



METODOLOGÍA EN EL USO DE RUIDO EN COMPONENTES ELECTROMECAÓNICAS DE UN EQUIPO INDUSTRIAL EN OPERACIÓN PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Sergio Blas Ramírez Reyna
seblrr@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial

Manuel González Hernández
mghdez@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial

Maximino Peña Guerrero
mpenag@ipn.mx

*Departamento de Acústica ESIME – Zacatenco, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del
Instituto Politécnico Nacional*

José De Jesús Negrete Redondo
josejnegrerter@yahoo.com.mx

*Departamento de Acústica ESIME – Zacatenco, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del
Instituto Politécnico Nacional*

Abstract

In most of the components of electromechanical equipment has the characteristic noise listening or recording as an indication of a possible failure. The technical staff of a company used for the purpose of maintaining equipment and facilities under operating since by systematic inspection and correction of faults in development before they occur or before they develop into major defects is known as preventive maintenance. This maintenance process should include tests, measurements, adjustments and replacement of parts, specifically to the detention of failures where they occur, they are reflecting the cost and quality of manufactured items, mainly the security of the operators. Then the faults can be elucidated by the components' noise generated by equipment in operation as a sign of failure. Here we present a methodology of the technique for preventive maintenance noise-based. This methodology usually consists in select some techniques and methods to reach the place and maybe fail just by the noise emitting by the equipment's components in operation.

Key words: preventive maintenance, noise, filters

1 INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los componentes de equipos electromecánicos se tiene la característica de escuchar o registrar ruido como indicio de una posible falla. La técnica que el personal de una

empresa utiliza con el propósito de mantener un equipo en condiciones y facilidades de operación dado que por inspección sistemática, y corrección de fallas en desarrollo antes de que ellas ocurran o antes de que se desarrollen en defectos mayores se conoce como mantenimiento preventivo. Este proceso de mantenimiento debe



incluir pruebas, medidas, ajustes y reemplazo de partes, hacer específicamente la detención de fallas donde ocurran, estas están reflejando el costo y calidad de los artículos fabricados. Entonces las fallas se pueden elucidar por medio del ruido que los componentes del equipo en operación generan como un indicio. La señal capturada con un micrófono se compara con un patrón de señales previamente registradas en una base de datos del mismo equipo pero en condiciones normales. Aquí presentamos una metodología de la técnica alternativa para mantenimiento preventivo basada en ruido. Los métodos y técnicas que nos permiten elucidar la falla de un componente utilizando su ruido cuando el equipo industrial está en operación, nos lleva a describir una metodología que permita con estas técnicas mantener preventivamente algún otro dispositivo.

Los patrones de señales almacenados en la base de datos fueron igualmente capturadas y analizadas sus propiedades, quedando establecidas como los coeficientes de su representación matemática y las que serán comparadas con aquellas obtenidas en operación a tiempo real.

Para una eficiencia notable se debe contar con un sistema computacional para monitorear o supervisar las fallas con el proceso de las señales de ruido. La señal que se captura se envía a un Convertidor Analógico Digital (ADC), para transformarla en un conjunto de datos que se tratan usando Análisis de Fourier [Cha87], [Wei67], especialmente la Transformada Discreta de Fourier (DFT) [Smi07], [Bur85] y el Código de Predicción Lineal (LPC) [Mar76], [Mak75]. Este último es el que se utilizó en los resultados mostrados.

Una falla existe, si la señal capturada por el micrófono de la componente del equipo no corresponde bajo una tolerancia con la señal registrada previamente en la base de datos.

A pesar de que mantenimiento preventivo generalmente se considera de gran valor, hay riesgos tales como fallas de equipo o error humano involucrado cuando se realiza mantenimiento preventivo.

Métodos comunes para determinar donde la organización de políticas de mantenimiento preventivo de manejo de fallas deben ser aplicadas son: las recomendaciones requerimientos de códigos y legislación dentro de la jurisdicción, que un experto piensa cómo debe ser hecho, o el mantenimiento que se ha hecho en equipo similar [Cam90].

Sin embargo, el Centro de Confiabilidad de Mantenimiento, suministra el más riguroso método para determinar políticas de mantenimiento aplicables y efectivas – que pueden incluir tareas de mantenimiento preventivo – para un elemento. Mantenimiento preventivo es conducido a mantener un equipo trabajando y / o extender la vida media del equipo es realmente el propósito y como consecuencia hay más elementos que ayudan a hacerlo. Claramente hemos mencionado que cuando la falla ocurre el mantenimiento correctivo, algunas veces llamado “reparación” conduce a que el equipo siga trabajando, el tiempo de reparación algunas veces es muy grande. La meta principal de mantenimiento es evitar o mitigar las consecuencias de la falla del equipo. Esto puede prevenir la falla antes de que ella ocurra. Las actividades del mantenimiento preventivo incluyen la revisión parcial o completa en periodos especificados. Además, los obreros pueden registrar los deterioros del equipo, así como conocer el reemplazo o reparación de las partes dañadas antes de que ellas causen una falla del sistema. El programa de mantenimiento preventivo ideal prevendrá todas las fallas del equipo antes de que ocurran. Sin embargo no hay políticas de la supervisión o sistemas automáticos para prevenir la falla en un equipo basado en



