



Influencia del desalineamiento en parámetros dinámico funcionales de motor de corriente directa 250 kW

Influence of misalignment on functional dynamic parameters of a 250 kW direct current motor

Evelio Palomino Marín^{1,*}, Fausto Taveras Lay^{II}, Alfredo del Castillo Serpa^{III}, Armando Díaz Concepción^I, Jesús Cabrera Gómez^I

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM. La Habana, Cuba.

II. TLAY SRL. Santo Domingo, República Dominicana.

III. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Instituto de Ciencias Básicas, Cujae, La Habana, Cuba.

* Autor de correspondencia: e.palomino@mecanica.cujae.edu.cu evelio.palomino@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 4 de marzo de 2023

Aceptado: 12 de mayo de 2023

Resumen

Se realizó una investigación experimental para la determinación de la influencia del desalineamiento en los parámetros dinámicos funcionales de un motor de corriente continua de 250 kW en una planta siderúrgica. El objetivo fue la determinación de los parámetros síntomas registrados en línea más sensibles a la condición de alineamiento del motor GH280 PK DC de 250 kW de un Laminador, para lo cual fue necesario obtener un modelo matemático que describiera el comportamiento de ciertos parámetros dinámico funcionales en función del desalineamiento del motor. Se provocó desalineamiento paralelo horizontal en un motor y se midió temperatura, vibraciones y consumo de corriente. Mediante el análisis estadístico se encontró una correlación moderadamente fuerte entre el desalineamiento y el consumo de corriente. Se obtuvo un modelo lineal que

relaciona ambas variables, el cual fue validado satisfactoriamente. El resultado obtenido fue que aunque el desalineamiento residual fuera tolerable, este provocó cambios significativos en el consumo energético, lo cual se traduce en reducciones de hasta 13 % de consumo energético realineando periódicamente el motor en función del consumo de corriente. El modelo obtenido permitió estimar el desalineamiento midiendo la corriente, siendo útil, aún sin exceder los límites tolerables, para la planificación de acciones correctivas optimizando así el consumo energético.

Palabras claves: desalineamiento de ejes; motores de corriente continua; consumo de corriente; análisis estadístico; parámetros dinámico funcionales; laminador de acero.

Abstract

An experimental investigation was carried out to determine the influence of misalignment on the functional dynamic parameters of a 250 kW DC motor in a steel plant. The objective was to determine the most sensitive online symptom parameters to the alignment condition of the 250 kW GH280 PK DC motor of a steel plant. To do this, it was necessary to obtain a mathematical model that described the behavior of certain functional dynamic parameters based on the motor misalignment. Parallel horizontal misalignment was caused in a motor and temperature, vibrations, and current consumption were measured. Through statistical analysis, a moderately strong correlation was found between misalignment and current consumption. A linear model relating both variables was obtained, which

was satisfactorily validated. The most relevant result was that although the residual misalignment was tolerable, it caused significant changes in energy consumption, which translates into reductions of up to 13 % in energy consumption by periodically realigning the motor based on current consumption. The research concluded that the model obtained allowed estimating misalignment by measuring the current, being useful, even without exceeding tolerable limits, for planning corrective actions thus optimizing energy consumption.

Key words: shaft misalignment; direct current motors; current consumption; statistical analysis; dynamic functional parameters; steel rolling mill.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Palomino Marín E, Taveras Lay F, del Castillo Serpa F, Díaz Concepción A, Cabrera Gómez J. Influencia del desalineamiento en parámetros dinámico funcionales de un motor de corriente directa 250 kW. Ingeniería Mecánica. 2023;26(3):e678.

1. Introducción

A pesar de la relación existente entre el desalineamiento de ejes en máquinas rotatorias y el comportamiento vibroacústico de esta, la temperatura y el consumo energético de los accionamientos, no se ha encontrado suficiente evidencia sobre los cambios en dichos parámetros ante desalineamientos residuales que aún estén contemplados dentro de límites tolerables en máquinas reales operando en línea.

En las últimas décadas ha habido gran interés en la comunidad científica por estudiar los efectos del desalineamiento en máquinas rotatorias. Los aspectos más importantes se resumirán a continuación.

En 1994, Xu M. y Marangoni RD [1, 2], desarrollaron un modelo teórico de un sistema completo motor-acoplamiento flexible-rotor capaz de describir las vibraciones mecánicas resultantes del desalineamiento y el desbalance, obteniendo ecuaciones generalizadas del movimiento para un sistema desalineado y desbalanceado.

