

Volumen I, Número 3 — Julio — Septiembre - 2017

ISSN 2523-6784

Revista de Innovación Sistemática

ECORFAN®



ECORFAN-Taiwán

Indización

- RESEARCH GATE
- GOOGLE SCHOLAR
- HISPANA
- MENDELEY

ECORFAN-Taiwán

Directorio Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

Director Regional

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD.

Director de la Revista

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC.

Edición Tipográfica

TREJO-RAMOS, Iván. BsC.

Edición de Logística

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC.

Revista de Innovación Sistemática, Volumen 1, Número 3, de Julio a Septiembre 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, ZhongXin, Street 69. Postcode: 23445. WEB: www.ecorfan.org/taiwan, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María ISSN 2523-6784. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Septiembre 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

Consejo Editorial

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

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

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

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

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

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

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

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

Consejo Arbitral

VGPA. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIIG. PhD

Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC

Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD

Universidad Panamericana, México

CAF. PhD

Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC

Universidad Panamericana, México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Innovación Sistemática.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión de la Editora en Jefe.

Como primer artículo está *Validación estadística del instrumento virtual para desbalanceo dinámico en dos planos mediante un diseño de experimentos 2²* por HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo, SILVA-JUÁREZ, Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús y GALLARDO-NAVARRO, José Luis con adscripción en la Universidad Tecnológica de Puebla, como siguiente artículo está *Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación* por LÓPEZ-MOLINA, Fredy, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín con adscripción en la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec, como siguiente artículo está *Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo* por FLORES-RAMÍREZ, Oscar, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo con adscripción en la Universidad Politécnica de Amozoc, como siguiente artículo está *Procesamiento dactilar usando Transformada de Fourier* por HERNÁNDEZ-EPIGMENTIO, Miguel Ángel, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma con adscripción en la Universidad Autónoma del Estado de México, como siguiente artículo está *Monitoreo del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la máquina BOY 25D utilizando LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB6009* por LÓPEZ-CORELLA, José, HERNÁNDEZ-RUIZ, Sergio, VÁZQUEZ-CUEVAS, Ignacio y HERRERA-VELARDE, Maribel con adscripción en el Instituto Tecnológico de Nogales, como siguiente artículo está *Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidámico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono* por GARCÍA-NAVARRO, Norma, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto, con adscripción en la Universidad Veracruzana, como siguiente artículo está *Emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real* por GARCÍA-GUENDULAIN, Crescencio, PERALTA-SÁNCHEZ, Edgar, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán, con adscripción en la Universidad Politécnica de Altamira.

Contenido

Artículo	Página
Validación estadística del instrumento virtual para desbalanceo dinámico en dos planos mediante un diseño de experimentos 2² HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo, SILVA-JUÁREZ, Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús y GALLARDO-NAVARRO, José Luis	1-9
Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación LÓPEZ-MOLINA, Fredy, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín	10-25
Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo FLORES-RAMÍREZ, Oscar, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo	26-36
Procesamiento dactilar usando Transformada de Fourier HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Ángel, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma	37-46
Monitoreo del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la máquina BOY 25D utilizando LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB6009 LÓPEZ-CORELLA, José, HERNÁNDEZ-RUIZ, Sergio, VÁZQUEZ-CUEVAS, Ignacio y HERRERA-VELARDE, Maribel	47-53
Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono GARCÍA-NAVARRO, Norma, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto	54-63
Emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real GARCÍA-GUENDULAIN, Crescencio, PERALTA-SÁNCHEZ, Edgar, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán	64-72

Instrucciones para Autores

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Validación estadística del instrumento virtual para desbalanceo dinámico en dos planos mediante un diseño de experimentos 2²

HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo†, SILVA-JUÁREZ, Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús y GALLARDO-NAVARRO, José Luis

División de Mantenimiento Industrial, Universidad Tecnológica de Puebla

Recibido 3 de Julio, 2017; Aceptado 8 de Septiembre, 2017

Resumen

El mantenimiento predictivo busca que las tareas de mantenimiento industrial mejoren la calidad de los productos y/o servicios prestados. El análisis de vibraciones permite diagnosticar un gran porcentaje de fallas. Un cambio en la vibración básica de una máquina, siempre y cuando está funcionando en condiciones normales, será indicativo de que algún defecto incipiente se está dando en alguno de sus elementos, provocando un cambio en las condiciones de funcionamiento de la misma. Por ello, la Universidad Tecnológica de Puebla (UTP) desarrolló una aplicación virtual para el diagnóstico y corrección del desbalanceo mecánico de rotores rígidos en uno y dos planos valorando la severidad de acuerdo a la norma ISO 1940-1:2003. De acuerdo al Modelo de la aproximación de Taguchi, las desviaciones de calidad en las características de los servicios y productos desarrollados de acuerdo al estándar, se ven afectados por las tareas proactivas de mantenimiento. Para probar que no hay efectos significativos en la aplicación virtual para el balanceo mecánico de un rotor rígido, se lleva a cabo un diseño de experimentos (DOE) para validar estadísticamente el instrumento virtual diseñado en la UTP para el desbalanceo dinámico en rotores rígidos.

vibraciones, instrumento virtual, diseño de experimentos

Abstract

Predictive maintenance seeks to ensure that industrial maintenance tasks improve the quality of the products and / or services provided. The analysis of vibrations allows diagnosing a big average of failure. A change in the basic vibration of the machine, when it is operating under normal conditions, will be indicative that some defect is incipient is developing in some of its elements, causing a change in the operating conditions of the same. For this reason, the Universidad Tecnológica de Puebla (UTP) developed a virtual application for the diagnosis and correction of the mechanical imbalance of rigid rotors in one and two planes evaluating the severity according to ISO 1940-1: 2003. According to Taguchi's model of approximation, the quality deviations in the characteristics of the services and the products developed according to the standard are affected by the proactive maintenance tasks. To prove that there are not significant effects in the virtual application for the mechanical unbalance of a rigid rotor, a design of experimental (DOE) is performed to statistically validate the virtual instrument designed in the UTP for dynamic unbalance in fixed rotors.

Vibrations, virtual instrument, design of experiments

Citación: HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo, SILVA-JUÁREZ, Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús y GALLARDO-NAVARRO, José Luis. Validación estadística del instrumento virtual para desbalanceo dinámico en dos planos mediante un diseño de experimentos 2². Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:1-9

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La importancia del instrumento virtual para el diagnóstico y corrección del desbalanceo mecánico en rotores rígidos en uno y dos planos es que puede competir con los instrumentos de marcas reconocidas, ya que ha sido probado en diferentes empresas con sus propios instrumentos de medición de desbalanceo.

Un diseño de experimentos será aplicado a los resultados obtenidos por el instrumento virtual para el diagnóstico y corrección del desbalanceo mecánico de rotores rígidos en uno y dos planos valorando la severidad de acuerdo a la norma ISO 1940-1:2003, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Puebla (Silva J., Salazar P., Ponce, & Herrera S., 2016) para compararlos con los resultados de los instrumentos de las empresas. Este diseño experimental examina estadísticamente la eficacia del instrumento virtual para obtener un mayor apego a los requerimientos nominales y objetivos (Montgomery, 2004) de la norma ISO 1940-1:2003 por medio de un diseño de experimentos 2^2 , es decir, dos factores con dos niveles.

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración; reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias (Vera, 2000). Por otro lado, el establecimiento de parámetros de operación normales permiten diferenciar situaciones fuera del estándar, lo cual se logra mediante un análisis de vibraciones, una de las metodologías más certeras en el diagnóstico y monitoreo de equipos y elementos (Mora, 2013).

También, el mantenimiento predictivo es una secuencia lógica que detecta un problema, se estudia, se encuentra su causa, y finalmente se decide la posibilidad de corregirlo (Royo, Torres, & Rebanaque, 2000):

- Detección: Reconocimiento del problema.
- Análisis: Localización de la causa del problema.
- Corrección: Encontrar el momento y forma de solucionar el problema.

Por otra parte, entre los parámetros relevantes de vibraciones están: severidad de la vibración, espectros, situaciones de movimiento, velocidades pico, banda octava, desviaciones en las frecuencias, ángulos de fase, bandas amplias y estrechas, entre otras. Esto tiene como consecuencia, fallas no previstas en equipos rotatorios, se pueden clasificar en accidentes o pérdidas económicas, dada la necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento, diseño y fabricación, la detección de fallas en equipos es un factor fundamental para lograr este objetivo (Camacho, Palacios, Ramírez, Vera, & Anchondo, 2016).

El desbalanceo en un rotor es la combinación de desbalanceo estático y desbalanceo por par de fuerzas (vea figura 1). Para corregir el desbalanceo dinámico es necesario hacer mediciones de vibración mientras el rotor está trabajando y hacer correcciones en dos planos.

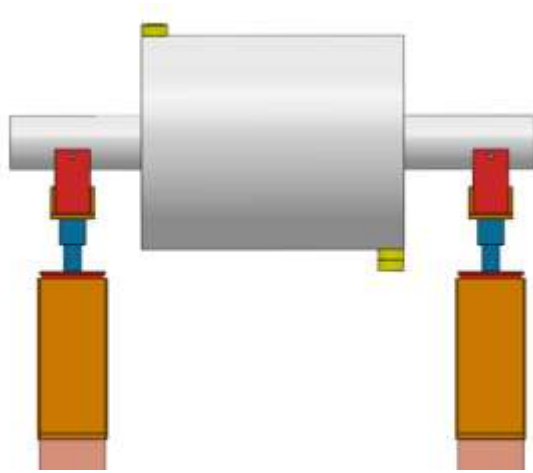


Figura 1 Desbalanceo en dos planos

Fuente. Silva J., A., Salazar P., M. A., Ponce, M. J., & Herrera S., G. (2016)

Este análisis, busca probar que estadísticamente el instrumento virtual en comparación con los instrumentos de las empresas involucradas, dan resultados similares para resolver el problema de vibraciones en su diagnóstico y corrección del desbalanceo mecánico en rotores rígidos en uno y dos planos. Para una maplia explicación de la operación del Instrumento Virtual UTP, ver el artículo “Instrumento virtual para diagnosticar y corregir desbalance de maquinaria rotativa” (Silva J., Salazar P., Ponce, & Herrera S., 2016).

El diseño de experimentos es esencialmente una estrategia para la planificación de experimentos de manera tal que las conclusiones relevantes sean alcanzadas en forma eficiente y económica (Napolitano, 2010). El objetivo de un diseño de experimentos es probar si al utilizar un tratamiento, en este caso el instrumento virtual, se produce una mejora o no.

Desarrollo

Instrumento virtual

El instrumento virtual desarrollado en la UTP (Silva J., Salazar P., Ponce, & Herrera S., 2016) utilizó un sistema de adquisición de datos y herramientas de LabVIEW con el objetivo de diagnosticar el desbalanceo mecánico en rotores rígidos, evaluar la severidad vibratoria mediante el análisis espectral y hacer el cálculo de los pesos de corrección.

Existen otros estudios para el balanceo de rotores rígidos como los desarrollados por García Reynoso et al (2008) y Estupiñan, San Martín y Canales (2006), estos instrumentos requieren ser válidos en campo. Después de validar el instrumento virtual de la UTP en campo, ahora se realizará un diseño de experimentos de dos factores para su validación estadística.

Metodología Diseño de experimentos factoriales

Los diseños de experimentos han permitido a las organizaciones de pasar de un estado estático a uno dinámico, el utilizar datos históricos es escuchar pasivamente al proceso, mientras que un experimento significa establecer una conversación dinámica con el proceso (Hunter, 1975). La experimentación hoy en día, es frecuentemente utilizada para resolver un problema o comprobar una idea.

El diseño de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente.

Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor, situaciones complejas de relación causa-efecto (Gutiérrez Pulido, 2012).

Cuando existen más de dos factores de interés en un experimento es conveniente utilizar un diseño factorial 2^k . Un experimento factorial de dos factores contempla sólo dos factores, que se pueden llamar A y B, cada uno con dos niveles. El modelo matemático lineal (Hines & Montgomery, 2002) para las observaciones de dos factores es un diseño completamente aleatorizado.

$$y_{i,j,k} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

Donde μ es el efecto de la media general, τ_i es el efecto del nivel i-ésimo del factor A, β_j es el efecto del nivel j-ésimo del factor B, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre A - B y ϵ_{ijk} , es una componente del error aleatorio.

La hipótesis nula H_0 busca probar que no hay ningún efecto significativo de los factores A y B y ninguna interacción significativa AB contra la hipótesis alterna H_1 cuando menos hay un efecto significativo en la media general μ . El diseño factorial de dos factores se muestra en la tabla 1.

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	y_{11n}	y_{12n}		y_{1bn}
	2	y_{21n}	y_{22n}		y_{2bn}
	⋮				
	a	y_{a1n}	y_{a2n}		y_{abn}

Tabla 1 Arreglo para un diseño factorial 2^2

Fuente: Hines & Montgomery (2002)

Análisis estadístico de un experimento de dos factores: el modelo de efectos fijos

Este análisis supone que los efectos A y B son fijos, es decir, los niveles a del factor A y los niveles b del factor B son elegidos en forma específica por el experimentador. El proceso para la prueba de hipótesis es mediante un análisis de varianza (ANOVA) como se muestra en la tabla 2.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_0
A	SS_A	$(a - 1)$	MSS_A	MSS_A / MSS_E
B	SS_B	$(b - 1)$	MSS_B	MSS_B / MSS_E
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MSS_{AB}	MSS_{AB} / MSS_E
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	MSS_E	
Total	SS_T	$abn - 1$		

Tabla 2 Tabla ANOVA

Fuente: Hines & Montgomery (2002)

Las fórmulas para diseño factorial general de dos factores:

Suma de cuadrados

$$SS_T = \sum \sum \sum y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2)$$

$$SS_A = \sum \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (3)$$

$$SS_B = \sum \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (4)$$

$$SS_{AB} = \sum \sum \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (5)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (6)$$

Medias de cuadrados

$$MSS_A = SS_A / (a - 1) \quad (7)$$

$$MSS_B = SS_B / (b - 1) \tag{8}$$

$$MSS_{AB} = SS_{AB} / (a - 1)(b - 1) \tag{9}$$

$$MSS_E = SS_E / ab(n - 1) \tag{10}$$

Las pruebas de hipótesis son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i \tag{11}$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_i \tag{12}$$

Las reglas de decisión para rechazar la

H_0

$$A: F_0 > F_{\alpha, (a-1), abn-1} \tag{13}$$

$$B: F_0 > F_{\alpha, (b-1), abn-1} \tag{14}$$

$$AB: F_0 > F_{\alpha, (a-1)(b-1), abn-1} \tag{15}$$

El desarrollo del experimento se llevó a cabo en tres empresas con su propio instrumento y el Instrumento Virtual (IV) de la UTP. Este análisis se realizó para el plano 1 y el plano 2 del rotor rígido, en magnitud de la onda de vibración y su ángulo en las etapas de diagnóstico (lectura inicial), corrección (lectura con peso y ángulo de prueba) y comprobación (lectura final) de acuerdo a la norma ISO 1940-1:2003.

Se llevó a cabo la recolección de las muestras aleatorias en campo, en la tabla 3, se observa las lecturas obtenidas en la empresa 1 y con el IV de la UTP.

Balanceador IRD Balancing 236				
Empresa: Embobinados Industriales y Montajes S.A. de C.V.				
	Plano 1		Plano 2	
	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
	(mils)	(grados)	(mils)	(grados)
Lectura inicial	0.153	236.56	0.149	88.596
	0.151	236.27	0.155	87.368
	0.160	237.84	0.153	87.959
	0.158	237.61	0.148	88.646
Lectura con peso y ángulo de prueba	0.196	186.53	0.160	220.63
	0.193	187.66	0.146	221.75
	0.191	186.09	0.157	222.05
	0.198	187.08	0.149	220.83
Lectura Final con pesos de corrección	0.030	45.963	0.009	187.630
	0.031	45.416	0.030	188.119
	0.040	46.258	0.008	187.734
	0.035	46.515	0.020	188.272
Aplicación Móvil <i>Measure Vibration UTP</i>				
	Plano 1		Plano 2	
	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
	(mils)	(grados)	(mils)	(grados)
Lectura inicial	0.154	236.560	0.149	84.576
	0.151	236.002	0.158	85.457
	0.158	236.254	0.153	84.278
	0.153	236.634	0.154	85.977
Lectura con peso y ángulo de prueba	0.195	186.53	0.161	228.63
	0.196	185.05	0.162	226.83
	0.200	185.42	0.151	228.84
	0.194	186.06	0.153	227.77
Lectura Final con pesos de corrección	0.038	45.963	0.010	184.630
	0.033	46.785	0.042	184.512
	0.031	45.124	0.037	185.211
	0.040	46.332	0.039	185.415

Tabla 3 Recolección de datos

Fuente: Elaboración propia con datos de Silva J., A., Salazar P., M. A., Ponce, M. J., & Herrera S., G. (2016)

Resultados

Se analizaron las mediciones en los dos planos en un rotor rígido. Los resultados obtenidos son de la siguiente forma:

- Plano 1 Magnitud Empresa 1 vs IV UTP
- Plano 1 Ángulo Empresa 1 vs IV UTP

- Plano 2 Magnitud Empresa 1 vs IV UTP
- Plano 2 Ángulo Empresa 1 vs IV UTP
- Plano 1 Magnitud Empresa 2 vs IV UTP
- Plano 1 Ángulo Empresa 2 vs IV UTP
- Plano 2 Magnitud Empresa 2 vs IV UTP
- Plano 2 Ángulo Empresa 2 vs IV UTP
- Plano 1 Magnitud Empresa 3 vs IV UTP
- Plano 1 Ángulo Empresa 3 vs IV UTP
- Plano 2 Magnitud Empresa 3 vs IV UTP
- Plano 2 Ángulo Empresa 3 vs IV UTP

Así, para los cálculos, mediante Minitab 17 diseño de experimentos factorial, en el plano 1 para la magnitud de la onda (milésimas) y su ángulo (grados), con los datos de la empresa 1 (E1) y las réplicas obtenidos con el IV UTP se exponen en tabla 4.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Media de cuadrados	F_0	Valor Crítico F
Instrumento	2.04E-06	1	2.04E-06	0.15077	4.414
Lecturas	0.1116021	2	0.055801	4120.69	3.554
Interacción	1.308E-06	2	6.54E-06	0.4830	3.554
Error	0.0000243	18	1.35E-05		
Total	0.1118609	23			

Tabla 4 Análisis de Varianza para Plano 1 – Magnitud, Empresa 1 - IV UTP

Fuente: *Elaboración propia*

De acuerdo a los resultados de la tabla ANOVA, no hay una diferencia significativa entre los instrumentos, por lo tanto, se acepta H_0 . Se acepta la H_1 en las lecturas, pues hay una diferencia significativa entre ellas.

En la interrelación entre instrumentos y lecturas no existe una diferencia significativa, se acepta H_0 .

Este procedimiento se aplica para las tres empresas y el IV UTP en los planos 1 y 2 para magnitud y ángulo. En la tabla 5 se expresan los resultados de las pruebas de hipótesis generales.

En la tabla 5, se observa que no hay diferencia significativa entre los instrumentos de las empresas y el IV UTP y su interrelación, se acepta H_0 . En las lecturas si s hay diferencias significativas, se acepta la H_1 . En general, el IV UTP no tiene diferencias significativas en su uso en comparación con otros instrumentos similares.

	Plano 1			Plano 2		
	Magnitud			Magnitud		
Empresa – UTP	Inst.	Lect.	I-L	Inst.	Lect.	I-L
E1_IDR B 236	H_0	H_1	H_0	H_0	H_0	H_0
E2_IDR B 236	H_0	H_1	H_0	H_0	H_1	H_0
E3_AX CMXA 80	H_0	H_1	H_0	H_0	H_1	H_0
	Ángulo			Ángulo		
	Inst.	Lect.	I-L	Inst.	Lect.	I-L
E1_IDR B 236	H_0	H_0	H_0	H_0	H_1	H_1
E2_IDR B 236	H_0	H_1	H_0	H_0	H_1	H_0
E3_AX CMXA 80	H_0	H_1	H_0	H_0	H_1	H_0

Tabla 5 Resumen de las pruebas de hipótesis

Fuente: *Elaboración propia*

Continuando con la validación estadística, se utiliza el método de Dunnet (Ruiz-Falcó, 2009) para comparar las medias de las mediciones del instrumento IV UTP como elemento de control con el E1_IRD Balancing 236 (gráfico 1) nos indica que no hay diferencia significativa entre los instrumentos, porque el valor cero está comprendido en el intervalo de confianza al 95%.

Esto se realiza para las tres empresas en plano 1 y 2, magnitud y ángulo contra el IV UTP.

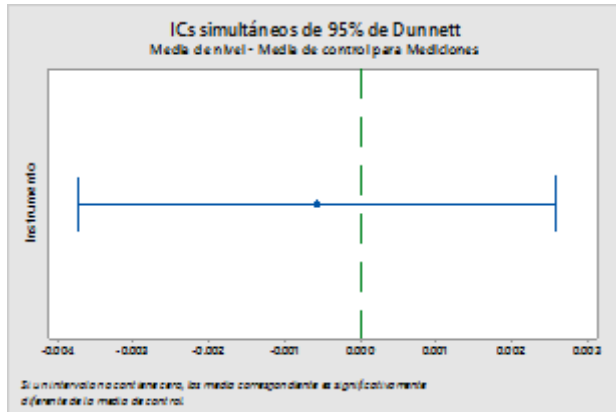


Gráfico 1 Intervalo de Confianza para comparar las medias de las mediciones de los instrumentos E1 - IV UTP

Fuente: Elaboración propia

Para la comprobación de la idoneidad del diseño de experimentos (Montgomery, 2004), iniciamos que los errores tienen media cero. Estas pruebas se realizan para los dos planos, magnitud y ángulo de las empresas y el IV UTP. En el gráfico 2 se muestra que efectivamente la media de los errores es cero para la E1 - IV UTP.

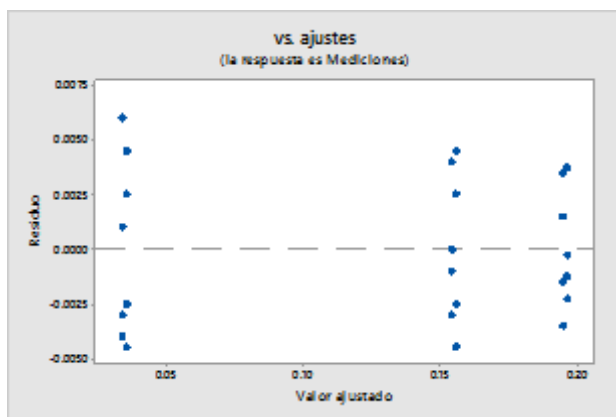


Gráfico 2 Errores con media cero E1-IV UTP, plano 1 magnitud

Fuente: Elaboración propia

Para la homogeneidad de varianzas se aplica la prueba de Bartlett (Correa, Iral, & Rojas, 2006), es decir, la varianza de los errores es constante. El gráfico 3 indica que no hay diferencia significativa entre las varianzas, ya que el valor p es mayor a 0.05.

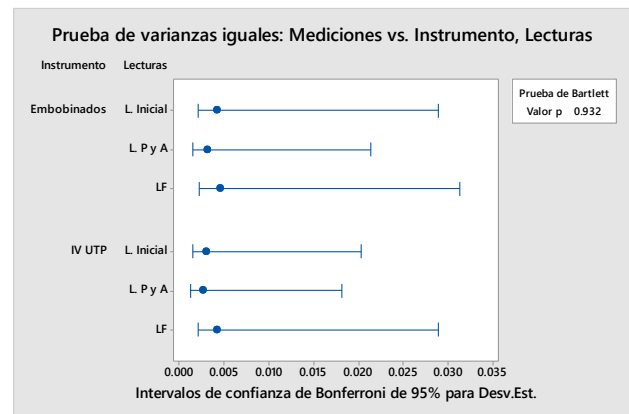


Gráfico 3 Prueba de Bartlett para E1 - IV UTP, plano 1 magnitud

Fuente: Elaboración propia

Para las muestras utilizadas en la prueba E1 - IV UTP plano 1 magnitud, el gráfico 4 revela que efectivamente son independientes y aleatorias (Mosquera, 2017). Esto asegura la validez de los resultados.

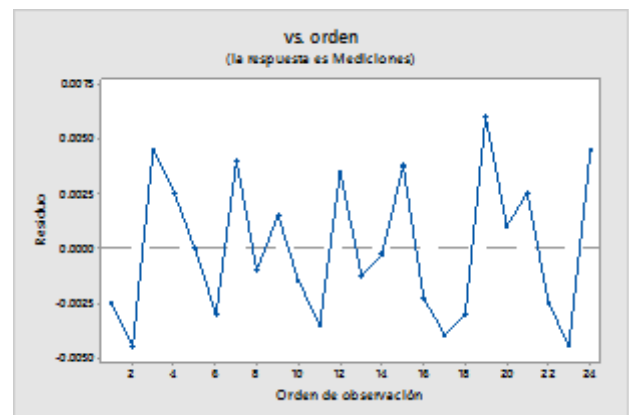


Gráfico 4 Muestras independientes y aleatorias E1- IV UTP plano 1 magnitud

Fuente: Elaboración propia

Para la prueba de normalidad E1 – IV UTP plano 1 magnitud, en el gráfico 5 se observa que hay una normalidad aceptable de acuerdo a la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Flesia, 2011).