ruido de las componentes cuando está en operación o al menos monitorear la falla por el ruido del componente. Algunas compañías ofrecen herramientas, consejos y aplicaciones de mantenimiento preventivo basados en monitoreo usando acelerómetros, sensores de vibración y redes de accesorios para situaciones industriales. Sus sensores son esenciales para programas de monitoreo de vibración, ahorran y reducen paros técnicos y mejoran la seguridad en las fábricas en todo el mundo.

Usualmente las máquinas de las fabricas sufren el desalineado de los ejes, balanceo de los rotores, fallas en los rodamientos o engranes. Datos de monitoreo de vibración nos permiten monitorear máquinas y detectar fallas.

Esas compañías son especialistas en productos de mantenimiento preventivo, por ejemplo, acelerómetros, sensores de velocidad, sensores 4-20mA, sensores piezoeléctricos, emisores de vibración, alarmas de vibración, especialidad de sensores, sensores para áreas peligrosas, cables, conectores, vibradores y más.

Pero la diferencia entre usar un acelerómetro para detectar la falla o usar un micrófono para escuchar el ruido de la falla es que el acelerómetro necesita estar en contacto con la componente y el micrófono no.

Nos damos cuenta que las fallas inician cuando algún ruido no usual de la componente del equipo se presenta, aun cuando dicho ruido no lo escuchamos. Esto nos puede indicar que probablemente ocurrirá una falla en el equipo. Por lo tanto detección de fallas es un subcampo de ingeniería del control que trata con la identificación de la falla bajo alguna tolerancia y el tipo de falla y su localización. Dos planteamientos se pueden distinguir reconocimiento directo de patrones y lectura de sensores que indican una falla y un análisis de

discrepancia entre la lectura del sensor y los valores esperados, derivados del modelo. En el último caso, típicamente la falla se ha detectado si la discrepancia o el residuo están debajo de cierto nivel. Es entonces la tarea de aislar la falla para categorizar su tipo y localización en la maquinaria.

2. Metodología en uso de ruido generado en componentes de un equipo industrial para el mantenimiento Preventivo.

Una vez establecido el plan y conocimiento de la distribución de maquinaria y los componentes que se han seleccionado para capturar las señales de ruido con los micrófonos, se propone la siguiente metodología para el monitoreo de la falla del componente si ocurre. Entonces listaremos los paso a seguir.

1. Generación de un archivo con los ruidos de los componentes en cuestión en su estado normal de operación.
2. Colocar los micrófonos en sitios adecuados para la captura del ruido.
3. Captura de las señales de los componentes en operación con intervalos de tiempo predefinidos y pequeños casi instantáneos.
4. La señales de ruido capturadas en tiempo con los micrófonos y los convertidores analógicos digitales como se muestra en el bloque 1 y 2 de la figura 1, cada señal es filtrada para obtener una función característica con la que se forma un vector cuyas componentes son los valores de la energía que tiene determinada porción de espectro de frecuencias (i.e. 100-300, 300-600, . . . , 4000-5000 Hz). Los componentes del vector se obtienen calculando en cada intervalo las frecuencias; o el número de veces de la señal con nivel cero; o el cálculo del promedio de la amplitud en cada señal; también la magnitud de cada señal, o el cálculo del máximo o el mínimo de la señal,

entre otras. Sabemos que las componentes del vector representan el ruido de la misma clase. Si el ruido cambia las componentes del vector también cambian. Estas señales son tratadas en tiempo real usando técnicas DFT o LPC.

5. Se consideraron tres clases de ruido, Normal, Anormal y Peligroso. En la figura 1, el block 3 contiene las funciones necesarias para inferir el estado del equipo que será analizado. Para deducir un estado específico, se puede utilizar alguna de las técnicas; base de datos, redes neuronales, sistemas expertos, expresiones regulares, técnicas de compiladores o sistemas inteligentes complejos.
6. Una vez que se han obtenido los vectores, se comparan con los de la base de datos para inferir o deducir que clase de ruido se generó por la componente del equipo. Sabemos que cada vector representa un cierto tipo de ruido.
7. Conversión de la señal de analógica a digital y de digital a analógica, para verificar su fidelidad.
8. Análisis de la señales identificando sus características.
9. Aplicación de ventaneo o discretización de la señal en rangos pequeños.
10. Rango de tolerancia entre un ruido establecido en el archivo y otro generado en la operación.
11. Aplicación de de mínimos cuadrados para ver su desviación
12. Sistema computacional que reconoce cómo anunciar una falla cuando un componente hacen un ruido inusual, comparado con el ruido original previamente grabado en el archivo de ruidos.
13. A fin de conseguir el resultado aplicamos Procesamiento Digital de Señales. Digital Signal Processing (DSP) [keh08], [ieee79] a mantenimiento preventivo.

