

Research Article

Renewable Energy Integration for Vehicles: Solar Energy and Green Hydrogen

Integración de Energías Renovables para Vehículos: Energía Solar e Hidrógeno Verde

Noemi Tatiana Quishpi Chasiluisa, Sonia Marisol Miranda Sánchez, Rafael Alexander Córdova Uvidia*, and Magdy Mileni Echeverría Guadalupe

Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

ORCID

Rafael Alexander Córdova Uvidia: <https://orcid.org/0000-0002-5326-3782>

VIII INTERNATIONAL
CONGRESS OF SCIENCE
TECHNOLOGY
ENTREPRENEURSHIP AND
INNOVATION (SECTEI 2021)

Corresponding Author: Rafael
Alexander Córdova Uvidia;
email:
rafael.cordova@espoch.
edu.ec

Published: 29 June 2022

Production and Hosting by
Knowledge E

© Noemi Tatiana Quishpi
Chasiluisa et al. This article is
distributed under the terms of
the [Creative Commons](#)
[Attribution License](#), which
permits unrestricted use and
redistribution provided that
the original author and
source are credited.

Abstract

This study demonstrates integration of renewable energies – solar energy and green hydrogen – for fueling vehicles. A scale prototype was tested – a vehicle that works with a reversible fuel cell, powered by photovoltaic energy, and whose operation is visible. The advantage of this method is that H₂ is produced in the vehicle itself. This experiment was carried out in the Laboratory of Smart Grids and Renewable Energies of the Faculty of Science of the Polytechnic High School of Chimborazo. For the statistical analysis, a 2² factorial design was used, where factor A was the charging time of the solar panel (5 min – 15 min) and factor B was radiation (low [at night or early in the morning] – high [midday]). The average maximum vehicle operating time was 162.37 s at the point (high radiation, 15 min). It is recommended that the internal polymeric membrane of the fuel cell should stay hydrated up to half its capacity.

Keywords: *Photovoltaic energy, Renewable energy, Fuel cell, Electrolysis, hydrogen, Solar panel.*

Resumen

El presente estudio demuestra una integración de energías renovables para vehículos: energía solar e hidrógeno verde, para lo que se experimentó con un prototipo a escala: un vehículo que funciona con una celda de combustible reversible, alimentada por energía fotovoltaica y cuyo funcionamiento es visible. La ventaja de esta versión es que la producción de H₂ se lleva a cabo en el propio vehículo. Este experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Para el análisis estadístico se utilizó un diseño factorial 2², donde el factor A fue el tiempo de carga del panel solar (5 min– 15 min) y el factor B la radiación (baja (tarde o temprano en la mañana) – alta (medio día)), el tiempo máximo promedio de funcionamiento del vehículo es 162,37 s en el punto (radiación alta, 15 min). Se recomienda que la membrana polimérica interna de la pila de combustible siempre permanezca hidratada hasta la mitad de su capacidad.

Palabras Clave: *Energía fotovoltaica, Energía renovable, Celda de combustible, Electrólisis, Hidrógeno, Panel solar.*

 OPEN ACCESS



1. Introducción

La quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) es uno de los factores más determinantes en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (CO_2) en la atmósfera; una alternativa para mitigar el cambio climático es la utilización de energía renovable. El H_2 es una fuente de energía renovable y al ser el más abundante en la naturaleza su importancia es aún mayor ya que permite obtener energía, electricidad y es un combustible que puede ser usado en motores o en células (pilas) llamadas electroquímicas e impulsar directamente vehículos al combustionar o generar electricidad a partir de una reacción electroquímica sin ocasionar daños en el medio ambiente [1].

Actualmente; casi el 88% de la economía energética depende de los combustibles fósiles [2]. La pandemia mundial que se está viviendo por la crisis del coronavirus (COVID-19), ha provocado varios bloqueos en la producción dando como resultado el quebranto de varios recursos como por ejemplo el decaimiento del precio del petróleo. La idea de frenar la recesión económica ha llevado a muchos países a enfocarse en sistemas eléctricos basados en energías renovables como son la instalación de paneles solares, turbinas eólicas, pilas de combustibles de H_2 entre otras opciones; las pilas de combustible muestran un funcionamiento impecable y con alta eficiencia [3].

