

MÉTODO DE INSTRUMENTACIÓN INDIRECTA BASADO EN ONDAS ACÚSTICAS DERIVADAS DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD ANGULAR EN MAQUINARIA ROTATIVA

Enrique Gerardo Hernández Vega

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua

ehernand@itchihuahua.edu.mx

Sergio Iván Chavaría Estrada

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua

sergio.i.chavarria@gmail.com

Resumen

El análisis de vibraciones es fundamental en el diagnóstico de maquinaria. Al hacer un análisis de vibraciones, buscamos formas para impedirlos o minimizar sus efectos. Las vibraciones tienen información valiosa sobre el comportamiento de un sistema y hay más de una forma de aprovechar esta información.

Este trabajo explora una manera alternativa de utilizar las vibraciones producidas por un motor eléctrico, para determinar su velocidad angular. Asumiendo una relación directa en la frecuencia fundamental de las vibraciones con la velocidad del motor y utilizando herramientas matemáticas para el análisis de señales, se desarrolla un método para la estimación de la velocidad de un motor.

En los casos explorados, 3 motores eléctricos, los valores de estimación obtenidos mantuvieron una correlación casi perfectamente lineal con una desviación estándar del error no mayor al 1%.

Palabras Claves: Acondicionamiento y procesamiento de señales, detección de tono, frecuencia fundamental, instrumentación acústica, vibraciones mecánicas.

Abstract

Vibration analysis is fundamental in machinery diagnosis. When doing a vibration analysis, we look for forms to minimize their effects. Vibrations have

valuable information regarding the behavior of a system, and there is more than one way to harness this information.

This work explores an alternative way of utilizing the vibrations produced by an electrical motor, to determine its angular speed. Assuming there is a direct relation between the fundamental frequency of the vibrations and the motor's speed, and using mathematical tools for signal processing, develops a method for estimating the speed of a motor.

In the explored cases, 3 electrical motors, the obtained values maintained an almost perfectly linear correlation with a standard deviation of the error no greater than 1%.

Keywords: *Acoustic instrumentation, fundamental frequency, mechanical vibrations, pitch detection, signal conditioning and processing.*

1. Introducción

De la manera más simple se define a la vibración como un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Los términos vibración y oscilación suelen usarse indiscriminadamente, aunque algunos autores distinguen a la oscilación como un movimiento periódico de baja frecuencia con una amplitud perceptible y regular. Por otro lado el comportamiento de las vibraciones suele ser irregular, incluso aleatorio y difícil de percibir a simple vista [de Silva, 2000]. Se define entonces a las vibraciones mecánicas como el movimiento periódico o armónico de masas, o como la respuesta oscilatoria, repetitiva o periódica de un sistema mecánico.

La respuesta dinámica de un sistema a una acción o estímulo puede generar vibraciones de forma natural, por ejemplo, la respuesta de percusión de un tambor cuya frecuencia natural dependerá solamente de su estructura y no del estímulo aplicado.

Un sistema también puede sufrir vibraciones forzadas, las cuales pueden ser iguales o completamente diferentes a la frecuencia natural del sistema, generadas por el mismo sistema o de manera externa, por ejemplo el eje de un motor al rotar produce vibraciones en todo el cuerpo del motor que coinciden con la frecuencia de rotación. Al igual que la respuesta al escalón o al impulso, la respuesta de un

sistema a un estímulo oscilatorio consta de su componente transitoria y su componente estable [Stoker, 1961] como se muestra en la figura 1.

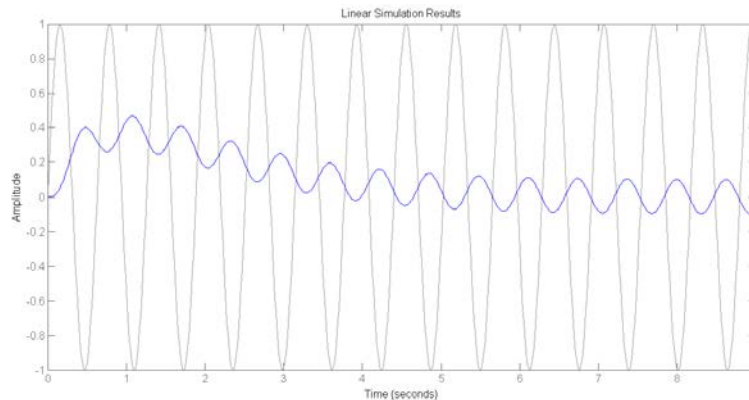


Figura 1 Ejemplo de respuesta transitoria y estable a una señal sinusoidal.

Ya sean naturales o forzadas, las vibraciones pueden ser deseables o indeseables según la naturaleza y objetivo del sistema. Ciertamente, los instrumentos musicales son un caso en el cual las vibraciones son deseables, pero la existencia de vibraciones en sistemas mecánicos puede llegar a ser un fenómeno perjudicial, tanto para la estabilidad del sistema como para su integridad estructural. Ignorar la ubicuidad de las vibraciones en todo sistema mecánico sería entonces un error que puede llevar a fallas imprevistas o incluso consecuencias fatales [Park, 2003]. Actualmente la manera más común y práctica de medir vibraciones mecánicas es transformarlas primero en señales eléctricas. Un sensor de vibraciones es necesario para esta tarea. Un sensor nos proporciona información, normalmente en forma de una señal eléctrica que regularmente debe ser acondicionada para ser procesada de manera digital, lo cual nos permite hacer manipulaciones matemáticas inmensamente complejas en fracciones de segundos [Park, 2003]. De poco sirve capturar y procesar una señal si no se le da una interpretación objetiva, pues dicha señal contiene información que puede ser observada e interpretada por un humano, o por una computadora.

