

## Capítulo 6 Análisis de vibraciones en un sistema rotodinámico

### Chapter 6 Vibration analysis in a rotodynamic system

GAMBOA-MARTIN, Vianney A.†\*, RODRÍGUEZ-BLANCO, Marco A., DURÁN-MORALES, Iván y MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, Gilberto

*Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería y Tecnología*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Vianney Aurora Gamboa-Martín* / **ORC ID:** 0000-0001-6257-5473, **Researcher ID Thomson:** AAN-2297-2021, **CVU CONACYT ID:** 1015116

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Marco Antonio, Rodríguez-Blanco* / **ORC ID:** 0000-0003-3641-6895, **Researcher ID Thomson:** U-6476-2017, **CVU CONACYT ID:** 51908

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Iván, Durán-Morales* / **ORC ID:** 0000-0001-9568-4457, **Researcher ID Thomson:** AAQ-1775-2021, **CVU CONACYT ID:** 169683

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Gilberto, Martínez-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-3529-7460, **Researcher ID Thomson:** AAN-3256-2021, **CVU CONACYT ID:** 101509

**DOI:** 10.35429/H.2021.13.49.58

V. Gamboa, M. Rodríguez, I. Durán y G. Martínez

\*paraíso\_610@hotmail.com

J. Sierra, H. Mandujano, F. Anguebes y A. Mohamed (VV. AA.). Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Handbooks-TII-©ECORFAN-Mexico, 2021.

## Abstract

In this paper analyzes vibrations in a rotodynamic system connected to a three-phase induction motor, which are caused by imbalance or mass imbalance. The analysis is carried out interacting with different scenarios and a rotation to the system is induced by means of a test bench, where a mass imbalance in the disk carries even a state of maximum excitation, forcing it to vibrate in an unbalanced way, this will enter an unbalanced state, the vibration signals and the current of the motor are acquired. Which are processed and analyzed in the frequency domain (Fourier spectrum). The results are validated experimentally in different scenarios of operation of the rotodynamic system composed of the parametric variation of; separation of bearing, mass of inertial disc imbalance and speed of the induction motor. The instrumentation for data acquisition consists of two pairs of accelerometers, current meter, variable frequency drive, and as a processor element of vibration analysis an open programming is used in LabVIEW. It explains the unbalanced vibration, failures that this same causes, it exposes the importance of the problem, details the process and equipment used for its realization.

## Rotodynamic system, Out-of-phase, Imbalance

### 1. Introducción

Muchas máquinas contienen sistemas de accionamiento con motores, embragues, engranajes, ejes, correas o cadenas, rodamientos de bolas, rodillos, aceite etc. Algunas vibraciones normales pueden ser generadas por oscilaciones inherentes de la máquina como; oscilaciones del eje, velocidad angular o excitación por impulsos PWM. Sin embargo, los cambios de estas vibraciones y las apariencias adicionales pueden ser causadas por fallas. Por lo tanto, el análisis de vibraciones es un campo bien establecido en la supervisión y monitoreo de las maquinas. En este sentido, existe un comportamiento de transferencia de máquina entre la fuente de las vibraciones y la ubicación de la medición. Este comportamiento de transferencia, expresado generalmente por una respuesta de frecuencia  $Gm(i\omega)$ , puede contener una o varias frecuencias de resonancia  $\omega_{res,i}$  de la estructura de la máquina, como resultado de diferentes sistemas mecánicos de tipo masa resorte amortiguador.

Existen instrumentos de medición en las máquinas como, acelerómetros laterales en una, dos o tres direcciones, esta dirección puede ser ortogonal, horizontal, vertical y axial o rotacional en la carcasa de las máquinas. El principio de medición de los acelerómetros se basa en la medición de fuerzas, como la medición de fuerza en los sensores piezoeléctricos, o medición del desplazamiento de una masa sísmica utilizando sensores inductivos. Por lo general, un filtro pasa-alta es colocado después del acelerómetro para amortiguar las perturbaciones de baja frecuencia, con una frecuencia de corte de 100-200 Hz. En lugar de la aceleración  $a(t)$ , también se puede medir la velocidad de vibración  $v(t)$  o el desplazamiento de vibración  $d(t)$  (Isermann, R., 2005).

