

## J2EE PLATFORM ADAPTATION TO BUILD A MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM OF AC MOTOR FAULTS USING WAVELETS AND TPM

### ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA J2EE PARA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES AC UTILIZANDO ONDÍCULAS Y MPT

Aland Bravo Vecorena<sup>1</sup>, Víctor Rojas Cerna<sup>2</sup>, Alberto Soto Lock<sup>3</sup>

#### RESUMEN

*El presente trabajo de investigación trata sobre el diseño e implementación de un sistema prototipo de monitoreo y diagnóstico de fallas en motores industriales utilizando las técnicas de las ondículas y la metodología de mantenimiento productivo total MPT, todas ellos implementadas sobre la plataforma empresarial J2EE desplegado sobre el contenedor Apache-Tomcat. Para el prototipo se utilizó un procesador de señales DSPIC30F6010A, en donde se implementa el algoritmo de control vectorial y el módulo de comunicación remota que utiliza el puerto RS232 para comunicarse con el nodo de control vía Servlets. Los resultados experimentales demuestran que el prototipo posee ventajas de flexibilidad e interoperabilidad comparado con otras soluciones existentes.*

*Palabras clave.- Procesador digital de señales, Control vectorial, Transformada wavelet, Diseño e implementación, Mantenimiento productivo total, Edición empresarial de java.*

#### ABSTRACT

*This paper describes a research work on design and implementation of a monitor and diagnostic prototype system to detect faults in industrial motors using the techniques of the wavelets and methodology of total productive maintenance, all them implemented on the J2EE platform deployed over the Apache-Tomcat container. For the prototype a digital signal processor DSPIC30F6010A was used where is implemented the algorithm of field oriented control and the module of remote communication that uses the RS232 port to communicate with the control node through Servlets. The experimental results demonstrate that the prototype possesses flexibility and interoperability advantages compared with other existent solutions.*

*Key words.- Digital signal processor, Field oriented control, Wavelet transform, Design and implementation, Total productive maintenance, Java enterprise edition.*

#### INTRODUCCIÓN

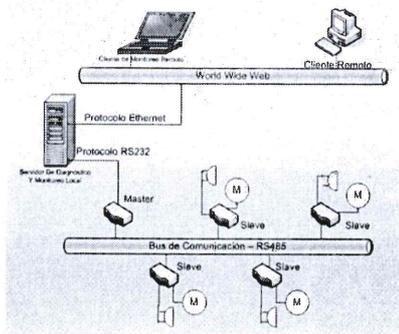
Existen diversas soluciones comerciales para implementar un sistema de monitoreo y

diagnóstico de fallas en motores industriales que sigan ciertos estándares de mantenimiento en plantas industriales, sin embargo dichas soluciones suelen tener ciertas restricciones tales como

<sup>1</sup>Graduado de la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, <sup>2</sup>Ing. Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, <sup>3</sup>Ing. MSc. Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

acceso restringido al código fuente para su adecuación a un escenario específico. Nuestra propuesta, proporciona una alternativa utilizando la plataforma empresarial J2EE, como una plataforma horizontal que permita comunicarse con los equipos de control de los motores industriales de modo que se permita tomar datos en tiempo real del estado de funcionamiento y producción de la planta. Esta solución adiciona funcionalidades intrínsecas tales como interoperabilidad a través de la comunicación remota, flexibilidad debido al acoplamiento de componentes que implementan metodologías de mantenimiento en plantas industriales tales como el MPT, uso de técnicas no convencionales de detección de fallas tales como las ondículas.

En resumen la conjunción de la plataforma empresarial de java para la comunicación remota, la técnica de control vectorial para controlar la dinámica de velocidad del motor, la transformada de ondículas para detectar cierto tipo de fallas de asimetría del rotor a través de la señal de corriente del estator, y la aplicación del TPM con el indicador OEE, todos ellos son enlazados para colaborar en forma conjunta entre los procesos del prototipo del sistema de monitoreo y diagnóstico propuesto (ver Figura 1).

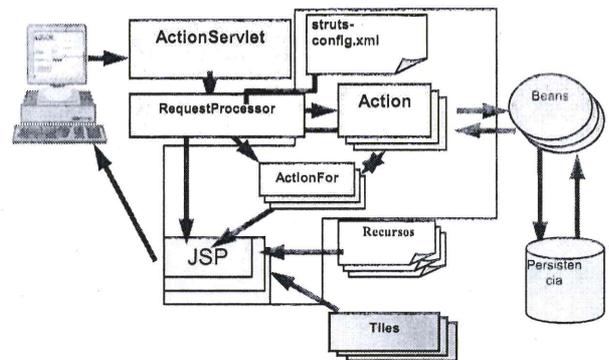


**Fig. 1** Escenario de la solución integral del sistema de monitoreo y diagnóstico de motores.

### IMPLEMENTACIÓN DE LOS INDICADORES OEE DEL MPT BAJO PLATAFORMA J2EE

El mantenimiento productivo total es una estrategia que permite mejorar la efectividad de los procesos productivos de una industria y fue desarrollada en el Instituto Japonés de Mantenimiento de Plantas,

con el objetivo de reducir las 6 grandes pérdidas. Para nuestro prototipo se implementó el indicador de Efectividad Global de los Equipos (OEE de sus siglas en inglés) utilizando un Servlet controlador que maneja la lógica de cálculo de los ratios porcentuales de disponibilidad, rendimiento y calidad requeridos para el cálculo en tiempo real del desempeño de un proceso industrial.



**Fig. 2** Arquitectura del Framework Struts.

En la Figura 2 se muestra el detalle interno de la arquitectura Struts el cual ha sido usada adecuando ciertas variaciones a través de la clase Servlet controladora "MyWelcomeManager", quien recibe peticiones de los clientes a través del objeto "request" que almacena los parámetros enviados, uno de estos parámetros es el "actiontype" que toma uno de los valores siguientes:

```
"newCommand"
"newDisplay";
"newOEE";
"userQuery";
"newUser";
```

Esta clase controladora invoca a la clase "userManager" que de acuerdo a la opción seleccionada, instancia el objeto JavaBean correspondiente (MotorDetails, Userdetails u OeeDetails). Por ejemplo cuando se selecciona la opción "newCommand", se crea una clase plana "MotorDetails" con los parámetros de conexión al puerto serie. Para el caso del indicador OEE, luego que el servlet controlador identifica la opción "newOEE", éste invoca a la clase "userManager" quien crea una instancia de la clase plana "OeeDetails", quien toma las entradas de los parámetros del usuario enviadas a través del método get. Finalmente es el servlet controlador "userManager" quien mapea las entradas a su

correspondiente instancia de la clase “OEEDetails” y genera los gráficos correspondientes de acuerdo a las opciones seleccionadas previamente por el usuario.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros utilizados para el cálculo del indicador OEE que han sido implementados en el servlet controlador “UserManager”.