Típicamente se utilizan sensores de movimiento para la detección y medición de vibraciones. Los sensores de movimiento más comunes son el piezoeléctrico, inductivo y capacitivo. Cabe mencionar que el sensor inductivo solía ser el más

popular para la medición de vibraciones, hasta que acelerómetro piezoeléctrico tomó su lugar debido a su respuesta dinámica mejorada y su construcción económica. Sin embargo, el sensor capacitivo no se queda atrás en popularidad, pues es muy utilizado en aplicaciones de acústica.

La naturaleza de una señal de vibraciones es analógica, es decir, es una señal con una infinidad de valores espaciados a intervalos infinitesimalmente pequeños. Para poder procesar la información de una señal de forma digital, es necesario discretizar dicha señal en intervalos finitos para obtener un arreglo de muestras numéricas [Shannon, 1948], [Smith, 1999], ver figura 2.

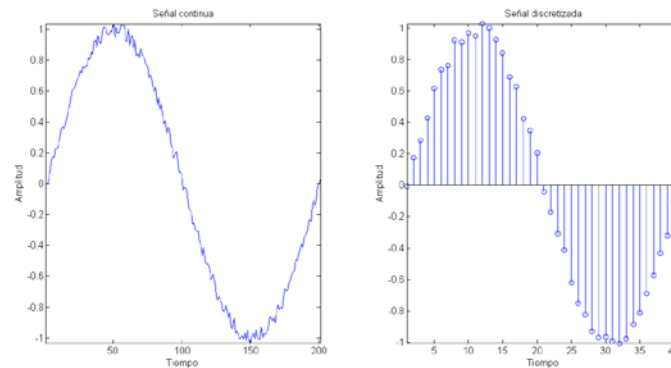


Figura 2 Discretización de una señal con componentes de ruido aleatorio.

Una señal vibratoria normalmente consiste en una superposición de ruido aleatorio, componentes cíclicas y sus armónicas. Mucha de la información contenida en una señal vibratoria es difícil de discernir a simple vista. Es por eso que se recurre a herramientas matemáticas para transformar estas señales que por naturaleza se encuentran en el dominio del tiempo a otros dominios como el de la Frecuencia. La Transformada de Fourier nos permite observar el espectro de frecuencia de una señal continua o discreta, de manera que se abren las puertas a un análisis que sería muy complicado en el dominio del tiempo [Smith, 1999].

2. Métodos

La premisa de este trabajo es la idea de que se pueden aprovechar las inevitables vibraciones mecánicas que produce un motor para extraer información acerca de su velocidad. ¿Qué implicaciones tiene esta declaración? En primer

lugar, se puede construir un tacómetro basado solamente en un sensor de vibración.

La manera más común de medir la velocidad de un motor es con uno o varios puntos de referencia en el rotor o flecha. Este punto, o puntos de referencia son detectados por algún sensor en cada revolución que da el motor. Con la ayuda de un sistema electrónico es posible contar la cantidad de ocasiones que se detecta este punto de referencia con respecto a un intervalo de tiempo. Normalmente en forma de pulsos eléctricos, solo es necesario contar estos pulsos en un intervalo de tiempo para determinar la velocidad, aceleración o posición del motor.

¿Qué ventajas ofrece un tacómetro basado en vibraciones mecánicas? Esta propuesta ofrece un método alternativo, no intrusivo, para la medición de velocidad de un motor de manera que no sea necesario acceder al mecanismo del motor, ni agregar cargas mecánicas. La propuesta a continuación es entonces un método para detección de velocidad para un motor basado en un sensor acústico. Dicho en otras palabras, utilizando algo tan sencillo como un micrófono es posible determinar la velocidad de un motor.

Es difícil ignorar el ruido acústico que produce un sistema vibratorio. ¿Sería ingenuo asumir la existencia de una relación perfecta entre ruido acústico y vibración mecánica? Bajo una perspectiva diferente, podríamos definir a las vibraciones mecánicas como ruido acústico que se propaga en un sólido.

La relación de velocidad de un motor y el ruido acústico que produce no es aparente a simple vista. Podría pensarse que solamente es cuestión de detectar el componente de frecuencia con mayor amplitud para conocer la velocidad de motor. Mientras que puede ser cierto para un sensor puramente vibratorio, acústicamente existen muchos factores diferentes que producen un sonido irregular, donde en la mayoría de los casos el componente de frecuencia de mayor amplitud no es la velocidad del motor.

La figura 3 muestra un ejemplo de la señal de ruido generada por un pequeño motor de corriente directa, así como el espectro de frecuencia correspondiente.