Las fallas en las máquinas generan señales armónicas estacionarias adicionales o señales de pulso (Isermann, R., 2005). Las primeras surgen debido a efectos linealmente superpuesto como el desequilibrio, alineación inexacta de flujo eléctrico en motores eléctricos, o por cambios en la operación periódica de la máquina. Las señales resultantes pueden aparecer como vibraciones aditivas, como

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_n(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \quad (1)$$

La transformada de Fourier es una herramienta que permite descomponer una función en una serie infinita de funciones que tienen diferentes frecuencias, y todas ellas múltiplos de la frecuencia (Marín, 2012).

Los componentes de un sistema (rodamientos, chumaceras, cojinetes, etc.) con el paso del tiempo sufren cierto desgaste o desajustes derivados por una desalineación o por un desbalance de masa u otra causa, provocando al sistema a vibrar de manera sobre excitada, por eso es importante el análisis de vibraciones en el cual se detectan estas fallas derivadas por la vibración desequilibrada, de manera que, la vibración constante desgasta los componentes del sistema.

De manera general, existen dos tipos de mantenimiento, predictivo y correctivo. El mantenimiento predictivo identifica las amplitudes que predominan en las señales de las vibraciones que se toman del sistema, las cuales se analizan para determinar las causas de la vibración. De esta manera, se puede establecer un paro programado para realizar un mantenimiento preventivo y corregir el desbalance o reemplazar el elemento, subsistema o sistema dañado de manera oportuna y evitar la propagación de la falla.

El mantenimiento correctivo se utiliza de manera basada en la intervención o interrupción en caso de falla por avería, el cual se distingue por dos formas (Blanco-Ortega, 2010) que consisten en el mantenimiento correctivo por intervención con la eliminación de la falla por avería, donde en reparación por emergencia, reemplaza los componentes dañados de la máquina, y el mantenimiento correctivo por interrupción con eliminación de causas, en donde se reemplaza los componentes dañados y se elimina la causa la cual origina la falla. El mantenimiento correctivo tiene sus ventajas y desventajas, las cuales puede maximizar el aprovechamiento de la máquina o hasta bajar el nivel de vida útil de la misma

Varios fenómenos pueden deteriorar el rendimiento de los motores de inducción y causar riesgos potenciales de seguridad, esto puede ser perjudicial para aplicaciones críticas. Las deficiencias, como los voltajes desequilibrados debido a las variaciones en la red eléctrica, el sistema desbalanceado mecánico o armónicos en la fuente de voltaje podrían ocasionar problemas como pérdidas excesivas, sobre corrientes, oscilaciones mecánicas e interferencia con la electrónica de control (Ioannides, M. G., 1995).

Poner en marcha un motor de inducción trifásico con voltajes desequilibrados o desbalance en la transmisión mecánica provoca vibración en el sistema, y repercute en el calentamiento excesivo en la transmisión mecánica, el cual se puede propagar hasta el motor. El método tradicional para analizar las condiciones de funcionamiento del motor cuando se han aplicado voltajes desequilibrados ha sido utilizar la teoría de los componentes simétricos (W. H. Kersting, March/April 1997).

Las fuentes comunes que generan vibraciones mecánicas en la maquinaria rotatoria son principalmente el desequilibrio, resonancias y el desalineamiento. El desequilibrio sucede cuando el eje principal de inercia no coincide con el eje geométrico del sistema, provocando vibraciones que generan fuerzas que son transmitidas principalmente a los soportes o cojinetes. La vibración causada por el desequilibrio es un problema común que se presenta en una gran cantidad de maquinaria rotatoria. Para equilibrar el sistema se han propuestos diversos métodos o dispositivos pasivos y activos con el objetivo de atenuar las vibraciones causadas por el desequilibrio (Blanco-Ortega, 2010), previo a un análisis de vibraciones.