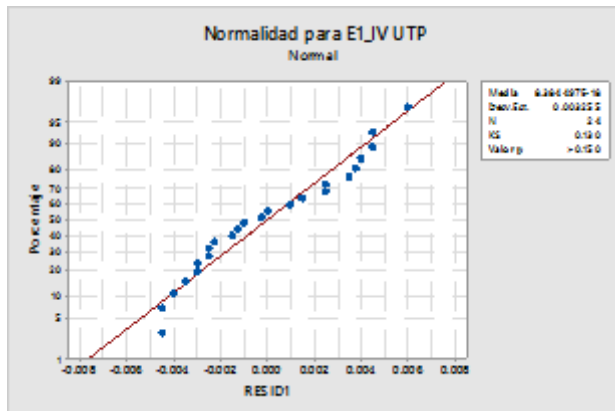


Gráfico 5 Normalidad de las muestras de la E1 – IV UTP plano 1 magnitud

Fuente: *Elaboración propia*

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo de la División de Mantenimiento Industrial de la Universidad Tecnológica de Puebla y las empresas Embobinados Industriales y Montajes S.A. de C.V., Instrumentación Industrial de Puebla S.A. de C.V. y Soluciones de Confiabilidad Integral.

Conclusiones

En general, el Instrumento Virtual desarrollado en UTP para el desbalanceo dinámico en dos planos para rotores rígidos es validado estadísticamente mediante el diseño de experimentos general, pues utilizando el modelo lineal representado mediante la ecuación (1) cumple con la idoneidad del diseño cumpliéndose los 4 supuestos de media de errores cero, varianza entre muestras iguales y constantes, independencia y aleatoriedad estadística y normalidad de los datos.

El instrumento ya fue probado en campo en tres empresas y sus resultados fueron satisfactorios de acuerdo a la norma ISO 1940-1:2003. Las pruebas de hipótesis para las lecturas muestran diferencias significativas, sin embargo, están dentro de los parámetros establecidos por la norma ISO.

Por otro lado, de acuerdo al Modelo de la aproximación de Taguchi (Méndez & Jairo, 2015), las desviaciones de calidad en las características de los servicios y productos desarrollados de acuerdo al estándar, se ven afectados por las tareas proactivas de mantenimiento. Con este instrumento virtual se coadyuva a este modelo en el área de mantenimiento industrial.

Finalmente, se cumple el objetivo de la validación estadística del instrumento virtual, lo que permite tener una confianza en su eficiencia y eficacia en campo y estadísticamente.

Referencias

Camacho, A., Palacios, L., Ramírez, I., Vera, E., & Anchondo, L. (2016). Efectos en la vibración debidos al cambio de la rigidez en un rotor fisurado. *Revista Tecnología e Innovación Ecorfan-Bolivia*, Vol. 3 No.9 61-66.

Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, Vol 29 No. 1 pp 57-76.

Estupiñan, p. E., San Martín, C., & Canales M., L. (2006). Desarrollo de un instrumento virtual para el balanceamiento dinámico de rotores. *Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería*, Vol. 14 N° 2, pp. 146-152.

Flesia, G. (2011). *Test de Kolmogorov-Smirnov*. FaMAF.

García Reynoso, A. e. (2008). Método de Balanceo de Rotores Rígidos con Datos de Vibración pulsante. *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, Vol. 3 No. 1 p 21 - 28.

Gutiérrez Pulido, H. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.

Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (2002). *Probabilidad y estadística para ingeniería*. México: CECSA.

Hunter, G. G. (1975). *101 ways to design an experiment*. Madison: University of Wisconsin.

Méndez, L. M., & Jairo, O. J. (2015). Aproximación del Método Taguchi para el estudio de recubrimientos de óxido de cromo aplicados por proyección térmica a la llama . *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 35 (2): 201-212.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos*. México: Editorial LIMUSA.

Mora, G. A. (2013). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. México: Alfaomega.

Mosquera, R. J. (27 de junio de 2017). *Universidad del Valle*. Obtenido de Campus virtual:

https://campusvirtual.univalle.edu.co/moodle/pluginfile.php/88615/mod_resource/content/0/Cla_se_7.pdf

Napolitano, H. (2010). Diseño de Experimentos. *Educación en Ciencias Químicas.*, N° 354 ■ INDUSTRIA & QUIMICA, pp 62-69.

Royo, J., Torres, F., & Rebanaque, G. (2000). Análisis de vibraciones e interpretación de datos. *Revista Mantenimiento: Ingeniería industrial y de edificios.*, No. 136, 39-48.

Ruiz-Falcó, A. (2009). *Herramientas Estadísticas - Comparación de más de dos muestras: ANOVA (Parte I)*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.

Silva J., A., Salazar P., M. A., Ponce, M. J., & Herrera S., G. (2016). Instrumento virtual para diagnosticar y corregir desbalance de maquinaria rotativa. *Revista de Tecnología e Innovación Ecorfan-Bolivia*, Vol.3 No.7 73-81.

Vera, J. (2000). *Algunos tipos de vibraciones*. Recuperado el 6 de marzo de 2017, de GUEMISA: www.guemisa.com

Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación

LÓPEZ-MOLINA, Fredy*†, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín

Universidad del Istmo, campus Tehuantepec, Av. Universidad s/n Bo. Santa Cruz, C.P. 70760, Oaxaca.

Recibido 3 de Julio 2017; Aceptado 4 de Septiembre, 2017

Resumen

Los aerogeneradores (WT, por sus siglas en inglés) son una de las fuentes de producción de energía que más rápido crece en el mundo; por ello existe una necesidad constante de reducir los costos de operación y mantenimiento. El monitoreo de condición (MC) es una herramienta utilizada comúnmente para la detección temprana de fallas minimizando el tiempo de inactividad y maximizando la productividad. Este artículo presenta una revisión del estado del arte de la técnica en el MC de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado, describiendo las diferentes estrategias de mantenimiento, técnicas y métodos de MC y destacando las diversas combinaciones de éstas y que han sido reportadas en la literatura.

Aerogenerador, operación y mantenimiento, monitoreo de condición, generador de inducción doble alimentado, diagnóstico de fallas

Abstract

Wind turbine technology is rapidly growing as one of the world's largest sources of energy production. Hence, there is a great need to reduce operating and maintenance costs. One of the tools with the greatest impact in fault detection is condition monitoring which has the ability to minimize downtime thus increasing productivity. This article details a state-of-the-art review of wind turbine for condition monitoring technology with a doubly fed induction generator analyzing the different maintenance strategies as well as the techniques and methods of condition monitoring. A qualitative fault tree analysis identifies future and promising research opportunities.

Wind turbine, operation and maintenance, condition monitoring, doubly fed induction generator, fault diagnostics

Citación: LÓPEZ-MOLINA, Fredy, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín. Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:10-25

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: frelo.molin@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

De acuerdo con (WWEA, 2009) se estima que el crecimiento de la capacidad eólica mundial (McGowan & Connors, 2000) se comportará como se muestra en el Gráfico 1. Pero para que la energía eólica sea competitiva con otras fuentes de energía, la disponibilidad, la fiabilidad y la vida de los aerogeneradores deberán ser mejores. A medida que el sector de la energía eólica va en aumento, la economía de los negocios exigirá una gestión cada vez más cuidadosa de los costos. Para una vida útil de 25 años, los costos de explotación y mantenimiento de aerogeneradores de 750 kW podrían representar aprox., el 25%–30% del coste total de generación de energía (Milborrow, 2006) o el 75%–90% de los costes de inversión (Vachon, 2002).

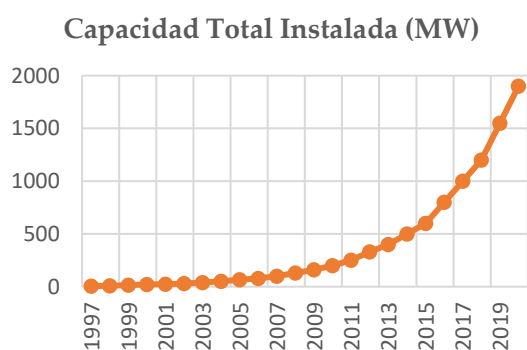


Gráfico 1 Capacidad total instalada de los aerogeneradores

Fuente: *Elaboración propia.*

Los nuevos parques eólicos suelen tener una mayor capacidad y comprenden un mayor número de máquinas. Esto sugiere que los aerogeneradores más grandes fallan con mayor frecuencia y, por lo tanto, requieren de mayor mantenimiento. La reducción de los costos de inspección y mantenimiento se ha vuelto cada vez más importante a medida que el tamaño y el número de aerogeneradores han seguido aumentando.

Es sabido que algunos de los componentes del aerogenerador fallan antes de lo esperado y, debido a que el tiempo de inactividad no es programado este puede ser costoso (Anon., 2005). Para tal efecto se emplean sistemas de monitoreo de condición (MC) para mejorar la disponibilidad del aerogenerador y reducir los costos de O&M.

Sin embargo, hay un grado de incertidumbre sobre la conveniencia de aplicar políticas de mantenimiento específicas a los componentes del aerogenerador. Por ello, este artículo discute la aplicabilidad de varias estrategias de mantenimiento al monitoreo de condición del aerogenerador, además de revisar las técnicas y métodos disponibles actualmente y resumir las formas y maneras en que los aerogeneradores pueden fallar. La discusión se centra en el aerogenerador de velocidad variable de tres palas con generador de inducción doblemente alimentado ya que es el aerogenerador dominante en gran parte del mundo (Logan & Kaplan, 2008).

Configuración de los aerogeneradores

La mayoría de los aerogeneradores son unidades de tres palas. Impulsados por el viento, las palas y el rotor transmiten energía a través del eje principal al generador mediante la caja multiplicadora, siendo la velocidad del generador la más cercana a la velocidad óptima necesaria para la generación de electricidad. La alineación con la dirección del viento es controlada por un sistema “yaw” estando la góndola montada en la parte superior de una torre.

Algunos defectos tales como fugas de aceite y corrosión pueden detectarse mediante inspección visual.

La decoloración de las superficies de los componentes puede indicar ligeras variaciones de temperatura o deterioro de su estado, y el sonido procedente de los rodamientos también puede indicar la condición en que se encuentran (Igarashi & Hamada, 1982; Igarashi & Yabe, 1983).

Sin embargo, típicas fallas, como el agrietamiento y la aspereza en las superficies de las palas, los cortocircuitos eléctricos en el generador y el sobrecalentamiento de la caja multiplicadora, exigen un enfoque más sofisticado para el mantenimiento.

Teoría del Mantenimiento

Se requiere de mantenimiento para asegurarse de que los componentes continúen realizando las funciones para los cuales fueron diseñados.

Los objetivos básicos de la actividad de mantenimiento son desplegar los recursos mínimos necesarios para garantizar que los componentes cumplan adecuadamente las funciones previstas, garantizando la fiabilidad del sistema recuperándose de las fallas (Ben-Daya & Duffuaa, 2009).

Mantenimiento Correctivo, Programado y Basado en Condiciones

La teoría clásica considera el mantenimiento como correctivo o preventivo. El primero (también conocido como mantenimiento no programado o basado en fallas) se lleva a cabo cuando en los aerogeneradores se detectan fallas en cualquiera de los componentes considerados como más importantes tal y como se muestra en la Figura 1.

Es posible que sea necesaria la renovación inmediata o el reemplazo de piezas (Ben-Daya & Duffuaa, 2009) y que se produzca un tiempo de inactividad no programada.

El mantenimiento correctivo es por lo tanto la más cara de las estrategias y los operadores de parques eólicos esperan recurrir a él lo menos posible.

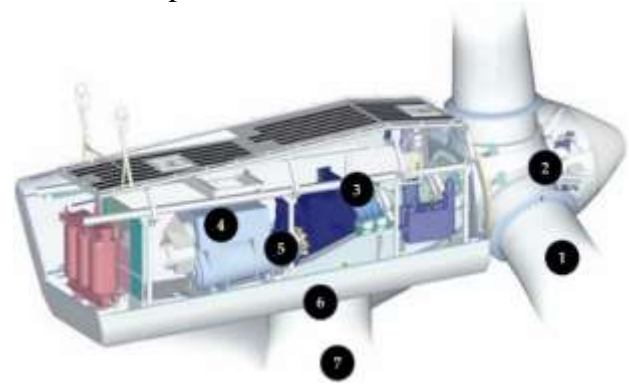


Figura 1 Principales partes de un aerogenerador: (1) palas, (2) rotor, (3) caja multiplicadora, (4) generador, (5) rodamientos, (6) sistema yaw y (7) torre

Fuente: <http://www.windpowermonthly.com>

Por el contrario, el objetivo principal del mantenimiento preventivo es reparar o reemplazar los componentes antes de que fallen. Esto se logra mediante el mantenimiento programado, conocido como mantenimiento basado en el tiempo (o planificado) y que implica la reparación o el reemplazo, a intervalos de tiempo regulares, según lo recomendado por el proveedor e independientemente de la condición. Las actividades de mantenimiento programadas en aerogeneradores incluyen el cambio de aceite y filtros, y el apriete y torque de los pernos. Pero la reducción de las fallas viene a costa de completar las tareas de mantenimiento de lo absolutamente necesario sin agotar la vida útil de los diversos componentes en servicio. Una alternativa es mitigar la falla de los principales componentes y la interrupción del sistema con el mantenimiento basado en condición en el que se emplean técnicas continuas de monitoreo e inspección para detectar prematuramente las fallas incipientes y determinar las tareas de mantenimiento necesarias antes de la falla (Pedregal et al, 2009).

Esto implica la adquisición, el procesamiento, el análisis y la interpretación de los datos y la selección de las acciones óptimas de mantenimiento (Campbell & Jardine, 2001) lográndose, mediante la utilización de sistemas de control. Además, se ha demostrado que el mantenimiento basado en la condición minimiza los costos de mantenimiento, mejora la seguridad operativa y reduce la cantidad y la gravedad de las fallas del sistema en operación. En (Byon & Ding, 2010; McMillan & Ault, 2008), han demostrado su aplicabilidad utilizando la simulación de Monte Carlo para evaluar su rentabilidad cuando se aplica a aerogeneradores. Actualmente, el mantenimiento basado en la condición es la estrategia más empleada en la industria de los aerogeneradores.

Por otro lado, el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad es la técnica más avanzada para decidir sobre el mantenimiento en la industria y es definido como un proceso para determinar qué debe hacerse para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que el usuario quiere que haga en su contexto operativo actual (Moubray, 1997). Este mantenimiento implica las funciones del sistema, la identificación de los modos de falla, la priorización de las funciones, la identificación de los requisitos y la selección de las tareas de mantenimiento más adecuadas con el objetivo de gestionar el riesgo de falla del sistema.

El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad ha sido reconocido y aceptado en muchos sectores industriales, como las plantas siderúrgicas, las redes ferroviarias y mantenimiento de buques así como en otras industrias.

Monitoreo de condición en aerogeneradores

En base a que un cambio significativo es indicativo de una falla en desarrollo (Wiggelinkhuizen et al., 2007), los sistemas de monitoreo de condición comprenden combinaciones de sensores y equipos de procesamiento de señal que proporcionan indicaciones continuas del componente utilizando técnicas tales como análisis de vibraciones, acústica, análisis de aceite, medición de deformaciones y termografía. Este método es muy utilizado en los aerogeneradores con la finalidad de supervisar el estado de sus principales componentes operativos como las palas, la caja multiplicadora, el generador, los rodamientos principales y la torre. La supervisión puede ser en línea (proporcionando una retroalimentación instantánea de la condición) o fuera de línea (los datos se recogen a intervalos regulares de tiempo utilizando sistemas de medición que no están integrados con el equipo). Las fallas presentes en los componentes pueden ser detectadas con una buena adquisición de datos y un procesamiento de señales adecuado, siempre que éstos se encuentren operando. Las acciones se pueden planificar a tiempo para evitar daños o fallas de los componentes. Las tareas de mantenimiento pueden programarse de manera eficiente, lo que se traduce en una mayor fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad, mientras que los tiempos de inactividad, los costos de mantenimiento y de explotación se reducen. Por lo tanto, las técnicas de monitoreo de condición se utilizan en toda la industria y los beneficios se muestran especialmente para los parques eólicos marinos, debido no sólo a los altos costos de operación y mantenimiento en el mar sino también a que los aerogeneradores suelen ser de mayor magnitud. Existen varias técnicas disponibles:

Análisis de vibración

El análisis de vibraciones continúa siendo la tecnología más popular empleada en aerogeneradores, especialmente para equipos rotatorios (Hameed et al., 2009). Para este análisis se requieren diferentes sensores para diferentes frecuencias, es decir, se utilizan transductores de posición para el rango de baja frecuencia, sensores de velocidad en el área de frecuencia media, acelerómetros en el rango de alta frecuencia y sensores de energía de emisión espectral para frecuencias muy altas (Verbruggen, 2003).

En cuanto a las aplicaciones, es apropiado para monitorear la caja multiplicadora, los rodamientos y otros elementos del aerogenerador. Se han presentado también revisiones detalladas de los diferentes métodos de vibración y acústica, tales como mediciones de vibración en los dominios de tiempo y frecuencia, medidas de sonido, el método de choque de pulso y la técnica de emisión acústica (Tandon & Nakra, 1992; Tandon & Choudhury, 1999).

Emisión acústica

Se produce una liberación rápida de la energía de deformación generando ondas elásticas cuando se altera la estructura de un metal y esto se puede analizar mediante emisiones acústicas. Las fuentes primarias de las emisiones acústicas en aerogeneradores son la generación y propagación de grietas, y se ha encontrado la técnica (Yoshioka, 1992) para detectar algunas fallas como por ejemplo el análisis de vibraciones (Tandon et al., 2007). La medición e interpretación de los parámetros de las emisiones acústicas para la detección de fallas en rodamientos de bolas con carga radial ya se ha demostrado a diferentes rangos de velocidad, así como su aplicación.

Las técnicas de ensayos no destructivos han utilizado ondas acústicas para mejorar la seguridad de las palas del aerogenerador y así permitir la evaluación de la criticidad de los daños en las láminas de pequeños aerogeneradores basado en emisiones acústicas. El uso de esta técnica crece gradualmente para el monitoreo de condición en los componentes del aerogenerador (componentes giratorios y palas).

Técnicas de pruebas ultrasónicas

Las técnicas de prueba ultrasónica son utilizadas extensivamente por la industria eólica para la evaluación estructural de torres de aerogeneradores y palas. Esta técnica se emplea generalmente para la evaluación cualitativa de la superficie y la detección de los defectos estructurales sub-superficiales (Endrenyi et al., 2001). Las características de propagación de las ondas ultrasónicas permiten estimar la ubicación y el tipo de defecto detectado, proporcionando así un método confiable para determinar las propiedades de los materiales de los principales componentes del aerogenerador. Los algoritmos de procesamiento de señales que incluyen técnicas de tiempo-frecuencia y transformaciones Wavelet pueden ser utilizados para extraer mayor información (Barron, 1996; Leske & Kitaljevich, 2006; Toms & Toms, 1998; Yonghui et al., 2003).

En la literatura se presenta una técnica de ultrasonido para visualizar la estructura interna de las palas de los aerogeneradores, así como para encontrar defectos tales como delaminaciones, falta de pegamento, etc. Además de la técnica ultrasónica de aire acoplado se ha utilizado para investigar los defectos internos en palas de aerogeneradores. Las imágenes obtenidas mediante ultrasonidos permiten reconocer la geometría de los defectos y estimar sus dimensiones aproximadas.

La técnica adaptada de ultrasonido de aire acoplado se emplea para una mejor identificación de la forma y el tamaño de los defectos en una pala del aerogenerador.

Análisis de aceite

Esta técnica tiene el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de las partes móviles por medio de la buena calidad del aceite. Esta técnica se realiza en su mayoría fuera de línea tomando muestras para vigilar la temperatura del aceite, la contaminación y la humedad (Yonghui et al., 2003).

La poca o mínima vibración presentada en los componentes puede ser evidente ante una falla y es el análisis del aceite el que proporciona advertencias tempranas. Un caso de estudio de una caja multiplicadora del aerogenerador se describe en (Leske & Kitaljevich, 2006). En el caso de contaminación excesiva del filtro, aceite contaminado o cambio en las propiedades de los componentes, la caracterización de las partículas puede dar una indicación de desgaste excesivo. Tales enfoques son particularmente eficaces y rentables para evitar fallas catastróficas (Barron, 1996; Toms & Toms, 1998).

Medición de deformaciones

La medición de las deformaciones es bastante útil si se utilizan extensómetros para protección contra altos niveles de estrés, especialmente en las palas del aerogenerador. Se han realizado evaluaciones para la interpretación de la señal del medidor de deformación de los sensores del extensómetro instalados en las palas para el ajuste, la calibración y la selección del sensor (Papadopoulos et al., 2000). Los sensores de fibra óptica siguen siendo muy caros, pero existen sistemas que son rentables basados en fibra óptica (Wernicke, y otros, 2004).

Estos sistemas muestran la manera en cómo se puede realizar la monitorización de la carga utilizando sensores de deformación en las palas del rotor.

Efectos eléctricos

La técnica de monitoreo de condición en equipos eléctricos, tales como motores, generadores y acumuladores se realiza utilizando el análisis de voltaje y corriente. Las mediciones de descarga se utilizan para redes de media y alta tensión. Por ejemplo, un análisis espectral de la corriente del estator (Schoen et al., 1995) del generador se puede utilizar para detectar fallas de aislamiento en el cableado sin influir en la operación del aerogenerador.

La resistencia eléctrica también se puede utilizar para la evaluación estructural de ciertos componentes del aerogenerador. La resistencia eléctrica varía con la rigidez dieléctrica y estos cambios abruptos se pueden utilizar para detectar grietas, delaminaciones, y fatiga. Por lo tanto, la técnica puede aplicarse a aerogeneradores en operación. Las referencias (Seo & Lee, 1999; Matsuzaki & Todoroki, 2006; Todoroki & Tanaka, 2002), demuestran cómo el principio de resistencia es útil para detectar el daño por fatiga. Mucho se ha investigado sobre estas técnicas por lo cual es un campo ya muy explotado pero existe un potencial significativo para llevarlas con éxito a la práctica.

Método del pulso de choque

Este método se ha utilizado como método cuantitativo para el monitoreo de la condición de los rodamientos y funciona detectando los choques mecánicos que se generan cuando una bola o rodillo en un rodamiento entra en contacto con un área de canalización dañada o con escombros (Butler, 1973).

Las señales son almacenadas por transductores usando un valor de choque normalizado (Zhen et al., 2008) obteniéndose una indicación de la condición del sistema (Tandon & Nakra, 1992). Las señales de vibración de baja frecuencia detectada en la góndola y causada por otras fuentes pueden filtrarse fácilmente de forma electrónica.

Un caso de estudio del método del pulso de choque con un transductor piezoeléctrico se describe en (Morando, 1988). El método es usado ocasionalmente por la industria para apoyar las mediciones de vibración.

Parámetros de proceso

El mantenimiento basado en parámetros de proceso para la detección de señales que superan los límites de control predefinidos es una práctica común en los aerogeneradores ya que los sistemas de control son cada vez más sofisticados y las capacidades de diagnóstico son cada vez mejores. La estabilidad transitoria y oscilatoria se analizan con diferentes escenarios de viento para el proceso de generación de electricidad en (Muller et al., 2006)]. Para una clara explicación del uso de señales y tendencias para la detección de fallas basados en la estimación de parámetros, véase (Zaher & McArthur, 2007).

Supervisión del rendimiento

La relación entre parámetros tales como la potencia, la velocidad del viento, el ángulo de la pala y la velocidad del rotor también puede utilizarse para la evaluación de la condición del aerogenerador y para la detección temprana de fallas (Sørensen et al., 2002).

Los trabajos previos incluyen análisis de flickers de voltaje con velocidad de viento variable y turbulencia variable. Similar a la técnica de estimación de los parámetros de proceso, los métodos más sofisticados, incluyendo la tendencia, no se utilizan a menudo. El par electromagnético y la potencia generada con series de tiempo del viento tomada en el campo de un anemómetro se consideran en (Dolan, 2005).

Inspección radiográfica

La detección de los componentes críticos estructurales del aerogenerador mediante la inspección radiográfica (utilizando rayos X) proporcionan información útil sobre la condición estructural del componente que se está inspeccionando. La imagen radiográfica depende del nivel de absorción de los fotones de rayos X a medida que pasan a través de un material. Por tanto, para detectar delaminaciones o grietas estrechas, con espacios de menos de 50 mm, se emplea la técnica de obtención de imágenes por rayos X. La obtención de imágenes por rayos X es útil para localizar los defectos internos del aerogenerador, y la ventaja principal de la inspección por rayos X es la precisión de la técnica (Peters, 1998). Recientemente se ha demostrado que un sistema radiográfico transportable para las palas de un aerogenerador es una solución para encontrar defectos y reducir el costo de la inspección (Fantidis et al., 2011).

Termografía

La termografía se utiliza a menudo para monitorear componentes electrónicos y eléctricos e identificar fallas por temperatura (Smith, 1978).

