



ESCUELA DE ESTUDIOS DE  
**POSTGRADO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA

# REVISTA 2020

DE LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, GUATEMALA, AÑO 11, NÚMERO 1

ISSN 2518-4725

e-ISSN 2706-9508







La Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería publica investigaciones originales de los diferentes campos de la ingeniería. Constituye una publicación en formato digital en la plataforma institucional Repositorio USAC, en línea y anual en formato impreso.

REEP	<b>Autores:</b>	Escuela de Estudios de Postgrado EEP (Facultad de Ingeniería USAC).
Año 11	<b>Título:</b>	Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, FIUSAC.
N° 1	<b>Imp / Ed.:</b>	Guatemala: Escuela de Estudios de Postgrado, USAC, 2020.
2020	<b>Idioma:</b>	Esp.
	<b>Descripción:</b>	#p . ; il. 27 cm.
	<b>Ejemplares:</b>	2020: Año 11, N° 1 (publicación anual).
	<b>ISSN:</b>	2518-4725.
	<b>Temas:</b>	Ingeniería - Revistas.





ESCUELA DE ESTUDIOS DE \_\_\_\_\_  
**POSTGRADO**  
\_\_\_\_\_ FACULTAD DE INGENIERÍA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada, DECANA.

Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez, SECRETARIO ACADÉMICO.

---

## **JUNTA DIRECTIVA**

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada, DECANA.

Ing. José Francisco Gómez Rivera, VOCAL I.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez, VOCAL II.

Ing. José Milton de León Bran, VOCAL III.

Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente, VOCAL IV.

Br. Fernando José Paz González, VOCAL V.

Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez, SECRETARIO ACADÉMICO.

---



# DIRECTORIO

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 11 No. 1  
Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala,  
Edificio S11, Primer nivel, Ciudad Universitaria, zona 12

## CONSEJO EDITORIAL

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí.  
Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería.  
USAC.

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes.  
Editora.  
Profesora de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

Dr. José Luis Argueta Mayorga.  
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez.  
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

Mtra. Hilda Palma Ramos.  
Profesora de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte.  
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

Dr. Alfredo Salvador Gálvez Sinibaldi.  
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.  
USAC.

## COMITÉ CIENTÍFICO

Dra. Magdalena Waleska Aldana Segura  
Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media.  
USAC.  
waldanasegura@gmail.com

Mtra. Anabelle Castro Castro  
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
anabellecc@gmail.com

Mtro. Francisco Alarcón Ahumada  
Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.  
francisco.aahumada@gmail.com

Dr. Félix Allan Douglas Aguilar  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
Aguilarfelix2013@gmail.com

## COMITÉ EDITORIAL

Dra. Marta Guisela Gaitán Garavito.  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
guisela@gmail.com

Mtra. Sandra Ninett Ramírez Flores.  
Universidad de San Carlos de Guatemala.  
sandraflo1005@gmail.com

Dr. Dennis Salvador Argueta Mayorga.  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
arguetadennis@gmail.com

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque.  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
jcfuentes24@gmail.com

Mtro. Pablo Christian De León Rodríguez.  
Facultad de Ingeniería. USAC.

Mtro. Daniel Augusto Sosa González.  
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. UCA.  
dasosa@gmail.com

Mtro. Pedro Miguel Agreda Girón.  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
pemtvo@gmail.com

Mtro. Esteban Ballesterio Alfaro.  
Instituto Tecnológico de Costa Rica.  
eballesterio@gmail.com

Mtro. Walter Arnoldo Bardales Espinoza.  
Facultad de Ingeniería. USAC.  
bardaleswa@gmail.com

## COORDINACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí.  
**Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.**

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes.  
**Editora.**

Ing. René Oswaldo Monge López.  
**Asistente de la Dirección.**

Licda. Anna Pamela Sofía González López.  
**Diseño y Diagramación.**

Mtra. Hilda Myriam Méndez de Avila.  
**Revisión Lingüística.**





## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

Universidad de San Carlos de Guatemala

---

### **MISIÓN**

Formar profesionales de la ingeniería con valores éticos, capaces de generar y adaptarse a los cambios del entorno, conscientes de la realidad nacional y comprometidos con la sociedad, para que, a través de la aplicación de la ciencia y la tecnología apropiada, contribuyan al bien común y desarrollo sostenible del país y la región.

### **VISIÓN**

Ser una institución académica con incidencia en la solución de la problemática nacional, formando profesionales emprendedores en distintas áreas de la ingeniería, con sólidos conceptos científicos, tecnológicos, éticos y sociales, fundamentados en la investigación y promoción de procesos innovadores orientados hacia la excelencia profesional.

## **ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

---

### **MISIÓN**

Formar maestros de la ingeniería para que sean competitivos y fomenten el desarrollo del país, a través de su emprendimiento de forma ética y responsable con la realidad nacional.

### **VISIÓN**

Ser innovadores en la formación profesional a nivel de postgrado, con liderazgo y sólidos conocimientos de la ciencia y la tecnología, sin olvidar a la sociedad que demanda la excelencia académica.



# Editorial

---

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se complace en presentar a la comunidad de investigadores, docentes y estudiantes, la revista científica de la Escuela de Estudios de Postgrado, indexada en el catálogo 2.0 de Latindex.

Los artículos que se publican corresponden a estudios realizados en diferentes áreas del conocimiento que se relacionan con las ciencias de la ingeniería y las ciencias aplicadas, los cuales reflejan el interés prioritario en la divulgación de resultados de investigación que fortalecen los programas de postgrado a nivel de doctorado, maestría y especialización.

El contenido se estructura con base en líneas temáticas abordadas por los autores. En la sección de Metalurgia se presentan dos artículos, uno de ellos reporta los resultados de un estudio experimental que identifica los aspectos con los que se relaciona la soldabilidad de aleaciones de Hierro y Carbono; el otro artículo reporta la aplicación de ensayos no destructivos para investigar las causas de falla de tuberías de acero al carbono para transporte de hidrocarburos. Ambos estudios se realizaron como parte del proyecto de Investigaciones Metalúrgicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de FIUSAC.

En la sección correspondiente a la Modelación con variables climáticas, se incluye un estudio que reporta resultados que indican que el modelo Armstrong-Prescott permite estimar la radiación solar mensual media en la Ciudad de Guatemala, con un alto nivel de certidumbre; también se presentan resultados de la caracterización del comportamiento del viento y la estimación del potencial eólico en la región sur de Guatemala. Estas investigaciones se realizaron en la Unidad de Modelación Matemática e Investigación de FIUSAC.

En la sección correspondiente al Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad se presenta un ensayo en el que se analizan los avances y el potencial de generación y utilización de energías renovables de geotermia y biomasa en Guatemala. El ensayo se elabora como producto evaluativo en el marco del curso Energías Renovables del programa doctoral.

En la sección del Área de Gestión y Servicios, se presentan dos artículos generados como producto de estudios presentados como trabajos de graduación de la Maestría en Gestión Industrial y de Maestría en Ingeniería de Mantenimiento. El primero reporta como la innovación en la estructura de empaque de jabones en barra incide en el incremento de la productividad; en el otro artículo se establece la eficiencia de un plan de mantenimiento preventivo de sensores termopares.

Se expresa un profundo reconocimiento a los autores cuyos aportes se publican, así como el agradecimiento a los integrantes del Comité Editorial, del Consejo Editorial, del Comité Científico de la revista, así como al personal que colaboró con la presente edición.

---

**Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada**

Decana  
Facultad de Ingeniería



# TABLA DE CONTENIDOS

## **Prefacio**

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí **15**

## **METALURGIA**

**Soldabilidad de fundiciones de hierro gris, hierro nodular y de acero inoxidable A304. Análisis Metalográfico** **19**

Dr. Roberto Alejandro Aguilar Rivas, Mtro. Estuardo Celada Ríos, Mtro. Byron J. Bonilla Chang

**Corrosión en una tubería de acero al carbono para transporte de hidrocarburos** **25**

Dr. Sc. Roberto Alejandro Aguilar Riva, Ing. Enrique Humberto Soria Lemus

## **MODELACIÓN CON VARIABLES CLIMATICAS**

**Aplicación del modelo de Armstrong-Prescptt para la estimación de la radiación solar media a nivel superficie en la ciudad de Guatemala, de 1995 a 2019** **33**

Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco, Dra. Mayra Virginia Castillo Montes

**Comportamiento del viento y estimación del potencial eólico en la región sur de Guatemala** **41**

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes, Lic. William Adolfo Polanco Anzueto, Dr. Paris Francisco Rivera Ramos

## **ENSAYOS DE DOCTORADO**

**Energías renovables, geotermia y biomasa: una revisión crítica para Guatemala** **51**

Mtro. Jeffrey Estuardo Argueta, Mtro. Wagner Guillermo Alonzo, Mtro. Sergio Leopoldo Dionisio

## **ÁREA DE GESTIÓN Y SERVICIOS**

**Desarrollo de una estructura laminada para empaque primario de jabones en barra como estrategia de Innovación** **61**

Mtra. Jenyffer Michelle Cardona Abrego, Mtro. Otto Rodrigo Lantan Reynosa

**Mantenimiento preventivo para la estandarización en los rangos de medición de temperatura a sensores termopares en una línea de extrusión de pet reciclado** **65**

Mtro. Edgar Alexander Nova Esquivel, Mtra. Sandra Ninett Ramírez Flores

**Instrucciones para autores** **69**



## PREFACIO

---

**EDGAR DARÍO ÁLVAREZ COTÍ**

Mtro. en Docencia Universitaria

Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería  
edalvarezc95@gmail.com

Durante varios años diferentes cohortes de las maestrías y especializaciones de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, han publicado artículos de relevancia para el desarrollo del país, de las industrias, empresas privadas y públicas, la profesionalización, el impulso empresarial innovativo y otros campos multidisciplinarios. También el Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad es parte de los programas que ofrece la escuela de estudios de postgrado. En este volumen de la revista hay artículos de investigación relacionados con el campo de la metalurgia, soldabilidad, aleaciones metálicas, artículos sobre modelos matemáticos para determinar la radiación solar, el potencial de generación eólico en ciertas áreas de Guatemala, las energías renovables como la biomasa, la geotermia que son factores claves para reducir la dependencia solo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica.

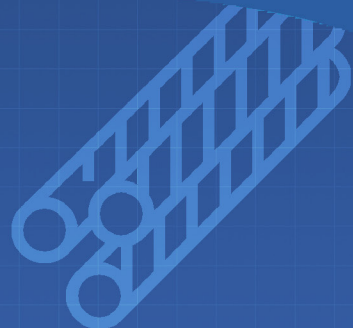
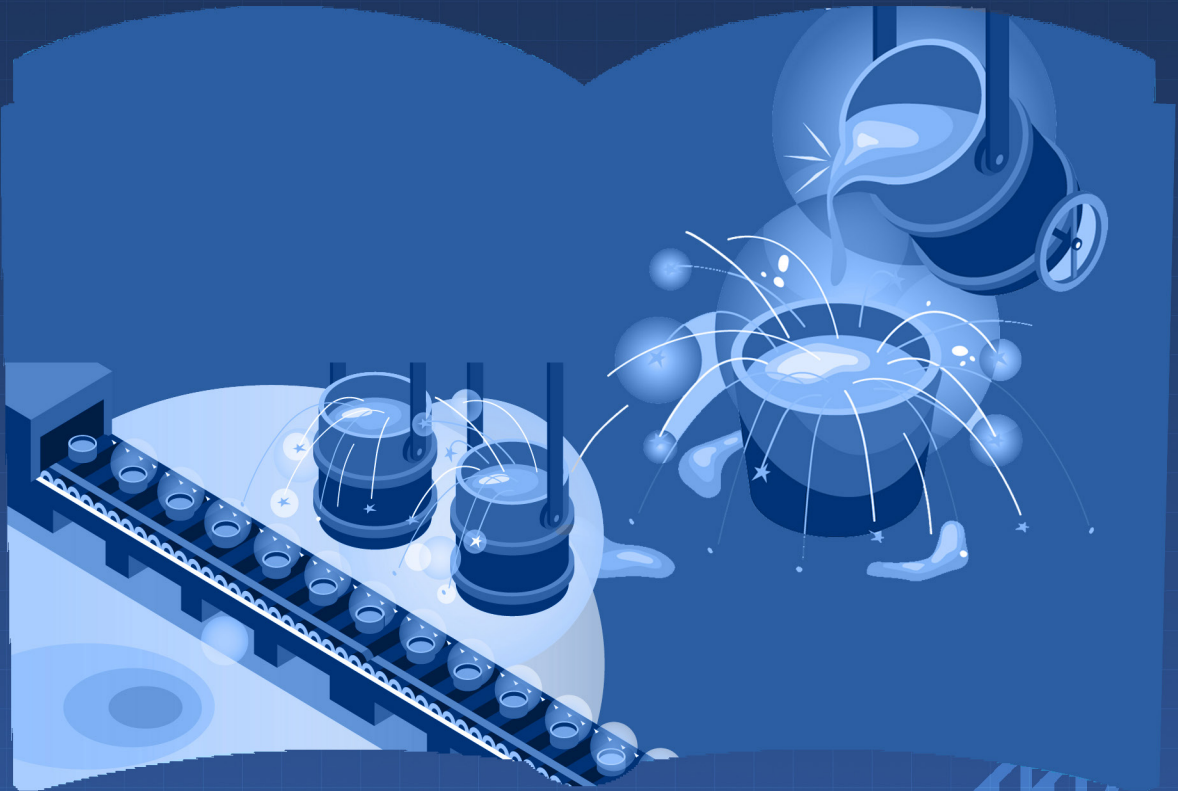
En el campo de la gestión industrial hay un artículo sobre innovación en los sistemas de empaque de productos industriales, en ingeniería de mantenimiento y gestión de activos un artículo sobre sensores de temperatura y reciclado.

Las publicaciones de los doctorandos y egresados de maestrías reflejan el grado de madurez de nuestros programas de postgrado, el impacto directo en el desarrollo profesional, impulso industrial de la región como un aporte aplicado a resolver problemas, encontrar soluciones, adaptarse a los cambios tecnológicos y completar la formación a un nivel superior al obtenido en los programas de licenciatura. Como centro de estudios superiores líder en la región es un agrado formar profesionales con valores éticos, conocimientos y criterio para tomar decisiones en los diferentes campos profesionales como consultores, empresarios, supervisores, gerentes, asesores, docentes, investigadores, y que los aportes se vean reflejados en las comunidades, áreas urbanas y rurales de Guatemala y la región. Nuestros egresados provienen a nivel de licenciatura de diferentes universidades públicas y privadas de la región. Presentamos a la sociedad esta revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.





# METALURGIA





# SOLDABILIDAD DE FUNDICIONES DE HIERRO GRIS, HIERRO NODULAR Y DE ACERO INOXIDABLE A304. ANÁLISIS METALOGRAFICO.

*Grey and Nodular Cast Iron and Stainless Steel A304 Weldability. Metallographic Analysis.*

**Roberto Alejandro Aguilar Rivas**

Dr. Sc. en Metalurgia  
raarivas@hotmail.com

**Estuardo Celada Ríos**

Mtro. en Mantenimiento  
santimagno\_2@hotmail.com

**Byron J. Bonilla Chang**

Mtro. en Mantenimiento  
byronbonilla25@hotmail.com

Recibido: 17 de agosto de 2020. | Revisado: 26 de febrero de 2021. | Aceptado: 28 de junio de 2021.

## RESUMEN

Se investiga la soldabilidad de aleaciones Hierro-Carbono, consistentes en fundición gris, fundición nodular y acero inoxidable austenítico. Se emplea el proceso de soldadura eléctrica al arco, SMAW, mediante cordón corrido, en donde se hace necesaria o se descarta la aplicación de tratamientos térmicos específicos, en casos reales, que afectan directamente a la infraestructura del país, en el empleo de motores de combustión interna y tuberías para conducción de agua e hidrocarburos.

Se realiza análisis metalográfico de casos especiales de soldadura, definiendo la necesidad de aplicación de tratamientos térmicos, TTT, en función de las características metalúrgicas de los elementos a soldar, y se señalan los procesos específicos de aplicación de acuerdo con ensayos experimentales de los autores.

Los ensayos experimentales se ejecutan sobre probetas de fundición gris, fundición nodular y acero inoxidable austenítico ASTM 304, obteniéndose resultados positivos de soldabilidad.

## PALABRAS CLAVE

Soldabilidad, fundición gris, fundición nodular, acero inoxidable.

## ABSTRACT

*Weldability of Iron-Carbon alloys, consisting of grey cast iron, nodular cast iron and austenitic stainless steel is investigated through the shielded metal arc welding, SMAW, by means of straight cord process, where the application of specific heat treatments is necessary or discarded, in real cases that directly affect the country's infrastructure, in de use of internal combustion engines and pipes for conduction of water an hydrocarbons.*

*Metallographic analysis of special cases of welding is car ried out, defining the need for application of heat treatments, TTT, through the metallurgical characteristics of the elements to be welded, and the specific processes of application according to experimental trials by the authors.*

*Experimental trials are conducted on grey cast iron, nodular cast iron and ASTM 304 austenitic stainless-steel specimens, with positive results of technological benefit*

## KEYWORDS

*Weldability, grey cast iron, nodular cast iron, stainless steel.*

## INTRODUCCIÓN

Se investiga, mediante ensayos metalográficos, la soldabilidad de fundiciones gris y nodular, y del acero inoxidable austenítico ASTM 304, presentes en una amplia gama de maquinaria y equipo empleados en la industria nacional, tal es el caso de los motores automotrices y de tuberías de transporte de hidrocarburos.

Cuando dos metales se unen por medio de soldadura, o bien cuando un material dañado se repara o se reconstruye mediante este proceso, sin mostrar ningún tipo de fallas o defectos, se dice que dichos materiales presentan buena soldabilidad. Esta propiedad no es más que la capacidad de los metales de facilitar su unión por el proceso de soldadura, obteniéndose juntas sanas y totalmente homogéneas, conservando las propiedades mecánicas originales. (Celada y Aguilar, 2013).

La soldabilidad está regida por las características químicas y metalúrgicas del material base y el material de aporte, así como de la aplicación de los procesos termodinámicos adecuados para su realización.

En este artículo se comprueba la continuidad de las estructuras metalográficas de probetas paralelas, de las uniones soldadas de los materiales propuestos, en las cuales los ensayos mecánicos producen resultados satisfactorios de soldabilidad.

Se emplean END, específicamente Líquidos Penetrantes, para verificar la continuidad de los cordones de soldadura exentos de defectos o discontinuidades.