La falta de energía en varias zonas con excesiva pobreza en el mundo ha llevado a la necesidad de crear ideas innovadoras, hoy en día la eficiencia de energía renovable ha logrado excelentes resultados y satisfacer de electricidad a varias personas. Los vehículos eléctricos que funcionan en base a pilas de combustible de hidrógeno han recibido una gran atención en todos los sectores del transporte [4]. En 2010, un primer prototipo de bus con 29 asientos que funciona en base a la energía del hidrógeno fue presentado en Brasil; la potencia de la pila de combustible utilizada fue 77,2 kW [5]. Grandes empresas tales como Hyundai han iniciado la producción en masa de vehículos tales como el Tucson ix35 y Nexo (2018) con eficiencias que alcanzan hasta el 60%, un rango de conducción de 415 km a 609 km y una durabilidad de hasta 10 años [4].

En octubre de 2020, la empresa ZeroAvia completó el primer vuelo en un avión de pasajeros utilizando pilas de combustible; el vuelo duró ocho minutos, y se alcanzó una altitud de 300 metros con una velocidad de 185 km/h [6]. Aplicaciones adicionales que incluyen la fabricación de pilas de combustible portátiles y trenes han sido desarrollados por Toyota y la Universidad de Birmingham [6]. Existen también submarinos que funcionan con pilas de combustible con una potencia eléctrica total de 300kW. El H_2 se

almacena como sólido en un compuesto de hidruro metálico; el agua que se produce a partir del combustible se puede utilizar como agua cruda a bordo del submarino [7].

Con el objetivo de demostrar la integración entre la energía solar fotovoltaica y las pilas de combustible de H_2 , se desarrolló el trabajo de titulación denominado “Recuperación de Agua del Proceso Electroquímico en la Producción de Hidrógeno Verde” en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias, y con el auspicio del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), bajo el programa de investigación “Building a Resilient Future for the Andean Paramo Ecosystem of Ecuador”. El problema que se estudió fue: ¿Cómo se puede integrar la energía renovable (solar) y el proceso electroquímico en pilas de combustible? [8].

2. Materiales y métodos

2.1. Experimentador de pilas de combustible de H_2

El equipo de laboratorio; tecnología de pilas de combustible, se encuentra en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias; este equipo permite realizar varios experimentos en una pila de combustible, consta de algunas partes: electrolizador, conjunto de pilas de combustible, contenedor H_2 , contenedor de O_2 , panel de conexión para el electrolizador, panel de conexión para el conjunto de pilas, panel de conexión para el resistor eléctrico (resistencia de carga variable, bombilla, electromotor).

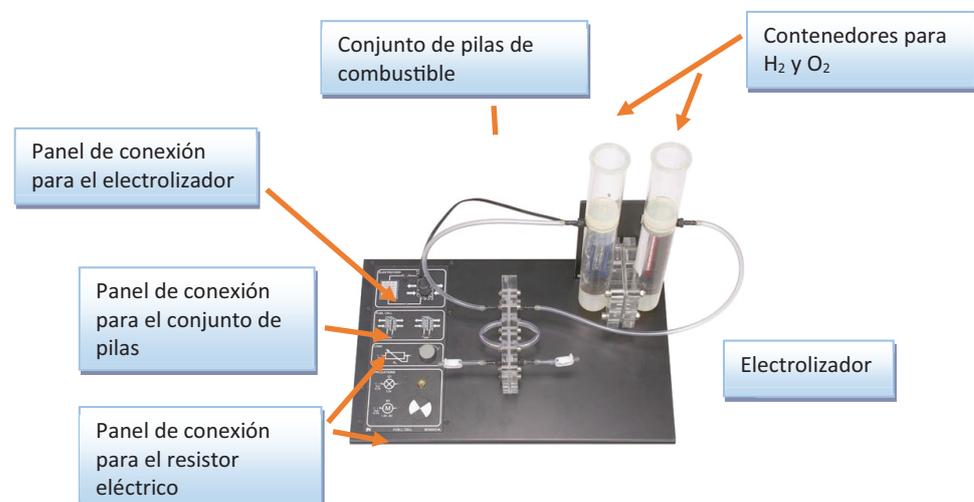


Figure 1

UniTrain-I SO4204-4L "Fuel Cell" 2010. Fuente: [9].