La técnica aún se aplica cuando el equipo se encuentra operando y a menudo implica la interpretación visual de los puntos calientes que surgen debido a un mal contacto o a una falla del sistema. En la actualidad, la técnica no está aún bien establecida para el monitoreo de condición, aunque las cámaras y el software de diagnóstico son adecuados para dicho monitoreo. Las cámaras infrarrojas se han utilizado para visualizar variaciones en la temperatura en la superficie de las palas del aerogenerador (Rumsey & Musial, 2001) y pueden indicar con eficacia grietas así como lugares propensos a dañarse (Doliński & Krawczuk, 2009). A más largo plazo, esto podría ser aplicable también a la electrónica de potencia.

La termografía pulsada puede emplearse para la evaluación estructural de las palas, pero debido al voluminoso equipo involucrado, esta no es una metodología estándar entre los operadores de aerogeneradores.

Las primeras investigaciones sobre la realización de mediciones termográficas de las palas en operación utilizando helicópteros para desplegar las cámaras infrarrojas aún no han sido probadas satisfactoriamente y se enfrentan a serias dificultades de implementación.

Señales de los sensores y métodos de procesamiento de señal

Independientemente de la técnica, la capacidad de un sistema de monitoreo de condición se basa en dos elementos básicos: el número, tipo de sensores y los métodos asociados de procesamiento y la simplificación de señales utilizados para extraer información importante de las diversas señales. Un sistema electrónico de medición adquirirá los datos y luego los procesará y distribuirá a un observador u otro sistema de control técnico.

La adquisición de datos implica la medición de las variables requeridas (por ejemplo, corriente, voltaje, temperatura, velocidad) y convertirlas en señales electrónicas para después elegir el tipo y número de sensores adecuados.

Puede ser necesario el acondicionamiento (realización de operaciones básicas incluyendo amplificación, filtrado, linealización y finalmente modulación/demodulación) para reducir la susceptibilidad de las señales de interferencia. Las técnicas de optimización pueden emplearse entonces (Levitin, 2006) en el procesamiento de las señales por un procesador de señales digitales (DSP), implicando no sólo el propio procesamiento sino también la clasificación y manipulación según sea necesario. La distribución subsiguiente será para una pantalla, computadora, dispositivo de almacenamiento u otro sistema. Existen varias opciones, incluyendo redes Ethernet con protocolo TCP/IP junto con WLAN para comunicarse con un sistema de adquisición de datos (SCADA) el cual es un sistema informático que permite el control local y remoto de las funciones de un aerogenerador, recolectando datos del parque eólico y analizándolos para reportar el rendimiento operativo y, por lo tanto, asegurar un funcionamiento eficiente. SCADA utiliza varios métodos de procesamiento de señales, siendo los más relevantes para aerogenerador los que se describen a continuación.

Métodos Estadísticos

Una aplicación común de algoritmos estadísticos para los propósitos de monitoreo de condición es analizar las señales de los datos de los diversos sensores en aerogeneradores.

Las medidas estadísticas más comunes, como la media cuadrática y la amplitud pico se utilizan ampliamente para el diagnóstico de fallas, pero también, actualmente, se desarrollan características más avanzadas (Tan et al., 2007; Thiringer, 1996).

Otros parámetros estadísticos importantes son el valor máximo, el valor mínimo, la media, el pico a pico, la desviación estándar, el factor de forma, el factor de cresta, el factor de impulso, la integral definida, la relación de energía y la curtosis.

Análisis de Tendencias

Aplicar un análisis de tendencias a un aerogenerador se refiere al concepto de reunir datos de los diversos sensores y buscar tendencias. Esto requiere de algoritmos particulares (Márquez, Tercero, & Schmid, 2007; Marquez, Weston, & Roberts, 2007), cuyas aplicaciones incluyen el monitoreo de los mecanismos pitch, aunque lo más común es el uso en los patrones de la potencia de salida de los generadores. Se debe tener en cuenta que el análisis de tendencia es una técnica diferente, específicamente para la previsión.

Métodos de Filtrado

Cuando existen datos redundantes que contienen información que no es útil y que bien se podrían eliminar para evitar comprometer los cálculos entonces se utilizan los métodos de filtrado. Por ejemplo, las vibraciones de una góndola tendrán que ser filtradas mientras se mide la vibración de la caja multiplicadora. En (Llombart-Estopiñan, 2008) se presenta un método que utiliza los mínimos cuadrados para estimación de la curva de potencia. El inconveniente del método de filtrado, mientras se monitorizan las tendencias es que los parámetros tienen que ser ajustados para tener en cuenta las diversas condiciones de operación.

Análisis en el dominio del tiempo

El análisis en el dominio del tiempo es una forma de monitorear las fallas en el aerogenerador tales como desbalances resistivos e inductivos entre las fases del rotor y del estator, además de las fallas de espira a espira en los devanados del rotor del generador. Las variaciones en las señales de corriente y las tendencias se utilizan normalmente para el análisis de vibraciones (Cheng et al., 2010), análisis de aceite y emisiones acústicas (Li & Li, 1995).

Análisis de Cepstrum

El cepstrum de potencia es un enfoque basado en el tiempo definido como la Transformada de Fourier Inversa Logarítmica del espectro de potencia (Wismer, 1994). El cepstrum es muy adecuado para aplicaciones de diagnóstico de equipos en un aerogenerador. Los espectros de vibración de la caja multiplicadora comúnmente muestran bandas laterales de la frecuencia de mallado y las componentes armónicas que surgen de la modulación de la forma de onda del engrane de los dientes de la caja multiplicadora (Caselitz et al., 1997). Para las cajas multiplicadoras en buenas condiciones, el nivel de la banda lateral permanece, generalmente constante con el tiempo. Por lo tanto, los cambios en el número y la amplitud de las bandas laterales normalmente indican deterioro. La presencia de varias familias de bandas laterales y otros componentes puede complicar la distinción y la evaluación de la banda lateral.

Tiempo Síncrono Promedio

También llamado dominio del tiempo promediado, es una técnica de procesamiento de señales que sirve de base para muchos algoritmos de detección de fallas de los engranajes en las cajas multiplicadoras.

Este método se emplea para identificar fallas en los rodamientos midiendo la vibración del mismo y obteniendo la forma de onda de la señal. También puede ayudar a identificar la fuente de vibración en los reductores del aerogenerador (Zheng & Wang, 2001). Por ejemplo, un diente de engranaje agrietado en una caja de engranajes que engrana una vez por revolución produce una vibración en la armadura altamente periódica que a su vez puede ser muy débil.

El tiempo síncrono promediado se puede utilizar para resaltar las características de la señal de vibración que se presentan durante un período de tiempo determinado, y puede trabajar con componentes de señal no periódica, filtrando el ruido de la señal al dominio del tiempo. Una vez que se alcanza la señal de tiempo promedio, es posible calcular la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), como a continuación se describe.

Transformada Rápida de Fourier

El algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (Burrus et al., 1994) se utiliza para la conversión de una señal digital desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Los rangos de frecuencia corresponden a estados particulares (por ejemplo, rodamiento defectuoso o sin fallas), los rangos que reflejan la velocidad de rotación del eje principal y la forma y tamaño del elemento en cuestión. Todos los elementos del rodamiento generan vibración a frecuencias específicas (conocidas como frecuencias de falla) y por lo tanto la Transformada Rápida de Fourier encuentra mayor uso en el monitoreo de la caja multiplicadora. La Transformada Rápida de Fourier también se utiliza para los rodamientos donde, si el daño comienza a desarrollarse, la forma de la distribución de la vibración se desvía de la curva nominal de Gauss.

La ventaja del análisis del dominio de la frecuencia sobre el análisis del dominio del tiempo es su capacidad de identificar y de aislar ciertos componentes de la frecuencia (Jardine et al., 2006).

Demodulación de Amplitud

Esta aproximación puede extraer señales periódicas de muy baja amplitud y frecuencia que podrían ser enmascarados por otras vibraciones de mayor energía como en las cajas multiplicadoras del aerogenerador. Mientras el espectro es útil para supervisar las frecuencias de los engranajes, el espectro envolvente proporciona una sensibilidad superior a las frecuencias de falla de los rodamientos en aplicaciones como en los aerogeneradores. Con su alta sensibilidad, se ha demostrado que la demodulación es buena para evaluar defectos que producen impactos, por ejemplo, contactos rodantes en rodamientos y contactos de diente a diente en los engranajes. También ayuda a reducir la complejidad del análisis siendo su principal ventaja la excelente visibilidad de las frecuencias de los defectos en los rodamientos sin la interferencia de otras frecuencias en el mismo espectro.

A pesar de las ventajas que ofrecen las cajas multiplicadoras en los aerogeneradores, todavía quedan barreras para su implementación. La selección de la ubicación del transductor es crucial para garantizar los resultados y, si el proceso de demodulación se basa en el filtrado de pasa-bajas, entonces la amplitud original de las señales defectuosas no se conserva.

Análisis de Orden

La Transformada Rápida de Fourier es útil para estudiar las oscilaciones en los convertidores de energía de velocidad constante cuando se aplica a señales de series de tiempo.

Sin embargo, este algoritmo no es adecuado para aerogeneradores de velocidad variable ya que se requiere de un algoritmo diferente, basado en ángulos de rotación, es decir, el denominado análisis de orden, que es adecuado para desbalances de rotor y asimetrías aerodinámicas. La oscilación torsional de la góndola genera una señal que está fuera de fase con cualquier oscilación transversal, por lo que pueden ser separados y analizados individualmente (Caselitz & Giebhardt, 2005). La interpolación y producción del espectro de órdenes conduce al cálculo de la Transformada Rápida de Fourier. Este análisis se puede usar para monitorear la condición general del rotor incluyendo la rugosidad superficial, desbalanceo de masa y asimetría aerodinámica.

Transformada de Wavelet

La Transformada de Wavelet es una técnica de tiempo-frecuencia similar a la Transformada de Fourier de Tiempo Corto adecuada para señales no-estacionarias. Esta técnica proporciona un mapa en tiempo-frecuencia de 3D de la señal que se analiza (Abbate et al., 2012; Yang et al., 2008) e implica su descomposición en un conjunto de sub-señales o niveles con diferentes frecuencias (Newland, 1993; Strang, 1996). Es aplicable para monitorear el nivel de vibración causado por desalineación, rodamiento y otros problemas en aerogeneradores, y puede ser usado como una indicación de un aerogenerador defectuoso.

La Transformada de Wavelet se ha aplicado al análisis de datos para la detección de fallas y el diagnóstico de varias partes del aerogenerador incluyendo la caja multiplicadora, rodamientos y otros sistemas mecánicos. Dalpiaz y Rivola (1997) han completado la evaluación de la efectividad y fiabilidad de las Transformadas de Wavelet y la comparación con otras técnicas de análisis de vibraciones.

Baydar y Ball aplican con éxito la Transformada de Wavelet a las señales de vibración y señales acústicas y también se han utilizado para estimar la máxima amplitud de los coeficientes Wavelet (Baydar & Ball, 2003).

Modelos Ocultos de Markov

Los modelos ocultos de Markov se han aplicado con éxito a la clasificación de los patrones en el análisis de tendencias (Kwon & Kim, 1999) y en el monitoreo de condición. Atlas et al., desarrollaron un método para predecir el desgaste con precisión (Atlas et al., 2000), al aplicar un método para monitorear procesos de fresado con los modelos ocultos de Markov. Yam et al. (2001) presentaron la aplicación de los modelos ocultos de Markov en la detección de fallas en rodamientos, y las características estadísticas dinámicas que existen en las observaciones actuales de las señales de vibración en la máquina han sido modeladas utilizando esta misma técnica.

Nuevas Técnicas

La detección y diagnóstico de fallas es una sofisticada adaptación del sistema de monitoreo de condición que incorpora algoritmos inteligentes adecuados para la detección temprana de fallas que proporcionan una visión del nivel de criticidad correspondiente. Los métodos de detección y diagnóstico de fallas pueden o no basarse en modelos dependiendo de la forma en que se incorpora el conocimiento del proceso dentro de la unidad de procesamiento de señal.

La inteligencia artificial se emplea esencialmente para reproducir el razonamiento humano lo más exactamente posible, basándose el razonamiento en el comportamiento del sistema y anotándolo en términos de reglas.

La naturaleza dinámica de los entornos en los que operan los aerogeneradores ha llevado a la aparición de planes de mantenimiento predictivo que toman en cuenta cualitativamente el medio ambiente, así como su efecto real sobre la condición de los componentes.

Los sistemas expertos o los denominados sistemas de diagnóstico basados en reglas detectan e identifican fallas incipientes de acuerdo con las reglas que representan la relación de cada falla posible con la condición de equipo monitorizada real (Yam et al., 2001). Tienen que cumplir dos capacidades para ser eficaces: la adquisición e integración de nuevos conocimientos, y también la explicación de su razonamiento (García et al., 2006).

Conclusión

El enfoque principal de este artículo de revisión en cuanto al monitoreo de condición y de los diversos métodos matemáticos para el procesamiento de señales se basa en las cajas multiplicadoras y en los rodamientos, rotores y palas, generadores y en la electrónica de potencia del aerogenerador de velocidad variable de doble alimentación. Se ha proporcionado también un resumen de las técnicas de monitoreo de condición disponibles a la par de algoritmos de procesamiento de señal y la selección de un conjunto de técnicas factibles y adecuadas para el aerogenerador de doble alimentación.

Para cada componente del aerogenerador existen diferentes técnicas que pueden emplearse, y para todas estas técnicas hay métodos matemáticos disponibles y referenciados en la literatura. Los principales obstáculos que enfrentan los diseñadores de sistemas de control para aerogeneradores siguen siendo:

- Selección del número y tipo de sensores;
- Selección de métodos de procesamiento de señales efectivos asociados con los sensores seleccionados; y
- Diseño de un modelo de fusión eficaz (es decir, la combinación de sensores y métodos de procesamiento de señales que proporcionan un rendimiento mejorado).

Referencias

- Abbate, A., DeCusatis, C., & Das, P. K. (2012). *Wavelets and subbands: fundamentals and applications*. Boston: Springer Science & Business Media.
- Anon., (2005). Managing the wind: reducing Kilowatt-Hour costs with condition monitoring. *Refocus*, 6(3), 48-51.
- Atlas, L., Ostendorf, M., & Bernard, G. D. (2000). Hidden Markov models for monitoring machining tool-wear. *In Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference*, 6, 3887-3890.
- Barron, D. R. (1996). *Engineering condition monitoring: practice, methods and applications*. Longman.
- Baydar, N., & Ball, A. (2003). Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(4), 787-804.
- Ben-Daya, M. S., & Duffuaa, A. R. (2009). *Handbook of maintenance management and engineering* (Vol. 7). Springer London.

- Burrus, C., McClellan, J., Oppenheim, A., Parks, T., Schafer, R., & Schuessler, H. (1994). Computer-based exercises for signal processing using MATLAB. *In E. Cliffs* (Ed.). (pp. 43-59). NJ: Prentice-Hall.
- Butler, D. E. (1973). The shock-pulse method for the detection of damaged rolling bearings. *Non-Destructive Testing*, 6(2), 92-95.
- Byon, E., & Ding, Y. (2010). Season-dependent condition-based maintenance for a wind turbine using a partially observed Markov decision process. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(4), 1823-1834.
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2001). *Maintenance excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*. New York: CRC Press.
- Caselitz, P., & Giebhardt, J. (2005). Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 127(2), 253-261.
- Caselitz, P., Giebhardt, J., Mevenkamp, M., & Reichardt, M. (1997). Application of condition monitoring systems in wind energy converters. *In EWEC-CONFERENCE*, (pp. 579-582). Dublin.
- Cheng, J., Yang, Y., & Yu, D. (2010). The envelope order spectrum based on generalized demodulation time-frequency analysis and its application to gear fault diagnosis. *Mechanical systems and signal processing*, 24(2), 508-521.
- Dalpiaz, G., & Rivola, A. (1997). Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(1), 53-73.
- Dolan, D. L., & Lehn, P. W. (2005). Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies. University of Toronto. 1-6.
- Doliński, L., & Krawczuk, M. (2009). Damage detection in turbine wind blades by vibration based methods. *In Journal of Physics: Conference Series*, 181(1).
- Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., Anders, G. J., Asgarpoor, S., & Billinton, R. G. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on power systems*, 16(4), 638-646.
- Fantidis, J. G., Potolias, C., & Bandekas, D. V. (2011). Wind turbine blade nondestructive testing with a transportable Radiography system. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1-7.
- Garcia, M. C., Sanz-Bobi, M. A., & del Pico, J. (2006). SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. *Computers in Industry*, 57(6), 552-568.
- Hameed, Z., Hong, Y. S., Cho, Y. M., & Song, C. K. (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(1), 1-39.
- Igarashi, T., & Hamada, H. (1982). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings: First report (Vibration of ball bearings with one defect). *Bulletin of JSME*, 25(204), 994-1001.
- Igarashi, T., & Yabe, S. (1983). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (First report: sound of ball bearing with one defect). *Bulletin of JSME*, 26(220), 1791-1798.

- Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483-1510.
- Kwon, K. C., & Kim, J. H. (1999). Accident identification in nuclear power plants using hidden Markov models. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(4), 491-501.
- Leske, S., & Kitaljevich, D. (2006). Managing gearbox failure Dewek. *Dewi Magazine*, (29).
- Levitin, G. (2006). Genetic algorithms in reliability engineering. *Reliability Engineering and System Safety*, 975-976.
- Li, C. J., & Li, S. Y. (1995). Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *Wear*, 185(1-2), 67-74.
- Llombart-Estopiñan, A. (2008, March). Improving the operation and maintenance of wind farms: determination of wind turbine performance. In: *Proceedings of ICREPQ.*, 1(6), 8-14.
- Logan, J., & Kaplan, S. (2008). *Wind Power in the United States: Technology, Economic, and Policy Issues*. Retrieved from <http://www.fas.org/-sgp/crs/misc/RL34546.pdf>
- Márquez, F. P., Tercero, D. J., & Schmid, F. (2007). Unobserved component models applied to the assessment of wear in railway points: A case study. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1703-1712.
- Marquez, F. P., Weston, P., & Roberts, C. (2007). Failure analysis and diagnostics for railway trackside equipment. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1411-1426.
- Matsuzaki, R., & Todoroki, A. (2006). Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes. *Composites science and technology*, 66(3), 407-416.
- McGowan, J. G., & Connors, S. R. (2000). Windpower: a turn of the century review. *Annual review of energy and the environment*, 25, 147-197.
- McMillan, D., & Ault, G. W. (2008). Condition monitoring benefit for onshore wind turbines: sensitivity to operational parameters. *IET Renewable Power Generation*, 2(1), 60-72.
- Milborrow, D. (2006). Operation and maintenance costs compared and revealed. *Windstats Newsletter*, 19(3), 1-3.
- Morando, L. E. (1988). Measuring shock pulses is ideal for bearing condition monitoring. *Pulp Paper*, 62, 96-98.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. New York: Industrial Press Inc.
- Muller, H., Poller, M., Basteck, A. T., & Pfister, J. (2006). Grid compatibility of variable speed wind turbines with directly coupled synchronous generator and hydro-dynamically controlled gearbox. In *Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, 307-315.
- Newland, D. E. (1993). *Random vibrations, spectral analysis and wavelet analysis*. Essex, England: Longman.
- Papadopoulos, K., Morfiadakis, E., Philippidis, T. P., & Lekou, D. J. (2000). Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads. *Wind Energy*, 3(1), 35-65.

- Pedregal, D. J., García, F. P., & Roberts, C. (2009). An algorithmic approach for maintenance management based on advanced state space systems and harmonic regressions. *Annals of Operations Research*, 166(1), 109-124.
- Peters, S. (1998). Handbook of composites. London: Chapman & Hall.
- Rumsey, M. A., & Musial, W. (2001). Application of infrared thermography nondestructive testing during wind turbine blade tests. *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Solar Energy Engineering*, 123(4), 271.
- Schoen, R. R., Lin, B. K., Schlag, J. H., & Farag, S. (1995). An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6), 1280-1286.
- Seo, D. C., & Lee, J. J. (1999). Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network. *Composite structures*, 47(1), 525-230.
- Smith, B. (1978). Condition monitoring by thermography. *NDT International*, 11(3), 121-122.
- Sørensen, B. F., Lading, L., Sendrup, P., McGugan, M., Debel, C., Kristensen, O., & Larsen. (2002). Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades - a preproject. *Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark*.
- Strang, G. &. (1996). *Wavelets and filter banks*. SIAM.
- Tan, C., Irving, P., & Mba, D. (2007). A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1), 208-233.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), 469-480.
- Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings. *Tribology International*, 25(3), 205-212.
- Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings—a review. *The shock and vibration digest*, 24(3), 3-11.
- Tandon, N., Yadava, G. S., & Ramakrishna, K. M. (2007). A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. *Mechanical systems and signal processing*, 21(1), 244-256.
- Thiringer, T. (1996). Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(3), 601-606.
- Todoroki, A., & Tanaka, Y. (2002). Delamination identification of crossply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method. *Composites Science and Technology*, 62(5), 629-639.

- Toms, L. A., & Toms, A. M. (1998). *Machinery oil analysis: methods, automation and benefits*. Coastal.
- Vachon, W. (2002, June). Long-term O&M costs of wind turbines based on failure rates and repair costs. In Proceedings WINDPOWER. *American Wind Energy Association annual conference, Portland, OR, 2-5*.
- Verbruggen, T. W. (2003, April). Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring WT-Ω. *Final Report*, 1-39.
- Wernicke, J., Shadden, J., Kuhnt, S., Byars, R., Rhead, P., & Damaschke, M. (2004). Field experience of fibre optical strain sensors for providing real time load information from wind turbine blades during operation. *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, (pp. 22-25). London, UK.
- Wiggelinkhuizen, E. V., Rademakers, L. W., Xiang, J., Watson, S., & Christensen, A. J. (2007). CONMOW: condition monitoring for offshore wind farms. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, 118-122.
- Wisner, N. J. (1994). Gearbox analysis using cepstrum analysis and comb liftering. Denmark.
- WWEA. (2009). World wind energy report 2009: <http://www.wwindea.org>
- Yam, R. C., Tse, P. W., Li, L., & Tu, P. (2001). Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(5), 383-391.
- Yang, W., Tavner, P. J., & Wilkinson, M. (2008). Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine with a synchronous generator using wavelet transforms. In: *The 4th International conference on power electronics, machines and Drives 2008 (PEMD2008), York, UK*, 6-10.
- Yonghui, Y., Weihua, W., Xinpin, Y., Hanliang, X., & Chengtao, W. (2003). An integrated on-line oil analysis method for condition monitoring. *Measurement Science and Technology*, 14(11), 1973-1977.
- Yoshioka, T. (1992). Detection of rolling contact sub-surface fatigue cracks using acoustic emission technique. *Lubrication Engineering*, 49(4), 303-308.
- Zaher, A. S., & McArthur, S. D. (2007). A multi-agent fault detection system for wind turbine defect recognition and diagnosis. In *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne POWERTECH 2007*, 22-27.
- Zhen, L., Zhengjia, H., Yanyang, Z., & Xuefeng, C. (2008). Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme. *Mathematics and computers in simulation*, 79(3), 318-338.
- Zheng, G. T., & Wang, W. J. (2001). A new cepstral analysis procedure of recovering excitations for transient components of vibration signals and applications to rotating machinery condition monitoring. *Journal of vibration and acoustics*, 123(2), 222-229.

Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo

FLORES-RAMÍREZ, Oscar†, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo

Departamento de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Amozoc

Recibido 6 de Julio, 2017; Aceptado 10 de Septiembre, 2017

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos los podemos definir como un conjunto de elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos que realizan la transformación de la radiación solar en energía eléctrica, los de conexión a red son los más idóneos para satisfacer demandas energéticas considerables, pero igual que todo proceso de generación de potencia eléctrica, las pérdidas son un factor determinante que hay que tener presente en todo momento para poder posteriormente evaluar el rendimiento de los sistemas. En este trabajo se realiza un análisis de la pérdida de energía eléctrica debido a suciedad y deposición de polvo en paneles solares del parque solar de la Universidad Politécnica de Amozoc; el cual consta de 200 paneles de 250 W, 5 inversores de la marca Fronius IG Plus V 10.0-1, para generar 7.2 MWh mensual. Después del análisis requerido se llegó a la conclusión que el sistema pierde el 11 % de su generación total, equivalente a 792 kWh mensual, esto ocasiona una pérdida de \$ 21,859.00 anual, para remediar esto se implementó el sistema de limpieza por pértigas y agua.

Sistema Fotovoltaico, energía eléctrica, paneles solares, radiación, rendimiento

Abstract

Photovoltaic systems can be defined as a set of electrical, electronic and mechanical elements that perform the transformation of solar radiation into electrical energy, those of connection to grid are the most suitable to meet considerable energy demands, but just as any process of generating electricity Electric power, losses are a determining factor and to keep in mind at all times to be able to subsequently evaluate the performance of systems. In this work an analysis of the loss of electrical energy due to dirt and deposition of dust in solar panels of the solar park of the Universidad Politécnica de Amozoc is carried out; which consists of 200 panels of 250 W, 5 inverters Fronius IG Plus V 10.0-1, to generate 7.2 MWh per month. After the required analysis, it was concluded that the system loses 11% of its total generation, equivalent to 792 kWh per month, which causes a loss of \$ 21,859.00 per year. To remedy this, the system of cleaning by poles and water was implemented.