Se puede apreciar un patrón en el espectro de frecuencia, donde los picos son equidistantes uno del otro, lo que refleja una relación armónica. Este punto es de

suma importancia ya que confirma el fundamento teórico sobre la frecuencia fundamental de una señal, donde dicha frecuencia fundamental equivale a la velocidad angular del motor. Sin embargo, aún es necesario confirmar la consistencia de este patrón con un instrumento de medición de velocidad.

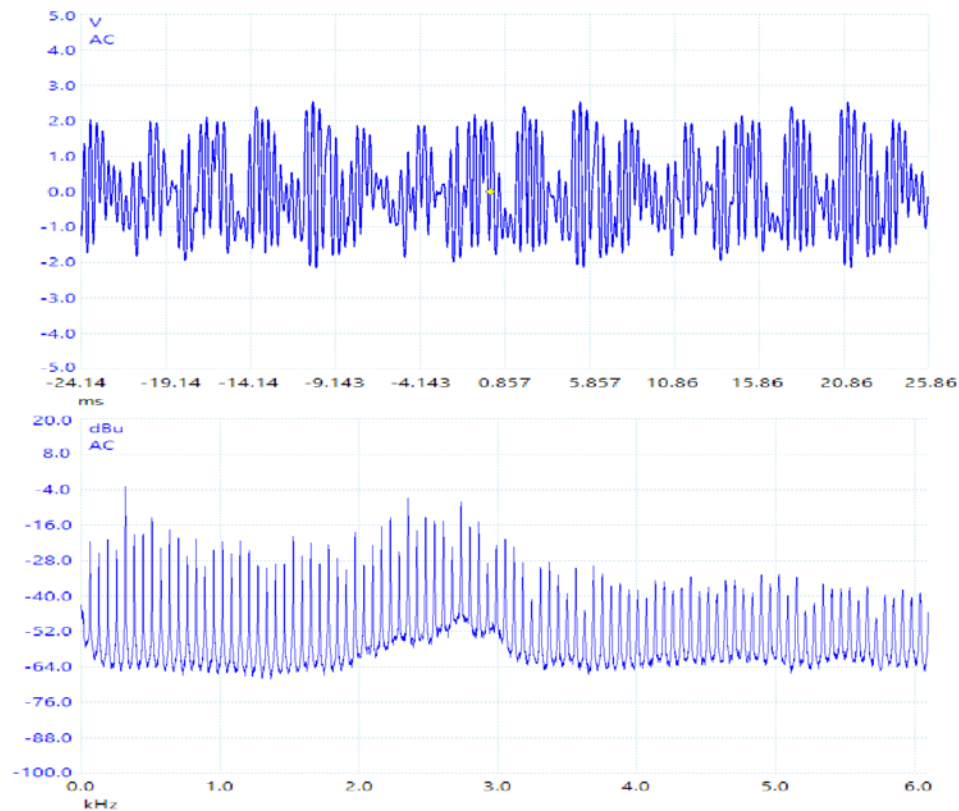


Figura 3 Sonido generado por un motor de corriente directa y su espectro de frecuencia.

Entonces, si se caracteriza el sonido producido por un motor de manera que consista de una frecuencia fundamental equivalente a su velocidad angular, más sus componentes armónicos, es posible determinar la velocidad angular de un motor midiendo las vibraciones o el sonido producido por éstas. Una buena regla general para la detección de la frecuencia fundamental en una señal es mantener una cantidad significativa de armónicos, pues el filtrar excesivamente es prominente a errores, aunque se permita la frecuencia fundamental.

El objetivo básico es extraer la frecuencia fundamental F_0 de una señal de sonido, la cual normalmente es la componente, o parcial, de menor frecuencia, la cual

suele estar relacionada con las parciales mayores. En una señal periódica, la mayoría de las parciales están relacionadas armónicamente, es decir, son múltiplos enteros de dicha frecuencia fundamental.

Existen diversos métodos [Middleton, 2003] para la estimación de la frecuencia fundamental F_0 , siendo cada método útil en diferentes contextos. Muchos de estos métodos toman un enfoque similar, aprovechando la naturaleza periódica de una señal es posible entonces determinar con cierto grado de certeza la frecuencia fundamental. Se debe asumir la periodicidad de la señal, ya que, de lo contrario, cualquier método será propenso a errores. La mayor parte de estos métodos funcionan adecuadamente al ser presentados con una señal periódica limpia, pero cuando la señal es ruidosa, o está compuesta de múltiples tonos, muchos métodos actuales pueden fallar inesperadamente. En la literatura se suele llamar Detección de Tono a un método de Estimación de la Frecuencia Fundamental.

La Correlación es una medida de similitud entre dos señales. La Autocorrelación de una señal es la correlación de dicha señal consigo misma. Similar a la Convolución, es la sumatoria sucesiva de la multiplicación de dos señales, donde para cada valor de la Autocorrelación se desplazan en el tiempo las muestras de una de las señales. En el dominio del tiempo, la Autocorrelación se define por ecuación 1.

$$R_{xx}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)x(k+n) \quad (1)$$

La representación simplificada de la Autocorrelación por ecuación 2.

$$R_{xx}(n) = x(n) * x(n) \quad (2)$$

Donde $*$ es el operador de correlación cruzada.

