

Capítulo 5 Propuesta para detección de vibraciones y/o desbalance en un sistema rotodinámico a partir de redes neuronales

Chapter 5 Proposal for detection of vibrations and/or unbalance for a rotodynamic system using neural networks

SANCHEZ-ARROYO, Ian Arturo†, RODRIGUEZ-BLANCO, Marco Antonio*, VAZQUEZ-AVILA José Luis y PALACIOS-GONGORA, Iris Susana

Universidad Autónoma del Carmen – Facultad de Ingeniería.

ID 1^{er} Autor: *Ian Arturo, Sanchez-Arroyo* / **ORC ID:** 0000-0001-6673-075X, **Researcher ID Thomson:** GXH-3990-2022, **CVU CONACYT ID:** 1143096

ID 1^{er} Coautor: *Marco Antonio, Rodriguez-Blanco* / **ORC ID:** 0000-0003-3641-6895, **Researcher ID Thomson:** U-6476-2017, **CVU CONACYT ID:** 51908

ID 2^{do} Coautor: *Josue Luis, Vazquez-Avila* / **ORC ID:** 0000-0002-9654-2431, **Researcher ID Thomson:** P-7994-2019, **CVU CONACYT ID:** 102415

ID 3^{er} Coautor: *Iris Susana, Palacios-Gongora* / **ORC ID:** 0000-0003-1702-1761, **Researcher ID Thomson:** GXZ-6460-2022, **CVU CONACYT ID:** 1137651

DOI: 10.35429/H.2022.10.36.48

I. Sánchez, M. Rodríguez, J. Vázquez e I. Palacios

*110768@mail.unacar.mx

O. Benavides & A. Flores (VV. AA.). Ingeniería y Materiales Aplicados al Medio Ambiente. Handbooks- TII- ©ECORFAN-Mexico, 2022.

Resumen

Las maquinas rotativa son muy importancia a nivel industrial para garantizar la flexibilidad, agilidad y precisión de los procesos tanto para aplicaciones críticas y no-críticas para la producción y manufactura de productos, lo cual salvaguardar la integridad humana y económica. En este sentido, garantizar el correcto funcionamiento de los equipos mediante la detección de fallas complementa un buen plan de mantenimiento preventivo o predictivo, esto alargar la vida útil de los equipos y evitar paro de producción. Actualmente existen varias técnicas de detección de vibraciones y/o desbalance para sistemas rotodinámicos como son motores, generadores, cajas de engranes entre otras, las cuales se basan en mediciones mecánicas mediante acelerómetros y/o proxímetros o mediciones eléctricas por medio de sensores de corriente. Las técnicas de procesamientos para diagnóstico de fallas por vibraciones y/o desbalance comúnmente se basan en el modelo del proceso o en señales obtenidas. Sin embargo, los modelos de los sistemas rotodinámicos son comúnmente no lineales, por lo que el modelo del sistema suele ser muy complejo y variante en el tiempo. Entonces las técnicas de procesamiento basados en señales utilizando métodos no lineales es la mejor opción de estudio. Existen técnicas de procesamiento de señales orientadas a sistemas rotodinámicos que permiten detectar fallas en los baleros y por desbalance del rotor, pero necesitan dos tipos de sensores para distinguir la falla específica y el enfoque está orientado para sistemas lineales lo cual incrementa el costo de la instrumentación y limita el rango de precisión respectivamente. En este trabajo se pretende utilizar la medición de señales vibratorias con solo acelerómetros para distinguir la falla entre baleros y/o desbalance empleando un enfoque no lineal basado en redes neuronales aplicado a un sistema rotodinámico, el cual será entrenado para diversas condiciones de operación libre de falla y bajo falla.

Vibraciones, Desbalance, Diagnóstico de fallas, Redes neuronales, Sistemas rotodinámicos

Abstract

Rotary machines are very important at an industrial level to guarantee the flexibility, agility and precision of the processes for both critical and non-critical applications for the production and manufacture of products, which safeguard human and economic integrity. In this sense, guaranteeing the correct functioning of the equipment by detecting faults complements a good preventive or predictive maintenance plan, this extends the useful life of the equipment and avoids production stoppage. Currently there are several vibrations and unbalance detection techniques for rotodynamic systems such as motors, generators, gearboxes, among others, which are based on mechanical measurements using accelerometers and/or proximeter or electrical measurements using current sensors. Processing techniques for fault diagnosis due to vibrations and/or unbalance are commonly model-based or signals-based. However, the models of rotodynamic systems are commonly nonlinear, so the system model is often very complex and time-varying. Then signal-based processing techniques using nonlinear methods is the best study option. There are signal processing techniques oriented to rotodynamic systems that allow detecting faults in the bearings and due to rotor unbalance, but they need two types of sensors to distinguish the specific fault and the approach is oriented towards linear systems, which increases the cost of instrumentation. and limits the precision range respectively. In this work it is intended to use the measurement of vibratory signals with only accelerometers to distinguish the fault between bearings and/or unbalance using a nonlinear approach based on neural networks applied to a rotodynamic system, which will be trained for various conditions of free-fault and under-fault operation.

Vibrations, Unbalance, Fault diagnosis, Neural networks, Rotodynamic system

1. Introducción

En la actualidad las tecnologías y procesos industriales han avanzado de forma exponencial y han requerido de la modernización de los procesos de fabricación industrial y de servicios, los motores eléctricos o bien todo lo que en resumen se le conoce como una maquina rotativa, son de vital importancia en los procesos debido a la utilidad que tienen en la industrial para sistemas de ingeniería (Ambur y Rinderknecht 2018; Huesca-Lazcano et al. 2019). Gran parte de las máquinas en la actualidad se desarrollan en base a sistemas mecatrónicos, esto para facilitar los procesos a los que están sometidos, sin embargo, aunque no se desea, las vibraciones se pueden encontrar en todas las máquinas rotatorias. Esto podría causar incomodidad a los usuarios, afectar el rendimiento del proceso al que está sometida y también podría provocar fallas parciales o totales (Ambur y Rinderknecht 2018).

