

ISSN 2523-6873

Volumen I, Número 4 – Octubre – Diciembre - 2017

# Revista de Ingeniería Innovativa

**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 4, de Octubre a Diciembre 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 Diciembre 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 *Generador de energía eléctrica venturi para automóviles* por PÉREZ-VILLEGAS, Manuel, TENORIO-CRUZ, Fermín, TÉLLEZ-HERNÁNDEZ, Rubén y CELIS-CHONCOHA, José Miguel con adscripción en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco, como siguiente artículo está *Diseño de salidas de un Estanque Piscícola Automatizado Demostrativo (ESPAD)* por ORTÍZ-RAMÍREZ, Carlos Artemio, MENDOZA-CRISÓSTOMO, Patricia, ZAYAS-PÉREZ, Ricardo, LUCERO-ÁLVAREZ, Cupertino, SOLANO-PALAPA, Nathaly, BELTRÁN-ROMERO, María de Lourdes y MERINO-VIAZCÁN, Janet con adscripción en la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, como siguiente artículo está *Análisis de penetración de dureza para un acero High Speed Steel (HSS), tratado termicamente con temple y revenido* por SERVIN-CASTAÑEDA, Rumualdo, CALDERÓN-RAMOS, Ismael, BARRERA-MORENO, Mario Alberto, SAN MIGUEL-IZA, Sandra María y GONZÁLEZ-ZARAZUA, Roberto Aldo con adscripción en la Universidad Autónoma de Coahuila y la Universidad Tecnológica de la Región Centro de Coahuila, como siguiente artículo está *Diseño de una cámara de impacto para evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos* por CERVANTES-TOBÓN, Arturo, GARCÍA-MENDOZA, Yulisa, SANGINEZ-MARTÍNEZ, Nanci Brenda y RAMÍREZ-MORALES, Cristhian Jesús con adscripción en el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, como siguiente artículo está *Diseño de un “Cople Porta-Probeta” para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento* por DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett con adscripción en la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez y el Instituto Politécnico Nacional, como siguiente artículo está *Aerogenerador ALISIO* por FLORES-SÁNCHEZ, Verónica, SHETTINO-GARCÍA, David Israel, SCHETTINO-GARCÍA, Martín Darío y JUÁREZ-BORBONIO, Jesús con adscripción en la Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, como siguiente artículo está *Foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados* por JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, José A., TOVAR-PÉREZ, Juan Pablo, NIEVES-ORTÍZ, Alfredo y SANTILLÁN-CONTRERAS, Luis Ángel con adscripción en la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez y el Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de Grupo Jumex, como ultimo articulo presentamos, *¿Cómo mejorar los modelos RNAs usando análisis estadístico?*, por ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana & COLORADO-GARRIDO, Darío, con adscripcion en la Universidad Veracruzana

## Contenido

Artículo	Página
<b>Generador de energía eléctrica venturi para automóviles</b> PÉREZ-VILLEGAS, Manuel, TENORIO-CRUZ, Fermín, TÉLLEZ-HERNÁNDEZ, Rubén y CELIS-CHONCOHA, José Miguel	1-6
<b>Diseño de salidas de un Estanque Piscícola Automatizado Demostrativo (ESPAD)</b> ORTÍZ-RAMÍREZ, Carlos Artemio, MENDOZA-CRISÓSTOMO, Patricia, ZAYAS-PÉREZ, Ricardo, LUCERO-ÁLVAREZ, Cupertino, SOLANO-PALAPA, Nathaly, BELTRÁN-ROMERO, María de Lourdes y MERINO-VIAZCÁN, Janet	7-17
<b>Análisis de penetración de dureza para un acero High Speed Steel (HSS), tratado termicamente con temple y revenido</b> SERVIN-CASTAÑEDA, Rumualdo, CALDERÓN-RAMOS, Ismael, BARRERA-MORENO, Mario Alberto, SAN MIGUEL-IZA, Sandra María y GONZÁLEZ-ZARAZUA, Roberto Aldo	18-24
<b>Diseño de una cámara de impacto para evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos</b> CERVANTES-TOBÓN, Arturo, GARCÍA-MENDOZA, Yulisa, SANGINEZ-MARTÍNEZ, Nanci Brenda y RAMÍREZ-MORALES, Cristhian Jesús	25-32
<b>Diseño de un “Cople Porta-Probeta” para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento</b> DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett	33-40
<b>Aerogenerador ALISIO</b> FLORES-SÁNCHEZ, Verónica, SHETTINO-GARCÍA, David Israel, SCHETTINO-GARCÍA, Martín Darío y JUÁREZ-BORBONIO, Jesús	41-47
<b>Foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados</b> JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, José A., TOVAR-PÉREZ, Juan Pablo, NIEVES-ORTÍZ, Alfredo y SANTILLÁN-CONTRERAS, Luis Ángel	48-53
<b>¿Cómo mejorar los modelos RNAs usando análisis estadístico?</b> ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana & COLORADO-GARRIDO, Darío	54-65

*Instrucciones para Autores*

*Formato de Originalidad*

*Formato de Autorización*

## Generador de energía eléctrica venturi para automóviles

PÉREZ-VILLEGAS, Manuel†\*, TENORIO-CRUZ, Fermín, TÉLLEZ-HERNÁNDEZ, Rubén y CELIS-CHONCOHA, José Miguel

*Universidad Tecnológica de Tecamachalco, Avenida Universidad Tecnológica 1, Barrio la Villita, 75483 Tecamachalco, Pue*

Recibido 3 de Octubre, 2017; Aceptado 8 de Diciembre, 2017

### Resumen

Objetivo: Este proyecto busca aumentar la autonomía de los autos eléctricos mediante un dispositivo eólico eléctrico que permite la generación de energía eléctrica adicional que puede almacenarse directamente en la batería y de esta manera aumenta la carga y con ello el tiempo de autonomía de los autos. Este proyecto busca disminuir el nivel de contaminación del aire en las principales ciudades de México [1]. Metodología: Mediante un sistema venturi se aprovecha la energía eólica que se genera con el movimiento del automóvil, esta energía se aprovecha con un generador que se encuentra conectado a un arreglo de motor y multiplicador de velocidad, que finalmente, aprovecha un motor inductor o alternador para alimentar la batería de un automóvil eléctrico. Contribución: Este proyecto aumenta la autonomía de los autos eléctricos y ayudaremos al medio ambiente, generando energía eléctrica sustentable y limpia.

### Venturi, Eólico, Batería, Generador, Alternador

### Abstract

Venturi electric power generator for cars. Objective: This project seeks to increase the autonomy of electric cars by means an electric eolic device that allows the generation of additional electrical energy that can be stored directly in the battery and in this way increases the load and thus the autonomy time of the cars. This project seeks to reduce the level of air pollution in the main cities of Mexico [1]. Methodology: Using a venturi system takes advantage of the eolic energy generated by the movement of the car, this energy is used with a generator that is connected to a motor arrangement and speed multiplier, which finally takes advantage of an inductor motor or alternator to power the battery of an electric car. Contribution: This project increases the autonomy of electric cars and will help the environment, generating sustainable and clean electric energy.

### Venturi, Eolic, Battery, Generator, Alternator

**Citación:** PÉREZ-VILLEGAS, Manuel, TENORIO-CRUZ, Fermín, TÉLLEZ-HERNÁNDEZ, Rubén y CELIS-CHONCOHA, José Miguel. Generador de energía eléctrica venturi para automóviles. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:1-6

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mantenimiento-utt@outlook.es)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Actualmente los autos generan un gran daño al medio ambiente por sus altos contaminantes de gas que dañan a la capa de ozono.

La industria automotriz en todo el mundo se encuentra desarrollando autos eléctricos como una respuesta a este problema. Estos autos no generan contaminantes y cada día aumenta su producción a nivel mundial, empresas como Tesla Motors, propiedad de Elon Musk, son las que avanzan en la punta y están desarrollando autos eléctricos más eficientes y económicos.

Pero el problema de generación de energía eléctrica persiste, porque el auge de los autos eléctricos trae consigo una mayor demanda de energía eléctrica, la cual requiere de diversos medios para su generación, desde combustibles fósiles hasta energías renovables alternativas y esto continúa siendo un problema. Ya se están desarrollando autos con celdas solares como una alternativa de solución, de esta manera, se puede aumentar la autonomía en un alto porcentaje.

## Justificación

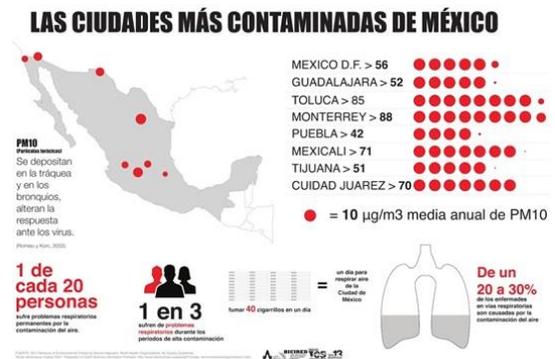
Este proyecto pretende contribuir a la reducción de contaminantes, se trata de un sistema eólico montado en un auto eléctrico que le permite generar energía eléctrica con el mismo movimiento del auto, almacenándola en la batería y aumentando la autonomía del auto.

Con esta contribución se puede aumentar la eficiencia del automóvil, haciendo uso de la energía renovable eólica, sin afectar el medio ambiente y contribuyendo al futuro de las siguientes generaciones.

## Problema

El problema de la contaminación generada por los automóviles es muy grande y es en todas las ciudades del mundo.

Específicamente en México, para sorpresa de muchos, la Ciudad de México no es la urbe más contaminada del país, de acuerdo con la base de datos 2016 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la contaminación y la calidad de aire.



**Figura 1** Ciudades más contaminadas de México. Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2016.

La ciudad más contaminada de México es Monterrey, que presentó el índice más alto de partículas nocivas durante el 2016.

El estudio realizado por la OMS mide los niveles de partículas menores a 10 micras (PM10) registradas anualmente en una entidad y Monterrey se colocó en el primer lugar de la lista al registrar en ese periodo 88 PM10, seguido de Toluca con un promedio de 85 PM10.

En este proyecto se retoman ideas y acciones tomadas por la empresa Tesla Motors, quien es una de las son encargadas de revolucionar al área automotriz con automóviles cien por ciento ecológicos y con autonomías cada vez mayores. Este proyecto pretende incrementar esa autonomía en beneficio del medio ambiente y de los usuarios de los autos eléctricos.

## Objetivos

### Objetivo General

Diseñar un sistema eólico que permita a un automóvil eléctrico ser amigable con el medio ambiente, siendo sustentable y aumentando su autonomía de viaje.

### Objetivos específicos

- Diseñar el Sistema eólico a base de una configuración de motores, generadores y variadores de velocidad.
- Realizar pruebas en un auto convencional y tomar lecturas de voltaje.
- Construcción de prototipo físico para realizar pruebas y cotización del proyecto.

### Marco Teórico

Resulta irónico que las primeras energías que el ser humano utilizó en su beneficio fueran las que ahora llamamos renovables y consideradas como futuras fuentes de energía. Con el descubrimiento de los recursos fósiles empezó una auténtica revolución energética al poder transformarlos en una energía más eficiente y barata.

Esta indiscriminación en su uso ha creado una alarma mundial, la contaminación, que ha llevado a la expresión con la que ya nos levantamos todos los días, el calentamiento global: desertificación de zonas húmedas, deshielo de los polos, cambios climáticos en general. Por este motivo se aprobó el famoso protocolo de Kyoto, en diciembre de 1997, donde al menos 55 países se comprometían a reducir las emisiones de gases responsables del efecto invernadero. Por este motivo nuestro empeño en transformar las energías naturales en un sustituto de las fósiles.

La energía eólica constituye una de las fuentes de energía renovable con mayor potencial de desarrollo, tanto por su técnica avanzada como por su viabilidad económica. Asimismo, es una de las fuentes de energía más interesantes para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Actualmente se pueden encontrar en el mercado máquinas eólicas en una amplia gama de potencias, desde el centenar de vatios (microeólica) hasta el millar de kilovatios (macroeólica), con aplicaciones tan diversas como el accionamiento de bombas de agua para riego, la producción autónoma de electricidad o la generación de energía eléctrica a gran escala (parques eólicos). Los avances de la tecnología eólica han permitido disponer de máquinas capaces de trabajar a buen rendimiento en lugares con distribución de velocidades bastante comunes.

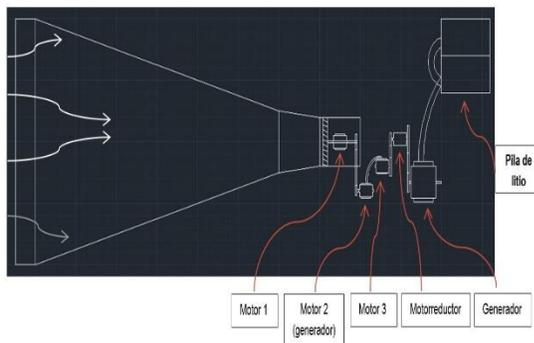
La energía eólica ha experimentado importantes progresos técnicos y económicos. Se han mejorado significativamente aspectos tales como la gestión y el mantenimiento, la integración de la energía eléctrica en la red, la adaptación del diseño de aerogeneradores a las características de los emplazamientos, la regulación y control, la predicción de producción a corto plazo y la economía de escala con una mejora de los costes de inversión y de producción eléctrica. También se ha iniciado el desarrollo de la energía eólica marina que ya ha demostrado su viabilidad técnica y económica.

Para este proyecto se diseñó una turbina capaz de ser movida con la fuerza del aire generado por el mismo automóvil cuando se encuentra en movimiento. La turbina estará conectada a un motor inductor, el cual genera electricidad que se almacena en la batería. Adicionalmente, se pueden agregar paneles solares en el techo del vehículo para que la carga sea aún más rápida.

Actualmente ya existen carros que tienen paneles solares en el techo pero aún son muy costosos, dichos paneles aumentan la eficiencia de los autos eléctricos en un alto porcentaje. Este proyecto pretende ser un complemento para aumentar aún más la autonomía de esos autos, recordamos que para aprovechar la luz solar son solo 11 horas al día y en días lluviosos o con nubes estos paneles no generan buena carga, con la ayuda de la turbina, la pila seguirá cargando sin depender del sol.

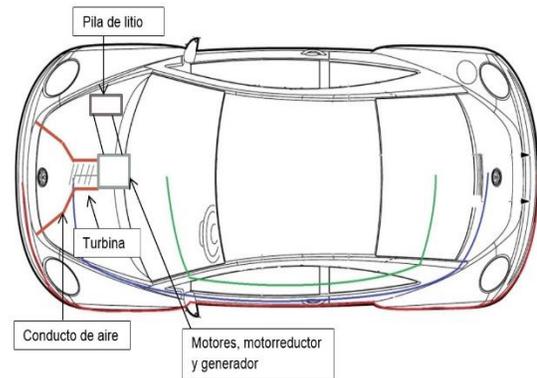
### Desarrollo del proyecto

En la primera parte del proyecto se desarrolló el sistema de transmisión de potencia, desde la turbina eólica hasta la pila de litio.



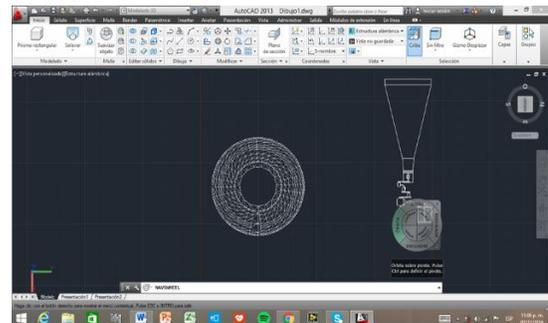
**Figura 2** Distribución de motores, motorreductor y generador

La fuerza del aire que entrará por el ducto hará que la fuerza motriz del aspa comience girar y a mover el motor 1, que va conectado a las aspás, como si fuera chumacera. El segundo motor es de 12 VCD conectado al motor 1 por medio de una banda, que hace las funciones de generador, la energía que éste proporcione será enviada al motor 3 de 12VCD. El motor 3 estará conectado al motorreductor 1/10, para finalmente conectar el motorreductor al generador de 110 v y 5000 watts y de ahí a la batería de litio.



**Figura 4** Disposición del equipo en el auto

A continuación se plantea como quedaría el diseño del automóvil, aclarando que sería un automóvil eléctrico. En la parte delantera se planea instalar la turbina con el eje junto al mecanismo diseñado.



**Figura 5** Diseño del prototipo

Se realizaron pruebas con un prototipo que se fabricó en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco y se instaló en la parte superior de un auto convencional de combustión interna, realizando mediciones a diferentes velocidades, comprobando que efectivamente se puede generar energía eléctrica y puede almacenarse en la batería.



**Figura 6** Construcción del prototipo.



**Figura 7** Pruebas del prototipo en auto de combustión interna

## Resultados

El costo de realizar el proyecto se resume en las siguientes tablas:

No.	Material	Piezas	Precio
1	Lámina galvanizada (Calibre 26")	1 1/2	\$900.00
2	Remaches	1	\$20.00
3	Cuadrado de 1" (para base)	1	\$150.00
4	Soldadura	6 pzs	\$20.00
5	Tornillos	3 pzs	\$10.00
6	Buje central de bicicleta	1	\$45.00
7	Pintura	1/4	\$50.00
<b>Total:</b>			<b>\$1,195.00</b>

**Tabla 1** Materiales para la turbina.

Los costos promedios de los materiales para el generador son los siguientes:

No.	Material	Piezas	Precio
1	Motor VCD 12 V (Actúa como generador)	1	\$150.00
2	Motor VCD 12 V (Es movido por mecanismo)	1	\$150.00
3	Motor VCD 12 V (Es alimentado por motor generador)	1	\$300.00
4	Motor reductor (1 a 6 vueltas)	1	\$250.00
5	Alternador modificado o motor inductor(120 v)	1	\$4000.00
6	Controlador de carga	1	\$800.00
7	Pila de litio	1	\$10,000.00
<b>Total:</b>			<b>\$15,650.00</b>

**Tabla 2** Materiales para el generador

Con el desarrollo e implementación de este proyecto se pretende un gran paso en el cuidado del medio ambiente, disminuyendo la contaminación en el planeta. Se trata de un pequeño aporte, pero sumando esfuerzos se logrará un gran impacto.



**Figura 8** Generación de 10 VCD a 80 kph

Los resultados son satisfactorios y este proyecto se encuentra en perfeccionamiento para mejorar sus condiciones de fabricación y operación, para que en un futuro no muy lejano, se haga una realidad en muchos autos eléctricos.

### Conclusiones

Este proyecto puede generar energía eléctrica a partir de la energía eólica, para aumentar la carga de la batería en la autonomía de un auto eléctrico. Con el prototipo desarrollado, se consiguió generar 10 VCD a una velocidad de 80 kph.

Concluimos que es viable y estamos trabajando para mejorar el prototipo, hacerlo más eficiente y económico.

### Referencias

Miguel Villarrubia López. (2004). *Energía eólica*. Ediciones CEAC, Grupo Planeta. Barcelona.

Javier Martín Jiménez. (2014). *Energía Solar Fotovoltáica y Energía Eólica*. 1ª edición, EDITOR ANTONIO MADRID VICENTE. A Coruña, España:

Miguel Villarrubia López. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. España: 1ª edición, Editorial MARCOMBO, S.A.

Gilberto Enríquez Harper. (2005). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. 1ª edición, Editorial Limusa. México.

Organización Mundial de la Salud. (2016). Contaminación del aire en México 2016. Mayo 30, 2017, de UNO TV. Sitio web: <http://www.who.int/gho/es/>

## Diseño de salidas de un Estanque Piscícola Automatizado Demostrativo (ESPAD)

ORTÍZ-RAMÍREZ, Carlos Artemio†\*, MENDOZA-CRISÓSTOMO, Patricia, ZAYAS-PÉREZ, Ricardo, LUCERO-ÁLVAREZ, Cupertino, SOLANO-PALAPA, Nathaly, BELTRÁN-ROMERO, María de Lourdes y MERINO-VIAZCÁN, Janet

*Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Prolongación Reforma 168, Santiago Mihuacán, 74420 Izúcar de Matamoros, Puebla*

Recibido 24 de Octubre, 2017; Aceptado 19 de Diciembre, 2017

### Resumen

ESPAD se divide en cuatro etapas, en la primera determinamos requerimientos y damos asistencia técnica a productores, la segunda es de salidas, incluye la implementación de celdas fotovoltaicas y las ventajas de tener una fuente de energía limpia. La tercera etapa describe detalladamente el proceso de producción y su automatización, así como la seguridad, tanto del equipo como del producto de mojarra Tilapia, con una cerca eléctrica, en la Cuarta etapa se capacita a productores en el uso y manejo de todo lo implementado. En la etapa dos, analizamos la respuesta a la entrada de las magnitudes físicas propias del estanque, la temperatura solo capturamos y almacenamos datos para análisis estadístico. Para el pH accionamos válvula solenoide para drenar el estanque y reducir la acidez. Para oxigenar el agua se deja correr y se implementa una fuente. Implementamos un dosificador de alimento con horarios, cantidades y llamado. Estas reacciones a sensores y temporizadores son las salidas o actuadores del sistema. Simultáneamente almacenamos datos para estudio estadístico y determinar las condiciones idóneas de producción.

### Automatización, control, salidas, actuadores

**Citación:** ORTÍZ-RAMÍREZ, Carlos Artemio, MENDOZA-CRISÓSTOMO, Patricia, ZAYAS-PÉREZ, Ricardo, LUCERO-ÁLVAREZ, Cupertino, SOLANO-PALAPA, Nathaly, BELTRÁN-ROMERO, María de Lourdes y MERINO-VIAZCÁN, Janet. Diseño de salidas de un Estanque Piscícola Automatizado Demostrativo (ESPAD). Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:7-17

### Abstract

ESPAD is divided into four stages, the first determines the requirements and gives technical assistance to producers, the second is outputs, includes the implementation of photovoltaic cells and the advantages of having a clean energy source. The third stage describes in detail the production process and its automation, as well as the safety of both the equipment and the product of scissors Tilapia, with an electric fence, in the stage of the fourth stage of capacitance in the use and handling of everything implemented. In step two, it analyzes the response to the input of the physical quantities of the watertightness, the temperature only captures and stores the data for the statistical analysis. For the pH we drive the solenoid valve to drain the sealing and to reduce the acids. To oxygenate the water to let run and to execute a source. We implemented a food dispenser with schedules, quantities and call. These reactions to the sensors and timers are the outputs of the system actuators. Simultaneously we store the data for the statistical study and determine the ideal conditions of the production.

### Automation, control, outputs, actuators

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: carlos70@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El desarrollo en la tecnología en la última década del siglo pasado y en lo que va de este siglo se da en manera exponencial, Es la era del internet de todo donde cualquier proceso de la vida cotidiana.

Estas tecnologías han aportado importantes elementos al mundo académico en general, por lo que se las ventajas que las TIC se extienden al campo de la Automatización.

## Justificación

Una de las actividades productivas de la región de Izúcar de Matamoros son centros piscícolas con especies endémicas. Estos centros piscícolas son austeros en tecnología. En la Magdalena, operan estanques de tilapia con sistemas tradicionales de producción, es decir, sin el menor indicio de tecnificación. No están establecidos procedimientos para la alimentación o adecuadas condiciones para el mejoramiento de las especies, incluso en la mayoría de los centros, no cuenta con el suficiente conocimiento de la correcta alimentación de cada especie.

## Problema

Los productores de Mojarra Tilapia de la comunidad de la Magdalena llevan a cabo la crianza de mojarra en un proceso manual. El comité de la comunidad o encargados del estanque deben estar monitoreando constantemente de manera presencial las condiciones del estanque y de los peces. El proceso de alimentación es manual, se deben dar dosis preestablecidas de alimento cada determinado tiempo, mismas que son variadas de acuerdo a los tiempos y disposición de cada responsable del comité, obviamente existe descuido por sus diversas ocupaciones, aunado a las condiciones climáticas.

Los encargados de los estanques cambian anualmente, son 42 socios y cada uno debe ser responsable, para un encargado que en un año está obteniendo experiencia, es cambiado y en 42 años volverá a ser encargado, cada uno de ellos da de comer, cuida y mantiene los estanques según el considere es lo idóneo, los estanques no son rentables por todo lo anterior planteado, tienen una producción que beneficia a todas las familias una vez al año y las pocas ganancia que obtienen son empleadas, para que el próximo año puedan volver a sembrar.