2.2. Pila de combustible reversible

Las pilas de combustible de electrolito de polímero o membrana de intercambio de protones (PEM) son una alternativa más eficiente para la obtención de H_2 con relación a las otras pilas de combustible debido a su simplicidad, viabilidad, rápida puesta en marcha y sobre todo por que poseen una membrana de polímero con características importantes: como su impermeabilidad a los gases, pero conducen protones. Las PEM que están compuestas por dos electrodos, un ánodo y un cátodo separados por un electrólito que facilita la transferencia iónica y funcionan a bajas temperaturas, debido a esto se utilizan en vehículos y generadores de energía en pequeña escala para casas. [10]. Las PEM reversibles realizan dos funciones: de un electrolizador y una celda de combustible en un sólo dispositivo por lo que permiten la obtención directa de electricidad, en donde el combustible es el H_2 o una mezcla rica en gases en H_2 ; obteniendo como subproducto agua 100% pura; las PEM reversibles tienen aplicaciones de automoción, generación de energía estacionaria distribuida en pequeña escala y para aplicaciones de energía portátiles [11].

2.3. Paneles solares

La energía solar es una energía renovable que se obtiene de una fuente natural e inagotable en este caso es la proveniente del Sol. Existe varias formas de recoger y aprovechar los rayos del sol para generar calor y electricidad [12]. Hay tres tipos de energía solar:

1. Fotovoltaica: transforma los rayos en electricidad mediante el uso de paneles solares.
2. Fototérmica: aprovecha el calor a través de los colectores solares.
3. Termoeléctrica: transforma el calor en energía de forma indirecta.

Una celda fotovoltaica es conocida como un material semiconductor fabricada con silicio, el silicio es el segundo elemento químico con mayor frecuencia en la corteza terrestre, un átomo de silicio posee cuatro electrones de valencia. En un cristal de silicio, cada dos electrones de átomos contiguos forman un enlace covalente. En este caso, el cristal de silicio no es un conductor eléctrico ya que carece de electrones libres que transporten energía. Si el cristal de silicio es sometido a la luz o al calor, este tipo de energía es absorbida por los electrones, si esta energía absorbida es suficiente, los electrones pueden abandonar sus enlaces covalentes y fluir libremente por el cristal de silicio, a este efecto se lo conoce como electrón "defecto o hueco". De esta forma

el silicio se convierte en un conductor de corriente, a este efecto se lo conoce como conductividad intrínseca de los semiconductores [13].

2.4. Automóvil con panel solar

Fabricado en Shanghai, China; este kit demuestra el funcionamiento de un sistema tecnológico de energía limpia en miniatura. Gracias un panel solar se alimenta un circuito eléctrico y se genera hidrógeno a través de la electrolisis del agua, este hidrógeno se convierte en electricidad gracias a una membrana de intercambio protónico, al ser visible la membrana, se puede observar su funcionamiento [14]. La ventaja de esta versión es que la producción de H_2 se lleva a cabo en el propio vehículo [15]. Se estima que para el año 2050 el uso de energía renovable, electrolisis y la necesidad de descarbonizar todos los sectores de las economías ayuden a las matrices energéticas y económicas del mundo a lucir más verdes [16].



Figure 2

Automóvil con panel solar. Fuente: [17].

Contenido de kit

1. Panel solar de 0,75Wp (vatio pico): Transforma la energía solar en electricidad.
2. Célula de combustible reversible: Conduce el H_2 y el O_2 a través de la pila sin que estos lleguen a mezclarse.
3. Chasis y ruedas del coche.



4. Motor eléctrico.
5. Leds parpadeantes.
6. Recipiente de agua.
7. Colectores de gases.
8. Jeringuilla: Sirve para llenar los contenedores de agua y también para inyectar agua a la pila de combustible PEM.
9. Tubos de silicona y cables.
10. Pack de pilas: Alimenta de Energia a la batería.

2.5. Efecto fotovoltaico

Al incidir la luz sobre la red cristalina, esta energía luminosa es transmitida a la red cristalina, este tipo de luz excita los átomos presentes en la red cristalina, en consecuencia, se generan pares de electrones, y huecos. Cuando esto ocurre fuera de la unión p-n, los pares de electrones y huecos se recombinan otra vez muy rápidamente, por otro lado, dentro de la unión p-n, los pares de electrones y huecos se separan por el efecto del campo eléctrico de la unión p-n, si conectamos una carga, entonces se puede comprobar que fluye corriente eléctrica por el sistema.