## DESARROLLO DEL ESTUDIO

La presente investigación se desarrolla dentro del concepto del diseño experimental, con enfoque mixto, cualitativo y cuantitativo, cuyo alcance es del tipo descriptivo. Con esto, se pretende llevar los resultados a todos aquellos profesionales, científicos y técnicos que se dedican a los procesos de soldadura y que se interesan en el manejo de las variables involucradas. De esta manera, se selec-

cionan probetas de fundición gris procedentes de un block fracturado de un motor automotriz, tipo Otto, de una tubería de fundición nodular, empleada para conducción de agua, y otra de acero inoxidable A304 proveniente de una tubería de conducción de hidrocarburos, a temperatura ambiente. Se selecciona el proceso SMAW (Shield Metal Arc Welding), como método de soldadura, con y sin aplicación de tratamientos térmicos (Welding, Brazing and Soldering, 2005), realizándose la fabricación empírica de probetas de dichos materiales, según López (2019).

Como material de aporte se escogen las aleaciones a base de níquel y níquel puro para las fundiciones, conforme a la metodología empleada por Bonilla (2015), así como acero inoxidable austenítico E308 según Celada (2015). Se aplican tratamientos térmicos (TTT), pre y durante la soldadura, a las temperaturas que se indican en las figuras 3 y 4, para el caso de las fundiciones. El control de calidad de las soldaduras y la soldabilidad se realiza por medio de la inspección metalográfica. Las metalografías que se muestran corroboran lo expuesto, mostrando las características de calidad obtenidas durante los ensayos.

- a) Las variables que interactúan durante el proceso de soldadura son las siguientes: material base, constituido por el material del elemento a soldarse o a reconstruirse.
- b) Cordón de soldadura o material de aporte.
- c) Línea de fusión, constituida por la interfaz sólido-líquido, o sea, entre el material base en estado sólido y semifundido, y el material de aporte en estado líquido.
- d) Zona afectada por el calor, ZAC, que es la zona del material base en la inmediata vecindad del cordón de soldadura normalmente sometida a los efectos termodinámicos del proceso, por lo que sus características metalúrgicas se ven afectadas durante el mismo.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### SOLDABILIDAD DE LAS FUNDICIONES GRIS Y NODULAR.

Las figuras 3, 4, 6 y 7 constituyen los resultados micrográficos de los diferentes procesos de soldadura, según cada uno de los casos que se analizan.

Como se puede observar en la figura 1, se analiza el caso de la micrografía de la fundición gris, que presenta una matriz de ferrita y perlita con precipitaciones de grafito en forma de hojuelas dispersas sin patrón definido en toda la matriz.

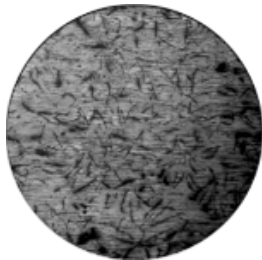


Figura 1. Micrografía representativa de las probetas de fundición gris, estado original. 100X.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 2, se observan las estructuras de grafito en forma esferoidal en una matriz de ferrita, características de la fundición nodular. Existe cierta similitud en algunas secciones con la fundición maleable debido a los bordes difuminados que presentan los nódulos de grafito.

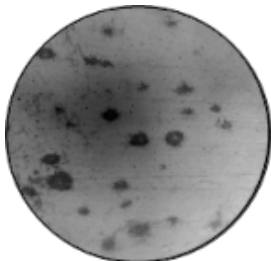


Figura 2. Micrografía representativa de las probetas de fundición nodular. Estado original 100X.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la figura 3, se presentan algunos resultados metalográficos de probetas soldadas por los métodos propuestos, los cuales indican la calidad de la unión entre el material base y el

material de aporte. Se emplean temperaturas de 200°C y 500°C pre y durante el proceso, con enfriamiento aislado.

Las micrografías son resultado de las siguientes variables:

- Material base: fundición gris. Material de aporte: Níquel de alta pureza (ENiCl). Temperatura de precalentamiento: 200°C.
- Igual que a), pero a temperatura de precalentamiento de 500°C.
- y d), El mismo material base, pero con electrodo Níquel-Hierro y temperaturas de precalentamiento a 200°C y 500°C.

Puede observarse claramente en las cuatro micrografías, la continuidad estructural entre el material base, fundición gris y los materiales de aporte: níquel de alta pureza y aleación ferroníquel, lo cual avala la soldabilidad del material base con los electrodos y temperaturas que se emplean.

Se distinguen dos zonas bien definidas: la zona oscura por las hojuelas de grafito es el material base y la zona clara es el material de aporte.

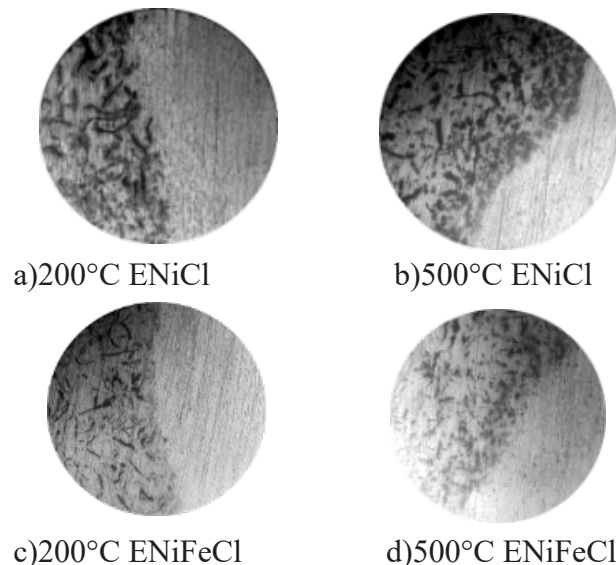


Figura 3. Micrografías de resultados de soldabilidad de fundición gris. Material base y cordón de soldadura. 100X. Fuente: elaboración propia.

En la figura 4, se muestran las micrografías de fundición nodular soldadas con iguales procedi-

mientos a los anteriores, SMAW, con los mismos electrodos, níquel de alta pureza y aleación ferrocobalto, pero a temperaturas de 200°C y 300°C. Se observa:

- a) Material base: fundición nodular.
- b) Material de aporte, cordón de soldadura.
- c) Zona de fusión. d) Zona afectada por el calor (HAZ).

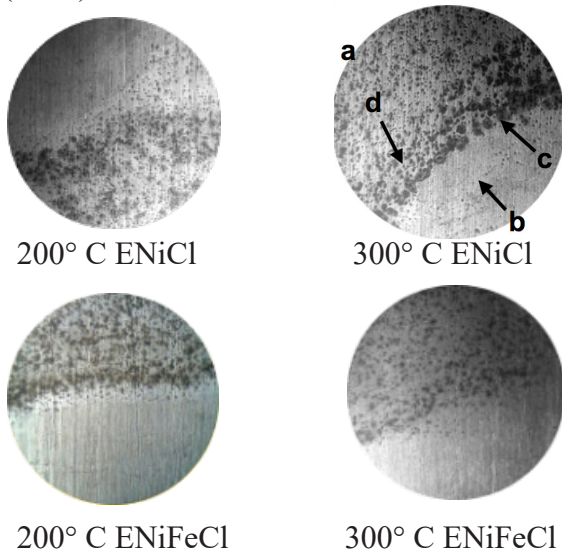


Figura 4. Micrografías de resultados de soldabilidad de fundición nodular. Material base y cordón de soldadura. 100X.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 4, se observa la compatibilidad microestructural del material base y el material de aporte. Es de hacer notar que la soldadura de la fundición nodular presenta mayor fluidez del material de aporte, aún a menor temperatura de precalentamiento.

#### SOLDABILIDAD DEL ACERO A304.

Los aceros austeníticos en general suelen presentar muy buena soldabilidad, sin tratamientos térmicos, además, existe una gran compatibilidad entre toda la familia de la serie AISI 300, lo que los hace sumamente versátiles aún para unión de aceros de otros grupos. Esto puede observarse en las micrografías siguientes, en donde se aprecia claramente la microestructura del material base A304 y del material de aporte A308 después de la soldadura.

La figura 5 muestra la estructura micrográfica ori-

ginal del acero A304, mientras que en la figura 6 se muestran las metalografías del cordón de soldadura con material de aporte E308 y la zona de unión con el material base A304.

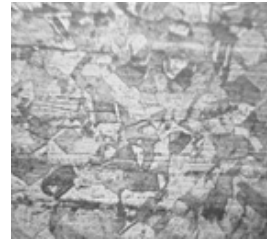


Figura 5. Micrografía de las probetas de acero inoxidable austenítico A304 en estado de suministro. 200X.  
Fuente: López, (2019).

Obsérvese la total continuidad de la estructura del material de aporte con el material base en la zona de unión.

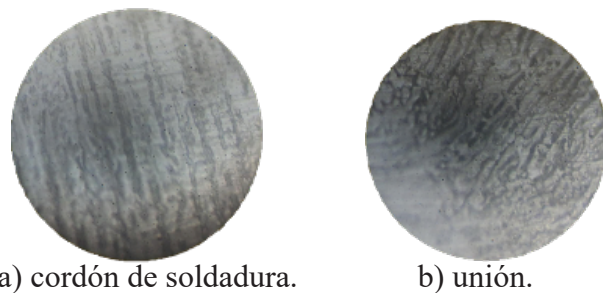


Figura 6. Micrografía de unión de acero A304 con material de aporte E308. 100X.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se aprecia la soldabilidad del mismo material base A304, con material de aporte E309L, mostrando similar compatibilidad de los materiales que en el caso anterior.



Figura 7. Micrografía de la unión de acero A304 con aporte E309L.  
Fuente: López (2019).

En la soldadura de este tipo de aceros, se produce un fenómeno perjudicial conocido como sensibilización (actualmente se acepta el término sensitización, adaptado del inglés sensitized), que en realidad no tiene que ver con la soldabilidad de los materiales, sino que depende del desconocimiento del operario de las variables ingenieriles que entran en el proceso.

El fenómeno se presenta cuando, durante la soldadura, se producen temperaturas muy altas en la zona afectada por el calor, debido al aporte calórico; esto provoca que se formen carburos de cromo que migran hacia los bordes de grano, dejando a las estructuras austeníticas, cercanas a dichos bordes, empobrecidas del cromo necesario para resistir la corrosión, muy susceptibles a dicho fenómeno.

La figura 8 muestra el fenómeno de la sensibilización, en la micrografía correspondiente a una probeta de acero AISI 304, recocida durante una hora a 650 °C dentro del horno y posteriormente atacada con ácido oxálico durante 3.5 minutos.

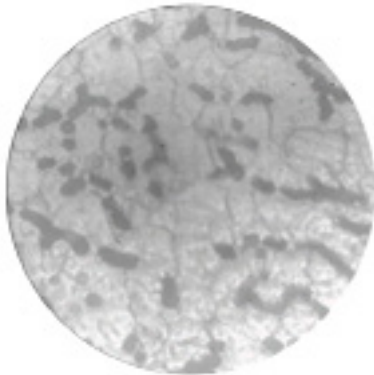


Figura 8. Corrosión en acero A304 sensibilizado y atacado con ácido oxálico al 10%. 100X.

Fuente: elaboración propia.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el caso de la fundición gris se nota la liga perfecta tanto del lado del material base y de la soldadura, no encontrándose ningún tipo de defectos ni discontinuidades en la línea de fusión ni en la ZAC. Es importante indicar que durante la aplicación de los END después de la soldadura, tam-

co se encuentran discontinuidades ni defectos con ninguna de las técnicas referidas. Lo mismo puede indicarse de la soldadura de la fundición nodular.

Tanto en el caso de la fundición gris, como de la nodular, los beneficios del precalentamiento a favor de la soldabilidad son similares, lo que no sucede cuando no se realiza ningún tipo de tratamiento térmico durante la aplicación de las técnicas de deposición, se encuentra mejor respuesta al proceso cuanto mayor es la temperatura de precalentamiento en ambos tipos de fundición.

Por otro lado, se nota un cambio estructural aparente en los casos del material base de la fundición nodular en la HAZ, en donde pareciera que hubo mayor dilución del carbono, ya que se hace más difícil definir los nódulos de grafito.

Finalmente, debe tomarse en cuenta que, para el caso de las fundiciones, es necesaria la aplicación de temperaturas pre y durante el proceso, realizando enfriamientos lentos con la unión recubierta.

En el caso de los aceros inoxidable austeníticos los tratamientos térmicos no son necesarios y debe evitarse la subida de las temperaturas durante la soldadura para evitar el efecto de la sensibilización, figura 8. La corrosión, en las zonas adyacentes a los límites de grano, en donde se depositan los carburos de cromo ( $Cr_{23}C_3$ ), se produce fácilmente debido a descarburación. De igual forma, el fenómeno se produce si se calienta el material austenítico entre 600 y 800 °C.

### CONCLUSIONES

De los resultados analizados metalográficamente, se observa que la soldabilidad de los materiales analizados depende de:

1. El tipo de material sometido al proceso de soldadura.
2. Del material de aporte.
3. De las temperaturas empleadas durante el proceso de soldadura.
4. De la compatibilidad entre el material base y el material de aporte.
5. Del conocimiento de las variables generales

implicadas en el proceso, principalmente el manejo de las temperaturas.

#### RECOMENDACIONES

1. A los responsables del proyecto de Investigaciones Metalúrgicas de la FIUSAC:

Apoyándose en los resultados de las investigaciones realizadas y en los problemas expuestos en las referencias, continuar con las investigaciones del fenómeno basándose en casos reales.

2. A los sectores involucrados (usuarios, industria y profesionales de la ingeniería):

Realizar los estudios e investigaciones correspondientes, en casos reales que involucran a cada sector o a su interacción, para contribuir al desarrollo del país.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Metals Handbook. (2005). Volume 6, *Welding, Brazing and Soldering*. ASM International. Ohio, USA.
- Bonilla Chang, B. J. (2015). *Reconstrucción y/o reparación de piezas de fundición gris por medio de soldadura al arco (SMAW)*. Tesis de Maestría en Mantenimiento. FIUSAC. Guatemala.
- Celada Ríos, E. S. y Aguilar Rivas, R. A. (2013). *Soldabilidad del acero AISI 1045 con electrodos E8018B2 y E9018B3*. Proyecto de investigaciones metalúrgicas. EIM. FIUSAC. Guatemala.
- Celada Ríos, E. S. (2015). *Ensayos de soldadura al arco con electrodo revestido en acero inoxidable austenítico AISI 304*. Tesis de Maestría en Mantenimiento. FIUSAC. Guatemala.
- López Rodríguez, S. A. (2019). *Diseño de una metodología de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disímiles*. Tesis de Maestría en Mantenimiento. FIUSAC. Guatemala.

#### INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Ingeniero Mecánico, Roberto Alejandro Aguilar Rivas, Facultad de Ingeniería, USAC. 1971.

Doctor en Ciencias. Estudios de posgrado a nivel de Maestría, Doctorado y Postdoctorado en Metalurgia de la Transformación, en la CNEA, Argentina. 1973-1977.

Afiliación laboral: Investigador. Escuela de Ingeniería Mecánica. FIUSAC. Guatemala.

Ingeniero Mecánico, Byron José Bonilla Chang, Facultad de Ingeniería, USAC. 2012.

Maestro en Ingeniería de Mantenimiento, Facultad de Ingeniería, USAC. 2015. Guatemala.

Ingeniero Mecánico, Estuardo Santiago Celada Ríos, Facultad de Ingeniería, USAC. 2012.

Maestro en Ingeniería de Mantenimiento. Facultad de Ingeniería, USAC. 2015. Guatemala.



# CORROSIÓN EN UNA TUBERÍA DE ACERO AL CARBONO PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

*Corrosion in a carbon steel pipe, for hydrocarbons conduction*

**Roberto Alejandro Aguilar Rivas**

Dr. Sc. en Metalurgia  
raarivas@hotmail.com

**Enrique Humberto Soria Lemus**

Ing. Mecánico experto en E. N. D.  
enrique@sie.com.gt

Recibido: 17 de agosto de 2020 | Revisado: 20 de mayo de 2021 | Aceptado: 7 de junio de 2021.

## RESUMEN

Con aplicación de Ensayos No Destructivos (END), se investigan las causas de falla, en una tubería de acero al carbono para transporte de hidrocarburos, enterrada con protección catódica, durante aproximadamente 60 años de servicio.

Se inspecciona la parte exterior de la sección de tubería, la cual se encuentra en condiciones normales de preservación. Posteriormente, se procede a la inspección interior del tubo, identificándose la degradación del mismo por medio de inspección visual y luego se realiza la medición de espesores por métodos mecánicos, en la parte adelgazada por corrosión; de la misma manera, se realiza la medición ultrasónica por arreglo de fases, tanto de los espesores en el área adelgazada por corrosión, como en las áreas circundantes aledañas a la misma.

Los resultados indican presencia avanzada, en forma combinada de corrosión uniforme y por picaduras (pitting), hasta llegar a la perforación en una sección de la tubería.

## PALABRAS CLAVE

Corrosión, potencial electroquímico, medio ambiente, pares galvánicos, electrólisis.

## SUMMARY

*With application of Non-Destructive Testing (NDT), the causes of failure are investigated in a carbon steel pipe for transport of hydrocarbons, buried with cathodic protection, for approximately 60 years of service.*

*The outside of the pipe section is inspected, which is found under normal preservation conditions. Subsequently, the internal inspection of the tube is carried out, identifying the degradation of the tube by means of visual inspection and then the measurement of thicknesses by mechanical methods, in the thinned part by corrosion; similarly, ultrasonic measurement is performed by phase arrangement, both of the thicknesses in the corrosion-thinned area, and in the surrounding areas.*

*The results indicate advanced presence, in a combined form of uniform corrosion and pitting, until drilling into a section of the pipe.*

## KEYWORDS

*Corrosion, electrochemical potential, environment, galvanic pairs, electrolysis.*

## INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se investigan las causas de falla de una sección de tubería de acero, empleada para la conducción de hidrocarburos, puesta en operación durante aproximadamente sesenta años.

Por medio de los métodos de ensayo visual y aplicación de ultrasonido, se evidencia presencia del ataque por corrosión, a través de sus características metalúrgicas. (normas API 574-2009 y API 571-2011).

La corrosión metálica consiste en una reacción electroquímica que produce un desgaste o deterioro de los materiales afectados, debido al medio al que se encuentren expuestos. La mayoría de los metales en contacto con el medio ambiente, forman un sistema termodinámicamente inestable tendiendo a retornar a su estado original en forma de óxidos. (Galvele y Duffó, 2007).

Los tipos de corrosión identificados pueden tipificarse como corrosión química y electroquímica, presentes en forma de corrosión uniforme y por picaduras. (Masamichi, 1990).

Lo anterior se aprecia en las fotografías de las figuras 3 a la 6.