14. Diseño de un modelo para el tratamiento de la señal. Que incluye: Micrófonos, Convertidor A/D , D/A Matemáticas y Software.
15. En la figura 1 se muestra el diagrama que representa el sistema computacional, que recibe la señal de entrada por el micrófono que se envía al convertidor analógico digital mostrado en el boque 1 de la figura 1.
16. Cada señal es filtrada obteniendo sus valores característicos. Para este proceso se usa la Trasformada Discreta de Fourier. Discrete Fourier Transform (DFT) [Smi07]. También se pueden utilizar otras técnicas como código predictivo lineal LPC.

El Procesamiento digital de señales Digital Signal Processing (DSP) [Ste97], [Mit98] es una de las tecnologías más poderosas del siglo veintiuno en ciencias e ingeniería [Uns99], como se puede apreciar en las áreas del conocimiento como: comunicaciones, imágenes en medicina, radar y sonar, reproducción de música de alta fidelidad, prospección de petróleo, sólo por nombrar algunos de ellos. Cada una de esas áreas tiene un desarrollo profundo en tecnología DSP [opp75], [Dat88]

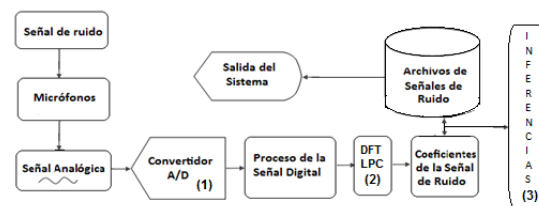


Figura 1. Diagrama del Sistema Computacional detector de fallas

17. También se activa un manejador de base de datos para comparar el vector obtenido del ruido emitido por la componente con aquellos almacenados en la base de datos de ruidos. Finalmente el sistema computacional decide que clase de



operación debe ser aplicada para obtener el resultado el cual se traduce en alguna acción para prevenir la falla en el equipo.

3. Estimación del espectro de señales con filtros digitales

1. La obtención de los valores de las componentes de un vector de señales, se hace por medio de filtros con diferentes porciones de espectro de ruido y se comparan con los correspondientes de la base de datos.
2. El filtro digital es un sistema [Ant93], [Ber05] que ejecuta operaciones matemáticas sobre una muestra de señal en tiempo discreto para reducir o aumentar ciertos aspectos de la señal. Un filtro analógico es un circuito electrónico operando sobre señales analógicas en tiempo continuo.
3. La señal analógica se procesa por un filtro digital, primero digitalizada y representada como una secuencia de números, que matemáticamente con ellos se reconstruye la nueva señal analógica. [Chi78].
4. Los filtros digitales [Ant93] se usan para dos propósitos (1) separación de señales que han sido combinadas y (2) restauración de señales que han sido distorsionadas en alguna forma. Los filtros analógicos se pueden usar para esas mismas tareas; sin embargo, los filtros digitales alcanzan mejores resultados [Cho73].

El promedio en movimiento es de los filtros más comunes en DSP, principalmente porque es el filtro más fácil de entender y usar. Es el líder para en codificar la señal en el dominio del tiempo,

pero el peor para en codificar la señal en el dominio de la frecuencia.

Filtros Windowed-sinc se usan para separar una banda de frecuencias de otra. Ellos son muy estables, cuando se llevan a cabo convoluciones estándar, los filtros Windowed-sinc son fáciles de programar pero lentos en ejecutarse.

Hay dos técnicas importantes en DSP, el método adición de traslape (overlap-add) y la convolución FFT [Bur85], el método de traslape, se usa para particionar grandes señales en pequeños segmentos de fácil proceso. La convolución de la Transformada Rápida de Fourier [Hei84] (Fast Fourier Transform (FFT)) [Coo65], [Duh90] usa el método de traslape junto con la Transformada Rápida de Fourier, admitiendo señales que serán convolucionadas al multiplicar su espectro de frecuencia.

La mayoría de los filtros tienen una de las cuatro respuestas de frecuencia estándar, pasa bajas, pasa altas, pasa bandas o rechazo de banda. Un método general de diseño de filtros digitales con una respuesta de frecuencia arbitraria, adaptado para las necesidades de una aplicación particular.