La detección y el diagnóstico de fallas mientras el sistema está en funcionamiento ayuda a reducir todo tipo de pérdidas. Las fallas mecánicas, los usos, la holgura provocan diferentes ruidos y vibraciones con diferente amplitud y frecuencia frente al sonido y movimiento normal del equipo. Los motores de inducción están presentes en todos los procesos y sistemas y para ello es importante conocer los tipos de fallas que pueden ocurrir durante su funcionamiento (Ágoston, 2015).

El desequilibrio de tensión y la distorsión armónica de tensión afectan la potencia, el par y las vibraciones en los motores de inducción. Por ejemplo, en (Donolo, 2016), se calcula la frecuencia de las oscilaciones de la potencia eléctrica, el par y las vibraciones debido al desequilibrio de tensión y los armónicos.

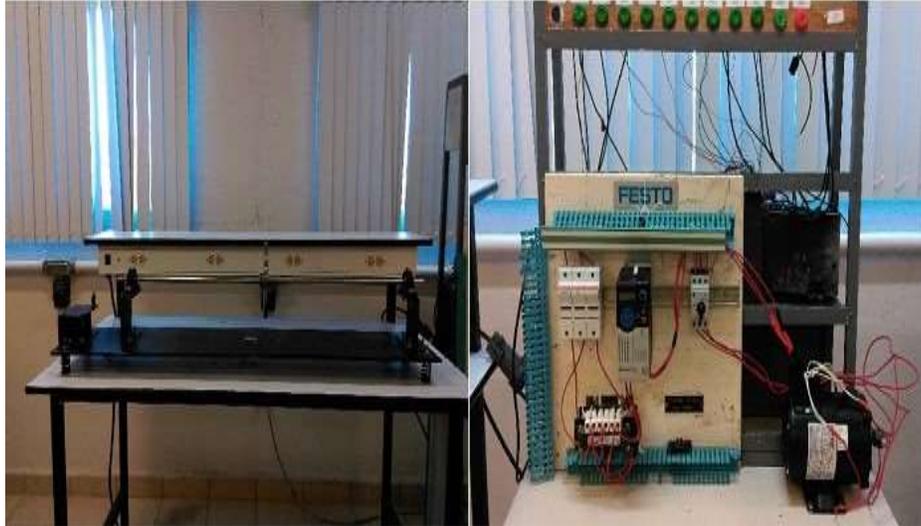
De igual manera se muestra que los valores típicos de distorsión armónica combinados con los niveles máximos de desequilibrio de voltaje permitidos por los estándares son suficientes para introducir niveles de vibraciones bajo los cuales no se recomienda la operación continua del motor de inducción trifásico. Sin embargo, también las vibraciones se pueden utilizar para identificar defectos que surgen de un diseño defectuoso, instalación defectuosa y desgaste. La frecuencia de la vibración medida es la misma que la de la fuerza que causa la vibración (Gopinath, 2010, September).

## **2. Medición e instrumentación**

El sistema rotodinámico o proceso utilizado, es un sistema mecatrónico, el cual consta de un motor de inducción trifásico conectado y controlado por, un variador de frecuencia (PowerFlex 525), además de una flecha o eje mecánico.

En la figura 6.1 se observa el sistema rotodinámico y el variador de frecuencia utilizados para controlar la velocidad del motor, cabe señalar que la conexión del motor de inducción se configura en delta con la intención de asegurar la medición adecuada entre fases y prescindir de la terminal neutra. Además, que en una conexión delta la 3<sup>ra</sup> armónica no se magnifica por la falla en el motor por pérdida de aislamiento o falla a tierra inherente a las fallas en el sistema mecánico.

**Figura 6.1** Equipo rotodinámico y PowerFlex 525



*Fuente: Instalaciones de laboratorio de Mecatrónica de la UNACAR*

En la tabla 6.1 se muestran los parámetros de operación del motor de inducción trifásica con los cuales opera el sistema, los datos en el variador de frecuencia (PowerFlex 525) son configurados a través de una conexión ethernet.