## DESARROLLO DEL ESTUDIO

La presente investigación se desarrolla dentro del concepto de la investigación aplicada, con enfoque cualitativo y alcance de tipo descriptivo. Se pretende plantear una metodología de investigación que pueda servir de modelo en la identificación de fallas por el efecto de la corrosión y sus consecuencias

Para la identificación del tipo de falla, debido a que no se cuenta con las especificaciones técnicas de la tubería, se procede a realizar mediciones de las dimensiones de la misma y ensayo a la chispa; luego, se realiza inspección visual en la sección de la tubería que se analiza. Posteriormente, se procede a la medición del tamaño de las socavaciones internas de la tubería con empleo de equipo manual.

Se aplica la técnica de ultrasonido por arreglo de fases (PAUT por sus siglas en inglés), mediante la cual se determina el espesor de varias secciones de la tubería para medir el desgaste de la chapa.

Finalmente, se identifica la falla caracterizándose los tipos de corrosión presentes por interpretación de su morfología. (Aguilar, 2019).

El equipo de ultrasonido con arreglo de fases es el que se identifica en la figura 1.



Figura 1. Equipo de ultrasonido por arreglo de fases.

Fuente: elaboración propia.

## RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis se realiza sobre una sección de la tubería de 14 pulgadas de diámetro (350 mm), por aproximadamente 1.5 metros de longitud, la cual presenta la falla.

Los siguientes datos corresponden a los resultados de las características físicas básicas de la tubería, a la calidad del acero por ensayo a la chispa y a la medición de espesores por medio de PAUT:

Diámetro: 14 pulgadas (350 mm) NPS.

Calidad de la chapa por ensayo a la chispa: acero al bajo carbono.

Los espesores correspondientes a las mediciones en cinco sectores de la chapa y fuera del área de la falla, son los siguientes:

Espesor mínimo medido: 5.35 mm.

Espesor máximo medido: 6.51 mm.

Espesor promedio calculado: 5.97 mm

En la figura 2, se muestra el resultado de una de las mediciones de espesor realizadas por ultrasonido con arreglo de fases.

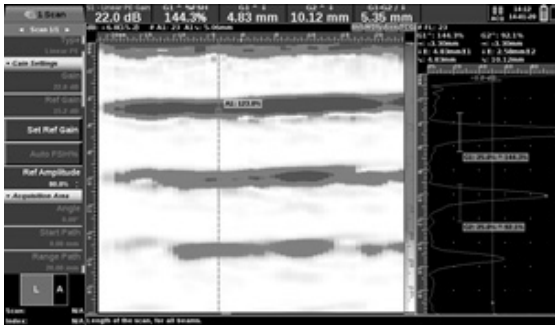


Figura 2. Gráfica de mediciones por ultrasonido.  
Fuente: elaboración propia.

Las figuras 3 a la 6, muestran las características físicas de las degradaciones o deterioro del acero en la parte interior.

En la figura 3, se aprecia claramente la morfología de las picaduras, algunas de las cuales han crecido en forma de cráteres, como resultado de la degradación del material.

En la figura 4, se identifica la falla por perforación de la chapa.

La figura 5, muestra la concentración de los efectos de la corrosión en la zona de unión de la soldadura longitudinal por resistencia y su inmediata vecindad o zona afectada por el calor (ZAC, o HAZ por sus siglas en inglés), identificándose claramente la presencia de corrosión generalizada o uniforme y corrosión por picaduras.

La figura 6, muestra la presencia de la corrosión generalizada o uniforme en el resto de la tubería.

Como se indica anteriormente, los resultados de las mediciones de espesores de distintos sectores se obtienen con la aplicación del equipo de ultrasonido con arreglo de fases.

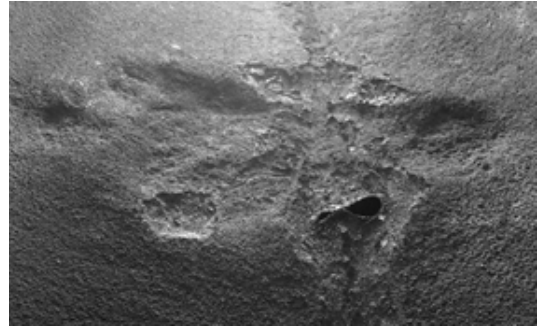


Figura 3. Zona de Falla.  
Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Perforación.  
Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Corrosión en la unión por soldadura.  
Fuente: elaboración propia.

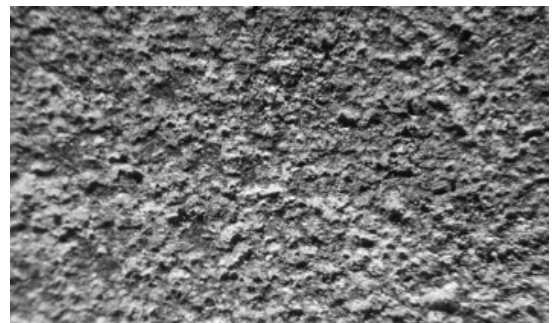


Figura 6. Corrosión generalizada en el interior de toda la tubería.  
Fuente: elaboración propia.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos, se considera que el espesor original corresponde a un tubo posiblemente de Cédula (SCH) 20 o Cédula (SCH) 30; esto no se especifica con seguridad debido a que no se tiene historial original de dicha tubería.

Los resultados de la identificación de la falla corresponden a inspección visual, ya que no se considera necesaria la aplicación de otros ensayos no destructivos debido a la evidencia de la misma. Para la comprobación del desgaste en general se realiza la medición de espesores con ultrasonido por arreglo de fases, necesaria en estos casos de falla.

La corrosión generalizada o uniforme en los aceros muestra la tendencia de este fenómeno a expandirse superficialmente, afectando la totalidad de las superficies expuestas, tal como puede apreciarse en las fotografías de las figuras.

De igual manera, se aprecia la proliferación de pequeñas picaduras con tendencia al crecimiento.

Los ácidos y la mayoría de los compuestos químicos como los hidrocarburos en general atacan directamente a los metales, produciéndose la corrosión química como en el caso analizado.

Por otro lado, la corrosión galvánica puede inducirse por la diferencia de las fases componentes de la microestructura del acero, en este caso, ferrita y perlita, o por separado ferrita y cementita o carburo de hierro, induciendo la corrosión por picaduras. Esto último, también puede producirse en los límites de la soldadura en donde se ven afectadas las fases metalográficas presentes, o debido a la sensibilización, en el caso de los aceros inoxidables (Soria y Aguilar, 2013).

Debe tenerse en cuenta que para que el fenómeno suceda debe existir un medio corrosivo, tal como los hidrocarburos, como se evidencia en el presente caso.

Existen varios métodos de prevención y disminución de los efectos de la corrosión que afecta a los

sistemas metálicos en general, y que se encuentran expuestos al efecto del medio ambiente, o a medios propicios para la inducción del fenómeno. Algunos de estos métodos se citan a continuación:

- a) Uso de pinturas especiales, como pinturas impermeables en depósitos o tuberías de conducción de fluidos en las cercanías de ambientes salinos. En estos casos se hace necesaria la aplicación de sistemas de mantenimiento continuo y renovación de las pinturas o recubrimientos en las zonas de deterioro; sin embargo, dicho recubrimiento puede realizarse solamente en la parte externa de la tubería, dado que en diámetros menores como el analizado no se puede aplicar un recubrimiento de pintura protectora, debido a que es poco práctica su aplicación.
- b) Empleo de recubrimientos metálicos por medio de procesos como galvanización por inmersión en caliente o electrólisis, con metales de diferente potencial electroquímico.
- c) Evitar el contacto directo de tuberías y depósitos de fluidos con el suelo húmedo, ya que este actúa como electrolito, al entrar en contacto con los materiales metálicos que forman pares galvánicos. Se recomienda el uso de alzas aisladas.
- d) Evitar el efecto de la sensibilización durante los procesos de soldadura de aceros inoxidables austeníticos, lo cual debilita la resistencia a la corrosión por ataque intergranular.
- e) Empleo de protección catódica, especialmente en el caso de tuberías y de navíos; sin embargo, la protección catódica en tuberías enterradas solamente ayuda a proteger la cara externa de la tubería, mas no la parte interna de la misma.

## CONCLUSIONES

1. Como puede constatarse por medio de los análisis de la falla expuestos, la misma se presenta debido a los efectos del fenómeno de la corrosión metálica iniciada por ataque químico y for-

mación de pares galvánicos, lo cual provoca la perforación identificada en la figura 4.

2. Los tipos de corrosión presentes, en función de su morfología, se identifican como corrosión por picaduras y corrosión generalizada. Esto, debido al material afecto, al medio de trabajo y al tipo de interacción entre ambos.
3. En el presente caso, los resultados que se obtienen por medio de la inspección visual, para definir los tipos de corrosión, y la medición de espesores por medio de ultrasonido, son suficientes para identificar las características de la falla.

#### RECOMENDACIONES

1. A los responsables del proyecto de Investigaciones Metalúrgicas de la FIUSAC:  
Continuar con las investigaciones del fenómeno de la corrosión, basándose en casos reales.
2. A los sectores afectados por el fenómeno:  
Hacer uso de los métodos propuestos para la prevención del fenómeno.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Rivas, R. A. (2019). *Fundamentos básicos de corrosión y aceros inoxidable*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, FIUSAC. Guatemala.
- API. Recommended Practice 574 (2009). *Inspection Practices for Piping System Components*.
- API. Recommended Practice 571 (2011). *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*.
- Galvele, J. R. y Duffó, G. S. (2007). *Degradación de materiales—Corrosión*. Instituto Sábató, UNSAM—CNEA. Argentina.
- Masamichi, K. (1990). *Metal Corrosion Damage and Protection Technology*. Allerton Press, Inc. New York, U.S.A.
- Soria Lemus, E. H. y Aguilar Rivas, R. A. (2013). *Corrosión por Picaduras en tuberías soldadas de acero inoxidable*. Causas y soluciones. EIM-FIUSAC. Guatemala.

#### INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Ingeniero Mecánico, Roberto Alejandro Aguilar Rivas. Facultad de Ingeniería, USAC. 1971.  
Doctor en Ciencias. Estudios de postgrado en Metalurgia de la Transformación, a nivel de Maestría, Doctorado y Postdoctorado en la CNEA, Argentina. 1973-1977.

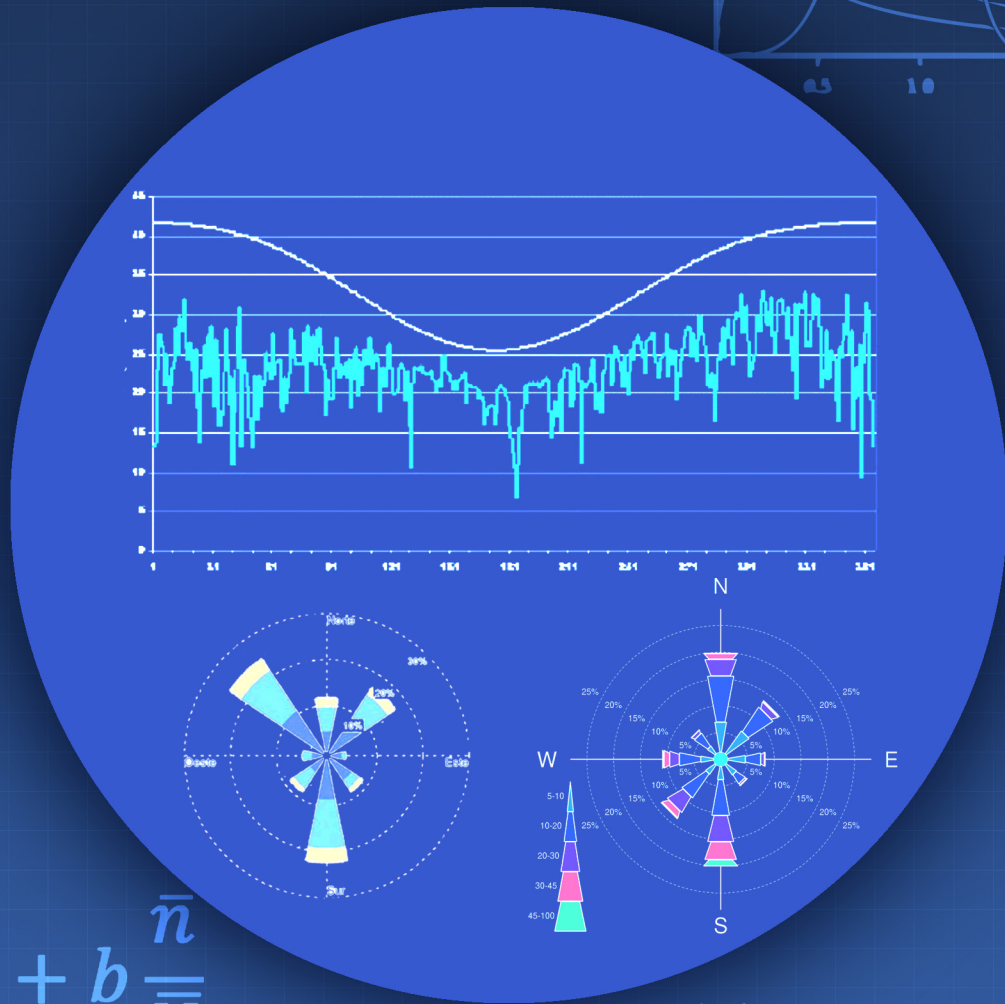
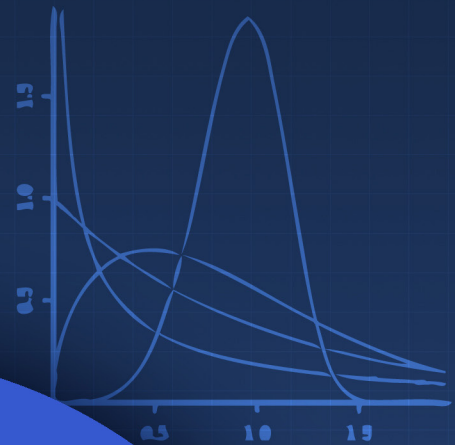
Afiliación laboral: Investigador, Escuela de Ingeniería Mecánica. FIUSAC. Guatemala.

Ingeniero Mecánico, Enrique Humberto Soria Lemus. Facultad de Ingeniería, USAC. 2004.  
Experto en Ensayos No Destructivos (END). Certificado de la AWS y API 653. Director, SIE Ltda. -Ensayos No Destructivos -

Afiliación laboral: Investigador Asociado, Escuela de Ingeniería Mecánica. FIUSAC. Guatemala.



# MODELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS



$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}}$$

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle v^3 \rangle$$

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \cos \omega_s) \right]$$

$$\langle v^3 \rangle = \int_0^{\infty} v^3 p(v) dv = c^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right)$$





# APLICACIÓN DEL MODELO DE ARMSTRONG-PRESCOTT PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR MEDIA A NIVEL SUPERFICIE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA, DE 1995 A 2019

*Application of Armstrong-Prescott's model for the estimation of average solar radiation at surface level in Guatemala city, from 1995 to 2019*

**Edwin Adalberto Bracamonte Orozco**

Mtro. en Investigación de Operaciones  
edwinbracamonte@yahoo.com

**Mayra Virginia Castillo Montes**

Doctora en Educación  
mayracastillom@yahoo.com

Recibido: 23 de noviembre de 2020. | Revisado: 16 de abril de 2021. | Aceptado: 18 de junio de 2021.

## RESUMEN

El estudio que se presenta se basa en la aplicación del modelo de Armstrong-Prescott para la estimación de la radiación solar media en la ciudad de Guatemala, a partir del cálculo de los valores de las variables que permiten determinar el coeficiente de transparencia  $\frac{H}{H_0}$  y la fracción solar  $\frac{\bar{n}}{N}$ . El propósito de la investigación es identificar el ajuste del modelo durante el periodo de 1995 a 2019 y compararlo con registros del año 1975.

Los resultados muestran que el modelo de Armstrong-Prescott permite obtener una buena estimación de la radiación solar media, con base en valores del error cuadrático medio cercanos a cero.

Los valores de los parámetros del modelo se constituyen en referentes para estudios posteriores en la ciudad de Guatemala o bien, para su comparación con resultados de la aplicación del modelo en otras regiones del país.

## PALABRAS CLAVE

Modelo de Armstrong-Prescott, radiación solar global media, coeficiente de transparencia, insolación.

## ABSTRACT

*The study presented is based on the application of the Armstrong-Prescott's model for the estimation of Guatemala City's average solar radiation, from estimation of the values of the variables that allow determining the  $\frac{H}{H_0}$  transparency coefficient and de solar fraction  $\frac{\bar{n}}{N}$ . The purpose of the research is to identify the fit of the model during the period from 1995 to 2019 and compare them with records from 1975.*

*The results show that the Armstrong-Prescott's model provides a good approximation of the mean solar radiation, which is established from Mean Square Error values close to zero.*

*The values of the model parameters become references for future studies in Guatemala City or, for their comparison with results from other regions of the country when the model is applied.*

## KEYWORDS

*Armstrong-Prescott model, Mean Global Solar Radiation, Transparency Coefficient, insolation.*

## INTRODUCCIÓN

La investigación se basa en la aplicación del modelo de Armstrong-Prescott (A-P) para estimar el comportamiento de la radiación solar global incidente a nivel de superficie en la ciudad de Guatemala. Se analizan registros de radiación solar media mensual e insolación, durante el período comprendido de 1995 a 2019, procedentes de la estación INSIVUMEH del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, ubicada en latitud  $14^{\circ} 35' 11''$ , longitud  $90^{\circ} 31' 58''$ , altitud 1502 msnm.

Como antecedente investigativo de importancia local se ubica a Bracamonte (1987), que reporta la elaboración de un mapa solar para Guatemala con base en los resultados de la aplicación del modelo de Armstrong-Prescott, durante el periodo de 1970 a 1983.

La aplicación del modelo de Armstrong-Prescott y sus variantes sigue vigente en estudios recientes para estimar la radiación solar en distintas regiones del mundo con base en registros meteorológicos (De Sousa et al, 2016; Liu, Tan y Pan 2019; Martim, Nogueira, Guia y Curado, 2020;). Otras investigaciones aplican modelos como el de Armstrong-Prescott, Bristow-Campbell y Hargreaves-Samani, para estimar la radiación solar con fines diversos como el estudio del rendimiento de cultivos (De la Casa, Ovando y Rodríguez, 2003), implementación de sistemas fotovoltaicos (Grajales Henao, 2018) y búsqueda de fuentes de energías renovables (Sierra, Quintero y Navarro, 2020).

Por tratarse de un modelo lineal, es importante actualizar los parámetros que involucra, por lo que es necesario calcular el coeficiente de transparencia  $\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$  y la fracción solar  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$ .

