos.

Características del banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel

El banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel, consta de tres elementos principales motor diésel, generador síncrono y un banco de resistencias, los cuales se muestran en la figura 1. El acoplamiento mecánico de los primeros dos elementos forma un sistema motor-generador, que convierte la energía calorífica del combustible a energía mecánica a través del motor diésel (Wark et al., 2001), el movimiento generado es utilizado como energía entrante para el generador síncrono que transforma esa energía mecánica a energía eléctrica por medios electromagnéticos (Hayt et al., 2001).

El generador síncrono se acopla al motor diésel debido a que brinda un fácil control de la potencia de salida a través del sistema de carga, conformado por el banco de resistencias. De esta manera se reproduce el proceso de conversión de energía del motor diésel en vehículos de transporte, ya que la carga que conectada al generador síncrono exige potencia mecánica al motor diésel como lo haría un vehículo automotor.

El motor diésel del banco de pruebas es de arranque manual, con un ciclo de funcionamiento a 4 tiempos, de inyección directa, velocidad nominal de 1500 rpm y 3 hp. El motor maneja como lubricante aceite SAE 15W40 de alto rendimiento y nominalmente utiliza combustible diésel ultra bajo en azufre (UBA) que es el diésel comercial.

El generador síncrono es trifásico y consta de una conexión interna en estrella, valor nominal de frecuencia 60 Hz, voltaje de línea de 220V, potencia y velocidad nominales de 3 hp y de 1500 rpm respectivamente. Ambas máquinas tienen la misma velocidad nominal en sus ejes, manteniendo así la frecuencia eléctrica de 60 Hz, que es la frecuencia de operación en México.



Figura 1 Componentes del banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel
Fuente: Fotografía propia

La carga resistiva está constituida por un conjunto de 9 resistencias de 50 Ω y 400W cada una. El banco de resistencias se diseñó para colocar 3 resistencias por fase conectadas en paralelo, cuyo arreglo brinda una baja resistencia que exige al generador y asu vez al motor al 100%. Con dicho arreglo se tienen dos puntos de prueba de rendimiento del biodiesel: en vacío o 0% de carga y al 100% de carga (Navarro et al., 2017).

En estos dos puntos analizan los parámetros electromecánicos, que son voltaje generado, corriente, potencia, frecuencia, velocidad y par, cuyas lecturas y adquisición de datos se realizan con un analizador de redes y un tacómetro digital.

El análisis de los parámetros electromecánicos con el arreglo de las cargas en paralelo, presenta los extremos del rendimiento del motor diésel, es decir, ignora el comportamiento que tiene el motor en porcentajes de carga entre 0 y 100%, lo que provoca una lectura incompleta del comportamiento de las variables electromecánicas.

Para adicionar puntos de análisis del rendimiento del combustible utilizado en el motor, es necesaria la implementación de variaciones paulatinas en la carga a través de un control electrónico, que cambié el arreglo de resistencias de manera automatizada para que se realicen los cambios en el arreglo de resistencias sin conectar o desconectar conductores, salvaguardando así la seguridad del operador.

Diseño y construcción del sistema de carga automatizado

Para el diseño de las variaciones de carga, se estudiaron los diferentes arreglos de resistencia por fase posibles, para poder hacer combinaciones entre las tres resistencias por fase. Se llega a que se pueden generar cinco arreglos serie-paralelo en diferentes configuraciones satisfagan cinco diferentes condiciones correspondientes al 15, 22, 30, 45 y 85 % de carga, además de las existentes de 0 y 100%.

Para lograr las combinaciones de carga definidas debe de cambiarse el cableado de las resistencias de las tres fases, para pasar de un arreglo a otro, esto es inviable y peligroso, debido a que por seguridad del operador, no debe realizar ese cambio con el generador alimentado a la carga para evitar la electrocución.

Por otro lado, interrumpir la prueba apagando y encendiendo el motor puede resultar en un rendimiento erróneo del motor porque se somete a un régimen de trabajo atípico. Por estos motivos la automatización del proceso de cambio de carga se hace indispensable. A través de la automatización se brinda seguridad al operador y la tarea del recableado para el cambio en los arreglos, se reduce a oprimir un botón. Los cambios de carga se realizan por medio de relevadores acomodados de manera que con combinaciones de activación y desactivación, entreguen los cinco arreglos para cargar el generador síncrono.