**Tabla 1.** Parámetros utilizados en el cálculo del indicador OEE de efectividad global de los equipos de la metodología MPT.

Parámetro	Descripción
Tiempo total de operación	Muestra el tiempo total que la máquina está disponible para fabricar productos. En caso de existir varios turnos, se puede analizar en forma independiente.
A – Tiempo disponible	Es el tiempo total que la máquina está disponible (Tiempo Total de Operación) menos el tiempo que hayamos decidido no destinarlo a producir (por ejemplo debido a vacaciones, no tenemos carga de trabajo, no tenemos personal disponible).
B – Tiempo operativo	Es el tiempo durante el cual la máquina está fabricando productos, es decir, es el Tiempo Disponible menos las pérdidas de tiempo: averías, esperas, cambios, restricciones de línea.
C – Producción prevista	Son las unidades que deberíamos producir durante el Tiempo Disponible si fuésemos a la velocidad máxima teórica de la máquina.
D – Producción real	Es el número de unidades producidas. La diferencia entre la Producción prevista y la producción real muestra las pérdidas de velocidad tales como micro paradas y la velocidad reducida.
E – Producción real	Es lo mismo que D.
F – Piezas buenas	Son todos los productos que cumplen dentro de las especificaciones, es decir, la producción real menos las pérdidas de calidad tales como el deshecho y los re trabajos.
B/A	Disponibilidad
D/C	Rendimiento
F/E	Calidad
OEE	Disponibilidad x Rendimiento x Calidad

Para generar los resultados en formato gráfico se utilizó la librería de fuente abierta jfreechart-1.0.8, generando por separado los parámetros de disponibilidad, rendimiento y calidad. En la Figura 3 se muestran las salidas para valores simulados:

tiempo total de operación 480 horas por turno, tiempo no programado de 30, A=450, pérdidas de tiempo 60, B=390, C=100, D=92, E=92, pérdidas de calidad 5, F=87. Con estos valores se obtiene OEE=75.4.

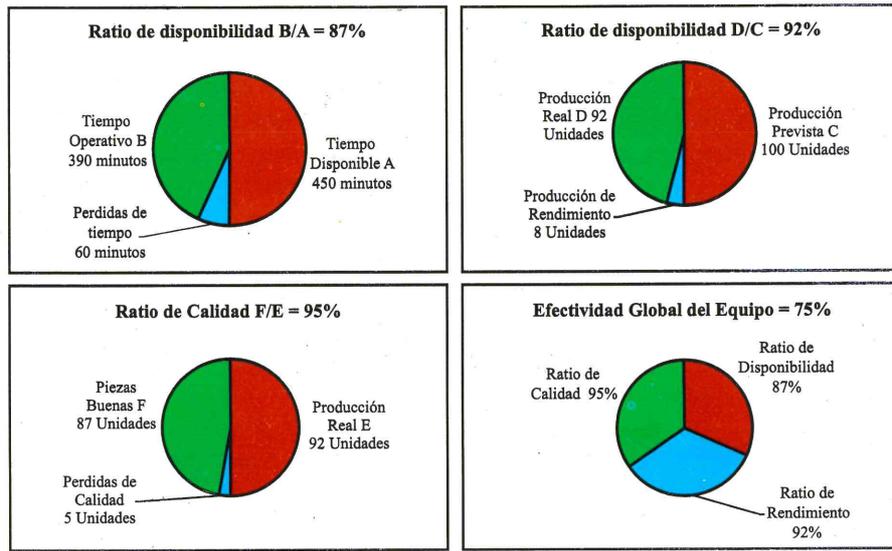


Fig. 3 Graficas de salida del servlet generador de indicadores de la metodología TPM.

A nivel de arquitectura de software, se emplea una versión personalizada del framework struts, esto es se usa un solo servlet controlador quien dependiendo de la solicitud recibida, procesa el requerimiento a una clase manager.

**IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE MONITOREO REMOTO DEL MOTOR USANDO J2EE Y DSPIC30F6010A**

Existen diversas técnicas de control de motores industriales en alterna síncronos que permiten el control de velocidad, los cuales están clasificados en una de las tres categorías: control escalar (caso control V/F), control vectorial (llamado también control de torque indirecto) y el control de torque directo.

En el caso del control escalar, el motor se alimenta con una señal de frecuencia variable generada por el modulador de ancho de pulso del inversor. La intención es mantener constante la relación V/f de modo que el torque se mantenga constante en los rangos de operación. En el control vectorial, los vectores de corriente de tres fases se convierten en un marco de referencia rotatorio de dos fases denominada d-q desde un marco de referencia rotatorio. La componente d representa la componente del flujo producido por la corriente del estator y la componente q representa la componente producida por el torque.

Estas dos componentes desacopladas pueden ser controladas independientemente, ver Fig. 4.

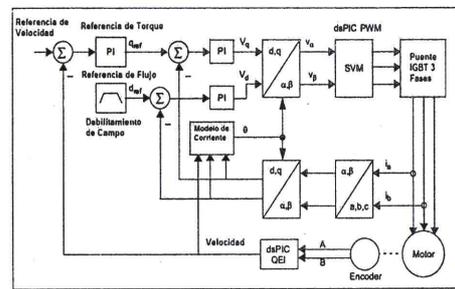


Fig. 4 Diagrama de bloques del sistema de control vectorial del motor.

Esta técnica de control simula un modelo de un motor DC excitada separadamente, la transformación desde el marco de referencia estacionario al rotatorio es realizada y controlada con referencia a un vector espacial de enlace de flujo específico (que puede ser referido al estator, al rotor o enlace al flujo de magnetización).