La Autocorrelación puede ser representada como la Convolución de una señal con su complejo conjugado invertido en el tiempo, ecuación 3.

$$R_{xx}(n) = x(n) * x^*(-n) \quad (3)$$

Donde $*$ es el operador de Convolución.

La Autocorrelación es una operación matemática que permite determinar la periodicidad de una señal, si esta existe. En el proceso del producto por el

conjugado se pierde la información de fase de la señal, dejando solamente información sobre el periodo. Esto resulta muy útil en la estimación de la frecuencia fundamental de una señal. Una ventaja es que el ruido aleatorio es eliminado, asumiendo que existe una correlación nula con la señal.

La figura 4 muestra el resultado de la Autocorrelación de la señal de sonido producida por el motor de la figura 3. El resultado de la Autocorrelación de una señal periódica es en realidad también una señal periódica. Mientras que sí se obtiene el periodo de la frecuencia fundamental, es difícil discernir entre los picos más prominentes. El resultado se encuentra en el dominio del tiempo, aunque no exactamente, pues puede verse como la representación del retraso en tiempo de una señal periódica en lugar del valor absoluto de un valor en un momento determinado.

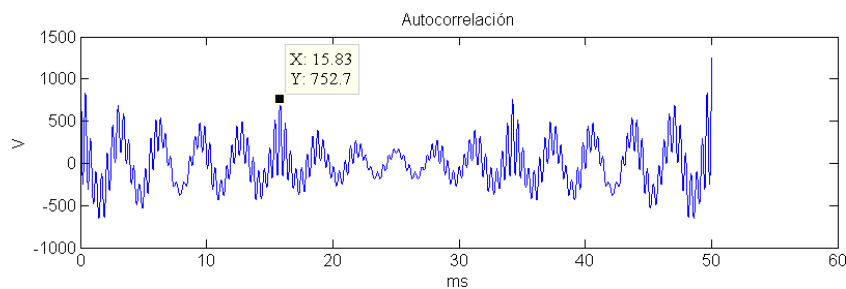


Figura 4 Ejemplo de Autocorrelación.

En [Tolonen, 2000] se describe un algoritmo eficiente para la estimación de múltiples tonos fundamentales en una señal, denominado como ESCAF por Enhanced Summary Autocorrelation Function, derivado del trabajo de [Meddis, 1997], basado en modelos de percepción auditiva humana.

Una implementación parcial [Mazzoni, 2000] del algoritmo ESCAF se encuentra en el software de composición y análisis de audio Audacity [Audacity, 2000], donde se omite la sumatoria de la disección de señales y se aplica el método de rectificación de media onda y sustracción a la autocorrelación de la señal obteniendo resultados muy prometedores.

El diagrama de flujo en la figura 5 muestra a grandes rasgos los pasos a seguir en el algoritmo de Autocorrelación Mejorada. El algoritmo comienza con la FFT de la

señal capturada, para luego determinar la Autocorrelación Generalizada, la cual se define por ecuación 4.

$$r_{xx}(\tau) = F^{-1} [|F[x(n)]|^k] \quad (4)$$

Donde los operadores F y F^{-1} son la *Transformada Discreta de Fourier* y la *Transformada Inversa de Fourier*, respectivamente. En lugar de multiplicar por el conjugado, se eleva el espectro a la potencia k , el cual es un parámetro que determina la compresión en el dominio de la frecuencia. La Autocorrelación Estándar utiliza un valor de $k = 2$ lo que es equivalente al producto por el conjugado.

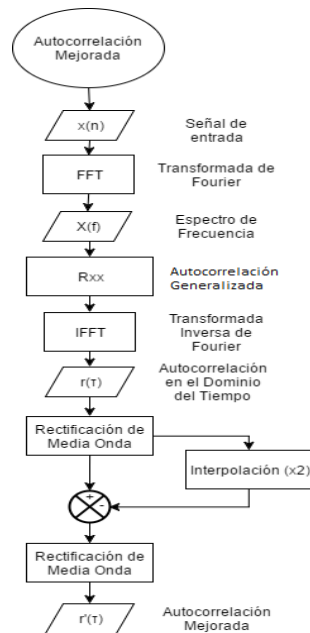


Figura 5 Diagrama de flujo del algoritmo de Autocorrelación Mejorada.

Se recomienda una $k=2/3$ según [Tolonen, 2000], lo que es un buen compromiso entre la sensibilidad al ruido para valores pequeños de k y baja resolución en los picos detectados para valores mayores. El nombre de Autocorrelación Mejorada viene del siguiente paso, el cual tiene el propósito de eliminar los armónicos redundantes en el espectro de la Autocorrelación, siendo estos múltiplos enteros de la o las frecuencias fundamentales. Primero se cortan todos los valores

negativos, rectificación de media onda, igualándolos a cero, se escala en el tiempo en un factor de dos, el resultado se sustrae a la función original con los valores negativos cortados, y por último se remueven de nuevo todos los valores negativos igualándolos a cero. Esto remueve picos repetidos con el doble de tiempo de retraso donde la amplitud del pico básico es mayor a la amplitud del duplicado. También se remueven los retrasos cercanos a cero, los cuales son una consecuencia colateral del algoritmo de Autocorrelación. Esta operación puede repetirse un número de veces con un escalamiento de tiempo de tres, cuatro, cinco, etc., hasta donde se desee, de manera que se eliminen múltiplos mayores de cada pico.