## MODELO DE ARMSTRONG-PRESCOTT

De acuerdo con Iqbal (1985), el modelo de Armstrong-Prescott se define como

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (1)$$

donde:

$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$  :coeficiente de transparencia

$\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$  :fracción solar

$a$  :intercepto en el origen

$b$  :pendiente

$\bar{H}$  :radiación solar global media mensual

$\bar{H}_o$  :radiación solar extraterrestre media mensual

Para el cálculo de la radiación solar extraterrestre diaria se utiliza la expresión:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \cos \omega_s) \right] \quad (2)$$

donde:

$I_{sc}$ : constante solar;  $1.96 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$

$E_0$ : excentricidad de la tierra, calculada con la ecuación de Duffie y Beckman (1980):

$$E_0 = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360 d_n}{365} \right) \quad (3)$$

$d_n$ : día del año juliano

$\omega_s$ : ángulo horario al amanecer, dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta * \tan \phi) \quad (4)$$

$\delta$ : declinación solar en grados, de acuerdo con Cooper (1969)

$$\delta = 23.45 * \sin \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (5)$$

$\phi$ : latitud del lugar;  $14^{\circ} 35'$

La longitud del día extraterrestre se determina utilizando la expresión:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta * \tan \phi) \quad (6)$$

donde:

$\delta$ : declinación solar en grados

$\phi$ : latitud del lugar;  $14^{\circ} 35'$

**RESULTADOS OBTENIDOS**

El proceso de aplicación del modelo de Armstrong-Prescott se inicia con el cálculo de las variables que se requieren, tales como: promedios mensuales de la excentricidad de la tierra  $\bar{E}_o$  (en grados), decli-

nación solar  $\delta$  (en grados), longitud del día  $\bar{N}$  (en horas), radiación extraterrestre  $\bar{H}_o$  (en  $calcm^{-2}día^{-1}$ ), radiación solar registrada,  $\bar{H}$  (en  $calcm^{-2}día^{-1}$ ), y la insolación registrada  $\bar{n}$  (en horas), correspondiente a la latitud de la ciudad de Guatemala.

Tabla 1.

*Distribución de promedios mensuales de la excentricidad de la tierra  $\bar{E}_o$  (en grados), declinación solar  $\delta$  (en grados), longitud del día,  $\bar{N}$  (en horas), radiación extraterrestre  $\bar{H}_o$  (en  $calcm^{-2}día^{-1}$ ) calculados, radiación solar  $\bar{H}$  (en  $calcm^{-2}día^{-1}$ ) e insolación media  $\bar{n}$  (en horas) registrados, ciudad de Guatemala, 1995 a 2019.*

Mes	Excentricidad ( $\bar{E}_o$ )	Declinación solar ( $\delta$ )	Longitud del día ( $\bar{N}$ )	Radiación extraterrestre ( $\bar{H}_o$ )	Radiación registrada ( $\bar{H}$ )	Insolación registrada $\bar{n}$
Enero	1.0314	-20.8472	11.2412	13.3255	0.3532	7.8998
Febrero	1.0232	-13.3253	11.5278	13.9907	0.4144	8.1291
Marzo	1.0090	-2.3892	11.9167	14.4335	0.4292	7.7199
Abril	0.9921	9.4932	12.3335	14.2985	0.4238	8.0211
Mayo	0.9773	18.8058	12.6788	13.7818	0.3748	6.0296
Junio	0.9686	23.0771	12.8486	13.4318	0.3640	5.1123
Julio	0.9684	21.1015	12.7689	13.6094	0.3639	6.2215
Agosto	0.9769	13.2960	12.4713	14.1546	0.3733	6.2010
Septiembre	0.9915	1.9936	12.0694	14.4441	0.3488	5.1111
Octubre	1.0085	-9.8485	11.6537	14.1644	0.3571	5.4933
Noviembre	1.0231	-19.0505	11.3118	13.5254	0.3692	7.0448
Diciembre	1.0315	-23.0956	11.1506	13.1133	0.3608	6.6682

Fuente: elaboración propia

El proceso de modelación continúa con la determinación de los promedios mensuales observados para la fracción solar  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$ , el coeficiente de transparencia  $\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$  observado y estimado por el modelo de Armstrong-Prescott y la distribución del error de estimación.

El cuadrado medio del error (RMSE) se considera un buen estimador del ajuste de un modelo a una distribución de datos, en la medida que las dife-

rencias entre los valores observados y los estimados sean cercanas a cero. (Gujarati, 1993).

La expresión que se aplica para calcularlo es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{observado} - Y_{estimado})^2} \quad (7)$$

Los resultados calculados para el coeficiente de transparencia y la fracción solar se presentan en la tabla 2.

Tabla 2.

Promedio mensual observado y estimado para el coeficiente de transparencia  $\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$  y la fracción solar  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$  ciudad de Guatemala, 1995 a 2019.

Mes	Fracción solar $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$ observado	$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ observado	$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ estimado.	Error de estimación	Error <sup>2</sup>
Enero	0.7028	0.7028	0.0287	-0.0020	0.00000408
Febrero	0.7052	0.7052	0.0290	0.0007	0.00000056
Marzo	0.6478	0.6478	0.0285	0.0012	0.00000153
Abril	0.6503	0.6503	0.0290	0.0006	0.00000031
Mayo	0.4756	0.4756	0.0267	0.0004	0.00000016
Junio	0.3979	0.3979	0.0261	0.0010	0.00000110
Julio	0.4872	0.4872	0.0265	0.0004	0.00000013
Agosto	0.4972	0.4972	0.0265	0.0001	0.00000001
Septiembre	0.4235	0.4235	0.0256	-0.0015	0.00000212
Octubre	0.4714	0.4714	0.0262	-0.0011	0.00000127
Noviembre	0.6228	0.6228	0.0278	-0.0006	0.00000039
Diciembre	0.5980	0.5980	0.0280	-0.0004	0.00000018
				Suma=	0.00000099
				RSME	0.000993

Fuente: elaboración propia

En la figura 1 se muestra la comparación gráfica entre los valores observados y los calculados con el modelo de Armstrong-Prescott para el coeficiente de transparencia.

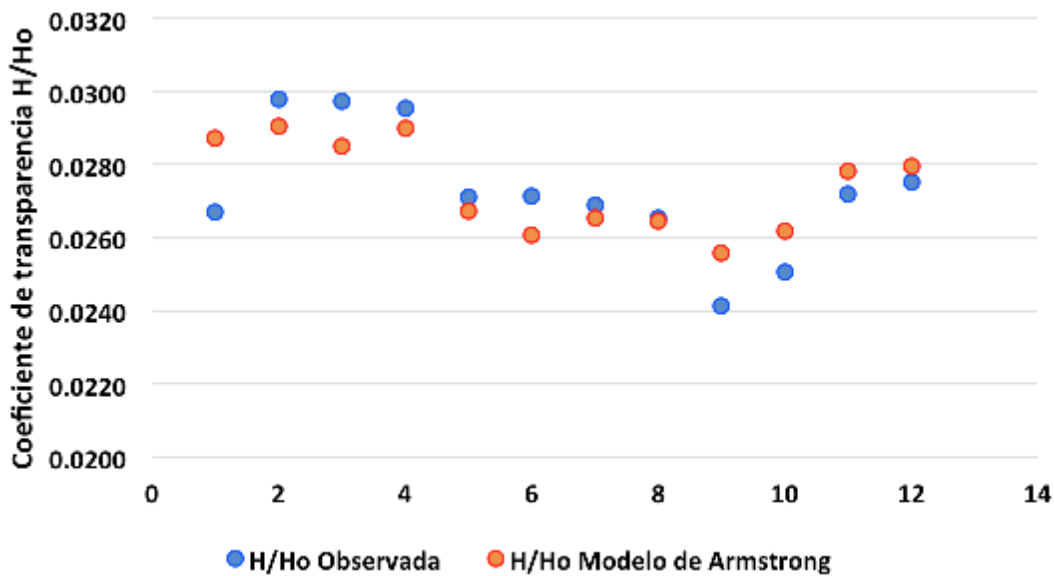


Figura 1. Comparación entre los valores promedio mensuales observados y los calculados con el modelo de Armstrong-Prescott para el coeficiente de transparencia.

La tabla 3 contiene los coeficientes a y b promedio calculados para cada año de estudio.

Tabla 3.  
Coeficientes a y b del modelo de A-P

Año	Coeficientes	
	a	b
1995	0.0335	-0.0179
1996	0.0296	0.0026
1997	0.0186	0.0169
1998	0.0224	0.0026
1999	0.0183	0.0094
2000	0.0200	0.0072
2001	0.0318	-0.0116
2002	0.0184	0.0113
2003	0.0155	0.0184
2004	0.0316	0.0087
2005	0.0227	0.0224
2006	0.0226	0.0232
2007	0.0241	0.0188
2008	0.0267	0.0158
2009	0.0209	0.0161
2010	0.0218	0.0129
2011	0.0587	-0.0343
2012	0.0145	0.0184
2013	0.0132	0.0211
2014	0.0147	0.0139
2015	0.0112	0.0208
2016	0.0212	0.0018
2017	0.0095	0.0254
2018	0.0079	0.0249
2019	0.0314	-0.0095

Fuente: elaboración propia

Los valores calculados para los parámetros del modelo de Armstrong-Prescott permiten estimar la radiación solar y compararla con los valores registrados. La radiación solar media mensual se estima de la siguiente forma:

$$\bar{H} = \bar{H}_o \left( a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (8)$$

Tabla 4.  
Comparación de la radiación solar promedio mensual registrada y estimada por el modelo A-P

Mes	Radiación promedio mensual $\bar{H}$ estimada	Radiación promedio mensual $\bar{H}$ registrada	Error <sup>2</sup>
Enero	0.3870	0.3532	0.00114
Febrero	0.4058	0.4144	0.00007
Marzo	0.4108	0.4292	0.00034
Abril	0.4112	0.4238	0.00016
Mayo	0.3676	0.3748	0.00005
Junio	0.3492	0.3640	0.00022
Julio	0.3738	0.3639	0.00010
Agosto	0.3883	0.3733	0.00023
Septiembre	0.3787	0.3488	0.00090
Octubre	0.3826	0.3571	0.00065
Noviembre	0.3809	0.3692	0.00014
Diciembre	0.3709	0.3608	0.00010
		MRSE	0.018

Fuente: elaboración propia

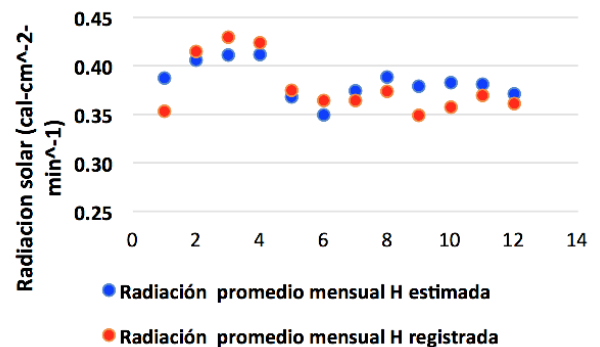


Figura 2. Radiación promedio mensual registrada y estimada durante el periodo de 1995 a 2019.

Los valores estimados para el periodo de estudio se comparan con valores promedio calculados para el año 1975 con datos de la misma estación; los resultados se presentan en la tabla 5.

Tabla 5.  
Comparación entre la radiación promedio mensual estimada con el Modelo A-P y la registrada en el año 1975.

Mes	Radiación promedio mensual H estimada modelo A-P	Radiación promedio mensual H registrada 1975	Error de estimación	Error <sup>2</sup>
Enero	0.3870	0.3870	-0.0341	0.00116
Febrero	0.4058	0.4058	-0.0215	0.00046
Marzo	0.4108	0.4108	-0.0189	0.00036
Abril	0.4112	0.4112	0.0018	0.00000
Mayo	0.3676	0.3676	0.0066	0.00004
Junio	0.3492	0.3492	-0.0072	0.00005
Julio	0.3738	0.3738	0.0965	0.00931
Agosto	0.3883	0.3883	-0.0719	0.00517
Septiembre	0.3787	0.3787	-0.0457	0.00209
Octubre	0.3826	0.3826	-0.0317	0.00100
Noviembre	0.3809	0.3809	-0.0056	0.00003
Diciembre	0.3709	0.3709	-0.0074	0.00005
			CME=	0.00164
			RMSE=	0.04055

Fuente: elaboración propia

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores presentados en la tabla 1, correspondientes a la radiación solar y a la insolación registradas, son adecuados debido a que, por su latitud, la ciudad capital de Guatemala se encuentra dentro del llamado cinturón solar ( $\pm 15^\circ$ ), lo cual permite desarrollar proyectos para el aprovechamiento de la energía solar ya sea en aplicaciones térmicas, iluminación natural o para la producción de energía eléctrica a pequeña y mediana escala. De acuerdo con lo que indica el Ministerio de Energía y Minas (2018), en Guatemala se cuenta con incentivos para el desarrollo de proyectos de energía solar, según la normativa que favorece el desarrollo de pequeños proyectos de energía renovable.

Los valores calculados para las variables radiación extraterrestre, declinación solar, ángulo horario del alba y longitud del día, permiten un adecuado cálculo del coeficiente de transparencia promedio mensual durante el periodo de 1995 a 2019; por lo que el modelo aplicado tiene un alto nivel de certidumbre.

Los resultados de la estimación de la radiación solar media mensual en la ciudad de Guatemala muestran que el error cuadrático medio es un buen indicador de la bondad del ajuste del modelo A-P a los datos registrados durante el periodo de estudio y en el año 1975, coincidiendo con lo reportado por De La Casa, Ovando y Rodríguez. (2003) que lo incluyen entre las medidas utilizadas.

Los valores de los parámetros del modelo pueden servir de referencia para su comparación en estudios posteriores en la ciudad de Guatemala, o bien, en otras regiones del país.

## CONCLUSIONES

1. Las variables utilizadas en el modelo de Armstrong-Prescott: radiación extraterrestre, declinación solar, ángulo horario del alba y longitud del día, muestran resultados con un bajo error cuadrático medio para el estimar el coeficiente de transparencia y la fracción solar en la ciudad de Guatemala.

2. El modelo de Armstrong-Prescott permite estimar la radiación solar mensual media en la Ciudad de Guatemala, con un alto nivel de certidumbre ya que el valor del error cuadrático medio es cercano a cero.

## RECOMENDACIONES

1. Aplicar el modelo de Armstrong-Prescott y otros modelos, para la estimación de la radiación solar media en diferentes regiones del país que cuenten con registros de radiación media y de insolación, con la finalidad de establecer las constantes del modelo para cada localidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bracamonte Orozco, E. (1987). Mapa solar guatemalteco. *Tecnología solar y eólica*, 4(3), p. 381-388. [https://doi.org/10.1016/0741983X\(87\)90068-3](https://doi.org/10.1016/0741983X(87)90068-3)
- De La Casa, A., Ovando, G. y Rodríguez, A. (2003) Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 32 (2): 45-61. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86432204>
- De Souza, J. L. et al. (2016). Empirical models of daily and monthly global solar irradiation using sunshine duration for Alagoas State, Northeastern Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14 p. 35-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2016.01.002>
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering Thermal Processes*. Wiley, New York.
- Grajales Henao, J. D. (2018). Modelo de estimación de radiación solar incidente sobre superficies horizontales e inclinadas en el CDITI para implementación de sistemas solares fotovoltaicos. *Revista Teinova*, 3, p. 57-62. Recuperado de: <http://revis-tas.sena.edu.co/index.php/CDITI/article/view/2361>
- Gujarati, D. N. (1993). *Econometría*. México: McGraw-Hill
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press: Canada.
- Liu, Y., Tan, Q., & Pan, T. (2019). Determining the parameters of the Ångström Prescott model for estimating solar radiation in different regions of China: Calibration and modeling. *Earth and Space Science*, 6, p. 1976-1986. <https://doi.org/10.1029/2019EA000635>
- Martim, C. C, Nogueira, J. S., Guia, L. E. B., & Curado, L. F. A. (2020). Estimate of global radiation by the Ångström-Prescott model for Tocantins. *Research, Society and Development*, 9(7): 1-13. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4139>
- Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala. (2018). *Energía solar en Guatemala*. Dirección General de Energía Guatemala. Recuperado de: <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf>
- Sierra, N, Quintero, D. y Navarro, A. (2020). Estimación de la radiación solar en Bucaramanga, Santander, mediante el método de Anstrong-Prescott. [http://cici.unillanos.edu.co/media2020/memorias/CICI\\_2020\\_paper\\_76.pdf](http://cici.unillanos.edu.co/media2020/memorias/CICI_2020_paper_76.pdf)

## INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Ingeniero Industrial, Edwin Adalberto Bracamonte Orozco, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1987.

Magister Scientiae en Investigación de Operaciones, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Informática y Ciencias de la Computación, Universidad Francisco Marroquín, 1997.

Afiliación Laboral: Facultad de Ingeniería USAC, Unidad de Modelación Matemática e Investiga-

ción, Unidad de Análisis de Datos, Escuela de Estudios de Postgrado.

Licenciada en Matemática Aplicada, Mayra Virginia Castillo Montes, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1995.

Doctora en Educación con especialidad en Mediación Pedagógica, Universidad de La Salle, Costa Rica, 2009.

Afiliación laboral: Facultad de Ingeniería USAC, Unidad de Modelación Matemática e Investigación, Escuela de Estudios de Postgrado.



# COMPORTAMIENTO DEL VIENTO Y ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN LA REGIÓN SUR DE GUATEMALA

*Wind behaviour and estimation of wind potential in the southern region of Guatemala*

**Mayra Virginia Castillo Montes**  
Dra. en Educación  
mayracastillom@yahoo.com

**William Adolfo Polanco Anzueto**  
Lic. en Matemática Aplicada  
william.polanco.gt@gmail.com

**Paris Francisco Rivera Ramos**  
Dr. en Cambio Climático  
paris.rivera@gmail.com

Recibido: 30 de noviembre de 2020. | Revisado: 20 de mayo de 2021. | Aceptado: 16 de junio de 2021.

## RESUMEN

El estudio del comportamiento del viento en la región sur de Guatemala se realiza con base en registros de 28 estaciones meteorológicas del Instituto Privado de Investigación en Cambio Climático, para el periodo de 2007 a 2018. La caracterización del viento y su descripción por medio de la distribución de Weibull de dos parámetros se orienta a la estimación del potencial eólico en la región.

El comportamiento del viento de acuerdo con la escala de Beaufort se describe como una brisa ligera y brisa muy ligera. Las velocidades máximas se observan entre las 9:00 y las 18:00 horas, con dirección predominante Norte y Noreste, aunque en su mayoría no superan los 4m/s, que se estima corresponde a la manifestación de vientos alisios en la región. En otros horarios alternan la componente Sur y Suroeste, así como la dirección Noroeste.