En general existen tres posibilidades para tal selección y por lo tanto tres controladores vectoriales diferentes: control orientado al flujo del estator, control orientado al flujo del rotor y control orientado al flujo de magnetización. Debido a que la componente de torque es controlada solamente después de realizada la transformación y por lo tanto no es la principal referencia de la entrada, esta técnica también es conocida también como control indirecto de torque, control orientado de campo o control orientado de flujo.

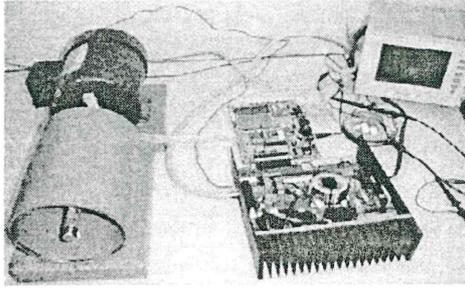


Fig. 5 Sistema de monitoreo y diagnóstico de fallas del motor AC.

En el Control de torque directo no se tiene ningún patrón de conmutación fijo, debido a que el inversor conmuta según las necesidades de la carga. La velocidad de referencia externa es decodificada para generar las referencias de torque y flujo, de ahí que estas variables se convierten en variables controladas directas y de ahí el nombre de control de torque directo. Para nuestro prototipo se utilizó la tarjeta de control MC1 dsPIC30F6010 de Microchip con el módulo HV de potencia, que incluye un encoder digital en donde se implementó en lenguaje C30 el algoritmo del control vectorial indirecto con flujo magnético orientado al rotor, el cual se comunica físicamente con una PC a través del puerto RS232 a 9600 baudios, 8 bits de paridad, 1 bit de parada y sin flujo de control utilizando el API java de comunicación serial javacomm20-win32 que es un estándar de Sun que no es parte oficial del JDK. Dicho modulo se comunica con un Servlet para el monitoreo y diagnóstico remoto.

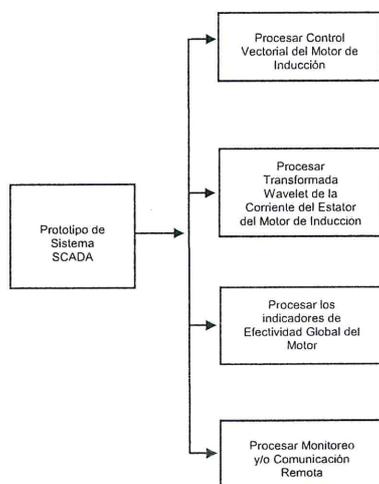


Fig. 6 Diagrama de los módulos de comunicación J2EE del sistema de monitoreo y diagnóstico de fallas de motores AC.

La secuencia dada en este escenario de comunicación remota es el siguiente:

1. El usuario ingresa al sistema a través del enlace controlMotor.html, donde elige la opción para controlar o monitorear las variables del motor y luego invoca la acción del servlet controlador "MyWelcomeManager". Los parámetros ingresados son: "portID" value="1", "action" value="wr", "timeout" value="50", "showMotor" value="D", "dtr" value="false", "cmdInput" que puede tomar uno de los valores siguientes: "I" Arrancar, "P" Parar, "A" Corriente\_A, "B" Corriente\_B, "D" Voltaje\_D, "Q" Voltaje\_Q.
2. El servlet controlador "MyWelcomeManager" instancia la clase "UserManager" quien crea una clase plana "MotorDetails", posteriormente el controlador mapea la entrada del usuario al objeto "MotorDetails".
3. Acto seguido, el servlet controlador llama al RequestDispatcher que redirecciona la llamada a un JSP, que dependiendo de la opción elegida puede tomar las variantes siguientes: plotMotor, plotIaMotor, plotIbMotor, plotVdMotor, o plotVqMotor.
4. Cada JSP internamente llama a un applet que se conecta al puerto RS232 para comunicarse con la tarjeta de control del DSPIC. Este applet utiliza el API javacomm, y genera una clase thread llamada "hilo\_modelo\_rs232", que tiene como atributo un objeto de la clase "WebSerialPort".
5. Finalmente el comando es enviado a la tarjeta de control por el puerto RS232. Por el lado de la tarjeta de control del dsPIC, se adicionó rutinas de interrupción del UART que maneja estos eventos.

En la Tabla 2, se muestra un análisis de los posibles enfoques de solución al momento de implementar la clase "WebSerialPort" responsable de la comunicación serial entre el servlet de la plataforma J2EE y la rutina de interrupción del dsPIC.

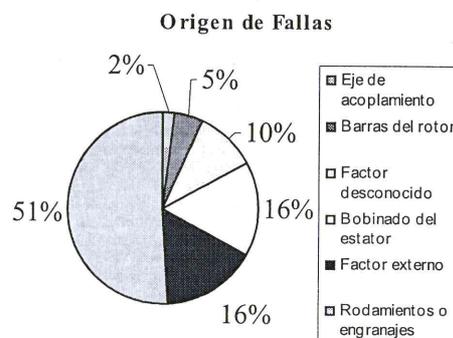
**Tabla 2.** Análisis de las alternativas de solución al uso concurrente del API de comunicación serial RS232.a través del contenedor J2EE.

Solución	Ventaja	Desventaja
Crear un puerto serial en cada objeto consumidor del recurso.	Cada clase es auto contenido.	Probable uso concurrente; la aplicación podría lanzar un PortInUseException. Para cerrar un puerto Serial se tiene que invocar al objeto mediante un método.
Crear un puerto serial fuera de cada objeto consumidor del recurso.	Uso concurrente limitado al proceso concurrente. Para cerrar un puerto no es necesario invocar al objeto consumidor.	Cada clase requiere SerialPort para ser enviado al constructor. No está protegido contra concurrencia de threads.
Crear una única clase que tenga control de todas las acciones requeridas del puerto serial.	Auto contenido. Es segura ante concurrencia de threads. La gestión para cerrar los puertos es realizada dentro de la clase.	Baja reutilización de código.
Usar el patrón de diseño singleton para el puerto serial dentro de cada objeto dependiente.	La clase es autocontenida. El uso concurrente está limitado al JVM y posee seguridad ante concurrencia de threads. La gestión para cerrar los puertos es realizada fuera de los objetos individuales dependientes.	Está limitada a un sólo puerto serial independiente del ID del puerto de comunicación.
Usar el patrón de diseño singleton para el puerto serial dentro de un grupo del recurso de todos los puertos seriales disponibles.	La clase es autocontenida. El uso concurrente está limitado al JVM y posee seguridad ante concurrencia de threads. La gestión para cerrar los puertos es realizada fuera de los objetos individuales dependientes. Puede solicitar cualquier puerto serial disponible del sistema.	Ninguna.

### IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE DETECCIÓN DE FALLAS USANDO WAVELETS

Existen diversas técnicas de detección de fallas en las maquinas de inducción mediante análisis en frecuencia de las corrientes del estator, la técnica que utiliza componentes armónicos para detectar fallas es llamada Análisis de la Firma de Corriente del Motor denominada MCSA por sus siglas en inglés (Motor Current Signature Analysis).

En la Figura 7 se muestran los porcentajes de acuerdo al origen de la falla [5].



**Fig. 7** Grafica de distribución de porcentajes por origen de fallas en los motores.

De acuerdo a la técnica MCSA, se distinguen cuatro tipos de fallas debido a factores internos del motor:

1. Asimetrías en el rotor, como resultado de una ruptura en las barras del rotor o los anillos terminales.
2. Asimetrías en el entrehierro, que origina excentricidades estáticas, dinámicas o una mezcla de ambas.
3. Asimetrías en el estator, originado por una falla de cortocircuito en los colectores.
4. Desajustes en rodamientos y engranajes, para el caso de motores que usan esta configuración.

Asimismo el MCSA considera factores externos de fallas tales como:

- Acoplamientos mecánicos.
- Alimentación asimétrica en los voltajes de alimentación.
- Cargas variables oscilantes.

En la Tabla 3 se detalla el resumen de los tipos de fallas, con su respectiva característica y detección usando la técnica MCSA, así como su consecuencia en el desempeño del motor. Para nuestro estudio se ha restringido la investigación, al escenario de fallas producidas por asimetrías del rotor y su respectiva detección a través de la señal de corriente del estator.

**Tabla 3.** Utilizados en el cálculo del indicador de efectividad global de los equipos OEE de la metodología MPT.

Falla o condición	Característica	Consecuencia	Detección MCSA
Barra rota del rotor	La distribución asimétrica de corriente del rotor del motor provoca una asimetría en la FMM del rotor	Se genera una FMM en retroceso	Las bandas laterales correspondientes a dos veces la frecuencia de deslizamiento alrededor de la frecuencia fundamental, así como las componentes del quinto y del séptimo armónico
Excentricidad Estática	Espacio de aire asimétrico, con una longitud de espacio de aire mínima fija espacialmente	Espacio de aire asimétrico, con una longitud de espacio de aire mínima fija espacialmente	Presencia de armónicos en el slot del estator
Excentricidad Dinámica	Espacio de aire asimétrico, con un periodo de rotación y espacio de aire radial mínima	Se genera un jale magnético desbalanceado	Presencia de armónicos en la hendidura del rotor donde se considera el orden de excentricidad dinámica
Excentricidad Mixta	Espacio de aire asimétrico con rotación periódica y una longitud de espacio de aire radial mínima	Se genera un jale magnético desbalanceado	1) Armónicos de los hendidura del rotor 2) Armónicos de las hendiduras del rotor que considera el orden de excentricidad dinámica 3) Bandas laterales correspondientes a la frecuencia del Rotor
Corto circuito en el bobinado del Estator	Menor número de vueltas de bobinado y una mayor FMM de retroceso	FMM asimétrica del estator y de las bobinas	1) Armónicos de las hendidura del rotor 2) Bandas laterales correspondientes a la frecuencia del rotor 3) Componente del tercer armónico 4) Corriente desbalanceada en las tres fases
Voltaje de alimentación asimétrica	-	-	1) Componente del tercer armónico 2) Corriente desbalanceada en las tres fases
Carga oscilante	-	-	Bandas laterales correspondientes a la frecuencia de oscilación de la carga

En las Tablas del 4 al 11, se muestran los valores simulados de diversos escenarios de fallas en los motores de inducción (en el dominio de la frecuencia), los cuales fueron utilizados para validar los valores umbrales de detección usando la técnica de ondículas.

**Tabla 4.** Modelo matemático de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido a la asimetría del estator.

$f_1$	$s$	$k$	$f_{brb} = (1 - 2ks)f_1$	$f_{brb} = (1 + 2ks)f_1$
60	0.05	1	54	66
60	0.05	2	48	72
60	0.05	3	42	78
60	0.05	4	36	84
60	0.05	5	30	90
60	0.05	6	24	96

**Tabla 5.** Modelo matemático alternativo de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido a la asimetría del estator.

$f_1$	$s$	$\frac{k}{p}$	$f_{brb} = [\frac{k}{p}(1-s) - s]f_1$	$f_{brb} = [\frac{k}{p}(1-s) + s]f_1$
60	0.05	1	54	60
60	0.05	5	282	288
60	0.05	7	396	402
60	0.05	9	510	516
60	0.05	11	624	630
60	0.05	13	738	744

**Tabla 6.** Modelo matemático de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido a la asimetría del estator que considera el número de barras del rotor.

$f_1$	$p$	$s$	$Q_r$	$k$	$n$	$f_{s,exc} = [kQ_r \frac{(1-s)}{p} - n]f_1$	$f_{s,exc} = [kQ_r \frac{(1-s)}{p} + n]f_1$
60	2	0.05	32	1	1	852	972
60	2	0.05	32	1	5	612	1212

**Tabla 7.** Modelo matemático de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido a la asimetría de aire del entrehierro – excentricidad dinámica.

Ecuación	$f_1$	$p$	$s$	$Q_r$	$k$	$n_d$	$n$	$f_{d,exc}$
$f_{d,exc} = [(kQ_r + n_d) \frac{(1-s)}{p} - n]f_1$	60	2	0.05	32	1	1	1	880.5
$f_{d,exc} = [(kQ_r + n_d) \frac{(1-s)}{p} + n]f_1$	60	2	0.05	32	1	1	1	1000.5
$f_{d,exc} = [(kQ_r - n_d) \frac{(1-s)}{p} - n]f_1$	60	2	0.05	32	1	1	1	823.5
$f_{d,exc} = [(kQ_r - n_d) \frac{(1-s)}{p} + n]f_1$	60	2	0.05	32	1	1	1	943.5
$f_{d,exc} = [(kQ_r + n_d) \frac{(1-s)}{p} - n]f_1$	60	2	0.05	32	1	2	1	909
$f_{d,exc} = [(kQ_r + n_d) \frac{(1-s)}{p} + n]f_1$	60	2	0.05	32	1	2	1	1029
$f_{d,exc} = [(kQ_r - n_d) \frac{(1-s)}{p} - n]f_1$	60	2	0.05	32	1	2	1	795
$f_{d,exc} = [(kQ_r - n_d) \frac{(1-s)}{p} + n]f_1$	60	2	0.05	32	1	2	1	915

**Tabla 8.** Modelo matemático de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido a la asimetría del aire del entrehierro – excentricidad mixta.