Photovoltaic system, electric power, solar panels, radiation, performance

Citación: FLORES-RAMÍREZ, Oscar, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo. Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:26-36

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El aprovechamiento de la energía del Sol de manera directa o indirectamente ha sido una constante en la humanidad, la necesidad de emplear nuevos métodos de generación de energía que sean de pequeño o nulo impacto ecológico ha dado como resultado el estudio de los métodos que emplean recursos renovables, uno de ellos es el aprovechamiento de la energía solar que es de elevada calidad energética y de insignificante impacto al ambiente además de ser inagotable a escala humana (Campos, 2012).

En México se han realizado diferentes trabajos relacionados con la puesta a punto de sistemas fotovoltaicos y es uno de los temas de investigación en área de energías de mayor interés. La importancia que tienen los sistemas fotovoltaicos estriba en los beneficios como son, la reducción del consumo de energía eléctrica producida por combustibles fósiles que contaminan al medio ambiente, es una fuente inagotable de energía, se reduce la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles, bajos costos de mantenimiento. Son sistemas silenciosos limpios que no afectan el medio ambiente, los paneles solares pueden ser añadidos gradualmente y así incrementar la energía disponible de acuerdo a la demanda. Cabe mencionar que la inversión inicial es significativa, pero su retorno es de corto a mediano plazo, ya que después de recuperar lo invertido, el resto de la energía producida representa utilidad.

Los problemas a los que se enfrenta una instalación de este tipo y de esta magnitud son muchos; basándonos en el funcionamiento y condiciones óptimas de un panel solar, uno de los problemas que mayor impacto puede llegar a tener es la limpieza de las placas solares, teniendo en cuenta el tipo de suelo y la exposición a la intemperie que tienen, la limpieza es un problema que se debe atacar de la mejor forma para no afectar la producción de energía pero que tampoco implique un gasto económico perjudicial. En este proyecto se propone la técnica de limpieza por pértigas y agua, así como el número de limpiezas al año apropiado para evitar que los paneles solares del parque solar de la Universidad Politécnica de Amozoc disminuyan su eficiencia debido a las condiciones que se presentan por el tipo de suelo y afecten la producción total del parque solar.

Estudio del arte

Existen estudios que han mostrado grandes variaciones del rendimiento de los paneles solares debido a la suciedad y deposición de polvo, por ejemplo en Kuwait se encontró una reducción del 17% en la producción de energía de módulos fotovoltaicos debido a la acumulación de arena de más de seis días. En Hermosillo, Sonora, México se encontró una reducción que oscila entre 8.5 % y 14 % debido a deposición de polvo por 20 días (Cabanillas y Munguía, 2011). En Málaga, España se obtuvo una reducción del 22% debido a deposición de polvo por 3 meses (Zorrilla et al., 2011). En Jodhpur, desierto de Thar, India se obtuvo una reducción del 12.78 % con un ciclo de limpieza de una semana (Nahar y Gupta, 1990). En Singapur se obtuvo una reducción del 12.4 % tras 33 días de ciclo de limpieza (Hee et., 2012). En Taiyuan, China se obtuvo una reducción del 15 % tras 2 semanas de ciclo de limpieza (Liquan et., 2012).

Factores de pérdidas energéticas

Al igual que en otros procesos de generación de potencia eléctrica, las pérdidas son un factor determinante que hay que tener presente en todo momento para poder posteriormente evaluar los rendimientos de los equipos. A priori resulta muy fácil pensar que la energía producida por una instalación fotovoltaica es directamente proporcional a la irradiación incidente en el plano del generador fotovoltaico, la experiencia y distintos estudios muestran que la energía producida por un módulo fotovoltaico es sensiblemente inferior. Esta disminución de la energía entregada por el generador respecto de la energía solar incidente puede ser explicada mediante una serie de pérdidas, como las pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal, las pérdidas de mismatch o de conexionado, las pérdidas por polvo y suciedad, las pérdidas angulares y espectrales, las pérdidas por caídas óhmicas en el cableado, las pérdidas por temperatura, las pérdidas por sombreado del generador fotovoltaico y pérdidas por rendimiento AC/DC del inversor (ybasolar.net).

Distintas tecnologías de limpieza

Sistema de limpieza con pértigas y agua

Es uno de los sistemas más utilizados. Se basa en la limpieza mecánica con pértigas especiales para vidrio, utilizando como apoyo un sistema de equipos de bombeo de agua y mangueras habitualmente integrados dentro de un vehículo para desplazarlos, que tratan el agua in situ mediante sistemas de filtros de partículas y un descalcificador, cuya finalidad es la de evitar la acumulación de cal que habitualmente porta el agua. La aplicación de agua se realiza mediante pértigas de fibra de carbono y poliéster, de densidad y grosor adecuados, utilizados para limpieza de vidrio y especialmente diseñadas para evitar las ralladuras.



Figura 1 Técnica de Pértigas y agua

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de limpieza con agua a presión

Este sistema de limpieza se realiza mediante un vehículo dotado de una cuba de agua de no menos de 2000 litros y un grupo de motobombas. Este mismo mecanismo de limpieza podemos encontrarlo en diferentes versiones: Para instalaciones fijas se puede utilizar un operario que maneja la pistola a presión y otro que se encarga de conducir y para instalaciones con estructuras de seguimiento grandes, existen otras versiones.



Figura 2 Técnica de Agua a presión

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de rodillo autopropulsado

El sistema consta de un vehículo autopropulsado con un rodillo de limpieza con cerdas de limpieza suaves para no dañar la superficie del módulo. El operador se sitúa en una zona con una visión óptima del sistema fotovoltaico.

La limpieza se realiza con agua descalcificada para evitar los residuos de cal que acortan la vida de los paneles.



Figura 3 Técnica de rodillo autopulsado

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistemas de limpieza mecanizados-automáticos

Estos sistemas se caracterizan por estar instalados en la propia estructura de sujeción de los módulos. Atendiendo a los criterios de este análisis, existen algunas variedades: Sistemas con rozamiento, el sistema consta de un cepillo-rodillo fabricado en nylon de longitud máxima de 10 m que va recorriendo los paneles y está fijado a la estructura.



Figura 4 Técnica mecanizados-automáticos

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de limpieza robotizada

Se plantea la utilización de robots automatizados que realicen la limpieza de las hileras de módulos con una inclinación no mayor a 45°. Estos dispositivos serían similares a los robots limpia-piscinas. Este sistema podría enfocarse a las instalaciones sobre cubierta, las cuales son de difícil acceso.



Figura 5 Técnica robotizada

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistemas fotovoltaicos

Se define como sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica. Estos sistemas, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- Instalaciones aisladas de la red eléctrica: En las que la dependencia no posee energía eléctrica de la red convencional y, por tanto, su consumo eléctrico ha de ser proporcionado íntegramente por la instalación solar fotovoltaica, que almacenará la generación eléctrica solar en baterías para su uso cuando sea solicitada.

- Instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional: En las que la dependencia posee suministro eléctrico y, por tanto, la generación eléctrica de la instalación solar es destinada, íntegramente, a su venta a la red eléctrica de distribución convencional. Los sistemas conectados a la red son sencillos, sólo requieren instalar los módulos fotovoltaicos, el cableado y el inversor, no precisando del uso de baterías (Castilla, 2007).

Las centrales fotovoltaicas son los lugares donde se lleva a cabo la obtención de energía solar para convertirse en energía eléctrica de una forma industrial, el destino de esta energía no es algo que competa necesariamente las centrales fotovoltaicas (Campos, 2012).

Relación de rendimiento o PR

El coeficiente de rendimiento es una medida de la calidad de una planta fotovoltaica que es independiente de la ubicación y por lo tanto a menudo descrito como un factor de calidad. La relación de rendimiento (PR) se expresa como porcentaje y describe la relación entre las salidas de energía reales y teóricos de la instalación fotovoltaica. Por lo tanto, muestra la proporción de la energía que está realmente disponible para la exportación a la red después de la deducción de la pérdida de energía y del consumo de energía para la operación.

Curva de corriente vs tensión (curva I-V)

La representación típica de la característica de salida de un dispositivo fotovoltaico (celda, módulo, sistema) se denomina curva corriente tensión.

La corriente de salida se mantiene prácticamente constante dentro del rango de tensión de operación y, por lo tanto el dispositivo se puede considerar como una fuente de corriente constante en este rango. La corriente y la tensión a la cual opera el panel fotovoltaico están determinadas por la radiación solar incidente, por la temperatura ambiente y por las características de las cargas conectadas. Los valores trascendentes de esta curva son: Corriente de cortocircuito (ICC), Potencia Pico (Pmp), Corriente a máxima potencia (IMP), Tensión a máxima potencia (VMP) (Castilla, 2007).

Parque solar UPAM

El Parque solar UPAM genera 86.4 MW al año, con esta cantidad de generación se abastece el 60 % del consumo de la Universidad Politécnica de Amozoc, el área que ocupa el parque es de 400 m², consta de 200 paneles monocristalinos y 5 inversores Fronius IG Plus V 10.0-3, las características de los paneles y los inversores se muestran en las tablas 1 y 2. El proyecto se localiza en Amozoc de Mota, Puebla, el parque solar UPAM se muestra en la figura 6.



Figura 6 Parque solar UPAM

Fuente: Elaboración Propia

Módulo fotovoltaico marca Solartec		
Modelo	S60MC-250	
Tipo de celda	Monocristalino	
Número de celdas	60	
Condiciones de medición	SCT	NOCT
Voltaje a circuito abierto (Voc)	37.92 V	35.10 V
Voltaje óptimo de operación (Vmpp)	30.96 V	28.50 V
Corriente a corto circuito (Isc)	8.62 A	6.95 A
Corriente óptima de operación (Impp)	8.07 A	6.36 A
Potencia máxima (Pmax)	250 W	181.6 W
Eficiencia del modulo	15.37 %	
Temperatura de operación	-40 °C a +90 °C	
Dimensiones	1640mm x 992mm	
Peso	20.5 kg	
Área total de 200 paneles	323.37 m ²	
Carga máxima	2400 Pa	

Tabla 1 Características de los paneles fotovoltaicos

Fuente: *Elaboración Propia*

Inversor marca Fronius	
Modelo	Fronius IG Plus V 10.0-3
Potencia recomendada de la instalación fotovoltaica	8500 - 11500 Wp
Gama de tensión MPP	230 - 500 V DC
Máxima tensión de entrada (con 1000 W/m ² / 14 °C en marcha sin carga)	600 V DC
Tensión de entrada nominal	390 V
Corriente de entrada nominal	27.6 A
Máxima corriente de entrada	46.7 A
Potencia de salida nominal (Pnom)	9995 W
Tensión de red nominal	208 V / 240 V
Margen de tensión de servicio AC	211 - 264 V
Corriente de salida nominal	27.7 A AC
Fases	3
Margen de frecuencia de salida	59.3 - 60.5 Hz
Máximo rendimiento	96.2 %

Tabla 2 Características de los inversores Fronius

Fuente: *Elaboración Propia*

La irradiación se obtuvo con la estación meteorológica instalada en la Universidad Politécnica de Amozoc, los resultados se muestran en la tabla 3.

Mes	Irradiación (kWh/m ² /día)
Enero	4.9
Febrero	5.5
Marzo	6.2
Abril	6.4
Mayo	6.1
Junio	5.7
Julio	5.8
Agosto	5.8
Septiembre	5.2
Octubre	5
Noviembre	4.7
Diciembre	4.4
Promedio	5.5

Tabla 3 Irradiación en la UPAM

Fuente: *Elaboración Propia*

Metodología

Se realizó un seguimiento a la limpieza de los paneles solares, la cual inicio en el mes de enero de 2016 y finalizo en enero de 2017, durante ese periodo de tiempo se aplicó la técnica de limpieza de pértigas y agua, en los meses de enero, febrero, mayo, agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2016 y enero de 2017, y se comparó el PR que se obtuvo por inversor. Se aplicó en estos meses la técnica de limpieza porque es cuando existe más polvo en la universidad.

Las especificaciones que se tomaron en consideración para realizar la limpieza son: Agua para consumo humano, con un pH no mayor a 7 y 8 solidos por unidad, con esto se hace cumplir la garantía en caso de algún fallo, además de garantizar vida útil y en óptimas condiciones del panel. La técnica de limpieza utilizada fue el de "Pértigas y agua", para esto se utilizó una Motobomba de 6 HP, Jalador, Cepillo de cerdas finas, franela, la universidad cuenta con el equipo y material necesario para realizar la limpieza de los paneles, de tal forma que no hay que invertir ningún peso.

Para realizar la limpieza de los paneles solares se roció agua a presión con la motobomba para quitar el exceso de tierra, con el cepillo se remueve la tierra que no ha sido retirada con la presión de agua. Se vuelve a rociar agua para quitar la tierra que pudiera haber quedado en los paneles, enseguida se quita el exceso de agua con el jalador y con la franela se seca y se procura quitar el paño, como se muestra en la figura 7.

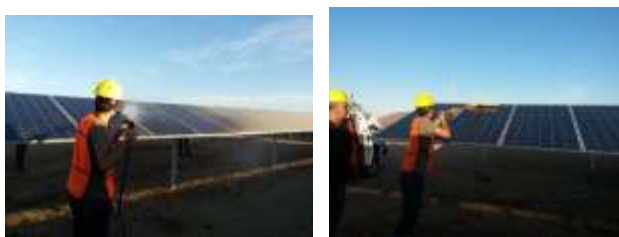


Figura 7 Limpieza de los paneles con la técnica de pértigas y agua

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 8 se muestran los paneles antes y después de aplicar la técnica de limpieza, como se puede observar en los paneles la deposición de polvo es uniforme.



Figura 8 Paneles antes y después de aplicar la técnica de limpieza

Fuente: Elaboración Propia

Resultados

En la figura 9 se observa un aumento promedio de aproximadamente el 11% por cada inversor en las mediciones antes y después de aplicar la técnica de limpieza. Para realizar este proceso se utilizó el equipo multifuncional de la marca “HT Instruments” para una completa verificación en instalaciones FV modelo “Solar I- V”.

Comparación de PR antes y después de la limpieza de los paneles

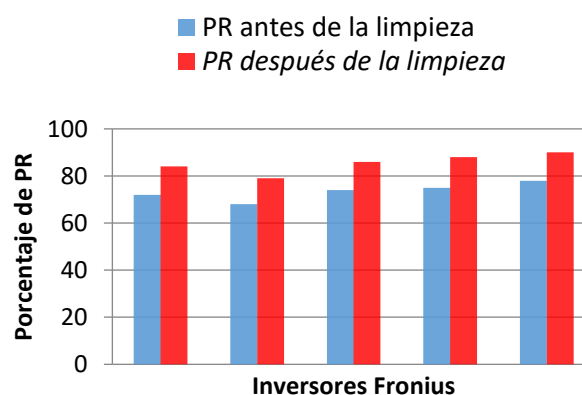


Gráfico 1 Gráfica de comparación de PR antes y después de limpieza.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4, se observa la cantidad de agua que se requiere para la limpieza del parque solar UPAM, que consta de 200 paneles.

Cantidad de agua utilizada para limpiar el parque solar UPAM con la técnica de Pértigas y agua		
Litros de agua por panel	Litros de agua por string	Litros de agua para el parque solar
2.3	92	460

Tabla 4 Gasto de agua en la limpieza total de paneles

Fuente: Elaboración Propia

El sistema fotovoltaico se puso en marcha en noviembre de 2014 y la primera limpieza se realizó en enero de 2016, como se muestra en la figura 10, los meses en que los paneles tenían suciedad y deposición de polvo su generación del parque solar UPAM osciló entre 7 y 7.4 MWh que fueron en los meses de marzo, abril, junio, julio y septiembre de 2016. Durante los meses que se aplicó la limpieza la generación del parque aumentó aproximadamente entre 11 y 12 %.

La limpieza se aplicó cada mes y cada dos meses, los resultados muestran que la generación se mantiene casi al mismo porcentaje en esos periodos, de tal forma que se tomó la decisión de realizar la limpieza de paneles cada dos meses.

Durante los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero se aplicó la limpieza cada mes ya que el parque solar recibe mayor polvo de los terrenos de siembra. Los resultados se muestran en la figura 10.



Figura 10 Resultados de potencia obtenidos antes y después de aplicar la limpieza de paneles

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 11 se muestra las toneladas de bioxido de carbono (CO₂) que se deja de emitir a la atmosfera, con esto se puede confirmar que los sistemas fotovoltaicos ayudan a la preservación del planeta.

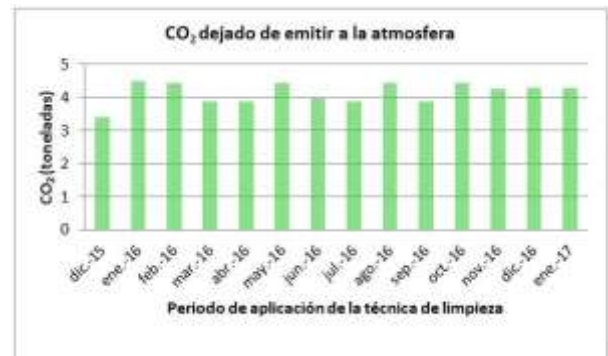


Figura 11 Bióxido de carbono dejado de emitir a la atmosfera

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 12 se muestra la potencia generada en el mes de septiembre cuando los paneles solares estaban sucios, en la figura 13 se muestra la potencia generada después de aplicar la técnica de pértigas y agua, como se observa en dichas figuras existe un aumento del 12 % en la producción de energía eléctrica en general después de aplicar la técnica de limpieza. En ambas figuras el eje x representa los días y el eje y la potencia generada.

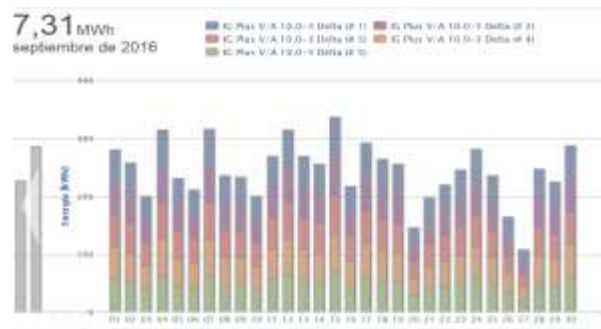


Figura 12. Generación de potencia en el mes de septiembre, cuando los paneles estaban sucios

Fuente: solarweb.com

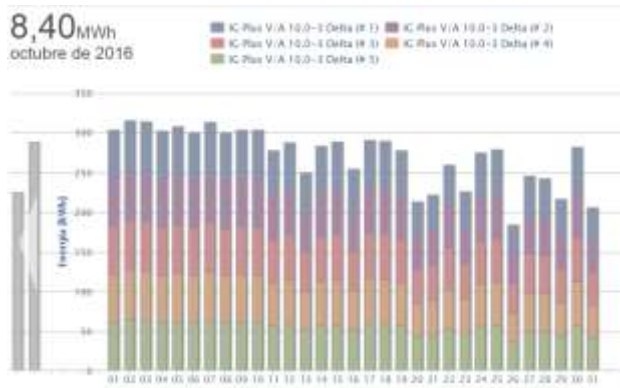


Figura 13 Generación de potencia en el mes de octubre, después de aplicar la técnica de limpieza

Fuente: solarweb.com

En la figura 14 se muestra la cantidad de CO₂ que se deja de emitir a la atmosfera en el mes de septiembre cuando los paneles estaban sucios, en la figura 15 se muestra la cantidad de CO₂ que el parque solar UPAM evita que llegue a la atmosfera después de aplicar la limpieza de los paneles, como se puede observar de las figura 12, 13, 14 y 15 se deja de emitir más CO₂ cuando se produce más potencia. Para generar 7.31 MWh se requieren 787.71 litros de gasolina y para generar 8.40 MWh se requieren 905.17 litros de gasolina, de tal forma que cuando se realiza la limpieza de paneles se dejan de quemar 117.46 litros de gasolina, ocasionando la disminución de CO₂ en favor del planeta.

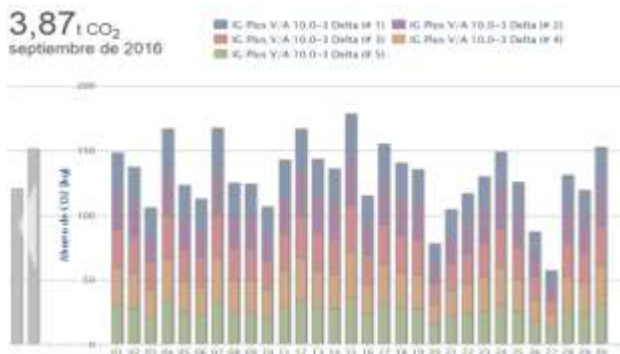


Figura 14 CO₂ dejado de emitir a la atmosfera cuando los paneles están sucios

Fuente: solarweb.com

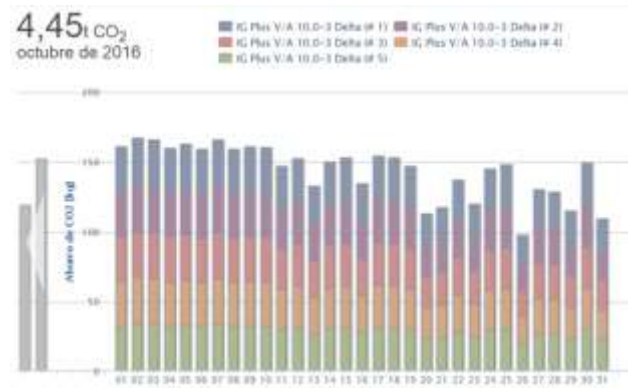


Figura 15 CO₂ dejado de emitir a la atmosfera cuando los paneles se les aplican la técnica de pértigas y agua

Fuente: solarweb.com

Agradecimiento

A la Universidad Politécnica de Amozoc por el “Apoyo a la Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico” y por gestionar los recursos ante las instancias correspondientes para el financiamiento del proyecto.

Conclusiones

En el proyecto se realizó la técnica de pértigas y agua a los paneles del parque solar UPAM para su limpieza, la cual debe ser una de las prioridades en el mantenimiento, pues la ubicación hace que el polvo sea algo casi imposible de combatir por lo que hacer limpiezas en periodos cortos garantiza un mejor rendimiento de la producción de energía.

Se llega a la conclusión que se requieren aproximadamente 460 litros de agua para realizar la limpieza del parque solar UPAM y los alumnos de la carrera de ingeniería en energía son los encargados de la limpieza con el asesoramiento de un profesor que ha tenido diplomados sobre manejo de paneles solares.

Con esta técnica evitamos perder entre 11 y 12% de potencia total del parque solar UPAM, con esta técnica de limpieza se evita la pérdida de una potencia aproximada de 0.8 MWh mensual, situación que beneficia considerablemente el aspecto económico de la universidad con un ahorro de \$ 21,859.00 anual. Con el uso de la técnica pértigas y agua y con una aplicación promedio de 5 veces al año se garantiza que el parque solar UPAM no tendrá pérdidas significativas en su producción energética anual. Con respecto a los combustibles fósiles se deja de quemar 117.46 litros de gasolina al mes cuando se realiza la limpieza de los paneles. El funcionamiento del parque ayuda a disminuir 50.35 toneladas de CO₂ al año al planeta.

Este estudio de técnicas de limpieza es específicamente para este parque solar ya que cada parque cuenta con factores particulares que afectan de manera directa a la limpieza de paneles como el tipo de clima, la frecuencia de corrientes de aire, el tipo de suelo, y la forma en cómo se distribuyen los paneles en la planta y la técnica de limpieza que se elija y solo podría usarse como referencia para algún otro parque, con los equipos idóneos y el personal necesario, esto para evitar dañar los paneles solares y tener la mayor producción energética.

El trabajo a futuro es la implementación de un manual de manejo de paneles solares donde se incluya la limpieza de los paneles, las medidas de seguridad y el uso de equipo de protección personal.

Referencias

Fletes, N., Paredes, C., Dibene, L. (2016). Eficiencia en la producción de energía de un panel fotovoltaico a diferente inclinación en Nuevo Vallarta, Nayarit. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3.

Dibene-Arriola, L., Paredes-Vázquez, C., Messina-López, V. (2016). Efectos del polvo en el desempeño de un arreglo fotovoltaico instalado en un clima costero. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3.

Cabanillas, R.E., Munguia, H. (2011). Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3.

Flores, O., González, R., Juárez, V., Huitzil, I. (2016). Análisis comparativo de rendimiento, costo y producción energética entre el sistema aislado e interconectado de la empresa cartón corrugado Puebla S.A. de C.V. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3, 9.

Zorrilla, J., Piliouge, M., Carretero, J., Bernaola, P., Carpena, P., Mora, L., Cardona, M. (2011). Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules. *Congreso Mundial de Energías Renovables*, Linkpoing, Suecia.

Nahar, N., Gupta, J. (1990). Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India. *Solar Wind Technol.* 7 (2), pp. 237–243.