En la maquinaria rotativa, el control sobre las fuerzas dinámicas, principales generadores de las grandes amplitudes de vibración y, el principal generador de los problemas de fatiga y desgaste ha sido la principal causa de estudios para evitar fallas catastróficas en los sistemas rotodinámicos (Sánchez-Acevedo, Nova A, y Madrigal A. 2018). Una de las fuentes más comunes de generación de vibración en máquinas rotatorias se debe al desbalance. El desbalance ocurre cuando el eje principal de inercia del rotor no coincide con el eje geométrico del sistema, lo que provoca vibraciones que generan fuerzas indeseables que se transmiten directamente a los elementos mecánicos, así como, soportes, cojinetes o baleros del rotor y ejes o acoples que el sistema posea incluyendo baleros y cojinetes. (Mendoza Larios et al. 2016), El monitoreo de la condición de la maquinaria rotativa es vital para obtener un proceso sin inconvenientes en la industria. La fabricación imprecisa como suele ocurrir por errores de procesos que se puede apreciar en los rodamientos, ejes y sin olvidar las condiciones de operación extremas, son las causas comunes de fallas en las maquinarias. Aparte de las pérdidas financieras que esto conlleva debido a los paros de procesos provocado por las averías repentinas de las maquinas pueden incluso provocar fallos catastróficos (Tahir et al. 2017).

Actualmente sean diseñado una variedad de metodologías para la de detección de fallas a partir del monitoreo de las vibraciones en los equipos, cabe destacar que esto también va a depender de varios factores a los que esté sometido el equipo a estudiar, como por ejemplo la carga de la máquina, la velocidad de operación, la cimentación, la rigidez, etc. Para esto, se emplean sensores específico, los cuales a partir de tarjetas de adquisición se obtiene datos a partir de señales a estudiar, cabe mencionar que debido al comportamiento no lineal de estos sistemas, la metodología debe trabajar bajo un esquema no lineales y a partir de ahí, se mencionan algunas de las metodologías utilizadas en la actualidad (Estupiñán P, San Martín, y Canales M 2006; Huesca-Lazcano et al. 2019; Sánchez-Acevedo et al. 2018; Tahir et al. 2017), como por ejemplo: La transformada rápida de Fourier (FFT): permite detección de cualquier cambio anormal en condiciones de trabajo normal de la máquina, pero se observa que en casos industriales complejos, es incapaz de identificar la ubicación del daño, por lo tanto se puede pensar como una herramienta para detectar fallas mediante el procesamiento de señales y no para identificar fallas específicas (Boudiaf et al. 2016). Algunos otros análisis existentes para detectar fallas se muestran a continuación:

Análisis temporal: este permite el seguimiento de cualquier cambio anormal en las condiciones de trabajo normal de la máquina. Pero, no proporciona ninguna información sobre qué componente es defectuoso. Entonces es sólo una estrategia de seguridad o monitoreo condicional (Boudiaf et al. 2016). Análisis de Cepstrum (CA): se puede utilizar para identificar y diagnosticar fallas en rodamientos. Sin embargo, sus limitaciones son que genera muchos picos grandes no deseados cerca del punto cero, lo que dificulta la interpretación de la salida (Boudiaf et al. 2016).

Análisis Envolvente (EA): se pueden utilizar para la detección y diagnóstico de fallas en el rodamiento. No obstante, las limitaciones para su uso es que requiere el conocimiento previo de la frecuencia de resonancia y la banda de filtrado, lo que nos hace referencia a que para utilizarlo se requiere de experiencia previa (Boudiaf et al. 2016).

Transformada de wavelet (WT): se puede utilizar para la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos. Sin embargo, se requiere preselección de la *wavelet mother* adecuada y nivel de descomposición apropiado que contenga la información necesaria para el diagnóstico de fallas (Boudiaf et al. 2016).

También se presenta como alternativa la identificación o extracción de parámetros no lineales entre los cuales destaca el máximo exponente de Lyapunov, como un indicador del estado de la máquina y comparativa al someterla a diferentes escenarios de operación libre de falla y bajo fallas (Huesca-Lazcano et al. 2019).

La metodología a partir de inteligencia artificial (AI), la cual también es un dominio popular para el diagnóstico automático de fallas en las maquinarias, incluyen redes neuronales artificiales (ANN), redes bayesianas, máquina de vectores de soporte (SVM), métodos de entropía y optimización, lógica difusa (DL). En general estos métodos buscan construir un modelo de caja negra a partir de datos históricos del proceso resultando muy útil para sistemas dinámicos no lineales (Tahir et al. 2017).

En el siguiente trabajo se presenta una propuesta para la detección de fallas en un sistema rotodinámico no lineal para distinguir entre el desbalance y daños en los rodamientos a partir del análisis de las vibraciones obtenidas con acelerómetros y encoder, esto aplicando el entrenamiento de redes neuronales con el sistema en diferentes condiciones libre de falla o con fallas.

2. Metodología empleada en la literatura.

2.1. Metodología para el balanceo de rotores empleando un analizador de vibraciones

El desbalance es una medida que mide la distancia en la que se desplaza la línea central del rotor, de la línea central de rotación. La fuerza generada por el desbalance, la fuerza centrífuga, se calcula en función de la masa de desbalanceo (m), la excentricidad (r) y la velocidad de rotación (ω), según la ecuación (1). Aunque, esto es función del tipo de rotor, su dinámica puede ser mucho más compleja, y el cálculo de las aceleraciones también.

