

Eccentricity Fault Detection in Industrial Washing Machine by Spectral Analysis

Víctor Arturo Maldonado-Ruelas*, Raúl Arturo Ortiz-Medina*,

* Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes, México

(Tel: (449)4421400 ext. 2060; victor.maldonado@upa.edu.mx; raul.ortiz@upa.edu.mx)

Abstract: Mechanical faults in electrical machines, particularly in industrial washing machines, are a relevant case study, particularly due to the high costs of corrective maintenance performed in the event of a failure. Therefore, the present work aims to detect incipient (small in magnitude) mechanical eccentricity failures by means of a frequency analysis of motor current signals through a programmable logic controller (PLC). Noninvasive signal measurements were performed using Hall effect sensors and signal conditioning for a SIMATIC S7-1200 PLC, obtaining a database during the process of a washing cycle. For data analysis, the Discrete Fourier Transform (FDT) of the Park Instantaneous Space Vector (ISP) was used. For the different eccentricity failures, varying loads in the industrial washing machine basket were considered. The algorithm programmed in the PLC allowed the fault to be detected during a wash cycle, at different operating points of the industrial washing machine and under normal operating environmental conditions; that is, with the noise and vibration of other industrial washing machines. The scope of this work, therefore, allows for early "online" fault detection, avoiding corrective maintenance on industrial washing machines and the generation of other types of mechanical failures, such as bearing failures.

Keywords: Fault Detection, Electrical Machines, Frequency Analysis; Programmable Automaton, Washing Machine.

1. INTRODUCCIÓN

La vida técnica de una lavadora industrial, está intrínsecamente relacionada con la fiabilidad y resistencia del producto hasta que se presenta una falla. Normalmente este es un parámetro expresado como número de años y/o número de ciclos u horas de trabajo. Los métodos de repetibilidad y reproducibilidad para probar la durabilidad del producto en condiciones de estrés de la vida real a menudo no están disponibles, como el caso de la lavadora (Stamminger et al. (2020)).

El acoplamiento mecánico en una lavadora industrial, es un aspecto importante a considerar dentro del mantenimiento continuo; ya que el motor genera la fuerza motriz para el movimiento de la tina de la lavadora, a través de una transmisión debidamente alineada. Esto evita desbalances, que generan desgastes mecánicos no sólo en la transmisión, sino en la misma máquina eléctrica y los componentes que se involucran (Mazzeletti et al. (2021)).

Por tanto, cuidar de la vida útil del sistema de potencia y tracción mecánico de la lavadora industrial es fundamental para mejorar la fiabilidad y su rendimiento. Detectar de manera oportuna las anomalías que producen las fallas en el sistema mecánico, ayudan a minimizar los mantenimientos correctivos y los altos costos del sistema de transmisión y potencia de la lavadora industrial y del motor eléctrico (Ugwiri et al. (2020)).

Métodos estadísticos con base en la recopilación de datos ante anomalías y sin ellas (Meira et al. (2022); Liu et al. (2019); Hmida et al. (2020)), se han utilizado para poder detectar estas fallas. Sin embargo, se requiere el conocimiento de un experto de estos sistemas para poder realizar dicha detección y de la oportuna recopilación de datos. Otros sistemas (Sameh et al. (2020); García-Calva et al. (2022)), se basan en modelos matemáticos con presencia de fallas, para poder detectar éstas

anomalías en algoritmos programados en microcontroladores externos al sistema de control de la lavadora.

Los sistemas mecánicos, en particular de lavadoras industriales buscan la medición acústica para poder detectar variaciones de vibraciones fuera de lo común, producidas por desbalances o desgastes de baleros. También se utilizan acelerómetros para poder detectar desbalances en algún eje, producidos por alguna variación generada por vibraciones en la máquina (Helmi et al. (2019); Ribeiro et al. (2019); Yoo (2019)). Existen algoritmos con base en redes neuronales (Hasan et al. (2019); Delgado-Arredondo et al. (2017); Wenzel et al. (2019)), que realizan la medición de datos y aprenden continuamente para distinguir las variaciones de los valores nominales ante la presencia de fallas mecánicas y poder discernir del tipo de falla que se presenta.