La figura 2, muestra el arreglo por fase de resistencias de $50\ \Omega$ y relevadores R1, R2, R3 y R4 con los que realizan las diferentes combinaciones de resistencias.

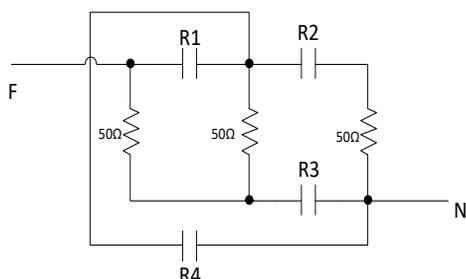


Figura 2 Diagrama del arreglo por fase de resistencias y contactores del módulo de carga del banco de pruebas.

Fuente: *Elaboración Propia*

Los relevadores de la figura 2 son activados o desactivados según se requiera para cada combinación de resistencias implementada. Quedando como resultado las cinco combinaciones mostradas en la figura 3, donde se observa en color rojo, la trayectoria del circuito que se genera, yendo desde la fase hasta el neutro con resistencias equivalentes de $150\ \Omega$, $100\ \Omega$, $75\ \Omega$, $50\ \Omega$ y $25\ \Omega$ que corresponden a los porcentajes de cargas mencionados anteriormente.

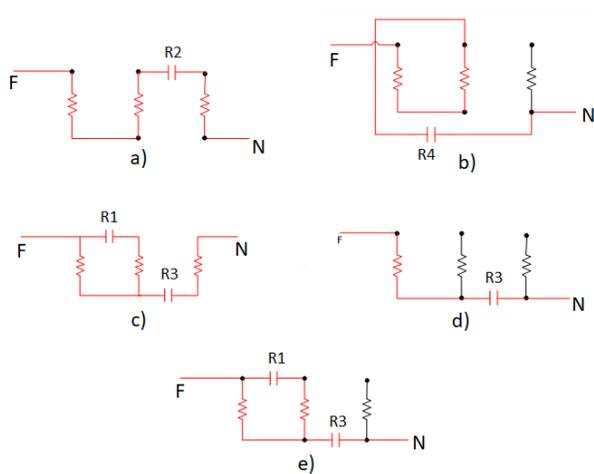


Figura 3 Combinaciones de activación y desactivación de los relevadores generar los arreglos de resistencias de a) $150\ \Omega$, b) $100\ \Omega$, c) $75\ \Omega$, d) $50\ \Omega$, y e) $25\ \Omega$ por fase

Fuente: *Elaboración Propia*

Para la activación de los relevadores, estos son colocados en una tarjeta electrónica diseñada para que se desempeñen de manera segura a través de un optoacoplador, que separa la parte de niveles lógicos de tensión y la parte de corriente alterna de $127\ \text{V}$ (Hart, 2001, Rashid, 2015).

Para el control de los relevadores se implementa un sistema que usa como unidad central de procesamiento (CPU, por sus siglas en inglés), un microcontrolador dsPIC30F4011, que es considerado como un dispositivo de alto desempeño, adecuado para aplicaciones de control de electrónica de potencia, motores y aplicaciones similares (Microchip, 2005).

El microcontrolador se programa para tener puertos de entrada de información, que físicamente corresponden a botones, que al ser oprimidos activan la señal para que los puertos de salida del microcontrolador se activen según sea la combinación de relevadores asignada a cada arreglo de resistencias. El sistema de control queda compuesto por doce relevadores distribuidos en tres tarjetas; una por fase, una tarjeta con la unidad central y una botonera que manipula la activación o desactivación de los relevadores.

El sistema incluye dos fuentes de $5\ \text{Vcd}$, una alimenta las tarjetas de activación de los relevadores y la otra al CPU del sistema. Cabe señalar que las tarjetas electrónicas fueron especialmente diseñadas e implementadas para esta aplicación particular, el sistema automatizado de carga se observa en la figura 4.