**Tabla 6.1** Parámetros del motor de inducción trifásico

Parámetros del motor	
Voltaje	220 V
RPM	1725 RPM
Polos	3
Frecuencia	60 Hz
Corriente	0.9 A
Potencia del motor	0.37 kW

*Fuente: Elaboración Propia*

El equipo de adquisición de datos (DAQ), se muestra en la siguiente figura y consta:

- De un módulo de entrada de sonido y vibración NI-9234, 4 canales, 51.2 KS/s canal $\pm$ 5V,
- Un dispositivo USB 6003 de E/S Multifunción, 8 I (16Bits, 100 KS/s, 2AO (5 KS/s canal), 13 DIO)
- Un contador de 32 Bits, el chasis cDA-914
- 2 acelerómetros PCB de uso general, 10 mV/g, ICP (EPE) GPTC03 (figura 6.2).

**Figura 6.2** Equipo DQA, Tarjeta NI 9234, National Instruments

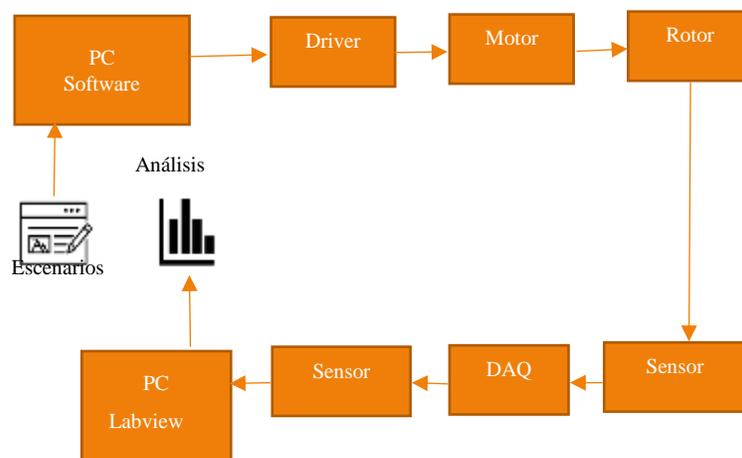


*Fuente: Recuperado de National Instruments*

### 3. Metodología

La metodología para seguir se resume con el siguiente diagrama a bloque que se representa en la figura 6.3. La metodología para la obtención de datos comienza, según se muestra en la figura 6.3, programando el escenario inicial con ayuda del software de control del variador de frecuencia PowerFlex a través de una conexión ethernet, posteriormente la variación de frecuencia interactúa con la variación del motor de inducción y transfiere el movimiento rotacional al rotor, el cual está conectado a la flecha mecánica del sistema rotodinámico, un acelerómetro, como sensor de vibración por cada chumacera, es conectado a la DAQ la cual se conecta a la PC, en donde se realiza el procesamiento y análisis utilizando software de LabVIEW con algoritmos de código abierto desarrollado en este trabajo. Una vez obtenida la prueba se procede a cambiar de escenario para así completar un análisis más completo.

**Figura 6.3** Diagrama de adquisición de datos y control de velocidad del motor de inducción en lazo abierto



*Fuente: Elaboración Propia*

A continuación, se muestra el equipo implementado de instrumentación, utilizado para el proceso de este trabajo.

En la figura 6.4 se observará la primera parte de equipo de instrumentación: el variador de frecuencia (PowerFlex 525), el motor, el eje mecánico, el medidor de corriente y osciloscopio.

**Figura 6.4** Equipo de instrumentación, primera parte



*Fuente: Instalaciones de laboratorio de Mecatrónica de la UNACAR*

En la figura 6.5 se muestra, el equipo para la obtención de datos (acelerómetros, tarjeta de adquisición DAQ y la HMI).