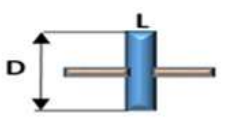
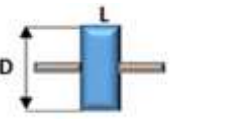
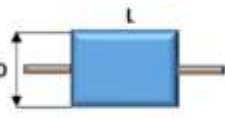
$$F_{Centrifuga} = m(r * \omega^2) \quad (1)$$

El desbalance se presenta en forma sincrónica a la velocidad de rotación del equipo, y su dirección es completamente radial. Por lo tanto, en el espectro de vibraciones, la amplitud de vibración que esta asociadas a este problema se puede observar en la componente $1X$ (primer armónico), Para conocer los tipos de desbalance, la norma ISO 1925 muestra una clasificación, según la distribución de las masas desbalanceadoras en: desbalanceo estático; cuando el eje principal de inercia es paralelo al eje de rotación, desbalanceo por fuerzas par; cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en el centro de gravedad del rotor, desbalanceo cuasiestático; cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en un punto distinto al centro de gravedad del rotor, y desbalanceo dinámico; cuando el eje principal de inercia no intercepta al eje de rotación.

A partir de la geometría, la distribución de masas y la velocidad de operación del rotor, el balanceo se puede realizar corrigiendo en un plano, y en dos o más planos. Expresado en la norma ISO 5406, se obtienen los modelos para balanceo teniendo en cuenta la relación entre el largo y el diámetro del rotor. En la tabla 1, se exponen estos modelos. En la norma ISO 1940 se establecen los niveles máximos de desbalanceo permitidos para las diferentes aplicaciones industriales.

En la siguiente metodología propuesta por (Sánchez-Acevedo et al. 2018) para balance de sistemas rotodinámicos se presenta la configuración de los parámetros requeridos para la aplicación de la metodología para el balanceo y los cálculos y posiciones para la realizar la corrección de este. El analizador que emplearon es un sistema comercial OROS 35 y sus aplicaciones correspondientes. Configuración inicial: Aquí definen el número de planos que se van a balancear, y el tipo de balanceo que se aplicara tomando en consideración en esta misma sección la posición de los sensores en la configuración.

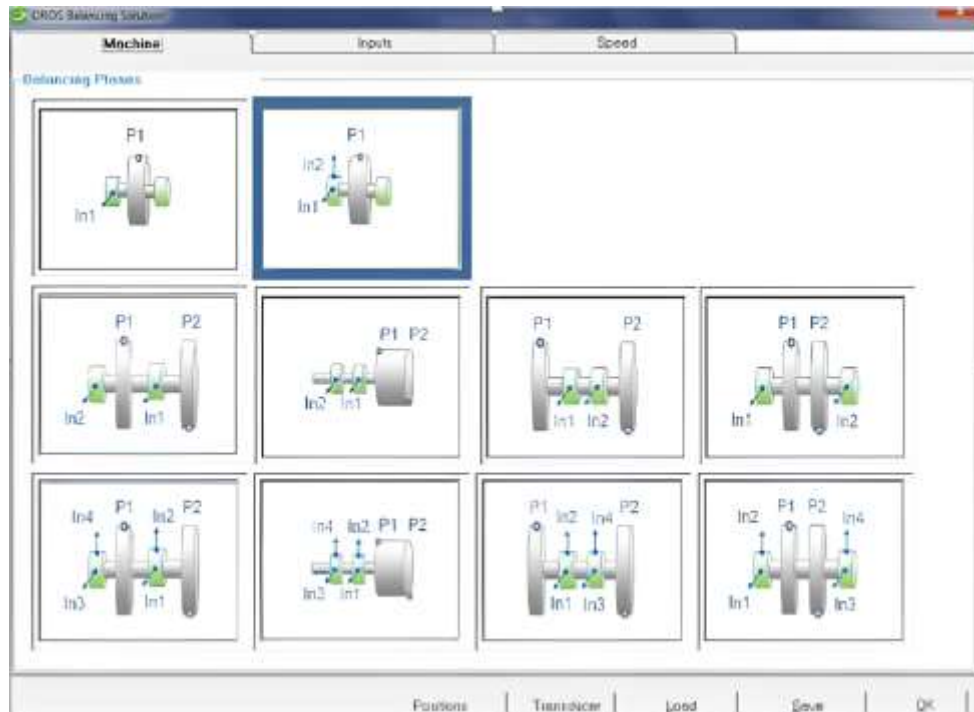
Tabla 1 Modelos de Balanceo

Rotor / modelo	Relación L/D	Modelo de balanceo		
		Un plano	2 planos	Múltiples planos
	Menos a 0.5	Hasta 1000 RPM	Superior a 1000 RPM	NO
	Mayor que 0.5 y menor que 2	Hasta 150 RPM	150- 2000 RPM superior al 70% Vel. Critico	Superior a 2000 RPM, superior al 70% Vel. Critica
	Mayor que 2	Hasta 100 RPM	100 RPM superior al 70% Vel. Critico	Superior a 70% Vel. Critica

Fuente: (Sánchez-Acevedo et al. 2018)

Ahora procedieron a la configuración de los sensores, a través de la información solicitada, tanto para los acelerómetros como para el tacómetro. Este proceso incluye la frecuencia de muestreo.

Figura 2 Configuración y ubicación de planos y acelerómetros que se van a trabajar



Fuente: (Sánchez-Acevedo et al. 2018)