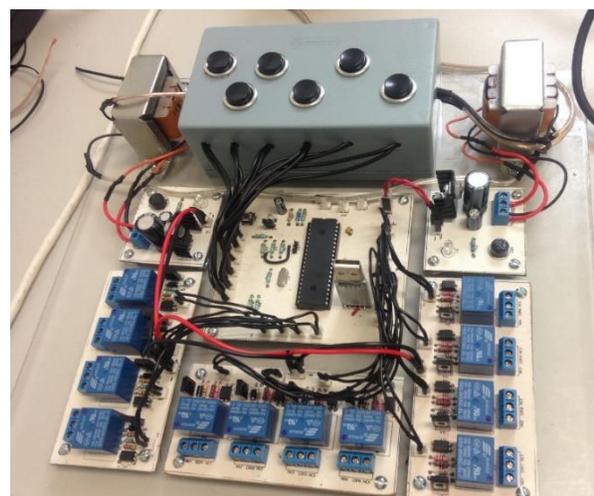


Figura 4 Sistema de control de carga implementado.

Fuente: *Fotografía Propia*

Por otro lado, se programó el microcontrolador con un algoritmo que, de manera cíclica, revisa el estado de los botones de activación de las condiciones de la carga, en caso de activación, el microcontrolador envía las señales a las tarjetas de relevadores para que se activen, generando así el arreglo de resistencias deseado.

También se desarrolló una rutina de activación continua, donde las cargas cambian de manera paulatina del 0 al 100 % pasando por los diferentes niveles de carga implementados.

Pruebas de rendimiento electromecánico de diésel y biodiesel

Las pruebas de rendimiento electromecánico se llevan a cabo integrando todos los elementos del banco de pruebas, como se muestra en la figura 5. Se inicia seleccionando el combustible, que debe de ser diésel o una mezcla de biodiesel con diésel a diferente porcentaje. El cople entre el motor y el generador lleva una parte opaca con una cinta blanca para medir la velocidad a través de un tacómetro óptico.

Las demás variables, se miden con un analizador de redes trifásico, que permite conocer y registrar los parámetros eléctricos de la salida del generador. Cuando el motor es encendido, se realiza la prueba en vacío, es decir, no se coloca ninguna resistencia a la salida del generador, es lo que registra en las mediciones en esta condición es lo que el motor consume sólo por estar encendido. Una vez que el motor llega a las condiciones de calentamiento normal, entra el sistema automatizado de carga, que lleva al motor a los porcentajes de carga de 15, 22, 30, 45 y 85 %.

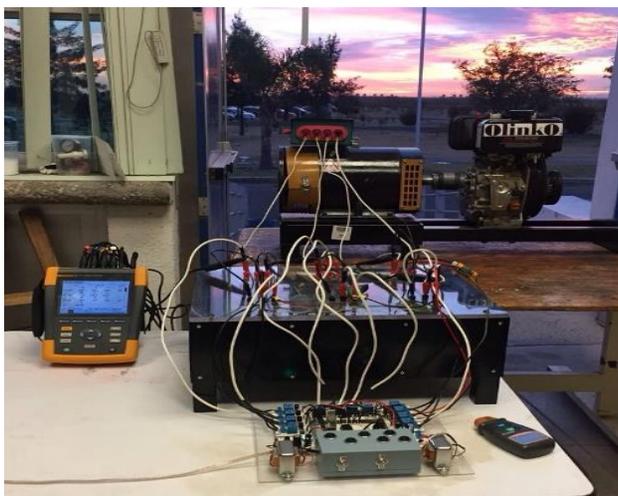


Figura 5 Banco de pruebas de rendimiento electromecánico de biodiesel operando con el sistema automatizado de carga.

Fuente: Fotografía Propia

Realizando el proceso descrito, se obtienen los parámetros electromecánicos que caracterizan el comportamiento del motor utilizando un combustible de poder calorífico específico.