Hee, J., Kumar, L.V., Danner, A.J., Yang, H., Bhatia, C.S. (2012). The effect of dust on transmission and self-cleaning property of solar panels. *Energy Proc.* 15, pp. 421–427.

Liqun, L., Zhiqi, L., Chunxia, S.Z.L. (2012). Degraded output characteristic at atmospheric air pollution and economy analysis of PV power system: a case study. *Przegl. Elektrotech. (Electr. Rev.)* 88 (9A), pp. 281–284.

Sayyah, M.N., Horenstein, M.K., Mazumder. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy* 107, pp. 576–604

Universidad de Sevilla. (2015, 10 de diciembre) Estudio del efecto de la limpieza de módulos en plantas fotovoltaicas “Análisis De Distintas Tecnologías De Limpieza”. Recuperado el 10 de diciembre de 2015, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70290/fighero/6ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf>

Campos, F. M. (2012). “Estudio de viabilidad en planta solar fotovoltaica de 500 kW sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla” Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla.

Hegazy, A. (2001). Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renew. Energy* 22 (4), pp. 525–540.

Castilla, J. (2007). Introducción a la energía solar fotovoltaica. Pp: 15-16. Manual del instalador energía fotovoltaica. Gráficas Celarayn, España.

Hasan, A., Sayigh, A. (1992). The effect of sand dust accumulation on the light transmittance, reflectance, and absorbance of the PV glazing. 2º Congreso Mundial de Energías Renovables, Reading, Reino Unido, pp. 461–466.

González, R., Jiménez, H., Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IIE*, octubre-diciembre del. México.

Qasem, H., Betts, T., Müllejans, H., AlBusairi, H., Gottschalg, R. (2012). Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 22, pp. 218-226.

Ali Al Shehri, B. (2016). Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass. *Solar Energy, journal homepage: www.elsevier.com/locate/solener*, 8.

García, M., Marroyo, L., Lorenzo, E., Pérez, M. (2011). Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in Navarra. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 19 (2), pp. 211–217.

Lorenzo, E., Moretón, R., Luque, I. (2013). Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 22, pp. 666–670.

Mani, M., Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 3124-3131.

Procesamiento dactilar usando Transformada de Fourier

HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Ángel*†, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

Universidad Autónoma del Estado de México

Recibido 7 de Julio, 2017; Aceptado 15 de Septiembre, 2017

Resumen

La búsqueda de métodos matemáticos que garanticen un mejor procesamiento de imágenes ha motivado el uso de nuevos métodos y técnicas de reconstrucción de una imagen, en este trabajo se hace uso de transformada de Fourier para el procesamiento de una huella dactilar. La aplicación del trabajo se enfoca hacia la biometría dactilar ya que tiene como objetivo principal el uso de la herramienta de Fourier de MATLAB, para el procesamiento de diversas imágenes biométricas y la aplicación de filtros digitales. La Transformada de Fourier se usa directamente en el procesamiento de los píxeles de una imagen reduciendo el ruido, efectos de captura, digitalización y transmisión. El objetivo principal de este trabajo es obtener el procesamiento de una huella digital preservando las características dactilares de la persona. Para conocer la validez del método propuesto se compararan los resultados obtenidos contra el levantamiento de la misma huella dactilar, mediante técnicas convencionales utilizadas en lofoscopia.

Fourier, biométrica, procesamiento, ruido, filtros

Abstract

The search for mathematical methods of image processing has motivated the use of new techniques. This work uses the Fast Fourier Transform for the processing of fingerprint images. The application of the work task effect the measurable search of the Fast Fourier Transform and the assessment output with different types of fingerprint images. FFT numerical tool and digital filters are designed in Matlab. FFT is used in the processing of the pixels to reduce noise, capture, scan and transmit effects of the image. The main objective of this work is to obtain the processing of a fingerprint preserving the original physical characteristics of the corresponding person. To know the validity of the proposed method, the results obtained against the lifting of the same fingerprint are compared using conventional techniques used in lofoscopia.

Fourier, biometric, processing, noise, filters

Citación: HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Ángel, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. Procesamiento dactilar usando Transformada de Fourier. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:36-45

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: mhernandez531@alumno.uaemex.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La biometría es el reconocimiento automático de un individuo midiendo ciertas características físicas y/o de comportamiento. Tradicionalmente las contraseñas y las tarjetas ID han sido usadas para moderar el acceso a lugares restringidos, sin embargo, en estos sistemas la seguridad puede ser violada cuando se divulga la contraseña a un usuario no autorizado o cuando un impostor roba la tarjeta. Es por eso que las huellas dactilares ofrecen estándares aceptables de confiabilidad como menciona Badler (1991) quien afirma que la probabilidad de encontrar dos huellas dactilares similares es del orden de 1.9×10^{-15} .

Las huellas dactilares son rasgos que identifican al individuo desde su nacimiento. Kuchen (2004) dice que las huellas dactilares se forman completamente alrededor de los siete meses de desarrollo del feto y sus cambios son mínimos a lo largo de su vida.

Actualmente identificar correctamente a una persona por sus rasgos físicos es muy importante. En este trabajo se hace el uso de la Transformada de Fourier para filtrar una huella dactilar con la finalidad de mejorar el análisis de los píxeles que conforman la imagen. La transformada de Fourier y los filtros digitales como herramientas matemáticas han tenido gran variedad de aplicaciones en el procesamiento digital de imágenes, diseño y el desarrollo de algoritmos para su implantación como lo describe Medina (2010) y Hernández (2016).

O'Gorman (1998) propuso el uso de filtros contextuales por primera vez para aclarar imágenes de huellas dactilares. Estos usan un alisamiento que mejora el eje paralelo a los bordes. El filtro incrementa el contraste en una dirección perpendicular mientras se realiza un alisamiento de cada pixel de la imagen procesada.

González (2003) argumenta que el ruido en una imagen se manifiesta de diversas formas dependiente de la señal o, independiente de la señal de forma resumida es la información no deseada que contamina la imagen ya que el origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen (errores en los sensores), como en el de transmisión (debido a interferencias en el canal de transmisión).

García (2016) dice que el procesamiento digital de imágenes (PDI) es empleado para el análisis y obtención de mejores precisiones en la información en una imagen.

El objetivo principal de este trabajo es la creación de un algoritmo computacional para el análisis y, procesamiento de una huella dactilar usando transformada de Fourier con filtros digitales para mejorar la calidad de imagen.

Para conseguir tal objetivo se propone la creación de un algoritmo de filtrado con Transformada de Fourier para aclarar y reconstruir información de cada pixel de la huella. El trabajo se compone de los siguientes apartados:

- Adquisición de la huella usando el lector óptico
- Preprocesamiento de la huella por medio de técnicas convencionales en niveles de escala de grises e histogramas.
- Filtro de imágenes usando transformada de Fourier.

Este trabajo almacena y utiliza las minucias de las huellas dactilares para, realizar la comparación de las características más significativas descritas en diferentes niveles de tonalidad en escala de grises e histogramas.

Se utiliza esta información para realizar la técnica de filtrado de imágenes usando transformada de Fourier. Para verificar la técnica se utilizó el método convencional de obtención de la huella por medio de un sensor contra la imagen filtrada por Fourier.

Minucias de la huella dactilar

Existen varias clasificaciones de las huellas dactilares, en este trabajo se utilizaron las descritas por los siguientes autores:

Bansal (2011) menciona que la huella dactilar ha utilizado por siglos y su precisión se ha demostrado ampliamente en nuevos estudios. Cappelli (2006) argumenta que una huella dactilar es el patrón de valles y crestas en la superficie de un dedo.

Mientras Abushariah (2012) menciona que la huella en forma general, esta se divide en tres regiones o zonas: Núcleo, Zona Marginal y Zona Basal como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Zonas dactilares

Fuente: Abushariah 2012

Donde las zonas de la huella definidas en la figura 1 son:

- A es la Zona Marginal
- B la Zona del Núcleo

- C la Zona Basal

Olivares (2008) y Thai (2010) afirman que las huellas digitales tienen características visibles que son: las crestas, los valles y las minucias, donde una cresta se define como un segmento de curva, y un valle como la región entre dos crestas adyacentes como se muestra en la siguiente figura 2.

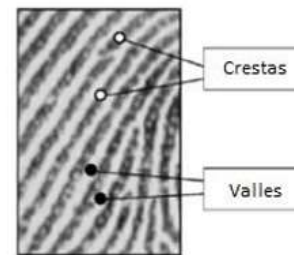


Figura 2 Crestas y Valles de una huella dactilar

Fuente: Thai 2010

(2011) describe que las minucias son los puntos en el que termina una cresta o se bifurca en dos o más crestas. Se define en términos de sus coordenadas (x, y) como se muestra en figura 3.

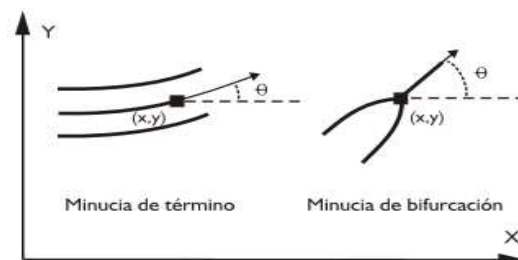


Figura 3 Minucias dactilares

Fuente: Bansal 2011

Desarrollo

En este trabajo se aplica un filtro a escala de grises en el dominio espacial que propuso O'Gorman (1989), el cual tiene por objetivo aclarar imágenes de huellas dactilares.

Los filtros según Qian (1999) tienen una propiedad importante que consiste en una óptima resolución a la frecuencia, donde funciones como las de Gabor pueden formar una representación general de las imágenes originales.

Hoy en día es muy común usar filtros basados en la frecuencia como la transformada de Fourier, debido a su precisión y que tiene gran resolución en el filtrado de imágenes en cuyas características son del tipo jerárquico en escala de grises.

Hong (1989) y Castleman (1996) argumenta que cuando se aplican filtros a escala de grises, la representación matemática simétrica de un filtro en una imagen es dada por la ecuación (1):

$$G(x, y) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{\delta X^2} + \frac{y^2}{\delta Y^2} \right] \right\} \cos(2\pi fx) \quad (1)$$

Dónde: f, es la frecuencia de una senoide plana bidimensional al largo del eje x; y δx y δy , son las desviaciones típicas especiales que definen una envolvente gaussiana al largo de los ejes.

La imagen de la huella se puede filtrar en el dominio de la frecuencia de Fourier para eliminando las altas y bajas frecuencias con lo cual suavizan los pixeles, realzando los bordes y eliminando el ruido. En la siguiente figura 4 se muestra diagrama de bloques del filtrado de la huella dactilar usando transformada de Fourier.

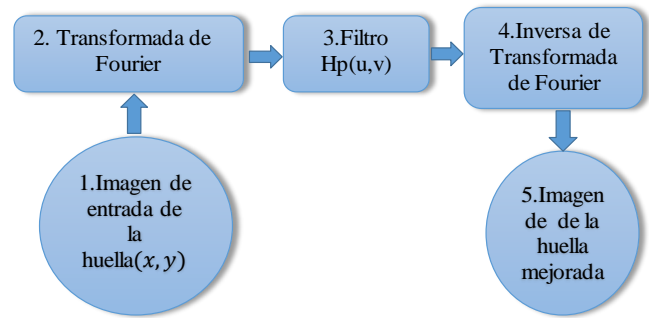


Figura 4 Diagrama del procesamiento de la huella usando transformada de Fourier

Fuente: basada de González, 2004.

1. La imagen es subdividida en recuadros con coordenadas (x,y)
2. Se aplica la transformada de Fourier a cada subconjunto
3. Se utiliza un filtro jerárquico Hp en coordenadas (u,v), que consiste en suavizar la figura antes de regresarla al sistema cartesiano (x,y). El filtro Jerárquico consiste en subdividir en niveles la huella como se muestra en la figura 5.

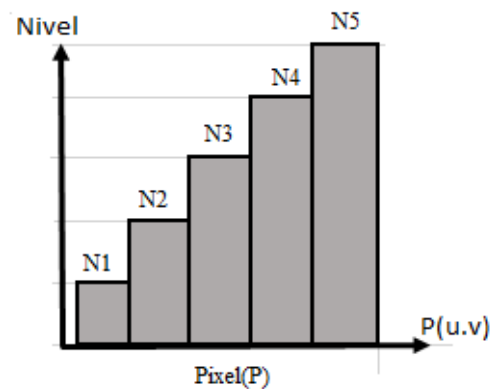


Figura 5 Comportamiento del filtro jerárquico

Fuente: Modificado de González, 2004

El resultado en el dominio del espacio consiste en un realzado de los cambios bruscos de niveles de grises, descritos por la siguiente expresión:

$$N(u, v) = \left\{ \begin{array}{l} N1 \text{ si } P(u, v) \leq 50 \\ N2 \text{ si } P(u, v) 50 < 100 \\ N3 \text{ si } P(u, v) \geq 100 < 150 \\ N4 \text{ si } P(u, v) \geq 150 < 200 \\ N5 \text{ si } P(u, v) \geq 200 < 255 \end{array} \right.$$

Donde $P(u,v)$ es el pixel en la coordenada (u,v) y los niveles jerárquicos son determinados de N1 a N5. Los filtros Jerárquicos realzan los cambios bruscos suprimiendo frecuencias menores originadas por el ruido de la imagen.

4. Se realiza la inversa de la transformada de Fourier para regresar al sistema cartesiano (x,y) .

5. Se obtiene la imagen de la huella mejorada y filtrada.

Resultados

Antes de aplicar la técnica de filtrado de Fourier, se describe el proceso de levantamiento de la huella dactilar, preprocesamiento en niveles de escala de grises y la obtención del histograma.

Levantamiento de las huellas

Para realizar el estudio se tomaron tres huellas dactilares del pulgar de la mano derecha, cuyas características de los individuos se muestran en la tabla 1.

Individuo	Edad	Género	Ocupación
1	25 años	Masculino	Estudiante
2	17 años	Femenino	Ama de casa/Estudiante
3	38 años	Femenino	Ama de casa

Tabla 1 Características generales de los individuos

Fuente: Elaboración propia.

Las huellas obtenidas se muestran en la figura 6, las cuales fueron capturadas a través del dispositivo biométrico Digital personal.

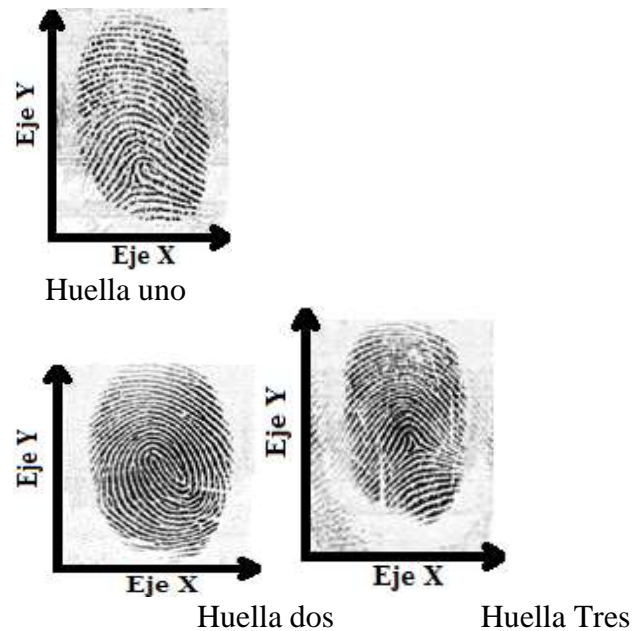


Figura 6 Huellas dactilares usando el lector óptico

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 6, el desgaste de una huella es un factor importante para la correcta captura. Para los individuos 1 y 2 la huella fue impresa correctamente mientras que para el individuo número 3 se observa el desgaste de su huella.

Preprocesamiento y tratamiento de la huella

En los gráficos 1, 2 y 3 se muestran las huellas dactilares en la matriz jerárquica de la escala de grises.

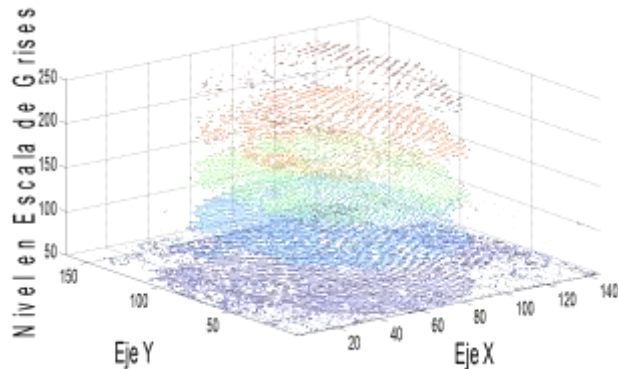


Gráfico 1 Matriz Jerárquica de la huella dactilar

Fuente: *Elaboración propia.*

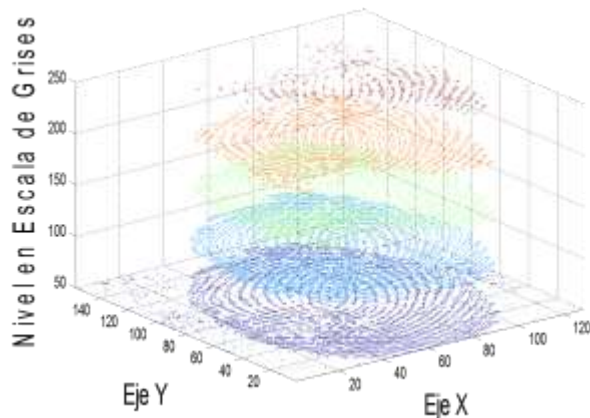


Gráfico 2 Matriz Jerárquica de la huella dactilar 2

Fuente: *Elaboración propia.*

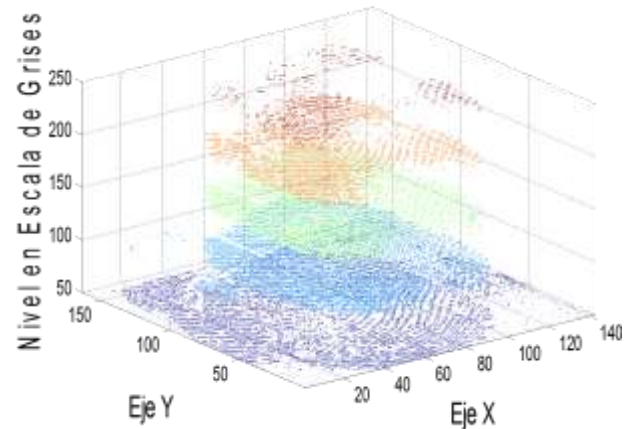


Gráfico 3 Matriz Jerárquica de la huella dactilar 3

Fuente: *Elaboración propia*

Como se observa en la gráfico 1 las huellas fueron separadas en 5 niveles azul marino, azul cielo, verde, naranja y rojo, donde cada nivel corresponde a la intensidad del pixel marcado, entre mayor es el nivel de intensidad del pixel mayor es el clúster de la escala de grises.

En los gráficos 1, 2 y 3 se aprecia que los valores máximos se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- Huella 1 Zona marginal, núcleo y basal
- Huella 2 Zona núcleo y marginal
- Huella 3 Zona marginal

Una manera práctica de mostrar la información de la gráfico 1, es por medio de histogramas, en el cual podemos representar la frecuencia de cada nivel de la escala de grises por cada huella (ver gráficos 4, 5,6).

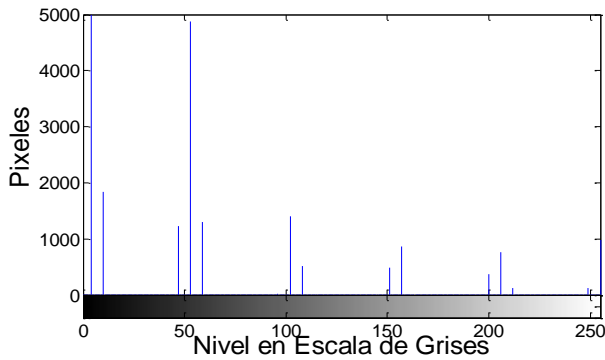


Gráfico 4 Histograma de la huella 1

Fuente: Elaboración propia.

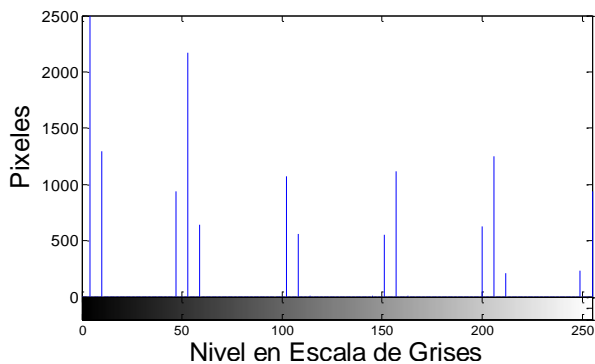


Gráfico 5 Histograma de la huella 2

Fuente: Elaboración propia.

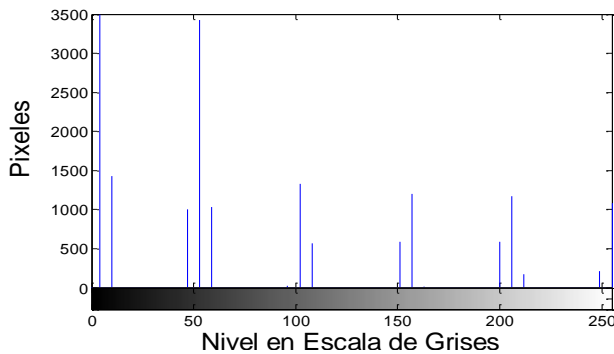


Gráfico 6 Histograma de la huella 3

Fuente: Elaboración propia

Se observa en el histograma que los niveles predominantes se localizan en aproximadamente 50 de la escala de grises llegando casi a los 5000 píxeles para la huella 1, para 3500 píxeles para la huella 2 y 2500 para la Huella 3.

Para cada histograma de cada huella, se observa que la distribución de los píxeles oscilan en promedio en el valor 50 esto es porque la mayoría de los valores matriciales representan la intensidad de la imagen de la huella en estos casos el nivel de grises siempre tiende a negro, puesto que se trabajó con una imagen en blanco y negro.

Como se observa el histograma es una herramienta eficiente para determinar la frecuencia de cada nivel de píxeles de la huella digital, sin embargo, tiene el inconveniente de perder información de la posición de la zona dactilar en el plano cartesiano (X,Y), trabajos futuros estarán encaminados a de determinar histogramas que conserven dicha información.

Friedrich (2014) y Hernández (2016) afirman que la transformada de Fourier es una herramienta importante dentro del procesamiento digital de imágenes. Esta es utilizada para descomponer una imagen en sus componentes fundamentales. La salida de la transformación mapea a la imagen al dominio de Fourier, mientras que la imagen de entrada está en el dominio espacial. Cada punto de la imagen en el dominio de Fourier representa una frecuencia particular contenida en la imagen en el dominio del espacio. La transformada de Fourier de una imagen nos permite aplicar distintos tipos de filtros a la imagen para mejorar la visualización e información de esta.

Sherlock (1994) propuso aplicar las ecuaciones de Fourier (2 y 3) a cada píxel de una imagen para conseguir un aclaramiento de la misma.

$$I_{enh}(x, y) = FFT^{-1}\{F(u, v)|F(u, v)^k\} \quad (2)$$

$$F(u, v) = FFT(I(x, y)) \quad (3)$$

Cuando se aplica un filtro en blanco y negro como el que se aplicó en las huellas, la imagen se convierte en una imagen binaria en donde cada pixel tiene asignado un valor lógico de 0 ó 1, como se muestra en la tabla 2.







Huella	Sin filtro	Con filtro
H1		
H2		
H3		

Tabla 2 Representación de huellas filtradas

Fuente: *Elaboración propia.*

Como se muestra en la tabla 2 se elimina el ruido de las huellas mejorando la resolución sobre las imágenes filtradas en blanco y negro, pero, en algunas partes de las huellas se pierden características al momento de procesarla.

Otro aspecto interesante que muestra la tabla 2 es que el desgaste que sufre una huella es directamente proporcional con el tipo de actividad y edad del individuo. En la tabla 2 se muestra el desgaste de la huella tres, inclusive faltando ciertas minucias de su captura.

Conclusiones

Cuando se escanea una huella digital existen variaciones causadas por diferentes factores tales como movimientos del dedo al momento de la captura, distintas presiones en las áreas laterales del escáner, o hasta si el dedo este sucio o con alguna imperfección. Por lo que en algunas ocasiones habrá más información que en otras, aunque se trate de la misma huella.

En este trabajo se eligió la transformada de Fourier debido a que contiene procesos como el realce de bordes y la eliminación del ruido, debido a que como se observa en la tabla 2 la toma de la huella dactilar contiene un grado significativo datos faltantes o ruido propio del lector.

La tabla 2 muestra que al aplicar el filtro en blanco y negro sobre las huellas dactilares es posible obtener una mejor nitidez de la imagen, debido a que el filtro elimina información que no forma parte de la huella, como es el ruido que se localiza fuera de la zona marginal y basal.