El potencial eólico estimado para alturas de 30m y 50m es insuficiente para la generación de energía a gran escala.

## PALABRAS CLAVE

Velocidad del viento, componente del viento, distribución de Weibull, potencial eólico.

## ABSTRACT

*The wind behaviour study on the southern region of Guatemala is carried out based on records from 28 meteorological stations of the Private Institute for Climate Change Research, from the period from 2007 to 2018. Wind characterization and its description through the Weibull distribution of two parameters is oriented to estimate the region's wind potential.*

*According to the Beaufort scale, the wind behaviour is described as light breeze and a very light breeze. Maximum speeds are observed between 9:00 am and 6:00 pm., predominantly from the North and Northeast, although most do not exceed 4 m/s, which is estimated to correspond to the manifestation of the trade winds in the region. At other times, the wind alternates among the South and Southwest components, as well as the Northwest.*

*The estimated wind potential, at heights of 30 m and 50 m, is insufficient for large scale power generation.*

## KEYWORDS

*Wind speed, wind component, Weibull distribution, wind potential.*

## INTRODUCCIÓN

A partir de conceptualizar el viento como masas de aire en movimiento, su dinámica puede estudiarse a diferentes escalas; entre ellas la capa límite de la tropósfera (hasta 1000 m de altura) en la que se analizan posibles aplicaciones eólicas a partir de la velocidad del viento, medida con base en la intensidad y la dirección (Villarrubia, 2013).

En los estudios relacionados con la velocidad y componente del viento se identifican propósitos como: caracterización del comportamiento de estas variables en regiones de interés, descripción de factores climáticos y orográficos incidentes en el comportamiento del viento en determinado periodo temporal, aplicación de modelos para estimar la velocidad y análisis del potencial para la generación de energía eólica. Este tema está abierto a la investigación.

En la literatura revisada se identifica la aplicación de varios modelos para estudiar el comportamiento de la velocidad del viento, entre ellas las distribuciones de Weibull, Gamma, Rayleigh y Lognormal (Amaya, Saavedra y Arango; 2014). Se destaca la bondad del ajuste del modelo de Weibull de dos parámetros (Guevara, 2013; Galán, Terrero, Legrá y Carcassés, 2014; Orozco, Mejías y Mellado, 2015; Pérez, Arriola y Espinal, 2017; Otero, Cerne y Campetella, 2017; Aragón, Serna y Solano, 2019; Zetina et al, 2019; Constante, Cuesta y Jijón, 2021). En otros estudios se han aplicado algoritmos de redes neuronales artificiales (Bolaños, Yaulema, Gavilánez y Avayaca, 2020; Vargas, 2020), o su combinación con los modelos ARIMA de Box-Jenkis (Pino, Parreño, Priore y Gómez, 2004).

## DESARROLLO DEL ESTUDIO

El estudio es de enfoque cuantitativo y diseño no experimental. La información que se analiza corresponde a registros de 28 estaciones meteorológicas ubicadas en la región sur de Guatemala, que pertenecen al Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático-ICC-

Los registros diarios de velocidad y dirección del viento se realizan cada 15 minutos, con periodos de registro diferentes entre 2007 y 2018.

Las fases de la investigación son: a) Estructuración de base de datos con registros de velocidad y componente del viento en cada estación, a partir de la información disponible. b) Análisis descriptivo para el cálculo de promedios diarios y anuales para caracterización de la velocidad y componente del viento, por medio de series de tiempo, rosas de viento y otros. c) Aplicación del modelo de Weibull de dos parámetros y análisis de la bondad de ajuste, con el criterio de máxima verosimilitud. d) Interpretación de los rangos de velocidad de acuerdo con la escala de Beaufort. e) Cálculo y estimación del potencial eólico ( $\text{Watts/m}^2$ ) con base en Villarrubia (2013, p.92):

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle v^3 \rangle \quad (1)$$

$$\langle v^3 \rangle = \int_0^\infty v^3 p(v) dv = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $c$  y  $k$  son los parámetros de Weibull y  $\Gamma$  es la función Gamma.

$$\rho = \rho_0 e^{-\left(\frac{0.297 H_m}{3048}\right)} \quad (3)$$

donde  $\rho_0 = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  y  $H_m$  es la elevación del lugar sobre el nivel del mar. Patel (2006, p.30).

Para estimar el potencial eólico a 30m y 50m se utiliza la expresión

$$\frac{(\text{Potencial eólico})^*}{\text{Potencial eólico}} \approx \left(\frac{z^*}{z}\right)^{3\alpha} \quad (4)$$

donde (Potencial eólico)\* es el potencial que se busca estimar, Potencial eólico es el potencial calculado,  $z^*$  es la altura a la cual se estima el potencial y  $z$  es la altura del potencial calculado. Se aplica un valor de  $\alpha = \frac{1}{7}$ .

**RESULTADOS OBTENIDOS**

En la tabla 1 se presentan los resultados de la velocidad promedio global.

Tabla 1.

*Ubicación de 28 estaciones de la región sur y velocidad promedio global*

Estación	Coordenadas	Velocidad	Estación	Coordenadas	Velocidad
Periodo	Latitud, longitud, altitud	Promedio Global (m/s)	Periodo	Latitud, longitud, altitud	Promedio Global (m/s)
1	Concepción. 2017-2018. 14.34°, -90.79°, 482 msnm	0.18	15	Bonanza. 2007-2018. 14.08°, -91.19°, 29 msnm	1.45
2	Irlanda. 2007-2018. 14.15°, -91.43°, 20 msnm	0.72	16	Amazonas. 2008-2018. 14.47°, -90.77°, 21 msnm	1.47
3	Xoluta. 2012-2018. 14.48°, -91.86°, 52 msnm	0.85	17	San Nicolas. 2012-2018. 14.18°, -91.6°, 20 msnm	1.48
4	Naranjales. 2011-2018. 14.37°, -91.48°, 91 msnm	0.97	18	Magdalena. 2013-2018. 13.93°, -90.26°, 19 msnm	1.59
5	Chiquirines. 2016-2018. 14.56°, -92.04°, 13 msnm	1.13	19	La Giralda. 2011- 2018. 13.98°, -90.93, 20 msnm	1.62
6	Petén Oficina. 2008-2018. 14.26°, -91.41°, 51 msnm	1.16	20	Tulula. 2010-2018. 14.51°, -91.59°, 251 msnm	1.70
7	CENGICANA. 2008-2018. 14.33°, -91.05°, 297 msnm	1.19	21	El Bálsamo. 2008-2018. 14.28°, -91°, 280 msnm	1.71
8	Costa Brava. 2008-2018. 14.24°, -90.92°, 151 msnm	1.23	22	Providencia. 2016-2018. 14.37°, -91.85°, 40 msnm	1.79
9	San Antonio. 2007-2018. 14°, -91.2°, 10 msnm	1.24	23	Bouganvilia. 2008-2018. 14.12°, -90.94°, 54 msnm	1.85
10	Puyumate. 2014-2018. 14.26°, -91.26°, 86 msnm	1.31	24	El Platanar. 2013-2018. 14.56°, -90.94°, 1572 msnm	1.92
11	San Rafael. 2010-2018. 14.02°, -90.63°, 9 msnm	1.39	25	Álamo. 2016-2018. 14.63°, -92.14°, 30 msnm	1.89
12	Tehuantepeq. 2008-2018. 14.17°, -91.1°, 67 msnm	1.39	26	Candelaria. 2015-2018. 13.91°, -90.56°, 5 msnm	2.17
13	Lorena. 2011-2018. 14.52°, -91.42°, 340 msnm	1.40	27	Cocales. 2017-2018. 14.38°, -91.2°, 215 msnm	2.18
14	Trinidad. 2008-2018. 14.15°, -90.84°, 67 msnm	1.45	28	La Máquina. 2018. 13.9°, -90.33°, 17 msnm	2.65

Fuente: elaboración propia



Figura 1. Ubicación de estaciones de ICC en región sur de Guatemala.

El proceso de análisis que se realiza en todas las estaciones se muestra en detalle para la estación Bouganvilia, que se elige con el criterio de reportar la velocidad promedio global más alta y contar con registros de al menos 10 años.

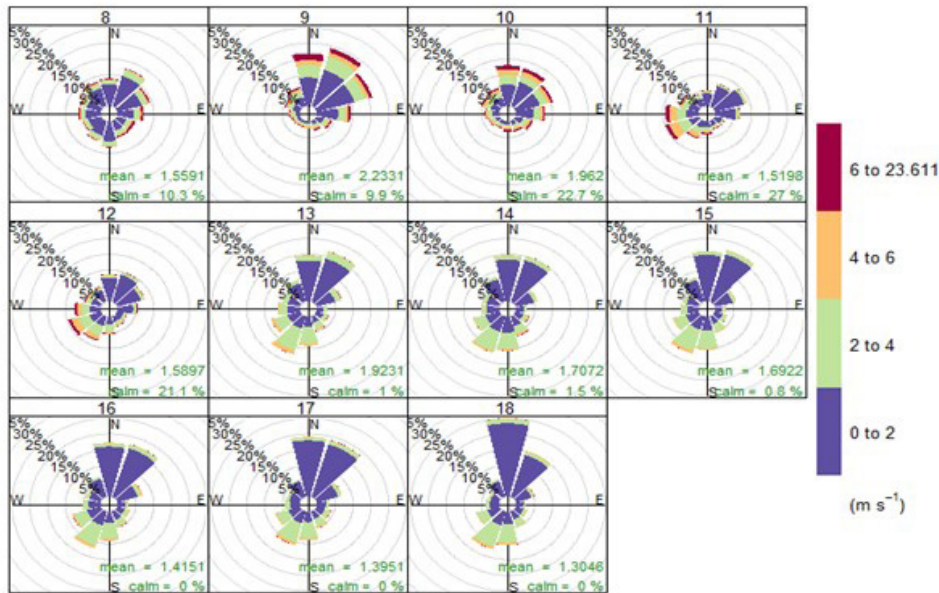


Figura 2. Rosa de vientos en estación Bouganvilia. 2008 a 2018.  
Fuente: elaboración propia.

El proceso de análisis que se realiza en todas las estaciones se muestra en detalle para la estación Bouganvilia, que se elige con el criterio de reportar la velocidad promedio global más alta y contar con registros de al menos 10 años.

En la figura 2 se observa que solamente en los años 2009, 2010 y 2011

Las variaciones de la componente del viento en diferentes horarios del día se presentan en lapsos de 15 minutos en los diagramas de cajas de la figura 3, en la que se identifica que la componente cercana a 200 grados azimutales predomina entre las 9:00 y de las 18:00 horas; en el horario restante cambia a una componente Sur y Suroeste.

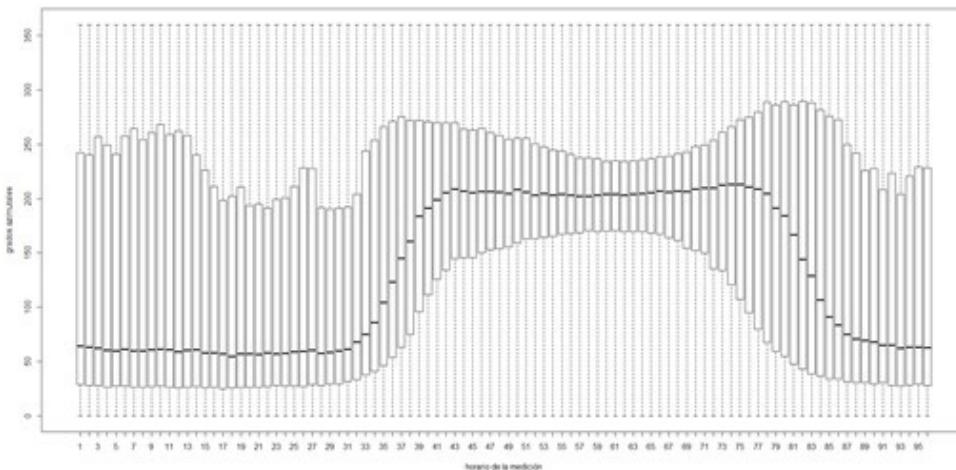


Figura 3. Patrones diarios de dirección del viento. 2008 a 2018.  
Fuente: elaboración propia.

Se describen las características del viento con base en la escala de Beaufort (Villarrubia, 2013).

Tabla 2.

Velocidad del viento en estación Bouganvilia de acuerdo con escala de Beaufort

Escala de Beaufort	V (m/s)	Porcentaje	Descripción
0	0 – 0.4	26.9 %	Calma
1	0.5 – 1.5	29.4 %	Brisa muy ligera
2	1.6 – 3.4	28.4 %	Brisa ligera
3	3.5 – 5.5	11.5 %	Pequeña brisa
4	5.5 – 8	2.9 %	Moderado

Fuente: elaboración propia

En general, la velocidad promedio global en 17 estaciones caracteriza al viento como brisa muy ligera y en 9 como brisa ligera.

A continuación, se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para seis estaciones en las cuales se calcula y estima el potencial eólico, aunque se estudia la bondad de ajuste en todas en las estaciones.

Tabla 3  
*Parámetros de la distribución de Weibull*

Estación	k	c	Media	Mediana	Min	Máx	DE
Amazonas	1.16	1.52	1.47	0.90	0.04	7.79	1.36
Bouganvilía	1.61	2.09	1.85	1.34	0.14	6.46	1.25
Cengicaña	1.54	1.33	1.19	0.91	0.06	5.19	0.82
San Antonio	2.05	1.39	1.23	1.08	0.03	5.88	0.63
Bonanza	1.66	1.65	1.47	1.06	0.14	5.42	0.91
Tulula	2.34	1.97	1.74	1.42	0.23	5.16	0.79

Fuente: elaboración propia

En la figura 4 se compara la distribución de Weibull con el histograma de frecuencias de velocidad del viento en la estación Bouganvilía.

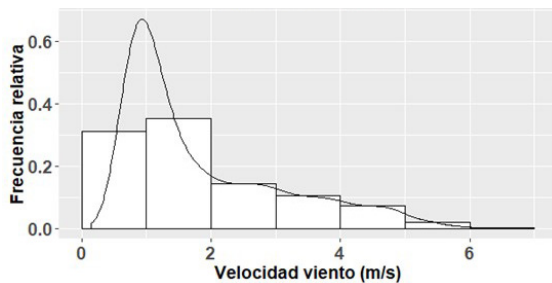


Figura 4.  
Distribución de Weibull e histograma. Estación Bouganvilía.

Fuente: elaboración propia.

Se presenta en detalle el procedimiento que se aplica a los registros de la estación Bouganvilía y en la tabla 4 se presentan los resultados para las seis estaciones de interés.

#### Potencial eólico a 10 m

La altitud sobre el nivel del mar de esta estación es de 60 metros. Los valores de los parámetros de Weibull son  $k=1.61$  y  $c=2.09$ .

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle v^3 \rangle$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\left(\frac{0.297Hm}{3048}\right)} = 1.225 e^{-\left(\frac{0.297(60)}{3048}\right)} = 1.2179$$

$$\langle v^3 \rangle = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) = (2.09)^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{1.61}\right)$$

$$= (2.09)^3 * 1.76915 = 16.15$$

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} * 1.2179 * 16.15 = 9.8352 \frac{W}{m^2}$$

#### Potencial eólico a 30 m

$$\frac{(\text{Potencial eólico})^*}{\text{Potencial eólico}} \approx \left(\frac{z^*}{z}\right)^{3\alpha}$$

$$\left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{60} \approx \left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{10} \left(\frac{30}{10}\right)^{3\left(\frac{1}{7}\right)}$$

$$\left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{60} \approx \left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{10} * \left(\frac{30}{10}\right)^{3\left(\frac{1}{7}\right)}$$

$$= 9.8352 * 1.6013 = 15.75 \frac{W}{m^2}$$

#### Potencial eólico a 50 m

$$\left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{60} \approx \left(\frac{\langle P_d \rangle}{A}\right)_{10} * \left(\frac{50}{10}\right)^{3\left(\frac{1}{7}\right)}$$

$$= 9.8352 * 1.9932 = 19.60 \frac{W}{m^2}$$

Tabla 4  
*Potencial eólico a diferentes alturas*

Estación	Potencial 10m	Eólico 30m	(W/m <sup>2</sup> ) 50m
Amazonas	2.75	4.41	5.49
Bouganvilía	9.83	15.75	19.60
Cengicaña	2	3.20	3.99
San Antonio	2.13	3.41	4.24
Bonanza	4.63	7.40	9.22
Tulula	5.28	8.44	10.52

Fuente: elaboración propia

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con Villarrubia (2013), en los estudios de caracterización del viento es ideal contar con datos de periodos temporales de 25 a 30 años, sin embargo, De la Cruz, Valencia y Vanegas (2018) reportan resultados con datos de 10 años y Soler, Sánchez y Borrego (2015), de 1 año. Para el estudio que se reporta se considera que la información disponible en las 28 estaciones que se analizan es suficiente para la descripción del comportamiento de la intensidad y la componente del viento en la región sur, así como para el cálculo y estimación del potencial eólico, que posteriormente pueda constituirse en una línea base cuando se cuente con más información.

A partir de los gráficos de rosas de viento es posible identificar un grupo de estaciones en las que el viento presenta una componente predominante Norte y Noreste con registro de velocidades de viento que en su mayoría no superan los 4m/s. Hay otro grupo de estaciones que presentan predominancia en la componente Sur y Suroeste y un grupo más reducido con prevalencia en la componente Noroeste.

El análisis de los registros de la estación Bouganvilia permite identificar gran variabilidad en las componentes, así como velocidades promedio bajas que caracterizan el viento como una brisa ligera, de acuerdo con la escala de Beaufort. Este comportamiento es similar en el resto de las estaciones.

Los diagramas de cajas que representan el comportamiento de la componente del viento para cada una de las 96 mediciones diarias desde las 0 horas hasta las 23:45, evidencian que entre las 9:00 y 18:00 horas (aproximadamente), existe una menor dispersión de los datos, es decir, el viento muestra componentes que están cerca de un valor que está representado por la mediana. En ese horario se identifica la mayor frecuencia en dirección Sur- Suroeste (entre 180° y 250°), Sureste (de

150° a 180°) y en una tercera posición de mayor frecuencia en la componente Noreste (de 35° a los 60°).

Con relación a los patrones observados en el comportamiento de la velocidad, se identifica un incremento en el horario de 9:00 a 18 horas, por con valores máximos a las 14 horas, aunque con velocidades bajas. Además, se identifica un grupo de 6 estaciones en las que se registran incrementos de velocidad del viento en horas de la madrugada, aunque su comportamiento corresponde a ráfagas de viento cuya velocidad es menor a la velocidad promedio.