Los autores presentan los resultados de estudios experimentales realizados sobre un banco para pruebas dinámicas controladas, con la finalidad de validar su modelo teórico de desalineamiento y desbalance, pero no aborda la problemática de las máquinas reales en el proceso productivo.

Por su parte, Sekhar AA y Prabhu BS [3], modelaron un sistema rotor-cojinete utilizando elementos finitos de orden superior, demostrando que el aumento de las componentes armónicas debido al desalineamiento puede modelarse a través de este método.

La investigación está encaminada a demostrar la validez del método de los elementos finitos para modelar el comportamiento de las componentes armónicas generadas por el desalineamiento. Es un trabajo puramente teórico.

Así mismo, Obaid RR, et al [4], analizaron el efecto de variar la frecuencia de entrada al motor de inducción en la detección del desbalance y el desalineamiento, demostrando que el efecto de estos defectos se evidencia en el espectro de corriente del estator aún a baja velocidad.

En este caso, se realiza un estudio de la influencia de la frecuencia fundamental en la apariencia del espectro de corriente registrado en un accionamiento eléctrico, todo ello en un banco de ensayos, no abordando la realidad de las máquinas inmersas en procesos productivos.

En 2004 Saavedra PN y Ramirez DE [5, 6], publicaron los resultados del desarrollo de un modelo teórico de elementos finitos de un sistema de dos rotores acoplados a través de un acoplamiento flexible para describir las vibraciones mecánicas resultantes del desalineamiento. Los cálculos mostraron que la variación periódica de la rigidez del acoplamiento con la rotación, fue la causa del comportamiento vibratorio. Los resultados teóricos se validaron experimentalmente, mostrando buena correspondencia entre el modelo teórico y el experimental.

Nuevamente, se trata del empleo de un banco de ensayo para validar los resultados de la modelación por el método de los elementos finitos, de dos rotores acoplados a través de un elemento flexible, lo cual resulta muy importante dada la creencia de que no es necesario alinear los acoplamientos flexibles.

En fechas más recientes, Sawalhi N, et al, [7] publicaron los principales resultados de una investigación en la que desarrollaron un modelo detallado de elementos finitos de un banco de pruebas para vibraciones. El modelo contempló matrices masa, rigidez y amortiguamiento, incorporando modelos no lineales de rodamientos, desalineamiento y desbalance. Los autores compararon resultados experimentales y simulados, mostrando un aumento de las componentes armónicas de la vibración, sobre todo de órdenes superiores. Los resultados validaron el modelo e indudablemente, ofrecieron un avance en la modelación de las vibraciones debidas al desalineamiento.

Novedoso resulta en esta investigación, el uso de modelos no lineales de rodamientos, desalineamiento y desbalance de un banco de pruebas para estudios experimentales de vibraciones.

Por otra parte, Arun KJ, et al, [8], publicaron una revisión de técnicas para el diagnóstico y pronóstico de sistemas de rotores desalineados, sustentada por modelos basados en elementos finitos, de sistemas desalineados rotor-cojinete-acoplamiento. Los autores utilizaron metodologías para el procesamiento y análisis de vibraciones para la detección de desalineamientos y contemplaron además, técnicas no basadas en análisis de vibraciones como el análisis de emisiones acústicas, el análisis de corriente del accionamiento eléctrico y la termografía infrarroja, evidenciando los efectos dañinos del desalineamiento y la importancia del diagnóstico precoz.

Resulta novedoso el análisis de emisiones acústicas, el análisis de corriente del accionamiento eléctrico y la termografía infrarroja, todo ello sobre un banco de pruebas.

La eficiencia de los accionamientos eléctricos constituye un aspecto muy sensible al desalineamiento, lo cual Verucchi CJ, et al, [9], analizaron experimentalmente, estudiando casos de desalineamiento radial y angular superiores a los límites recomendados por los fabricantes. Como resultado de los experimentos sobre un banco de ensayos, se registraron aumentos de temperatura en los acoplamientos y reducciones de eficiencia de hasta un 2% para desalineamientos excesivos, mayores en el caso radial.

De especial importancia resulta esta investigación realizada sobre un banco de ensayos, toda vez que se estudió el comportamiento de la temperatura y la eficiencia del accionamiento, ante valores de desalineamiento superiores a los límites recomendados por los fabricantes de los acoplamientos.

Albdery MH y Szabo I [10], presentaron un estudio experimental sobre el efecto del desalineamiento en cojinetes de rodamientos empleando para ello un banco de pruebas con un accionamiento eléctrico acoplado a una carga, provocando desalineamientos radiales por encima de los límites recomendados. Registraron la temperatura en rodamientos con cámara termográfica, obteniendo aumentos de temperatura de hasta 20 °C proporcionales al desalineamiento, lo cual los autores atribuyeron al incremento de las fuerzas de fricción.