Filtros recursivos son una forma eficiente para alcanzar una amplia respuesta de impulso, sin tener que ejecutar una amplia convolución. Se ejecutan muy rápido, pero tienen menos presentación y flexibilidad que los filtros digitales. Filtros recursivos también llamados filtros IIR (Infinite Impulse Response (IIR)) ya que su impulso de respuesta tiene un decaimiento exponencial suave. Esto los distingue de los filtros digitales llevados a cabo por convolución, llamados filtros de respuesta finita (Finite Impulse Response (FIR)). Estamos usando este tipo de filtros para obtener la solución del comportamiento de la componente del equipo [Rab75].

Los filtros de Chebyshev [Rab75] se usan para separar una banda de frecuencias de otra. Aun cuando no pueden empatar la profundidad de los filtros windowed-sinc, pero son más que adecuados para muchas aplicaciones. El atributo principal de los filtros de Chebyshev, es su velocidad típicamente más que un orden de magnitud de rapidez que los filtros windowed-sinc. Esto es porque ellos llevan a cabo la recursión más que la convolución. El diseño de estos filtros está basado en técnicas matemáticas llamada transformada $-z$ (z-Transform.)

5. Obtener los elementos del vector de una señal de ruido y compararlos con los vectores almacenados en una *base de ruidos*, aplicando los filtros para separar diferentes porciones del espectro sonoro. En realidad, un filtro digital es simplemente una operación matemática como integrar, diferenciar, sumar, suavizar, extrapolar. Estas y muchas otras son operaciones lineales. Hay dos tipos de filtros: recursivos y los no recursivos. Un filtro digital no recursivo FIR, se define por donde c_k son las constantes del filtro, $u(n-k)$ son los datos de entrada [Dec72].

$$y = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k u_{n-k} \quad (3.1)$$

Como se puede ver en la Figura 2 a esta operación matemática se conoce como *convolución* de los datos con los coeficientes.

La salida y_n es la suma de los productos con los datos y los coeficientes. En el mundo real los datos son finitos, por lo tanto la ecuación de un filtro FIR queda como

$$y = \sum_{k=-N}^N c_k u_{n-k} \quad (3.2)$$

Por otro lado, en palabras de R. W. Hamming, un filtro recursivo IIR, es "simplemente una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes, y no más" [Ham89]. En la Figura 3 se muestra cómo trabaja un filtro IIR, de manera formal, este filtro se define como:

$$y = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k u_{n-k} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k y_{n-k} \quad (3.3)$$

donde y_k y d_k son constantes. En la práctica el número de datos es finito por lo tanto.

$$y = \sum_{k=-0}^N c_k u_{n-k} + \sum_{k=1}^M d_k y_{n-k} \quad (3.4)$$

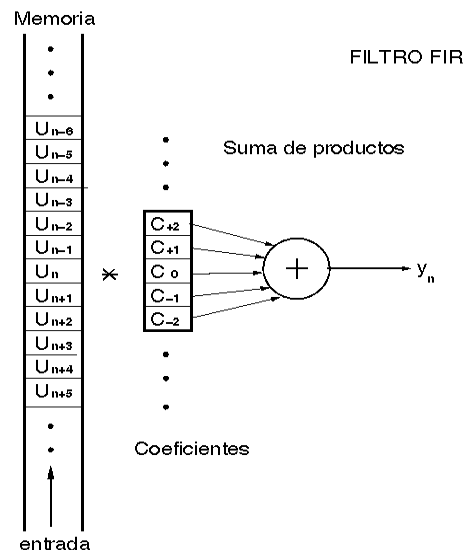


Figura 2. Filtro no recursivo FIR

Ya sea con filtros FIR o con filtros IIR se puede construir un banco de filtros Figura 3 para separar las frecuencias y establecer los parámetros que permitan obtener los componentes del vector de la señal de ruido (energía, promedio, cruces por cero, magnitud, subspectro, entre otros).

4. Estimación del espectro usando predicción lineal

Otra forma de obtener los parámetros de la señal de ruido es por predicción lineal (Linear Predictive Coding (LPC)) que es una herramienta usualmente usada en audio y proceso de voz para representar el espectro de la envolvente de una señal de voz en forma comprimida, usando información de un modelo de predicción lineal.

símbolos, usualmente números binarios. Esto permite procesar la señal usando circuitos digitales tal como un microprocesador y una computadora. Aun cuando tal conversión puede perder o alisar la señal, la mayoría de los sistemas de audio usan ésta técnica de proceso digital y mucho más potente y eficiente que el proceso de la señal en dominio analógico [Pai00].