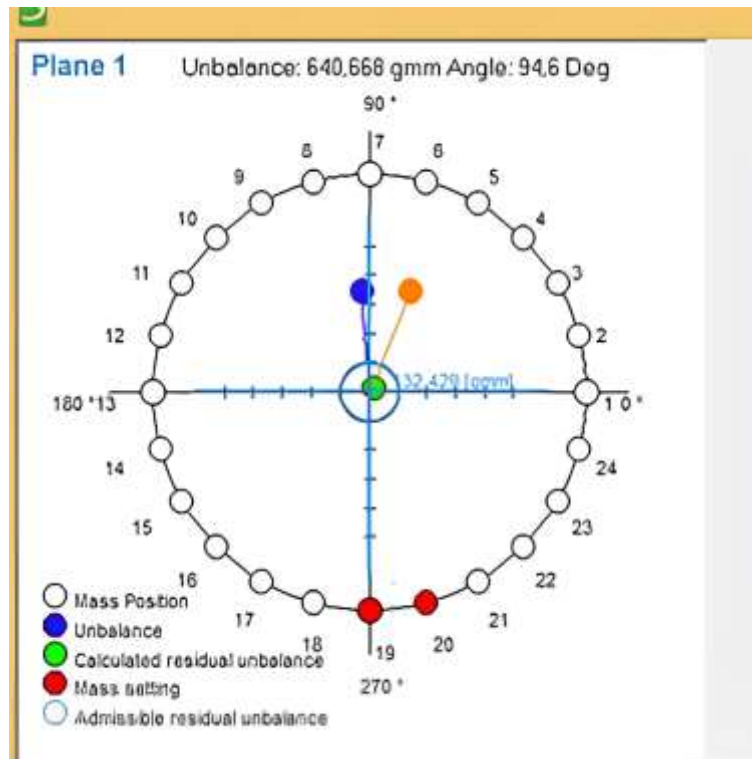
Configuración del rotor: Ingresaron la cantidad de planos, el número de posiciones de las masas, el radio desde el centro de rotación a las posiciones de las masas, la masa del rotor (esta masa debe ser dividida en el número de rodamientos del rotor), la velocidad de los rotores, la calidad del balanceo y, la metodología ya sea agregando o retirando masas de prueba, como se muestra en la ventana del sistema de adquisición OROS 35 de la figura 2.

Este proceso está dividido en 3 secciones. 1: determinaron el estado inicial del balanceo del sistema, permite conocer si se necesita el balanceo; 2: introdujeron de manera controlada las masas de desbalanceo, esto con el fin de determinar la masa de desbalanceo, así como su posición; 3: agregaron o quitaron masas para balancear, según sea necesario, y con estos 3 pasos, determinaron si cumple con los niveles permitidos de desbalanceo, o si se hace necesario balancear de nuevo.

El objetivo de la prueba es disminuir el nivel de excentricidad de desbalanceo, señalado con las líneas azules de la figura 2. El círculo azul representa el desbalanceo admisible. Ahora, la línea de excentricidad después del proceso de balanceo debería quedar dentro del límite de la línea azul. La ventana mostrada en la figura 2 es una herramienta que permite al usuario conocer el resultado del proceso.

Por último, la validación se realiza con el análisis de vibraciones, en el que se debe evidenciar la disminución de las vibraciones, en el espectro en frecuencias, del primer armónico ($1X$), y el cumplimiento de la norma.

Figura 2 Representación gráfica de la ejecución del balanceo



Fuente: (Sánchez-Acevedo et al. 2018)

Para validar la metodología, los autores emplearon el sistema de adquisición OROS 35 con diferentes casos estudiados en diferentes bancos de ensayos de vibraciones mecánicas. De igual forma, los autores realizaron la validación de la metodología y las herramientas para balanceo en maquinaria tipo industrial. En los análisis realizados establecen la condición de operación tanto para el sistema desbalanceado, es decir, antes de aplicar el proceso de balanceo, como para el instante posterior al proceso, con el objeto de evaluar su efectividad. (Sánchez-Acevedo et al. 2018)

2.2 Balanceo Automático de un Sistema Rotor-Cojinete: Identificador Algebraico en Línea del Desbalance Para un Sistema Rotodinámico

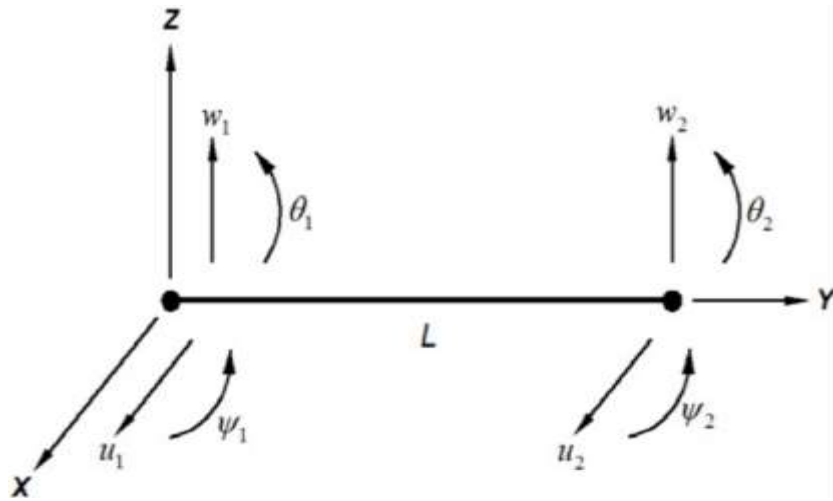
El modelado de un sistema rotodinámico con variados grados de libertad lo obtenemos a partir del teorema de elemento finito, propuesto en (Mendoza Larios et al. 2016). La flecha este modelado a partir de un análisis de tipo viga considerando el grado de libertad de esta, Así como se ilustra en la Figura 3. para esto, el desplazamiento nodal vectorial se define a continuación:

$$\{\delta\} = \{u_1, w_1, \psi_1, \theta_1, u_2, w_2, \psi_2, \theta_2\}^T \quad (2)$$

En la ecuación (2), T es la transpuesta de $\{\delta\}$ y define el vector de desplazamientos nodal y los desplazamientos y rotaciones correspondientes a los movimientos en las direcciones x-y-z son:

$$\{\delta_u\} = \{u_1, \psi_1, u_2, \psi_2\}^T \quad \{\delta_w\} = \{w_1, \theta_1, w_2, \theta_2\}^T \quad (3)$$

Figura 3 Elemento finito tipo viga para el modelado del eje



Fuente: (Mendoza Larios et al. 2016)