**Figura 6.5** Equipo de instrumentación, segunda parte

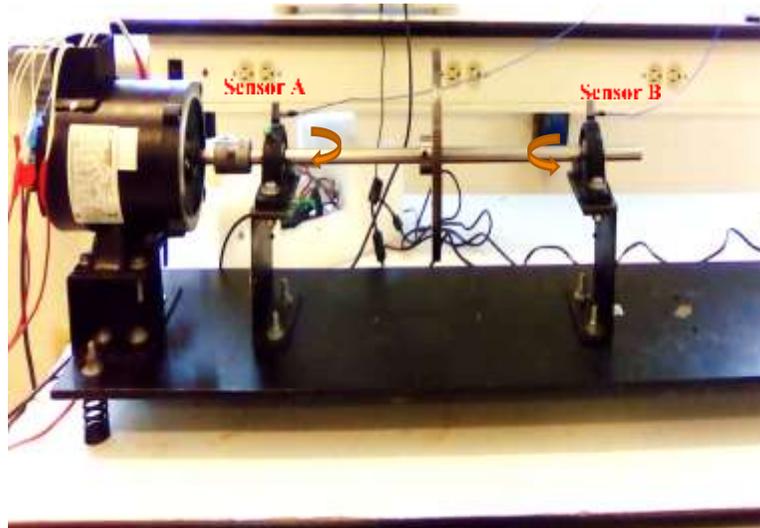


*Fuente: Instalaciones de laboratorio de Mecatrónica de la UNACAR*

Las vibraciones son obtenidas por medio de una red de acelerómetros, donde las señales se procesan por un DAQ y a través de un software de ingeniería de sistemas LabVIEW, se analizan las señales y se extraen los datos obtenidos en el dominio de la frecuencia, por otro lado, se analizan las corrientes del motor de inducción en el osciloscopio, donde los datos obtenidos se procesan por medio de software para cálculos de ingeniería.

Con la finalidad de analizar de manera detallada la vibración vertical, los sensores A y B se colocaron sobre la chumacera como se muestra en la siguiente figura 6. Las vibraciones laterales no se consideraron en este análisis porque experimentalmente las magnitudes verticales brindan cambios más significativos.

**Figura 6.6** Posición de los acelerómetros A y B sobre la chumacera. Tarjeta NI 9234 de National Instruments



*Fuente: Instalaciones de laboratorio de Mecatrónica de la UNACAR*

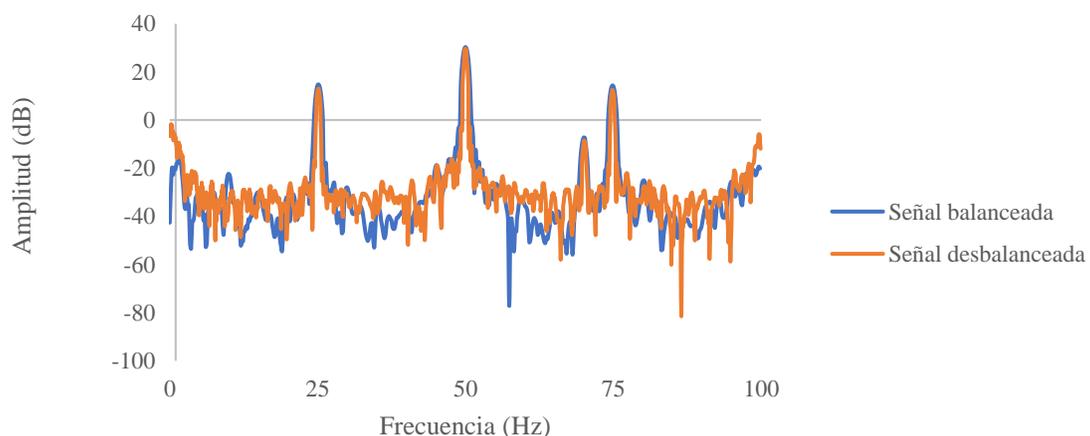
## Pruebas experimentales

Los resultados de las pruebas realizadas en el sistema rotodinámico, se adquirieron por medio de dos barras de acero, una de 0.60 metros y la otra de 0.75 metros, las cuales vibran de manera particular a diferentes velocidades, la medición de las perturbaciones de corrientes del motor debido a la longitud de barra de transmisión de acero son pos-procesada empleando la FFT que el propio osciloscopio tiene como herramientas matemáticas dando como resultado el mismo espectro en frecuencia que el empleado con los acelerómetros, DAQ, software de LabVIEW y PC, La ventaja de usar acelerómetro es la magnitudes más significativas en comparación con la FFT utilizando las corriente del motor.