La estimación del tono fundamental es entonces determinada por el pico de mayor amplitud, siendo en el caso de la figura 6 equivalente a un retraso en el tiempo de 15.83 ms, y el recíproco igual a 63.167 Hz.

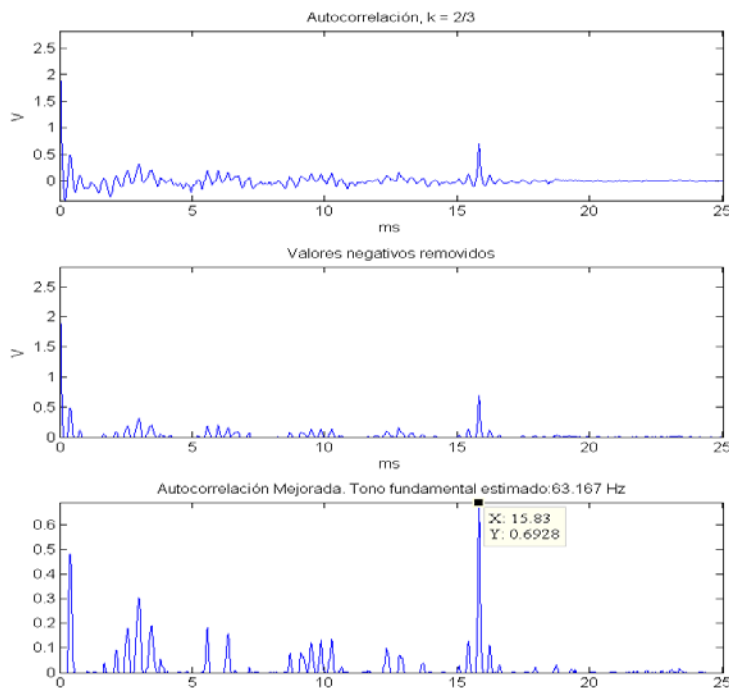


Figura 6 Autocorrelación Mejorada.

La información obtenida del resultado de aplicar la Autocorrelación Mejorada nos da información sobre los armónicos fundamentales más prominentes en una señal. Se puede asumir entonces, con un cierto grado de precisión e incertidumbre

que los componentes de mayor amplitud corresponden directamente a los modos principales de vibración y, aplicando este tipo de análisis a las vibraciones producidas por un motor, se puede determinar si existe una relación directa entre dichos componentes y la velocidad angular del motor.

La estimación de velocidad angular consiste entonces en determinar cuál es la componente de mayor amplitud en el resultado de la Autocorrelación Mejorada. La información que proporciona la Autocorrelación está en el dominio del tiempo y puede representarse como retrasos temporales en la señal. Aplicando el recíproco al valor de tiempo correspondiente a la componente de mayor amplitud nos revela la frecuencia equivalente. Esta frecuencia representará la frecuencia fundamental del motor, asumiendo que el motor es la única o la mayor fuente de ruido acústico capturado.

El micrófono utilizado es del tipo electreto, el cual debe conectarse a un circuito de polarización, el cual se muestra en la figura 7.

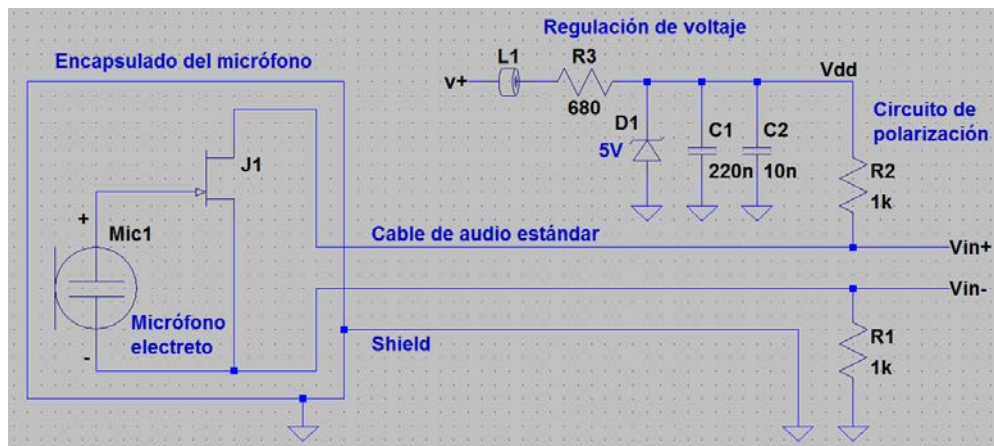


Figura 7 Circuito de polarización del micrófono electreto.

El circuito de acondicionamiento está basado en amplificadores operacionales, constando de un amplificador de instrumentación, un filtro pasa bajas de segundo orden y un filtro pasa altas de cuarto orden, figura 8.

El proceso experimental consistió de los siguientes pasos:

- Realizar las conexiones eléctricas al sistema de adquisición de datos tanto del micrófono de captura, como del optoacoplador, para la comparación de ambos resultados.