Se coincide con otros autores (Aragón, Serna y Solano, 2019; Zetina et al, 2019; Constante, Cuesta y Jijón, 2021) en cuanto a la bondad del ajuste de la distribución de Weibull al comportamiento empírico de los datos registrados en las 28 estaciones ubicadas a una altitud que varía de 5 msnm a 1572 msnm.

De acuerdo con Guevara (2013) se requiere de velocidades entre 4m/s y 6m/s para considerar un potencial eólico mínimo por lo que se establece que el potencial eólico estimado, es insuficiente para la generación de energía a gran escala por lo que se limita su utilidad para actividades como bombeo de agua, carga de baterías y otras similares de uso domiciliar.

1. El viento de la región sur de Guatemala se ubica en la categoría 1 (61%) y en la categoría 2 (39 %) de la escala de Beaufort; los datos de velocidad se ajustan a una distribución de Weibull según el criterio de máxima verosimilitud.
2. El comportamiento de la componente del viento se estabiliza alrededor de la mediana de la distribución de datos, entre las 9:00 y las 18:00 horas, con dirección predominante Norte y Noreste y registro de velocidades que en su mayoría no superan los 4m/s, que se estima corresponde a la manifestación del viento alisio predominante

en la región centroamericana. Hay otro grupo de estaciones que presentan predominancia en la dirección Sur y Suroeste y un grupo más reducido con prevalencia en la dirección Noroeste.

3. El potencial eólico en la región sur de Guatemala calculado para velocidades de viento a 10 m y estimado para 30 m y 50 m de altura, es insuficiente para la generación de energía a gran escala, su aprovechamiento se reduce a actividades como bombeo de agua, carga de baterías y otras similares.

#### RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios para identificar patrones de las características mensuales del viento y sus relaciones con variables como la temperatura, precipitación, presión atmosférica, orografía y otras.
2. Desarrollar estudios de potencial eólico en otras regiones del país para las cuales se cuente con registros de la velocidad y componentes del viento.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaya-Martínez, P.A., Saavedra-Montes, A.J. y Arango-Zuluaga, E.I. (2014). A Statistical Analysis of Wind Speed Distribution Models In The Aburrá Valley, Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(5), 121–136. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S012253832014000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S012253832014000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Aragón-Moreno, J. A., Serna-Castaño, E. D. y Solano-Romero, D. S. (2019). Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 - 2016. *Entramado*, 15(2), 286-307. <https://doi.org/10.18041/19003803/entramado.2.5733>
- Bolaños, P., Yaulema, J., Gavilánez, O. Avayaca, B. (2020). Redes neuronales en la predicción de la velocidad del viento. *Polo del Conocimiento* (Edición núm. 45) 5(5), 4-40, <https://doi.org/10.23857/pc.v5i5.1398>
- De la Cruz Buelvas, J., Valencia Ochoa, G., y Vanegas Chamorro, M. (2018). Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(2), 319-328. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000200319>
- Constante, J., Cuesta, A. y Jijón, D. (2021). Métodos de ajuste de Weibull de dos parámetros en series de viento y estimación del Potencial Eolo-eléctrico. *Revista Técnica Energía*, 17(II), 74-82. DOI: 10.37116/REVISTAENERGIA.V17.N2.2021.424
- Galán, N., Orozco, E., Mejías, N. y Mellado, C. (2015). Análisis Estadístico de la Velocidad del Viento en Mazatlán, Sinaloa. *Revista de Análisis Cuantitativo y Estadístico*, 2 (4), 288-294. Recuperado de: [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Analisis\\_Cuantitativo\\_y\\_Estadistico/analisis4/3%20Analisis%20Cuantitativo%20y%20Estadistico%20Vol%202%20Num%204%20288-294.pdf](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Analisis_Cuantitativo_y_Estadistico/analisis4/3%20Analisis%20Cuantitativo%20y%20Estadistico%20Vol%202%20Num%204%20288-294.pdf)
- Guevara Díaz, J. M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra. Nueva Etapa*, XXIX (46), 81-101. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72130181006>
- Otero, F., Cerne, S., Campetella, C. (2017). Estudio preliminar de la velocidad del viento en San Julián en referencia a la generación de energía eólica. *Meteorológica*, 42(2), 59-79. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/57456/CONICET\\_Digital\\_Nro.97c6c7e8-f1f2-4613-b673-6107517a725b\\_d.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/57456/CONICET_Digital_Nro.97c6c7e8-f1f2-4613-b673-6107517a725b_d.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Patel, M. (2006). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation* (2nd

ed.). Unites States: Taylor & Francis.

- Pérez, J., Arriola, J. y Espinal, M. (2017). Potencia aprovechable y varibilidad del viento caso típico distrito de Pimentel. *Revista TECNIA*, 27(2), 63-71. <https://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v27i2.176>
- Pino, R., Parreño, J., Priore, P. y Gómez, A. (2004). Pronóstico de la Velocidad y Dirección del Viento mediante Redes Neuronales Artificiales. *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*, 905-914. Leganés. Recuperado de <http://adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/1208https://doi.org/10.35290/ro.v1n3.2020.368>
- Soler, E., Sánchez, L. y Borrego, R. (2015). Caracterización del viento para evaluar su potencial energético en la Isla de la Juventud. *Ciencias de La Tierra y El Espacio*, 16(2), 164–175. Recuperado de <https://silo.tips/download/caracterizacion-del-viento-para-evaluar-su-potencial-energetico-en-la-isla-de-la>
- Terrero, E., Legrá, A. y Carcassés, J. (2014). Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte I *Teoría y algoritmo general. Ingeniería Energética, Vol. XXXVI*, 200-209. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v36n2/rie09215.pdf>
- Vargas Guevara, C. L. . (2020). Evaluación del potencial eólico y predicción de la velocidad de viento con Minería de Datos. *Revista ODIGOS*, 1(3), 9–25. <https://doi.org/10.35290/ro.v1n3.2020.368>
- Villarrubia, M.(2013). *Ingeniería de la energía eólica*. Alfaomega Grupo Editor: México.
- Zetina-Moguel, C. E., et al. (2019). Aproximación a la modelación estocástica del viento de turbonadas en la ciudad de Mérida, Yucatán. *Ingeniería*, 23(3), 8-22. Recuperado de: <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/161/149>

#### INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Licenciada en Matemática Aplicada, Mayra Virginia Castillo Montes, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1997. Doctora en Educación, Universidad de La Salle, Costa Rica, 2009.

Afiliación laboral: Unidad de Modelación Matemática e Investigación, Facultad de Ingeniería. USAC.

Licenciado en Matemática Aplicada, William Adolfo Polanco Anzueto, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003.

Afiliación Laboral: Unidad de Modelación Matemática e Investigación, Escuela de Ciencias, Facultad de Ingeniería. USAC.

Dr. en Cambio Climático y Sostenibilidad, Paris Francisco Rivera Ramos, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería. USAC.

Afiliación laboral: Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemáticas y Ciencias Físicas. Universidad Mariano Gálvez de Guatemala.



# CAMBIO CLIMÁTICO Y SOSTENIBILIDAD

DOCTORADO





# ENERGÍAS RENOVABLES, GEOTERMIA Y BIOMASA: UNA REVISIÓN CRÍTICA PARA GUATEMALA

*Renewable energies, geothermal and biomass: a critical review for Guatemala*

**Jeffrey Estuardo Argueta**

Mtro. en Ingeniería Sanitaria  
Jeff\_argueta@hotmail.com

**Wagner Guillermo Alonzo**

Mtro. en Plantas Medicinales  
wagneralonzo@yahoo.com

**Sergio Leopoldo Dionisio**

Mtro. en Desarrollo Rural Sostenible  
sergioldd@gmail.com

Recibido: 23 de noviembre de 2020. | Revisado: 25 de marzo de 2021. | Aceptado: 28 de junio de 2021.

## RESUMEN

El presente ensayo revisa avances y el potencial de generación y la utilización de energías renovables de geotermia y biomasa en Guatemala. Se visualiza que el recurso de la energía geotérmica se desaprovecha, con relación al potencial para su explotación, se proyecta que se podría aprovechar implementando plantas generadoras de energía hasta de 6,000 MW. En cuanto al potencial energético del país por medio de la biomasa según los datos por el Ministerio de Energía y Minas -MEM-, tiene una capacidad de 701 MW, sin embargo, en su mayoría impera el uso de la leña que genera un impacto negativo en los bosques, mientras que el residuo del bagazo se proyecta como un generador de energía amigable.

## ABSTRACT

*This article demonstrates the advances, potential and use of renewable energies, focused on Geothermal and Biomass or biofuels. In Guatemala, it is expected that the Geothermal energy resource is wasted, in relation to the map of areas that are potential for the exploitation of geothermal energy, it is projected that it could be used by implementing power generating plants through Geothermal energy up to 6,000 MW. Regarding the country's energy potential of Biomass, according to data from the Ministry of Energy and Mines -MEM-, it has a capacity of 701 MW, mostly it is the use of firewood that generates a negative impact on forests, while that the bagasse residue is projected as a friendly power generator.*

## PALABRAS CLAVE

Energía renovable, biocombustibles, biomasa, geotermia.

## KEYWORDS

*Renewable Energy, biofuels, biomass, Geothermal.*

## INTRODUCCIÓN

El ensayo tiene por objetivo brindar un análisis crítico sobre el uso actual, uso potencial y principales desafíos para el desarrollo de las energías renovables en el país, en específico sobre la energía geotérmica y la energía de biomasa.

Debido a los efectos sociales y económicos del cambio climático y la necesidad de mitigar los gases de efecto invernadero (GEI), se plantea como alternativa el desarrollo y uso de las energías renovables. En ese sentido, la información que se presenta permite conocer el estado del aprovechamiento de los recursos renovables en cuanto a la geotermia y la biomasa o biocombustibles.

Se considera que en Guatemala el potencial que se tiene para el aprovechamiento de estos recursos es alto, ya que las matrices energéticas para diferentes años, permiten visualizar la tendencia o el uso de estos recursos en sustitución de los combustibles fósiles que son altamente contaminantes y no amigables con el medio ambiente.

### A. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN GUATEMALA

La ubicación del país en el punto de unión de tres placas tectónicas -Placa de Norte América, Placa del Caribe y Placa de Cocos- (MEM, 2018), la formación de la cadena volcánica y el conjunto de fallas como la del Motagua y del Polochic, permiten manifestaciones geotérmicas de alto interés para la generación de energía eléctrica.

Tal condición, representa oportunidades para el desarrollo de un sector energético limpio y auto-suficiente, así como el cumplimiento de las metas de mitigación de GEI y la contribución al objetivo del Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura atmosférica a 2° C o menos (Dalla, et al., 2020).

El agotamiento de los combustibles fósiles (carbón y petróleo), la creciente importancia de problemas climáticos, así como aspectos de seguridad energética, permiten afirmar que la exploración de energías renovables nacionales constituye una solución en el mediano y largo plazo.

La energía geotérmica aprovecha el calor interno de la Tierra, principalmente del magma fundido y el proceso de desintegración de elementos radiactivos, en donde el agua y el vapor, transportan la energía a la superficie terrestre (Wang, et al., 2020; IRINA, 2020).

### ANTECEDENTES

El interés del país para identificar y evaluar áreas con manifestaciones geotérmicas inicia en 1970. La Agencia Tecnológica con el Extranjero de Japón (OTCA, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Electrificación-INDE), identificaron potenciales campos geotérmicos en Moyuta, Jutiapa; Zunil, Quetzaltenango, Amatitlán, San Vicente Pacaya y Villa Canales (MEM, s.f.). En 1982 INDE y OLADE, definieron 13 áreas con potencial geotérmico de reserva nacional, ampliado en la década de 1990 (MEM, 2018; MEM, 2019).

El potencial nacional ha sido estimado en 1,000 MW de energía geotérmica, de los cuales únicamente se aprovecha el 3.5 % (35.23 MW), con una participación en la matriz energética de 2.20 %, para el año 2017 (MEM, 2018).

### DESAFÍOS Y VIABILIDAD

La energía geotérmica es considerada una de las formas más limpias de generar electricidad, al aprovechar el calor de las áreas tectónicas (MEM, 2018), que puede sustituir el uso de combustibles fósiles y que contribuye a abastecer la demanda de energía y la mitigación de gases efecto invernadero. Se considera este recurso como abundante, versátil, bajo en carbono y no intermitente (Dalla et al., 2020).

A partir de las condiciones mencionadas, la geotermia puede convertirse en una de las áreas claves para el desarrollo energético nacional basado en energías limpias; sin embargo, requiere de la revisión de una serie de desafíos, entre ellos: aspectos financieros, recursos tecnológicos, conflictos sociales que pueden generarse y carencia de políticas

nacionales para su promoción.

Uno de los factores críticos para el desarrollo de la geotérmica, son los altos costos de inversión. Según Gonzales (2019), a partir de un análisis de costos de generación de energía durante 2017 al 2018, la geotérmica junto con la energía eólica, son tecnologías que no logran disminuir el costo nivelado de la electricidad.

El reporte de costos de generación de energía renovable de IRENA (2020), indica que las energías renovables seguirán una tendencia de crecimiento, en donde tecnologías como la solar fotovoltaica y la eólica terrestre, brindan posibilidades de crecimiento rápido, en tanto que tecnologías como la eólica marina, la hidroeléctrica, la bioenergía y la energía geotérmica ofrecen opciones de inversión a mediano plazo complementarias y rentables.

La geotermia tiene repercusiones sobre el ambiente, al generar gases no condensables (como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, helio, nitrógeno y metano) en la liberación descargas de vapor, así como trazas de mercurio, arsénico y radón que pueden contaminar los cuerpos de agua (Chen et al., 2020).

Para una mayor comprensión de estos riesgos, se deben evaluar los riesgos ambientales subterráneos, superficiales y atmosféricos (Dalla, et al, 2020).

Se considera que, una adecuada comprensión de los problemas ambientales, el desarrollo de instrumentos y tecnologías para su gestión, permiten reducir los riesgos sobre la salud humana, los sistemas ecológicos y la economía, así como la conflictividad social asociada.

## **B. ENERGÍA BIOMASA EN GUATEMALA**

En Guatemala se utiliza la biomasa en diversas formas, tal es el caso de la leña, cogeneración con bagazo de caña, biodigestión y otras.

La fuente energética de mayor demanda en el país es la leña (FAO, 1996). Se estima que el 64 % de la población depende de ésta como fuente de energía,

el 67 % de ella se encuentra en el área rural y el 33 % en el área urbana (INAB-FAO, 2004, BANGUAT/URL-IARNA,2009).

La población guatemalteca por necesidad y tradición utiliza y seguirá utilizando la leña como fuente principal de energía, de forma mayoritaria en el área rural debido a que, para los sectores poblacionales más pobres, el 80 % del gasto en combustibles se destina a cocción de alimentos y calefacción de la vivienda (CEPAL, 2008).

En el Quinto Eje de la Política Energética 2013-2027 del Ministerio de Energía y Minas, se establece la reducción del uso de leña en el país, el objetivo es promocionar el incremento del uso de estufas ahorradoras y así disminuir el uso de leña en industrias, fomentar el uso de plantaciones o bosques energéticos para fines industriales y sustituir el uso de leña por otras fuentes energéticas en los hogares (MEM, 2019).

La proyección del consumo total de leña implementando las estufas ahorradoras, indica que en el año 2032 habrá una reducción de 15,766,996 toneladas de leña (MEM, 2019).

Por otra parte, Guatemala es el principal productor de azúcar en Centroamérica, los ingenios reutilizan el bagazo de caña para la producción de energía eléctrica. Actualmente, existe una capacidad instalada de 985 MW, de los cuales 650 MW se entregan directamente al Sistema Nacional Interconectado. La producción de energía es de aproximadamente 1,800 GWH anuales, lo que representa el 15 %, siendo el tercero después de las hidroeléctricas, con 33 %, y del carbón, con 30 % del total. Los productores de electricidad más importantes son los ingenios Magdalena, Pantaleón, La Unión, Santa Ana, Madre Tierra, Concepción, Tululá y Palo Gordo (Muñoz, 2014).

La generación eléctrica a partir de biomasa de bagazo de caña representa uno de los recursos de mayor

importancia en la matriz energética de Guatemala, principalmente por su bajo costo variable, el cual compite con el de las generadoras hidroeléctricas. Además, tiene la ventaja de no producir emisiones de carbono, ya que libera al ambiente exactamente la misma cantidad que ha sido fijada por el proceso de fotosíntesis durante el crecimiento del cultivo de la caña de azúcar, lo que la hace amigable ambientalmente. Por otra parte, tiene el inconveniente de que el residuo solamente está disponible durante el periodo de cosecha de la caña de azúcar (período de zafra) (Muñoz, 2014).

En el año 2013, las hidroeléctricas cubrieron el 48.6 % de la demanda del país, el segundo mayor aporte corresponde al sector de más rápido crecimiento en los últimos años, las plantas generadoras a base de carbón mineral; luego están los ingenios con un 15.9 % de participación y los generadores con bunker con un 13.2 %, el resto corresponde a otras tecnologías menos influyentes (Muñoz, 2014).

Por otra parte, el biogás, como fuente de energía renovable, ha despertado un gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil implementación, sobre todo en sectores rurales. Su potencial desarrollo, no solo considerando la producción de biogás, sino que como ayuda a la obtención de biofertilizante y tratamiento de problemas sanitarios en algunos casos, hacen que su replicabilidad y difusión en los sectores con abundancia de materia orgánica de desecho sea atractivo (FAO, 2011).

En Guatemala existen varios proyectos generadores de biogás, en el 2014 la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) aprobó el Proyecto de Biogás del Vertedero El Trébol que, según la resolución 29-2014, generará 4.8 megavatios (MW).

## **BIOCOMBUSTIBLES**

Los biocombustibles se caracterizan por utilizar la biomasa como una fuente de energía renovable, con la finalidad de generar energía para los motores, el

cual puede ser utilizado en un nivel de pureza o diluido con otro combustible fósil. El biocombustible se clasifica según el tipo de producción y uso, entre ellos se encuentran: Etanol, Biodiesel y Biogás.

Etanol: las principales aplicaciones del etanol son para uso como carburante, uso para bebidas alcohólicas e industrial, por mencionar los usos más comunes. El etanol proviene de un proceso biológico (fermentación) o petroquímico (destilación). Para la producción del etanol carburante se utilizan los dos procesos mencionados anteriormente, pero se agrega a ellos la deshidratación, donde se elimina el agua para obtener un grado más puro de etanol. (González, 2017). La materia prima utilizada son los almidones (trigo, papa, yuca, maíz), azúcares (remolacha, caña) y celulosas (residuos forestales, segunda generación).