## Hipótesis

Podemos mostrar que en dicho proceso se puede captar las diferentes magnitudes físicas por medio de sensores, de ahí procesar la información y de acuerdo a datos establecidos (Roldán, 2005) en artículos científicos de la producción de mojarra, (Arredondo, 1996) comparar en una memoria del dispositivo a implementar para determinar qué acción tomar y mandarla a un actuador. Es decir automatizar el proceso. En donde el usuario establece los parámetros a controlar y los rangos establecidos de acuerdo a las condiciones idóneas de la mojarra tilapia, horarios y cantidad de alimento de forma automática, sin importar que esté o no presente dicho encargado. Con este sistema buscamos hacer un estudio local de acuerdo a los datos obtenidos y analizados estadísticamente, donde podremos ir variándolos para una mayor producción.

Una vez establecida y fundamentada esta tecnología, procederemos a transferirla a los productores y capacitarlos y así no importa quién sea el encargado las condiciones estarán hechas solo para administrar.

## Objetivos

### Objetivo General

Adquirir datos para monitorear parámetros físico-químicos y biológicos del agua en estanque y por medio de actuadores mantenerlos dentro de un rango de sus valores adecuados.

### Objetivos específicos

Controlar el nivel de pH del estanque de acuerdo a la lectura del sensor, accionar una válvula solenoide para quitarle acidez al estanque.

Controlar la oxigenación del agua del estanque de acuerdo a la lectura del sensor y accionar una bomba sumergible que al aventar el agua la oxigena.

Accionar un dispensador de alimentos con las cantidades exactas de acuerdo a la cantidad de producto y en horarios donde mejor se aproveche.

### Marco Teórico

El proyecto ESPAD se desarrolla en estanques de productores de Tilapia en la comunidad de La Magdalena, municipio de Tepeojuma, realizando la automatización de solo un estanque midiendo tres variables y controlando los horarios de alimentación de manera automática (Arredondo, 1996), Se trabajó con las siguientes variables:

**Temperatura:** Para la especie en cuestión, i.e. mojarra tilapia se prefieren temperaturas elevadas. Por ello su distribución se restringe a áreas cuyas isotermas de invierno sean superiores a los 20°C. El rango natural oscila entre 20°C y 30°C, pudiendo soportar temperaturas menores. La primera variable es la temperatura, la tilapia está en un ambiente ideal a los 24°C por lo que el control debe tener como mínimo una temperatura de 18°C.

**Oxígeno disuelto:** La tilapia puede vivir en condiciones ambientales adversas pues soporta bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Ello se debe a la capacidad de su sangre a saturarse de oxígeno aun cuando la presión parcial de este último sea baja. Asimismo, la tilapia tiene la facultad de reducir su consumo de oxígeno cuando la concentración en el medio es bajo (inferior a 3 mg/l). Si esta concentración disminuye aún más, su metabolismo se vuelve anaeróbico. En el prototipo, cuando el oxígeno disuelto alcanza el nivel de 3 mg/l se enciende una luz para indicar este valor mínimo y se activara una válvula la cual permitirá drenar el estanque y dejara llenar con agua rodada para que pueda alcanzar 8 mg/l y la válvula se desactiva.

**Acidez:** El rango conveniente del pH del agua para piscicultura oscila entre 7 y 8, por lo que se recomienda permanecer en este rango. Cuando el sensor detecta un pH de 8.1 por ejemplo, se enciende una sirena y una luz que indica un valor arriba del valor máximo permitido y debe ser apagada por el operador. El pH se controla en este caso vaciando el estanque por la parte más profunda y agregando agua limpia. Esto se logra automáticamente al activar una válvula solenoide de desagüe hasta un nivel mínimo, y encendiendo una bomba después del vaciado para que alcance el nivel de agua normal, momento en el que la bomba se desactiva.

**Alimento:** la última parte del proceso es la alimentación (Toledo-Pérez, 1998) automática.

Se sugieren horarios de comida para la mojarra tilapia y lugares donde se debe aplicar el alimento, ya que es un animal que se acostumbra al lugar donde hay comida, es decir si se llega a cambiar el lugar en el mismo estanque donde se aplica la comida estas podrían dejar de comer, por lo que el alimentador automático, se debe instalar en el lugar en donde ya se le esté aplicando la comida, en el caso de los estanques ya establecidos. Sin embargo, se pueden modificar cuidadosamente los horarios y cantidades de alimento, con el fin de mejorar la producción. Otra ventaja subyacente es el ahorro de alimento.

### Metodología de Investigación

Cualquier proyecto aplica la metodología ciclo de vida (E. KENDALL, 2005), En el caso de ESPAD se aplica ésta metodología y pasa por las siguientes fases y/o etapas:

#### a. Planificación conceptual

La planificación conceptual es la primera fase del ciclo de vida del desarrollo de cualquier sistema. En esta fase, se define el sistema propuesto, determinando alcance del proyecto y las limitaciones de factores como los recursos, presupuesto y tiempo.

#### b. Definición de requisitos

Después de establecer el alcance del proyecto, se trabaja con los usuarios finales para definir los requisitos del sistema (aplicaciones) y después para verificar los requisitos y conseguir la validación por parte de los usuarios.

#### c. Diseño

En esta fase se transforman los requerimientos en requisitos técnicos. Inicialmente, se crea un diseño técnico preliminar para tratar todos los requisitos, de aplicación, etc.

Cuando el diseño preliminar ha terminado, los desarrolladores hacen un diseño técnico detallado, que define todas las funciones técnicas necesarias para implementar el sistema.

#### d. Desarrollo y pruebas

Los participantes comienzan a desarrollar el proyecto actual. Esto incluye creación de software, hardware y toda la arquitectura adecuada que requiera el sistema.

Las pruebas empiezan después de terminar la construcción de todos los componentes. Se asegura la calidad, se verifica que el sistema reúna los requisitos usando un plan de pruebas detallado.

Las principales etapas para la realización del sistema espacial son:

- Adquirir.
- Comprar, construir, reutilizar.
- Ensamblar, integrar: unir todas las piezas.
- Verificación y validación. Verificación: responde a la pregunta, ¿se construyó el sistema correctamente?
- Validación: ¿se construyó el sistema correcto?

#### e. Puesta en marcha

Durante la puesta en marcha, se arranca el sistema, para empezar a utilizarlo. Se proporciona la documentación del sistema a los usuarios finales, donde se detalla cómo usar el sistema. La capacitación también es una parte importante de la fase de puesta en marcha. Las sesiones de capacitación deberían ser planteadas para cada grupo de usuarios.

#### f. Operaciones y mantenimiento

El sistema pasa a modo de operación total. Se controla el sistema para asegurar que esté cumpliendo los requisitos pedidos. Además, de realizar mantenimiento periódico para asegurar que el sistema sigue funcionando como se espera. También se proporciona asistencia técnica para el sistema y resuelve los problemas que pueden presentarse.

#### g. Disposición

Esta fase proporciona una serie de pasos sistemáticos para finalizar el sistema y asegura que la información vital se mantenga para los proyectos futuros o las necesidades tanto del sistema como de los usuarios. Además, la correcta disposición del sistema es necesaria para asegurar que los componentes, datos, software y hardware se disponen de forma adecuada.

### Diseño, Instalación y puesta en marcha del sistema de salida

De acuerdo al proyecto y a la etapa estipulada para sus posibles aplicaciones, se dividirá el estado del arte en cuatro partes, mismas que en este proyecto pueden ser utilizadas juntas o por separado, simplificando el Estado del arte o antecedentes a lo ya realizado en cada una de las posibles áreas de implementación. Debe quedar claro que aquí empleamos transferencia de tecnología.

Para realizar ésta parte del proyecto, lo dividiremos en tres partes, la primera será la alimentación del sistema automático y de la cerca electrificada, la segunda es el control de salidas y la tercera nos enfocaremos a la cerca electrificada

### Sistema de alimentación fotovoltaico Aislado

Aquí se cubre las soluciones integradas que de las necesidades de generación, almacenamiento y suministro de electricidad a partir del sol (ARENAS SÁNCHEZ, 2011).

El calor y la luz del sol son energía renovable que puede aprovecharse por medio de captadores como celdas fotovoltaicas, que transforman y generan la electricidad, se encargan de transformar la radiación solar en energía eléctrica. El sistema ideal a usarse donde no es posible interconectarse a la red de CFE, como nuestro caso que es en estanques fuera de la zona rural y se requiere electricidad. De acuerdo a las necesidades ver figura 3.1, se hizo un estudio de dimensionamiento para obtener el sistema que requiere.



Figura 1 Diagrama de sistema fotovoltaico aislado

Donde en el punto:

**1** Fuente de generación. Un panel fotovoltaico convierte la radiación solar en corriente eléctrica. Aprovechando al máximo las condiciones climáticas de la región.

**2** Este controlador permite controlar la carga de las baterías para evitar una sobrecarga o una descarga excesiva.

**3** En las baterías de ciclado profundo almacenamos la energía, de esta forma tenemos reserva durante la noche o en días de poco sol.

**4** Este dispositivo convierte la energía generada en los paneles, o la almacenada en las baterías, que es directa, en corriente alterna que es la misma que usamos para nuestros equipos eléctricos a 110 VCA.

Así es como podemos conectar nuestro computador o controlador, y alimentar a los sensores y actuadores.

5 Nuestro generador solar nos entrega suficiente electricidad para que funcionen todos los aparatos eléctricos y dispositivos electrónicos.

Proceso de Control para las salidas

De acuerdo a lo estudiado se determinan las variables: Set Point: pH. 7.5; DBO 3 mg/l (p.p.m.); T 18-28 °C; Alimentación dosificada, 3 veces al día.

ENTRADAS Y SALIDAS: dispone de dos sensores, uno de pH y otro de temperatura como entradas y un arreglo temporizado incorporado a la tarjeta CPU que se puede ajustar para controlar los requerimientos de oxígeno disuelto (CINDA ELECTRONICA, 2013). A la salida tiene dos válvulas solenoides que se abren y cierran simultáneamente para ajustar el rango de acidez. Una de ellas es para desaguar y la otra para incorporar agua limpia. Para la temperatura solo se utilizaran como datos estadísticos y determinar temporadas de producción.

Diagrama de flujo, diagrama eléctrico y diagrama unifilar.

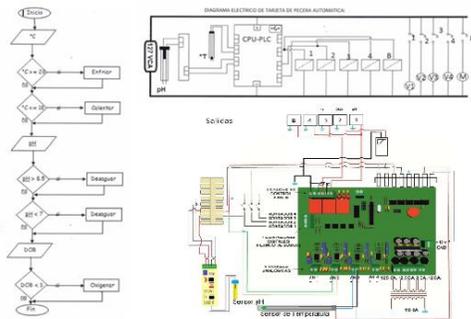


Figura 2 Diagrama de flujo, eléctrico y unifilar

Descripción del software

Para empezar a utilizar el prototipo de estanque piscícola es necesario conectar el dispositivo a una fuente de voltaje de 110 volts.

Una vez conectado se debe verificar que el primer LED que está junto a las conexiones periféricas y viendo de arriba hacia abajo como se muestra en la figura 3.2 en el diagrama unifilar esté parpadeando en color rojo; otra forma de cerciorarse es que el sistema también emitirá un sonido cuando haya sido activado; eso indica que el dispositivo está listo para configurarse.

El usuario se conecta mediante cable USB de dispositivo a computadora. Se ejecuta el programa ProgADQ, que es la interfaz que requiere el dispositivo para realizar el monitoreo y control. Después de abrir el programa, como se muestra en la Figura 3.3, se debe visualizar el HUD [Head-Up Display] para iniciar la configuración estrictamente necesaria de los dispositivos de control.

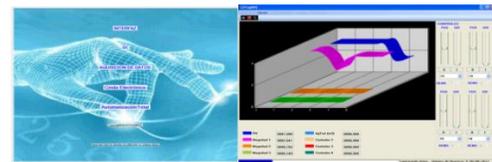


Figura 3 Arranque y Visualizador de controles

En la parte superior izquierda del HUD se encuentra el menú Herramientas, donde se tienen los 4 tipos de configuración necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.

Configuración del puerto serie. En esta opción se elige que puerto USB dispondrá para que el dispositivo envíe los datos de muestreo a su computadora. Se puede modificar la velocidad de bits por segundo y la cantidad de bits de datos (según las necesidades) pero se recomienda dejar las configuraciones de serie como muestra la figura 3a.

Configuración de Parámetros. En éste menú se tiene la opción de modificar el tiempo de muestreo que tienen los canales del programa. Por default todos los canales están gobernados por el mismo periodo.

Para que el usuario obtenga las lecturas deseadas, es necesario activar los canales de transmisión, teniendo presente que el programa cuenta con 4 canales analógicos. El número de canales y su tiempo de muestreo estarán en función de las necesidades del usuario como se muestra en 3b.

Configuración de Reloj en tiempo real. En esta opción se debe configurar la fecha y hora, con la finalidad de que el muestreo esté ordenado en el archivo de Excel que el mismo programa genera en tablas (variables vs. número de muestras).

Configuración de Parámetros de control.- Esta es la configuración más importante. En el menú se despliega tres casillas que corresponden a los canales de transmisión de datos; Al activar las casillas, los controles manuales también lo hacen y es posible manipularlos, se puede proponer, por ejemplo, un paso de 0.08 para modificar los valores de set point. Finalmente se debe activar la casilla que tiene la etiqueta “Tarjeta 1”, para que se puedan obtener las lecturas a través de la tarjeta de adquisición de datos.

Para iniciar el muestreo basta con dar clic en el tercer botón, una vez que esto se hizo, empezará a desplegarse en la parte central del HUD una gráfica que muestra las variables por canal que el usuario dispuso. Finalmente se debe señalar que para más información del uso del programa interfaz ProgADQ, se cuenta con el manual de usuario.

A manera de sumario, primeramente se deben asegurar las conexiones correspondientes. Una vez configurado el programa se inicia la lectura de datos con el botón “Iniciar lectura”, botón en forma de flecha Fig. 3.4a; o en el menú “Opción” e “Iniciar lectura”. El botón de detener lectura se muestra en Fig. 3.4b.

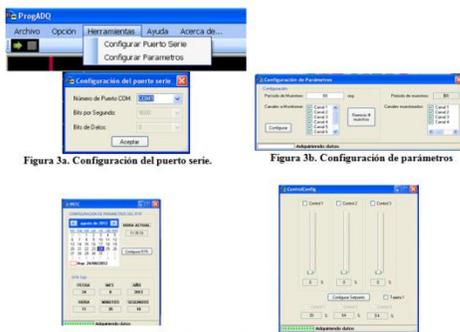


Figura 3a. Configuración del puerto serie.

Figura 3b. Configuración de parámetros

Figura 3c. Configuración del reloj en tiempo real.

Figura 3d. Control de salidas a rele

Figura 4 Ventanas de configuración Monitoreo

Una vez establecidas las configuraciones es posible comenzar el monitoreo. Es importante aclarar que no se pueden hacer ambas cosas al mismo tiempo.



Figura 5 Botón de adquisición de datos, opción de iniciar lectura

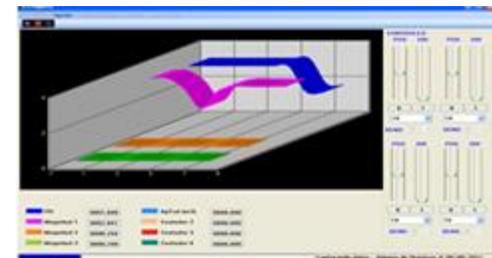


Figura 6 Modo de Captura de datos

**Dibujos del Prototipo**

En la figura 3.5 se muestra el esquema final del prototipo así como los diagramas de proceso de las tres variables a considerar, temperatura, pH y oxígeno disuelto.

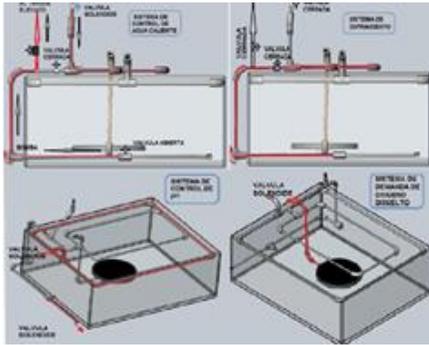


Figura 7 Dibujos del prototipo y diagramas de proceso

### Cerca electrificada

Una cerca electrificada está formada por un energizador o pulsador alimentado por una fuente de energía fotovoltaica. Este pulsador eleva el voltaje hasta 15000 volts pero con niveles de corriente muy bajos ya que su función es solo la de proporcionar un choque eléctrico sin consecuencias fatales. Este efecto de choque funciona solo si hay una conexión directa a tierra, que debe ser muy firme. La conductividad aumenta si el suelo es húmedo. En el alambre se transportan los pulsos de corriente a lo largo de todo el cerco.

Para realizar una buena instalación dividiremos en 10 pasos:

1) Verificar que el área de la cerca esté limpia y libre de plantas si el equipo es convencional, ya que estas pueden funcionar como puente entre el pulsador y la tierra y reducir el efecto de choque deseado.

El diagrama del perímetro es el siguiente:

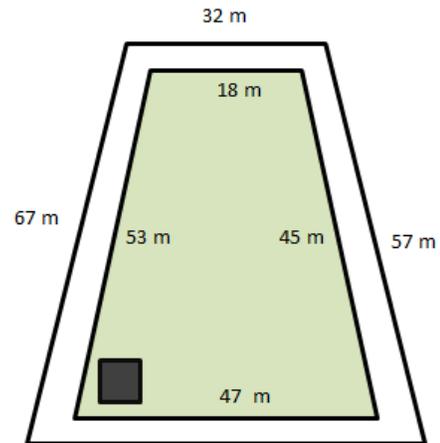


Figura 8

### El diagrama del perímetro

Para cubrir el perímetro con tubo cada 3 m requerimos de 130 tubos. Cada tramo de tubo Metálico de  $\frac{3}{4}$ " para agua cedula 30, tiene 6.0 m. de largo. Salen tres postes por tramo de tubo Se requieren 75 tubos de 2 m necesitamos 25.

Lo mismo para tubo de 1" para agua cedula 30. Salen 2 postes por tramo de tubo Se requieren 6 tubos de 3.0 m tenemos que comprar 3.

Se requiere hacer con Tubos una puerta con candado, Tubo adicional o según el material que requiera para hacerla. 1 kg de alambre galvanizado cal 14 tiene 40m de largo. Como requerimos la distancia de 350m de la periferia por 9 líneas son un total de 3150m, se requiere un total de 78.75 kg de alambre.

2) Usar alambre calibre a4 al 18 galvanizado recocido en pares (4, 6, 8). Fijar el equipo en un lugar limpio y techado, cerca del interruptor general de energía y toma de agua. Y se usan dos tipos de poste (Fig. 3.7):

Postes de esquina: soportan la estructura del cerco. Su posición es en las esquinas o cada 25 m en línea recta

Postes de paso: Permiten el paso de los pulsos eléctricos

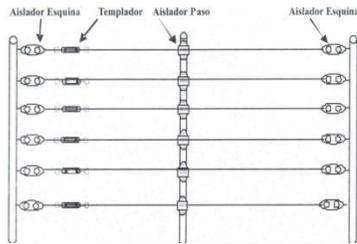


Figura 9 tipos de poste

Para que el cercado eléctrico sea continuo se debe puentear como se muestra en la figura 3.8. No se muestra la tierra física.

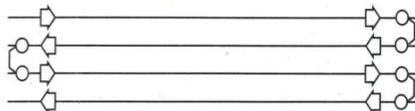


Figura 10 puente del cercado

3) Conectar la mariposa central a una tierra física eficiente.

En los energizadores existen tres terminales: la fuente de alto voltaje o salida, la terminal de retorno y la tierra física, (tubo de agua, varilla coperwell) con cable calibre 14 AWG, para alto voltaje y no a más de 15 metros del cercado. Conexión de tierra física. En la figura 3.9 muestra que el cercado es alimentado desde la parte superior, hasta la línea 1, sin conectar la línea 2, ya que esta se empleará para la tierra física.

El número de líneas a energizar debe ser par ya que una línea extra debe usarse para la tierra física, y esta debe tocar cada poste, ya que es muy importante que la línea de tierra sea corto circuitada a través de los aisladores a los tubos que la sujetan, lo que significa que esta línea es parte de la postería. Este puente de tierra física debe tocar los postes.

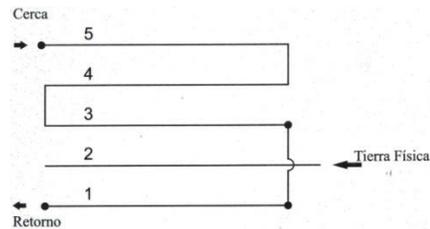


Figura 11 Conexión de tierra física.

4) Conectar las mariposas laterales a las dos entradas de la cerca con cable doble aislado o THW. Los conductores de alto voltaje, el de alimentación y el de regreso deben estar separados por lo menos 20 cm. y aislados en tubos independientes. Las terminales de la batería de 12 VDC 1.5 amperes, 1 = + y 2 = -.

5) Conectar el interruptor remoto o local THW.

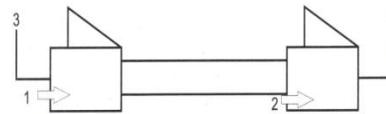
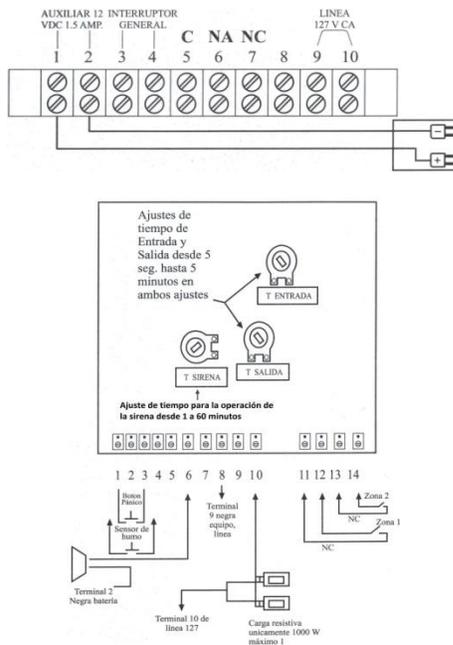


Figura 12 terminales de la batería

Las terminales 3 y 4 forman el interruptor de seguridad extra; este último puede ser cableado hasta 30 metros del equipo. Las terminales 5, 7 y 8 no se usan.

6) Asegurarse que el interruptor se encuentre en posición de apagado y conectar la batería cerciorándose de la polaridad correcta (1=+ y 2=-), rojo +, negro -.

7) Conectar la línea de 127 VCA a las terminales 9 y 10. Checar que la salida no posea un interruptor. Entre fase y neutro que debe ir directamente de la red como se ve en la figura 3.11.



**Figura 13** Conexión de la tablilla del equipo

8) Conectar el + de la sirena a la terminal 6 superior si no requiere de temporizar su operación de la tableta de interfase si requiere ajustar el tiempo de 1 a 60 minutos.

9) Conectar los accesorios de la interfase, como lámparas, botón de pánico, sensores de humo, de movimiento, etc.

10) Cerrar la tapa y encender el interruptor. Escuchará unas pulsaciones que indican que el equipo opera.

## Resultados

Ésta etapa del proyecto se cumplió el objetivo de establecer un mecanismo automatizado de control que accionara a los actuadores o salidas, mismas que realiza parte del procesos del estanque piscícola, en el flujo de corriente de agua tanto para mantener el pH como la oxigenación, así como la manutención de las mojaras, y el almacenamiento de datos de los parámetros en el estanque (temperatura, pH, etc.). Se alcanzaron las metas trazadas con los resultados siguientes:

Se calculó el tamaño de la válvula solenoide para el flujo de agua, específico del estanque.

Se gravó un video del funcionamiento de los actuadores para que sea parte del tutorial final para la instalación y uso.

Se logró la transferencia de tecnología al realizar trípticos y manuales técnicos.

Se dio la asistencia para la adaptación del sistema de salidas a necesidades propias.

Se concluye que el sistema dará una reducción de los gastos de mantenimiento y manutención de los estanques.

Se observa la optimización de los recursos que conllevan un ahorro de materias primas y de esfuerzo.

Se deduce que la implementación del sistema aumentará la producción.

Se evita el robo del producto al estar protegido con una cerca eléctrica.

Se logró energizar el sistema y la cerca eléctrica con energía solar a través de celdas fotovoltaicas.

Se pueden en este momento realizar convenios estatales para la transferencia de tecnología.



**Figura 14** Electrónica y prueba del sistema de salidas

### Agradecimiento

Agradecemos a la SAGARPA a través de la SDR, a la UTIM como líder y responsable del proyecto y encargada de transferir la tecnología, y al CECS-BUAP como evaluador del proyecto, pero especialmente a los productores de tilapia de la comunidad de La Magdalena, del municipio de Tepeojuma, Puebla.