Ahora, el modelado del sistema rotodinámico con diferentes grados de libertad, diferentes masas de desbalance y varios tipos de platos para desbalance esto lo definimos con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 [M]\{\delta''\} + [[C_1] + \phi'[C_2]]\{\delta'\} + [[K] + \phi''[K_1]]\{\delta\} = \\
 \phi'^2 \sum_{n=1}^{nm_u} \{F_{u(2n-1)}(\phi)\} + \phi'' \sum_{n=1}^{nm_u} \{F_{u(2n)}(\phi)\} \\
 + \phi'^2 \sum_{n=1}^{nm_b} \{F_{b(2n-1)}(\phi)\} + \phi'' \sum_{n=1}^{nm_b} \{F_{b(2n)}(\phi)\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

con:

$$\begin{aligned}
 F_{u(2n-1)} &= m_u d_n (\sin(\phi + \alpha_n) + \cos(\phi + \alpha_n)) \\
 F_{u(2n)} &= m_u d_n (\sin(\phi + \alpha_n) - \cos(\phi + \alpha_n)) \\
 F_{b(2n-1)} &= m_b e_n (\sin(\phi + \varepsilon_n) + \cos(\phi + \varepsilon_n)) \\
 F_{b(2n)} &= m_b e_n (\sin(\phi + \varepsilon_n) - \cos(\phi + \varepsilon_n))
 \end{aligned}$$

donde:

nm_u	Es el número de masas para desbalancear el sistema.
nm_b	Es el número de masas para balancear, atribuidas a los platos para balanceo activo.
ε_n y α_n	Es las posiciones angulares de las masas para balance y desbalance, respectivamente.
$\{\delta\}$	Es el vector total que contiene los desplazamientos nodales.
$[M]$	Es la matriz general de masa del sistema.
$[[C_1] + \phi'[C_2]]$	Es la matriz general de amortiguamiento, que incluye los efectos giroscópicos en función de la velocidad de rotación ($\phi'[C_2]$) y $[C_1]$ que contiene el amortiguamiento atribuible a los soportes.
$[K] + \phi''[K_1]$	Es la matriz general de rigidez, y está formada por $[K]$ que incluye la rigidez del rotor y soportes.
$\phi''[K_1]$	Es una expresión de rigidez que está en función de la aceleración angular del rotor.
$\{F_{u(2n-1)}\}$ y $\{F_{u(2n)}\}$	Son los vectores de fuerza atribuidos a las masas en desbalance.
$m_u d_n$ y $\{F_{b(2n-1)}\}, \{F_{b(2n)}\}$	Son los vectores de fuerza atribuidos a las masas de balance y localizadas en los platos activos de balanceo ($m_b e_n$).
ϕ, ϕ' y ϕ''	Son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración angular del rotor, respectivamente.

Rampa de excitación de tipo lineal

La rampa de excitación visualiza un incremento de la frecuencia de excitación, con una pendiente específica con respecto al tiempo y puede ser en creciente o decreciente. En general, la frecuencia de excitación en los sistemas rotodinámicos tiene pendientes no lineales en el tiempo. Pero para algunos casos, esta variación suele ser muy lenta, con esto podemos aplicar procesos de linealización para estudiar su comportamiento. Entonces a la ecuación (4) se le puede considerar una variación de frecuencia de excitación es la siguiente ecuación:

$$\phi'(t) = \phi_0 + \phi''t \quad (5)$$

donde:

ϕ_0 = es la frecuencia de excitación justo al inicio de la rampa.
 ϕ'' = es la tasa de cambio de la frecuencia de excitación en función del tiempo.
 t = es la variable del tiempo.

Modelo matemático para la identificación algebraica en línea del desbalance y posición angular

La identificación algebraica de los parámetros se basa en el modelo matemático del sistema rotodinámico de varios grados de libertad, donde el vector de desplazamientos de nuestro sistema está representado por $\{\delta\}$. Los datos de entrada para la identificación son los desplazamientos u_1, w_1, u_2, w_2 esto corresponden a el movimiento en x-y-z, tomando en cuenta que esto es solo para una aplicación teórica, para el sistema rotodinámico en tiempo real, el vector $\{\delta\}$, corresponderá a la señal obtenida con sensores de movimiento, ubicados en cada rodamiento del sistema rotodinámico considerando los grados de libertad. Para estudiar el sistema rotodinámico, tomaremos en cuenta la masa con desbalance y un plato para balanceo. Entonces la ecuación (4) quedara de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [M]\{\delta''\} + [[C_1] + \phi'[C_2]]\{\delta'\} + [[K] + \phi''[K_1]]\{\delta\} = \\ \{m_u d_n (\sin(\phi + \alpha_n) + \cos(\phi + \alpha_n))\} \\ + \{m_u d_n (\sin(\phi + \alpha_n) + \cos(\phi + \alpha_n))\} \\ \{m_u e_n (\sin(\phi + \varepsilon_n) + \cos(\phi + \varepsilon_n))\} \\ + \{m_u e_n (\sin(\phi + \varepsilon_n) - \cos(\phi + \varepsilon_n))\} \end{aligned} \quad (6)$$

donde ε y α representan las posiciones angulares de las masas de balanceo y desbalance. Ahora, multiplicaremos la ecuación (6) por t^2 e integramos dos veces en función de t , se obtiene la ecuación (7) para identificar algebraicamente el desbalance y su posición angular del sistema rotodinámico recordando los grados de libertad que posee:

$$\begin{aligned} \iint [[M]\{\delta''\} + [[C_1] + \phi'[C_2]]\{\delta'\} + [[K] + \phi''[K_1]]\{\delta\}]t^2 = \\ \{\iint m_u d_n (\phi'^2 \sin(\phi + \alpha_n) + \phi'' \cos(\phi + \alpha_n))t^2\} \\ + \{\iint m_u d_n (\phi'' \sin(\phi + \alpha_n) + \phi'^2 \cos(\phi + \alpha_n))t^2\} \\ \{\iint m_u e_n (\phi'^2 \sin(\phi + \varepsilon_n) + \phi'' \cos(\phi + \varepsilon_n))t^2\} \\ + \{\iint m_u e_n (\phi'' \sin(\phi + \varepsilon_n) - \phi'^2 \cos(\phi + \varepsilon_n))t^2\} \end{aligned} \quad (7)$$

donde

$\iint \varphi(t)$ son integrales múltiples en el tiempo (t) de la forma:

$$\int_0^t \int_0^{\sigma_1} \dots \int_0^{\sigma_{N-1}} \varphi(\sigma_N) d\sigma_N \dots d\sigma_1, \text{ con } \int \varphi(t) = \int_0^t \varphi(\sigma) d\sigma \text{ y } N \text{ un entero positivo}$$