2.6. Diseño experimental

Para el automóvil de H₂ alimentado con energía solar se utilizó un diseño factorial 2²; se utilizó un factor cuantitativo que es el tiempo de carga del panel solar (5 min– 15 min) y un factor cualitativo que es la radiación (baja (tarde o temprano en la mañana) – alta (medio día)). Se realizaron tres repeticiones [18].

Variables independientes: El tiempo de carga del panel solar y la radiación

Variable dependiente: Tiempo de funcionamiento del vehículo

Hipótesis de interés

H₀: Efecto del tiempo de carga del panel solar (A) = 0

H_A: Efecto del tiempo de carga del panel solar (A) ≠ 0

H₀: Efecto de la radiación (B) = 0

H_A: Efecto de la radiación (B) ≠ 0

H₀: Tiempo de carga del panel solar x Radiación (AB) = 0

H_A: Tiempo de carga del panel solar x Radiación (AB) ≠ 0



Table 1

Medición del tiempo de funcionamiento del vehículo de H2 en función del tiempo de carga del panel solar y la radiación

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F0	Valor P
Radiación	SC _A	1	CM _A	CM _A /CM _E	P(F>F ₀ ^A)
Tiempo	SC _B	1	CM _B	CM _B /CM _E	P(F>F ₀ ^B)
Efecto AB	SC _{AB}	1	CM _{AB}	CM _{AB} /CME	P(F>F ₀ ^{AB})
Error	SC _E	8	CM _E		
Total	SC _T	11			

Fuente: [8].

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i.}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$$

2.7. Materiales

Vehículo de hidrógeno

Pila de combustible reversible

Panel solar

Agua destilada

2.8. Procedimiento

1. Conectar el panel solar a la pila de combustible, dejar cargar durante el tiempo establecido



2. Una vez transcurrido el tiempo de carga desconectar el panel, y conectar el motor del vehículo a la pila de combustible
3. Medir el tiempo de funcionamiento del vehículo

3. Resultados y Discusión

Table 2

Resultados del experimento: Medición del tiempo de funcionamiento del vehículo de H2 en función del tiempo de carga del panel solar y la radiación.

		B: Radiación						
A: Tiempo de carga del panel solar		Baja			Alto			Total $Y_{i..}$
		5	10,66	10,74	10,33	56,10	53,48	
15		41,12	39,15	40,65	179,45	140,10	167,55	608,02
	Total $Y_{.j.}$	152,65			655,42			$Y_{...} = 808,07$

Fuente: [8].

n = 3
a = 2
b = 2

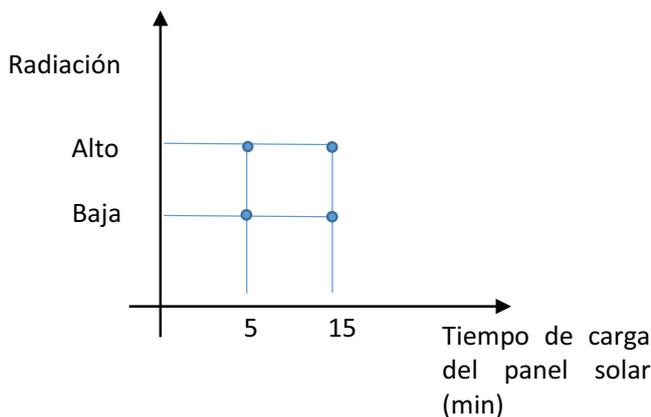


Figure 3

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N} = \sum_{i=1}^2 \frac{(200^2 + 608,02^2)}{2 \times 3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 13866,626$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N} = \sum_{j=1}^2 \frac{(152,65^2 + 655,42^2)}{2 \times 3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 21064,806$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$$



$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{(31,73^2 + 120,92^2 + 168,32^2 + 487,1^2)}{3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3}$$

$$-13866,626 - 21064,806 = 4395,964$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^3 94572,714 - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 40157,954$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$$

$$SC_E = 40157,954 - 13866,626 - 21063,279 - 4395,964$$

$$SC_E = 832,0$$

Table 3

ANOVA para el diseño factorial a x b.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	Valor P	F _{crítico}
A: Tiempo de carga del panel solar	13869,96	1	13869,96	133,59	0,0000029	5,31
B: Radiación	21064,81	1	21064,81	202,89	0,00000057	5,31
AB	4395,631	1	4392,63	42,31	0,000187	5,31
Error	830,55	8	103,81			
Total	40157,95	11				

Fuente: [8].