Algunos otros métodos de detección utilizan elementos externos como fundas de lavadora adaptados (Soto-Campo et al. (2020)); para medir las variaciones de vibración en una red de sensores incrustados en la funda. Otros, utilizan pruebas de validación de laboratorio con pruebas acústicas (Gundewar et al. (2021)); para conocer el estado de los componentes mecánicos de la transmisión de potencia.

Sin embargo, el reto es poder detectar estas fallas en condiciones de operación nominales, en ambientes normales de trabajo, con sistemas de sensores o esquemas no invasivos, de bajo costo computacional. Así, como no implementar otros procesadores que trabajen asincrónicamente con el control de la lavadora "fuera de línea" o con condiciones controladas o de laboratorio; pero, sobre todo, que permitan detectar las fallas mecánicas de manera oportuna; para poder realizar mantenimientos preventivos en lugar de mantenimientos correctivos.

Por lo que este trabajo, presenta un análisis espectral por medio de la DFT de las corrientes de línea del motor utilizando sensores de efecto Hall, de manera no invasiva. A diferencia

de los trabajos previos mencionados, que incluyen muchos sensores y normalmente operan en condiciones de laboratorio o fuera de línea. Así mismo, se utiliza una plataforma digital de adquisición de señales basada en un PLC, debido también a que es robusto para las condiciones de la lavadora que se necesita. Esto tiene ventajas con respecto a otras plataformas de mayor frecuencia de adquisición que son más frágiles a ruidos y operación de campo.

Para la detección de fallas de excentricidad, se busca que sean fallas incipientes (no visibles a simple vista o de manera intuitiva) ya que son las de mayor interés. Por lo que utilizar un algoritmo de menor costo computacional es prioridad con respecto a algunos otros de aprendizaje de máquina o redes neuronales.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta las características de la lavadora industrial, la máquina eléctrica y sistema de adquisición. La sección 3 la estructura metodológica de los experimentos y el algoritmo de detección de falla. Los resultados de la detección se presentan en la sección 4. Por último, la sección 5 presenta las conclusiones del trabajo y la discusión de los resultados.

2. LAVADORA INDUSTRIAL Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN

2.1 Lavadora Industrial

La lavadora industrial que se utilizó para este trabajo presenta las siguientes características en la Tabla 1.

Tabla 1. Característica de la Lavadora Industrial

Característica	Valor
Marca	SPEED QUEEN
Capacidad de Carga	11 Kg en ropa seca
Transmisión mecánica	10:1
Potencia de Motor	2 HP
Voltaje de Motor	220 V trifásicos
Frecuencia de Operación	60 Hz
Velocidad Mecánica	1750 RPM
Corriente Nominal	6.5 A

La Fig. 1, presenta la estructura interna de la lavadora con los componentes que se utilizaron.



Fig. 1. Lavadora Industrial

2.2 Proceso de lavado industrial de ropa

Tabla 2. Proceso en lavadora industrial

Etapas	Tiempo [min]	RPM en Canasta
Prelavado	6	50
Centrifugado	1.5	180
Lavado	14	50
Centrifugado	1.5	180
Enjuague	6	50
Centrifugado	3	470
Suavizado	6	50
Centrifugado	6	470
Tiempo Total	44	

El programa de lavado de una lavadora industrial a diferencia de una comercial, es que ocupa un bajo consumo de agua, incrementando la acción mecánica de lavado. La Tabla 2, muestra a detalle las etapas de lavado, así como su tiempo y velocidad en revoluciones por minuto (RPM).