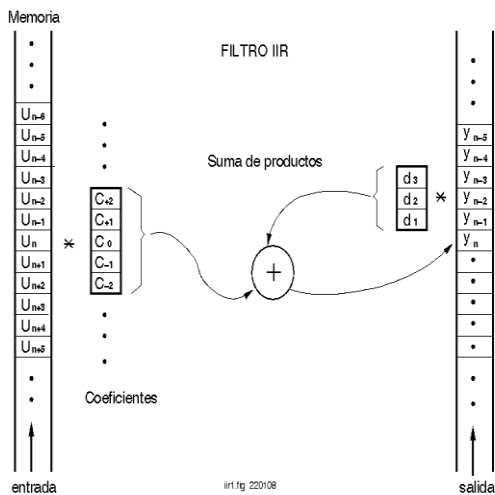


Figura 3 Filtro digital recursivo IIR [Ham89]

Esta es una poderosa técnica para el procesamiento de voz. [Mar 76], y una de los métodos más útiles para una buena codificación y calidad de la voz de bajo rango en bits con extremada exactitud en la estimación de los parámetros.

A fin de convertir la señal analógica del tiempo continuo a su representación en el tiempo discreto, debe ser mostrada y cuantizada. El muestreo es la división de la señal en intervalos discretos en el que las lecturas del voltaje analógico serán tomadas. La cuantización es la conversión del voltaje analógico instantáneo en una representación binaria. Electrónicamente, esas funciones son ejecutadas por un convertidor analógico digital.

LPC se usa frecuentemente para transmitir información espectral envolvente, tiene una tolerancia en la transmisión de errores. Transmisión de los coeficientes del filtro no deseables ya que son muy sensibles a errores. En otras palabras, un pequeño error puede distorsionar todo el espectro, o peor, un pequeño error puede hacer la predicción inestable del filtro.

La longitud del intervalo de muestra determina la máxima frecuencia que se puede codificar. El teorema de Nyquist-Shannon de muestreo establece que una señal puede ser construida exactamente de su muestra si la muestra de frecuencia es tan grande como el doble de la mayor frecuencia de la señal. Debido a que el humano no puede escuchar frecuencias arriba de aproximadamente 20kHz que además depende de la edad de la persona, la razón de muestreo tiene que estar arriba de los 40kHz. Los CD's comerciales se graban a 44.1kHz [Bos03] [Bra97] [Smi07].

Una representación digital expresada en forma de onda de presión como una secuencia de

La resolución bit usada durante el proceso de cuantización determina el mínimo voltaje que puede ser digitalmente representado, y así el rango dinámico de la señal digital. Como el rango de la dinámica de una señal de audio es, por definición, limitado al ruido, la resolución necesita simplemente ser suficientemente grande para capturar la señal arriba de ese ruido base.

Métodos de proceso y áreas de aplicación incluyen almacén, nivel de compresión, compresión de datos, transmisión, mejoras (es decir, ecualización, filtrado, cancelación de ruido, eco o reverberancia, remoción o adición, etc.)

Predicción lineal es una operación matemática donde valores futuros de una señal en tiempo discreto son estimadas como funciones lineales de muestra previas. En proceso digital de señales, predicción lineal es a menudo llamada codificación de predicción lineal (Linear Predictive Coding (LPC)) y se puede ver como un subconjunto de la teoría de filtros.

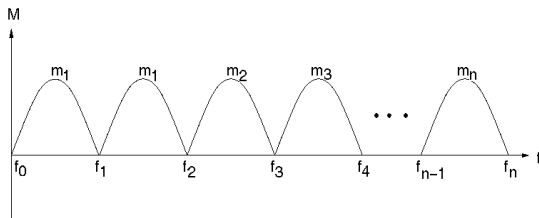


Figura 4. Base de datos (Filtros)

18. La representación más común es:

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i u(n-i) \quad (4.1)$$

Donde $\tilde{x}(n)$ es el valor de la señal predicha, $x(n-i)$ son los previos valores observados y a_i los coeficientes predictores. El error generado por este estimado es:

$$e(n) = x(n) - \tilde{x}(n-i) \quad (4.2)$$

$$0 \leq n \leq N-1$$

Donde x_n es el valor de la señal verdadera.

estas ecuaciones son válidas para todos los tipos de predicción lineal. Las diferencias son acotadas en la forma de los parámetros a_i escogidos.

Trabajan buscando el error mínimo que se produce cuando se extrapola los valores de nuestra señal $\tilde{x}(n)$ iniciando con los valores que tienen las k muestra anteriores $x(n-1)$, $x(n-2)$, ..., $x(n-k)$ usando métodos lineales.

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^k a_i x(n-i) \quad (4.3)$$

Estamos buscando los coeficientes a_i porque con ellos construimos el vector representativo de cierto tipo de señal de ruido. Para obtenerlas, minimizamos el error que existe entre $\tilde{x}(n)$ y $x(n-i)$ con el método de mínimos cuadrático. Calculando el error cuadrático medio de L del intervalo para un máximo de N muestras.

$$L = \sum_n e^2(n) = x(n) - \sum_{i=1}^k a_i x(n-i) \quad (4.4)$$

$$0 \leq n \leq N-1$$

Donde: $x(n)$ es la muestra de referencia media actual y $\tilde{x}(n)$ es el valor de muestra esperado; n es el intervalo de muestra, i es el índice de muestra anterior, k es el máximo de las muestras anteriores, a_i es el coeficiente de la muestra, N es el tamaño del conjunto de las muestras, y L es valor mínimo cuadrático medio.