### Conclusiones

El proyecto se desarrolló en tiempo y forma quedando satisfechos con los resultados las tres instituciones involucradas, i.e., el ejecutor de gasto, la SAGARPA federal a través de la SDR estatal, la UTIM como líder y responsable del proyecto y encargada de transferir la tecnología, el CECS-BUAP como evaluador del proyecto y los productores de tilapia.

### Referencias

CINDA ELECTRONICA. (10 de 10 de 2013). Recuperado el 20 de 11 de 2013, de <http://www.cindaelectronica.com>

ARENAS SÁNCHEZ, Z. C. (2011). *LIBRO INTERACTIVO SOBRE ENERGIA SOLAR Y SUS APLICACIONES*. PEREIRA: PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA PEREIRA.

Arredondo, F. y. (1996). El cultivo de la tilapia en México. *Primer Curso Internacional de Producción de Tilapia*. UNAM, SEMARNAP, UAMI y Fac. Med. Vet. y Zoot. México, 7-18.

E. KENDALL, K. y. (2005). *Análisis y diseño de sistemas*. (sexta ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.

Roldán, I. P. (2005). *Iván Pedrosa Roldán (2005). Ordenación Y Gestión De Recursos Piscícolas Y Cinegéticos (Ira ed)*. España: Santiago De Compostela.

Toledo-Pérez, S. y.-C. (1998). Nutrición y Alimentación de Tilapia Cultivada . *Memorias del IV Simposium Internacional de Nutrición Acuícola.*, 83-137.

## Análisis de penetración de dureza para un acero High Speed Steel (HSS), tratado termicamente con temple y revenido

SERVIN-CASTAÑEDA, Rumualdo†\*, CALDERÓN-RAMOS, Ismael, BARRERA-MORENO, Mario Alberto, SAN MIGUEL-IZA, Sandra María y GONZÁLEZ-ZARAZUA, Roberto Aldo

*Universidad Autónoma de Coahuila. Barranquilla S/N, Col. Guadalupe, Monclova Coah. México*

*Universidad Tecnológica de la Región Centro de Coahuila. Carretera 57 Nte Km 14.5, Tramo Monclova-Sabinas, Monclova Coah. México*

Recibido 13 de Octubre, 2017; Aceptado 15 de Diciembre, 2017

### Resumen

En el presente trabajo se estudió el efecto que tiene el tratamiento térmico en la penetración de dureza para un acero *High Speed Steel* (HSS); se analizó la densidad de microporosidad en una pieza de material con alto contenidos de Cr, Mo y V, que posteriormente se cortó y preparo de acuerdo a los estándares ASTM para medir la dureza desde la superficie hasta el centro de la pieza. Aplicando diferentes técnicas de caracterización se evidenció que las durezas más altas se obtienen cuando la densidad de microporosidad es menor; en la superficie de la pieza de 0.0 a 12.0 mm la dureza cae de 66.8 a 65.1 HRC con microporosidades de 0.2894 a 0.9154%, mientras que para la profundidad de 12.0 a 24.0 mm la dureza cae de 65.1 a 53.8 HRC con microporosidades que van de 0.9154 a 6.3634%; lo que significa que hay una relación de caída de dureza de 6.6 a 1, mientras que la microporosidad se incrementa de 1 a 8.7.

**Microporosidad, High Speed Steel (HSS), Dureza, Microestructura**

### Abstract

In the present study, we analyzed the effect of heat treatment on penetration of hardness for a High-Speed Steel (HSS). We analyzed the density of microporosity in a piece of material with high contents of Cr, Mo and V, later it was cut and prepare according to standard ASTM in order to measure the hardness from the surface until middle of the piece. Applying different techniques of characterization, it was shown that higher hardness was found when the density of microporosity is minor; in the surface of the piece from 0.0 to 12.0 mm hardness drops from 66.8 to 65.1 HRC, with microporosity from 0.2894 to 0.9154, while for the depth of 12.0 to 24.0 mm, hardness drops from 65.1 to 53.8 HRC, with microporosity from 0.9154 to 6.3634 %; it means, that there is relation of drop hardness from 6.6 to 1, and increase of microporosity from 1 to 8.7.

**Microporosity, High Speed Steel (HSS), Hardness, Microstructure**

**Citación:** SERVIN-CASTAÑEDA, Rumualdo, CALDERÓN-RAMOS, Ismael, BARRERA-MORENO, Mario Alberto, SAN MIGUEL-IZA, Sandra María y GONZÁLEZ-ZARAZUA, Roberto Aldo. Análisis de penetración de dureza para un acero High Speed Steel (HSS), tratado termicamente con temple y revenido. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:18-24

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: romualdoservinc@prodigy.net.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los aceros de alta velocidad (HSS) son aleaciones base Fe basadas en el sistema Fe-C-X, donde X representa un grupo de elementos de aleación fuertemente carburígenos como el Cr, W, Mo y/o V. Estos aceros se han utilizado con éxito para la fabricación de cilindros de trabajo de laminado en caliente debido a las excelentes propiedades mecánicas, es decir, dureza y alta resistencia al desgaste a alta temperatura. Además, los rodillos de acero de alta velocidad tienen una vida útil más larga. La aleación química de estos cilindros se diseña para obtener productos con una dureza muy elevada, capaz de resistir las acciones mecánicas del servicio. Además, es necesario obtener una microestructura estable en las condiciones de operación durante el tiempo estimado de servicio [1-4].

## Justificación

El 60% del acero fabricado en el mundo se obtiene por medio del proceso de laminación en caliente, en donde los rodillos de laminación son utilizados como herramienta indispensable, actualmente los rodillos tienen poco tiempo de vida útil, requiriendo que las campañas de laminación sean más prolongadas, para lo que necesitaremos que la dureza de los rodillos sea homogénea, esto nos permitirá incrementar las campañas de laminación. Se considera que el conocimiento adquirido en este proyecto contribuirá al desarrollo tecnológico del proceso de laminación en caliente.

## Problema

La dureza es una de las principales variables que influyen en la calidad superficial de la lámina, cuando la dureza no es homogénea se presentan problemas de calidad además de que los molinos de laminación bajan su índice de productividad.

## Hipótesis

Los contenidos de elementos de aleación en conjunto con el tratamiento térmico establecen las propiedades mecánicas de dureza, en la superficie del material la dureza será mayor debido al tiempo inmediato de enfriamiento, mientras que en el centro de la pieza la dureza cae ligeramente.

## Objetivos

### Objetivo General

Establecer la relación que existe en la penetración de dureza con los porcentajes de microporosidades, aplicando un tratamiento térmico de temple y revenido.

### Objetivos específicos

- Establecer la relación de dureza en función de los porcentajes de las imperfecciones metalográficas (microporosidad intersticial) de aceros HSS.
- Evaluar la relación de la dureza en la superficie de la probeta con relación al centro de la misma.

## Marco Teórico

La relación de dureza contra la microporosidad en los aceros de alta velocidad es un aspecto importante que se estudia en este trabajo, ya que varios estudios demuestran que la dureza de un material es más alta cuando existe menor microporosidad en dicho material, también se dice que la superficie de la pieza es la más dura, y es muy importante recalcar que tienen mucho que ver los tratamientos térmicos que se les da al material, estos aceros frecuentemente son sometidos al proceso de revenido que siempre debe aplicarse después de un temple.

La composición del acero y la temperatura del proceso de revenido, tienen una marcada influencia en las características de la microestructura obtenida, influyendo, en consecuencia, en las propiedades mecánicas del acero revenido.

Los resultados de algunos ensayos revelaron que los rodillos HSS que contiene una mayor cantidad de vanadio mostraron la mejor resistencia al desgaste [5-7].

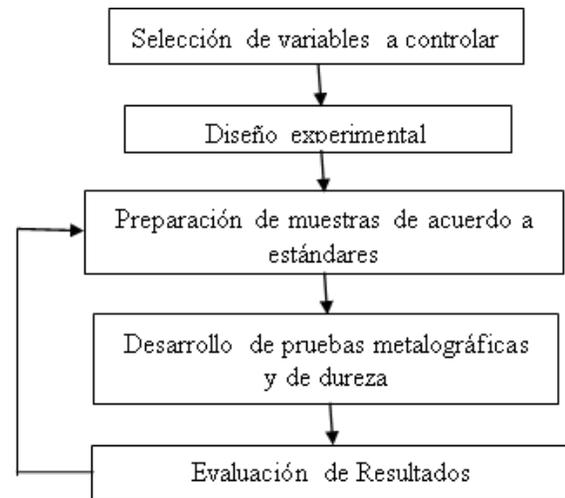
El comportamiento de un material está fuertemente ligado a sus propiedades mecánicas, las cuales dependen fundamentalmente de la estructura y una de las variables fundamentales que influyen en la estructura que tenga el material, es su composición química. La composición del acero y la temperatura del proceso de revenido, tienen una marcada influencia en las características de la microestructura obtenida, influyendo en consecuencia, en la dureza del acero. Por esta razón, diversas investigaciones han sido realizadas con el fin de conocer el efecto que estas variables tienen en la dureza y resistencia del acero [6].

Seleccionar el mejor acero para un uso determinado es un desafío que enfrenta frecuentemente un ingeniero. Son numerosos los aspectos a tener en cuenta a la hora de elegir el mejor material para una determinada aplicación, su costo global, la facilidad de su fabricación y por supuesto su comportamiento frente a las demandas a las que estará sometido el mismo.

El proceso de laminación en caliente es uno de los más utilizados para la producción de acero. Los rodillos de laminación son una de las herramientas más costosas en este proceso [8].

## Metodología de Investigación

El desarrollo del estudio se llevó a cabo de acuerdo a los estándares establecidos en las normas ASTM, las actividades desarrolladas son las que se muestran en el diagrama de flujo representado en la Figura 1, y se describe detalladamente a continuación.

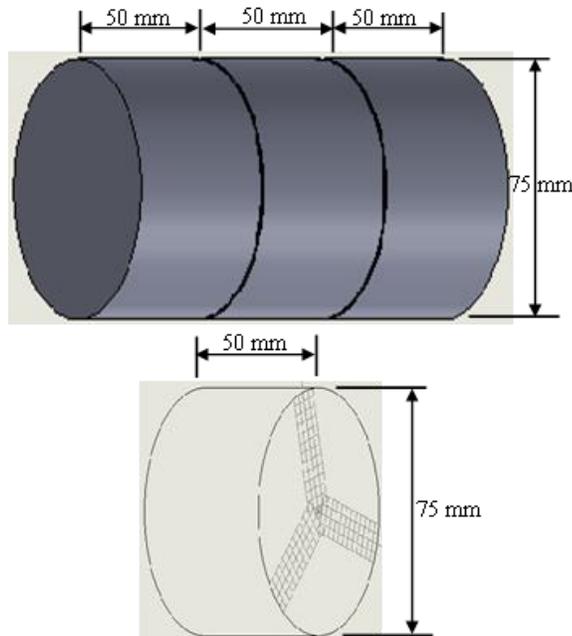


**Figura 1** Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas para el estudio

**Selección de variables a controlar.-** La muestra de acero HSS fue tratada térmicamente a una temperatura de 1100°C y revenida a 275°C, con estos valores se obtienen durezas que van a estar en función de algunas variables de control, dentro de las cuales se considera relevante el análisis de la microporosidad, debido a que este factor influye en la homogeneidad del material y por consecuencia en la dureza del acero, cuando un material se trata térmicamente con temple, la superficie de la pieza se enfría más rápido que el centro de la pieza, por lo que las propiedades mecánicas como la dureza varían en función de la profundidad de temple, por lo tanto resulta de interés considerar también la penetración de dureza en el material o caída de dureza de la superficie hacia el centro de la pieza.

Diseño experimental y análisis químico.  
 - Para el desarrollo del material analizado, se utilizó una barra de acero HSS de 75 mm de diámetro por 150 mm de longitud, posteriormente se cortó en tres partes para analizar la parte más homogénea la cual es el centro de la pieza, sus dimensiones son de 75 mm de diámetro por 50 mm de longitud, tal como se muestra en la Figura 2.

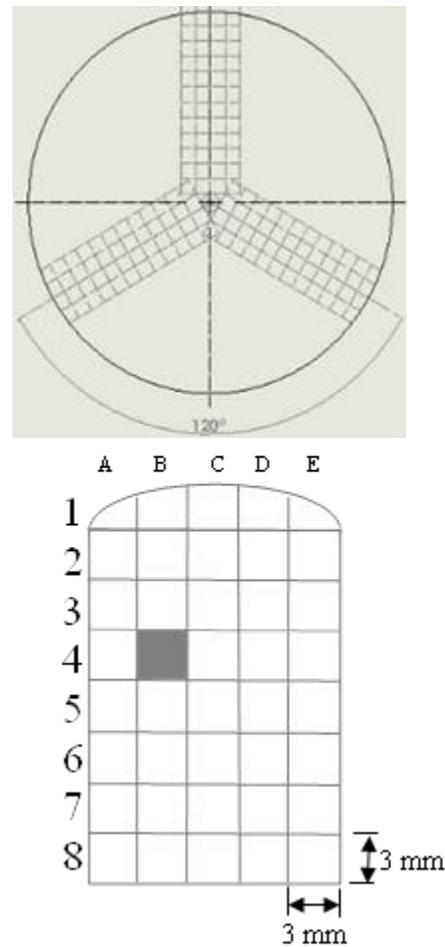
El análisis químico de la muestra de acero HSS se llevó a cabo en un Espectrómetro de luz visible. Para determinar la composición química de la muestra el método utilizado fue basado en la norma ASTM-E45, Método A (comparación), ASTM E-112.



**Figura 3** Diseño experimental para la identificación de campos analizados

Preparación de muestras. - Para el análisis de las muestras se utilizaron los estándares de la ASTM, sobre todo en el ensayo de dureza donde la norma ASTM E18 especifica las distancias que deben de existir entre cada indentación, por lo cual se subdividió la muestra en campos cuadrados de análisis de 9mm<sup>2</sup>, con dimensiones de 3mm x 3 mm.

La circunferencia de la barra analizada se dividió en tres partes de 120° y se trazaron áreas de cinco columnas y ocho renglones como se muestra en la Figura 3, para un mayor cálculo estadístico se analizan las dos caras de la barra. Con el fin de identificar cada uno de los campos se establece el siguiente criterio, cada campo estará formado por una letra que le corresponde una columna y un renglón que le corresponde un número; por ejemplo, el campo que se muestra en la Figura es B4.



**Figura 3** Diseño de barra para análisis

Desarrollo de pruebas metalográficas y de dureza. - La preparación metalográfica inicialmente se realizó en la desbastadora, en el cual se utilizaron lijas de 80, 180, 320, 600, 800, 1000 y 1200; posteriormente se procedió a pulir la muestra, en el cual se utilizó alúmina y pasta de diamante de  $0.05\mu\text{m}$  sobre paños de marca LECO, hasta obtener una muestra con un acabado espejo.

Para determinar la dureza de la muestra del rodillo de acero HSS se efectuaron pruebas de dureza en un Durómetro con dureza regular Rockwell C, con una carga generada por el penetrador de 150kg con un tiempo de carga de 10seg, en total fueron 240 pruebas. Una vez efectuadas las pruebas de dureza, se llevó la muestra al microscopio metalográfico para obtener el porcentaje de microporosidad del acero HSS, esto se efectuó cerca de la marca de dureza.

Evaluación de resultados. - Con el fin de tener una mejor apreciación de los resultados, se utilizarán graficas de correlación (dispersión) y graficas de contorno, en la que se presenta la variación de dureza contra el porcentaje de microporosidad y valores de dureza contra profundidad en (mm) de la pieza. Y en la grafica de contorno, se podrán comparar las tres variables

### Tipo de Investigación

Básicamente el trabajo que se expone está orientado a encontrar la relación que existe entre los valores de dureza contra los valores de microporosidad, el cual consiste en el desarrollo tecnológico de un material HSS que mantenga su dureza homogénea y sea resistente al desgaste, que permita que las propiedades mecánicas de este acero soporten el contacto mecánico y pueda ser utilizado en rodillos de trabajo de laminación en caliente, así como para herramientas expuestas a altos coeficientes de fricción.

### 4. Resultados

En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de dureza, y en la Tabla 2, los resultados de porcentaje de microporosidad; en ambos casos se muestran los valores promedio de los 240 campos analizados. La superficie de la pieza viene siendo las durezas más altas, que son dadas por el número 1 y están acomodadas de la superficie hacia el centro de la pieza.

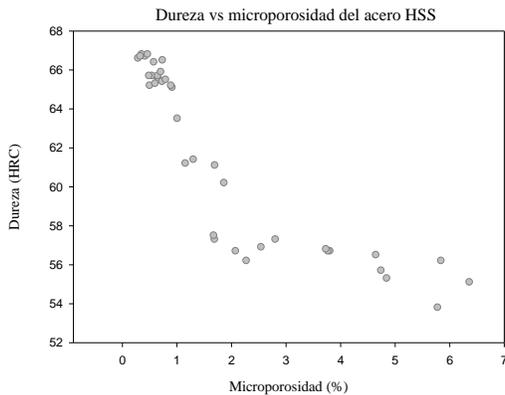
Nº	Profundidad (mm)	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	D (HRC)	E (HRC)
1	3	66.7	66.8	66.6	66.7	66.8
2	6	66.5	66.4	65.6	65.7	65.5
3	9	65.7	65.5	65.4	65.7	65.9
4	12	65.2	65.3	65.1	65.5	65.2
5	15	63.5	61.1	61.2	61.4	60.2
6	18	57.3	57.5	57.3	56.2	56.7
7	21	56.7	56.9	56.7	56.8	56.5
8	24	56.2	55.7	55.3	53.8	55.1

**Tabla 1** Resultados de dureza promedio de los 240 campos de la muestra.

Nº	Profundidad (mm)	A	B	C	D	E
1	3	0.4175	0.3555	0.2894	0.3286	0.4638
2	6	0.7371	0.5778	0.6469	0.5438	0.6704
3	9	0.4886	0.6741	0.7316	0.6506	0.7060
4	12	0.5017	0.6024	0.9154	0.7945	0.8915
5	15	1.0076	1.6974	1.1577	1.3029	1.8645
6	18	1.6918	1.6758	2.8054	2.2753	3.8064
7	21	3.7684	2.5462	2.0767	3.7346	4.6490
8	24	5.8429	4.7432	4.8472	5.7805	6.3634

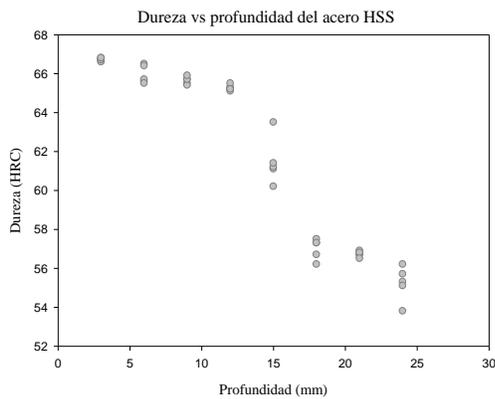
**Tabla 2** Resultados de porcentajes de microporosidad promedio en los 240 campos de la muestra

Con el método estadístico desarrollado se generó la Gráfica 1 de correlación (dispersión), en la que se presenta la variación de dureza contra el porcentaje de microporosidad, comprobando que existe una gran relación entre las dos variables. En la gráfica de la Figura 4, se observan que con microporosidades menores a 2% se obtienen durezas hasta de 66.8HRC.



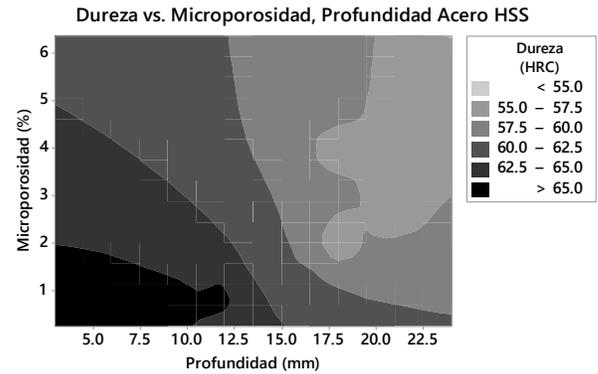
**Figura 4** Grafica de dureza en función de la Microporosidad

En la Figura 5, se muestra la gráfica que representa la dureza en función de la profundidad, termino conocido como caída de dureza, en la que se puede observar que la dureza permanece homogénea con valores de dureza superiores a 65HRC para una profundidad de 12 mm y posteriormente cae hasta los 54.8HRC.



**Figura 5** Resultados de porcentajes de microporosidad promedio en los 240 campos de la muestra

En Figura 6, se muestra la gráfica de contorno, en donde se representa la dureza en función de la microporosidad y profundidad de la muestra de acero HSS, en donde se observa que los valores de dureza mayores a 65HRC se obtienen para profundidades menores de 12mm y microporosidades menores a 2%.



**Figura 6** Valores de dureza contra porcentaje de microporosidad y profundidad

La composición química de la muestra de acero HSS utilizada en este trabajo es mostrada en la Tabla 3, en donde se puede observar los altos contenidos de Cromo, Níquel, Molibdeno y Vanadio; por lo cual la presencia de carburos MC están conformados por estos elementos de aleación.

C	Mn	P	S	Si
1.673	0.406	0.023	0.009	0.762
Cu	Cr	Ni	Mo	Al
0.070	6.904	0.949	2.179	1.014
V	Cb	Ti	Sn	Ca
4.276	0.019	0.004	0.009	0.0016

**Tabla 3** Resultados de porcentajes de elementos de aleación

**Conclusiones**

Para el intervalo de 0.0mm a 12.0 mm la dureza cae de 66.8 a 65.1 HRC que representa una caída de 1.7 HRC, mientras que para la profundidad de 12.0mm a 24.0 mm la dureza cae de 65.1 a 54.8 HRC, que representa una caída de 11.3 HRC, lo que significa que hay una relación de caída de dureza de 6.6 a 1.

Y para el intervalo de 0.0mm a 12.0 mm la microporosidades aumenta de 0.2894 a 0.9154%, que representa un incremento de 0.626%, mientras que para la profundidad de 12.0mm a 24.0mm las microporosidades que van de 0.9154 a 6.3634%, que representa un incremento de microporosidad de 5.448%, lo que significa que hay una relación de incremento de microporosidad de 1 a 8.7.

Con este estudio se confirma la hipótesis de que existe una relación directa entre las tres variables, ya que podemos observar que a menor profundidad y a menor microporosidad mayor es la dureza.

### Referencias

- [1] J. M. Artímez <sup>(1)</sup>, José García <sup>(2)</sup>, J. M. Llano <sup>(2)</sup>, M. Alvaré <sup>(2)</sup>, J. Belzunce <sup>(3)</sup> <sup>1</sup>Fundación ITMA. PEPA, Asturias (Spain). <sup>2</sup>“Caracterización de los carburos  $M_xC_y$  presentes en aceros rápidos para cilindros de laminación bimetálicos procesados por colada centrifugada”. Fundación Nodular, S.A. – Asturias (Spain) <sup>3</sup>E.P.S. de Ingeniería (Universidad de Oviedo), Campus Universitario, Asturias, 2008.
- [2] Alfonso Hernández <sup>(2)</sup>, Luis Alfonso Borjon <sup>(2)</sup>, Waldemar Braatz <sup>(3)</sup>, Marcelo Rebellato <sup>(3)</sup>, Rumualdo Servin <sup>(4)</sup>, Laura G. Castruita <sup>(4)</sup> “Control en el consumo de rodillos de apoyo (5%Cr), utilizados en los molinos de laminación en caliente”. (1) Technical Contribution to the 48th International Congress of the ABM, Santos– SP – Brazil. (2) – Altos Hornos de México S.A de C.V., (3) - Villares Rolls, (4) – Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, October 2011.
- [3] Yin, Yanjun; Sun, Jiquan; Teng, Shengyang; Niu, Chuang; Oxidation Behavior of High-Speed Steel Used for Hot Rolls. Editor Springer US V-86, pp 45-57 New York 2016.

[4] Minwoo Kang, Young-Kook Lee. The Effects of Austenitizing Conditions on the Microstructure and Wear Resistance of a Centrifugally Cast High-Speed Steel Roll. Volume 47, pp 3365–3374, Springer 2016.

[5] Yanzon, Rodolfo; Aranda, Virginia; Sánchez, Arlington; Gimenez, Maximiliano. Predicción de la dureza en un acero revenido en función de la temperatura y la composición química. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, tomo 19.1 pág. 29-39. Madrid, España. 2015.