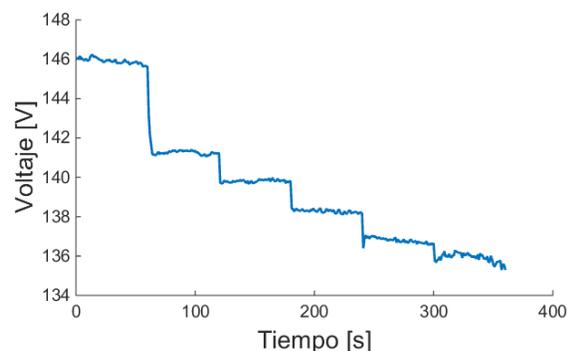


Gráfico 1 Voltaje de fase, en la prueba de rendimiento electromecánico del diésel

Fuente: Resultados Propios

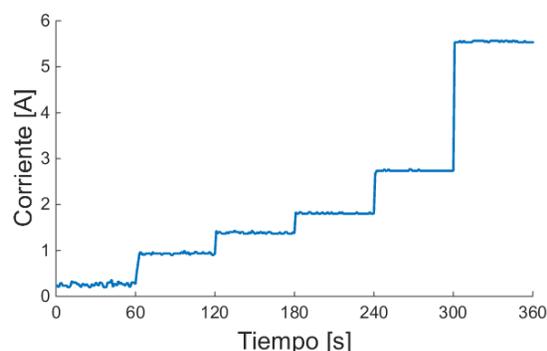


Gráfico 2 Corriente de línea, en la prueba de rendimiento electromecánico del diésel

Fuente: Resultados Propios

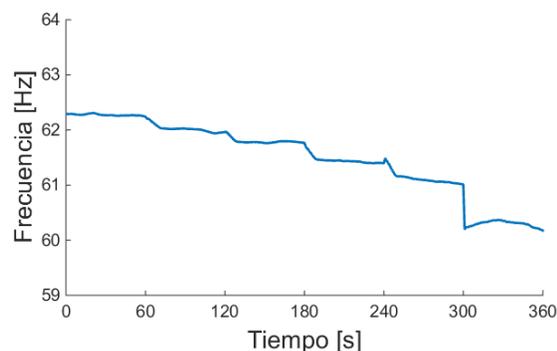


Gráfico 3 Frecuencia, en la prueba de rendimiento electromecánico del diésel

Fuente: Resultados Propios

Los gráficos 1, 2 y 3 corresponden respectivamente al voltaje del generador, la corriente para alimentar a la carga y la frecuencia eléctrica. En todos los gráficos se observa claramente el cambio de carga que se presenta cada 60 segundos, que van desde el vacío hasta el máximo nivel de carga. Durante esos lapsos de tiempo, los parámetros de voltaje, corriente y frecuencia se mantienen a un nivel, hasta que se presenta el siguiente nivel de carga accionado por el sistema automatizado de cambio de carga.

El voltaje, mientras la carga aumenta, las terminales del generador presentan caídas de voltaje, inherentes a la disminución de la velocidad del eje del motor producida por el aumento en la carga. La corriente, es también dependiente de la carga conectada al generador, mientras la carga crece, la corriente exigida al generador es mayor también, la potencia real tiene un comportamiento similar a la corriente, debido a que los cambios en el voltaje se presentan, pero en proporciones menores que en la corriente. El parámetro eléctrico de la frecuencia puede ser también considerado un parámetro mecánico, ya que la frecuencia y la velocidad guardan una relación directamente proporcional y sólo dependen de los polos de la máquina eléctrica, que es una constante. Mientras mayor es la carga, la velocidad del motor también disminuye.

El resultado de mayor relevancia en las pruebas de rendimiento electromecánico de los diferentes combustibles es la curva potencia-velocidad, que se genera a partir de estos dos datos. En estas gráficas se observa que mientras el motor es más exigido, es decir, que se extrae más potencia de él, su velocidad disminuye. Entonces el mayor rendimiento es de aquel que mantiene una velocidad mayor al estar sometido a la misma carga.

En el gráfico 4 se observa la comparación del rendimiento electromecánico de cuatro combustibles diferentes. El primer combustible es el diésel, marcado en azul. El diésel, como se esperaba es el que tiene el mayor rendimiento a través de los puntos de prueba, que corresponden a las cargas definidas por el sistema automatizado de cambio de carga. Las líneas naranja, amarilla y verde corresponden a concentraciones del 10, 20 y 25% de biodiesel, obtenido con base en aceites vegetales utilizados en frituras variadas.