La radiación afecta significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable debido a que el valor p se encuentra en la zona de rechazo es decir es menor al nivel de significancia 0,05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.



Debido a que el valor p es menor al nivel de significancia 0,05 se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula razón por la cual se comprobó que el tiempo de carga del panel solar afecta significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable. Ya que valor p se encuentra en la zona de rechazo y es menor al nivel de significancia 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa razón por la cual se comprobó que tanto la radiación como el tiempo de carga del panel solar afectan significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable

4. Conclusiones

Se experimentó en un vehículo a escala que funciona a base de pilas de combustible de hidrógeno, la ventaja de esta versión es que la pila de combustible es reversible por lo que la producción de H_2 se lleva a cabo en el propio vehículo. Al aplicar el diseño factorial 2^2 , donde el tiempo de carga del panel solar es el factor A, y la radiación es el factor B, se observó que incluso en días nublados el panel solar tenía la capacidad de generar la suficiente energía para poner en funcionamiento al vehículo. Con este tratamiento se demuestra que se puede integrar los dos tipos de energía: la energía renovable (solar) y la energía del H_2 proveniente de la electrólisis del agua.

5. Agradecimientos

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), y al laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables por permitir realizar esta investigación.

6. Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses en la presentación del presente trabajo.

References

- [1] Alejandra Martins. BBC News Mundo. Cambio climático: los fenómenos adversos a los que se enfrentará América Latina, según el contundente informe de la ONU. 13, agosto, 2021. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58191363>.



- [2] Peng L, Wei Z. Catalyst Engineering for Electrochemical Energy Conversion from Water to Water: Water Electrolysis and the Hydrogen Fuel Cell. *Engineering* [Internet]. 2020;6(6):653–79. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.028>
- [3] IRENA. Post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality. June2020. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Post-COVID-Recovery>
- [4] Li W, Long R, Chen H, Chen F, Zheng X, He Z, et al. Willingness to pay for hydrogen fuel cell electric vehicles in China: A choice experiment analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [Internet]. 2020;(xxxx):1–8. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.046>
- [5] Miranda, P.E.V.; Carreira ES. Brazilian Hybrid Electric Fuel Cell Bus. 18th World Hydrogen Energy Conference. 2010;2(6):1–5.
- [6] University of Birmingham. Fuel Cells Bulletin. HydroFLEX train in first UK mainline trial. *Fuel Cells Bulletin*. 2020;2020(10):5-7.
- [7] Pichonat T. MEMS-Based Micro Fuel Cells as Promising Power Sources for Portable Electronics. *Micro Fuel Cells*. Volume 1, Chapter 2. 2009.
- [8] Miranda S, Quishpi N. Recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*; 2021.
- [9] LUCAS-NÜLLE GmbH. Sistemas de capacitación en energías renovables. Lucas Nülle, Germany. 2010.
- [10] Asensio, JA y otros. Pilas de combustible de Membrana Polimérica. *Revista Afinidad LXVIII*. Julio-agosto 2011.
- [11] Barbir F. PEM Fuel Cells - Theory and Practice 2nd Edition. Elsevier. ISBN 9780123877109. September 25, 2012.
- [12] Energía Solar. *Energía Solar* [Internet]. Twenergy, España. 14 de enero de 2020. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energia-solar/>
- [13] Lucas Nülle GmbH. Curso Unitrain “Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos.” *Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos*. Lucas Nülle, Alemania. 2010.
- [14] Horizon Educational. Fuel Cell Car Science Kit. Praga, Chequia, 2020. <https://www.horizoneducational.com/fuel-cell-car-science-kit/p1232#product-downloads>
- [15] Thames & Kosmos. Fuel cell X7 hydrogen powered car. In: *Fuel cell X7 hydrogen powered car*. Rhode Island, 2007. p. 17.
- [16] Correa, Max A; Barría, Carlos Q; Maluenda BP. Hidrógeno Verde [Internet]. *Energía*. 2020. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_chile.pdf



- [17] Horizon Educational. Fuel Cell Car Science Kit Assembly Guide. Praga, Chequia, 2020. <https://www.horizoneducational.com/document/download?ids=1398>.
- [18] Gutiérrez H, de la Vara Salazar R. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Edición. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill Interamericana, México. 2007