Independientemente del dispositivo que se utilice la repetitividad de la captura de una huella dactilar no es garantizada, esto es debido a que no siempre se puede asegurar:

- El mismo ángulo de inclinación de la huella
- La misma presión de las zonas marginal, basal y núcleo ejercida sobre el lector

- Pequeños movimientos que tornen borrosa la imagen
- El desgaste de las minucias

Es por eso que al no estar asegurada la repetitividad es necesaria la aplicación de una técnica como la presentada en este artículo, mejorando el aclaramiento y disminuyendo el ruido de la imagen.

Como trabajo futuro se propone el uso de los niveles jerárquicos para realizar el filtrado de la huella dactilar, es decir cambiar el filtro digital por un filtro de 5 niveles los cuales se muestran en los gráficos 1, 2 y 3.

Trabajos futuros estarán encaminados a determinar histogramas que conserven dicha información de las minucias después del uso de la técnica Fourier, debido a que la técnica suele perder información de la huella dactilar como se muestra en rojo en la tabla 2.

Referencias

Hernández,A;Benítez,C;Morales,O y Martínez,D.(2016). Análisis de algoritmos para reconocimiento de imágenes digitales. *Revista de Sistemas Computacionales y TIC's*, Vol.2 No.5 82-93.

Garcia,U;Márquez,J; Sánchez,M y Sabino, B.(2016). Detección y evaluación de daños en pavimento asfáltico mediante procesamiento de imágenes digitales. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, Vol.2 No.5 12-18.

Hernández, B;Carrasco,J; Martínez ,José ; Camacho-, O.(2016). Ajuste de filtros wavelets usando inteligencia artificial para compresión de imágenes,*Revista Polibits*, Vol. 53, 23-30.

Friedrich ,V.(2014). Transformada de Fourier de una Imagen y filtrado de una imagen en el dominio de la frecuencia. *Funciones de Variable Compleja*,Vol.3,No 4,15-18.

A. A. M. Abushariah, T. Gunawan, J. Chebil y M. A. M. Abushariah,.Automatic Person Identification System Using Handwritten Signatures,*Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2012 International Conference, pp. 560-565, 3-5 July 2012.

L. H. Thai y H. N. Tam(2010).Fingerprint Recognition Using Standardized Fingerprint Model. *IJCSI International Journal of Computer Science*, Vol. 7, nº 7, pp. 11-17.

Castleman K (1996) "Digital Image Processing" Prentice Hall NJ.

R. Medina, D.González.(2010).Transformada de Fourier en aplicación en el diseño de filtros digitales para el procesamiento de imágenes". 8th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Arequipa, Perú.

M. Kuchen, C. Newell. "A Model for fingerprint formation". *Europhys letters*. Vol. 68. 2004. pp.141-147.

W. Badler. "Dermatoglyphics". *Science transition*. Vol. 9. 1991. pp. 95.

L. O'Gorman,"Fingerprint Verification",In *Biometrics:Personal Identification in a Networked Society*,A,K.Jain,R.Bolle,and S.Pankanti(editors),Kluwer Academic Publisher,pp 43-64,1998.

González, Rafael C.Digital Image Prosesising Using MATLAB,Prentice –Hall,Inc,2003,pg 597

S. Qian, D. Chen. "Joint time-frequency analysis". IEEE Signal Processing Magazine. Vol. 16. 1999. pp. 52-67.

L.Hong,"Automatic Personal Identification Using Fingerprints",Ph.D.Thesis,Department of computer Science and Engineering,Michigan State University,East Lansing,pp.92-106,1998.

R. Bansal, P. Sehgal y P. Bedi.(2011).Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, No. 3.

R. Cappelli, D. Maio, D. Maltoni, J. L. Wayman y A. K. Jain.Performance Evaluation of Fingerprint Verification Systems,IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol 28, nº 1, pp. 3-18, 2006.

Olivares,J.(2008). Reconocimiento y validación de huellas dactilares utilizando una Red Neuronal.Revista de tecnología.Volumen 7, No. 1, ISSN1692-1399, p. 55-60.

González Rafael C y Woods E. Richard (2004) "Digital Images Processing using MATLAB". AddisonWesley / Diaz de Santos.

B. G. Sherlock, D. M. Monro, K. Millard.(1994). Fingerprint enhancement by directional Fourier filtering. *Visual Image Signal Processing*. Vol. 141. 1994. pp. 87-94.

Monitoreo del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la máquina BOY 25D utilizando LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB6009

LÓPEZ-CORELLA, José*†, HERNÁNDEZ-RUIZ, Sergio, VÁZQUEZ-CUEVAS, Ignacio y HERRERA-VELARDE, Maribel

Departamento Metal Mecanica, Ingenieria Mecatronica, Instituto Tecnológico de Nogales

Recibido 7 de Julio, 2017; Aceptado 15 de Septiembre, 2017

Resumen

El presente trabajo es continuación de la investigación realizada en el Instituto Tecnológico de Nogales llamada: “Automatización del Proceso de Moldeo por Inyección de Plásticos de la Máquina BOY 25D Utilizando Arduino y el Shield SIM 900 GSM/GPRS”, la cual fue presentada en el Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática 2016. En específico dentro del proceso de inyección de plásticos, los parámetros que fueron monitoreados son los siguientes: Niveles de aceite. Temperatura del aceite. Presiones de inyección. Presión (tonelaje en molde cerrado). Todos estos tomados de los indicadores luminosos de la máquina ya mencionada. Con el fin de conocer el estado actual que guarda la máquina y generar alertas cuando estos excedan los límites, estas alertas son enviadas por medio de el módulo Bluetooth como mensajes al celular previamente registrado o vía correo electrónico utilizando una aplicación desarrollada con LabView, evitando un posible daño a la máquina.

LabView, Bluetooth, Boy 25D

Abstract

This paper is a continuation of the research carried out at the Instituto Tecnológico de Nogales called: “Automatización del Proceso de Moldeo por Inyección de Plásticos de la Máquina BOY 25D Utilizando Arduino y el Shield SIM 900 GSM/GPRS”, which was presented at the Interdisciplinary Congress of Renewable Energies, Industrial Maintenance, Mechatronics and Informatics 2016. Specifically within the plastics injection process, the parameters that were improved and updated for monitoring are as follows: Oil levels. Oil temperature. Injection pressures. Pressure (closed mold tonnage). All these taken from the lights of the machine already mentioned. In order to know the current status of the machine and generate alerts when they exceed the limits, these alerts are sent via the Bluetooth module as messages to the cell phone previously registered or via email using an application developed with LabView, Avoiding possible damage to the machine.

LabView, Bluetooth, Boy 25D

Citación: LÓPEZ-CORELLA, José, HERNÁNDEZ-RUIZ, Sergio, VÁZQUEZ-CUEVAS, Ignacio y HERRERA-VELARDE, Maribel. Monitoreo del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la máquina BOY 25D utilizando LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB6009. Revista de Innovación Sistemática. 2017. 1-3:46-52

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: lopez.alejandro@itnogales.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La industria de productos plásticos ha tenido un crecimiento muy grande desde 1945 y una gran parte de este crecimiento ha sido en la inyección de plásticos, En un mundo cada vez más globalizado la velocidad de respuesta es un factor primordial para aprovechar las ventajas competitivas que involucra poner un producto en el mercado antes que otra empresa. Maya Enrique (2007), el moldeo por inyección de plásticos es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido a un molde cerrado a presión, a través de un orificio pequeño llamado compuerta, en el molde el material se solidifica, la pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada. El moldeo por inyección es una técnica muy popular para la fabricación de artículos, debido a la versatilidad de las piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, el diseño escalable y altos niveles de producción Malloy (2010).

En el laboratorio de Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Nogales, contamos con una máquina de inyección de plásticos modelo Boy 25D, tiene la característica de contar con un panel de leds como indicadores de parámetros de funcionamiento y alarmas, cuando se requiere dejar trabajando la máquina por un tiempo largo, es necesario estar bajo supervisión directa del panel de leds, monitoreando visualmente si todos los procesos se encuentran trabajando adecuadamente y evitar un daño en la máquina y en las piezas López José (2016). Es decir siempre es necesario supervisar personalmente la máquina para verificar si todos los procesos están trabajando dentro de los límites permisibles. Por esta razón se decidió trabajar en la automatización del monitoreo de los siguientes parámetros:

- Monitoreo de los niveles de aceite.

- Que haya material.
- Temperatura del aceite.
- Presiones.
- Presión (tonelaje en molde cerrado).
- Guardas cerradas correctamente.

Para esto se utilizó la plataforma LabView y un módulo Bluetooth.

El trabajo se encuentra organizado en las siguientes secciones, en la primera se presenta el componentes del sistema y una breve descripción teórica de algunos conceptos, en la segunda sección el sistema propuesto, en la tercera se muestran los resultados obtenidos y por último se presentan las conclusiones.

Componentes del Sistema

Plataforma LabView

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) figura 1 es una plataforma y entorno de programación gráfico para diseñar sistemas, usado por ingenieros e investigadores. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real, usando iconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Ofrece una integración con múltiples dispositivos de hardware y brinda múltiples bibliotecas integradas para análisis avanzado de datos, todo para crear instrumentación virtual.



Figura 1 Plataforma LabVIEW

Fuente: ni.com

Tarjeta DAQ NI USB-6009

La adquisición de datos (DAQ) figura 2 es el proceso mediante el cual se puede medir un fenómeno eléctrico o físico (como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido) por medio de una computadora (PC) figura 3. Un sistema DAQ consta de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software.

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior.



Figura 2 Tarjeta DAQ

Fuente: ni.com

Funciona como dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas.



Figura 3 Proceso DAQ

Fuente: ni.com

Tarjeta USB Bluetooth

La transmisión de datos por medio de Bluetooth es una tecnología para redes inalámbricas entre distintos dispositivos mediante una radiofrecuencia segura de 2.4 GHz figura 4



Figura 4 Bluetooth utilizado

Imagen ilustrativa

Fuente: ni.com

Sistema Propuesto

En la figura 5, se muestra una foto de el sistema propuesto, la máquina no cuenta con una pantalla digital para el monitoreo o ajustes de los parámetros de operación, sin embargo cuenta con regletas que son utilizadas para ajustar dichos valores.

Cuando el valor esta en 0 indica que no se encuentra activado el indicador luminoso, pero cuando el valor de entrada es mayor a 0, indica que una alarma ha sido activada y dependiendo del indicador es el parámetro de operación fuera de rango, es entonces que el programa en LabVIEW dará la orden de mandar correo electrónico y mensajes por medio del dispositivo Bluetooth a dispositivos ya registrados ver figura 9a, 9b y figura 10a y 10b, indicando cual indicador esta activado, en otras palabras cual puerto de entrada analógica se encuentra con una lectura mayor a 0.



Figura 9 Llegada de alertas al celular

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN



Figura 10 Llegada de alertas al correo electrónico

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN

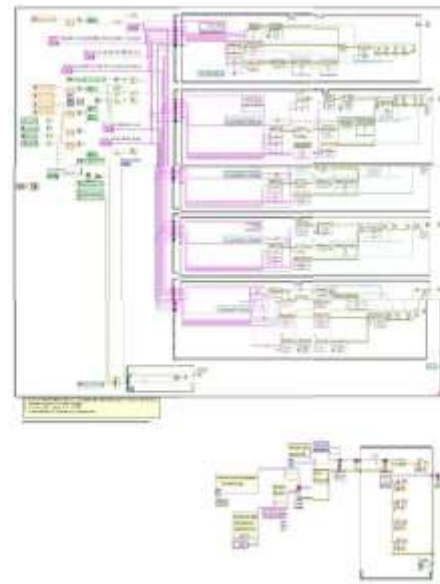


Figura 11 Fragmento de código donde detecta alarma y envía mensaje y/o correo electrónico

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN



Figura 12 Interface gráfica de monitoreo y alta de dispositivos a envía mensaje y/o correo

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN

Resultados Obtenidos

Se ha realizado un análisis de su comportamiento y se ha evaluado la efectividad de la tecnología, lo anterior con la finalidad de registrar las variables que intervienen en los procesos antes mencionados, optimizar los recursos y atender alarmas generadas en el proceso a tiempo, antes de que la máquina pueda sufrir algún tipo de daño, como resultado tenemos la información que se muestra en la siguiente tabla 1.

Codigo	Parametro	Descripcion
H20	Guarda	Guarda mal cerrada o obstruida
H05	Niveles de aceite	Asegura que el niveles de aceite sean los adecuados
H05T	Temperatra de aceite	Asegura que la maquina no se este sobrecalentando y este en temperaturas adecuadas
H54	Precion de aceite	Asegura que la maquina este inyectando en sus parámetros de presión
B10W	Presion e cierre molde	Asegura que la maquina este inyectando en sus parámetros de presión

Tabla 1 Alarmas enviadas por correo

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN

Las mediciones fueron adquiridas sin problemas de igualmanera la comunicación entre todos los dispositivos que intervienen en el proceso. Un solo detalle a considerar las fotorresistencias tardan en estabilizarse después de ser excitadas, por lo que se añade un retardo (delay) en el software para los tiempos de lectura, evitando que no se generen alertas falsas, o bien, para que no se envíen más de un mensaje y/o correo electrónico con la misma alerta.

Conclusiones

Uno de los principales objetivos del presente trabajo fue el de establecer un mecanismo que pudiera monitorear constantemente el funcionamiento de las principales variables de operación de la máquina Boy 25D.

Esto con el fin de que si alguna de estas variables saliera de rango, se pueda detectar con tiempo y por medio del NI DAQ USB-6009 y Bluetooth enviar mensajes a las personas encargadas de la máquina avisándole que tiene problemas, así como el código de falla y archivos adjuntos en el correo por esta razón se decidió hacer la aplicación en LabView (ver figura 11). Con el fin de atacar el problema lo más pronto posible evitando posibles daños en la máquina y no retrasando la producción más de lo debido.

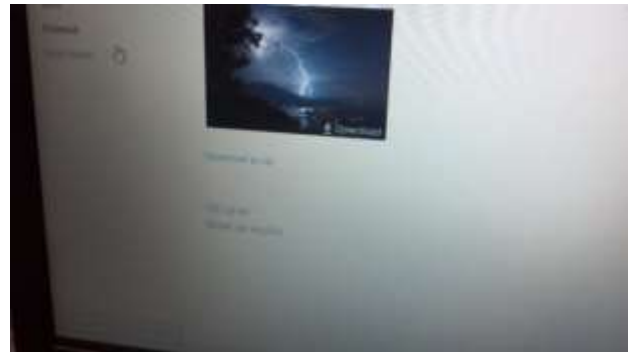


Figura 11 cuerpo del correo electrónico con archivos adjuntos

Fuente: Laboratorio de moldeo ITN

La diferencia principal de esta investigación respecto a la anterior es la implementación de nuevas tecnologías que a corto plazo generan muchos más costos ya que la tarjeta DAQ, Bluetooth y acceso a internet son más costosos que la tarjeta arduino pero a futuro la tarjeta arduino y el modulo GSM si se presentan muchas alertas se genera mucho más costo en los mensajes de texto enviados.

A futuro se pretende instrumentar y automatizar los parámetros de temperaturas de barril y presiones del proceso de moldeo para de esta manera implementar moldeo científico y tener un mejor control de los procesos de moldeo.

Referencias

Evans Brian (2011). “Beginning Arduino Programming”, writing code for the most popular microcontroller board in the world, technology in action. ISBN: 978-1-4302-3778-5.

Maya, Enrique. (2007), Diseño de moldes de inyección de plásticos con ingeniería concurrente, tesis de obtención de grado, IPM México D.F. p. 98.

Malloy (2010), R., Plastic Part Design for Injection Molding, Hanser Publishers. ISBN 1-56990-129-5

<http://www.ni.com/webcast/439/es/>

Cogdell J. R. (2000). Fundamentos de Electrónica. Pearson Educación. ISBN: 968-444-470-2

Malloy Robert A. (2nd Edition) Plastic Part Design for Injection Molding. ISBN: 978-1-56990-436-7.

López José, Hernández Sergio, Ortiz Bertha, González Sara, (2016). Automatización del Proceso de Moldeo por Inyección de Plásticos de la Máquina BOY 25D Utilizando Arduino y el Shield SIM900 GSM/GPRS. Revista Tecnología e Innovación. Septiembre 2016 Vol. 3. No. 8 45-49. ISSN: 2410-3993.

Mendoza Rosa, Tapia Guillermo, Ortega Francisco, García José. (2016). Aplicación Web para el Control Remoto de Mecanismos mediante Arduino. Revista de Tecnología e Innovación, Marzo 2016 Vol. 3 No. 6 1-7. ISSN: 2410-3993.

Reyes Cecilia, Barreto Aldrin, Bautista Verónica. (2015). Sistema de Monitoreo del LOBOBUS. Revista Tecnología e Innovación Diciembre 2015 Vol. 2 No. 5 998-1006. ISSN: 2410-3993.

Beltran Miguel, Salinas Oscar, Luna Martha. (2015). Prototype Robot Rover with Arduino, LabView and Mobile Devices. Revista Tecnología e Innovación Septiembre 2015 Vol. 2 No. 4 679-687. ISSN: 2410-3993.

Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono

GARCÍA-NAVARRO, Norma*†, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, campus Poza Rica

Recibido 11 de Julio 2017; Aceptado 16 de Septiembre, 2017

Resumen

Los costos por corrosión son difíciles de calcular, pero abundan pruebas que muestran que son tan altos que usualmente impactan a todos los sectores de la sociedad, desde el patrimonio familiar hasta la infraestructura productiva que mantiene la economía de cualquier país (Castañeda-Valdéz & Rodríguez-Rodríguez, 2014). Se aplicaron recubrimientos galvanizados en frío con acabados de esmalte alquidálico y poliuretano sobre placas de acero al carbono (preparadas por la empresa Metalyzinc). Se expusieron a la atmósfera en Poza Rica Veracruz y se evaluaron con técnicas electroquímicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE). La exposición de las placas recubiertas se realizó en un panel de exposición ajustable a 45 grados, con dirección hacia los vientos dominantes, a diferentes periodos de exposición. Se comprobó que los recubrimientos estudiados protegen al acero de la corrosión por el incremento de la impedancia, conforme se hidrata la película polimérica, posiblemente debido a la activación de pigmentos de zinc, que sellan los poros y las heterogeneidades del recubrimiento, siendo una alternativa para contrarrestar los daños ocasionados por la corrosión atmosférica en ambientes industriales y marinos.

Galvanizado, esmalte, corrosión

Abstract

Corrosion costs are difficult to calculate, but there is plenty of evidence to show that they are so high that they usually impact all sectors of society, from the family patrimony to the productive infrastructure maintained by the economy of any country (Castañeda-Valdéz & Rodríguez - Rodríguez, 2014). Cold galvanized coatings were applied with alquidalic enamel and polyurethane finishes on carbon steel plates (prepared by Metalyzinc). They were exposed to the atmosphere at Poza Rica Veracruz and were evaluated with electrochemical techniques of Resistance to Linear Polarization (RPL) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Exposure of the coated plates was done in an adjustable exposure panel at 45 degrees, directed towards the prevailing winds, at different periods of exposure. It was verified that the coatings studied protect the steel from corrosion by increasing the impedance, as the polymer film hydrates, possibly due to the activation of zinc pigments, which seal the pores and the heterogeneities of the coating, being an alternative to counteract the damages caused by atmospheric corrosion in industrial and marine environments.

Galvanized, enamel, corrosion

Citación: GARCÍA-NAVARRO, Norma, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto. Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono. *Revista de Innovación Sistemática* 2017. 1-3:53-62

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

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La atmosfera es uno de los entornos o ambientes más comunes a los que se encuentra expuesto un material metálico, en este entorno es prácticamente inevitable el proceso de corrosión ya que la presencia de agua (electrolito) y oxígeno (oxidante) hacen que se lleve a cabo dicho proceso por ello es importante el uso de recubrimientos anticorrosivos para los metales expuestos en este medio (Ramirez Parquet & otros, 2006).

Un estudio del gobierno de Veracruz reveló que 41 por ciento de los accidentes relacionados con ductos se deben a la corrosión en las líneas que atraviesan por al menos 140 de los 212 municipios que conforman la entidad (Nava, 2010). Por tal motivo, ha sido de suma importancia estudiar el comportamiento de estos materiales en diferentes medios y condiciones, con el fin de poder determinar su susceptibilidad a la corrosión en los diferentes ambientes a los que se enfrentan, y partir de ahí para mejorar sus propiedades aumentando su vida útil.

La ciudad de Poza Rica se encuentra ubicada en la zona norte del estado de Veracruz a 30 Km de la costa del Golfo de México, presenta una humedad relativa regularmente por encima del 80%, con una temperatura y precipitación pluvial promedio anual de 30°C y 1180 mm respectivamente.

Los recubrimientos actúan como una barrera que aísla al material metálico del medio agresivo por lo cual se retarda la corrosión. La gran variedad de tipos de pinturas con diferentes características y resistencias, de sencilla aplicación, diversidad de colores, costo relativamente bajo y posibilidad de combinación con recubrimientos metálicos (por ejemplo, los galvanizados) son, entre otras, las principales ventajas que inducen a este tipo de protección contra la corrosión (Orozco, 2011).

El uso de los recubrimientos es muy amplio ya que abarca desde grandes estructuras metálicas expuestas en ambientes industriales fuertemente agresivos hasta diminutos componentes electrónicos. Se ha escrito que por cada 100 m² de superficie metálica expuesta a la corrosión, unos 85-90 m² están protegidos por revestimientos de pintura (González Hernández, 1984).

El corto periodo de prueba, su alta confiabilidad y posibilidad de analizar el proceso de corrosión son algunas de las ventajas de las técnicas electroquímicas (Genescá, 2002). Las más utilizadas para la evaluación de recubrimientos son la resistencia a la polarización lineal (RPL), la cual es una técnica de corriente directa y la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), que es una técnica de corriente alterna.

Metodología

Preparación de la superficie

Los sistemas de recubrimientos galvanizado en frío mas esmalte alquidálico y galvanizado en frío más poliuretano, fueron aplicados sobre placas de acero al carbón con dimensiones de 7.5 cm de ancho por 10 cm de largo. Para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico, la placa fue debastada con papel lija de carburo de silicio 320 (SiC). Posteriormente fue limpiada con acetona, se aplicó el recubrimiento galvanizado en frío y se dejó secar durante 2 horas aproximadamente y al final se recubrió con el esmalte alquidálico (figura 1a), aplicando ambas capas con brocha (Codelpa, 2015). Para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más poliuretano (figura 1b), el recubrimiento fue aplicado industrialmente por la empresa Metalyzinc.

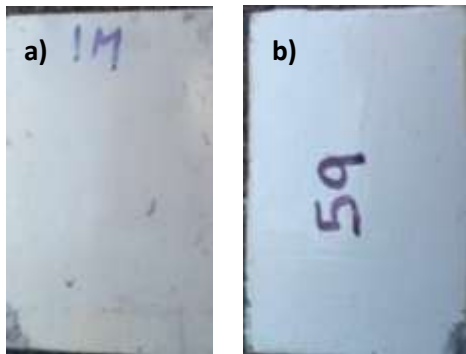


Figura 1 a) Recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico y b) Recubrimiento galvanizado en frío poliuretano sobre acero al carbono

Fuente: *Elaboración propia*

Exposición de los recubrimientos

Las placas de acero al carbono con los sistemas de recubrimientos fueron expuestas en la Facultad de Ciencias Químicas (Campus Poza Rica-Tuxpan), donde se instaló un panel de exposición en la azotea (Figura 3.3), el cual fue ajustado a 45 grados con dirección hacia los vientos dominantes en la ciudad, de acuerdo a la normatividad vigente (ISO, 1992).

Las placas fueron expuestas un total de 6 meses, las cuales fueron caracterizadas mediante técnicas electroquímicas en periodos comprendidos de 0,2,4,5,6 meses.

Preparación de la celda electroquímica

Una de las esquinas de las placas de carbono fue adaptada para utilizarla como conexión para el electrodo de trabajo, desprendiendo de ella la pintura por ambos lados en forma de rectángulo, posteriormente se fijó un tubo de PVC de aproximadamente 9cm^2 de área de exposición al electrolito por 6cm de altura, el cual es sellado a la base para evitar fugas.

El arreglo experimental de la celda (Figura 2) se llevó a cabo colocando la placa a evaluar o electrodo de trabajo, llena con el electrolito Na_2SO_4 0.1M, utilizando grafito como electrodo auxiliar para medir la intensidad de corriente eléctrica y como electrodo de referencia calomel/saturado ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$) que evalúa diferencia de voltaje.



Figura 2 Arreglo experimental de la celda electroquímica

Fuente: *Elaboración propia*

Evaluación electroquímica

El estudio electroquímico se realizó empleando un potenciostato ACM instruments, el cual fue conectado a los electrodos correspondientes en el arreglo de la celda. El experimento se monitoreó con las técnicas electroquímicas resistencia a la polarización lineal (RPL) y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), en una secuencia programada de la siguiente manera:

1. Seguimiento del E_{corr} por 5 minutos
2. Prueba de Resistencia de Polarización lineal (± 15 mV alrededor de E_{corr})

3. Prueba de Impedancia Electroquímica (+/- 10 mV y de 10000- 0.1 Hz)

Resultados

El potencial de corrosión (E_{corr}) es un parámetro que proporciona información termodinámica del proceso de corrosión, entre más electronegativo sea E_{corr} significa mayor tendencia a que la corrosión se presente a nivel interface, sin embargo, la cinética de corrosión puede proporcionar la velocidad de las reacciones electroquímicas (Calderón & Rossa Mattos, 2006). Los valores obtenidos con la técnica electroquímica RPL son inversamente proporcionales a la velocidad de corrosión, mientras que la intensidad de corriente es directamente proporcional a la velocidad de corrosión.