Para calcular el valor mínimo de L derivamos con respecto a las variables a_j $a_j | 1 \leq j \leq k$

$$\frac{\partial L}{\partial a_j} = 0 \quad 1 \leq j \leq k$$

Derivando la ecuación (4.4) se tiene:

$$\frac{\partial L}{\partial a_j} = \sum_n x(n-j)e(n) \quad 1 \leq j \leq k$$

Esta expresión puede ser dada como:

$$\sum x(n-j)[x(n) - \sum_{i=1}^k a_i x(n-i)] =$$

$$\sum_j x(n-j)x(n) - \sum_{i=1}^k a_i \sum_n x(n-j)x(n-i) =$$

$$C_{j0} = \sum_{j=1}^k a_i C_{ji}$$

Donde

$$C_{ji} = \sum_n x(n-j)x(n-i)$$

Una forma de limitar el valor de n en la suma es eliminar las muestras que no pertenecen al intervalo $0 \leq n \leq N - 1$. Esto es equivalente a poner una ventana rectangular en el intervalo. Por lo tanto si $C_{ij} = C_{ji} = r_{|i-j|}$, entonces los valores de $r_{|i-j|}$ son los coeficientes de la matriz de auto correlación cuya propiedad es la simetría. Esto significa que los elementos de la diagonal son iguales (*Toeplitz matrix*). Para resolver el sistema, se puede hacer por el método de Cholesky o también por el método de Levinson-Durbin, este proceso se conoce como el método de auto correlación por esta razón

$$\sum_{i=1}^k r_n(|j-i|)a_i = r_n(j) \quad 1 \leq j \leq k$$

O representado en forma matricial

$$\begin{bmatrix} r_n(0) & r_n(1) & r_n(2) & \dots & r_n(k-1) \\ r_n(1) & r_n(0) & r_n(1) & \dots & r_n(k-2) \\ r_n(2) & r_n(1) & r_n(0) & \dots & r_n(k-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n(k-1) & r_n(k-2) & r_n(k-3) & \dots & r_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_n(1) \\ r_n(2) \\ r_n(3) \\ \vdots \\ r_n(k) \end{bmatrix}$$

5 Resultado

La relación entre los coeficientes de recursión y la respuesta de los filtros está dada por una técnica

matemática llamada transformada-z, como se mencionó en la sección 3. Por ejemplo, la transformada-z puede ser usada para tareas tales como: convertir coeficientes de recursión y frecuencias de respuesta, combinando estados paralelos y de cascada, en simples filtros, diseñando sistemas recursivos que imitan filtros analógicos, etc. Desafortunadamente la transformada-z es más complicada por eso, la mayoría de los usuarios prefieren tratar con DSP. Esto es la realidad de los que se especializan en DSP. Hay tres formas para encontrar los coeficientes de recursión sin tener que entender la transformada-z.:

1. Primero, diseñar las ecuaciones de varios tipos de filtros recursivos simples.
2. Segundo escribir un programa de computadora para diseñar los más sofisticados filtros pasa bajas y pasa altas de Chebyshev [Rab75].
3. Tercero describir el método interactivo para diseñar filtros recursivos con frecuencia arbitraria de respuesta [McC98].

En las figures 5, 6, y 7 se observan tres tipos de señal de ruido, de un motor eléctrico en operación. La grafica se obtuvo con un programa en lenguaje C (gr.c) que muestra tales señales. O de otra manera las tablas 1, 2, y 3 representan los coeficientes correspondientes a cada señal de ruido.