[6]Joon Wook Park,Huo Choon Lee, Sunghak Lee. Composition, microstructure, hardness, and wear properties of high-speed steel rolls Volume 30, Issue 2, pp 399–409, Springer 1999.

[7] Yanzón, Rodolfo C; Bocca, José C; Rebollo, Daniel; Sánchez, Arlington R. Predicción de dureza en piezas construidas con acero templado y revenido. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica 13.2, pp 25-45. Madrid, España. 2009.

[8] Chang Kyu Kim, Yong Chan Kim, Jong Il Park, Sunghak Lee, Nack J. Kim, Jung Seung Yang. Effects of alloying elements on microstructure

hardness, and fracture toughness of centrifugally cast high-speed steel rolls. Volume 36, Issue 1, pp 87–97 Springer 2005.

## Diseño de una cámara de impacto para evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos

CERVANTES-TOBÓN, Arturo†\*, GARCÍA-MENDOZA, Yulisa, SANGINEZ-MARTÍNEZ, Nanci Brenda y RAMÍREZ-MORALES, Cristhian Jesús

*Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, México, D.F., México*

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Departamento de Nanotecnología, Av. Emiliano Zapata S/N, El Tráfico, 54400 Villa Nicolás Romero, Atizapán, Edo. De México, México*

Recibido 7 de Octubre, 2017; Aceptado 5 de Diciembre, 2017

### Resumen

Se llevó a cabo el diseño y construcción de un dispositivo denominado “cámara de impacto”, para poder evaluar el efecto que tiene el cambio de dirección en partes importantes de componentes tales como son: Codos y Tees en el transporte de hidrocarburos. Se evaluó la velocidad de corrosión, mediante la técnica de resistencia a la polarización lineal en dichos cambios de dirección en función de ángulos empleados dentro del dispositivo. Dentro del dispositivo se colocó un porta muestras que soporta cupones de acero API 5L X70 a evaluar con respecto a la velocidad de corrosión y que a su vez es empleado de manera común en el transporte de hidrocarburos. Se utilizaron 3 ángulos diferentes (30, 60 y 90°) que simulan los cambios de dirección más empleados en la industria del transporte de los hidrocarburos. Se diseñó un porta cupones que permita una manipulación adecuada, con respecto al montaje y operación durante la experimentación que permita evaluar de manera eficiente mediante una caracterización de los productos de corrosión formados por microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX), el efecto que puedan tener los productos de corrosión que se lleguen a formar en la superficie del acero.

### Cámara de impacto, Acero API 5L X70, Corrosión asistida por flujo

### Abstract

The design and construction of a device called "impact chamber" was carried out to evaluate the effect of the change of direction on important parts of components such as: Elbows and Tees in the transport of hydrocarbons. The corrosion rate was evaluated using the linear polarization resistance technique in these changes of direction as a function of the angles used inside the device. Inside the device was placed a sample holder that supports API 5L X70 steel coupons to evaluate with regard to the speed of corrosion and which in turn is commonly used in the transport of hydrocarbons. Three different angles (30, 60 and 90 °) were used to simulate the most commonly used steering changes in the hydrocarbon transportation industry. A coupon holder was designed to allow adequate manipulation with respect to the assembly and operation during the experimentation that allows an efficient evaluation by means of a characterization of the corrosion products formed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), The effect that corrosion products may have on the surface of the steel.

### Jet impingement, API 5L X70 steel, Flow assisted corrosion

**Citación:** CERVANTES-TOBÓN, Arturo, GARCÍA-MENDOZA, Yulisa, SANGINEZ-MARTÍNEZ, Nanci Brenda y RAMÍREZ-MORALES, Cristhian Jesús. Diseño de una cámara de impacto para evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:25-32

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: maenc\_2000@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

**Introducción**

La corrosión asistida por flujo, denominada también corrosión acelerada por flujo (FAC), está relacionada con la pérdida de metal causada por un proceso electroquímico de disolución de la película protectora seguida de la liberación de iones metálicos cuando la superficie metálica es sometida a un flujo de una o dos fases [1,2]. La FAC es un proceso por el cual la capa de óxido normalmente protectora sobre un acero al carbono o acero de baja aleación se disuelve en una corriente de agua o una mezcla agua-vapor. La capa de óxido se hace más fina y menos protectora, y la velocidad de corrosión se incrementa. Finalmente, se alcanza un estado estacionario cuando las velocidades de corrosión y disolución son iguales y se mantienen las velocidades de corrosión estables.

**Justificación**

La Corrosión Asistida por Flujo es un mecanismo de corrosión que se presenta en tuberías y ductos, el cual provoca la pérdida del material desde el interior por medio de la remoción de la capa protectora de los productos de corrosión y su posterior exposición del material, lo que produce un adelgazamiento de la pared, siendo esta situación un factor importante en la falla de tuberías.

**Problema**

Actualmente la FAC es uno de los principales problemas de seguridad para el personal y la disponibilidad de las plantas, que afecta de manera importante el deterioro de las instalaciones. En estudios realizados[1,2], se estima que la corrosión provoca pérdidas económicas debido a los paros que se tienen que realizar en planta, ya sea por accidentes catastróficos o mantenimiento correctivo para reemplazar tramos de ducto o conexiones.

Por tal motivo es de suma importancia el estudio de los materiales seleccionados para este uso, es aquí donde se plantea la importancia de realizar estudios que puedan indicar el comportamiento del flujo dentro de los ductos o tuberías y conocer en qué zonas se puede estar presentando este tipo de corrosión debido a las velocidades y los cambios de dirección.

Debido al interés que ha generado el tema de la Corrosión Asistida por Flujo y la problemática que representa para la industria, actualmente se están realizando estudios de flujo de fluidos en combinación con experimentaciones basadas en modelos físicos y simulación numérica, los cuales resultan ser una herramienta útil que permite reproducir los fenómenos reales del proceso.

**Hipótesis**

Con un diseño asecurado de una cámara de impacto se puede investigar el comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión de los componentes de acero cuando son colocados a diferentes ángulos de inclinación en codos, tees y reducciones de área, en las instalaciones que transportan hidrocarburos.

**Objetivos****Objetivo General**

El objetivo principal de esta investigación, es diseñar y construir una cámara de impacto para poder evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos.

### Objetivos específicos

- Una vez construida la cámara de impacto obtener la velocidad de corrosión en un acero API 5L X-70 para tres ángulos o cambios de dirección (30, 60 y 90°) en un medio corrosivo (salmuera con keroseno y ácido sulfhídrico).
- Caracterizar los productos de corrosión formados por las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y difracción de Rayos X (DRX), para observar la morfología y las especies cristalinas presentes.

### Marco Teórico

El fenómeno de corrosión es una de las principales causas de fallas en las instalaciones petroleras y la mitad de estas fallas están vinculadas a la corrosión, debido la presencia de gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  [3], los cuales se disuelven en la fase acuosa del fluido, produciendo diferentes formas de corrosión.

En las industrias del petróleo y del gas, la presencia de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en los fluidos transportados causa graves problemas de corrosión en las tuberías de acero [4].

El acero API 5L-X70 se utiliza como material de tubería en México y otros países en el transporte de gas natural, hidrocarburos y crudo en la industria petrolera. Sin embargo, es susceptible a una degradación severa por el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que está casi siempre presente tanto en petróleo crudo como en gas natural, en medios alcalinos y ácidos [5-7]. La corrosión del  $\text{H}_2\text{S}$  comienza con la disolución del gas  $\text{H}_2\text{S}$  en la fase líquida para formar varias especies reactivas como el sulfuro de hidrógeno, los iones hidrosulfuro, los iones sulfuro y los iones  $\text{H}^+$  que participan en la transferencia de electrones en la interfase metálica [8-10].

Estas son las reacciones catódicas. La reacción anódica es la disolución de Fe para formar  $\text{Fe}^{++}$ . Las reacciones electroquímicas (catódicas y anódicas) en la superficie metálica producen productos de corrosión.

### Metodología de Investigación

El equipo experimental utilizado en la presente investigación se muestra en la Figura 1, el cual consiste de una cámara de impacto de acrílico transparente de 5mm de espesor. Se hace circular un medio constituido por una salmuera preparada de acuerdo a la norma NACE 1D196 adicionada con 10% de keroseno y 1 Bar de  $\text{H}_2\text{S}$ , el cual es almacenada en un tanque de polietileno con capacidad de 100 L. Mediante el uso de un rotámetro se controlan los caudales del fluido.

A la salida de la cámara se conectan tres mangueras para ayudar en el drenaje del medio hacia el tanque.



**Figura 1** Cámara de impacto elaborada en acrílico.

La Figura 2 muestra el montaje del porta probetas dentro de la cámara de impacto, se colocan cupones de acero API 5L X-70 a los ángulos de 30°, 60° y 90° quedando frente a la entrada del medio, el cual se hace circular desde el tanque de almacenamiento hasta llegar a impactar sobre la superficie de los mismos.



**Figura 2** Probetas a diferentes ángulos de inclinación (30, 60 y 90°)

### Determinación de la composición química del acero

La composición química del acero se determina empleando un espectrómetro de arco y chispa, mediante la técnica de análisis por emisión óptica.

### Microestructura del acero

La microestructura del acero se obtiene por medio de microscopía óptica, desbastando y puliendo la superficie del acero y finalmente atacando con el reactivo denominado Nital 3.

### Medición de la velocidad de corrosión

La medición de la velocidad de corrosión se llevó a cabo mediante la colocación de cupones en la placa de choque, y mediante el uso de la técnica de resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ). Es una prueba estándar basado en la norma (ASTM G59-97) y con ayuda del software POWER SUITE de Princeton Applied Research mediante el uso de un potencióstato/galvanostato Parstar modelo 2263 (en un intervalo de  $\pm 20mV$ ). Las curvas de polarización fueron obtenidas en un intervalo de  $0.166mV$  por segundo.

### Caracterización de los productos de corrosión

#### Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La caracterización de los productos de corrosión formados sobre la superficie del acero después de las pruebas electroquímicas se hace mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), con un equipo Jeol JSM 6300 operado a  $20kV$  equipado con un sistema de análisis de dispersión de energía (EDS).

### Difracción de Rayos X

El análisis de DRX se realiza mediante un difractómetro Focus D8 Marca Bruker, el cual emplea radiación  $Cu K\alpha$ , a las condiciones de  $35 kV$ ,  $25A$ , en un intervalo de  $2\theta$   $20^\circ$  a  $120^\circ$ , incrementos de  $0.02^\circ$  con temperatura ambiente.

### Resultados

#### Composición química

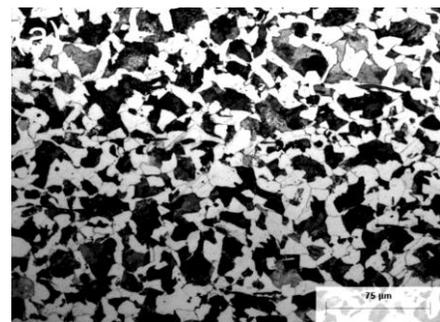
La composición del acero API 5L X70 destaca 3 elementos los cuales tienen un gran impacto en cuanto su comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión, estos elementos son el cromo (Cr) cobre (Cu) y Níquel (Ni). En conjunto estos elementos tienen una gran influencia en el comportamiento de la velocidad de corrosión así como la tendencia a estabilizar la matriz del acero.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni
0.24	1.08	0.28	.01	.02	0.15	0.18	0.08
0	1	4	9	1	6	5	8

**Tabla 1** Composición química del acero API 5L X-70

#### Microestructura del acero API 5L X70

La Figura 3 muestra la microestructura a 100 aumentos (100X) del acero API 5L X-70. Las fases presentes que se observan son dos, Ferrita (fase clara) y Perlita (fase oscura), los granos tienden a ser equiaxiales.



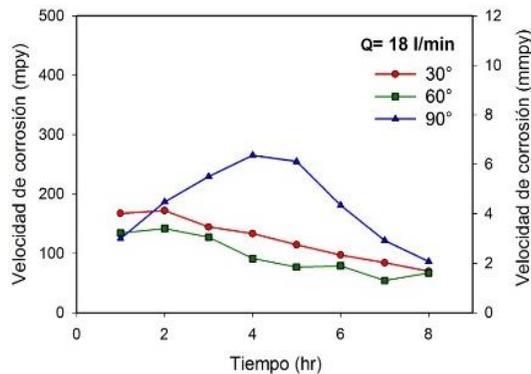
**Figura 3** Microestructura del acero API 5L X70

### Medición de la velocidad de corrosión, mediante la resistencia a la polarización lineal.

En la Figura 4, se observa la variación de la velocidad de corrosión que se obtuvo en función del tiempo para un flujo de 18 l/min para 90°, 60° y 30°.

En general la velocidad de corrosión tiende a disminuir conforme se incrementa el tiempo; las velocidades de corrosión más bajas se presentan para un ángulo de 60° debido a que los productos de corrosión que se forman podrían ser más estables.

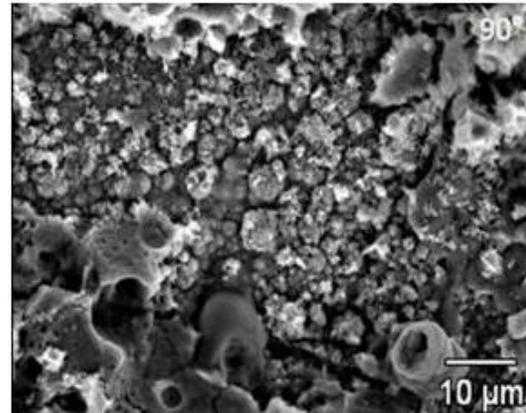
Por otro lado cuando se trabajó con un ángulo de 90° la velocidad de corrosión presenta un comportamiento de tipo parabólico es decir, primeramente presenta un incremento muy marcado acompañado de una disminución continua de la misma. Esta disminución se atribuye a la continua formación de los productos de corrosión.



**Figura 4** Velocidad de corrosión para los ángulos de contacto de 90°, 60° y 30° a un caudal de 18 l/min a un tiempo de 8 h de prueba

### Caracterización de los productos de corrosión para el ángulo de 90° por microscopía electrónica de barrido

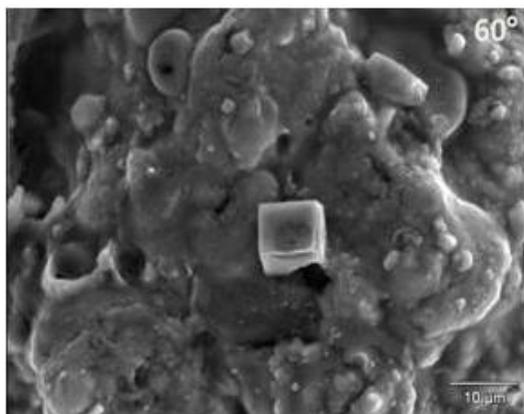
Se llevó a cabo la caracterización de los productos de corrosión para el acero API 5L X-70 para un ángulo de impacto de 90°, mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5. La morfología resulta ser de tipo dentado o irregular. El crecimiento de los productos de corrosión se observa a través de capas y existe además una remoción de los mismos por la acción del flujo.



**Figura 5** Morfología de los productos de corrosión del acero API 5L X70 para un ángulo de 90° a 1000 magnificaciones

### Caracterización de los productos de corrosión para el ángulo de 60° por microscopía electrónica de barrido

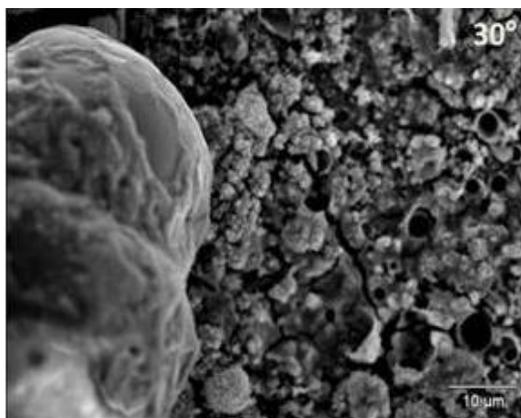
La Figura 6 muestra una morfología para un ángulo de 60°, que resulta ser de tipo dentado o irregular, con algunos productos con tendencia a ser redondeados. Se observa una aglomeración de los productos así como una mayor rugosidad de estos.



**Figura 6** Morfología de los productos de corrosión del acero API 5L X70 para un ángulo de  $60^\circ$  a 1000 magnificaciones

### Caracterización de los productos de corrosión para el ángulo de $30^\circ$ por microscopía electrónica de barrido

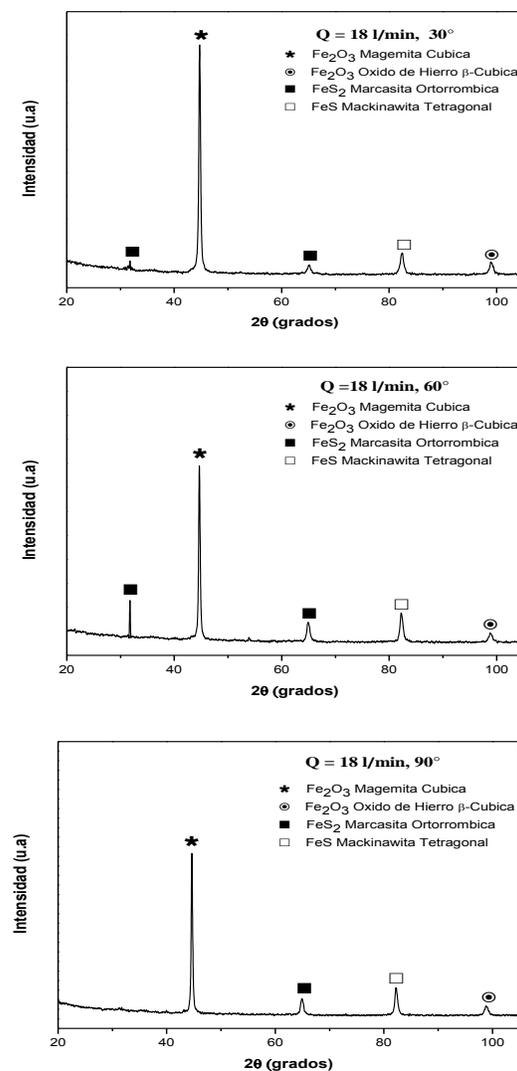
Para un ángulo de impacto de  $30^\circ$  los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7. La morfología resulta ser de tipo dentado o irregular, con algunos productos con tendencia a ser redondeados. Se observa una aglomeración de los productos.



**Figura 7** Morfología de los productos de corrosión del acero API 5L X70 para un ángulo de  $60^\circ$  a 1000 magnificaciones

### Caracterización de los productos de corrosión por Difracción de rayos X

La Figura 8 muestra los patrones de difracción que se obtuvieron de los cupones sometidos a un caudal de 18 l/min.



**Figura 8** Patrón de difracción de rayos X para los productos de corrosión formados en los cupones para un caudal de 18 l/min.

Las fases que se presentan en los patrones de difracción de los tres ángulos son: la mackinawita tetragonal (FeS), magemita cúbica (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), marcasita ortorrómbica (FeS<sub>2</sub>) y el óxido de hierro β-cúbica (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la presencia de la marcasita explica el comportamiento de las bajas velocidades de corrosión en los ángulos de inclinación de 30° y 60° y en el cupón de 90° ya que se le conoce como un producto de corrosión estable y coadyuvante en el control de la velocidad de corrosión debido a su estructura cristalina.

La magemita cúbica presenta una disminución en su pico conforme se incrementa el ángulo, de igual forma lo hace el óxido de hierro β-cúbica, mientras que la marcasita, en los ángulos de 30° y 60° presenta dos picos y en el ángulo de 90° solo uno. En este caso es una mezcla de óxidos y sulfuros estables que resultan ser muy estables es decir son adherentes.

### Conclusiones

El ángulo que presenta el mejor comportamiento con respecto a la velocidad de corrosión resultó ser el de 60°, debido a que presenta una mayor presencia de un sulfuro denominado Marcasita Ortorrómbica la cual tiene un carácter protector de acuerdo a la literatura.

Los productos de corrosión que se forman en la superficie son de tipo irregular con cierta tendencia en algunos casos a ser redondeados, lo cual podría ser benéfico a la acción del fluido corrosivo para lograr que la velocidad de corrosión no llegue a incrementarse de manera considerable.

Los productos de corrosión resultan ser una mezcla formada principalmente por óxidos y sulfuros, estos últimos resultan ser más adherentes y por consecuencia más protectores.

### Referencias

S. Nasrazadani, R.K. Nakka, D. Hopkins, J. Stevens, "Characterization of oxides on FAC susceptible small-bore carbón steel piping of a power plant", *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol. 86, issue 12 (2005) 845-852.

B. Chexal, J. Horowitz, R. Jones, B. Dooley, C. Wood, M. Bouchacourt, M., F. Remy, F. Nordmann, P. St. Paul, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", TR-106611, Electric Power Research institute, PaloAlto, CA (1996).

Kermani, M.B.; Harrop, D. The impact of corrosion on oil and gas industry. *SPE Prod. Facil.* **1996**, 11, 186-190.

M. E. Olvera-Martinez, J. Mendoza-Flores, F. J. Rodriguez-Gomez, M. E. Palomar-Pardave and J. Genesca, "Effects of turbulent flow on the corrosion inhibition properties of 2-mercaptobenzimidazole", *Materials and Corrosion*, vol. 64, issue 6 (2013) 522-529.

J. L. Crolet, M. R. Bonis, "How to pressurize Autoclaves for Corrosion testing under CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Pressure", *Corros.*, 56 (2000) 167-182.

6. M. Elboujdani, V. S. Sastri, R. W. Revie, "Field measurement of hydrogen in sour gas pipelines", *Corros.*, vol. 50, issue 8 (1994) 636-640.

M. A. Lucio-García, J. G. González-Rodríguez, M. Casales, L. Martínez, J. G. Chacón-Nava, M. A. Neri-Flores, A. Martínez-Villafañe, "Effect of heat treatment on H<sub>2</sub>S corrosion of a micro-alloyed C-Mn steel", *Corros. Sci.*, vol. 51, issue 10 (2009) 2380-2386.

E. C. Greco, W. B Wright, "Corrosion of Iron in an H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O System", *Corrosion*, vol. 18, issue 3 (1962) 119-124.

J. B. Sardisco, and R. E. Pitts, "Corrosion of Iron in an H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O System: Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion Reaction," Corrosion 21, (1965) 245–253.

R. N. Tuttle, R. D. Kane, A Compilation of Classic Papers, NACE, Houston, Texas (1981).

## Diseño de un “Cople Porta-Probeta” para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento

DÍAZ-CRUZ, Manuela†\*, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Departamento de Nanotecnología, Av. Emiliano Zapata S/N, El Tráfico, 54400 Villa Nicolás Romero, Atizapán, Edo. De México, México*

*Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, México, D.F*

Recibido 17 de Octubre, 2017; Aceptado 26 de Diciembre, 2017

### Resumen

El CET es un modelo físico diseñado para reproducir a escala las condiciones de flujo de un sistema de tuberías (transporte) de modo que se presenten fenómenos hidrodinámicos representativos, pero a nivel laboratorio. Por lo anterior se realizaron adaptaciones al CET a partir de diseños propios denominados “Coples porta-probetas” y “probetas metálicas” con el objetivo de llevar a cabo la experimentación de una manera más representativa del efecto de la velocidad de corrosión dentro de una tubería de acero así como facilitar el manejo del sistema durante la experimentación. Se realizó una evaluación de la velocidad de corrosión y caracterización de los productos de corrosión de los aceros grado API 5L X52 y X65 en un Circuito Experimental de Tubería (CET) por el cual se hizo circular un fluido amargo con flujo turbulento para analizar el efecto de la Corrosión Asistida por Flujo (CAF). La velocidad de corrosión de los aceros se obtuvo mediante la técnica electroquímica de la resistencia a la polarización lineal, con respecto al tiempo de exposición en un medio amargo. Los productos de corrosión fueron caracterizados mediante las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX).

### Aceros API, corrosión asistida por flujo, flujo turbulento

**Citación:** DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett. Diseño de un “Cople Porta-Probeta” para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:33-40

### Abstract

The ECP is a physical model designed to scale-up the flow conditions of a pipeline system (transport) so that representative hydrodynamic phenomena occur, but at the laboratory level. For the above, adaptations to the ECP were made from own designs and "metal probes" with the objective of carrying out the experimentation in a more representative way of the effect of the corrosion rate inside a steel pipe as well as to facilitate the handling During the experiment. An evaluation of the corrosion rate and characterization of the corrosion products of API grade 5L X52 and X65 steels was carried out in an Experimental Circuit of Pipeline (ECP) through which a bitter fluid with turbulent flow was circulated to analyze the effect Of Flow Assisted Corrosion (FAC). The corrosion rate of the steels was obtained by the electrochemical technique of resistance to linear polarization, with respect to the time of exposure in a bitter medium. The corrosion products were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) techniques.