2.3 Falla de excentricidad

Dentro de las fallas mecánicas de una máquina eléctrica, este tipo de falla se considera que ocurre por diversos factores; el primero puede ser de diseño y armado, cuando no está correctamente alineada la flecha del motor con la carga. También ocurre con el desgaste natural del tiempo de los componentes como la transmisión mecánica. Así mismo, ocurre cuando la carga que se coloca, en este caso en la lavadora industrial no está bien balanceada.

En (Villalobos-Piña, (2013)); se presenta un esquema que detecta el desbalance en las corrientes de estator en una máquina eléctrica trifásica, por medio del módulo del ISP. La Ec. (1) presenta la transformada de Concordia, que se requiere para tener el conocimiento del efecto de desbalance del ISP que causa una falla en el motor de inducción.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde i_{α} , i_{β} son las corrientes en el marco de referencia fijo, y i_a , i_b , i_c son las corrientes trifásicas de estator. En la Ec. (2), se presenta el cálculo del módulo del ISP.

$$I_{ISP} = \|I_{ISP}\| = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \quad (2)$$

El espectro de la señal del módulo del ISP para la excentricidad genera una firma de falla cercano a la mitad de la frecuencia de operación (F_L) menos el deslizamiento de la máquina (s); como se presenta en la Ec. (3).

$$F_{Excentricidad} = \frac{F_L}{2} - s \quad (3)$$

2.4 Sistema de Adquisición

Se desarrolló un sistema de medición de corrientes para un motor trifásico de inducción, por medio de una tarjeta que utiliza sensores de efecto Hall de orificio pasante (no invasivos), e instrumentación analógica por medio de amplificadores operacionales.

La Fig. 2, muestra el diagrama esquemático del sistema de adquisición de corrientes en una sola fase. El sistema cuenta con una protección electrónica para evitar que el sistema supere los 10 Volts y ocurra un daño en la tarjeta analógica del PLC.

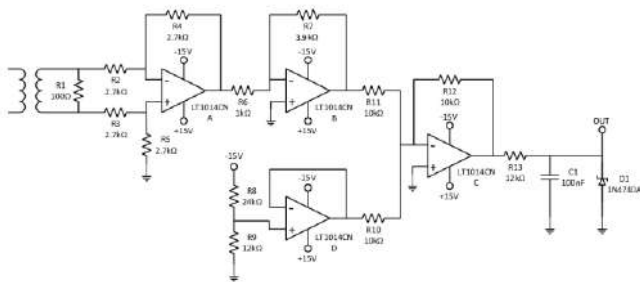


Fig 2. Esquemático del sistema de adquisición de señales

3. METODOLOGÍA

3.1 Pruebas de lavado.

Se consideran dos experimentos para la prueba de desbalance. En la primera considera carga nominal de ropa, distribuida en prendas que comúnmente se utilizan aproximando el peso establecido por el fabricante. La Tabla 2, presenta la distribución de peso y la cantidad de prendas que se utilizaron para el ciclo de lavado.

Tabla 2. Condiciones de carga nominal

Prueba	Carga	Ropa	Pza	Kg[u]	Kg[T]
1	Nominal	Pantalón	13	0.358	4.65
		Camisa	9	0.258	2.32
		Playera	15	0.195	2.92
		Overol	1	0.395	0.39
		Toalla	4	0.211	0.84
		Total [kg]			11.12

La distribución de las prendas y la cantidad de las mismas, se seleccionaron con base a la experiencia del dueño del local y los 15 años de trabajo con el uso de lavadoras industriales. El peso de cada uno se realizó en seco de manera unitaria [u] y se seleccionaron las que dieran aproximadamente el mismo peso, tomando un promedio entre cada tipo de prenda para obtener el peso total [T] por cada tipo de prenda.

Para la segunda prueba, se considera una carga anormal, la cual incluye ropa que no son recomendadas por fabricante para ser lavadas por lavadoras industriales como es el caso de tenis y tapetes. La Tabla 3, presenta la distribución de peso y la cantidad de prendas que se utilizaron para el ciclo de lavado.