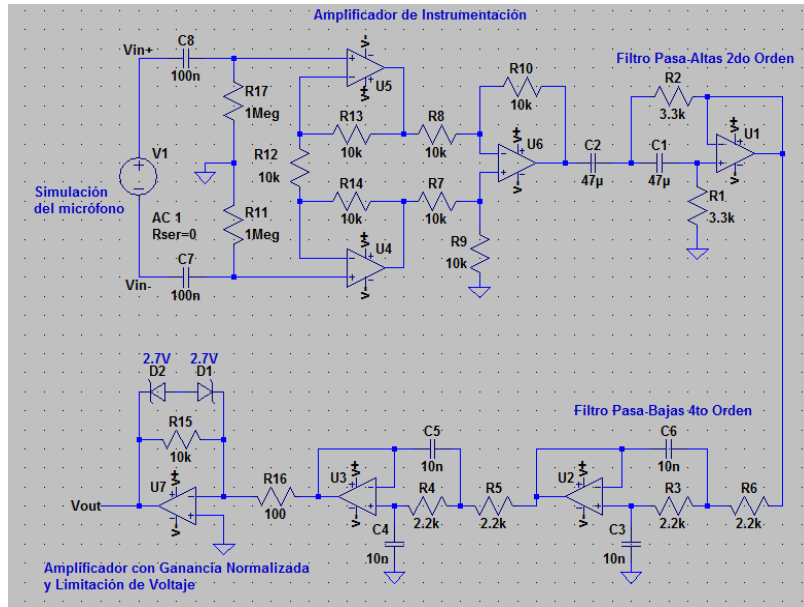


Figura 8 Circuito de Acondicionamiento de la señal del micrófono.

- Se automatizó el proceso de captura usando el Osciloscopio USB picoScope 2204A [Pico Technology, 2017] y aprovechando el API de Matlab que provee Pico Technology. De esta manera se capturan de forma paralela las señales entregadas por el micrófono y el optoacoplador.
- Las señales son procesadas por un script de Matlab. Primero se determina la frecuencia de la señal del optoacoplador y se ajusta a un factor equivalente al número de ranuras que tiene el detector de cuadratura. Por otro lado, se utiliza el algoritmo de estimación de frecuencia fundamental en la señal del micrófono.
- Acumulando 1000 resultados, estos son exportados a una hoja electrónica de datos para caracterizar la relación que existe entre los valores entregados por el optoacoplador y el algoritmo de detección de tono.

En la figura 9 se muestra el diagrama a bloques del sistema.

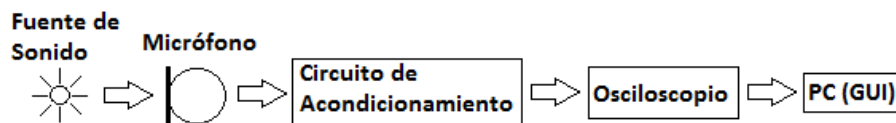


Figura 9 Diagrama del sistema.

3. Resultados

Se utilizaron tres motores de prueba y se observaron resultados muy similares, y una clara relación directa entre la frecuencia fundamental de las vibraciones con la velocidad angular de cada motor. En cada caso, el error de medición se mantuvo dentro de un rango casi constante, con muy poca desviación de la media. Debido a cuestiones de espacio y al hecho de que en 2 motores el experimento fue casi totalmente automatizado, sólo se muestran los resultados para un solo motor. Además, los resultados de este motor fueron los más interesantes por así decirlo. El motor eléctrico es parte del kit didáctico 1405B de la corporación Nida en la tarjeta experimental 130A-255, figura 10, [Nida, 1996]. El tema de la tarjeta es la experimentación con sensores fotoeléctricos para medición de movimiento angular en un motor. La tarjeta cuenta con un optoacoplador con interruptor de haz, y un sensor reflector.

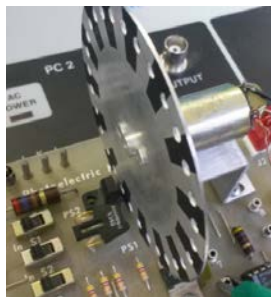


Figura 10 Motor de DC con detector de cuadratura por reflexión e interrupción de luz.

Para el experimento de comparación con la frecuencia fundamental de vibraciones, se utilizó la salida del optoacoplador y se calculó la frecuencia de la señal de salida dividida entre 16, ya que el disco cuenta con 32 orificios. Los resultados de 1000 comparaciones se muestran en la gráfica de la figura 11a, los cuales son filtrados por el método de Theil-Sen [Wikipedia, 2017], el cual consiste en determinar todas las pendientes generadas por todos los pares de datos posibles, para luego seleccionar aquella que se encuentre en la media, de esta manera pueden eliminarse todos los valores atípicos, en este caso manteniendo 828 datos dentro de la tolerancia de 30% en la tendencia lineal principal, ver figura 11b.

También se muestra la distribución del error en la figura 11d. El resumen de resultados se muestra en la tabla 1.