### Steels API, flow assisted corrosion, turbulent flow

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: neladiaz1346@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La corrosión por  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  en la producción de gas y petróleo representa una de las más importantes áreas de investigación, debido a la necesidad crítica de evaluar la severidad de la corrosión y así disminuir el riesgo de problemas en operación y bajar los costos efectivos de producción.

En los medios acuosos donde se encuentran  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  disueltos se producen daños de naturaleza corrosiva en sistemas metálicos, los cuales traen como consecuencia grandes pérdidas en muchos campos técnicos e industriales.

La presencia de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  disueltos pueden afectar procesos donde estén en contacto con equipos tales como: condensadores, bombas, líneas de distribución de gasolinas e hidrocarburos, equipos para la producción y refinación de aceites crudos y gases naturales.

Se sabe que la velocidad de corrosión del acero en medios con la presencia de fluidos se incrementa con el aumento del caudal de estos, debido a la remoción mecánica de las películas protectoras (óxidos) sobre la superficie del acero, así como a la disolución o retraso del crecimiento de productos de corrosión a diferentes velocidades de flujo, lo anterior se conoce como corrosión asistida por flujo (CAF).

Bajo diversas condiciones multifásicas, se ha demostrado que el régimen de flujo incrementa el daño de corrosión en las tuberías<sup>1,2</sup>.

## Justificación

El estudio de la corrosión en tuberías y equipos que almacenan, transportan o procesan hidrocarburos es de gran interés para la comunidad científica debido a las pérdidas económicas y físicas que se tienen en las industrias petroquímicas. Estas pérdidas se deben a fallas relacionadas con el fenómeno de corrosión presente dentro de las tuberías, ocasionando problemas en la producción ya que se generan mantenimientos correctivos o bien “paros” para el reemplazo de un sistema que ha sido dañado, además, ocasionan daños físicos al personal y al medio ambiente.

Una de las principales causas de las fallas en las instalaciones petroleras se debe al fenómeno de corrosión, las cuales se deben en gran parte a la presencia de gases como  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ , los cuales se disuelven en la fase acuosa del fluido. La solubilidad de los sulfuros y carbonatos no siempre dependen de las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ , de la presión o de la temperatura del sistema ya que otros parámetros tales como los hidrodinámicos pueden generar patrones y velocidades de flujo que ocasionan esfuerzos sobre las capas de protección (constituidas por óxidos y sulfuros), removiéndolas y generando así un fenómeno de corrosión denominado corrosión asistida por flujo (CAF).

## Problema

La CAF es un problema en los sistemas de tubería que presentan altas velocidades de flujo y fuertes cambios de dirección. Existen relativamente pocos estudios del CAF en sistemas de tubería que transportan hidrocarburos con  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ .

Mediante el análisis de los efectos que tiene la velocidad de flujo de fluidos a través de las tuberías se pueden tomar medidas que permiten controlar o retardar la corrosión interna de la misma. Estos estudios se basan principalmente en el efecto que tienen las diferentes variables de operación de las tuberías en la corrosión del acero, ya sea variando todas las condiciones de operación de la tubería o solo una de ellas. Una manera de realizar éste tipo de análisis a nivel laboratorio es mediante de circuitos experimentales de tuberías.

Un Circuito Experimental de Tubería (CET) tiene como función reproducir a pequeña escala condiciones físicas y/o químicas de un sistema de tuberías. Este modelo físico se puede instalar a nivel laboratorio y colocar instrumentos que a escalas reales son muy caros o imposibles de instalar.

### Hipótesis

Con la implementación de un cople porta-probeta será posible evaluar la velocidad de corrosión de dos aceros grado API, esperando que uno de ellos tenga un mejor comportamiento con respecto a la corrosión.

### Objetivos

#### Objetivo General

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un “cople porta-probeta” para llevar a cabo fácilmente la evaluación de la velocidad de corrosión de los aceros API 5L X52 y X65 en un circuito experimental de tubería (CET) por el cual se hace circular un fluido amargo con un flujo turbulento.

#### Objetivos específicos

- Evaluar la velocidad de corrosión los aceros API 5L X-52 y X-65 en un medio amargo (ácido sulfhídrico) y flujo turbulento.

- Caracterizar los productos de corrosión formados por las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y difracción de Rayos X (DRX), para observar la morfología y las especies cristalinas presentes.

### Marco Teórico

#### Corrosión por CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S<sup>3,4</sup>.

La naturaleza de la interacción del H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> con aceros al carbono es compleja. De investigaciones realizadas por diferentes autores<sup>5-7</sup> se observa que las capas de productos de corrosión formadas sobre aceros templados pueden ser protectoras o pueden llevar a una falla rápida, dependiendo de las condiciones de producción. Esto se debe principalmente a que una película de sulfuro de Fe (FeS) se formará, si el H<sub>2</sub>S es la especie predominante, y el carbonato de hierro (FeCO<sub>3</sub>) se formará, si el CO<sub>2</sub> es el predominante en la mezcla<sup>8</sup>.

Se ha reportado de que dependiendo de los productos de corrosión (compuestos no estequiométricos) formados en el acero en medios amargos (presencia de H<sub>2</sub>S) pueden ser protectores o no protectores contra la corrosión. Muchos autores proponen que el primer producto de corrosión formado en la superficie del acero es una fase de sulfuro ferroso (FeS), conocida como mackinawita<sup>9</sup> como resultado de una reacción de estado sólido en la superficie del acero con el medio corrosivo<sup>10,11</sup>. La mackinawita en combinación con algunos otros sulfuros que lleguen a formarse tales como la troilita y la pirita, pueden llegar a tener cierta porosidad y adherencia controlada por el proceso de disolución del hierro y la difusión del hidrógeno formado durante las reacciones que se llevan a cabo en la superficie del acero<sup>12</sup>.

## Metodología de Investigación

### Diseño del cople porta-probetas en SolidWorks.

El objetivo de los coples es que las probetas permanezcan al mismo nivel de la pared interna de la tubería para no interferir en el patrón de flujo y poder llevar a cabo la experimentación simulando que el interior de la vía de transporte de flujo es metálico. La Figura 1 esquematiza el diseño del cople porta-probeta en SolidWorks 2014.



**Figura 1** Diseño de cople porta-probeta en SolidWorks 2014

### Construcción del cople porta probeta

Se lleva a cabo la construcción y maquinado del cople porta probeta en base al diseño propuesto en la Figura 1 para la colocación de este en un circuito experimental de tubería (CET), el cual se muestra en la Figura 2. En cada uno de estos dispositivos se podrán colocar los cupones de acero previamente maquinados para llevar a cabo las pruebas electroquímicas y por ende evaluar la velocidad de corrosión de los aceros API 5L X52 y X65.



**Figura 2** Cople porta probetas elaborado en teflón

### Ensamble del cople porta probeta en un circuito experimental de tubería y prueba de funcionamiento adecuado del mismo

Se lleva a cabo el ensamble del cople porta probeta en un circuito experimental de tubería. Posteriormente se realiza una prueba preliminar para corroborar el funcionamiento correcto del dispositivo utilizando agua como fluido.

### Caracterización microestructural de los aceros grado API 5L X52 y X65.

Se realiza la caracterización de los aceros grado API 5L X52 y X65 para determinar las fases presentes en cada uno de los aceros, mediante el uso de un microscopio óptico.

### Composición química de los aceros empleados

Mediante la técnica de análisis por emisión óptica (chispa) con un espectrómetro de arco y chispa marca BELEC, se obtiene la composición química de los aceros.

### Pruebas electroquímicas para determinar la velocidad de corrosión mediante el uso del cople porta probetas.

Se llevan a cabo pruebas electroquímicas para determinar la velocidad de corrosión de los aceros API 5L X-52 y X-65 en un circuito de tubería experimental (LOOP).

DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett. Diseño de un "Cople Porta-Probeta" para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento. Revista de Ingeniería Innovativa 2017

Se utiliza como medio corrosivo una salmuera de acuerdo a la norma NACE ID-196, adicionada con 10% de keroseno y H<sub>2</sub>S a 1 Bar a una velocidad de 30 l/min. La velocidad de corrosión se determina mediante la técnica de la resistencia a la polarización lineal con el software POWER SUIT para 3 diferentes tiempos de exposición del acero al medio corrosivo (3,6 y 12h).

La velocidad de corrosión se obtiene en mpy (mili pulgadas por año) y/o mmpy (milímetros por año). Dicha velocidad es evaluada en las 3 posiciones con las que se cuenta dentro del cople porta probetas.

### Caracterización de los productos de corrosión mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La caracterización de los productos de corrosión formados sobre la superficie del acero después de las pruebas electroquímicas se hace mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), con un equipo Jeol JSM 6300 operado a 20kV.

### Caracterización de los productos de corrosión mediante Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de DRX se realiza mediante un difractómetro Focus D8 Marca Bruker, el cual emplea radiación Cu K $\alpha$ , a las condiciones de 35 kV, 25A, en un intervalo de 2  $\theta$  20° a 120°, incrementos de 0.02°.

## Resultados

### Composición química

De los datos obtenidos en la Tabla 1, se observa que conservan similitud en el contenido de carbono aunque sea un poco mayor en el X52 y el porcentaje de azufre es relativamente bajo en ambos casos.

Existen otros elementos que intervienen en el comportamiento de los aceros en su velocidad de corrosión los cuales son el cromo,

cobre y níquel; en conjunto, estos elementos resultan importantes en el comportamiento de los aceros.

**Tabla 1** Composición química de los aceros API 5L X52

C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni
0.1	1.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	57	31	23	14	61	01	22

y X65

### Microestructura de los aceros API 5L X52 y X65

Las microestructuras, en ambos aceros se identifica la presencia de dos fases: la perlita (microconstituyente oscuro) y la ferrita (microconstituyente claro); donde la fase perlita está dentro de la matriz ferrita. Por lo tanto se determina que no existen factores ajenos como una elevada concentración de inclusiones, un tratamiento térmico u otro proceso fisicoquímico que afecte la microestructura.

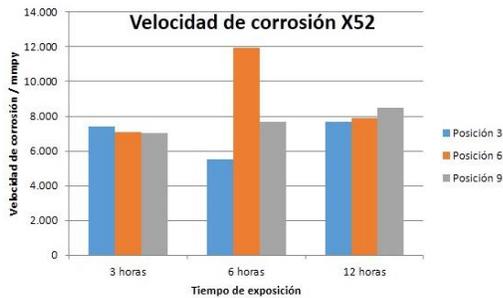
### Medición de la velocidad de corrosión, mediante la la resistencia a la polarización lineal.

En la Figura 3 se muestra la velocidad de corrosión respecto a las posiciones en el cople para el acero grado X52 en función del tiempo de exposición. Los resultados muestran un aumento en la velocidad de corrosión a medida que transcurre el tiempo en la zona crítica de la posición 6 para un tiempo de exposición de seis horas, siendo la zona que tuvo una inestabilidad mayor comportándose diferente respecto a las otras posiciones.

Si bien no existe una relación directa de las posiciones a medida que transcurre el tiempo, la relación de los valores es más cercana entre la

DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett. Diseño de un "Cople Porta-Probeta" para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento. Revista de Ingeniería Innovativa 2017

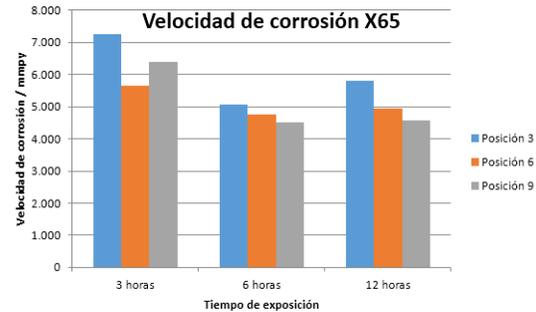
posición 3 y 9. El comportamiento de la posición 6 se debe probablemente a la interacción que tiene la superficie del metal con el agente turbulento al que está expuesto, la cual se analiza más adelante en las caracterizaciones de los productos de corrosión. Al final de la prueba las velocidades de corrosión en cada una de las posiciones tienen cierta similitud al aproximarse a los 8 milímetros por año.



**Gráfico 1** Velocidad de corrosión del acero API 5L X52 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición.

En el gráfico 2 se muestran los resultados de la prueba electroquímica para el acero X65, inmediatamente se observa que la velocidad de corrosión es menor que la del acero grado X52, partiendo del hecho que el X65 tiene menos de 8 mmpy en todos los registros.

También se aprecia que el acero tiene una tendencia a disminuir aún más la velocidad de corrosión, probablemente suceda porque el acero se protege desde el inicio de la prueba y mantiene los productos de corrosión en su superficie. Respecto a la posición 3 la tendencia al final de la prueba es a incrementar su actividad y quizá sea resultado de desprendimientos en su superficie. Las caracterizaciones de la superficie al final de la prueba se analizan más adelante.

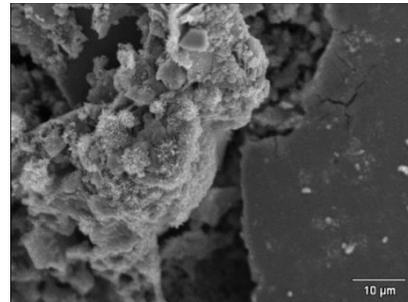


**Gráfico 2** Velocidad de corrosión del acero API 5L X65 para cada una de las posiciones en función del tiempo de exposición

### Caracterización de los productos de corrosión para el acero API 5L X-52

En la Figura 5 se observan los productos de corrosión formados a las 12 horas de experimentación, para el acero API 5L X65 aunque para ambos aceros se tienen productos de forma irregular.

Además para el acero API 5L X65 se tiene una aglomeración de los productos de corrosión y por ende una disminución de la velocidad de corrosión.

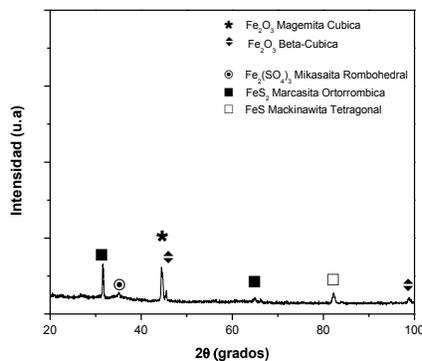


**Figura 3** Morfología de los productos de corrosión a 1500X para el acero API 5L X65 en la posición 9 a los tres diferentes tiempos de exposición.

## Caracterización de los productos de corrosión por Difracción de rayos X

La Figura 4 muestra el difractograma para el acero X65, se destaca la predominancia de sulfuros respecto a los óxidos, lo cual favorece la estabilidad de la capa protectora, siendo la marcasita ortorrómbica ( $\text{FeS}_2$ ) la que se presenta con mayor intensidad y aunado con la mackinawita ( $\text{FeS}$ ) proporcionan una mayor protección al acero.

Se comprueba además que este acero desarrolló a lo largo de la prueba una mayor variedad de productos de corrosión tales como sulfuros y un sulfato, los cuales en comparación con los óxidos, tienen un comportamiento de mayor adherencia y por ende una disminución de la velocidad de corrosión en comparación con el acero X52.



**Figura 4** Especies cristalinas presentes en los productos de corrosión del acero API 5L X65

## Conclusiones

Se observó que el acero API 5L X65 presenta menores velocidades de corrosión debido a la formación de productos de corrosión más estables en la superficie metálica en comparación que el acero API 5L X52.

Las menores velocidades de corrosión en el acero API 5L X65, se atribuye a una mayor gama de sulfuros en comparación de los óxidos tales como la Marcasita Ortorrómbica ( $\text{FeS}_2$ ) y la Mackinawita tetragonal ( $\text{FeS}$ ).

## Referencias

Sun, J.Y., and Jepson, W.P., "Slug Flow Characteristics and Their Effect on Corrosion Rates in Horizontal Oil and Gas Pipelines," SPE, Paper No. 24787, Washington, D.C., 1992.

Zhou, X., "Experimental study of Corrosion Rate and Slug Flow Characteristics in Horizontal, Multiphase Pipelines," NACE International Annual Conference and Exhibition, Paper No. 92081, Nashville, TN, April 1992.

Videm K., Kvarekval J., Surface effects on the electrochemistry of iron and carbon steel electrodes in aqueous  $\text{CO}_2$  solutions. Paper 01. Corrosion NACE, 1996.

Videm K., Kvarekval J., Corrosion of carbon steel in carbon dioxide saturated solutions containing small amounts of Hydrogen Sulfide, Corrosion. (April 1995) 260 – 269.

Srinivasan S., Russell D., Prediction of corrosivity of  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  production environments. Paper 011. Corrosion NACE. 1996.

Kvarekval J., The Influence of Small Amounts of  $\text{H}_2\text{S}$  on  $\text{CO}_2$  Corrosion of Iron and Carbon Steel, EUROCORR'97. Trondheim, Norway.

Fred F., Lyle Jr.,  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  corrosion under wet gas pipeline conditions in the presence of bicarbonate, chloride, and oxygen, Paper # 11 Corrosion, NACE 1.998.

Brown B., Nesic S.,  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  corrosion under scale forming conditions. Paper # 05625 Corrosion, NACE 2005.

Meyer, F. H., Riggs, O.L., McGlasson, R. L. and Sudbury, J.D., Corrosion products of mild steel in hydrogen sulfide environments, Corrosion Journal 14 (1958) 69.

S. N. Smith and E. J. Wright, Prediction of minimum H<sub>2</sub>S levels required for slightly sour corrosion, Corrosion/94, Paper no. 11, NACE International, Houston, Texas, 1994.

D. W. Shoesmith, P. Taylor, M. G. Bailey, and D. G. Owen, "The Formation of Ferrous Monosulfide Polymorphs during the Corrosion of Iron by Aqueous Hydrogen Sulfide at 21°C," J. Electrochem. Soc. 127, (1980): p. 1007–1015.

R. Cabrera-Sierra, E. Sosa, M. T. Oropeza, I. González, "Electrochemical study on carbón steel corrosion process in alkaline sour media", Electrochim. Acta, 47 (2002) 2149-2158.

## Aerogenerador ALISIO

FLORES-SÁNCHEZ, Verónica†\*, SHETTINO-GARCÍA, David Israel, SCHETTINO-GARCÍA, Martín Darío y JUÁREZ-BORBONIO, Jesús

*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz. Av.Universidad 350, Dos caminos, 94910 Cuicláhuac, Ver*

Recibido 19 de Octubre, 2017; Aceptado 6 de Diciembre, 2017

### Resumen

En este artículo se expone la evaluación de un generador eólico vertical tipo savonius diseñado por estudiantes de la Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, dicho estudio se realizó en la zona de Orizaba Veracruz con el objetivo de conocer la factibilidad del uso de este tipo de generadores. A lo largo del documento se presentarán los pasos para determinar la eficiencia del generador en RPM y Volts producidos, de igual forma se muestra la productividad del generador esta en función a distintos factores ambientales, y se compara el funcionamiento con generadores eólicos horizontales.

**Inocuidad, acortamiento, frigoríficas, fotovoltaico**

### Abstract

This article presents the evaluation of a vertical wind generator type savonius designed by students of the Technological University of the Center of Veracruz, this study was carried out in the area of Orizaba Veracruz with the objective of knowing the feasibility of using this type of generators. Throughout the document, the steps will be presented to determine the efficiency of the generator in RPM and Volts produced, just as it is shown the productivity of the generator is in function to different environmental factors, and the operation with horizontal wind generators will be compared.

**Safety, shortening, refrigeration, photovoltaic**

**Citación:** FLORES-SÁNCHEZ, Verónica, SHETTINO-GARCÍA, David Israel, SCHETTINO-GARCÍA, Martín Darío y JUÁREZ-BORBONIO, Jesús. Aerogenerador ALISIO. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:41-47

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: veronica.flores@utcv.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Según Lewis, el uso de los generadores eólicos trae consigo algunos beneficios tales como: ampliar los campos de desarrollo y de investigación, aumentar las capacidades tecnológicas y producir menos contaminación al generar energía eléctrica.

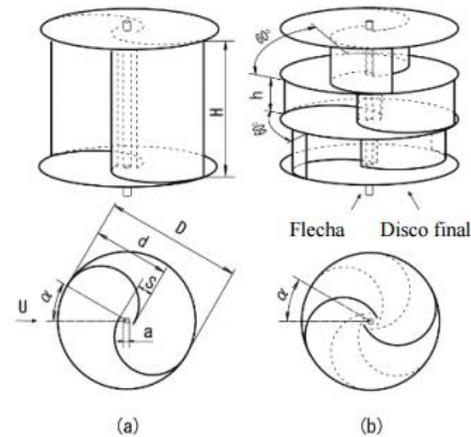
Alisio es un generador eólico vertical tipo “Savonius”, con este diseño se busca reducir los costos y obtener como mínimo 12v de corriente alterna (CA) con corrientes de aire de menos de 5 m/s. En comparación con los generadores convencionales empleados en los parques eólicos, la velocidad de viento que se necesita es mínima, además es más pequeño el área que ocupa es de 1m<sup>2</sup>.

## Justificación

El generador eólico vertical tipo savonius fue desarrollado en principio por Flettner utilizando un rotor que se forma a partir del corte de la sección transversal de un cilindro, para después volverlo a unir y formar una “S” muy parecido al que se muestra en la figura 1. [1][2]

Este tipo de turbina ha sido estudiada por una gran variedad de investigadores e inclusive instituciones, en el 2005 Tsutomu Hayashi, intentó mejorar la eficiencia del generador savonius, el diseñó una turbina de tres etapas (figura 2), pero desafortunadamente este diseño no fue muy óptimo, pues reducía 1/6 el torque, el coeficiente de potencia disminuyó en un 25% y existían momentos de torques negativos, todo esto en comparación con la turbina de una etapa. [2]

La turbina Savonius es de simple construcción, tiene la capacidad de tomar el viento de cualquier dirección, es operable a velocidades bajas de viento lo que la hace más eficiente en su funcionamiento. [3]



**Figura 1** Turbinas savonius: a) una etapa, b) tres etapas.

## Problema

El recurso eólico en México es competitivo, como lo demuestran los numerosos proyectos llevados a cabo por el sector privado en la modalidad de autoabastecimiento, así como por la CFE bajo la modalidad de Productor Independiente de Energía (AMDEE, 2016).

En México se genera un bajo porcentaje de energía eólica, lo anterior debido a que la tecnología existente es costosa, el diseño de un generador eólico vertical más eficiente, podrá generar 12v CA por cada ejemplar, además este sistema será 50% más económico, haciendo que la energía eólica se vea más atractiva a el inversionista.

## Hipótesis

El diseño del generador eólico ALISIO generará 12 V con una velocidad de viento de 5 m/s.

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar la funcionabilidad del sistema eólico ALISIO para revelar la velocidad angular que se puede alcanzar con distintas ráfagas de viento.

### Objetivos específicos

Establecer parámetros de funcionamiento del generador ALISIO.

Registrar las distintas velocidades de viento que se alcanzan Orizaba, Ver.

Comparar la velocidad del viento de la zona de estudio con la velocidad en RPM que puede tomar la turbina.

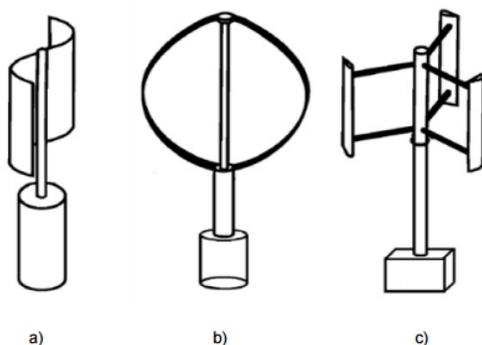
Establecer la velocidad media de la turbina.

Definir la eficiencia de funcionamiento del generador bajo los parámetros obtenidos.

### Marco Teórico

#### Turbina de generador de eje vertical

Existen tres tipos de generadores de eje verticales y se clasifican según su turbina, la turbina tipo Savonius, la turbina daerrius y la turbina tipo H. en la figura 2 se puede apreciar claramente cada tipo de turbina.



**Figura 2** turbinas de eje vertical: a) turbina tipo Savonius, b) turbina tipo Daerrius y c) turbina tipo H.

En este caso se ha elegido la turbina tipo savonius, ya que proporciona el torque idóneo para generar la energía deseada.