Integramos por partes y manipulamos de manera algebraica en la ecuación (7), y se obtiene un sistema de ecuaciones lineales para cada soporte como se aprecia a continuación:

$$A(t)\theta = b(t) \quad (8)$$

donde, $\theta = [m_u d_\eta = m_u d \cos(\alpha), m_u d_\zeta = m_u d \sin(\alpha)]^T$ representa el desbalance vectorial por identificar, entonces $A(t)$ y $b(t)$ se pueden representar de la siguiente manera:

$$A(t) = \begin{bmatrix} -a_{11}(t) & a_{12}(t) \\ a_{12}(t) & a_{11}(t) \end{bmatrix}, \quad b(t) = \begin{Bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

con

$$a_{11} = \int t^2 \phi' \cos \phi - 2 \iint t \phi' \cos \phi$$

$$a_{12} = \int t^2 \phi' \cos \phi - 2 \iint t \phi' \cos \phi$$

$$b(t) = [M]t^2\{\delta\} + \iint [[C_1]t^2 + \phi'[C_2]t^2 - 4[M]t\{\delta\} + \iint [2[M] - 2[C_1]t - [C_2](\phi''t^2 + 2\phi't)]\{\delta\} + \iint [[K_1] + \phi''[K_2]t^2]\{\delta\} + \{m_b e \int t^2 \phi' \cos(\phi + \varepsilon)\} - \{2m_b e \iint t \phi' \cos(\phi + \varepsilon)\} - \{m_b e \int t^2 \phi' \sin(\phi + \varepsilon)\} + \{2m_b e \iint t \phi' \sin(\phi + \varepsilon)\}$$

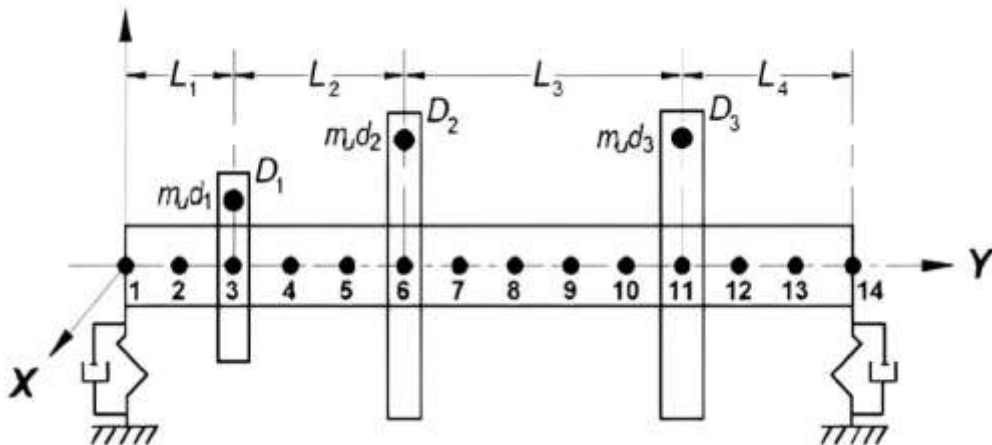
Ahora, observaremos $A(t)$ y $b(t)$ las cuales están en función de las vibraciones del rotor $\{\delta\}$ y responden solamente a los grados de libertad de sistema. En la ecuación (8) se puede ver que el vector θ es identificable algebraicamente sí, y solo sí, el comportamiento dinámico del sistema obedece a la condición $\det[A(t) \neq 0]$. Podemos decir que, esta condición se obtiene en intervalos pequeños $(t_0, t_0 + K]$ donde K es un valor positivo y necesariamente pequeño. Ahora de la ecuación (8) se obtiene la identificación de los parámetros del modelo de la ecuación (4) para el desbalance y su posición angular, esto visualizado en la ecuación siguiente:

$$\left. \begin{aligned} m_u d_\eta &= \frac{b_2 a_{11} - b_1 a_{12}}{a_{11}^2 + a_{12}^2} \\ m_u d_\zeta &= \frac{b_1 a_{12} - b_2 a_{11}}{a_{11}^2 + a_{12}^2} \\ m_u d_e &= \sqrt{m_u d_\eta^2 + m_u d_\zeta^2} \\ \alpha_e &= \cos^{-1} \left(\frac{m_u d_\eta}{m_u d_e} \right) \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + K] \quad (10)$$

En la ecuación (10) podemos observar que la identificación algebraica de los parámetros del desbalance y la posición angular es independiente de la condición inicial del sistema y depende del vector de desplazamiento en las direcciones x-y-z en el instante de tiempo t , así como de la pendiente de la rampa de excitación. (Mendoza Larios et al. 2016).

De manera gráfica, en la figura 4 se muestra un ejemplo del modelo del rotor en donde se muestran tres platos inerciales con dos soportes en los extremos. De manera general, se da como ejemplo tres masas diferentes para desbalance con tres posiciones angulares (3, 6 y 11) diferentes y distribuidas en los tres platos.

Figura 4 Modelo aproximado del rotor



Fuente: (Mendoza Larios et al. 2016)

Es importante destacar que el modelo del rotor de la figura 4 corresponde al modelo de la ecuación (4) con algunas restricciones que se tomaron en cuenta a la hora de simplificar.