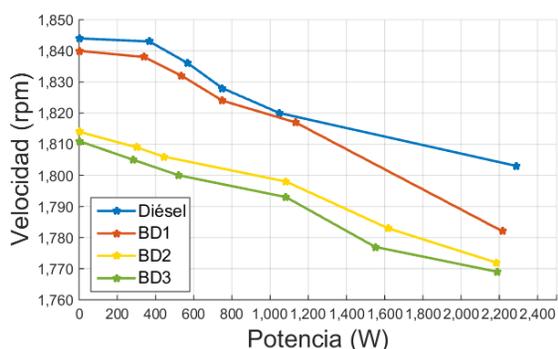


Gráfico 4 Comparación de las curvas de rendimiento electromecánico del diésel y mezclas de biodiesel.

Fuente: Resultados Propios

Conclusiones

En la Universidad Politécnica de Aguascalientes existe la producción de biodiesel a nivel didáctico y académico de investigación, pero no se contaba con el equipo necesario para realizar pruebas del producto terminado, atendiendo a esta problemática se desarrolló el banco de pruebas para la caracterización de parámetros electromecánicos de biodiesel en la misma universidad. Aunado a la implementación del banco se trabajó en el sistema de variación de carga, que en conjunto, ostentan una mayor capacidad de análisis del rendimiento del biodiesel generado. Así mismo, el banco de pruebas está al servicio de los productores locales de biodiesel, abriendo la posibilidad de vincular su producción con el sector académico y de investigación

Referencias

- Guru B. S., Hiziroglu H. R. (2003) Máquinas eléctricas y transformadores, Tercera edición, *Orford University Press*
- Grainger J. J., Stevenson, W. D., (1996) Análisis de sistemas de potencia, primera edición, *McGraw Hill*
- Hart D. W., (2001) Electrónica de potencia, primera edición, *Prentice Hall*
- Hayt W. H, Buck, J. A., (2001) Teoría electromagnética, séptima edición, *McGraw Hill*
- Jaipradidtham C., (2016) Energy cost reduction and potential analysis of diesel engine for electricity generation using biodiesel from oil palm-rice husk and pig manure with biogas renewable energy, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Melaka, 2016, pp. 378-383.
- Martin S. S., Chebak A., Barka N., (2015) Development of renewable energy laboratory based on integration of wind, solar and biodiesel energies through a virtual and physical environment, *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Marrakech, 2015, pp. 1-8.

Microchip, (2005) dsPIC30F4011/4012 High Performance Digital Signal Controllers, *Data Sheet, Microchip Technology Inc.*

Navarro M. F., Ortiz R. A., Aguirre J. F., Fregoso E. R., (2017) Diseño y construcción de banco de pruebas para la caracterización de biodiesel a través de parámetros electromecánicos, *Memoria de congreso XLI Semana Nacional de Energía Solar* en Guadalajara, Jal.,

Rashid M. H., (2015) *Electrónica de potencia*, Cuarta edición, *Pearson*,

Riba J. R., Esteban B., Baquero G., Puig R., Ruis A., (2010) Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diésel, *Revista afinidad*, Vol 67, No. 546

Rodríguez R. P., Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel., *Revista de Ingeniería Mecánica*, vol. 11, núm. 3., pp. 33-38, 2008.

Rodríguez R. P., Determinación del uso de biodiesel en el funcionamiento de motores diésel., *Revista CENIC Ciencias Químicas*, Vol. 41, pp. 57-58, 20 de enero de 2010

Rojas González, A., Chaparro Anaya, Óscar, & Ospina, C. (2012). Evaluación de mezclas biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica. *Ingeniería Y Universidad*, 15(2)

Serna F., Barrera L., Montiel H., (2011) Impacto social y económico en el uso de biocombustibles, *Journal of technology management and innovation*, Vol. 6, issue I

Wark K., Richards D. E. (2001) *Termodinámica*, Sexta edición, *McGraw Hill*