#### La energía eólica

La energía eólica se ha usado desde tiempos remotos para la navegación, molinos de viento; en la actualidad, se utiliza para generar electricidad a través de los parques eólicos [4].

México es un país en el cual hay una gran diversidad de zonas para poder aprovechar el potencial eólico, la zona con mayor potencial es Oaxaca, razón por la que se tiene el campo eólico más grande en el país. De igual manera existen tras regiones tales como Zacatecas, Tabasco, la cadena montañosa de la rumorosa y el litoral de la península de Baja California, así como litorales del Pacífico y Golfo de México[5].

El crecimiento del uso de generadores eólicos ha aumentado con el pasar del tiempo, según la GWEC (Global Wind Energy Council) el uso de generadores eólicos para 2020 podrá ayudar a disminuir la emisión de gases  $[[CO]]_2$  en mas de 1.5 toneladas por año.

Para el 2009 la capacidad eólica que se instaló creció un 25% con respecto al año anterior, cifra que representa una cuarta parte de crecimiento respectivamente [4].

#### Estudios sobre el recurso eólico en México

El recurso eólico como tal en México no ha sido estudiado en grandes magnitudes, es decir solo se han realizado estudios a zonas aisladas del país, donde se piensa que existe un mayor potencial eólico, de este modo se han creado mapas para algunas regiones del país, mismos que han sido creados por organizaciones como, el Laboratorio de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en colaboración con la comisan federal de electricidad.

Actualmente no existe un mapa eólico del estado de Veracruz, ya que, Veracruz es un estado con valores de recurso eólico muy variable y en muchos puntos del estado insuficientes, no obstante se piensa que existen otros puntos donde no hay fluctuaciones con desviaciones elevadas, de igual modo se cree que se puede aprovechar el recurso eólico que pasa otra vez de la sierra madre oriental.

### Sistema de generación eólico

En este caso se usa un generador de eje vertical, y se siguen los mismos principios de generación que en los generadores convencionales, es decir, que existe una relación entre la velocidad de la turbina y la velocidad del viento, lo que quiere decir que si existe una velocidad del viento alta, también existirá una velocidad alta de rotación de la turbina y viceversa. Por lo tanto cuando la velocidad del viento cambia, también afecta a la velocidad de la turbina y por ende la generación de energía.

La ecuación (1) da la relación entre el poder extraído de la turbina y las variables de la turbina.

$$P_{\text{turbina}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire.

A= Área de sección transversal.

v= Velocidad del viento.

$C_p$ = coeficiente de potencia.

En otras palabras los factores que delimitaran la potencia de la turbina son: El área de contacto, la densidad del aire y su velocidad. Es decir que mientras mayores sean estos valores la turbina tendrá mayor potencia.

### Metodología de Investigación

La aprobación de este trabajo radica en el impacto ambiental que se tiene con las energías limpias.

### Tipo de Investigación

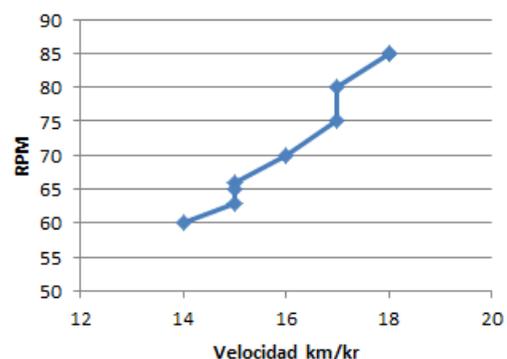
El trabajo que aquí se presenta es una investigación experimental pues el prototipo es probado en distintas velocidades de viento, de igual forma se hace una revisión exhaustiva de los autores que han desarrollado trabajos similares.

### Métodos Teóricos

Para el diseño del prototipo se determinan los parámetros de funcionamiento y el potencial eólico, posteriormente se calculan las RPM del prototipo.

### Establecimiento de los parámetros de funcionamiento.

Para establecer la velocidad de viento necesaria que permita obtener la velocidad angular en la turbina, se realizan pruebas con generador en distintas velocidades. Este análisis muestra la cantidad de RPM obtenidas a cierta velocidad del viento. Cuando la velocidad del aire es de 14 km/hr las RPM son de 60 (Figura 3)



**Figura 3** RPM obtenidas en velocidades distintas de viento

Cundo la turbina tienen 120 RPM la producción de voltaje que se tiene es de 12 v.

**Estudio del potencial eólico**

Para poder realizar un análisis adecuado del potencial eólico, consultamos los valores máximos de velocidad del viento durante el mes de febrero en la zona de Orizaba, Veracruz. Dichos valores fueron extraídos de la pagina "Meteored" misma que diariamente hace un análisis de los fenómenos meteorológicos en diferentes zonas del país.

A continuación se muestra una grafica con las velocidades del viento obtenidas durante el mes de febrero, para la zona de Orizaba Veracruz.

La velocidad del viento más alta para este mes fue 37 km/hr es decir 10.27 m/s aproximadamente. Así mismo tenemos una velocidad promedio de 23.08 km/hr, el equivalente a 6.4 m/s.



Figura 4 Gráfico del viento en Orizaba, Veracruz durante el mes de febrero.

De igual manera se obtuvieron los datos del mes de enero, mismos que se ilustran a continuación.

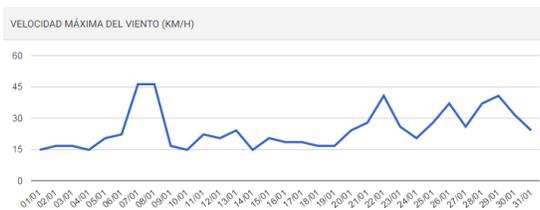


Figura 5 Gráfico del viento en Orizaba Veracruz durante el mes de enero.

Durante enero se puede apreciar que existen fluctuaciones grandes en el comportamiento de la velocidad del viento, la velocidad media es de 24.6 km/hr.

**Establecimiento del modelo estadístico**

Una vez obtenidos los datos de funcionamiento del generador y los valores de la velocidad del viento durante enero y febrero, podemos hacer un análisis estadístico, del posible funcionamiento del generador bajo estas circunstancias. Para hacerlo más significativo se manejaran m/s.

Para esto se deben obtener los promedios de los parámetros de funcionamiento del generador, los datos obtenidos fueron, una velocidad de viento promedio de 4.4753 m/s y un total de RPM de 72.11, con estos valores obtenidos se usa una relación para compararla con los valores obtenidos en los meses de enero y febrero.

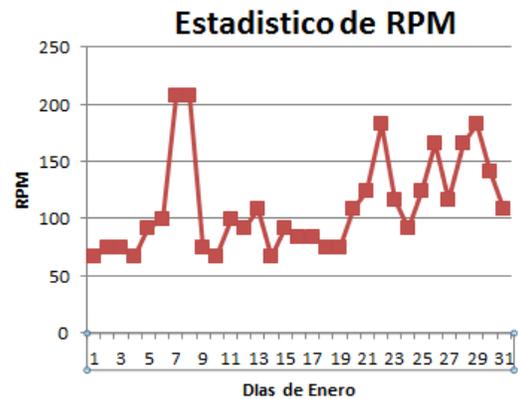


Figura 6 Estadístico para el mes de Enero.

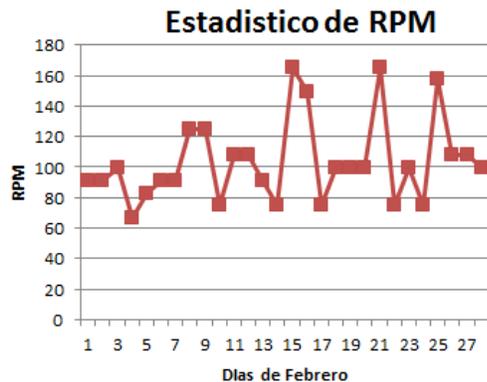


Figura 7 Estadístico para el mes de febrero.

A partir de estos valores podemos inferir que las RPM promedio para el mes de enero son de 110 RPM cada y para febrero 103 RPM.

Si tomamos en cuenta que con 120 RPM se obtienen 12 volts aproximadamente, entonces obtenemos promedios de 11 y 10.3 volts respectivamente.

Estos datos planteados únicamente para un elemento generador, si tomamos en cuenta que se puede colocar un campo eólico de dimensiones mínimas.

Por ultimo para definir funcionabilidad del generador ALISIO,

Para definir la eficiencia de funcionamiento del generador, tenemos los datos de: media de velocidad, media de RPM, media de Voltaje, y todo el análisis estadístico, con lo cual podemos definir la eficiencia con la frase, si se planeaba producir 12V con corrientes de aire que hagan que la turbina gire a 120 RPM, y obtenemos que en la zona, estadísticamente se tienen valores medios de 110 RPM y 103 RPM entonces procedemos resolver la eficiencia con una relación que sea directamente proporcional, estableciendo la siguiente ecuación.

$$eficiencia_{RPM} = \frac{RPM_m(100)}{RPM_f} \quad (2)$$

Donde:

$RPM_m$  = Las revoluciones por minuto medias obtenidas durante algún mes.

$RPM_f$  = Las revoluciones por minuto necesarias para hacer 12 V.

Resolviendo la ecuación tenemos.

$$eficiencia_{RPM} = \frac{110(100)}{120} \quad (3)$$

Para el mes de enero. Obteniendo el 91% de eficiencia durante el mes de enero.

$$eficiencia_{RPM} = \frac{103(100)}{120} \quad (4)$$

Para el mes de febrero. Obteniendo el 85.83% de eficiencia en RPM para el mes de febrero.

Ahora también podemos definir una relación de eficiencia con respecto al voltaje. Obteniendo:

$$eficiencia_V = \frac{V_m(100)}{V_f} \quad (5)$$

Aunque si ponemos atención, los resultados serian los mismos, debido a que si decimos que tenemos con 120 RPM 12 V, es decir por cada 10 RPM producimos 1 V (haciendo una comparación de valores) podemos intuir que en la formula si sustituimos las RPM por Volts, la relación será exactamente igual. Entonces proseguimos a calcular la eficiencia de los dos meses y para eso solo haremos la media de eficiencia mensual:

$$Eficiencia = \frac{eficiencia_{ene} * eficiendia_{feb}}{n} \quad (6)$$

Donde n es el número de meses. Sustituyendo la formula tenemos.

$$eficiencia = \frac{91 * 85.83}{2} \quad (7)$$

Obteniendo así el 88.75 % de los valores esperados de funcionamiento durante estos meses bajo esas circunstancias.

### Resultados

Se obtuvo que el 88.75 % de los valores esperados son alcanzados en situaciones muy parecidas a las del clima en Orizaba. Claro podemos inferir a que si las pruebas se realizaran en el complejo montañoso serian resultados mas favorables, debido a que existiría menos interferencias del viento. De igual manera concluimos en que el funcionamiento del generador ALISIO es superior en comparación con generadores horizontales, debido a que las velocidades de viento registradas son mínimas en comparación con las usadas para hacer girar los molinos eólicos.

### Conclusiones

El generador ALISIO es capaz de Producir la cantidad de Voltaje esperado en zonas donde se alcancen vientos mayores a 6.8 m/s, no obstante el generador opera a bajas velocidades de viento, a 14 km/hr (3.88 m/s) se alcanzan 60 RPM es decir aproximadamente 6 volts en zonas de baja velocidad del viento.

Por lo anterior se tiene que el generador ALISO es viable, la velocidad de viento necesaria se puede encontrar en distintas zonas del Estado de Veracruz y del País.

### Referencias

[1] Hassan, M., Iqbal, T., Khan, N., Hinchey, M., & Masek, V., (2017). [online] Available at: <https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/CFD-Analysis-of-a-Twisted-Savonius-Turbine.pdf> [Accessed 28 Jun. 2017].

[2] HAYASHI, T., LI, Y. and HARA, Y. (2005). Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor. *JSME International Journal Series B*, 48(1), pp.9-16.

[3] Kamoji, M., Kedare, S. and Prabhu, S. (2009). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7-8), pp.1064-1073.

[4] Universitaria, R. (2017). Revista Digital Universitaria, Recurso Eólico en Baja California. [online] *Revista.unam.mx*. Available at: <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num2/art24/int24a.htm> [Accessed 28 Jun. 2017].

[5] Cadenas Tovar, R. (2017). Educación y Nuevas Tecnologías Central Eoloeléctrica La Venta II". *Revista Digital Universitaria*. Vol. 8, No. Available at: [http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art90/dic\\_art90.pdf](http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art90/dic_art90.pdf) [Accessed 28 Jun. 2017].

## Foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados

JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, José A.†\*, TOVAR-PÉREZ, Juan Pablo, NIEVES-ORTÍZ, Alfredo y SANTILLÁN-CONTRERAS, Luis Ángel

*Universidad Tecnológica Fidel Velazquez. Av. Emiliano Zapata S/N, El Trafico, 54400 Villa Nicolás Romero, Méx  
Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de Grupo Jumex*

Recibido 11 de Octubre, 2017; Aceptado 22 de Diciembre, 2017

### Resumen

En este trabajo presentamos una fuente de luz artificial a base de nanotubos de carbono multicapa funcionalizados con nanopartículas de plata, que nosotros denominamos; "foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados" aquí mostramos que es un proyecto viable para poder remplazar los focos ahorradores, focos incandescentes y focos LED, debido a su eficiencia y calidad de ahorro de energía de nuestros nanotubos de carbono funcionalizados, mostramos un foco ahorrador que emite luz blanca y de bajo consumo eléctrico que podrán obtener una alta eficiencia de luminosidad de más 60 lúmenes por watt en comparación con las luces LED, tiene un consumo de energía mínimo, se calcula que utiliza alrededor de 0.1 watts por hora de funcionamiento, de al redecor de unas 500 veces menos que las luces LED [1]. Es producto terminado es durable y económico, ya que para la implementación del producto se utilizan materiales reciclados para la fabricación de las capsulas que protejen los filamentos de nanotubos de carbono, con esta implementación también se pretende reducir la contaminación ambiental generado por residuos plásticos.

### Nanotubos de carbono, foco ahorrador y funcionalizados

### Abstract

In this work we present an artificial light source based on multilayer carbon nanotubes functionalized with silver nanoparticles, which we call; "energy-saving bulbs based on functionalized carbon nanotubes" here we show that it is a viable project to be able to replace the light bulbs, incandescent light bulbs and LED spotlights, due to its efficiency and quality of energy saving of our functionalized carbon nanotubes, We show a white light bulb and low power consumption that can achieve a high brightness efficiency of more than 60 lumens per watt compared to LED lights, has a minimum power consumption, is estimated to use about 0.1 watts per Hour of operation, to the redecor of about 500 times less than LED lights [1]. The finished product is durable and economical, since for the implementation of the product recycled materials are used for the manufacture of capsules that protect the filaments of carbon nanotubes, with this implementation is also intended to reduce the environmental pollution generated by recycled plastic.

### Carbon nanotubes, energy-saving bulbs, functionalized

**Citación:** JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, José A., TOVAR-PÉREZ, Juan Pablo, NIEVES-ORTÍZ, Alfredo y SANTILLÁN-CONTRERAS, Luis Ángel. Foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-4:48-53

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jjimener@jumex.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El carbón es uno de los elementos mas versátiles conocido por el hombre y puede tener una gran variedad de estructuras que se han venido estudiando.

Los nanotubos de carbono (NTC's) son alótropos del carbono, como el diamante, el grafito o los fulerenos, fueron descubiertos accidentalmente por S. Iijima, ya que en un principio se pensó que eran fulerenos. Su estructura puede ser procedente de una lámina de grafeno enrollada sobre sí misma. Debido al grado de enrollamiento, y la manera Como se conforma la lámina original, muestran distinto diámetro y geometría interna.[2]

Existen diferentes tipos de NTC's en función de las capas de grafito que los forman, estos pueden ser nanotubos de carbono de pared sencilla (SWCNT's por sus siglas en inglés) y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT's) que pueden considerarse como capas de láminas de grafeno enrolladas concéntricamente donde cada átomo de carbono está unido con otros tres mediante hibridación  $sp^2$ . [3]

## Justificación

Actualmente, la contaminación es un “problema de carácter mundial” y junto al calentamiento global han hecho que los avances tecnológicos e investigaciones se enfoquen en tratar de disminuir la problemática, tanto como el uso de tungsteno en la fabricación de los focos incandescentes que tienen un aprovechamiento bajo eléctricamente como el provebla de la contaminación de los envases plásticos, generando un impedimento para avanzar en la tecnología comparada con la del foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbon.

La utilización de estos nanotubos decorados con plata son atractivos en la sustitución del tungsteno por su principal ventaja en el consume de corriente eléctrica y la utilización de plástico reciclado para la fabricación de las bombillas.

## Problema

El calentamiento global es día a día una problemática mundial sin lugar a dudas el excesivo consumo eléctrico es un factor vital, se estima que las emisiones totales derivadas del consumo nacional eléctrico son de 133.4 millones de toneladas de dióxido de carbono [4]. La intención del proyecto es reducir las emisiones de dióxido de carbono principal precursores de gases de efecto invernadero.

## Hipótesis

Se pretende disminuir el consumo eléctrico en el alumbrado con la implementación de un producto de bajo consumo eléctrico esto aunado a los desarrollos que se están implementando para el uso de productos y energías sostenibles se pueden reducir considerablemente las de emisiones de  $CO_2$ . la implementación de materiales reciclados para la producción de la capsula del foco reducirían la contaminación por residuos plásticos lo cual realza la sostenibilidad y viabilidad del proyecto, no solo se consume menos energía, se contamina menos y se busca disminuir la contaminación por residuos plásticos.

## Objetivos

En nuestro objetivo con este trabajo es la fabricación de luz artificial con manojos de nanotubos de carbono multipared decorados con nanopartículas de plata, muy eficiente con muy bajo consumo de energía y larga duración de vida útil.

Se calcula que 0,1 W por cada hora de funcionamiento, es decir, cerca de un centenar de veces menos que las LED, además de una mejor disipación de calor. La electrónica basada en el carbono, especialmente los nanotubos de carbono (CNT), adoptamos poner un manojo con ciento de nanotubos de carbono alineados como filamentos, así, si un nanotubo llegase a su fin de su vida se reemplazaría automáticamente con los otros nanotubos de carbono.

Además de:

- Disminuir el impacto ambiental de los focos de consumo eléctrico
- Reducir los contaminantes plásticos (PET, PP, HDPE)

### Objetivo General

Producir un foco de bajo consumo eléctrico, Desarrollar un foco ahorrador a base de materiales reciclados que minimicen el impacto ambiental.

### Objetos específicos

1.- uso de contaminantes plásticos como materia prima (botellas, bolsas, tapas, envases, etc) para la producción de un producto de bajo impacto ambiental y económico

2.- crear un producto:

- Eficiente
- Accesible
- De bajo costo y consumo eléctrico,
- Durable y competitivo.

### Objetivos específicos

Mayor ahorro de energía emitiendo luz blanca a base de los nanotubos de carbono funcionalizados con plata.

Mejor aprovechamiento de las propiedades caloríficas que poseen las nanopartículas de plata con el paso de la corriente eléctrica para la emisión de calor.

El “foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados con plata” utilizado en el contexto que se desea gracias a su excelente propagación de luz blanca y a la emisión de calor que este nos brinda, especialmente en hogares, oficinas, negocios, bodegas, etc.

### Marco Teórico

Los Nanotubos de carbono (NTC's) funcionalizados con plata son utilizados en la capsula (foco) para la emisión de luz blanca y aprovechar el calor que se transmite, estos elementos son utilizados por las investigaciones que se han realizado a cerca de ellos y tienen propiedades que ayudan a mejorar mucho la calidad del producto, el aprovechamiento de la energía calorífica, mejoran la emisión de luz blanca y los nanotubos de carbono (NTC's) específicamente son muy buenos ahorradores de energía eléctrica.

Emisión de campo a partir de nanotubos de carbono y su aplicación a fuentes de electrones (Elsevier o sus licenciarios o colaboradores, Elsevier Science Ltd, 2000). Alta estabilidad química y de alta resistencia mecánica. Un estudio de microscopía de emisión de campo (FEM) se llevó a cabo tanto para los nanotubos de paredes múltiples (MWNT) y nanotubos de una sola pared (SWNT) producidas por descarga de arco entre los electrodos de carbono.

Emisión estable de electrones, la luminosidad adecuada, y larga vida de los emisores.

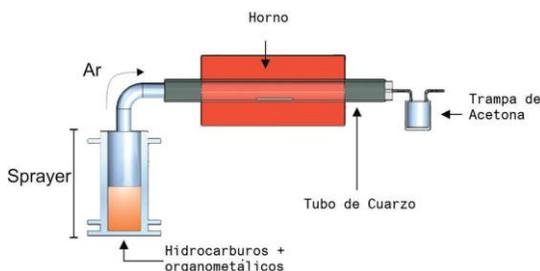
Dispositivo de múltiples capas blanca orgánicos emisores de luz electroluminiscente (Junji Kido, Masato Kimura y Katsutoshi Nagai, Science, 1995). dispositivos electroluminiscentes orgánicos son diodos emisores de luz en la que los materiales activos consisten enteramente de materiales orgánicos.

Aquí, se informa de la fabricación de un dispositivo electroluminiscente orgánico de emisión de luz blanca hecha a partir de películas delgadas orgánicas-depositado al vacío.

Las aplicaciones de un dispositivo de este tipo incluyen fuentes de luz finas como el papel, que son particularmente útiles para los lugares que requieren dispositivos de iluminación de peso ligero, tal como en un servicio de enlace de aeronaves y de espacio.

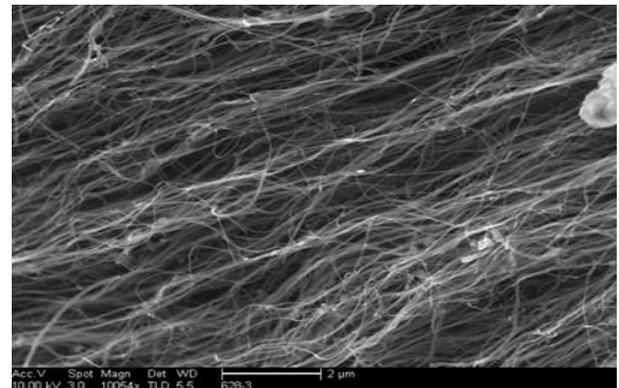
### Metodología de Investigación

Existen diferentes métodos que permiten obtener CNT's, cada uno de los métodos presenta ventajas y desventajas asociadas. La síntesis de nuestros nanotubos de carbono es mediante el proceso de CVD, figura 1. Hoy en día este proceso de síntesis es muy popular para la obtención de nanotubos de carbono pues permite obtener nanotubos de alta pureza y en gran cantidad.

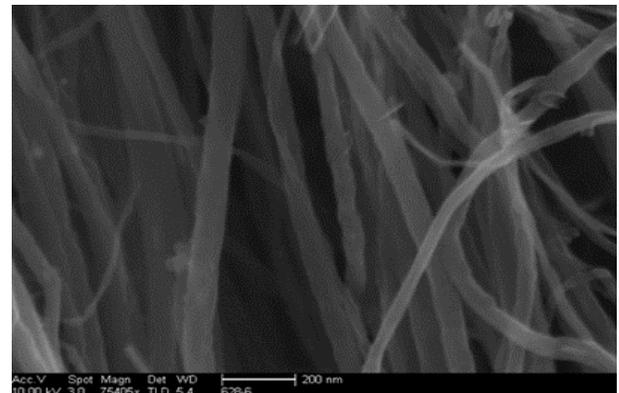


**Figura 1** Típico reactor para el proceso de CVD

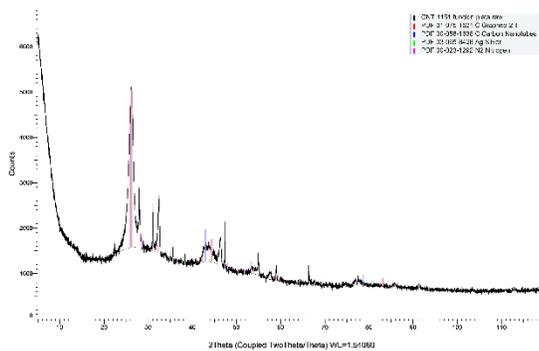
Para verificar que realmente son nanotubos de carbono se analizan mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) figura 2 y 3. Para los análisis de la decoración de nuestro material usamos la difracción de rayos X. Los nanotubos de carbono son decorados con nanopartículas de plata, para llegar a este proceso primero se funcionalizan los nanotubos de carbono mediante el proceso Redox, con este proceso los nanotubos de carbono son más reactivos, entonces se agrega nitrato de plata molido sobre los nanotubos de carbono en un proceso de sonicación por 30 min con agua desionizada para depositar las partículas de plata, esto hace un enlace carbono-plata, aquí mostramos con el análisis de difracción de Rayos X, figura 4



**Figura 2** Microscopia electrónica de barrido aquí observamos nuestros manojos de nanotubos de carbono



**Figura 3** Acercamiento donde distinguimos mejor los nanotubos de carbono



**Figura 4** Difracción de Rayos X. para comprobar la presencia de los nanotubos de carbono y la partícula de plata

Para la metodología de la emisión de luz presentamos un simple ajuste en el circuito eléctrico, su funcionamiento es debido a que la luz de los nanotubos se obtiene por inyección de electrones y huecos de la fuente al portador y viceversa. Estos electrones y huecos, al recombinarse, emiten luz, la capacidad de transporte de corriente de los nanotubos de carbono es su capacidad para convertir una señal electrónica en una señal óptica de una manera altamente eficiente.