En Guatemala, el decreto 17-85 regula que la gasolina debe mezclarse con un mínimo de 5 % de alcohol, se denomina como “Ley de Alcohol Carburante Guatemala”. El objetivo de dicha ley es diversificar la matriz energética y generar la producción de etanol en los abastecimientos de productos agrícolas. Sin embargo, esto no se aplica por inconsistencias dentro de la ley.

Las plantas de producción de etanol en Guatemala se encuentran ubicadas en el Sur del país, siendo este el más propicio durante la época de zafra y por las condiciones climáticas típicas de esa región, ver figura 5. En Guatemala en el año 2020 se implementó un plan piloto denominado “Ecopower, el cual está a cargo el Ministerio de Energía y Minas, en conjunto con la Universidad del Valle de Guatemala, Banco Interamericano de Desarrollo de Guatemala, la asociación de Combustibles Renovables y la Municipalidad de Guatemala. Este proyecto tiene como propósito evaluar las emisiones y rendimientos de 34 vehículos automotores de la ciudad capital, al usar un combustible mezclado al 5 % (E5) con etanol.

Los resultados obtenidos del plan piloto demostra-

ron que se reducen los gases de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> hasta un 13 % y un 65 % del monóxido de carbono CO, en comparación de los combustibles fósiles sin alguna cantidad de etanol.

Mapa 6: Ubicación de las plantas de producción de etanol en Guatemala

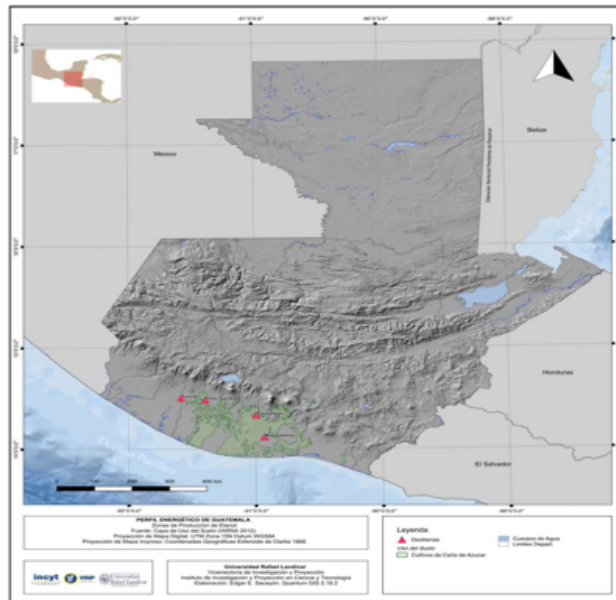


Figura 5. Mapa de Guatemala con la ubicación de las plantas productoras de Etanol.

Fuente: Perfil Energético de Guatemala, Ministerio de Energía y Minas, (2018, p. 101).

**Biodiesel:** es un combustible líquido, el cual se obtiene de los aceites vegetales, grasas de animales, procesos industriales de esterificación y transesterificación, el cual puede ser aplicado total o parcialmente con el diésel fósil. Los aceites vegetales están compuestos por un 90-98 % de triglicéridos, que se transforman en biodiesel a través de los procesos mencionados.

En Guatemala no se cuenta con una producción significativa de biodiesel, ya que a escala industrial no existe industria que lo fabrique, debido a los precios altos de producción. Este no sería competitivo con el diésel, en relación con el costo de venta, por lo que no es rentable. Únicamente se cuenta con dos empresas que fabrican biodiesel a partir del aceite reciclado.

Las microalgas también se han propuesto como

materia prima para la producción del aceite vegetal y biodiesel. Un reciente estudio de la Universidad Galileo de Guatemala, evalúa especies de microalgas encontradas en el lago de Amatitlán para producir biodiesel (Diaz, 2011).

**Biogás:** este gas es usado como un biocombustible gaseoso, producido por una descomposición de la materia orgánica, generado por la digestión anaerobia de los desechos orgánicos que provienen de residuos de estiércol animal y rellenos sanitarios. El indicador que se utiliza para evaluar la capacidad potencial de este biocombustible es que en Guatemala se producen alrededor de 8 millones de toneladas métricas de desechos sólidos anualmente. La ciudad de Guatemala produce el 72 %, con lo que potencialmente podría producir 4 MW; el basurero de Villa Nueva recibe un estimado de 300 toneladas métricas al día, con lo que podrían producir 1 MW de energía eléctrica. (Koberle y Rivers, 2012).

Las plantas industriales de producción de energía a partir de biogás son muy escasas en Guatemala, por lo que éste es un campo abierto a la exploración y la investigación.

## CONCLUSIONES

El gran potencial geotérmico de Guatemala, aunado con cambios en el marco normativo, así como el decidido apoyo de sectores inversionistas y de la investigación, pueden incidir de forma significativa en la diversificación de la matriz energética a partir de aprovechamientos de energía renovable.

La energía biomásica, es aquella que se obtiene del aprovechamiento de la materia orgánica formada previamente en algún proceso biológico o mecánico. En Guatemala, la principal fuente es la leña, por lo que el Plan Nacional de Energía contempla una estrategia de disminución del consumo de leña para el año 2032, con base en el uso de estufas ahorradoras, estimando una reducción de 15,766,996 Toneladas de leña.

La segunda forma de energía biomásica es la co-generación a través de la industria azucarera, esta presenta el inconveniente que únicamente funciona en tiempos de zafra. Por último, se encuentra la producción de biogás la cual se ha incrementado en los últimos años, pero apenas contribuye con menos del 0.1 % del total de la matriz energética, aunque tiene un potencial importante para su desarrollo.

En Guatemala existe una producción significativa de etanol que cumple con la demanda del país, si existiera un régimen que impulsara la utilización de por lo menos el 5 % de etanol en todos los combustibles fósiles que se consumen, se aprovecharía producción que se genera en el país de 250 millones de litros al año.

Los biocombustibles son una alternativa en Guatemala que puede ser potencializada, si se implementaran políticas legales, del uso de estos. Tal es el caso del biodiesel cuya producción es más cara que la importación del diesel, por lo que al tener una mayor demanda del biodiésel los precios de producción pueden disminuir y convertirse en un biocombustible más rentable.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANGUAT y URL, IARNA (Banco de Guatemala y Universidad Rafael Landívar, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. (2009). *Cuenta Integrada de Energía y Emisiones. Bases teóricas, conceptuales y metodológicas (CIEE)*. Guatemala, serie divulgativa No. 6, 22 p.
- Chen, S., Zhang, Q., Andrews-Speed, P., & Mclellan, B. (2020). *Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: A review. Journal of Environmental Management*, 276, 111-287. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111287
- CEPAL. (2008). *La Energía y las Metas del Milenio en Guatemala, Honduras y Nicaragua*. UN.LC/MEX/L.843/Rev.1 21 de febrero de 2008.
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. (2017). Resolución CNEE-125-2017.
- Dalla, F., Nogueira, L., Limberger, J., van Wes, J., & van der Zwaan, B. (2020). *Scenarios for geothermal energy deployment in Europe*. In *Energy*, Volume 206, 2020, 118060. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060>.
- Díaz, J. (2011). *Evaluación de Pre-factibilidad técnico-económica de las potencialidades energéticas de las microalgas que contaminan el lago Amatitlán para la obtención de Biodiesel. Proyecto Fodecyt, 049-2009*, Universidad Galileo, Guatemala.
- Dirección de productos forestales, FAO, (1996), *Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa*, Montevideo, Uruguay: Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- Gonzalez, M. (2019). *Energía Geotérmica: estado del arte de la tecnología de generación eléctrica a partir de la geotermia*. Argentina: secretaria de energías renovables y eficiencia energética.
- INAB-FAO. (2004). *Tendencias y Perspectivas del Sector Forestal en América Latina*, Informe Nacional Guatemala, Roma, Italia. 66 p.
- IRENA. (2019). *Costos de generación de energía renovable en 2019: conclusiones principales*: Recuperado de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Costs\\_2019\\_ES.PDF?la=en&hash=A74F5A6BA01D-86C175702B4F27C7086AF5D23F99](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Costs_2019_ES.PDF?la=en&hash=A74F5A6BA01D-86C175702B4F27C7086AF5D23F99)
- Koberle, A. y Rivers, I. (2012). *An Alternative Power Development Plan for Guatemala*. Berkeley California.
- MEM. (2019). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: Dirección General de Energía – Ministerio de Energías y Minas.
- MEM. (2018). *Energía Geotérmica*. Guatemala: Dirección General de Energía – Ministerio de Energías y Minas.
- MEM. (s.f). *Recursos Geotérmicos de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Energías y Minas.



Muñoz Solares, M. (2014). *Desarrollo de la Cogeneración en Guatemala*. Memoria Anual de resultados 13-14 Cengicaña.

Wang, Y., Liu, Y., Dou, J., Li, M., & Zeng, M. (2020). *Geothermal energy in China: Status, challenges, and policy recommendations*. *Utilities Policy*, 64, 101020. doi:10.1016/j.jup.2020.101020

### **INFORMACIÓN DE LOS AUTORES**

Ingeniero Civil, Jeffrey Estuardo Argueta Gálvez, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015.

Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, 2016.

Afiliación laboral: Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Administración.

Ingeniero Agrónomo, Wagner Alonzo, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

Maestro en Producción y Uso de Plantas Medicinales, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2018.

Afiliación laboral: Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Chimaltenango (CUNDECH).

Ingeniero Agrónomo, Sergio Dionisio, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.

Maestro en Desarrollo Rural Sostenible por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (Sede Académica Guatemala).

Afiliación laboral: Especialista en Paisajes Sostenible y Clima, RA.



# ÁREA DE GESTIÓN Y SERVICIOS



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
DE MANTENIMIENTO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN  
INDUSTRIAL**



## DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA LAMINADA PARA EMPAQUE PRIMARIO DE JABONES EN BARRA COMO ESTRATEGIA DE INNOVACIÓN

*Development of a laminated structure to be used as primary packaging for soap bars as an innovation strategy*

**Jenyffer Michelle Cardona Abrego**

Mtra. en Gestión Industrial  
Jmichelle.ca@gmail.com

**Otto Rodrigo Lantan Reynosa**

Mtro. en Administración Corporativa  
orlantan@gmail.com

Recibido: 23 de septiembre de 2020. | Revisado: 17 de febrero de 2021. | Aceptado: 16 de junio de 2021.

### RESUMEN

El estudio se realiza con el fin de determinar la mejora en la productividad, en la línea de empaque de una planta de jabones en barra, al desarrollar una estructura alternativa para empaque primario como una estrategia de innovación. Se realiza una evaluación de la estructura laminada que se utiliza en el empaque primario, se determinan sus componentes, propiedades mecánicas, costo y rendimiento. Se costea y analiza la estructura alternativa, comparándola con la estructura original. Y se determina cómo impacta el rendimiento y las propiedades mecánicas con el cambio de estructura.

El resultado que se obtiene es el incremento en un 4 % de la productividad en la línea de empaque de la planta de jabones en barra, al desarrollar la estructura alternativa.

### ABSTRACT

*The purpose of the study was to determine the improvement in the productivity, in the packaging line of a soap bar plant, by developing an alternative structure for the primary packaging, as an innovation alternative. An evaluation of the laminated structure used in the primary packaging, its components, mechanical properties, cost and performance was carried out. A comparison of the original and the alternative structure was performed. It was determined how performance and mechanical properties were affected by the change of the structure.*

*A 4 % increase in productivity, in the packaging line of the soap bar plant, was obtained with the development of the alternative structure.*

### PALABRAS CLAVE

Productividad, innovación, empaque, polipropileno, película.

### KEYWORDS

*Productivity, innovation, packaging, polypropylene, film.*

## INTRODUCCIÓN

En la planta de jabones en barra en la que se realiza el estudio, se utiliza como empaque primario una estructura compuesta por dos películas de polipropileno biorientado transparente de 20 $\mu$  cada una. Con este empaque la planta tiene capacidad para empacar 135 unidades por minuto.

Es de importancia realizar un análisis de la estructura para identificar el aumento en la productividad del proceso de empaque de jabones en barra, al desarrollar una alternativa innovadora para el empaque primario, sustituyendo en la estructura original una película de polipropileno biorientado por polipropileno cast. De acuerdo con Sancho (2007), innovar significa introducir mejoras en lo ya conocido o producir algo totalmente nuevo.

## DESARROLLO DEL ESTUDIO

El estudio se realiza con base en distintas mediciones en el laboratorio, previas y posteriores al cambio de la estructura del empaque primario para jabones en barra, como estrategia para identificar diferencias.

El enfoque es cuantitativo ya que se realizan mediciones sobre las variables tanto de la estructura original, como en la propuesta. De acuerdo a Monje (2011) lo importante en estos estudios es la cuantificación y la medición para la construcción de teorías.

Las variables, según Barrantes (2002), como cualquier característica cuya magnitud puede variar en individuos u objetos, son cuantitativas; se miden en este estudio productividad, espesor de material, fuerza de adhesión, coeficiente de fricción, resistencia a la tensión, costo, rendimiento y elongación.

La estadística estudia los métodos para analizar datos, sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables (Spiegel, 1991). El estudio utiliza como herramienta de análisis la estadística descriptiva; de acuerdo con Moya y Robles (2010), para recopilar la información de manera sintetizada, presentar y caracterizar apropiadamente el conjunto de datos.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados más relevantes de la investigación se presentan iniciando con la ilustración de la estructura original de empaque.

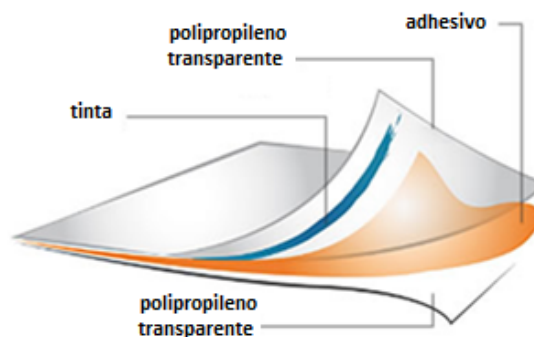


Figura 1. Estructura original del empaque

Fuente: Laminaciones técnicas para empaques – Lamitec.com

Tabla 1.

*Fuerza Bond estructura BOPP + BOPP*

	<b>Fuerza bond (Kgf)</b>
1	491.81
2	312.03
3	408.65
4	503.51
5	572.39
6	660.01
7	566.45
8	593.58
9	571.55
10	540.63

Fuente: elaboración propia.

En las muestras de estructura de BOPP + CPP, no es posible delaminar para realizar el ensayo, por las propiedades de adhesión que le proporciona el CPP.

Tabla 2.  
*Coefficiente cinético de fricción estructura BOPP + BOPP*

Muestra	COF interno	COF externo
1	0.278	0.3288
2	0.2558	0.2568
3	0.2682	0.2442
4	0.1663	0.3053
5	0.3102	0.3085

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.  
*Costo de estructuras.*

Costo Estructura	
Estructura	Q/Kg
BOPP+BOPP	36.9
BOPP+CPP	36.1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.  
*Coefficiente de fricción cinético estructura BOPP + CPP*

Muestra	COF interno	COF externo
1	0.3215	0.1336
2	0.2453	0.1867
3	0.2693	0.1619
4	0.2094	0.1047
5	0.2291	0.1319

Tabla 5.  
*Resistencia a la tensión de estructuras*

Muestra	Unidades	BOPP+BOPP	BOPP+CPP
Tensión CD	PSI	29325.25	20059
Tensión MD	PSI	15200	7450.5

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6 .  
*Rendimiento estructuras*

Estructura	Rend
BOPP+BOPP	36.9
BOPP+CPP	36.1

Fuente: elaboración propia.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los ensayos para determinar la fuerza de bond se obtiene para la estructura de BOPP + BOPP una fuerza promedio de 522.06 kgf. La fuerza máxima es 660.01kgf y la mínima 312.03kgf. La estructura BOPP + CPP no logra delaminarse. Se atribuye este

resultado a una de las características que posee el CPP que es la excelente fuerza de sello.

Los resultados para el coeficiente de fricción cinético en la estructura de BOPP + BOPP en la capa externa es de 0.28 mientras que en la capa interna 0.26. Por otra parte, en la estructura de BOPP + CPP tiene un coeficiente cinético externo de 0.25 y un coeficiente interno de 0.14.

Los resultados de la segunda estructura permiten un mejor desempeño de la película durante el proceso de empaque de jabón y como consecuencia, permiten mejorar la productividad.

Según muestran los resultados obtenidos para el costo y rendimiento, aunque el rendimiento para la estructura propuesta es menor, el ahorro que se obtiene en el costo por kilogramo, permite que el costo por unidad se mantenga por debajo del que corresponde a la estructura original.

Aunque la resistencia a la tensión es superior en la estructura original, la diferencia no resulta ser crítica, ya que ambas estructuras tienen comportamiento estable durante el proceso de empaque a la velocidad normal.

Como producto de la realización del estudio, la empresa visualiza la importancia de innovar en los procesos industriales que constituyen la base de la producción.

## CONCLUSIONES

1. Se determina que la estructura utilizada para empaque primario de jabones en barra, se compone por dos sustratos de polipropileno transparente de 20 $\mu$  cada uno, más adhesivo y tinta representando 4 $\mu$ ; resultando una estructura de 44 $\mu$ .
2. Se establece que el costo de la estructura alternativa propuesta de BOPP + CPP es de Q 36.1 por kilogramo, con un ahorro respecto de la estructura original de Q0.80 por kilogramo. El costo por unidad de empaque que se obtiene es de Q0.072 que representa un ahorro de 2.17% en material de empaque.

3. Se determina que el impacto sobre el rendimiento del material al desarrollar la estructura con CPP es de 1 % a favor de la estructura original. En cuanto a las propiedades mecánicas, las diferencias en los resultados obtenidos, no impactan la maquinabilidad del material propuesto. Se atribuye el buen desempeño de la película al coeficiente de fricción que presenta una mejora notable en la estructura propuesta.
4. Al desarrollar una estructura alternativa, se evidencia una mejora en la productividad del 4 %. El número de unidades empacadas aumenta de 135 a 142 paquetes por minuto.

### RECOMENDACIONES

1. Continuar desarrollando estructuras para maximizar el rendimiento del material de empaque y que posean propiedades mecánicas apropiadas que le permitan un buen desempeño.
2. Considerar para futuros desarrollos de empaques primarios, no sólo estructuras bilaminadas, sino también monocapas; que pueden repercutir positivamente en el rendimiento del material.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrantes R. (2002). *Investigación: un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Monje, C. (2011). *Metodología de la Investigación Cuantitativa y Cualitativa Guía Didáctica* Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
- Moya, M., y Robles, N. (2010). *Probabilidad y estadística. Un enfoque teórico y práctico*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Sancho, R. (2007) *Innovación Industrial. Revista Española de documentación científica*. (30), 553-564. Recuperado de <http://digital.csic.es>.
- Spiegel, M. (1991) *Estadística*. España: McGraw-Hill.