Galvanizado en frío más esmalte alquidálico

Este sistema presenta (Tabla 1) un aumento en sus valores de R_p que se encuentran entre $1.2E7$ y $4.0E8 \text{ Ohm-cm}^2$, demostrando así que el sistema protege al material metálico de la corrosión. Puesto que E_{corr} se incrementa durante el tiempo de exposición; aplicado a recubrimientos indica que este otorga protección al sustrato metálico (Genescá, 2002). Sin embargo, cuando el E_{corr} comience a descender habrá terminado el tiempo de vida útil del sistema de pintura.

Tiempo (meses)	E_{corr}	R_p (Ohm-cm^2)
0	-----	1.2×10^7
2	-3200	4.2×10^5
4	-3420	1.3×10^5
5	-1700	5.3×10^3
6	25	4.1×10^8

Tabla 1 Resultados obtenidos para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico mediante la técnica RPL

Fuente: Elaboración propia

Un incremento en la corriente indica que se ve favorecido el proceso de corrosión ya que no se presenta una resistencia que impida el paso de corriente desprendida por los átomos metálicos al convertirse en cationes (Ramirez Parquet & otros, 2006).

En la grafica 1 Corriente vs Tiempo se muestra la variación de corriente que presento el acero con respecto al tiempo, obteniendo como resultado que a los 6 meses de exposición hay un aumento en la corriente, que se puede relacionar con la hidratación de la película alquidálica.

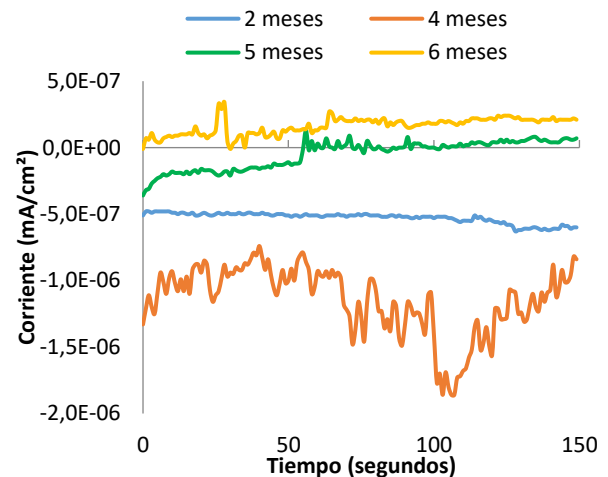


Gráfico 1 Diagrama corriente vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a Walter G.W. (1986). la vida útil de un recubrimiento se puede relacionar cuando el voltaje o potencial se vuelve más electropositivo en función del tiempo. Sin embargo, cuando este empieza a disminuir significa que el recubrimiento se ha hidratado y no protege satisfactoriamente al sustrato metálico. En la gráfica 2 se aprecia un incremento de la diferencia de voltaje a circuito abierto, lo que es indicativo de la protección de la corrosión del acero y la estabilidad del recubrimiento.

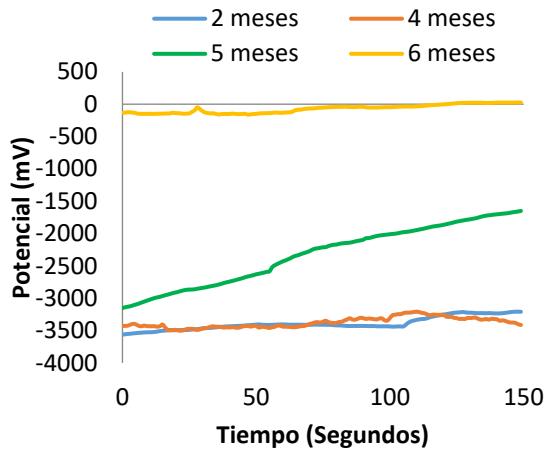
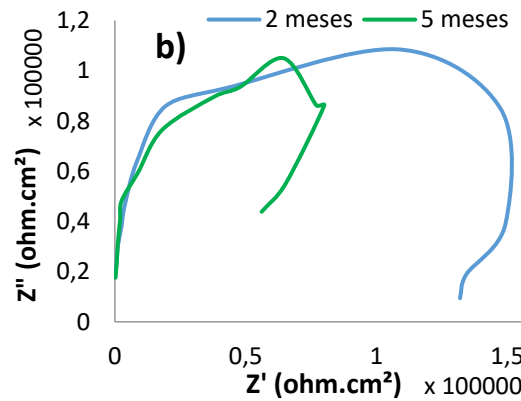
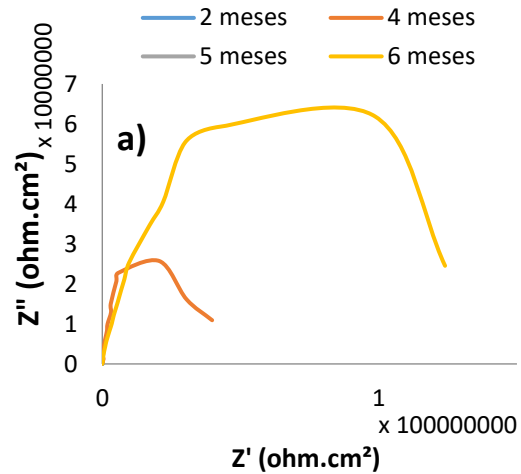


Gráfico 2 Diagrama potencial vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3 se muestra el diagrama de Nyquist para el recubrimiento galvanizado en frío mas esmalte alquidálico a 2, 4, 5 y 6 meses de exposición, este recubrimiento es resistente a la humedad y ambientes agresivos. Al hidratarse la película del alquidálico se presenta un incremento en los valores de impedancia real e imaginaria para los 4 y 6 meses de exposición (Gráfica 3a), ya que la impedancia es una oposición al paso de señal eléctrica, el aumento demuestra una mejor protección del recubrimiento contra la corrosión, debido a la activación de pigmentos de zinc (RZC), que sellan los poros e imperfecciones de la película. La interface resistiva transita a una interface capacitiva, lo que es indicativo de la formación de óxidos protectores (4, 5 y 6 meses de exposición).



Gráfica 3. Diagrama de impedancia en Nyquist para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a) 2,4,5 y 6 meses de exposición b) zoom para 2 y 5 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de Bode ángulo de fase vs impedancia para el recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico (Gráfica 4) en la región de alta frecuencia (1E02 a 1E04 Hz) es posible apreciar un incremento en el ángulo de fase a los 4 y 6 meses de exposición lo que indica una mayor resistencia de la película de dicho recubrimiento en este periodo de tiempo.

Este mismo incremento se mantiene en la media frecuencia (corrosión por activación, 1E0 a 1E02 Hz) y baja frecuencia (difusión limitada). El modulo de impedancia (Gráfica 5) también presenta un incremento a los 4 y 6 meses de exposición con valores cercanos a 1E+08 Ohm*cm², lo que se debe a que el recubrimiento al inicio de la evaluación forma una barrera que protege al metal, impidiendo el acceso al electrolito, esta barrera incrementa en función del tiempo de exposición.

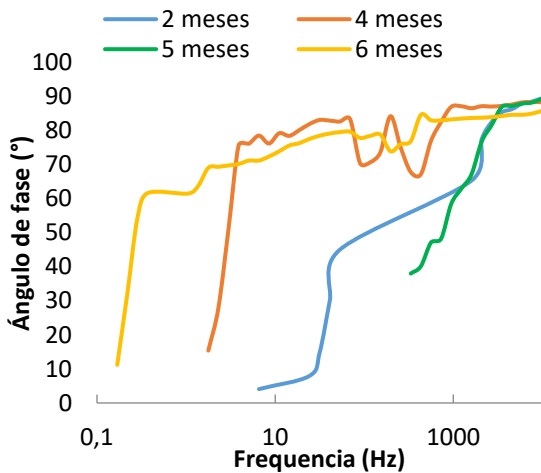


Gráfico 4 Diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a 2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: *Elaboración propia*

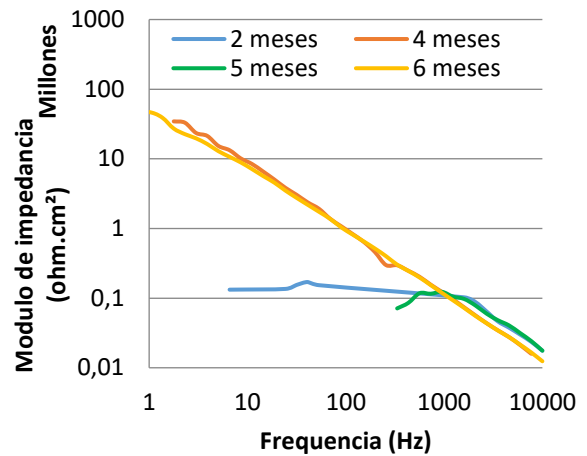


Gráfico 5 Diagrama de Bode módulo de impedancia vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío más esmalte alquidálico en la atmosfera de Poza Rica a 2,4, 5 y 6 meses de exposición

Fuente: *Elaboración propia*

Galvanizado en frío poliuretano de dos componentes

En la tabla 2 se presentan los valores de Ecorr y Rp para el sistema galvanizado en frío poliuretano de dos componentes, los valores de Rp se encuentran entre 8.9E7 y 3.3E8 Ohm-cm² este incremento demuestra que su comportamiento protector mejora conforme transcurre el tiempo de exposición, mientras que el Ecorr presenta un aumento en aumento en sus valores a los 4 meses de exposición, lo que indica que es cuando mayor tendencia a la corrosión presenta el material recubierto.

Tiempo (meses)	Ecorr	Rp (Ohm-cm ²)
0	-----	8.9x10 ⁷
2	-----	6.6 x10 ⁷
4	-5475	2.2 x10 ⁷
5	-1500	4.7 x10 ⁸
6	e	3.3 x10 ⁸

Tabla 2. Resultados obtenidos para el sistema galvanizado en frío poliuretano mediante la técnica de Resistencia a la polarización lineal

Fuente: *Elaboración propia*

En la Gráfica 6 se muestra la variación de corriente con respecto al tiempo que presenta el acero recubierto con galvanizado en frío poliuretano de dos componentes al ser expuesto a la atmosfera de la ciudad de Poza Rica, Ver; la película es hidratada por lo que se presenta un incremento de corriente de acuerdo al tiempo de exposición.

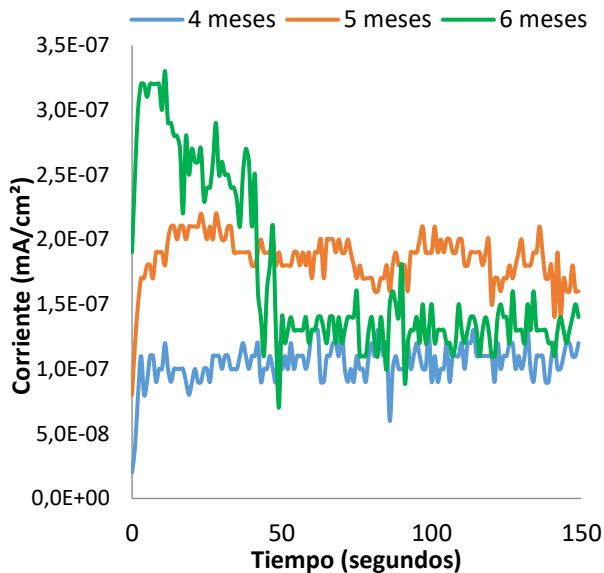


Gráfico 6 Diagrama corriente vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano

Fuente: Elaboración propia

Un incremento de la diferencia de voltaje a circuito abierto indica que el acero es protegido de la corrosión, en este caso por el recubrimiento galvanizado en frío poliuretano de dos componentes como se muestra en la gráfica 7.

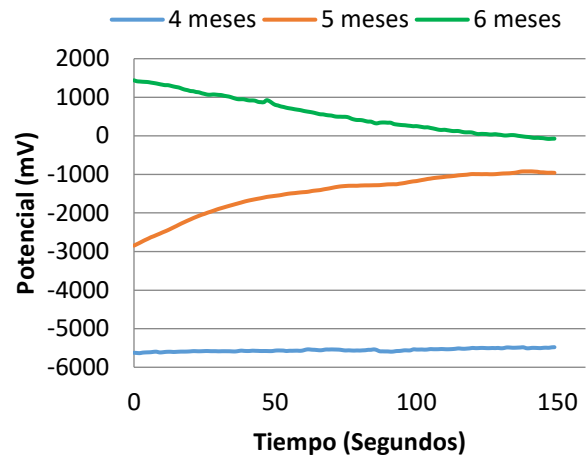


Gráfico 7 Diagrama potencial vs tiempo para el sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano

Fuente: Elaboración propia

El sistema de recubrimiento galvanizado en frío poliuretano de dos componentes presenta un incremento en la impedancia real e imaginaria a los 4 ($4.5E7$, $2.3E7$ Ohm-cm²) y 6 ($4.9E7$, $5.8E7$ Ohm-cm²) meses de exposición en la atmosfera de poza rica (gráfica 8a) lo que demuestra que el recubrimiento está protegiendo al acero de la corrosión, mientras que en la gráfica 8b se muestra el comportamiento para 0,2 y 5 meses de exposición, presentando una disminución a los 5 meses de exposición ($9.9E4$, $9.2E4$ Ohm-cm²), esto se debe a la absorción de agua por parte de la película, lo cual favorece las reacciones de corrosión debido al transporte iónico a nivel interface.

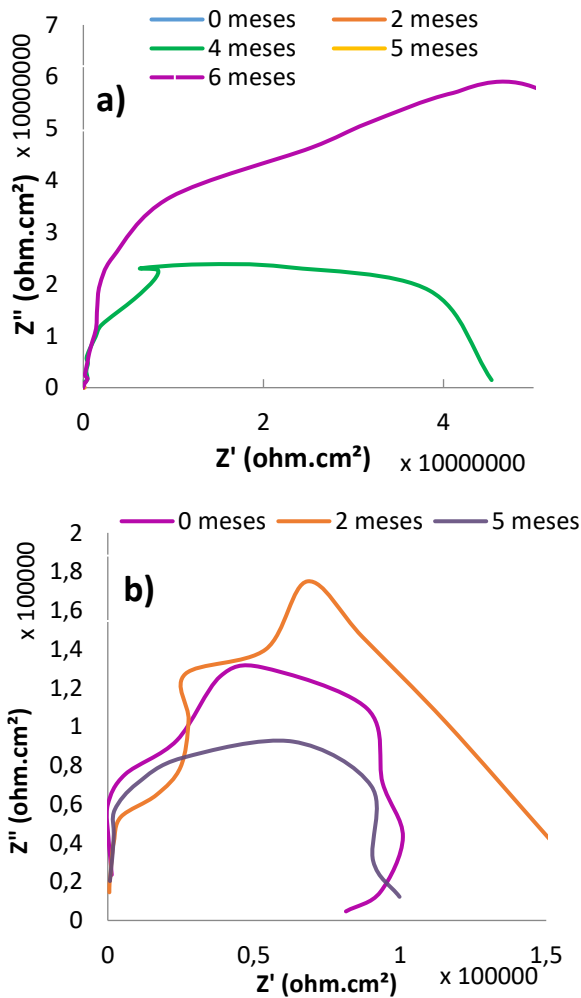


Gráfico 8 Diagrama de impedancia en Nyquist para a) sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmósfera de Poza Rica b) zoom para 0, 2 y 5 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para el sistema galvanizado en frío poliuretano de dos componentes (gráfica 9) se presenta un incremento a los 4 y 6 meses de exposición en la región de alta frecuencia este incremento se mantiene en la media y baja frecuencia, lo que muestra que en este periodo de tiempo es cuando mayor resistencia presenta el recubrimiento y se desarrolla la formación de la película, así como una mayor resistencia a la transferencia de carga. El módulo de impedancia (gráfica 10) al principio de la evaluación se encuentra en el rango de $7.9E4 \text{ ohm.cm}^2$, mismo que aumenta hasta $5.9E7 \text{ ohm.cm}^2$ a los 6 meses de exposición.

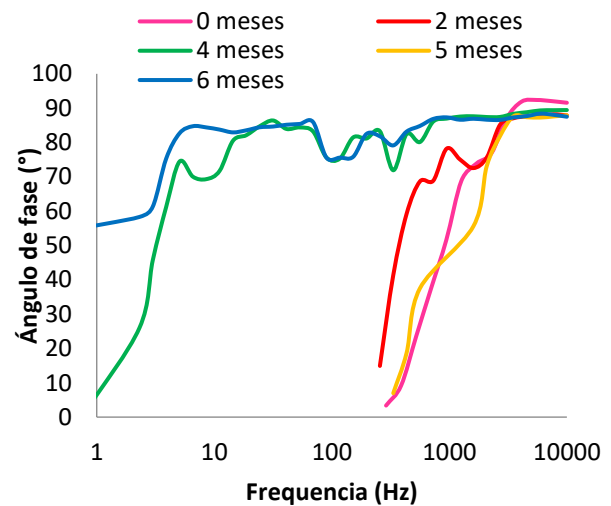


Gráfico 9 Diagrama de Bode ángulo de fase vs frecuencia para sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmósfera de Poza Rica a 0,2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

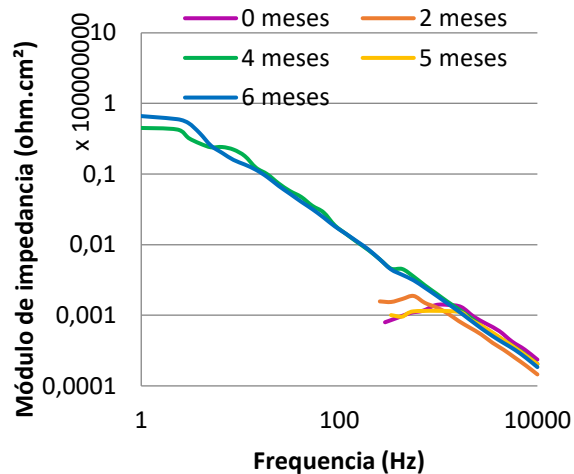


Gráfico 10 Diagrama de Bode modulo de impedancia vs frecuencia para sistema galvanizado en frío poliuretano en la atmosfera de Poza Rica a 0,2,4,5 y 6 meses de exposición

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Se demostró mediante el uso de técnicas como la RPL y EIE el comportamiento que presentó cada sistema de recubrimiento al ser expuesto en la atmósfera de Poza Rica, Ver; en diferentes periodos de tiempo.

A través de estas técnicas, se logró definir que tanto el recubrimiento galvanizado en frío más esmalte alquidálico y el recubrimiento galvanizado en frío poliuretano presentaron un comportamiento similar a los 4 y 6 meses de exposición. Mediante el diagrama de Nyquist se observó un aumento en los valores de impedancia para ambos recubrimientos ya que, en ese periodo de tiempo, se activaron sus pigmentos de zinc ofreciendo una mejor protección contra la corrosión. Mientras que el diagrama de Bode demuestra un aumento en la resistencia de la película para el mismo periodo de tiempo en ambas pinturas.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la grafica voltaje contra tiempo mediante la técnica de Resistencia a la polarización indican que un aumento en la diferencia de voltaje para ambas pinturas significa una buena protección contra la corrosión del acero y estabilidad del recubrimiento.

Se demostró que ambos recubrimientos, presentan un comportamiento similar en sus respectivas evaluaciones electroquímicas, siendo a los 4 y 6 meses el periodo de tiempo en que ambas pinturas presentan mayor actividad protectora, debido a las condiciones atmosféricas a las que fueron expuestas.

Referencias

- Calderón, J., & Rossa Mattos, O. (2006). Análisis de la evolución del potencial del circuito abierto del cobalto en medio levemente alcalino. *Revista Facultad de Ingeniería*(38).
- Castañeda-Valdéz, A., & Rodriguez-Rodriguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *CENIC Ciencias Químicas*, 45, 52-59.
- Codelpa. (octubre de 2015). *Galvanizado en frío*. Obtenido de www.codelpa.cl/content/download/.../TDS%20GALVANIZADO%20EN%20FRIO.pdf
- Genescá, J. (2002). *Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión*. México: Programa universitario de materiales UNAM.
- González Hernández, J. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.

ISO. (1992). Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres –Determination of corrosion rate standard specimens for the evaluation of corrosivity. En *ISO 9226:1992*.

Nava, L. (2010). *Análisis del uso de la lámina galvanizada en vivienda social en México. Costos y beneficios*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.

Orozco, R. (2011). *Universidad Veracruzana*. Recuperado el 29 de agosto de 2017, de Recubrimientos anticorrosivos: <https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>

Ramirez Parquet, R., & otros. (2006). Rodrigo A. Ramirez Parquet Evaluación a la resistencia a la corrosión de revestimientos orgánicos a través de técnicas electroquímicas. En *Congreso LATINCORR2006* (pág. 36). Fortaleza-Brasil: LATINCORR2006.

Walter, G. (1986). A critical review of the protection of metals by paints. *Corrosion Science*, 26(1), 27-38.

Emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real

GARCÍA-GUENDULAIN, Crescencio*†, PERALTA-SÁNCHEZ, Edgar, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán

Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Altamira

Recibido 12 de Julio, 2017; Aceptado 26 de Septiembre, 2017

Resumen

En este trabajo se realiza la propuesta de un emulador de turbina eólica con generador de imanes permanentes; para ello se realiza una síntesis de la obtención del modelo dinámico de la turbina. El modelo dinámico determina el comportamiento de la turbina propuesta que corresponde a un aerogenerador de eje horizontal, el cuál es la base para la implementación de la turbina de viento con propósitos de experimentación. Se utiliza LabVIEW® para el desarrollo de la interfaz gráfica, así como para el monitoreo y control en tiempo real a través de una plataforma CompactRIO. Se utiliza un motor de corriente alterna el cual está acoplado a un generador de imanes permanentes. El motor de corriente alterna se encargará de simular la velocidad de una turbina de viento real basándose en el resultado del programa que resuelve el modelo dinámico; para ello se usará un inversor de fuente de voltaje comercial que se encargará de controlar el motor a una velocidad de referencia dada por dicho programa. Gracias a este trabajo se dispone de un prototipo que realiza la emulación de una turbina eólica, la cual permite realizar experimentación y en un futuro inmediato proponer nuevas alternativas en el aprovechamiento del potencial eólico.

Turbina de viento, LabVIEW, emulador

Citación: GARCÍA-GUENDULAIN, Crescencio, PERALTA-SÁNCHEZ, Edgar, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán, Emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:63-71

Abstract

This paper presents a wind turbine emulator with permanent magnet generator; for this, a synthesis of the obtaining of the dynamic model of the turbine is realized. The dynamic model determines the behavior of the turbine that corresponds to a horizontal axis wind turbine (HAWT), which is the base for the implementation of the wind turbine for experimental purposes. LabVIEW® is used for the development of the graphical interface, as well as for real-time monitoring and control through a CompactRIO platform (real-time processor for communication and signal processing). An AC motor is used which is coupled to a permanent magnet generator. The AC motor will be responsible for simulating the speed of a real wind turbine based on the result of the program that resolves the dynamic model; for this, a commercial voltage source inverter will be used for controlling the motor at a reference speed given by the program. Thanks to this work we have a prototype that realizes the emulation of a wind turbine, which allows the experimentation and in the immediate future to propose new alternatives in the use of the wind potential.

Wind Turbine, LabVIEW, emulator

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: crescencio.garcia@upalt.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La energía es un factor indispensable para el desarrollo y el progreso de una sociedad. Se debe garantizar la seguridad del abastecimiento; el aumento del nivel de autoproducción para lograr mayor independencia energética y un incremento de la diversificación de fuentes energéticas para conseguir una menor dependencia de los combustibles fósiles y en particular el petróleo. [6]

Debido a su falta de capacidad técnica y financiera, México presenta un retraso significativo en el despliegue de energías renovables a pesar de su potencial privilegiado. Las Energías Renovables son indispensables para asegurar la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente. [7]

En el caso de la energía eólica se han realizado importantes progresos en otros países de economía desarrollada o emergente sin embargo aun con ello la potencia nominal eólica instalada a escala mundial equivale a una tercera parte de la capacidad mundial instalada de energía nuclear. [8]

Un problema importante que aparece en la investigación y experimentación con turbinas de viento utilizadas en la energía eólica, es el difícil acceso a una turbina real. Es decir, no se puede experimentar cuando no se encuentra disponible una turbina de viento en la que se puedan validar las propuestas y los experimentos. Sin embargo, algunos investigadores han diseñado simuladores que son capaces de emular las condiciones reales de operación del rotor de una turbina de viento. Esto es posible construyendo un modelo aerodinámico que incluye las variables más importantes del viento que influyen en la turbina.

Por ello es importante la implementación de un emulador de turbina eólica que nos permita realizar experimentación y proponer nuevas alternativas en el aprovechamiento del potencial eólico, con el propósito de impulsar la transición energética y con ello detonar el potencial de México como productor de energías renovables.