Tabla 3. Condiciones de carga anormal

Prueba	Carga	Ropa	Pza	Kg[u]	Kg[T]
2	Anormal	Tenis	6	0.985	5.91
		Tapete	2	1.81	3.62
		Pantalón	5	0.195	0.97
		Overol	1	0.395	0.39
		Toalla	1	0.211	0.21
		Total [kg]			11.10

De igual manera el peso unitario se realizó en seco, y la cantidad de cada elemento se hizo bajo la experiencia del dueño del establecimiento. El uso de elementos que no son recomendados para el uso en lavadoras industriales se debe principalmente a que generan inercia derivado de su composición y ocasionan un desgaste prematuro en el equipo.

3.1 Adquisición de datos.

La frecuencia de muestreo del PLC S7-1200 es de 1 KHz, que corresponden a 1000 muestras cada segundo de operación. Dado que la frecuencia de línea del motor en el proceso de lavado es de 8.45 Hz; cubre la necesidad de procesamiento a pesar de que el procesador del PLC aparte está ejecutando el control de lavado.

Por el proceso de lavado, se considera un ciclo, empezando 8 seg girando en sentido horario, 4 seg de reposo y proceso de cambio de giro, 8 seg girando en sentido anti-horario y, por último 4 seg de reposo y proceso de cambio de giro. Este ciclo se repite 35 veces, lo que corresponde a los 14 min que se consideran en el proceso completo.

Para cada experimento, se tendrá el control de la toma de muestras, dejando que las prendas se mojaran inicialmente por 2 minutos y con 100 ml de detergente líquido. Así mismo, se eliminarán los transitorios de velocidad al disminuir la velocidad en el cambio de giro de lavado. Por lo cual, se toman aproximadamente 1280 datos para cada fase en cada ciclo.

Para validar los resultados para los 35 ciclos, se utiliza el método de mínimos cuadrados para linealizar la lectura de los datos, esto es importante mencionar que se hace en condiciones de operación de ruido y vibración externa. Con esta base de datos se procesa para obtener el ISP de las señales de las corrientes del motor en ambas condiciones de operación.

La Fig. 3 muestra el ISP ya procesado en el PLC, a través de la función TRACE del TIA Portal.



Fig. 3. ISP de las corrientes de fase del motor.

4. RESULTADOS

El análisis espectral de la señal de la DFT de las corrientes del motor de la lavadora bajo condiciones nominales, en operación de lavado; a una frecuencia de operación de 8.45 Hz se presenta en la Fig. 4. Se aprecia que la firma de falla del ISP no se presenta a la frecuencia de interés. Esto indica que, bajo condiciones nominales de carga de la lavadora industriales, no hay una falla de excentricidad en el análisis espectral.

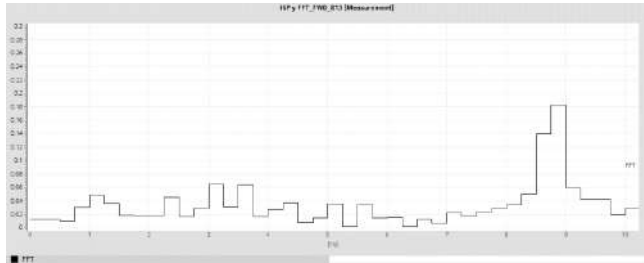


Fig. 4. DFT del ISP en condiciones nominales

Se realiza la prueba de desbalance, con el ajuste de cambio de peso en la carga de ropa de la lavadora industrial. La Fig. 5 presenta que la firma de falla del ISP se presenta a la frecuencia de interés (aproximadamente 0.95 Hz).