### INFORMACIÓN DEL AUTOR

Ingeniera Industrial, Jenyffer Michelle Cardona Abrego, graduada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), 2010.

Maestra en Artes en Gestión Industrial de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), 2019.

Afiliación laboral: Industria La Popular.



# MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA ESTANDARIZACIÓN EN LOS RANGOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA A SENSORES TERMOPARES EN UNA LÍNEA DE EXTRUSIÓN DE PET RECICLADO

*Preventive maintenance for the standarization of the temperature measurement ranges to thermocouple sensors sensors in a recycled pet extrusion line*

**Edgar Alexander Nova Esquivel**

Mtro. en Ingeniería de Mantenimiento  
edgaralexandernova@gmail.com

**Sandra Ninett Ramírez Flores**

Mtra. en Ingeniería de Mantenimiento  
sandraflo13@hotmail.com

Recibido: 21 de septiembre de 2020. | Revisado: 12 de febrero de 2021. | Aceptado: 11 de junio de 2021.

## RESUMEN

Con la finalidad de suplir la carencia de un sistema de gestión de las mediciones enfocado en el control y cuidado de los sensores termopares, se desarrolla un plan de mantenimiento preventivo.

La investigación se basa en seis fases esenciales: definición de los rangos de medición de temperatura, análisis de los puntos críticos en la medición, determinación de las variables que afectan el funcionamiento de los termopares, definición de la periodicidad de los trabajos de calibración, desarrollo del plan de mantenimiento preventivo y, evaluación y análisis de los datos obtenidos.

Los resultados muestran que el diseño y desarrollo del programa de mantenimiento preventivo es adecuado para la aplicación, ya que permite identificar que en tres posiciones críticas del proceso existen sensores termopares averiados, los cuales muestran lecturas erróneas en distintas etapas del procedimiento de extrusión.

## PALABRAS CLAVE

Mantenimiento preventivo, temperatura, termopar, calibración.

## ABSTRACT

*In order to provide for the lack of a measurement management system focused on the control of thermocouple sensors, the preventive maintenance plan is developed.*

*The research is based on six essential phases: definition of the temperature measurement ranges, analysis of the critical points in the measurement, determination of the variables that affect the operation of the thermocouples, definition of the periodicity of the calibration, development of the preventive maintenance plan and evaluation of the obtained data.*

*The results show that the preventive maintenance plan is adequate for the application, since it allows to identify that in three critical positions of the process there were faulty thermocouple sensors, which show erroneous readings at different stages of the extrusion process.*

## KEYWORDS

*Preventive maintenance, temperature, thermocouple, calibration.*

## INTRODUCCIÓN

La medición de temperatura se presenta en diversas aplicaciones industriales y existen diferentes tipos de equipos de medición para procesos. La investigación se enfoca en los sensores termopares, los trabajos de mantenimiento preventivo y calibraciones, tomando en cuenta la afirmación de que los termopares son instrumentos delicados debido a que están compuestos por la unión de dos metales puros o aleaciones que interactúan entre sí para proporcionar la lectura de la variable (Di Ciancia, 2016).

La importancia del plan de mantenimiento radica en que la variación de la temperatura en las diferentes zonas del proceso, define las propiedades mecánicas y físicas del producto terminado.

En la investigación se desarrolla un programa de calibración y mantenimiento preventivo a sensores termopares para cubrir la carencia de control en la medición de la variable de proceso temperatura, como lo indican Hilario y Salcedo (2016).

Las instalaciones de la empresa en la que se desarrolla la investigación se encuentran ubicadas en el municipio de Villa Nueva del departamento de Guatemala. El tiempo del estudio es de 6 meses, iniciando el mes de mayo de 2019 y finalizando en el mes de octubre de 2019.

## DESARROLLO DEL ESTUDIO

La investigación se desarrolla con un enfoque mixto. Cuantitativo al estudiar numéricamente los rangos permisibles de medición de la temperatura en el proceso y cualitativo, definiendo el estado de cada sensor termopar de acuerdo con la precisión en las lecturas que realizan.

La muestra se conforma por los diecisiete sensores termopares que se encuentran instalados en el proceso de extrusión, los cuales se dividen en: doce sensores ubicados en puntos del proceso en los cuales la precisión en la medición de la temperatura es importante para la homogeneidad de las propiedades físicas y mecánicas del producto

terminado, y siete sensores que se encuentran en puntos del proceso que se utilizan como mediciones referenciales.

La calibración de los instrumentos de medición se lleva a cabo mediante un procedimiento comparativo referencial utilizando las tablas de valores predeterminados para los sensores termopares tipo J, concordando con lo expuesto por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial-Inti (2015), en las cuales se define la lectura en mili voltios (mV) para cada valor de temperatura, los que se deben comparar con la lectura que presenta el sensor a la misma temperatura; además, se determina el rango de valores máximos y mínimos permisibles para cada posición, también se definen los puntos de medición críticos mediante el análisis del proceso.

Tomando en cuenta lo que indica Angosto (2016), con relación a que todo proceso que contenga medición de variables presenta errores en las lecturas, ya que ninguna medida es completamente exacta y presenta rangos permisibles en su funcionamiento, se desarrolla el plan de mantenimiento preventivo, generando los siguientes documentos: descripción detallada de los equipos instalados, referencias de medición para la calibración de sensores termopares tipo J, historial de eventos en los instrumentos de medición de la línea de extrusión, designación de responsabilidades para la ejecución y supervisión de las tareas, indicaciones recomendadas a realizar en conjunto con los trabajos de mantenimiento preventivo, registro de inspección previa a los sensores, registro de comparación de las medidas referenciales con las medidas reales, registro de calibración a los termopares, formato de orden de trabajo y formato de requisición de repuestos.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Al aplicar el plan de mantenimiento preventivo se determina la situación puntual e individual de cada sensor. El procedimiento de confirmación metrológica se muestra en la figura 1.

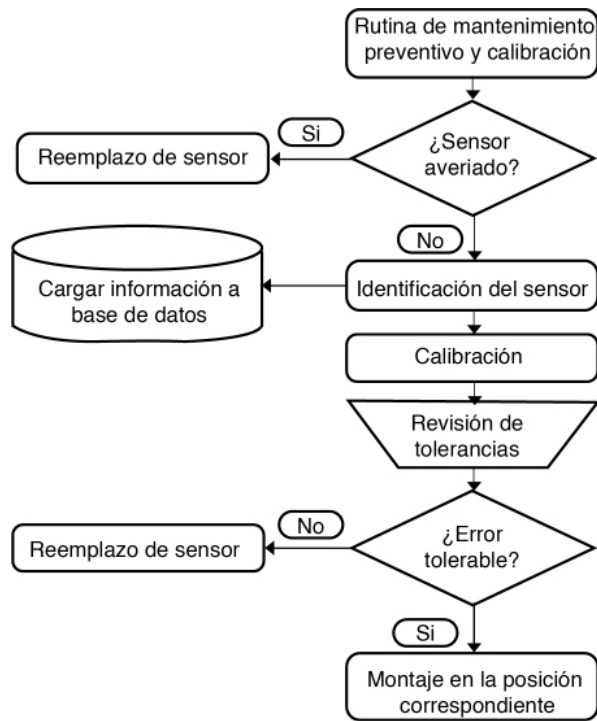


Figura 1. Procedimiento de confirmación metrológica.  
Fuente: elaboración propia.

Los resultados al calibrar los doce termopares definidos como críticos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.  
Estado de los sensores termopares instalados en posiciones críticas.

Número	Temperatura Esperada	Temperatura obtenida	Estado
1	180.0 °C	180.1 °C	Bueno
2	190.0 °C	193.4°C	Dañado
3	200.0 °C	200.8 °C	Bueno
4	250.0 °C	249.2 °C	Bueno
5	255.0 °C	254.4 °C	Bueno
6	265.0 °C	261.3°C	Dañado
7	270.0 °C	270.4°C	Bueno
8	270.0 °C	268.5°C	Bueno
9	270.0 °C	270.4 °C	Bueno
10	270.0 °C	271.0 °C	Bueno
11	270.0 °C	266.1°C	Dañado
12	145.0 °C	145.3 °C	Bueno

Fuente: elaboración propia.

La distribución del error en las mediciones de los doce sensores críticos del proceso de extrusión se muestra en la figura 2.

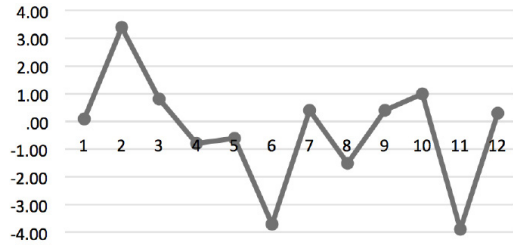


Figura 2. Error de la medición en °C.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 2 se muestran los resultados al reemplazar los sensores averiados identificados como 2, 6 y 11.

Tabla 2.  
Mediciones con sensores instalados.

Número	Temperatura Esperada	Temperatura obtenida	Estado
2			
6	190.0 °C	190.2 °C	Bueno
11	265.0 °C	264.9 °C	Bueno
	270.0 °C	270.1 °C	Bueno

Fuente: elaboración propia.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados permiten afirmar que la aplicación de la confirmación metrológica (figura 1) representa mejoras al proceso, debido a que permite identificar los sensores dañados que generan variaciones en las mediciones de temperatura en la fase productiva de extrusión. El rango permisible de medición se define en  $\pm 3$  °C para cada ubicación analizada. Las calibraciones a los doce termopares ubicados en las posiciones críticas del proceso, permiten determinar que los sensores 2, 6 y 11 (figura 2), muestran lecturas erróneas y fuera del rango de temperatura permisible para la aplicación (tabla 1). El resto de los termopares muestra variaciones que se mantienen dentro del rango de error permitido, lo que indica que no representan riesgo para el proceso de extrusión.

Los sensores averiados se reemplazan para garantizar la estandarización de los rangos de medición de la temperatura. Al realizar el cambio de los sensores las lecturas se establecen dentro de los

rangos definidos de medición (tabla 2). Se define que la periodicidad correcta para la calibración de los termopares es de 6,000 horas para los que se encuentran en puntos críticos y de 12,000 horas de trabajo para los que están en posiciones de medición referenciales.

Se confirma que carecer de un plan de control sobre los equipos de medición de variables genera un proceso no confiable que impide garantizar que las características de fabricación cumplan con los lineamientos que requiere el control de calidad, de acuerdo con Ortiz y Reina (2016).

### CONCLUSIONES

1. Se determina que el rango permisible de medición para los sensores termopares, es de  $\pm 3$  °C.
2. Se define que la periodicidad correcta para la calibración de los termopares es de 6,000 horas para los que se encuentran en puntos críticos y de 12,000 horas de trabajo para los que están en posiciones de medición referenciales.
3. Los sensores termopares reemplazados por lecturas incorrectas presentan error en las mediciones de 3.4, 3.7 y 3.9 °C, respectivamente.

### RECOMENDACIONES

1. Es importante inspeccionar de forma constante los termopares para garantizar que se estén utilizando en el correcto rango de temperatura y evitar riesgo de mediciones erróneas por mal dimensionamiento.
2. Para asegurar el buen funcionamiento del termopar, el personal técnico designado debe respetar la periodicidad establecida para los trabajos de mantenimiento y calibración.
3. Se recomienda al jefe del departamento de Mantenimiento que garantice la existencia de los repuestos para recambio de sensores para realizar el reemplazo de termopares averiados, sin pérdidas significativas de tiempo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angosto, D. (2016). *Desarrollo de procedimientos de calibración para instrumentación industrial*. Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Recuperado en: <https://repositorio.upct.es/xmlui/handle/10317/6622>
- Di Ciancia, G. (2016). *Solución a problemas frecuentes en mediciones con termocuplas*. AADECA, 1(3), 44-46. Recuperado en: [https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa3\\_svs\\_consultores\\_termocuplas.pdf](https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa3_svs_consultores_termocuplas.pdf)
- Hilario, A. y Salcedo, J. (2013). *Calibración de equipos de medida*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de [http://personales.upv.es/ahilario/LaTeX/pdf/tarea\\_final\\_A4-edoc.pdf](http://personales.upv.es/ahilario/LaTeX/pdf/tarea_final_A4-edoc.pdf)
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial -INTI. (2015). *Calibración de termocuplas por comparación*. Mendoza, Argentina: INTI, Física y Metrología. Recuperado en: <https://www.inti.gov.ar/publicaciones/descargac/443>
- Ortiz, J. y Reina, H. (2016). *Propuesta para estandarización del proceso de calibración de sensores de temperatura por contacto directo para la empresa COASPHARMA, S.A.S.* (Tesis de Licenciatura, Instituto Técnico Central Superior, Bogotá, Colombia). Recuperada de: <https://repositorio.itc.edu.co/handle/001/131>.

### INFORMACIÓN DEL AUTOR

Ingeniero Mecánico Industrial, Edgar Alexander Nova Esquivel, egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019.  
Maestro en Artes en Ingeniería de Mantenimiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2020.

Afiliación laboral: Complast, S. A.

# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

---

La Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería publica trabajos de investigación en los diferentes campos de la ingeniería y áreas afines, originales e inéditos. Se ha ampliado el campo de difusión para estudios de las Ciencias Naturales, Tecnología, Ciencias de la Salud, Desarrollo Social y Ciencias Sociales y Humanísticas. Los artículos enviados para su publicación deberán cumplir con los lineamientos establecidos. Al ser aceptados por el Consejo Editorial, son sometidos a un proceso de revisión y arbitraje por pares externos en la modalidad de doble ciego. Lo que ofrece al lector y autores un alto nivel académico.

## RESUMEN

Extensión máxima de 150 palabras, se sugiere utilizar para ello el contador de palabras disponible en Word. Describir el problema que originó la investigación, la solución ensayada, método y materiales de trabajo. Describir los principales resultados obtenidos, así como sus impactos a nivel técnico, económico, social, ambiental u otros.

## ABSTRACT

Traducir al idioma inglés, el resumen redactado en la columna de la izquierda de la página.

La traducción debe ser revisada con un profesional con amplios conocimientos del idioma inglés, en caso de que el autor no los posea. Evitar la utilización del traductor de google u otra similar.

## PALABRAS CLAVE

Cinco palabras que servirán para identificar el estudio realizado.

## KEYWORDS

Traducción al idioma inglés de las palabras clave.

## INTRODUCCIÓN

Brindar un panorama general del tema estudiado, su importancia, aspectos relevantes para comprender el contexto en el cual se desarrolló el estudio, bases teóricas o perspectivas adoptadas y otros referentes que sustenten la investigación. 150 palabras.

Esta sección es muy importante para que el lector se entere de las técnicas de investigación aplicadas y las actividades que se realizaron. Por ejemplo: el tipo de estudio, su alcance y diseño, variables estudiadas y forma de evaluarlas. Básicamente, se debe describir la forma en la que se realizó el estudio, por lo que se incluye el método y los materiales

Además, describir si se realizaron visitas de campo, encuestas, mediciones, ensayos de laboratorio, análisis de bases de datos u otros.

Es mejor escribir en párrafos cortos.

Agregar citas bibliográficas acorde a normas APA sexta edición.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Esta es una sección muy importante, donde deben incluirse los resultados derivados del estudio.

Los subtítulos deben diferenciarse del encabezado de la sección.

En el caso de inclusión de figuras, deben ser nítidas, legibles. Se denomina figuras a gráficas, esquemas, fotografías u otros elementos gráficos.

Es conveniente describir brevemente el contenido de una tabla, evitando los aspectos obvios.

En el caso de inclusión de fórmulas, éstas deben elaborarse utilizando el editor de ecuaciones dis-

ponible en Word, indicando el significado de cada una de las variables o parámetros que se incluyen. Deben enumerarse entre paréntesis para poder hacer referencia de estas.

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Esta sección debe contener el análisis e interpretación de los resultados presentados, en cuanto a parámetros técnicos, valores de referencia, avances en la solución del problema que se buscaba resolver.

También debe orientarse la discusión a mostrar evidencia de los conocimientos generados, aportes, logro de los objetivos y si da el caso, posible relación con hipótesis formuladas o líneas de investigación posterior.

### **CONCLUSIONES**

Deben derivar de los resultados presentados en el artículo, mostrando clara evidencia del logro de los objetivos propuestos para el estudio. Deben ser claras y precisas. Enumerarlas sin dejar espacio entre ellas.

### **RECOMENDACIONES**

Indicar a quién o a quiénes van dirigidas, deben derivar del estudio realizado.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Citar con Normas APA y orden alfabético. Mínimo 5 referencias y máximo 7.

### **INFORMACIÓN DEL AUTOR**

Grado académico a nivel de licenciatura, nombre completo, Facultad de la que egresó, Universidad dónde estudió, año en que se graduó.

Grado académico de Maestría o Doctorado (si lo posee). Lugar de trabajo.

### **ASPECTOS DE ESTILO**

Título centrado a 16 pts en Arial con negrilla, con un máximo de 20 palabras.

Traducción del título al idioma inglés, times new

roman a 10 pts en cursiva, centrado.

Nombre completo de los autores.

Correo electrónico de los autores.

Márgen superior: 2.7 cm

Márgen inferior: 2.5 cm

Márgen izquierdo: 1 cm

Márgen derecho: 2 cm

Interlineado sencillo, texto justificado, utilizar el formato disponible

Extensión máxima de 4 páginas para tesis o trabajos de graduación de maestría, 6 páginas para ensayos, 8-10 para tesis de doctorado y otros estudios.

Redactar en tiempo verbal presente.

### **SOBRE EL ENVÍO DE ARTÍCULOS**

Enviar por la vía del correo electrónico (revista-postgrado@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt) el artículo en formato Word y en formato pdf. Tablas aparte y enumeradas, imágenes en formato jpg aparte y enumeradas, con una resolución de 300 dpi.

### **SOBRE LA REVISIÓN DE ARTÍCULOS**

Los autores recibirán dictamen de la evaluación realizada y dispondrán de un máximo de 4 semanas para realizar las correcciones, en caso de que sean requeridas.

Al aprobar un artículo para su publicación, los autores envían firmada una carta en la que se responsabiliza por la originalidad del documento y cede sus derechos de publicación a la revista.





**(+502) 2418 -9142**



**(+502) 5876-6989**



**Edificio S-11, Primer Nivel,  
Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala.**



**<https://postgrado.ingenieria.usac.edu.gt/>**



**informacion\_eep@ing.usac.edu.gt**



**/fiusaceep**



**@eep\_fiusac**



**ISSN 2518-4725.**