### Prueba 1

En la primera prueba, una barra de transmisión de longitud 0.60m con disco de inercia balanceado y desbalanceado es utilizado. El espectro de frecuencia de la corriente del motor procesada con las herramientas matemáticas del osciloscopio y El espectro de frecuencia de las vibraciones mecánicas son medidas con acelerómetros y el software de LabVIEW respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran los gráficos 6.1 y 6.2, respectivamente. El Gráfico 6.1 muestra los espectros de las corrientes obtenidas, donde se observan dos señales; la primera en color rojo corresponde a la corriente del motor en condición libre de carga o balanceado, y la segunda grafica en color azul, en condición bajo carga o desbalanceado, ambos a la misma velocidad de operación de 1725 rpm, las cuales fueron medidas por medio de un tacómetro.

**Gráfico 6.1** Espectros de Fourier de las corrientes del motor prueba 1.

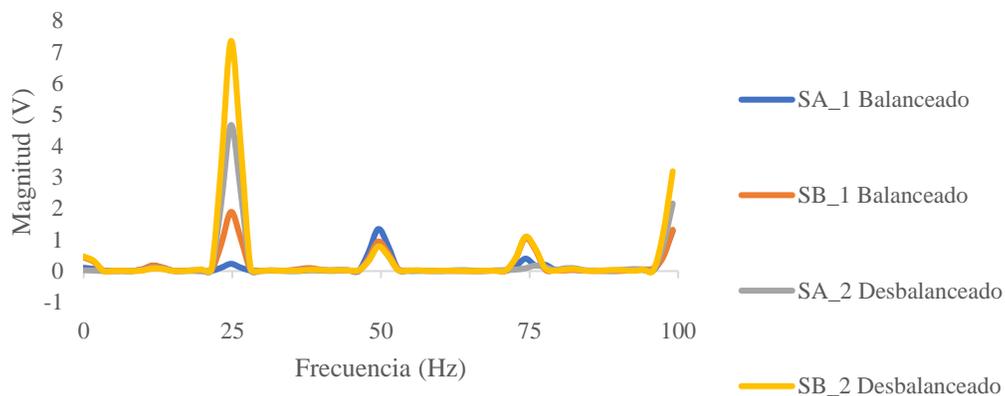


*Fuente: Elaboración Propia*

El Gráfico 6.2 muestran los espectros de frecuencia obtenidos de las vibraciones mecánicas del sistema, en donde se observan cuatro señales; la primera señal de color azul y la segunda de color naranja, corresponden a los acelerómetros situados en la chumacera cerca y lejos al motor, respectivamente, en condición libre de carga inercial o balanceado con una velocidad de operación de 2200 rpm.

La tercera señal de color gris y la cuarta señal de color amarillo corresponden a los acelerómetros situados en la chumacera cerca y lejos al motor, respectivamente, en condición libre bajo carga inercial o desbalanceado con una velocidad de operación de 2,158 rpm.