Funciona como un foco normal, tiene su casquillo estándar que entra en cual quiere socket de hogar, al llegar la corriente eléctrica de 120 volts es transformado a 12 volts con un transformador de corriente eléctrica, esta corriente es transportada por los hilos de cobre hasta los nanotubos de carbono, al llegar la corriente los nanotubos de carbono estos empiezan con la radiación electromagnética, que es una luz blanca [5], al tener nanopartículas de plata hace un mejor conducción eléctrica como térmica [6], todo dentro de una ampolla de vidrio en vacío.

## Resultados

Con base en lo planteado, la investigación y experimentación realizada, se consiguió crear un foco de bajo consumo eléctrico (aproximadamente 0.1 w/h.) en comparación con los focos comerciales e incluso los focos led, es más eficiente con respecto al consumo eléctrico, es durable, y lo más importa el impacto ambiental es de un margen muy bajo basándose en el consumo estimado de los focos ahorradores y las emisiones que se generan anualmente.

## Conclusiones

En vista de que un gran porcentaje de focos ahorradores no cumplen con los requerimientos de calidad de iluminación, eficiencia, factor de potencia y ahorro de energía eléctrica, se concluye que hay que hacer uso de los nanomateriales debido a su eficiencia, tales como los nanotubos de carbono y las nanopartículas de plata,

## Agradecimiento

Los autores agradecen al Dr. Arturo Cervantes, a la Dra Manuela Dias al Ing Daniel Vargas y a la Lic, Ekitzel Rosas Lara, por las discusiones fructíferas en nuestro trabajo.

## Referencias

- [1] Sharon Bahena-Garrido, Norihiro Shimoi, Daisuke Abe, Toshimasa Hojo, Yasumitsu Tanaka. Planar light source using a phosphor screen with single-walled carbon nanotubes as field emitters. Review of Scientific Instruments. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4895913>.
- [2] Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 1991;354:56-58. <http://search.proquest.com/openview/382a4e4ad28bd67f5f25e974ad9afb19/1?pq-origsite=gscholar&cbl=40569>

[3] López López, Lluvia. Rev. mex. cienc. farm vol.43 no.3 México jul./sep. 2012 [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-01952012000300002&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-01952012000300002&script=sci_arttext&tlng=en)

[4] World economic forum. (2017). global energy architecture performance index report 2017. junio 2017, de committed to improving the state of the world [http://www3.weforum.org/docs/wef\\_energy\\_architecture\\_performance\\_index\\_2017.pdf](http://www3.weforum.org/docs/wef_energy_architecture_performance_index_2017.pdf)

[5] Natnael behabtu, Colin c. young, Dmitri e. tsentalovich1, Olga kleinerman, xuan wang, anson w. k. ma. Strong, light, multifunctional fibers of carbon nanotubes with ultrahigh conductivity. Science, vol 339, issue 6116, 11 January 2013.

[6] kyoung-yong chun1, youngseok , jonghyun rho, jong-hyun ahn, young-jin kim, hyouk ryeol choi, and seunghyun baik. highly conductive, printable and stretchable composite films of carbon nanotubes and silver. nature nanotechnology | vol 5 | december 2010 [www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology)

## Cómo mejorar los modelos RNAs usando análisis estadístico?

ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana <sup>1</sup> & COLORADO-GARRIDO, Darío <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos. Av. Universidad Km.7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 96355, Coatzacoalcos, Veracruz México

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables. Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos. Av. Universidad Km.7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 96355, Coatzacoalcos, Veracruz México

Recibido 12 Junio 2017; Aceptado 10 Diciembre, 2017

### Resumen

Este trabajo presenta una metodología que hace uso del análisis estadístico con la finalidad de mejorar el diseño de los modelos de redes neuronales artificiales (RNAs) en el sentido de que disminuye el número de variables de entrada a la RNA y hace una validación estadística estricta para verificar la bondad del ajuste. Para ilustrar la metodología se hace uso de los trabajos presentados por los autores Ramírez et al. (2017), Martínez et al. (2017), Escobedo et al. (2016) los cuales ocupan algunos pasos de la metodología propuesta.

**Análisis residual, matriz de correlación, regresión lineal múltiple**

### Abstract

This research presents a methodology that take use of statistical analysis with the aim of improving the artificial neural networks model (ANN), in the sense that the number of input neurons in the ANN were decreased and strict statistical validation process was evaluated in order to verify the goodness of fit. To illustrate the methodology, the research of Ramirez et al. (2017), Martínez et al. (2017), Escobedo et al. (2016) were analyzed.

**Residual analysis, Correlation matrix, Multiple lineal regression**

**Citación:** ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana & COLORADO-GARRIDO, Darío. ¿Cómo mejorar los modelos RNAs usando análisis estadístico?. Revista de Ingeniería Innovativa. 2017. 1-4: 54-65

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: bescobedo@uv.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El modelo matemático de una red neuronal artificial (RNA) ha sido usado para predecir fenómenos físicos, químicos, energéticos, biológicos, mecánicos, ambientales, sociales, económicos, etc. Lo anterior, entendiendo al modelo RNA como un modelo tipo “caja negra”, donde no es necesario conocer o entender mecanismo de transferencia o razones de cambio para predecir una variable dependiente.

En la literatura diferentes metodologías para predecir una variable de desempeño en ciclos termodinámicos basados en el proceso de absorción-desorción para producir calor o frío han sido estudiadas. En estas metodologías las variables de operación medibles son, por ejemplo, temperaturas, presión, flujo másico o concentración y utilizan estructuras matemáticas como las RNA y los modelos polinomiales. Al respecto, diferentes trabajos han sido reportados, Laidi y Hanini (2013) predice el coeficiente de desempeño (COP) de un refrigerador solar intermitente para la producción de hielo utilizando carbón activado/metanol como fluidos de trabajo utilizando una red neuronal artificial.

Lazrak et al. (2016) presenta una metodología basada en evaluaciones dinámicas y modelos de identificación basados en RNA para predecir el desempeño dinámico de un enfriador basado en un ciclo de absorción. Beausoleil et al. (2015) presenta un modelo quasi-estado-estable, dicho modelo se basa en modelos de regresión ajustados con datos experimentales de un enfriador por absorción. Castilla et al. (2013) propone simplificar la predicción del desempeño de equipos para calentamiento, ventilación y aire acondicionado usando polinomios y RNA, con la visión de implementarlos en control y estimación en tiempo real, así como en sensores.

Debido a la gran utilidad de los modelos de RNAs para predecir fenómenos físicos, la presente investigación propone una metodología con el objetivo mejorar el modelo tradicional de RNA en el sentido de que disminuye el número de variables de entrada y hace una validación estadística estricta del modelo predicho por la RNA. Con esta metodología también es posible construir funciones polinomiales las cuales al igual que las RNA predicen la variable dependiente dadas las variables independientes.

Los pasos de la metodología planteada en esta investigación se ilustran en la predicción del coeficiente de desempeño de los sistemas estudiados en Ramírez et al. (2017), Martínez et al. (2017), Escobedo et al. (2016), dado que la metodología estudiada es una versión ampliada y mejorada de las metodologías expuestas en dichos trabajos.

## Red neuronal artificial (RNA)

Esta sección describe brevemente el modelo de red neuronal artificial. Para más detalles del tema se recomienda revisar Demuth y Beale (1998). Dado y como una variable dependiente que se desea predecir y  $x_1, x_2, \dots, x_n$  como un conjunto de variables independiente, un modelo red neuronal artificial puede ser definido de la siguiente forma:

$$y = RNA(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Donde *RNA* representa al menos dos funciones matemáticas relacionadas, por ejemplo: lineal y tangencial hiperbólica o lineal y sigmoide. A menudo, en procesos químicos, físicos o energéticos, y representa una variable de gran interés que proporciona una medida cuantificable del desempeño del sistema, la cual se asocia a la capa de salida de un modelo RNA. Mientras que,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son variables de operación medibles durante el desarrollo del fenómeno estudiado, dichas variables son usadas en la capa de entrada del modelo.

Si se usa la función tangencial hiperbólica y la función lineal para proponer un modelo RNA se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = \sum_{j=1}^J \left[ W_{out}(l, j) \cdot \left( \frac{2}{1 + \exp(-2 \sum_{r=1}^R ((W_{in}\{j, r\} p_r) + b_{l,j}))} - 1 \right) \right] + b_2 \quad (2)$$

Dónde:  $W_{in}$  representa los pesos relacionados a la capa de entrada con la capa oculta,  $W_{out}$  los pesos asociados a la capa oculta con la capa de salida,  $b_{l,j}$  es el vector de sesgos relacionados a la capa de entrada,  $b_2$  el sesgo asumido a la capa de salida,  $R$  es el número de neuronas en la capa de entrada (variables independientes) y  $J$  el número de neuronas ocultas.

Dos problemas son comúnmente planteados cuando se entrena un modelo RNA: i) determinar el número de variables independientes en la capa de entrada  $R$ , y ii) el número de neuronas en la capa oculta  $J$ . La metodología expuesta en este trabajo ayuda a resolver el primer problema.

### Metodología para mejorar los modelos de RNA

En esta sección se describe la metodología propuesta (pasos 1-8 abajo) en este trabajo la cual pretende ayudar a mejorar el desempeño de los modelos de redes neuronales artificiales en el sentido que disminuye el número de variables de entrada a la red y además, propone una validación estadística estricta a dichos modelos.

**Variables de entrada.** Suponga que al inicio tiene  $n$  variables de entrada, digamos por ejemplo,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , y que con ellas pretende hacer un modelo de red neuronal artificial el cual le permita predecir una variable  $y$ . En símbolos matemáticos,

$$y = RNA(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3)$$

**Matriz de correlación.** La correlación es una técnica que permite investigar la relación lineal que pudiera existir entre dos variables. En este estudio el *coeficiente de correlación de Pearson* es usado para medir la relación lineal entre dos variables aleatorias  $x$  y  $y$ . La definición matemática de dicho coeficiente de correlación denotado como  $\rho(x, y)$  es

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (4)$$

Donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las medias,  $S_x$  y  $S_y$  son las desviaciones estándares y  $(x_i, y_i)$  son las observaciones de las variables  $x$  y  $y$ , respectivamente. La letra  $n$  es el número de pares de observaciones,  $(x_i, y_i)$ ,

- Un coeficiente de correlación con valor  $\rho = 1$  significa que existe una relación lineal perfecta positiva entre las dos variables que se estén correlacionando, es decir,  $y = ax + b$ .
- El valor  $\rho(x, y) = -1$  indica que existe una relación lineal inversa o relación lineal perfecta negativa entre las dos variables, esto es,  $y = -ax + b$ .
- El caso  $\rho(x, y) = 0$  sugiere que no existe relación, por lo menos lineal entre los respectivos valores de las variables  $x$ ,  $y$ .

Cuando se pretende estudiar la correlación lineal entre más de dos variables,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , resulta práctico arreglar todos los coeficientes  $\rho(x_i, x_j)$   $i, j = 1, 2, \dots, n$  en una matriz, dicha matriz recibe el nombre de matriz de correlación. En esta metodología la matriz de correlación es usada para seleccionar aquellos pares de variables  $(x_i, x_j)$  que presenten coeficientes de correlación altos.

De esta forma, el conjunto de variables de entrada  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  que se tenía inicialmente para los modelos de redes neuronales artificiales es disminuido a un número menor de variables, digamos  $m$  con  $m < n$ . Así, con ésta nueva cantidad de variables se pasa al siguiente paso en la metodología.

**Regresión múltiple (RM).** Como menciona el autor Kachigan S. (1991), mientras el coeficiente de correlación nos mide la relación lineal entre dos variables, el análisis de regresión múltiple permite encontrar una ecuación matemática la cual permita describir la naturaleza de la relación entre dos o más variables.

Suponga que tiene una o más variables independientes  $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ . El análisis de regresión múltiple esta interesado en predecir una variable dependiente  $y$  cuando se conocen los diferentes valores de las variables independientes  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . En esta metodología el análisis de regresión múltiple es usado para construir una función polinomial  $P: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$  tal que

$$y = P(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon \quad (5)$$

Donde  $\varepsilon$  es un error aleatorio. Una vez encontrada la función polinomial  $P$  un paso de suma importancia es la validación del modelo encontrado. Esta validación es presentada en el paso que sigue.

**Análisis residual.** Dado que la función polinomial (5) fue encontrada usando el análisis de regresión lineal múltiple, la validación de dicho modelo polinomial es tradicionalmente hecha verificando que las hipótesis del análisis de regresión múltiple (RM) se satisfacen, dichas hipótesis son, el error aleatorio  $\varepsilon$

- a) Tiene valor esperado 0,
- b) Presenta distribución normal,
- c) Tiene varianza constante (homocedasticidad) y,
- d) Es independiente.

Debido a que, la distribución del error aleatorio  $\varepsilon$  es desconocida no se pueden verificar las hipótesis de la RM directamente. El incumplimiento de las hipótesis enunciadas arriba no es evidente directamente de una inspección de la gráfica de  $y$  contra  $P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ .

Por lo que, una gráfica de los errores residuales puede ayudar a detectar posibles fallas o incumplimiento de dichas hipótesis. Estos errores residuales son definidos de la siguiente forma: errores residuales  $= y_i - \hat{y}_i$ , donde  $y_i$  es la  $i$ -ésima observación de la variable,  $y$  y  $\hat{y}_i$  es la  $i$ -ésimo parámetro estimado, es decir,  $\hat{y}_i = P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ .

Si la gráfica de los errores residuales se asemeja a una distribución normal con media 0, entonces las hipótesis (a) y (b) son correctas. Para verificar la hipótesis (c) y (d), se debe de hacer una gráfica de la variable dependiente estimada ( $\hat{y}_i = P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ) contra los errores residuales estandarizados. Todos los puntos en dicha gráfica deben de estar dentro de una banda cercanos a 0 y alejados del mismo no más de  $\pm 3\sigma$  ( $\sigma$  es la desviación estandar de  $y = P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ) Se recomienda al lector revisar el capítulo 4 del libro Kachigan S. (1991), para más detalles sobre el análisis de regresión múltiple y el análisis residual.

**Variables de entrada a la RNA.** Una vez validado el modelo polinomial (3.1) observe lo siguiente.

- Para la construcción de la función polinomial (3.1) es posible usar todas las variables  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$  pero se busca que dicho polinomio sea lo más simple posible. Así que, intente disminuir (de ser posible) la cantidad de variables usadas en dicho polinomio
- Si no se descartan variables, es decir, todas las variables  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$  (seleccionadas de la matriz de correlación) fueron usadas en la construcción de la función polinomial, entonces dichas variables serán las variables de entrada para la RNA.
- Si alguna variable no fue usada en el modelo polinomial estimado, entonces las variables de entrada de la RNA sólo serán aquellas variables involucradas en el polinomio estimado.

- El modelo polinomial nos permite confirmar si las variables seleccionadas por la matriz de correlación serán las variables de entrada a la RNA o se descartan una o más variables y esto reduce aún más el número de variables de entrada a la RNA.

**Entrenamiento de la RNA.** Llamamos “entrenamiento” al proceso de búsqueda de los parámetros  $W_{in}$ ,  $W_{out}$ ,  $b_{1j}$  y  $b_2$  en el modelo red neuronal. Diferentes metodologías de optimización han sido reportadas y usadas para las RNA, por ejemplo: el método de Newton, gradiente conjugado, método Quasi-Newton, el algoritmo Levenberg-Marquardt, etc.

El algoritmo Levenberg-Marquardt ha sido recomendado por varios autores debido a su alta velocidad de cálculo, aspecto importante en el entrenamiento de modelos RNA. Dado un vector de errores al cuadrado de la red neuronal  $e$ , el algoritmo Levenberg-Marquardt utiliza la matriz Jacobiana  $J$ , la cual contiene a las primeras derivadas de la suma de errores al cuadrado con respecto a cada parámetro de la red neuronal. El gradiente  $g$  puede ser calculado como:

$$g = J^T e, \quad (6)$$

El algoritmo de Levenberg-Marquardt sigue la siguiente relación:

$$[J^T W J + \gamma I] = J^T W e, \quad (7)$$

Donde,  $W$  es la inversa de la matriz de covarianza de las mediciones de error  $e$ ,  $I$  es la matriz identidad, mientras que  $\gamma$  es el parámetro ( $\gamma > 0$ ) que determina el tamaño de paso para encontrar una solución óptima, si  $\gamma$  es grande aproxima al método de gradiente descendente, pero sí  $\gamma$  es pequeño aproxima al método de Gauss-Newton. Los valores de  $\gamma$  apropiados son relación del problema en cuestión y el error  $e$ .

**Modelo de RNA.** El modelo RNA descrito en la ecuación (1.1) es evaluado con los parámetros  $W_{in}$ ,  $W_{out}$ ,  $b_{1j}$  y  $b_2$  encontrados en el punto (6).

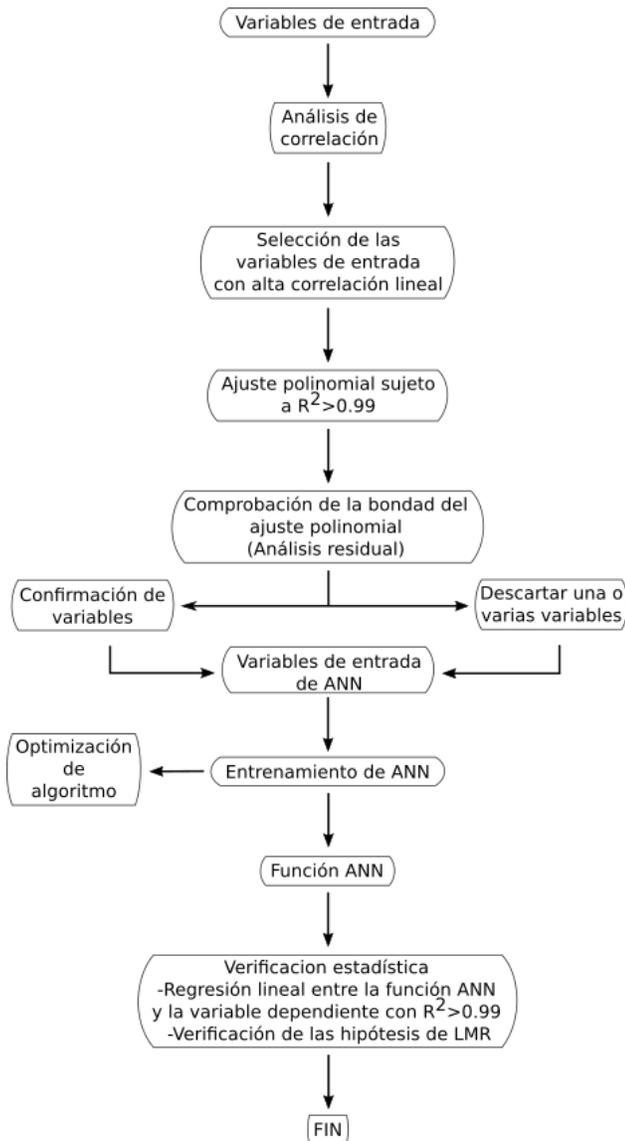
**Verificación estadística del modelo de RNA.** Como mencionan los autores en Martínez et al. (2017), la validación de los modelos de redes neuronales artificiales se hace tradicionalmente con

- a. El coeficiente de determinación y,
- b. Regresión lineal simple

Entre los datos experimentales y los datos simulados obtenidos por el modelo de RNA. La ecuación de la mejor línea de ajuste por regresión lineal simple es

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (8)$$

Donde  $x$  es considerada como la variable predictora o independiente (datos experimentales) y  $y$  es la respuesta o variable dependiente (datos simulados por la RNA). Los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  pueden ser estimados usando los datos experimentales,  $\varepsilon$  es error aleatorio.



**Figura 1** Metodología propuesta en este trabajo

Las hipótesis en el análisis de regresión lineal son las mismas que las dadas para el análisis de regresión lineal múltiple y, por tanto, se verifican con el análisis de errores residuales explicados previamente. Si el parámetro  $\beta_0$  está cercano a 0 y el parámetro  $\beta_1$  es cercano a 1, entonces se puede concluir que el modelo de RNA obtenido es adecuado.

La Figura 1 presenta un diagrama el cual resume los pasos establecidos de la metodología propuesta en este trabajo.

**Observación 1.** En esta metodología, los pasos 1-4 permiten encontrar una función polinomial la cual predice una variable dependiente conociendo los valores de las variables independientes. Así que, si sólo busca encontrar una función matemática que permita describir la relación entre la variable dependiente y las variables independientes sólo realice los pasos 1-4.

### Aplicaciones

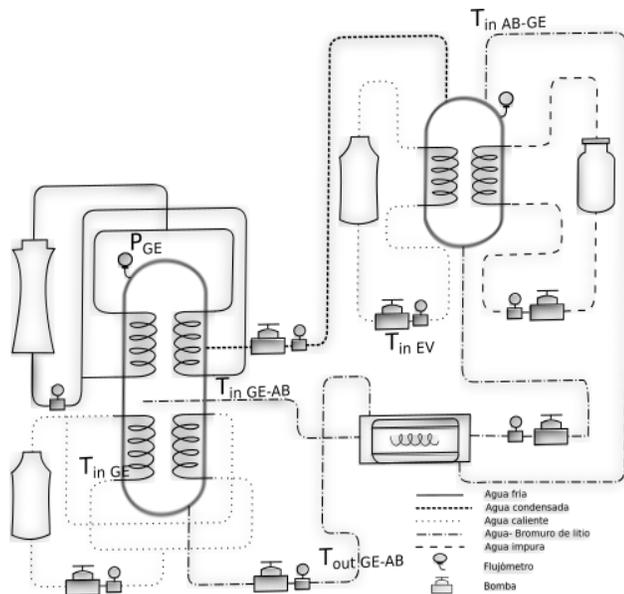
Para ilustrar la metodología, en esta sección se hace un resumen de los trabajos Ramírez et al. (2017), Martínez et al. (2017), Escobedo et al. (2016). En dichas investigaciones los autores utilizan parte de la metodología estudiada.

### Transformador de calor con componentes de doble función: modelos polinomiales

En el trabajo de los autores Ramírez et al. (2017) se evaluó una base de datos experimental obtenida a partir del nuevo diseño de un transformador de calor de absorción. El transformador de calor está diseñado para usar componentes de doble función: Absorbedor(*AB*)-evaporador(*EV*) y generador(*GE*)-condensador(*CO*), operando con una solución de trabajo (bromuro de litio/agua) y desarrollado en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en Cuernavaca, Morelos.

El sistema está instrumentado en forma que es posible obtener en línea mediciones de:  $T$  temperatura,  $X$  concentración de la solución de trabajo,  $FM$  flujo másicos y  $P$  presiones en la entrada (*in*) y salida (*out*) de los componentes principales del sistema. De tal forma, cuando nos referimos a  $T_{inGE-AB}$  significa la temperatura de entrada al generador procedente del absorbedor, de la misma forma para el resto de variables. El equipo está diseñado para satisfacer 2 kW térmicos de alimentación y su principal objetivo es utilizar el calor producido por la reacción exotérmica en el absorbedor para purificar agua (ver Figura 2).

En la investigación de Ramírez et al. (2017) se realizan los pasos 1-4 de la metodología presentada para construir un modelo polinomial el cual permite predecir el coeficiente de desempeño (COP por sus siglas en inglés) de un transformador de calor con componentes de doble función.



**Figura 2** Transformador de calor con componentes de doble función

### Variables de entrada

Temperaturas (°C):

$$T_{inGE}, T_{inGE-AB}, T_{outAB-GE}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, T_{inCO}, T_{outCO}, T_{inEV}.$$

Concentraciones (%):  $X_{inAB-GE}, X_{outAB}, X_{outGE}$ .