En este caso, sobre un banco de ensayos se estudia la influencia de desalineamientos superiores a los límites recomendados, en la temperatura de los cojinetes, pero no se realizan pruebas en máquinas reales en plena producción.

Un estudio experimental sobre el consumo energético en máquinas rotatorias con desalineamiento en ejes fue realizado por Abouelanouar B, et al [11]. Para ello emplearon un banco de pruebas con accionamiento eléctrico y un dispositivo para provocar desalineamiento controlado angular y paralelo en el acoplamiento. Registraron vibraciones y potencia eléctrica, observando incrementos en los niveles de vibraciones, de potencia activa, reactiva y aparente proporcionales a los desalineamientos provocados.

En este caso se estudió la influencia controlada del desalineamiento en los niveles de vibraciones y de potencia a nivel de banco de ensayos.

De la revisión bibliográfica realizada, se observa la necesidad de estudiar el comportamiento de parámetros dinámico-funcionales en máquinas acopladas operando dentro del proceso productivo, toda vez que aunque los valores de desalineamiento residual estén contemplados dentro de límites tolerables, estos influyen en tales parámetros. No se puede perder de vista, que la tolerabilidad del desalineamiento residual está encaminado a proteger solamente la integridad del acoplamiento.

De acuerdo a los resultados de esta revisión bibliográfica, se realizó una investigación experimental donde se determinó la influencia del desalineamiento en parámetros dinámico-funcionales de un motor de corriente continua (DC, *Direct Current*) de 250 kW en un laminador de acero, con el objetivo de determinar los parámetros síntomas registrados en línea, que resultaran más sensibles a la condición de alineación del mencionado motor.

2. Métodos

El motor GH280 PK DC 250 kW instalado en las parejas de desbaste e intermedio del laminador, cuenta con las características eléctricas descritas a continuación:

- Voltaje de armadura: 600 V_{DC}
- Voltaje de campo: 220 V_{DC}
- Corriente máxima de armadura: 455 A
- Velocidad: 1050/2000 rpm
- Potencia: 250 kW

En la práctica, la velocidad óptima de trabajo está entre 1300 rpm y 1800 rpm, tomando en cuenta la temperatura, el consumo de escobillas, la condición de colector y demás variables comprendidas en este equipo.

El acoplamiento del motor a la máquina conducida es de la marca Maina modelo GO-6A y está conformado por dos cubos con dentado exterior que engranan con los dientes del engranaje interior tallado en la tapa del acoplamiento según se observa en la Figura 1. Está construido para altas potencias y velocidades. Las tapas se montan axialmente para asegurar un área de contacto permanente para la transmisión y están provistas de retenedores para evitar la filtración de polvo y fugas de lubricante.

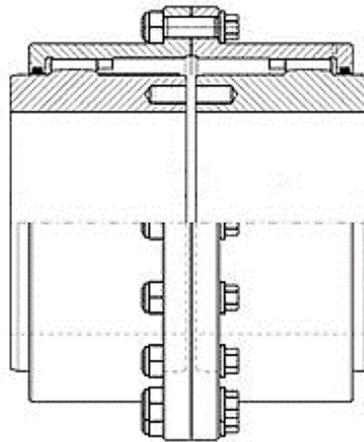


Fig. 1. Representación esquemática del tipo de acoplamiento motor-máquina conducida. Fuente: MAINA Gear Couplings, Model GO-6A, URL: <https://utslcws.com/wp-content/uploads/2017/07/MAINA-Gear-Couplings.pdf>

2.1. Los ejercicios experimentales

En la instalación experimental se provocó cierta cantidad de desalineamiento y por supuesto, la elección de los factores dependió de las tolerancias permitidas por el acople y del tipo de desalineamiento, sin que el proceso de cambio de nivel afecte otras variables del equipo o introduzca resultados no esperados en el proceso productivo. Se usó como instalación experimental 2 máquinas acopladas trabajando en el proceso productivo, por lo que no hubo alteraciones provocadas por el experimento.

En la investigación, se provocó desalineamiento paralelo (OFFSET) en el plano horizontal. Las razones que condujeron a esta decisión fueron las siguientes:

1. Provocar desalineamiento en un solo plano equivale a un menor tiempo de indisponibilidad de la máquina.
2. Provocar desalineamiento en el plano horizontal equivale a un menor tiempo de indisponibilidad comparado con el necesario para provocar desalineamiento vertical.
3. Resulta mucho más complejo provocar desviaciones angulares (GAP) que paralelas (GAP) y por supuesto, el experimento conduciría a un mayor tiempo de indisponibilidad de la máquina en caso de provocar desalineamiento combinado.