**Gráfico 6.2** Espectros de Fourier de las vibraciones mecánicas del sistema prueba 1.



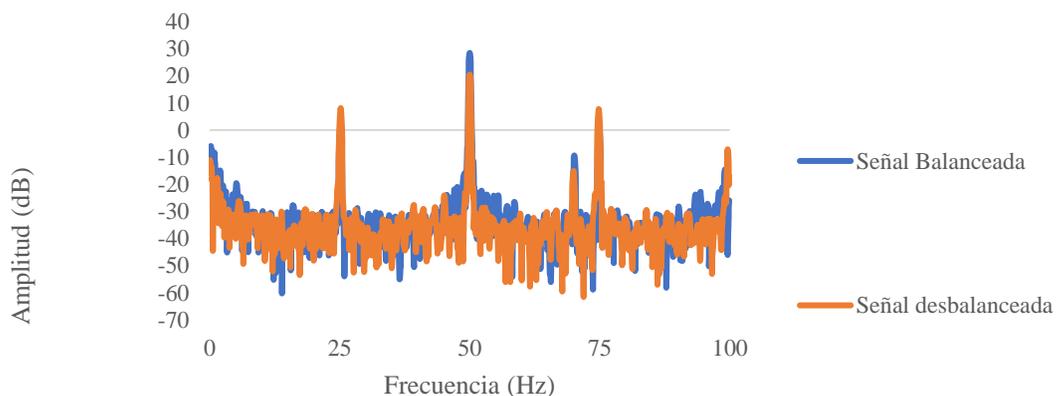
*Fuente: Elaboración Propia*

## Prueba 2

En la segunda prueba se utiliza la barra de 0.75 metros, y se mide el espectro de frecuencia de la corriente del motor procesada con las herramientas matemáticas del osciloscopio y las vibraciones se miden con las herramientas matemáticas del software de ingeniería LabVIEW, en condiciones balanceada y desbalanceado, los resultados obtenidos se muestran en el gráfico 6.3 y 6.4, respectivamente.

El gráfico 6.3, se observan los espectros de corriente del motor, donde se observan dos señales; la primera señal en color azul corresponde, a la corriente de motor en condiciones libres sin carga o balanceado, y la segunda señal de color naranja, corresponde a la corriente en operación en condiciones bajo carga o desbalanceado, ambos a una velocidad de 1,905 rpm, las cuales fueron medidas por medio de un tacómetro. Se observa que la variación en la amplitud es más significativa.

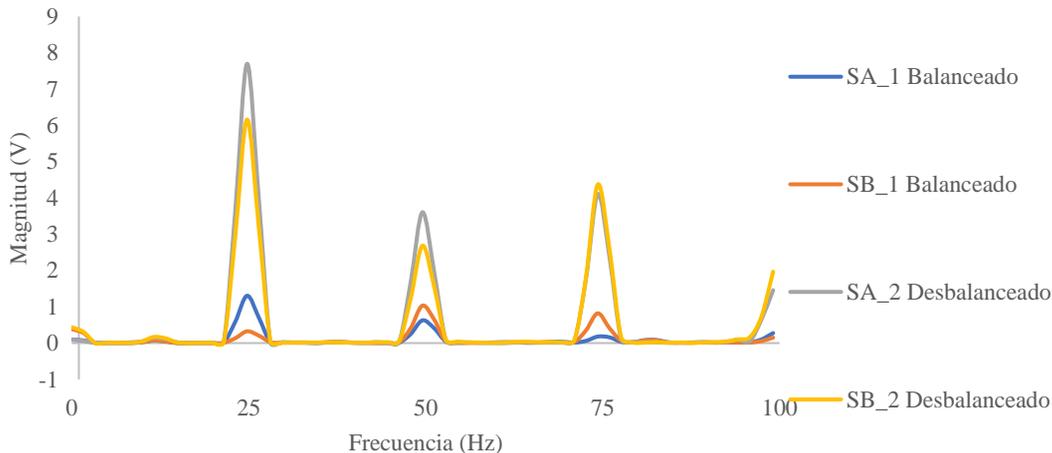
**Gráfico 6.3** Espectro de Fourier de las corrientes del motor prueba 2.



*Fuente: Elaboración Propia*

En el gráfico 6.4, se observan los espectros de las vibraciones del motor de inducción, en donde se visualizan cuatro señales, la primera en color azul y la segunda señal en color naranja, corresponde, a las vibraciones del sistema del primer y segundo sensor (acelerómetro) en operación en condiciones libres sin carga, a una velocidad de 1,550 rpm, la tercera en color gris y la cuarta señal en color amarillo, corresponde a las vibraciones del sistema en condiciones con carga, a una velocidad de 1,905 rpm, las cuales fueron medidas por medio de un tacómetro. Se puede observar que la variación en la amplitud es más significativa cuando se presenta la carga en el sistema.