Presiones (Hg):

$$P_{AB}, P_{GE}.$$

Flujo másico (kg/s):

$$FM_{GE}, FM_{EV}, FM_{AB}.$$

**Matriz de correlación.** La matriz de correlación encontrada por los autores indica que las diferentes temperaturas:

$T_{inGE}, T_{inGE-AB}, T_{outAB-GE}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, T_{inCO}, T_{outCO}, T_{inEV}, P_{GE}$ , están correlacionadas entre sí. Por lo tanto, con la matriz de correlación es posible disminuir el conjunto original de variables de entrada a la RNA

$$\{T_{inGE}, T_{inGE-AB}, T_{outAB-GE}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, T_{inCO}, T_{outCO}, T_{inEV}, P_{GE}, X_{inAB-GE}, X_{outAB}, X_{outGE}, P_{AB}, P_{GE}, FM_{GE}, FM_{EV}, FM_{AB}\}$$

por el conjunto

$$\{T_{inGE}, T_{inGE-AB}, T_{outAB-GE}, T_{inAB-GE}, \dots, T_{outGE-AB}, T_{inCO}, T_{outCO}, T_{inEV}, P_{GE}\} \quad (4.1)$$

1. **Regresión múltiple.** En este paso se usa el análisis de regresión múltiple combinando todas las variables del conjunto (4.1) para encontrar una función polinomial que aproxime al coeficiente de desempeño del sistema estudiado. Los autores Ramírez et al. (2017) encontraron 4 funciones polinomiales, pero la función con un número menor de variables y con la estructura más sencilla es:

$$\begin{aligned} f_1(T_{inGE}, T_{inAB-GE}, T_{outAB-GE}, T_{inEV}, P_{GE}) = & 4.5198 \times 10^2 - 17.4019(T_{inGE}) + \\ & 4.3257(T_{inAB-GE}) - 5.1631(T_{outGE-AB}) + \\ & 6.34448(T_{inEV}) - 10.5611(P_{GE}) - \\ & 0.0010((T_{inGE}) \cdot (T_{inAB-GE}) \cdot (T_{inEV})) + \\ & 0.0010((T_{inGE}) \cdot (T_{outGE-AB}) \cdot (T_{inEV})) + 1.39 \times \\ & 10^{-6}((T_{inGE}) \cdot (T_{inAB-GE}) \cdot (T_{inEV}) \cdot (P_{GE})) + \\ & 0.6730((T_{inGE}) \cdot (P_{GE})) - 0.0544((T_{inAB-GE}) \cdot \\ & (P_{GE})) + 0.0006((T_{inEV}) \cdot (T_{outGE-AB})) - \\ & 0.3660((T_{inEV}) \cdot (P_{GE})) - 0.0530(T_{inAB-GE})^2 + \\ & 0.0736(T_{outGE-AB})^2 - 0.0271(T_{inEV})^2 - \\ & 0.0990(T_{inGE})^2 - 0.0041((P_{GE}) \cdot (T_{inGE})^2) + \\ & 0.0005((T_{inGE}) \cdot (T_{inAB-GE})^2) + 0.0003((P_{GE}) \cdot \\ & (T_{inAB-GE})^2) - 0.0003((T_{inGE}) \cdot (T_{outGE-AB})^2) - \\ & 0.0006((T_{inEV}) \cdot (T_{outGE-AB})^2) + \\ & 0.0005((T_{inAB-GE}) \cdot (T_{inEV})^2) + 0.0071((T_{inEV}) \cdot \\ & (P_{GE})^2) - 0.0076(P_{GE})^3. \end{aligned} \quad (4.2)$$

El coeficiente de determinación del modelo polinomial (4.2) es  $R^2 = 0.9934$ .

2. **Análisis residual.** El análisis residual hecho por los autores muestra el correcto uso del análisis de regresión múltiple con un  $R^2 = 0.9934$ .

**Observación 2.** Como se mencionó previamente, en el trabajo de los autores Ramírez et al (2017) únicamente se usan los pasos 1-4 de la metodología presentada para obtener modelos polinomiales los cuales permiten predecir el desempeño del transformador de calor estudiado. En caso de querer también obtener los modelos de RNA, las variables de entradas para dichos modelos serían

$$T_{inGE}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, T_{inEV}, P_{GE}. \quad (4.3)$$

#### 4.2 Transformador de calor con componentes de doble función: redes neuronales artificiales

El trabajo de los autores Martínez et al. (2017) usa los pasos 1-2 y 5-8 de la metodología expuesta para construir modelos de RNAs simplificados, los cuales predicen el coeficiente de desempeño del transformador de calor con componentes de doble función descrito previamente en la sección 4.1, por tal motivo los pasos 1-2 son omitidos debido a que son los mismos.

3. **Variables de entrada a la RNA.** Las variables de entrada para construir los modelos de RNAs son:  $T_{inGE}, T_{inGE-AB}, T_{outGE-AB}, T_{inEV}, P_{GE}$  las cuales son seleccionadas en base a una matriz de correlación.

4. **Entrenamiento de la RNA.** El entrenamiento de las redes neuronales presentadas en este trabajo fueron usando el algoritmo de Levenberg-Marquadt y descrita en la sección de *entrenamiento* previamente descrita.

5. **Modelos de RNA.** Se obtuvieron 4 modelos de RNAs, de los cuales el primer modelo (RNA1) ocupa como variables de entradas

$T_{inGE}, T_{inAB-GE}, T_{inGE-AB}, T_{outGE-AB}, T_{inEV}, P_{GE}$ , el segundo (RNA2)  $T_{inGE}, T_{inAB-GE}, T_{inGE-AB}, T_{outGE-AB}, T_{inEV}$ , el tercero (RNA3)  $T_{inGE-AB}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, P_{GE}$  y el cuarto (RNA4)  $T_{inGE}, T_{inEV}, P_{GE}$ . Para fines ilustrativos a continuación se muestra los modelos **RNA1** y **RNA2**.

#### RNA1:

$$COP_{sim} = 2[0.6578/(1 + e^{\phi_1}) - 0.4038/(1 + e^{\phi_2}) - 0.2596/(1 + e^{\phi_3}) - 0.0655/(1 + e^{\phi_4})] - (0.6578 - 0.4038 - 0.2596 - 0.0655) + 0.1822, \quad (4.4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -2(-8.4816 T_{inGE} + 6.2576 T_{inGE-AB} + 2.7682 T_{inAB-GE} - 4.6990 T_{outGE-AB} - 7.1527 T_{inEV} + 1.0384 P_{AB} + 8.1859), \\ \phi_2 &= -2(14.2334 T_{inGE} + 12.4429 T_{inGE-AB} + 8.7167 T_{inAB-GE} - 13.6168 T_{outGE-AB} - 7.5706 T_{inEV} + 1.0384 P_{AB} + 8.1859), \\ \phi_3 &= -2(-6.5909 T_{inGE} + 3.1316 T_{inGE-AB} + 0.6686 T_{inAB-GE} - 2.5646 T_{outGE-AB} - 16.6884 T_{inEV} + 3.7124 P_{AB} + 13.7787), \end{aligned}$$

y

$$\phi_4 = -2(-2.5631 T_{inGE} + 8.8186 T_{inGE-AB} - 1.5703 T_{inAB-GE} - 16.2158 T_{outGE-AB} + 10.8729 T_{inEV} - 1.7951 P_{AB} + 3.1875).$$

#### RNA2:

$$COP_{sim} = 2[-0.8681/(1 + e^{\phi_1}) + 0.1671/(1 + e^{\phi_2}) - 0.0876/(1 + e^{\phi_3}) - 0.7073/(1 + e^{\phi_4})] - (-0.8681 + 0.1671 - 0.0876 - 0.7073) + 0.2047, \quad (4.5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -2(5.3875 T_{inGE} - 5.0064 T_{inGE-AB} - 2.6359 T_{inAB-GE} + 6.1035 T_{outGE-AB} + 8.1114 T_{inEV} - 8.6445), \\ \phi_2 &= -2(34.0036 T_{inGE} - 6.530 T_{inGE-AB} - 32.6466 T_{inAB-GE} + 19.2428 T_{outGE-AB} + 30.2894 T_{inEV} - 33.2274), \\ \phi_3 &= -2(0.2642 T_{inGE} + 5.8341 T_{inGE-AB} + 4.8368 T_{inAB-GE} - 21.4879 T_{outGE-AB} + 11.6259 T_{inEV} + 1.2319), \\ \phi_4 &= -2(-3.7847 T_{inGE} + 5.6966 T_{inGE-AB} + 2.8396 T_{inAB-GE} - 8.8353 T_{outGE-AB} - 9.8910 T_{inEV} + 9.7929), \end{aligned}$$

6. **Verificación estadística de los modelos de RNA.** El modelo RNA1 tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9988$ , para el RNA2  $R^2 = 0.9984$ , para RNA3  $R^2 = 0.9976$  y finalmente para RNA4  $R^2 = 0.9948$ . Estos coeficientes de determinación implicaría que los 4 modelos ajustan de forma correcta los datos. Así que, para asegurar dicha afirmación se procede a hacer para cada modelo una regresión lineal entre los datos de COP experimental y los datos obtenidas por el modelo de RNA encontrando que los modelos de RNAs predicen de forma correcta el COP del sistema estudiado. Así, para seleccionar el mejor modelo de RNA los autores en Martínez et al. (2017) proponen hacer un análisis residual a dichas regresiones lineales (RL) y aquellos modelos que cumplan lo más aproximado posible las hipótesis de la RL dadas en el paso 3 de la metodología propuesta en este trabajo serán los seleccionados. Después de hacer el análisis residual los autores concluyen que los mejores modelos son RNA1 y RNA2 dados en (4.4) y (4.5).

**Observación 3.** De acuerdo con los estudios presentados por Ramírez et al. (2017) y Martínez et al. (2017) las variables correlacionadas para la construcción de polinomios y RNAs son:  $T_{inGE}, T_{inAB-GE}, T_{outGE-AB}, T_{inEV}, P_{GE}$ . Cabe señalar, que el estudio revela la importancia del monitoreo de variables relacionadas al fenómeno de absorción-desorción dado en el flujo de la solución de bromuro de litio/agua entre absorbedor y generador.

### 4.3 Sistema de refrigeración solar intermitente

El trabajo presentado por los autores en Escobedo et al. (2016) lleva acabo los pasos 1-8 (no hace el análisis residual de la última regresión lineal que usan en el paso 8), construye una función polinomial y un modelo de RNA los cuales predicen el coeficiente de desempeño (denotado como  $COP_{sys}$ ) de un sistema de refrigeración solar intermitente.

Los autores analizan un sistema termodinámico que aprovecha la energía del sol a través de un concentrador solar parabólico y un proceso de absorción-desorción, con el objetivo de generar 8 kg de hielo por día. El sistema utiliza como fluido de trabajo a una solución de amoniaco/nitrato de litio, fue construido y evaluado en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El sistema esta instrumentado en forma que es posible obtener en línea mediciones de:  $T_{cw}$ ;  $T_G$ ;  $T_A$  que representan la temperatura de enfriamiento, generador y ambiente, correspondiente,  $X_S$  concentración de la solución de trabajo,  $\dot{m}_{NH3}$  flujo máscos de amoniaco,  $P_G$  presión en el generador y  $Q_R$  el flujo de calor capturado en el concentrador solar.

La metodología propuesta en Escobedo et al. (2016) consiste en los siguientes pasos: Variables de entrada → Matriz de correlación (MC) para seleccionar variables → Ajuste polinomial con análisis de regresión multivariable → Análisis residual para el modelo polinomial obtenido → confirmación de variables de entrada a la RNA o en su caso reducción del conjunto obtenido de la MC → Variables de entrada a la RNA → Metodología de la RNA → bondad del ajuste con el coeficiente de determinación y regresión lineal.

**Observación 4.** A diferencia de la metodología propuesta en Escobedo et al. (2016), la metodología propuesta en el presente trabajo sugiere hacer también un análisis residual a la regresión lineal usada para verificar la bondad del ajuste del modelo de RNA, esto debido a que pueden obtenerse diferentes modelos de RNAs y la forma de decidir cuál es el mejor será a través de este análisis residual.

A continuación, se mencionarán los resultados obtenidos con la metodología planteada,

1. **Variables de entrada.** Las variables de operación en el sistema son:  $X_s$ ;  $T_{cw}$ ;  $T_G$ ;  $T_A$ ;  $P_G$ ,  $\dot{m}_{NH_3}$  y  $Q_R$ .
2. **Matriz de correlación.** Como se menciona en la sección 3, una vez que se tienen las variables de entrada ( $X_s$ ;  $T_{cw}$ ;  $T_G$ ;  $T_A$ ;  $P_G$ ,  $\dot{m}_{NH_3}$  y  $Q_R$ ) ya sea para construir un modelo polinomial o para obtener un modelo de RNA, se procede a obtener la matriz de correlación de dichas variables. En esta aplicación resulta ser

Una inspección visual de la matriz de correlación permite concluir que:

- a.  $T_G$  y  $\dot{m}_{NH_3}$  están altamente correlacionadas entre sí,
- b.  $T_{cw}$  está altamente correlacionada con  $T_G$ ,
- c.  $T_A$  tiene alta correlación con  $P_G$ ,
- d. Las variables  $T_G$ ,  $\dot{m}_{NH_3}$ ,  $Q_R$  están correlacionadas entre sí, y
- e.  $COP_{exp}$  está altamente correlacionado con  $\dot{m}_{NH_3}$ .

De esta manera, la matriz de correlación nos permite reducir el conjunto original de variables de entrada el cual estaba compuesto por 7 variables  $\{X_s, T_{cw}, T_G, T_A, P_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R\}$  a un conjunto con variables  $\{T_A, T_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R, P_G\}$  integrado por aquellas variables con alto coeficiente de correlación.

1. **Regresión múltiple.** El paso 3 de la metodología indica el uso del análisis de regresión lineal múltiple usando las variables seleccionadas por la matriz de correlación,  $\{T_A, T_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R; P_G\}$ , para desarrollar un modelo polinomial el cual permita predecir el coeficiente de desempeño del sistema estudiado. En el trabajo Escobedo et al. (2016), los autores encuentran el siguiente modelo polinomial:

$$COP_{sys} \approx 0.0316699 + 0.0983451\dot{m}_{NH_3} - 0.0224109\dot{m}_{NH_3}^2 + 0.0023801\dot{m}_{NH_3}^3 - 0.0013443 Q_R - 0.0000438Q_R^2 + 0.000000661Q_R^3. \quad (4.6)$$

Note que el modelo polinomial (4.6) solo cuenta con 2 variables de las 5 seleccionadas por la matriz de correlación, esto se debe a que durante el análisis de regresión múltiple se hacen todas las combinaciones posibles del conjunto  $\{T_A, T_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R, P_G\}$  y se toma aquel polinomio que ajuste los datos con un coeficiente de determinación mayor a 0.99 y que además ocupe en su desarrollo el menor número posible de variables del conjunto dado.

1. **Análisis residual.** La bondad del ajuste polinomial se obtuvo con el coeficiente de determinación,  $R^2$ . Además, del  $R^2 = 0.9957363$  los autores realizaron un análisis residual el cual les permitió verificar que las hipótesis del análisis de regresión lineal múltiple se satisfacen. Así, el  $R^2 = 0.9957363$ , indica que 99.57% de la variabilidad del coeficiente de desempeño del sistema estudiado puede ser explicado por este modelo.

**Observación 5.** Si únicamente busca un modelo matemático que prediga el coeficiente de desempeño del sistema estudiado, puede finalizar con este paso.

1. **Variables de entrada a la RNA.** Una vez validado el modelo polinomial encontrado (4.6), el conjunto de variables  $\{T_A, T_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R, P_G\}$  dado por la matriz de correlación se reduce al conjunto  $\{\dot{m}_{NH_3}, Q_R\}$  cuyos elementos son las variables ocupadas en el modelo polinomial. Las variables  $\{\dot{m}_{NH_3}, Q_R\}$  serán las variables de entrada para el modelo RNA.
2. **Entrenamiento de la RNA.** El entrenamiento de la red neuronal que se llevó a cabo fue usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt utilizando los algoritmos de Matlab.

3. **Modelo de la RNA.** Se modela una red neuronal artificial con 2 neuronas en la capa oculta evolucionando con 9 coeficientes (6 pesos y 3 sesgos):  $IW = 0.2399, 1.1203, -0.5121, -0.5471$ ,  $LW = -0.5772, 1.9594$ ,  $b2 = -1.2633$  y,  $b1 = -0.0131, -0.7329$ . El modelo de red neuronal artificial ( $COP_{ANN}$ ) obtenido es

$$COP_{ANN} = \left[ 2 \left( \frac{-0.5772}{1+e^{\phi_1}} - \frac{1.9594}{1+e^{\phi_2}} \right) + 0.5752 + 1.9594 \right] - 1.2633, \quad (4.7)$$

Donde:

$$\phi_1 = -2(0.2399\dot{m}_{NH_3} + 1.1203Q_R - 0.0131),$$

$$\phi_2 = -2(-0.5121\dot{m}_{NH_3} - 0.5471Q_R - 0.7329),$$

1. **Verificación estadística del modelo de RNA.** Para checar la bondad del ajuste de la RNA (4.7), los autores en Escobedo et al. (2016) hacen una regresión lineal entre los datos del coeficiente de desempeño experimental ( $COP_{exp}$ ) y los datos obtenidos por el modelo de RNA ( $COP_{simANN}$ ):

$$COP_{simANN} = \alpha + bCOP_{exp}. \quad (4.8)$$

En la regresión lineal (4.8) si el parámetro  $\alpha$  se encuentra cercano a 0 y la pendiente  $b$  cercana a 1, entonces:  $COP_{simANN} \approx COP_{exp}$ , implicando que estadísticamente  $COP_{simANN}$  predice correctamente el  $COP_{exp}$ . Con el análisis de regresión lineal se encontró que el intercepto  $\alpha$  se encuentra en el intervalo  $(-4.43e^{-4}, 3.53e^{-4})$  el cual incluye al cero y la pendiente  $b \in (0.9978, 1.0002)$  incluyendo al 1 con  $R^2 = 0.9978$ . Lo cual según los autores en Escobedo et al. (2016) les permite concluir que el modelo de RNA (4.7) predice con buena exactitud el COP del sistema estudiado.

**Observación 5.** La metodología propuesta en este trabajo sugiere hacer un análisis residual a la regresión lineal (4.8) debido a que es posible obtener diferentes modelos de RNAs haciendo diferentes combinaciones de elementos del conjunto  $\{T_A, T_G, \dot{m}_{NH_3}, Q_R, P_G\}$  y el análisis residual permite escoger al mejor modelo como aquél que mejor cumpla las hipótesis de regresión dadas en el paso 4 de esta metodología.

### Conclusión

Las principales aportaciones del trabajo son las siguientes:

- Se presento una metodología para el análisis de variables de operación, análisis del grado de correlación entre las variables independientes y la predicción, entrenamiento de una red neuronal y validación cumpliendo con criterios estadísticos estrictos. La metodología es producto de una revisión de trabajos previamente publicados con aplicaciones a un transformador de calor y un sistema de refrigeración intermitente asistido por energía solar.
- La metodología presentada podría ser aplicada para el modelado de otros ciclos termodinámicos, plantas térmicas o tecnología con aplicaciones de energía renovables, con la finalidad de predecir variables de eficiencia.

### Referencias,

Ramírez-Hernández C., Escobedo-Trujillo B.A., Colorado D., Alaffita-Hernández F.A., Morales L.I. & Hernández J.A. (2017). Coefficient of performance prediction by a polynomial of a heat transformer with two-duplex components.

Applied Thermal Engineering, 114, 1193-1202.  
Martinez-Martinez E., Escobedo-Trujillo B.A., Colorado D., Morales L.I., Huicochea A., Hernandez J.A. & Siqueiros J. (2017). Criteria for improving the traditional artificial neural network methodology applied to predict COP for a heat transformer, Desalination and water treatment, 73, 90-100.

Escobedo-Trujillo B.A., Colorado D., Rivera W. & Alaffita-Hernández F.A. (2016). Neural network and polynomial model to improve the coefficient of performance prediction for solar intermittent refrigeration system, Solar energy, 129, 28-37.

Demuth H., Beale M. (1998). Neural networks toolbox for Matlab. The MathWorks Inc

Kachigan S. (1991). Multivariate statistical analysis. A conceptual introduction. Radius Press. 2<sup>nd</sup> ed, New York.

Lazrak A., Boudehenn F., Bonnot S., Fraisse G., Leconte A., Papon P., Souyri B. (2016). Development of a dynamic artificial neural network model of an absorption chiller and its experimental validation, Renewable energy, 86, 1009-1022.

Beausoleil-Morrison I., Johnson G., Paige-Kemery B. (2015). The experimental

## 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

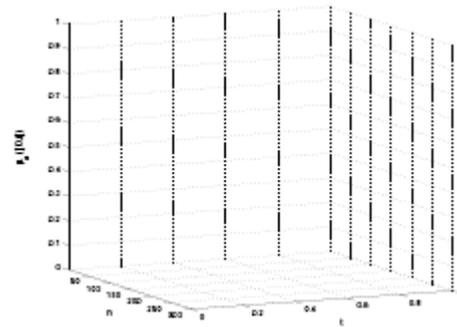
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

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

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

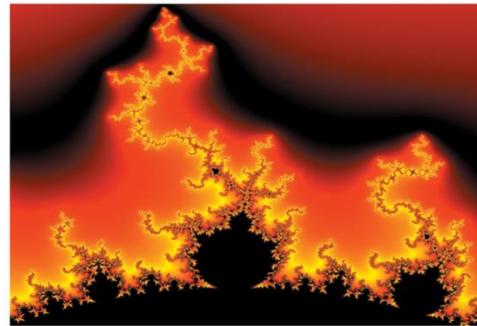
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[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

“Generador de energía eléctrica venturi para automóviles”

**PÉREZ-VILLEGAS, Manuel, TENORIO-CRUZ, Fermín, TÉLLEZ-HERNÁNDEZ, Rubén y CELIS-CHONCOHA, José Miguel**

*Universidad Tecnológica de Tecamachalco*

“Diseño de salidas de un Estanque Piscícola Automatizado Demostrativo (ESPAD)”

**ORTÍZ-RAMÍREZ, Carlos Artemio, MENDOZA-CRISÓSTOMO, Patricia, ZAYAS-PÉREZ, Ricardo, LUCERO-ÁLVAREZ, Cupertino, SOLANO-PALAPA, Nathaly, BELTRÁN-ROMERO, María de Lourdes y MERINO-VIAZCÁN, Janet**

*Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros*

“Análisis de penetración de dureza para un acero High Speed Steel (HSS), tratado termicamente con temple y revenido”

**SERVIN-CASTAÑEDA, Rumualdo, CALDERÓN-RAMOS, Ismael, BARRERA-MORENO, Mario Alberto, SAN MIGUEL-IZA, Sandra María y GONZÁLEZ-ZARAZUA, Roberto Aldo**

*Universidad Autónoma de Coahuila.*

*Universidad Tecnológica de la Región Centro de Coahuila*

“Diseño de una cámara de impacto para evaluar el efecto del cambio de dirección y la velocidad de corrosión en tuberías que transportan hidrocarburos”

**CERVANTES-TOBÓN, Arturo, GARCÍA-MENDOZA, Yulisa, SANGINEZ-MARTÍNEZ, Nanci Brenda y RAMÍREZ-MORALES, Cristhian Jesús**

*Instituto Politécnico Nacional*

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez*

“Diseño de un “Cople Porta-Probeta” para la determinación de la velocidad de corrosión en Aceros API 5L en un medio amargo y flujo turbulento”

**DÍAZ-CRUZ, Manuela, NEPAMUCENO-NERI, Anahí, DOMÍNGUEZ-ROSAS, Karla Ivett**

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Instituto Politécnico Nacional*

“Aerogenerador ALISIO”

**FLORES-SÁNCHEZ, Verónica, SHETTINO-GARCÍA, David Israel, SCHETTINO-GARCÍA, Martín Darío y JUÁREZ-BORBONIO, Jesús**

*Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz*

“Foco ahorrador de energía a base de nanotubos de carbono funcionalizados”

**JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, José A., TOVAR-PÉREZ, Juan Pablo, NIEVES-ORTÍZ, Alfredo y SANTILLÁN-CONTRERAS, Luis Ángel**

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez.*

*Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de Grupo Jumex*

“¿Cómo mejorar los modelos RNAs usando análisis estadístico?”

**ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana & COLORADO-GARRIDO, Darío**

*Universidad Veracruzana*



[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)