$f_1$	$s$	$m$	$f_{mix,exc} = f_1[1 - k \frac{(1-s)}{p}]$	$f_{mix,exc} = f_1[1 + k \frac{(1-s)}{p}]$
60	0.05	1	3	117
60	0.05	2	-54	174

**Tabla 9.** Modelo matemático de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido al cortocircuito en el bobinado del estator.

$f_1$	$p$	$s$	$n$	$k$	$f_{st} = f_1 \cdot [\frac{n}{p}(1-s) - k]$	$f_{st} = f_1 \cdot [\frac{n}{p}(1-s) + k]$
60	2	0.05	1	1	31.5	88.5
60	2	0.05	2	1	3	117
60	2	0.05	1	5	271.5	328.5

**Tabla 10.** Modelo matemático alternativo de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido al cortocircuito en el bobinado del estator que considera el número de barras del rotor.

$f_1$	$p$	$s$	$Q_r$	$k$	$m$	$n$	$f_{st} = f_1 \{kQ_r \frac{(1-s)}{p} \pm 2m \pm n\}$
60	2	0.05	32	1	0	-1	852
60	2	0.05	32	1	0	1	972
60	2	0.05	32	1	1	1	1092
60	2	0.05	32	1	2	1	1212

**Tabla 11.** Modelo matemático alternativo de las frecuencias detectadas en la corriente del estator debido al cortocircuito en el bobinado del estator que considera el número de barras del rotor y el porcentaje de saturación.

$f_1$	$p$	$s$	$Q_r$	$k$	$i$	$m$	$n$	$f_{st} = f_1 \{ (kQ_r \pm i) \frac{(1-s)}{p} \pm 2m \pm n \cdot s \}$
60	2	0.05	32	0	1	0	1	31.5
60	2	0.05	32	0	2	0	1	60
60	2	0.05	32	0	3	0	1	88.5
60	2	0.05	32	0	4	0	1	117
60	2	0.05	32	0	5	0	1	145.5

Para efectos de validar la técnica propuesta de detección vía ondículas, se simuló en Matlab-Simulink el comportamiento del motor de inducción AC, asimismo se generaron patrones de fallas y su correspondiente umbral de detección a través de la señal de corriente del estator, quedando

pendiente la comprobación experimental para trabajos posteriores.

detección usando la ondículas madre daub4 con 5 niveles de resolución (ver Figura 10).

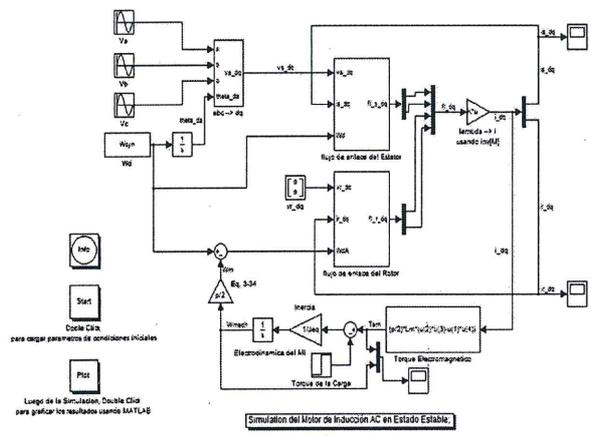


Fig. 8 Diagrama de bloques del modelo del motor de inducción en estado estable.

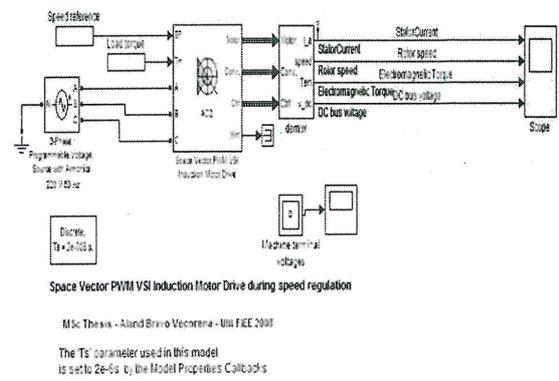


Fig. 10 Diagrama de bloques del escenario de simulación de fallas de la asimetría del rotor del motor (Simulink del Matlab versión R2007a).

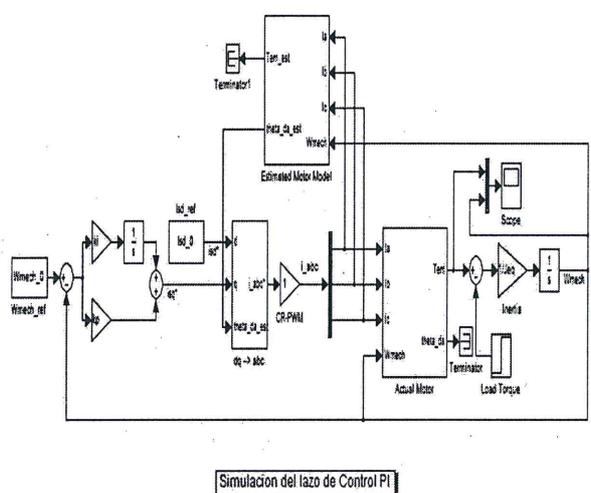


Fig. 9 Diagrama de bloques del lazo de control PI del sistema de control vectorial del motor.

**RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA J2EE PARA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES INDUSTRIALES USANDO WAVELETS**

En las Figuras 11, 12, 13, 14 y 15 se muestran los resultados del procesamiento del análisis y síntesis de la señal de corriente del estator al cual se le ha adicionado armónicos que simulan el escenario de falla de asimetría del rotor y su respectiva

Para emular un escenario real, se simula un torque de amplitud 8 N. m. y -8 N. m. en los intervalos de tiempo 0.5 y 1.5 segundos de iniciado la simulación. Del mismo modo, se simula una referencia de velocidad de 900 y 1500 RPM en los intervalos 0 y 1 segundo de iniciado la simulación.

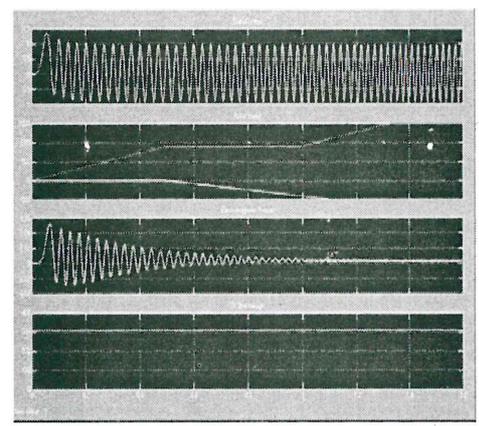


Fig. 11 Salidas de la simulación del motor en estado normal y una amplitud 8 N. m. de torque, de arriba hacia abajo: Corriente del estator, Velocidad del rotor, Torque electromagnético, y Voltaje del bus DC.

El algoritmo utilizado es una variante propuesta en [10, 11], pero en vez de una señal de vibración como entrada, se utiliza la señal de corriente del estator. Se efectuaron pruebas comparativas entre el algoritmo de ondículas con el de fourier y se comprueban las ventajas de la transformada de

ondículas en la determinación de las irregularidades presentes en la corriente del estator del motor.

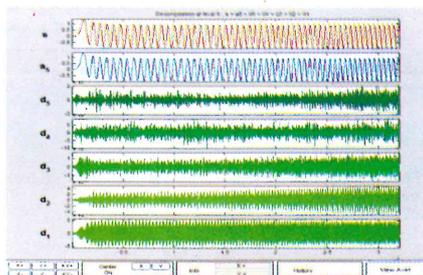


Fig. 12 Salidas de la descomposición del motor en estado normal con 8 N. m. de torque usando la ondícula madre Daub4 con 5 niveles de resolución de arriba hacia abajo: señal de corriente del estator, señal de promedio a nivel 5, señal de detalle nivel 5, 4, 3, 2 y 1.

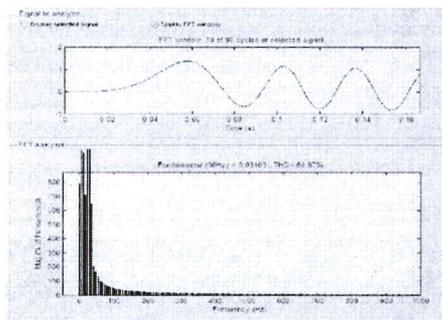


Fig. 13 Análisis en frecuencia de la señal de corriente del estator en condiciones normales, se aprecia un distorsión armónica total de 64.97%.

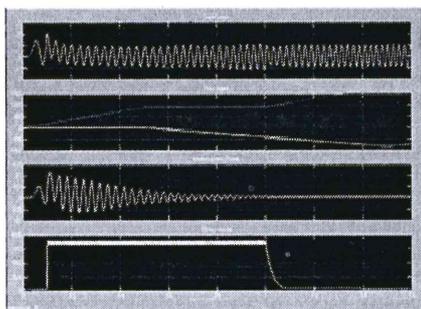


Fig. 14 Salidas de la simulación del motor bajo presencia del 5to armónico con 22 V de amplitud y una amplitud 8 N. m. de torque, de arriba hacia abajo: corriente del estator, velocidad del rotor, torque electromagnético, y voltaje del bus DC.

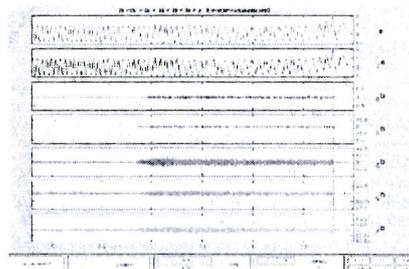


Fig. 15 Salidas de la descomposición del motor bajo presencia del 5to armónico con una amplitud de 22 V y una amplitud 8 N. m. de torque, usando la ondícula madre Daub4 con 5 niveles de resolución de arriba hacia abajo: señal de corriente del estator con armónico, señal de promedio a nivel 5, señal de detalle nivel 5, 4, 3, 2 y 1.

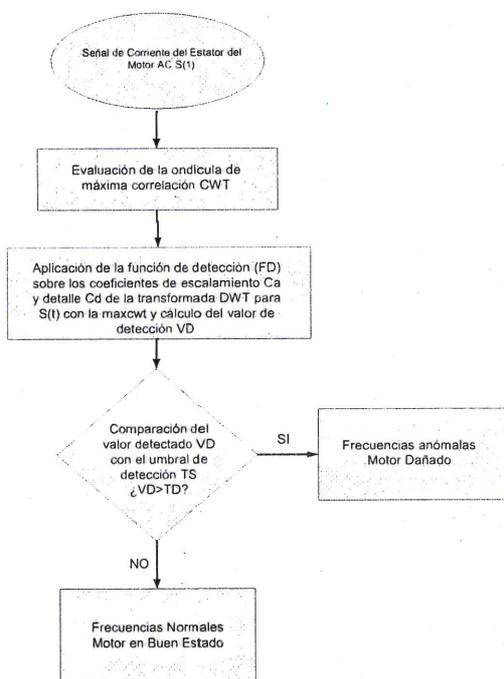


Fig. 16 Algoritmo usado para la detección de fallas en motores AC a través de la señal de corriente del estator del motor AC empleando ondículas.