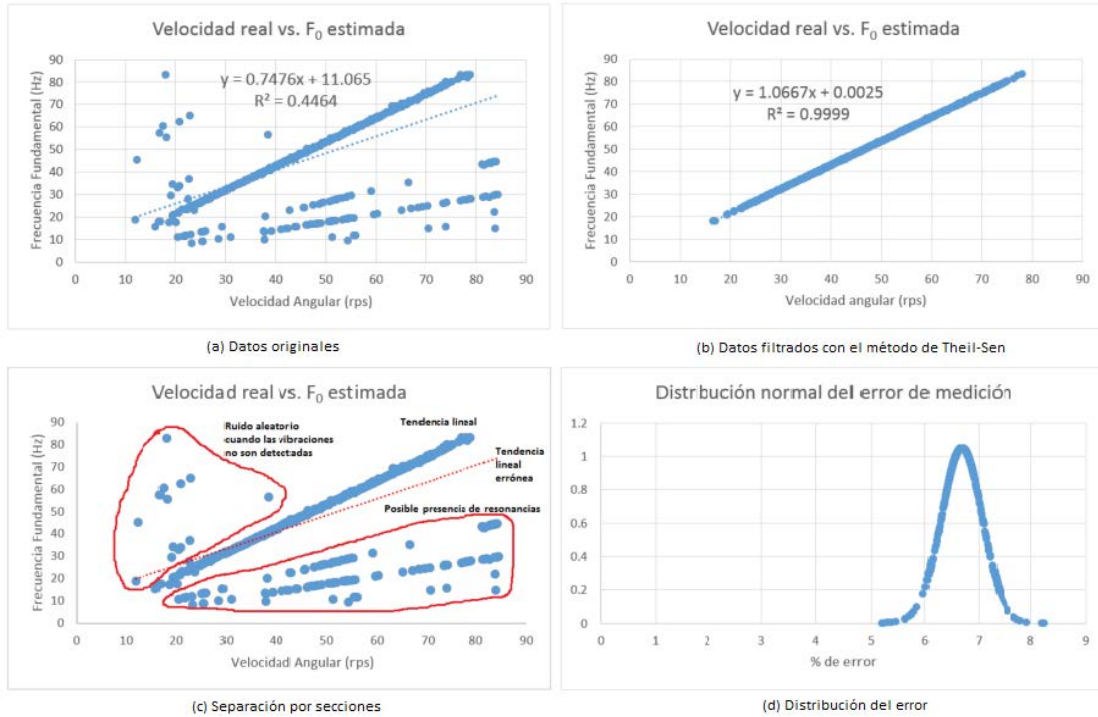


Figura 11 Resultados del experimento.

Tabla 1 Parámetros de captura

Parámetros de captura	
Frecuencia de muestreo F_s	19.6078 kHz
Número de muestras N	$2^{16} = 65536$
Ventana Utilizada	Hamming
Parámetros de comparación	
Motor de prueba	Nida 130A-255
Instrumento de medición de velocidad	Optoacoplador
Número de pruebas	828 filtradas de 1000
Umbral de detección	16.57 rps \Leftrightarrow 78.04 rps
Error mínimo e_{min}	5.20%
Error máximo e_{max}	8.27%
Error promedio \bar{e}	6.68%
Desviación estándar del error σ_e	0.3806 %
Regresión lineal	$y = 1.0667x + 0.0025$
Coeficiente de determinación R	0.9999

Un aspecto interesante en las mediciones de los motores es que entre más grande es el motor, el umbral de detección es mejor para bajas velocidades. Esto tiene sentido si se tiene en cuenta que la energía producida por las vibraciones del motor son una función directa de la masa total o inercia rotacional, así como de la velocidad de rotación. Entonces, la energía de vibraciones producida por dos motores de diferente tamaño, cuya velocidad es igual, no será la misma, pues las vibraciones en el motor más grande serán más prominentes. Por otro lado, un motor bien balanceado produce menos vibraciones por lo que se dificulta la detección de velocidad. Se observan discrepancias de detección cuando se utiliza una carga de inercia en la flecha. Intuitivamente, cuanto mayor es la carga, mayores son las vibraciones, por ende, mayor la sensibilidad en la detección de velocidad. Otra forma de mejorar la sensibilidad es utilizando un número grande de muestras en el análisis de frecuencia mejorando la resolución y aumentando el umbral de detección, permitiendo observar bajas frecuencias.

La colocación del sensor parece afectar enormemente la medición. Hay que tomar en cuenta la transmisibilidad de vibraciones del sistema y colocar el sensor donde sea posible maximizar la detección. Ya que el transductor es un micrófono, en ocasiones no es necesario mantener contacto mecánico directo, pues basta con sostener el sensor en el aire, y en algunas ocasiones esto puede generar mejores resultados. Sin embargo, puede ser difícil determinar el uso correcto del instrumento en cada aplicación.

A pesar de que se depende de la existencia de vibraciones mecánicas, una presencia excesiva puede ser perjudicial en las mediciones. Si la plataforma o el chasis donde esté instalado el motor sufren de vibraciones excesivas, estas vibraciones se superponen en la detección del sensor. Además, el sistema puede entrar en resonancia provocando que se detecte mayormente la frecuencia natural del sistema en lugar de la velocidad angular del motor.