3. Metodología para desarrollar

3.1 Concepto básico redes neuronales

Las redes neuronales son más que otra forma de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Si se examinan con atención aquellos problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo, se observará que todos ellos tienen una característica en común; la experiencia. El hombre es capaz de resolver estas situaciones acudiendo a la experiencia acumulada. Así, parece claro que una forma de aproximarse al problema consista en la construcción de sistemas que sean capaces de reproducir esta característica humana. En definitiva, las redes neuronales no son más que un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, que es el ejemplo más perfecto del que disponemos para un sistema que es capaz de adquirir conocimiento a través de la experiencia. Una red neuronal es un nuevo sistema para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano que es la neurona. (Damián Jorge, 2001)

4. Discusión de Metodologías desarrolladas

El primer esquema expuesto en la sección 2.1.1 se utiliza un equipo especialmente diseñado para detección de desbalanceo de excentricidad en los ejes rotodinámicos de los equipos, con este sistema se detecta el desbalance a partir de sensores de vibración colocados en los soportes de los rodamientos y un medidor de revoluciones, con ellos se estudia la amplitud de dichas vibraciones en diferentes escenarios, y se logra balancear el sistema compensado en donde requiere peso para reducir la excentricidad, con esto llegamos a la conclusión que este método solo funciona para reducir desbalance en los ejes rotodinámicos, por lo tanto no podremos obtener información suficiente si se requiere el estudio de fallas por rodamientos.

El segundo esquema expuesto en la sección 2.2.2 se presenta un modelado matemático linealizado para obtener el desbalance y posición angular de un eje con múltiples grados de libertad, la metodología presentada se basa en un modelo algebraico complejo modelado en software de ingeniería con el fin de lograr el objetivo: determinar excentricidad y la posición angular de dicha excentricidad, con esto se entiende que esta metodología es precisa al determinar en donde se encuentra el desbalance y es más específico que el anterior pero solo está diseñado para detectar excentricidad, por lo tanto de igual forma, no se podría determinar si la excentricidad es causada por daños de rodamientos o alguna otra condición del sistema, también se puede mencionar que al ser un modelado matemático se requiere de experiencia en la rama para lograr aplicar esta metodología ya que el algoritmo para identificación de parámetros depende en gran medida de las consideraciones de la rampa de excitación lineal. Luego entonces la identificación es conveniente para variaciones lentas ya que el sistema rotodinámico es un sistema no lineal.

4.1. Propuesta

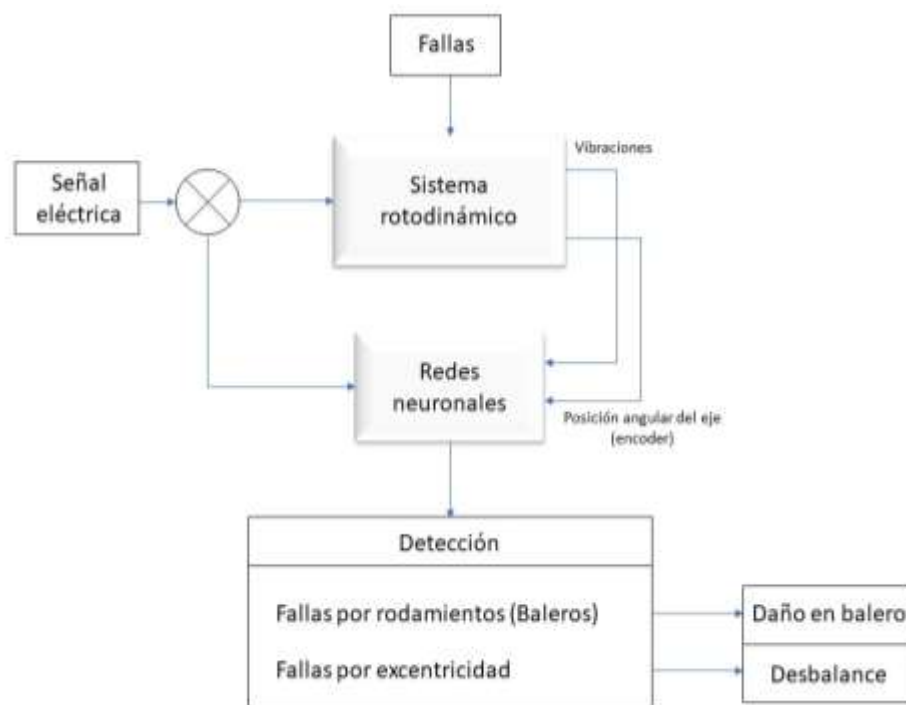
En este artículo, la propuesta es utilizar inteligencia artificial para detectar fallas en un sistema rotodinámico, todos los sistemas que poseen ejes o acoples, tienden a sufrir desbalance por excentricidad. La excentricidad del estator y el rotor es una de las fallas básicas en los motores de inducción y ejes rotodinámico que contribuyen a un porcentaje considerable de las fallas del motor. Algunas razones para la excentricidad incluyen: sección transversal interna del estator elíptica, desalineación relativa del rotor y el estator en la etapa de fijación y puesta en marcha, colocación incorrecta del rodamiento de bolas, fricción del rodamiento de bolas, desalineación del eje de carga y el eje del rotor, resonancia mecánica en velocidad crítica, carga desequilibrada e inclinación del eje del rotor. (Faiz y Ojaghi 2009)

La propuesta de este trabajo, orientado al sistema rotodinámico, es construir un sistema que sea capaz, a partir de señales estudiadas, de distinguir entre fallas por excentricidad o en su defecto por rodamientos en mal estado ya sea en el eje rotodinámico o en el eje del motor y sus rodamientos o cojinetes.

La propuesta se basa en entrenar una red neuronal a partir de los datos de entrada y salida del sistema rotodinámico trabajando en condición libre y bajo falla, para ello se considerarán las fallas en baleros y fallas por desbalance. Para ello se propone utilizar un banco de pruebas que permita emular fallas en los baleros de cada soporte y desbalance mediante la adición de masas en los platos de desbalance activo.

Para esta metodología se propone el siguiente esquema, donde se explica a grandes rasgos la hipótesis propuesta

Figura 5 Esquema propuesto de entrenamiento para detección de fallas



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5 se muestra el esquema de la propuesta para este artículo donde se describe de manera grafica los pasos aplicar.