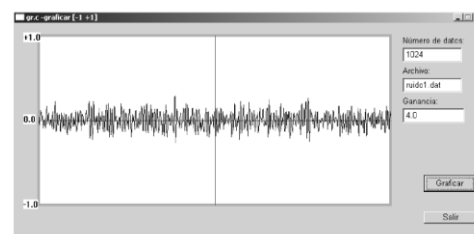


Figura 5 Ruido Normal del Componente

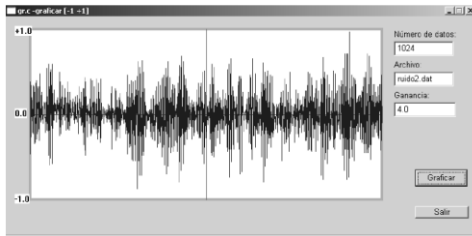


Figura 6 Ruido Anormal del componente

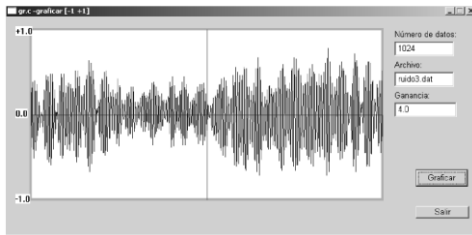


Figura 7. Ruido peligroso del componente

Tabla 1 Coeficientes de la señal de ruido 1

A[1] = 1.000000	RC[1] = -0.999814	ALPHA = 0.005092
A[2] = -0.895232	RC[2] = 0.300383	ALPHA = 0.005092
A[3] = -0.221979	RC[3] = 0.395534	ALPHA = 0.005092
A[4] = -0.010758	RC[4] = 0.302035	ALPHA = 0.005092
A[5] = -0.030330	RC[5] = 0.230464	ALPHA = 0.005092
A[6] = -0.179069	RC[6] = 0.395520	ALPHA = 0.005092
A[7] = 0.394020	RC[7] = -0.035127	ALPHA = 0.005092
A[8] = -0.136583	RC[8] = 0.083767	ALPHA = 0.005092
A[9] = -0.050861	RC[9] = 0.122368	ALPHA = 0.005092
A[10] = 0.029964	RC[10] = 0.101801	ALPHA = 0.005092

Tabla 2 Coeficientes de la señal de ruido 2

A[1] = 1.000000	RC[1] = -0.999814	ALPHA = 0.005092
A[2] = -0.895069	RC[2] = 0.300585	ALPHA = 0.005092
A[3] = -0.220949	RC[3] = 0.394866	ALPHA = 0.005092
A[4] = -0.012718	RC[4] = 0.302412	ALPHA = 0.005092
A[5] = -0.030027	RC[5] = 0.231131	ALPHA = 0.005092
A[6] = -0.178566	RC[6] = 0.395477	ALPHA = 0.005092
A[7] = 0.393647	RC[7] = -0.034947	ALPHA = 0.005092
A[8] = -0.136563	RC[8] = 0.084053	ALPHA = 0.005092
A[9] = -0.049742	RC[9] = 0.121510	ALPHA = 0.005092
A[10] = 0.028803	RC[10] = 0.102158	ALPHA = 0.005092

Tabla 3 Coeficientes de la señal de ruido 3

A[1] = 1.000000	RC[1] = -0.999807	ALPHA = 0.005537
A[2] = -0.908881	RC[2] = 0.285548	ALPHA = 0.005537
A[3] = -0.190141	RC[3] = 0.372751	ALPHA = 0.005537
A[4] = -0.012608	RC[4] = 0.286599	ALPHA = 0.005537
A[5] = -0.036748	RC[5] = 0.225378	ALPHA = 0.005537
A[6] = -0.190537	RC[6] = 0.393201	ALPHA = 0.005537
A[7] = 0.383174	RC[7] = -0.027604	ALPHA = 0.005537
A[8] = -0.145709	RC[8] = 0.104936	ALPHA = 0.005537
A[9] = -0.023432	RC[9] = 0.118251	ALPHA = 0.005537
A[10] = 0.030471	RC[10] = 0.095396	ALPHA = 0.005537

6 Conclusiones

A fin de probar la validez del sistema computacional que se propone para detectar alguna falla de componente de un equipo, justamente al escuchar el ruido de dicha componente. Se utilizó un motor eléctrico para obtener las frecuencias cuando trabaja correctamente y luego las frecuencias cuando está dañado. Usando un micrófono el sistema computacional obtiene las frecuencias del ruido del componente en cuestión, estas se comparan considerando una tolerancia, con las almacenadas en la base de datos que corresponden a las frecuencias cuando la componente trabaja correctamente, de esta forma el sistema computacional emite un resultado indicando si hubo falla. Las señales de ruido mostradas en las figuras 5, 6, y 7 corresponden a los tres estados del motor eléctrico, normal, a punto de dañarse y dañado. El sistema computacional trata de imitar solamente en el filtrado de la señal de ruido al experto en mantenimiento preventivo que reconoce cuando puede ocurrir una falla, solamente por escuchar el ruido de la componente y la ubica. Investigamos la posibilidad de aplicar la teoría técnicas de análisis de Fourier a señales emitidas por ruidos de las componentes del equipo para identificar la falla, la técnica puede usarse en sistemas electromecánicos, hidroeléctricos y otros que debido a su naturaleza se pueda identificar la falla por la emisión de ruido. Reconocemos que



hay varias herramientas y teoría en mantenimiento preventivo a fin de minimizar el costo en la fabricación del algún producto y extender la vida media del equipo. Sin embargo pensamos que esta técnica puede mejorar el mantenimiento preventivo. También se puede usar en operaciones de monitoreo de otro tipo de procesos para inferir o activar alguna tarea en la planta. Muchos procesos cambian su estado de operación automáticamente en tiempo real y se desearía reconocer la causa. El sistema computacional se puede acompañar con otras herramientas, tales como sistemas expertos, cuya base de conocimientos puede contener las políticas de mantenimiento del equipo, para diagnosticar la falla. Se pueden programar los micrófonos para verificar las frecuencias del equipo durante la operación, con lo cual se tendrá un agregado de seguridad de que el equipo trabaja correctamente dentro de los rangos permitidos de operación, así que el mantenimiento preventivo resultará menos costoso. Nuestra contribución es mostrar una técnica alternativa en mantenimiento preventivo barato.