Es claro que la calidad de los resultados mejora entre mayor es el número de pruebas, sin embargo, dado que los últimos dos experimentos se realizaron de forma automatizada, estos se volvieron muy propensos a la presencia de valores atípicos los cuales pueden ser removidos con relativa facilidad, sin embargo, estos

puntos no deseados pueden darnos información sobre comportamientos inesperados en el sistema bajo prueba. Este comportamiento se puede observar en las pruebas sobre el motor mediano y pequeño, pero es mucho más prominente en el motor pequeño. La figura 11c indica una separación por secciones de comportamiento, indicando la presencia de diferentes fenómenos en el experimento.

4. Discusión

Posibles implementaciones y aplicaciones quedan fuera del alcance de este trabajo ya que el objetivo principal fue el discutir solamente la metodología de una forma indirecta de detectar la velocidad de un motor en base a las vibraciones producidas por este. Solamente se discuten algunas sugerencias de trabajos futuros, como desarrollo de productos y/o aplicaciones.

El primer producto obvio que se puede crear basado en este método es un tacómetro de bolsillo, el cual serviría como una herramienta alternativa de diagnóstico para cualquier tipo de motor o sistema rotativo, creando la posibilidad de medir velocidad en motores sin sensores o en lugares difíciles de acceder directamente.

A todo esto, puede aunarse un sistema de diagnóstico de vibraciones, aplicando todo este desarrollo como un sistema interactivo, que dé información detallada al usuario, similar a muchas herramientas de diagnóstico especializadas.

La selección del número de muestras y la frecuencia de muestreo juegan un papel crítico en el proceso de estimación, afectando factores como la resolución y el umbral de detección. Si no se optimizan estos parámetros para el funcionamiento en tiempo real, se puede dificultar enormemente la aplicación de un lazo de control, ya que se requiere de una respuesta dinámica lo suficientemente rápida como para no afectar la estabilidad del sistema. Se propone la posibilidad de no mantener los parámetros de captura fijos, pues dependiendo de la respuesta del sistema, quizá sea conveniente ajustar estos parámetros dependiendo, por ejemplo, de la diferencia necesaria para detectar velocidades bajas o altas. Si se

resuelven estos problemas, teóricamente será posible aplicar este producto a un lazo de control de velocidad.

5. Conclusiones

En base a los resultados de los experimentos, se observa que existe una relación lineal entre la velocidad del motor y la frecuencia fundamental de las vibraciones producidas por éste. A pesar de la presencia de errores de medición, esta relación lineal se mantiene en los tres motores, por lo que se concluye que estos errores pueden deberse principalmente a las incertidumbres de los instrumentos, así como falta de calibración.

El algoritmo de Autocorrelación Mejorada entregó buenos resultados en general, sin embargo, no quedan descartadas posibles modificaciones, así como el uso de otros métodos para la estimación de la frecuencia fundamental.

Este método de medición de velocidad angular ofrece la ventaja ser una medición indirecta no intrusiva. El sensor de vibraciones puede colocarse entonces donde sea conveniente y no estorbe al mecanismo del motor. Además, no requiere de aditamentos extra como indicadores ópticos o acoplamientos mecánicos.

Una desventaja al usar este método es la presencia de un umbral de detección impredecible. Dada la naturaleza de las vibraciones mecánicas, se esperan respuestas dinámicas completamente diferentes para todo tipo de motores. Debido a esto es difícil determinar en primera instancia si los valores devueltos por el instrumento son veraces o errores aleatorios. Sin embargo, es posible mantener la opción de una ganancia variable cuando el ruido producido por un motor sea, o muy tenue, o muy intenso, dando al usuario del instrumento control sobre el umbral de detección.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Audacity, Audacity download | SourceForge.net, 2000: <http://sourceforge.net/projects/audacity/>, 2016.
- [2] De Silva, C. *Vibration Fundamentals and Practice*. CRC Press LLC, 2000.
- [3] Mazzoni, D. *Spectrum.cpp*. GNU General Public License Open Software,

- 2000.
- [4] Meddis, R. & O'mard, L. A unitary model of pitch perception, 1997.
 - [5] Middleton, G. Pitch Detection Algorithms, *OpenStax CNX*, 2003: <http://cnx.org/contents/i5AAkZCP@2/Pitch-Detection-Algorithms>, 2017.
 - [6] Nida, Basic Transducers Experiment Card Set Model 1405B. Nida Corporation, 1996.
 - [7] Park, J. & Mackay, S. Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems, pp. 435, 2003.
 - [8] Pico Technology, PicoScope 2000 Specifications: <https://www.picotech.com/oscilloscope/2000/picoscope-2000-specifications>, 2017.
 - [9] Shannon, C. A Mathematical Theory of Communication, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948.
 - [10] Smith, S. The Scientist and Engineer's Guide to Digital signal processing, 1999.
 - [11] Stoker, J. Nonlinear Vibrations in Mechanical and Electrical Systems. Interscience Publishers, Inc., 1961.
 - [12] Tolonen, T. & Karjalainen, A. A computationally efficient multipitch analysis model, *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol. 8, no. 6, pp. 708–716, 2000.
 - [13] Wikipedia, Theil–Sen estimator, *Wikipedia*, 2017: https://en.wikipedia.org/wiki/Theil–Sen_estimator.