Para entrenar la red neuronal, se propone desarrollar una configuración experimental que permita recolectar un gran número de datos del sistema rotodinámico, para ellos se consideran diferentes escenarios de prueba que permita trabajar al sistema libre de falla y bajo falla. Los escenarios o pruebas de entrenamiento serán los siguientes:

- Libre de fallas: para este escenario el sistema rotodinámico estará en óptimas condiciones de operación es decir sin ningún tipo de falla ya sea por excentricidad o daño en rodamientos
- Falla de baleros posición 1: para este escenario se le inducirá una falla al sistema colocando un balero dañado en una posición aleatoria en algunas de los soportes del eje suponiendo que se tiene dos soportes la posición asignada sería la que se encuentra cerca del motor eléctrico.
- Falla de balero posición 2: en este escenario se repite la prueba del inciso b) cambiando la posición al siguiente soporte
- Falla por excentricidad: para esta falla en el sistema existe un plato perfectamente balanceado con orificios donde se puede aplicar pesos para simular excentricidad.

El objetivo de los diversos escenarios es entrenar la red neuronal de tal modo que sea capaz de distinguir que tipo de falla presenta el sistema ya sea por desbalance o por baleros dañados. el análisis temporal y frecuencial de las señales de entrada y salida del sistema rotodinámico serán utilizado a priori para el entrenamiento más preciso de la RN

Resultados esperados

Los resultados que se esperan de esta propuesta son obtener con mayor precisión una detección de fallas de un sistema rotodinámico con ello facilitar al operador el trabajo de localizar la falla con un diagnóstico más exacto sobre la falla ya sea por desbalance o por algún rodamiento que este presentando desgaste por envejecimientos.

La mayoría de los métodos existentes tiende a ser complejos y en ocasiones difíciles de entender o aplicar, el uso de la red neuronal nos permite lograr de manera más sencilla la detección evitando los cálculos matemáticos necesarios para los otros métodos, en este caso, solo se requieren datos obtenidos de la planta o sistema, con lo que se pueden proponer aún más escenarios para lograr una mayor precisión a la hora de crear un informe que nos indique que falla esta presentado el equipo al cual se le aplicara la propuesta.

Agradecimiento

A la Universidad Autónoma del Carmen, por permitir realizar los estudios de maestría en ingeniería mecatrónica

Financiamiento

Financiación: El presente trabajo ha sido financiado por CONACYT [CVU: 1143096, 2021];

Conclusiones

Existen una variedad de metodologías para aplicar para detección de fallas desde aplicaciones prácticas con equipos diseñados específicamente para tal fin o bien aplicando modelados matemáticos que nos permitan obtener un detección preciosa, observamos en este artículo que todos son útiles, pero cada uno tiene su desventaja a la hora de ser aplicado, desde no lograr detectar cual es la falla, hasta la complejidad de la aplicación, en este trabajo se propuso un método que nos permitirá ahorrar tiempo y esfuerzo a la hora de lograr detectar fallas, que a su vez tendrá un rango de precisión mayor para predecir en donde se encuentra la falla y que tipo es, se estudiara un sistema para lograr corroborar lo descrito aquí, y así poder obtener los resultados esperados, de esta aplicación.

Referencias

- Ambur, Ramakrishnan, y Stephan Rinderknecht. 2018. "Unbalance Detection in Rotor Systems with Active Bearings Using Self-Sensing Piezoelectric Actuators". *Mechanical Systems and Signal Processing* 102. doi: 10.1016/j.ymsp.2017.09.006, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.09.006>
- Boudiaf, Adel, Abdelkrim Moussaoui, Amine Dahane, y Issam Atoui. 2016. "A Comparative Study of Various Methods of Bearing Faults Diagnosis Using the Case Western Reserve University Data". *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16(2). doi: 10.1007/s11668-016-0080-7, <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0080-7>
- Estupiñán P, Edgar, César San Martín, y Luis Canales M. 2006. "DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL BALANCEAMIENTO DINAMICO DE ROTORES". *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 14(2). doi: 10.4067/s0718-33052006000100008, <https://doi.org/10.4067/s0718-33052006000100008>
- Faiz, Jawad, y Mansour Ojaghi. 2009. "Different Indexes for Eccentricity Faults Diagnosis in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review". *Mechatronics* 19(1), <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.07.004>
- Huesca-Lazcano, Erick Eduardo, Oscar Flores-Ramírez, Gabriel Romero-Rodríguez, y Karla Cecilia Apan-Araujo. 2019. "Detección de Fallas En Máquinas Rotatorias Utilizando Parámetros No Lineales". *Revista de Ingeniería Mecánica*. doi: 10.35429/jme.2019.12.3.25.33, <https://doi.org/10.35429/jme.2019.12.3.25.33>

- Damián Jorge, M. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. Historia, 55. <ftp://decsai.ugr.es/pub/usuarios/castro/Material-Redes-Neuronales/Libros/matich-redesneuronales.pdf>
- Mendoza Larios, J. G., J. Colín Ocampo, A. Blanco Ortega, A. Abúndez Pliego, y E. S. Gutiérrez Wing. 2016. "Balanceo Automático de Un Sistema Rotor-Cojinete: Identificador Algebraico En Línea Del Desbalance Para Un Sistema Rotodinámico". *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* 13(3). doi: 10.1016/j.riai.2016.03.004, <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.03.004>
- Sánchez-Acevedo, Heller, Fabian R. Nova A, y Jhon A. Madrigal A. 2018. "Metodología Para El Balanceo de Rotores Empleando Un Analizador de Vibraciones". *Revista UIS Ingenierías* 17(2):291–308. doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018025, <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018025>
- Tahir, M. Masood, Ayyaz Hussain, Saeed Badshah, Abdul Qayyum Khan, y Naeem Iqbal. 2017. "Classification of Unbalance and Misalignment Faults in Rotor Using Multi-Axis Time Domain Features". en *ICET 2016 - 2016 International Conference on Emerging Technologies*, <https://doi.org/10.1109/ICET.2016.7813273>