Referencias

- [Ant93] A. Antoniou, Digital Filters: Analysis, Design, and Applications, New York, NY: McGraw-Hill, 1993.
- [Bra08] Braunl Thomas. Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems, third edition, Springer, Germany 2008, 2006, 2003.
- [Ber05] S.W.A. Bergen and A. Antoniou, Design of No recursive Digital Filters Using the Ultra spherical Window Function, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 2005, no. 12, pp. 1910-1922, 2005.
- [Bos03] M. Bosi and R. E. Goldberg. Introduction to Digital Audio Coding and Standards, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [Bra97]. Brandenburg and M. Bosi, "Overview of MPEG audio: Current and future standards for low-bit-rate audio coding," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 45, pp. 4-21, Jan./Feb. 1997.
- [Bur85] C. S. Burrus and T. W. Parks, DFT/FFT and Convolution Algorithms, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1985.
- [Cam90] J. P. Campbell Jr., T. E. Tremain, and V. C. Welch, "The proposed federal standard 1016 4800 bps voice coder: CELP," Speech Technology Magazine, pp. 58-64, April-May 1990.
- [Cha87] D. C. Champeney, A Handbook of Fourier Theorems, Cambridge University Press, 1987.
- [Chi78] D. G. Childers, ed., Modern Spectrum Analysis, New York: IEEE Press, 1978.
- [Cho73] J. M. Chowning, "The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 21, no. 7, pp. 526-534, 1973,
- [Coo65] J. Cooley and J. Tukey, "An algorithm for the machine computation of the complex Fourier series," Mathematics of Computation, vol. 19, pp. 297-301, Apr. 1965.
- [Dat88] J. Dattorro, "The implementation of recursive digital filters for high-fidelity audio," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 36, pp. 851-878, Nov. 1988
- [Dec72] A.G. Deczky, Synthesis of Recursive Digital Filters Using the Minimum p-Error Criterion},



- IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. AU-20, pp. 257-263, Oct. 1972.
- [Duh90] P. Duhamel and M. Vetterli, "Fast Fourier transforms: A tutorial review and state of the art," *Signal Processing*, vol. 19, pp. 259-299, Apr. 1990.
- [Ham89] Hamming R. W., *Digital Filters*, 3rd. ed., Dover, 1989. Bell Laboratories.
- [Hei84] M. Heideman, D. Johnson, and C. S. Burrus, "Gauss and the history of the FFT," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 1, pp. 14-21, Oct. 1984, also in the *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 34, no. 3, pp. 265-277, 1985.
- [EEE79] DSP Committee, ed., *Programs for Digital Signal Processing*, New York: IEEE Press, 1979.
- [Keh08] Kehtarnavaz Nasser, *Digital Signal Processing System Design: LabVIEW-Based Hybrid Programming*, second edition, Academic Press, 2008.
- [Mak75] J. Makhoul, "Linear prediction: A tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, pp. 561-580, Apr. 1975.
- [Mar76] J. D. Markel and A. H. Gray, *Linear Prediction of Speech*, New York: Springer Verlag, 1976.
- [McC98] J. H. McClellan, R. W. Schafer, and M. A. Yoder, *DSP First: A Multimedia Approach*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998, Tk5102.M388.
- [Mit98] S.K. Mitra, *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*, New York, NY: McGraw-Hill, 1998.
- [Opp75] A. V. Oppenheim and R. W. Schafer, *Digital Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1975.
- [Pai00] T. Painter and A. Spanias, "Perceptual coding of digital audio," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 451-513, Apr. 2000.
- [Rab75] L. R. Rabiner, J.H. McClellan, and T.W. Parks, *FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted Chebyshev Approximation*, *Proc. IEEE*, vol. 63, pp. 595-610, Apr. 1975.
- [Smi07] Julius O. Smith III *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications* Ed. W3K, Second Edition 2007.
- [Smi07]. O. Smith III, *Introduction to Digital Filters with Audio Applications*, Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Stanford University, 2007.
- [Ste97] Steven W. Smith *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 1997 ISBN 0-9660176-3-3
- [Uns99] M. Unser, "Splines: A perfect fit for signal and image processing," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 16, pp. 22-38, Nov. 1999.
- [Wel67] P. D. Welch, "The use of fast Fourier transforms for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodograms," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, pp. 70-73, 1967.