Para la aplicación de la detección de fallas del motor AC usando ondículas (ver Figura 16), se procede de la siguiente manera:

Se generan los patrones de fallas en corriente del estator en la variable chan1, tomando como parámetros de entrada la frecuencia de muestreo. Posteriormente se aplica la función maxcwt para

determinar la ondícula de máxima correlación (maxwav), esto sobre los coeficientes CWT que pueden procesarse como DWT ya que el algoritmo se aplica sobre los coeficientes de escalamiento (Ca) y de detalle (Cd) de la DWT, luego se define maxwev, con el cual se evalúan los Ca y Cd hasta un segundo nivel de resolución y se sustituye en la función de detección (FD) para luego obtener el VD (valor de detección), finalmente se compara el VD con el TD para determinar la falla del motor si  $VD > TD$

La función de detección FD se calcula a partir de las ecuaciones:

$$FD = \frac{(SDWT_r)^2}{EDWT_r * SDWT_{r+1}}$$

$$EDWT_r = \sum_{k=1}^{\frac{F_0}{2}} (Ca_1(k))^2$$

$$SDWT_r = \sum_{k=1}^{\frac{F_0}{2}} (Ca_1(k))^2 * k$$

Donde:

$EDWT_r$  es la función de energía de los coeficientes ondícula en la sección r,  $SDWT_r$  es la función que permite valorar el incremento de las distorsiones, y "r" define el r-esimo segmento de la transformada ondícula discreta DWT, siendo Ca1 los coeficientes de escalamiento para el primer nivel de descomposición y que podrían ser sustituidos por los Ca2 del segundo nivel o por los coeficientes de detalle Cd1 y Cd2 de la primera y segunda etapa de descomposición respectivamente.

FD denota una secuencia de valores que definen las discontinuidades en cada segmento de señal, de ahí que se toma el valor máximo de cada segmento de una nueva segmentación ahora sobre FD (10 puntos

por intervalo) y se establece la proporción de la diferencia entre el mayor valor de los máximos de cada nuevo segmento FD con la media de éstos máximos quedando el valor de detección de la siguiente manera:

$$VD = \frac{\max X_{\max FSD} - \hat{X}_{\max SFD}}{\hat{X}_{\max SFD}} \geq TD$$

Este parámetro es útil para la regresión con los coeficientes de aproximación Ca y de detalles Cd, en la que el subíndice maxSFD indica que es el valor máximo de cada uno de los segmentos de FD y  $\hat{X}_{\max SFD}$  es el valor promedio de la totalidad de los valores máximos, mientras que  $\max X_{\max FSD}$  es el mayor valor entre ellos.

Al aplicar el algoritmo sobre los coeficientes de detalle Cd1 y Cd2 de la DWT se obtiene el valor de detección sobre las componentes de alta frecuencia lo que es útil para discriminar la falla del motor AC.

En la Tabla 12 se muestra el resumen de las detecciones de fallas de asimetría en el rotor usando la técnica de ondículas descrita.

Se puede apreciar que cuando el torque es bajo (2 N-m.), se detecta un falso positivo para armónicos con una amplitud de 12, mientras que en escenario de torque alto (8 N-m) se detecta correctamente, esto debido a la característica dinámica del motor, así como las propiedades de las ondículas, que ofrece una alta resolución de frecuencia en el tiempo para frecuencias bajas, y una baja resolución en frecuencia en el tiempo para frecuencias altas.

Esto es una ventaja comparado con Fourier que en todo instante de tiempo la resolución en frecuencia se mantiene.

**Tabla 12.** Resultado de la detección de fallas en el motor AC a través de la corriente del estator usando la técnica de ondículas.

Señal de Prueba	ZCa1	ZCa2	Zd1	Zd2	Zfft	Detectado	Real
ISAMRTO2	0.4641	0.4782	0.2045	0.5071	45.9675	Ok	Ok
ISAMRAR5AM12TO2	0.7515	0.7524	1.3181	1.8301	46.1455	Ok	No Ok
ISAMRAR5AM22TO2	1.2571	1.2334	1.0144	1.1270	46.0521	No Ok	No Ok
ISAMRTO4	0.3942	0.4068	0.1950	0.3763	46.9212	Ok	Ok
ISAMRAR5AM12TO4	0.6660	0.6677	1.3301	0.6882	47.1161	Ok	No Ok
ISAMRAR5AM22TO4	1.2040	1.1787	0.9542	1.0242	46.9775	No Ok	No Ok
ISAMRTO6	0.4041	0.3728	0.3799	0.4450	47.4047	Ok	Ok
ISAMRAR5AM12TO6	1.2600	1.2489	1.3756	9.0749	47.5636	No Ok	No Ok
ISAMRAR5AM22TO6	1.6973	0.8303	1.0295	16.3101	47.4791	No Ok	No Ok
ISAMRTO8	0.3518	0.3753	0.3131	0.3859	47.6313	Ok	Ok
ISAMRAR5AM12TO8	1.2274	1.2513	1.1571	8.6578	47.7995	No Ok	No Ok
ISAMRAR5AM22TO8	1.1581	1.1335	3.0094	1.2970	47.7115	No Ok	No Ok

ISAMRAR5AM12TO2 significa la corriente del estator  $I_s$  en la línea A, con marco de referencia al rotor (MR), con un armónico en la quinta componente (AR5), con una amplitud 12 del armónico (AM12), y un torque de 2 N.m. (TO2). En todos los casos se han simulado fallas de asimetrías en el rotor solamente.

### CONCLUSIONES

Se ha demostrado el uso de las ondículas como una alternativa viable para la detección de fallas en el motor AC, sin embargo aún queda por investigar la afinación óptima del valor umbral de detección, teniendo en cuenta el comportamiento dinámico del sistema.

Se ha desarrollado un entorno de simulación vía la corriente del estator del motor, para detección de fallas usando modelos en frecuencia para emular los efectos generados en asimetrías del espacio de aire del entrehierro, asimetrías en el estator, desajustes en los rodamientos y engranajes.

Se ha desarrollado un software de código abierto que implementa la metodología TPM a través del

indicador OEE, que facilita la recolección de datos en tiempo real y viabiliza mejoras en los equipos de producción durante todo su ciclo de vida.

Se ha comprobado la ventaja que provee la plataforma J2EE es la independencia de la capa de presentación con la capa de la lógica de negocio, bajo este contexto, el empleo del Framework struts con el uso de la librería de código libre jfreechart-1.0.8, brindan una ventaja adicional para visualizar la data en forma gráfica y mantener la separación de la capa visual con la lógica de acoplamiento interno del sistema embebido.

Como implicancia futura, este sistema podría ser utilizado como una plataforma base para el departamento técnico de una empresa que requiera presentar reportes referida al rendimiento de las máquinas y equipos de forma uniforme.