**Gráfico 6.4** Espectro de Fourier de las vibraciones del sistema prueba 2.



*Fuente: Elaboración Propia*

#### 4. Discusión de los resultados

En las gráficas 1, 2, 3 y 4 se observa que los armónicos centrales corresponden a la frecuencia eléctrica de operación del motor, la cual es de 50 Hz para la Prueba 1 y 2. Aquí es interesante mencionar que la velocidad del eje del sistema es función de la frecuencia de operación. Por otro lado, la frecuencia de 25 y 75 Hz para la Prueba 1 y 2, son características de las vibraciones producidas por los baleros o cojinetes de las chumaceras. Para corroborar estas frecuencias es necesario conocer algunos parámetros de los baleros, como la velocidad del eje y dimensiones de los diámetros de los baleros, según se reporta en (Blanco-Ortega, 2010).

Ahora bien, ¿Por qué motivo se tienen frecuencias laterales simétricas, si se sabe que los dos baleros utilizados son iguales? La respuesta es porque las vibraciones siempre se propagan dentro del mismo diámetro metálico del balero, pero en forma transversal. Es decir, las vibraciones se duplica o triplica por cada balero con diferente dimensión. El motivo por el cual no se pudo operar a su máxima velocidad de la Prueba 1 y 2 es porque en un sistema desbalanceado con un eje más grande, las vibraciones incrementan a tal grado que el eje llega a deformarse.

#### 6. Agradecimiento

Se agradece el apoyo brindado al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), e igualmente a la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).

#### 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos de las corrientes y las vibraciones mecánicas del sistema rotodinámico, tienen espectros de Fourier muy similares, se puede determinar que este modelo de detección puede analizar las vibraciones que experimenta el sistema rotodinámico, al percibir una carga mínima, pero si la carga excede, el sistema tiende a dañar a el motor de inducción, la importancia de la longitud del eje es fundamental en la obtención de las muestras, entre mayor sea la longitud del eje, el sistema experimenta más vibraciones mecánicas y por consiguiente más número de muestras a analizar, ahora a menor longitud la vibraciones son menores y un mínimo de muestras a analizar.

Se puede mejorar este análisis con la implementación de más sensores, para recabar un mayor número de muestras y precisión del sistema rotodinámico.

## 7. Referencias

- Ágoston, K. (2015). Fault detection of the electrical motors based on vibration analysis. *Procedia technology*, 19, 547-553.
- Blanco-Ortega, A. B.-C.-N.-A. (2010). Control de vibraciones en maquinaria rotatoria. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(4), 36-43.
- de Abreu, J. P. G., & Emanuel, A. E. (October 2000). Induction motors loss of life due to voltage imbalance and harmonics: a preliminary study. In *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No. 00EX441)*, Vol. 1, (7-80) IEEE.
- Donolo, P. B. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric power systems research*, 140, 866-873.
- Gopinath, S. (2010, September). Study on electric motor mass unbalance based on vibration monitoring analysis technique. In *2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology*, 539-542.
- Hu, J. B. (2009). Proportional integral plus multi-frequency resonant current controller for grid-connected voltage source converter under imbalanced and distorted supply voltage conditions. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 10(10), 1532-1540.
- Ioannides, M. G. (1995). A new approach for the prediction and identification of generated harmonics by induction generators in transient state. *IEEE transactions on energy conversion*, 10(1), 118-125.
- Isermann, R. (2005). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- Kersting, W. H. . (May 2000). Causes and effects of unbalanced voltages serving an induction motor. In *2000 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 44th Annual Conference (Cat. No. 00CH37071)*, (pp. B3-1). IEEE.
- Khoobroo, A., Fahimi, B., & Lee, W. J. (November 2008). Effects of system harmonics and unbalanced voltages on electromagnetic performance of induction motors. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics In 2008*, 1173-1178.
- Marín, E. P. (2012). *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Félix Varela.
- W. H. Kersting, W. H. (March/April 1997). Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines. *IEEE Transactions on industry applications*, 33(2), 415-4120.
- Wang, Y. J. (January 2000). An analytical study on steady-state performance of an induction motor connected to unbalanced three-phase voltage. In *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*, Vol.1, (159-164) IEEE.