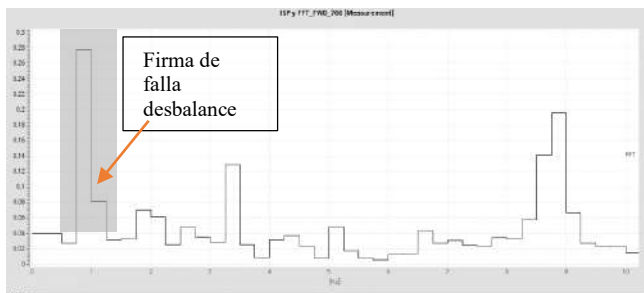


Fig. 5. DFT del ISP con carga anormal

Para validar de manera experimental que la firma de falla de desbalance se presenta debido a la carga anormal que se introduce a la lavadora industrial; se realiza una carga de sólo agua a los niveles indicados para una carga completa por el fabricante y se realiza las mismas pruebas. La Fig. 6 presenta los resultados de la DFT del ISP.

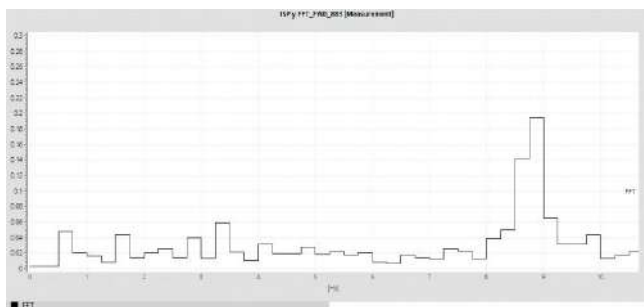


Fig. 6. DFT del ISP con carga de sólo agua

Esto valida que el desbalance se genera por el efecto del tipo de carga que se pone en la lavadora o la falta de carga completa en la misma.

Todas las pruebas realizadas se hicieron con baleros nuevos. Sin embargo, también se realizaron pruebas con los baleros ya usados y desgastados que se tenían del último cambio que se hicieron en la lavadora. La Fig. 7 muestra la firma de falla de desbalance aún con baleros que presentan fallas o desgaste en el motor. Esto garantiza que, con el tiempo, el algoritmo sigue detectando fallas de desbalance en la frecuencia de interés de la firma de falla mecánica de la lavadora industrial.

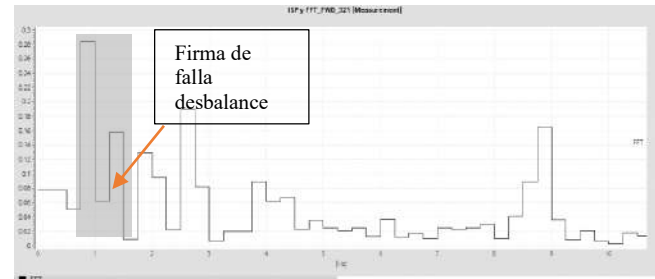


Fig. 7. FFT del ISP con balero usado y carga anormal.

5. CONCLUSIONES

Como conclusiones de este trabajo se pueden mencionar los siguientes puntos:

- Se logró detectar una falla mecánica (excentricidad) de una máquina eléctrica en aplicación de una lavadora industrial; utilizando un PLC con una frecuencia de muestreo muy baja (1KHz), en condiciones de operaciones reales, midiendo sólo las corrientes de operación del motor.
- El tipo de falla que se detectó es de tipo incipiente, ya que al no estar conectado el motor a la transmisión y hacer el análisis en frecuencia, era imprescindible con respecto al análisis en condiciones nominales.
- Se logró realizar un sistema de detección de fallas dentro de un sistema de control de operación, de una lavadora industrial.
- Se realizó un sistema de interfaz hombre-máquina (HMI, por sus siglas en inglés) para que el usuario pueda tener información y poder realizar modificación a la operación de la máquina logrando una mayor eficiencia al proceso de lavado, derivado del análisis espectral de la firma de falla mecánica.
- No se trabaja en diferentes lavadoras, ya que esta se ensambló con estas condiciones de operación; sin embargo, se puede extrapolar a otras lavadoras y condiciones de operación.