### APÉNDICE

Detalle de las especificaciones técnicas del modelo del motor utilizado para el prototipo, (ver Tabla 13).

Tabla 13. Parámetros del motor de inducción trifásico LEESON C4T34FB5A.

Datos	Valor	Descripción de los Parámetros del Motor LEESON C4T34FB5A
Pot	1/3 HP	Potencia
PF	74 %	Factor de Potencia
V	208-230 V	Voltaje
F	60 Hz	Frecuencia
RPM	3450	Revoluciones por minuto
PH	3	Fases
Rs	8.061 $\Omega$	Resistencia del estator por fase
Rr	2.985 $\Omega$	Resistencia del rotor por fase
Xls	5.6 $\Omega$	Reactancia del estator a 60 Hz
Xlr	2.296 $\Omega$	Reactancia del rotor a 60 Hz
Xm	130.2 $\Omega$	Reactancia magnética a 60 Hz
Jeq	0.025 kg·m <sup>2</sup>	Inercia equivalente del sistema
P	2	Número de polos
T	0.078 s	Constante de tiempo del Rotor

A continuación se detallan los modelos matemáticos de los diversos escenarios de fallas en los motores de inducción que fueron utilizados en el análisis de fallas MCSA.

a) Condiciones normales del motor.-

$$f_r = (1-s) f_1$$

Siendo:  $f_r$  frecuencia del rotor,  $s$  deslizamiento y  $f_1$  la frecuencia fundamental

b) Condiciones asimétricas del rotor.-

$$f_{brb} = (1 \pm 2ks) f_1, \quad k=1, 2, 3, \dots$$

$$f_{brb} = [k/p * (1-s) \pm s] f_1, \quad k/p=1, 5, 7, \dots$$

Siendo:  $f_{brb}$  frecuencia de la barra rota del rotor o frecuencia de las bandas laterales,  $s$  deslizamiento,  $f_1$  la frecuencia fundamental y  $p$  el número de polos del motor

c) Condiciones de asimetría de aire del entrehierro.-

1. Excentricidad estática

$$f_{s,exc} = [k Q_r (1-s)/p \pm n] f_1, \quad k=1, 2, 3, \dots; n=1, 3, 5, \dots$$

Siendo:  $n$ , el orden de los armónicos de tiempo en el estator que están presentes en la fuente de alimentación del motor,  $Q_r$  es el número de slots del rotor,  $s$  es el deslizamiento, y  $p$  el número de polos del motor.

2. Excentricidad dinámica

$$f_{d,exc} = [(k Q_r \pm n_d)(1-s)/p \pm n] f_1, \quad k=1, 2, 3, \dots; n_d=1, 2, 3, \dots; n=1, 3, 5, \dots;$$

Siendo:  $n$ , el orden de los armónicos de tiempo en el estator que están presentes en la fuente de alimentación del motor,  $n_d$  el orden de excentricidad dinámica,  $Q_r$  es el número de slots del rotor,  $s$  es el deslizamiento, y  $p$  el número de polos del motor.

3. Excentricidad mixta

$$f_{mix,exc} = f_1 [1 \pm k(1-s)/p], \quad k=1, 2, 3, \dots; k/p=1, 2, 3, \dots;$$

d) Condiciones de asimetrías del estator.-

$$d.1) f_{st} = |n/p (1-s) \pm k| f_1, \quad n=1, 2, 3, \dots; k=1, 3, 5, \dots;$$

$$f_{st} = f_1 \{k Q_r (1-s)/p \pm 2m \pm n\},$$

Siendo:  $f_{st}$ , la frecuencia de falla del bobinado en el enrollado del estator.

$$d.2) f_{st} = f_1 \{(k Q_r \pm i)(1-s)/p \pm 2m \pm n.s\}, \quad i=1, 2, 3, \dots; n=1, 2, 3, \dots; k=1, 2, 3, \dots; m=1, 3, 5, \dots;$$

Siendo:  $f_{st}$ , la frecuencia de falla del bobinado en el enrollado del estator,  $k$  la cantidad de hendiduras del rotor,  $m$  parámetro de saturación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las contribuciones de los trabajos previos sobre la técnica de ondículas realizados en la FIEE-UNI, que motivaron la extensión de esta técnica en el área del control automático.

## REFERENCIAS

1. **Fuller, J. F., Fuchs, E. F., Roesler, K. J.**, "Influence of harmonics on power distribution system protection", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 549-557, Apr. 1988.
2. **Mohan, N.**, "Advanced Electric Drives". Minneapolis USA, 2001.
3. **Creed Huddleston**, "Intelligent Sensor Design Using the Microchip dsPIC". Elsevier, MA 01803 USA, 2007.
4. **Nievergelt, Y.**, "Wavelets Made Easy". New York USA, 1999.
5. **Kliman, G. B., Stein, J.**, "Induction Motor Fault Detection via Passive Current Monitoring", Proceedings of International Conference (ICEM'90), Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, pp. 13-17, 1990.
6. **Thomson, W. T., Orpin, P.**, "Current and Vibration Monitoring for Fault Diagnosis and Root Cause Analysis of Induction Motor Drives", presented at the Proceedings of Thirty-First Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory. Texas A&M University, College Station, Texas, pp. 61-67, 2002.
7. **Bravo Vecorena, A.**, "Aplicación del Control Vectorial y la Transformada Wavelet para el Monitoreo y diagnóstico Remoto de Motores Industriales", disertación MSc Automática. Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2008.
8. **Bravo Vecorena, A.**, "Diseño e Implementación de una Biblioteca Digital Distribuida basaba en Web Services para el Proyecto Huascarán", disertación MSc. Telemática. Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2005.
9. **Bravo Vecorena, A.**, "Aplicación de la Transformada Wavelet y las Redes Neuronales para el Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas", disertación Tesis de Ingeniero de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2003.
10. **Osorio Sánchez, A.**, "Algoritmo para detección de vibraciones anormales en maquinarias utilizando la transformada wavelet", disertación Tesis de Ingeniero de la Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad de Las Américas Puebla - México, 2006.
11. **Tristan, J.**, "Creating Music by Listening", disertación Tesis de Doctorado de la Facultad de Ciencia y Arte, Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT - USA, 2005.

Correspondencia: [abravo@uni.edu.pe](mailto:abravo@uni.edu.pe)

Recepción de originales: Octubre 2007

Aceptación de originales: Diciembre 2007