El siguiente artículo mostrará la propuesta de un emulador de turbina eólica que utiliza LabVIEW® Real Time como interfaz gráfica y de control para la plataforma CompactRIO, la cual cuenta con un procesador en tiempo real para comunicación y procesamiento de señales como elementos clave en el proceso de emulación. Además, describirá primeramente el funcionamiento de las turbinas de viento con generadores de imanes permanentes, para posteriormente mostrar los cálculos de potencia y par de una turbina de este tipo, lo que permitirá definir el modelo dinámico de una turbina de viento con generador de imanes permanentes.

Posteriormente se muestra la simulación con los cálculos anteriores a fin de comprender el modelo dinámico que permitirá su implementación. Finalmente se muestra la implementación del emulador de turbina eólica empleando una plataforma en tiempo real. Se muestran resultados y conclusiones de este trabajo.

Turbinas de viento con generador de imanes permanentes [3]

Un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) con múltiples polos puede operar a bajas velocidades, de esta forma se puede omitir el uso de engranes. Los engranes son costosos, producen un diseño más pesado, generan pérdidas y demandan continuo mantenimiento.

La conexión comúnmente utilizada para este generador se muestra en la Figura 1.

Un diseño sin engranes tiene más eficiencia, es más robusto y beneficia principalmente a la generación de energía eléctrica a partir del viento en lugares lejanos a la costa. El uso de un generador síncrono de imanes permanentes trabaja sin una alimentación de CD independiente, además su eficiencia es mayor que otros generadores utilizados para estas aplicaciones.

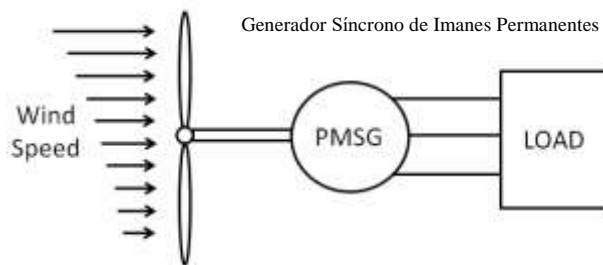


Figura 1 Turbina de viento con PMSG

Fuente: Mayo-Maldonado, J. C., et al. "Maximum Power Point Tracking Control for a DC-Generator/Multiplier-Converter Combination for Wind Energy Applications." *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. Vol. 1. 2011.*

Potencia de salida en una turbina de viento

La potencia del viento sobre un área está dada por la siguiente ecuación: [2]

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

Donde ρ es la densidad del viento (1.225 kg/m³), A es el área de barrido del rotor, mientras v que es la velocidad del viento. Por otra parte, la potencia de salida de una turbina está limitada por un coeficiente de potencia (C_p) que define la porción de energía disponible en el viento que es transformada a energía mecánica por la turbina.

Tomando en cuenta este coeficiente, a partir de la ecuación (1), es posible obtener la ecuación (2).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda) A v^3 \quad (2)$$

En la ecuación (2), el coeficiente de potencia depende de λ , la cual define una relación entre la velocidad del rotor de la turbina y la velocidad libre del viento (Tip Speed Ratio o TSR), está dada por:

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{v} \quad (3)$$

Donde R es el radio del área de barrido de la turbina y ω_r es la velocidad del rotor de la turbina. Comúnmente los fabricantes de turbinas de viento proporcionan las curvas características del coeficiente de potencia en función del TSR. Estas curvas dependen del diseño y de aspectos constructivos de la turbina de viento. En la Figura 2 se muestra una curva típica de una turbina de viento de eje horizontal y tres aspas.

Es posible hacer una aproximación algebraica de la curva mostrada en la Figura 2, de esta forma se puede obtener la función que define al coeficiente de potencia. La función obtenida para el coeficiente de potencia se puede representar mediante una función ponomial es decir:[4]

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \quad (4)$$

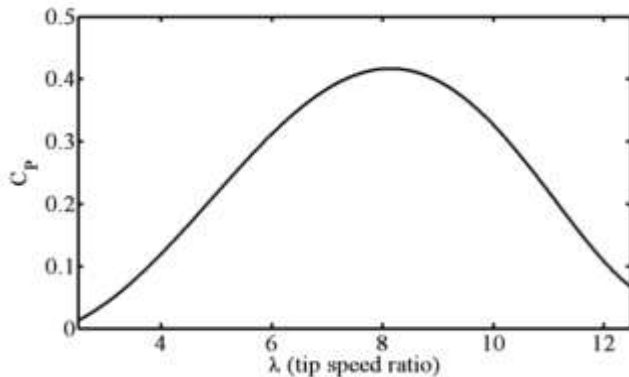


Figura 2 Curva de Potencia $C_p(\lambda)$ [5]

Fuente: R. Salas, et al, On the real time estimation of the wind speed for wind energy conversion systems, CONIELECOMP 2010

De este modo la ecuación que define la potencia de salida de la turbina de viento está completa. Se puede observar que la potencia varía dependiendo la velocidad del viento y el TSR definido en la ecuación (3), la cual depende también de la velocidad del rotor de la turbina.

Par mecánico de una turbina de viento

El par mecánico de la turbina puede obtenerse dividiendo directamente la ecuación (2) entre la velocidad del rotor, esto es: [

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_r} = \frac{1}{2\omega_r} \rho C_p(\lambda) A v^3 \quad (5)$$

La ecuación (5) es válida para representar el valor instantáneo del par mecánico de la turbina de viento, sin embargo se puede apreciar que existe una singularidad cuando la velocidad del rotor es igual a cero. Con fines de experimentación y de implementación de un sistema de generación de energía eléctrica a partir del viento, se puede utilizar la ecuación (5) procurando que la velocidad del rotor sea diferente de cero en todo momento.

También es posible utilizar una ecuación para el par mecánico que no requiera dividir la ecuación entre la velocidad del rotor. Existe un coeficiente de par que es usado comúnmente y que está relacionado con el coeficiente de potencia, el cual se define como:

$$C_Q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (5)$$

Si se consideran las ecuaciones (2), (4) y $A = \pi R^2$, la ecuación para el par mecánico definido en (5) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho C_Q(\lambda) R^3 v^2 \quad (6)$$

Modelo dinámico de la turbina de viento [5]

La dinámica de la velocidad del rotor de la turbina de viento está dada por la siguiente ecuación estado:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \left(\frac{P}{2} \right) \left[\frac{0.5 \rho C_Q(\lambda) R^3 v^2 - T_e}{J} \right]$$

$$y = \omega_r \quad (7)$$

Donde T_e puede considerarse como un parámetro variante en el tiempo y es el valor instantáneo del par eléctrico del generador mientras que J es la inercia total del sistema de generación, es decir la suma de la inercia de la turbina y la del generador. Debido a que C_Q es una función polinomial de λ la cual depende de la velocidad del rotor ω_r , el modelo dinámico que define la aceleración de la turbina de viento presentado en la ecuación (7), es no lineal donde la salida del sistema es claramente la velocidad del rotor.

Este modelo dinámico es utilizado para en principio realizar las simulaciones que posteriormente permitirán llevar a cabo la emulación de una turbina de viento basado en un motor de inducción acoplado directamente al generador síncrono de imanes permanentes. Esto permitirá realizar la experimentación y validación de los resultados obtenidos.

Simulación

Para la realización de la simulación se utilizaron las ecuaciones anteriores a fin de proponer un diseño que permita observar el comportamiento de una turbina eólica con los principios básicos.

Para la simulación del modelo de la turbina eólica se utilizó el software de Simulink® 7.7 de Matlab® 2011, específicamente el módulo de SymPowerSystem.

Tomando como base la descripción realizada en los puntos anteriores se propone realizar la simulación de la turbina eólica en primera instancia utilizando la máquina síncrona de imanes permanentes la cual se caracterizó obteniendo los principales parámetros que generalmente se emplean para su modelo matemático y que rigen su comportamiento. Cabe mencionar que estos no se especifican en las hojas técnicas de los fabricantes de los generadores y es necesario obtenerlos de manera experimental.

Se implementó la ecuación (6), para el cálculo del par mecánico de la turbina, el cual será aplicado a la máquina síncrona. La Figura 3 muestra el cálculo del par mecánico implementado en Simulink®.

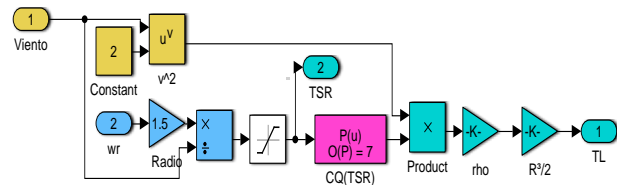


Figura 3 Cálculo del par mecánico de la turbina

Fuente: Elaboración propia

La máquina síncrona recibe el par mecánico como entrada y genera voltaje trifásico en sus terminales el cual es rectificado y posteriormente aplicado a una carga resistiva que se encuentra en paralelo con un capacitor. Se mide el par eléctrico y la velocidad, la velocidad es una de las entradas para el cálculo del par. La Figura 4 y 5 muestra el diagrama general de esta implementación.

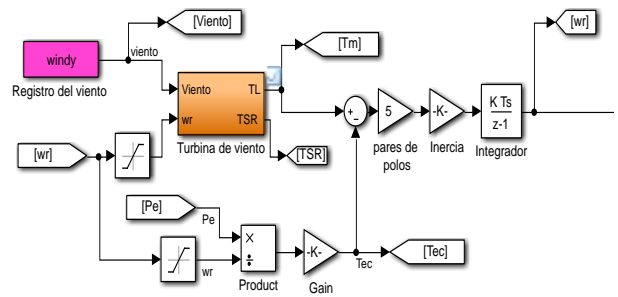


Figura 4 Solución del modelo dinámico que proporciona velocidad de referencia

Fuente: Elaboración propia

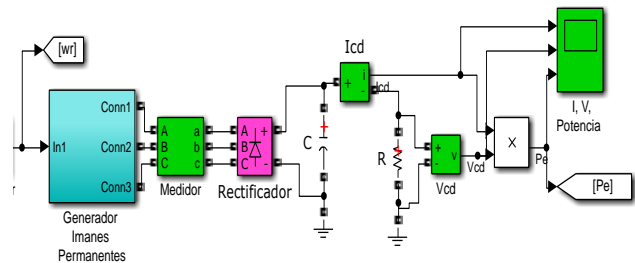


Figura 5 Velocidad de referencia aplicada al PMSG, con carga resistiva

Fuente: Elaboración propia

Resultados de simulación

Para poder llegar a la obtención de los resultados se estimó el Radio de la Pala con una dimensión de 1.5 m y la carga resistiva a fin de que no generarán un par excesivo superior al que requiere para su diseño la máquina síncrona. La máquina opera a un par promedio de 5 Nm.

La Figura 6 comprara el par eléctrico y mecánico el cual en promedio corresponde a 5 Nm. En la propuesta de simulación se aprecia más oscilación en el par mecánico debido a la variación en los cálculos que dependen de la función polinomial.

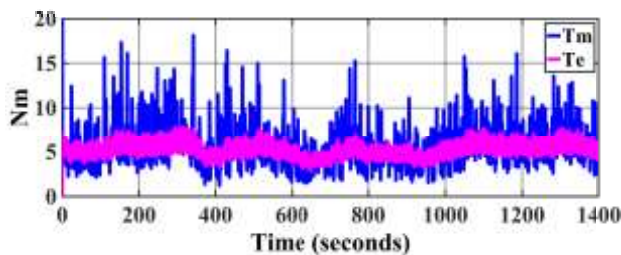


Figura 6 Par eléctrico (Te) y mecánico (Tm)

Fuente: Elaboración propia

La potencia eléctrica generada se muestra en la Figura 7. Se puede observar que para este ejemplo se consume una potencia eléctrica de máximo 100W. Esta propuesta de consumo en la simulación se consideró para de igual manera realizarlo de manera experimental.

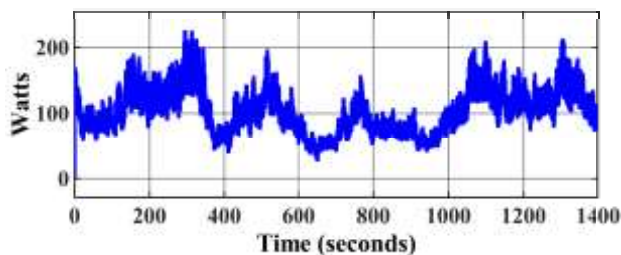


Figura 7 Potencia Eléctrica

Fuente: Elaboración propia

La velocidad de la máquina es proporcionada por la solución de la integración numérica al resolver la ecuación diferencial con un tiempo de muestreo de 500 ms, la cual es mostrada en la Figura 4. Esta señal es aplicada como referencia al modelo dinámico del generador de imanes permanentes y para efectos de simulación en el modelo del generador se usa como referencia en lugar del par mecánico. Esto con la finalidad de llevar a cabo la experimentación. La Figura 8 muestra la evolución de la velocidad de la turbina (generador) durante la simulación.

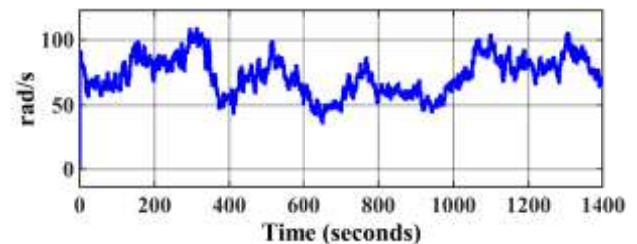


Figura 8 Velocidad de la turbina

Fuente: Elaboración propia

Implementación del emulador de turbina eólica

Para propósitos de experimentación, se reemplaza la turbina de viento por un motor de inducción que se encuentra acoplado directamente al generador síncrono de imanes permanentes. El motor de inducción se encargará de simular la velocidad de una turbina de viento real basándose en el resultado del programa que resuelve el modelo dinámico, para ello se usará un inversor de fuente de voltaje comercial, que se encargará de controlar el motor con una velocidad de referencia. La velocidad de referencia está dada por un programa en tiempo real que resuelve el modelo dinámico de la turbina.

Una vez concluido el sistema de emulación completo y teniendo voltaje generado en corriente alterna, se rectifica el voltaje para alimentar cargas resistivas. Asimismo, se realiza un registro de las corrientes, voltajes y velocidades, con el fin de poder ser analizadas a futuro y elaborar los reportes.

Finalmente se realiza la integración de todo el sistema. Se prueba el emulador de la turbina eólica con el coeficiente de potencia mostrado. Se utilizarán grabaciones reales de viento para demostrar su funcionamiento y con ello analizar los distintos resultados en la generación.

Para llevar a cabo el desarrollo experimental del sistema del emulador de la turbina de viento se hará uso de diferentes herramientas de hardware y software. Para controlar el motor de inducción de 1HP, se utilizó un inversor marca Baldor, modelo Vector H2.

Para calcular la velocidad de referencia para el motor de inducción, se utilizará una computadora personal con el software LabVIEW® que se comunica con la plataforma CompactRIO. La plataforma CompactRIO tiene una variedad de controladores embebidos con dos objetivos de procesamiento: (1) un procesador en tiempo real para comunicación y procesamiento de señales y (2) FPGA programable por el usuario para implementar control de alta velocidad y temporización y disparo personalizados directamente en hardware. Elimina la necesidad de separar subsistemas al conectar directamente a sensores, pantallas, cámaras y motores y aprovechar un potente desarrollo y software en tiempo de ejecución. En este caso se usará la plataforma cRIO 9075.

Para resolver en tiempo real la ecuación del modelo de la turbina, es necesario conocer la velocidad del rotor y los parámetros que varían constantemente, tales como la velocidad del viento, el voltaje en el capacitor y la corriente. Para medir la velocidad del motor, este cuenta con un encoder integrado. Para obtener los valores de la velocidad del viento, se utilizó una medición real de viento que tiene una duración de 1400 segundos. Para medir el voltaje y corriente se utilizarán las entradas analógicas NI 6201, acondicionadas mediante un sensor de voltaje aislado AD210JN. Por otro lado, el inversor Vector H2, proporciona una medición de la velocidad del rotor la cual es utilizada para resolver la ecuación (7) en tiempo real.



Figura 9 Implementación del emulador

Fuente: Elaboración propia

Resultados

La Figura 9, muestra la implementación del inversor, el motor de inducción y el generador síncrono de imanes permanentes. La implementación del emulador permite obtener resultado en tiempo real de las variables más importantes en un sistema de generación eoloeletrica. El programa implementado en LabVIEW® permite graficar par mecánico y eléctrico; velocidad del generador; coeficiente de potencia y el viento. Todo durante los 1400 segundos que dura la emulación.

La Figura 10 muestra la pantalla principal de graficación durante los 1400 segundos.

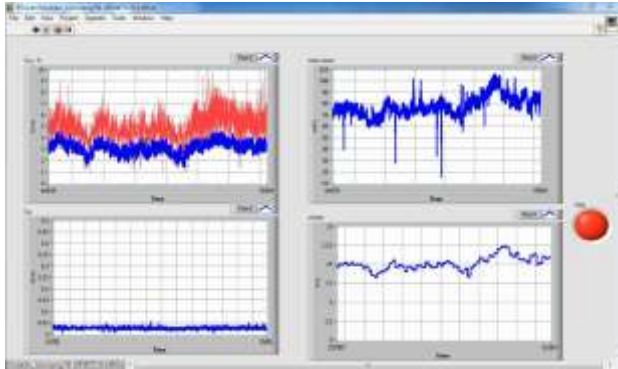


Figura 10 Pantalla de graficación de la implementación en tiempo real

Fuente: Elaboración propia

La Figura 11 muestra la grabación de viento utilizada en este proceso de emulación de turbina de viento, es importante mencionar que el proceso de emulación dura 1400 segundos, que corresponde a la duración de la grabación de viento.

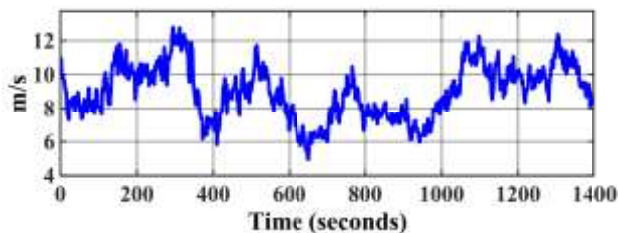


Figura 11 Grabación de viento

Fuente: Elaboración propia

La Figura 12 muestra la comparación entre la simulación realizada con Simulink® y el resultado experimental al utilizar el emulador de turbina de viento utilizando la plataforma en tiempo real (CompactRIO), se observa que ligeramente la simulación nos proporcionar una velocidad mayor, pero el comportamiento en promedio es muy similar.

Los resultados experimentales muestran una aproximación muy cercana a los cálculos obtenidos durante las simulaciones realizadas.

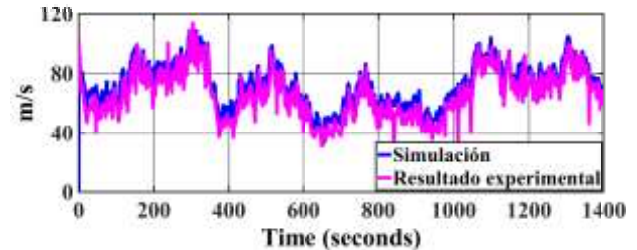


Figura 12 Comparación entre simulación y resultados experimentales

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este trabajo se emplea el modelo de la turbina de viento para construir de forma experimental un emulador que sea capaz de representar físicamente la dinámica de una turbina de viento real. Se utilizó un archivo que contiene una medición real de la velocidad del viento, un motor de inducción acoplado directamente a un generador síncrono de imanes permanentes, algunas mediciones y una plataforma en tiempo real. Los resultados experimentales son comparados con los resultados esperados obtenidos con simulaciones y ambos son muy similares.

El emulador presenta una dinámica que describe el comportamiento transitorio de las variables como velocidad de la máquina, potencia y el coeficiente de par. También se pueden obtener gráficas de par mecánico y eléctrico en tiempo real.

El propósito principal de este trabajo, es construir un sistema de generación de energía eléctrica a partir del viento que permita a futuro seguir desarrollando investigación en esta área, por ejemplo, el desarrollar un control de máximo aprovechamiento de energía (Maximum Power Point Tracking).

Dentro de los trabajos futuros se tiene contemplado la utilización de varios modelos de cálculo de coeficiente de potencia y par.

Finalmente se concluye que este trabajo de emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real, permite realizar experimentación y en un futuro inmediato proponer nuevas alternativas en el aprovechamiento del potencial eólico, con el propósito de impulsar la transición energética y con ello detonar el potencial de México como productor de energías renovables.

Referencias

- [1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi - Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons LTD (2001).
- [2] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista, Ricardo J. Mantz – Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. Springer (2007).
- [3] Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu, Nicolaos-Antonio, Cutululis, Emil Ceang, Optimal Control of Wind Energy Systems. Springer; 2008.
- [4] R. Salas, et al, On the real time estimation of the wind speed for wind energy conversion systems, CONIELECOMP 2010.
- [5] Mayo-Maldonado, J. C., et al. "Maximum Power Point Tracking Control for a DC-Generator/Multiplier-Converter Combination for Wind Energy Applications." Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. Vol. 1. 2011.
- [6] Vllarrubia, M. (2013). Ingeniería de la Energía Eólica. México: Alfaomega.
- [7] Rommel A. Vicini, Osvaldo M. Micheloud, Smart Grid, (2012) Cengage Learning, México
- [8] Diagnóstico de las Energías Renovables. Reforma Energética, Presidencia de la República, México. <http://presidencia.gob.mx/reformaenergetica/#!/diagnostico>.
- [9] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, Analysis of Electrical Machinery and Drive Systems. John Wiley and Sons, IEEE Press Power Engineering; 2004.
- [10] Hernández, Oscar, Mina, Jesús y Claudio, Abraham. Emulador de Turbina Eólica basado en el Control Vectorial de una Máquina Eléctrica. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 117-130.
- [11] Jiménez-Ramírez, Alan, López-Garza, Víctor, Molinero-Hernández, Daniel y Casillas-Farfán, Christian. Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 9-25

Instrucciones para autores

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

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

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

Resumen

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

Keywords

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

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

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Instrucciones para autores

Introducción

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

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

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

Enfocar claramente cada una de sus características

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

Explicación de las secciones del artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

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

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

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

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

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

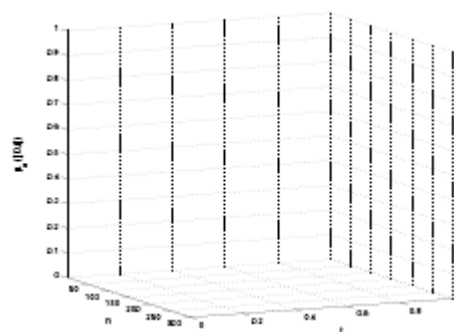


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

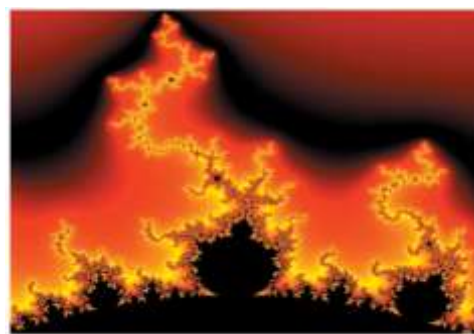


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

Instrucciones para autores

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

Ficha Técnica

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Formato de Originalidad



Taipei-Taiwan a ____ de ____ del 20 ____

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

Artículo (Article):

Firma (Signature):

Nombre (Name)

Formato de Autorización



Taipei-Taiwan a ____ de ____ del 20____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN- Taiwan a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN- Taiwan to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

Revista de Innovación Sistemática

“Validación estadística del instrumento virtual para desbalanceo dinámico en dos planos mediante un diseño de experimentos 22”

HERRERA-SÁNCHEZ, Gustavo, SILVA-JUÁREZ, Alejandro, SALAZAR-PEDRAZA, Miguel de Jesús y GALLARDO-NAVARRO, José Luis

Universidad Tecnológica de Puebla

“Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación”

LÓPEZ-MOLINA, Fredy, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín

Universidad del Istmo

“Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo”

FLORES-RAMÍREZ, Oscar, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo

Universidad Politécnica de Amozoc

“Procesamiento dactilar usando Transformada de Fourier”

HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Ángel, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

Universidad Autónoma del Estado de México

“Monitoreo del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la máquina BOY 25D utilizando LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos NI USB6009”

LÓPEZ-CORELLA, José, HERNÁNDEZ-RUIZ, Sergio, VÁZQUEZ-CUEVAS, Ignacio y HERRERA-VELARDE, Maribel

Instituto Tecnológico de Nogales

“Comparativo anticorrosivo de los acabados de alquidálico y poliuretano en pinturas ricas en zinc sobre acero al carbono”

GARCÍA-NAVARRO, Norma, PÉREZ-HERNÁNDEZ, Erik, LUGO-ISLAS, Gabriela, GALLARDO-CASTÁN, Ernesto

Universidad Veracruzana

“Emulación de turbina eólica utilizando plataforma en tiempo real”

GARCÍA-GUENDULAIN, Crescencio, PERALTA-SÁNCHEZ, Edgar, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Adán

Universidad Politécnica de Altamira