Esto tipo de trabajos de ciencia aplicada, permite obtener información relevante de la máquina eléctrica y de la lavadora industrial con respecto a cualquier anomalía mecánica que presente en una etapa temprana, evitando costos elevados de mantenimientos correctivos y un uso eficiente de la máquina para los usuarios que la operan.

REFERENCIAS

- Stamminger, R., Bues, A., Alfieri, F. & Cordella, M. (2020). Durability of washing machines under real life conditions: Definition and application of a testing procedure. *Journal of* 289

cleaner production, 261. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121222.

Mazzeletti, M. Donolo, P. D., Pezzani, C. M., Oliveira, M. O., Bossio, G. R., & De Angelo, C. H. (2021). Stator faults detection on induction motors using harmonic sequence current components analysis. *IEEE Latin America Transactions*, 19(5). 726-734. DOI: 10.1109/TLA.2021.9448286.

Ugwiri, M., Carratú, M., Pietrosanto, A., Paciello, V., & Lay-Ekuakille, A. (2020). Vibrations measurement and current signatures for fault detection in asynchronous motor. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1-6. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128433.

Meira, M., Bossio, G., Bossio, J., Verucchi, C. & Ruschetti, C. (2022). Broken rotor bar detection using the full spectrum applied to the induction motor starting currents. *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, DOI: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939959.

Liu, M. K., Tran, M. Q. & Weng, P. Y. (2019). Fusion of vibration and current signatures for the fault diagnosis of induction machines. *Shock and Vibration*, DOI: 10.1155/2019/7176482.

Hmida, M. A., & Braham, A. (2020). Fault detection of VFD-fed induction motor under transient conditions using harmonic wavelet transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(10). 8207-8215. DOI: 10.1109/TIM.2020.2993107.

Sameh, M., Tarek, A. & Yassine, K. (2020). Bearing and rotor faults detection and diagnosis of induction motors using statistical neural networks, *20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*, 77-81. DOI: 10.1109/STA50679.2020.9329334.

García-Calva, T. A., Morinigo-Sotelo, D. & Troncoso, R. (2022). Fundamental frequency normalization for reliable detection of rotor and load defects in vsd-fed induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(2). 1467-1474, DOI: 10.1109/TEC.2021.3124803.

Helmi, H. & Forouzanbar, A. (2019). Rolling bearing fault detection of electric motor using time domain and frequency domain features extraction and ANFIS. *IET Electric Power Applications*, 13(5). 669-669, 2019. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5274.

Ribeiro, D. A., Ferreira, D. D., Pereira, D. A., Junior, R. A. & Nunes, R. D. (2019). Mechanical fault detection in electric motors measured by a digital signal processing device in an optical mouse. *Measurement*, 138. 350-355. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.02.050.

Yoo, Y. J. (2019). Fault detection of induction motor using fast Fourier transform with feature selection via principal component analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(9). 1543-1552. DOI: 10.1007/s12541-019-00176-z.

Hasan, M. J., Islam, M. M. & Kim, J. M. (2019). Acoustic spectral imaging and transfer learning for reliable bearing fault

diagnosis under variable speed conditions. *Measurement*, 138. 620-631. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.02.075.

Delgado-Arredondo, P. A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H. & Romero-Troncoso, R. (2017). Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83. 568-589. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.06.032.

Wenzel da Silva, F. W. & Cavalca, K. L. (2019). Vibration signatures of a rotor-coupling-bearing system under angular misalignment. *Mechanism and Machine Theory*, 133. 559-583. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.014.

Soto-Ocampo, C. R., Mera, J. M. Cano-Moreno, J. D. & Garcia-Bernardo, J. L. (2020). Low-cost, high-frequency, data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis-case study. *Sensors*, 20(12). 3493. DOI: 10.3390/s20123493.

Gundewar, S. K. & Kane, P. V. (2021). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9. 643-674. DOI: 10.1007/s42417-020-00253-y.

Villalobos-Piña, F. J. (2013). Análisis y Diseño de un Esquema de Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción. *Tesis Doctoral UASLP*.