Por requisitos de operaciones, el motor que se está investigando operó a 2100 rpm, por lo cual se fijaron 3 niveles de desviaciones a saber, 0,17 mm, 0,10 mm y 0,05 mm respectivamente, para los cuales se realizaron las mediciones de los parámetros dinámico funcionales o variables de respuesta.

De acuerdo con estudios realizados con anterioridad, existe una relación entre el desalineamiento y el consumo energético [9, 11], así como también con la temperatura en los alojamientos de los cojinetes de rodamiento de una máquina [8-10] y las vibraciones registradas en estos [5-7].

Estos parámetros, cambiantes y bajo la influencia del ritmo de producción, tipo de producto, condiciones ambientales, condición de la máquina entre otros, se identifican como parámetros dinámicos funcionales y son los que aparecen a continuación.

- Temperatura, expresada en grados Celsius (°C)
- Consumo de corriente, expresado en Ampere (A)
- Vibraciones, expresada en milímetros por segundo (mm/s)

Para la ejecución de los ejercicios experimentales fue imprescindible garantizar que todos sin excepción se realicen bajo las mismas condiciones operacionales, con la finalidad de obtener una homogeneidad en las variables propias de la función del activo que puedan influir en los parámetros dinámicos funcionales del mismo.

Estas condiciones son:

- Producto: varilla corrugada de 9,5 mm (3/8") x 6 metros (20')
- Velocidad lineal del tren laminador: 13,1 m/s
- Revoluciones por minuto de la pasada número 10: 1540 +/- 20 rpm
- Temperatura promedio de material: 1100 °C +/- 40 °C
- Todos los parámetros dinámico funcionales fueron tomados en dos horarios, 10:00 a.m. y 3:00 p.m. con el objetivo de tener influencias similares del medio ambiente.

El procedimiento de alineación se ejecutó con un instrumento de alineación por rayo láser SHAFTALIGN de la compañía alemana PRÜFTECHNIK AG con una resolución de 1 μ m lineal y 10 μ Rad angular, todo con una precisión promedio mayor que el 98 %. En cada caso y para cada uno de los niveles de alineación residual (0,17 mm, 0,10 mm y 0,05 mm), se verificaron estos valores en cada movimiento horizontal de la máquina, cuidando rigurosamente que el desalineamiento continuara siendo paralelo y que se mantuviera en todos los casos el mismo desalineamiento residual vertical.

Para la medición de la temperatura en los rodamientos del motor GH280 PK DC 250 kW se utilizó un pirómetro marca FLUKE modelo 62, con distancia del punto focal de entre 50 mm y 1500 mm, rango de temperatura de entre -30 °C y 500 °C y una precisión de +/-1,5 % de la lectura. La medición se realizó siempre a un metro de distancia del punto de medición, previo marcaje de los puntos donde se debió colocar el punto de luz visible del pirómetro.

Para la medición de la corriente se utilizó un Analizador de Calidad de Energía FLUKE 435 habilitado para capturar datos del RMS (*root mean square*) y formas de onda rápidas para caracterizar la dinámica del sistema eléctrico, a la vez que efectúa las mediciones clásicas de la energía activa y reactiva, desequilibrio y energía armónica, las cuales se cuantifican para establecer claramente pérdidas energéticas reales en el sistema. El mencionado Analizador se dejó de manera temporal en la alimentación del motor experimental hasta que concluyeron las pruebas. El técnico encargado de la medición pasó en los horarios previstos para tomar lectura y asentar en el formulario correspondiente la medición realizada.

Por su parte, las mediciones del nivel total de las vibraciones se realizaron con un Colector Analizador de Vibraciones CSI 2130D con un rango de frecuencia de entre 10 Hz y 1 kHz, una resolución en frecuencia de 0,5 Hz, rangos de medición para desplazamiento desde ~100 μm , velocidad desde ~ 1 mm/s RMS y aceleración desde ~ 5 m/s^2 . El instrumento exhibe in error de amplitud $\leq 5\%$ y un error de frecuencia $\leq 0,5\%$. Admite la conexión de acelerómetros, transductores de velocidad y sondas de proximidad. Es necesario precisar que aunque las mediciones se realizaron en el rodamiento lado acople y en las tres direcciones ortogonales es decir, radial vertical, radial horizontal y axial, a los efectos de estos experimentos se decidió tomar en cuenta para el análisis sólo las mediciones realizadas en la dirección radial vertical, pues el desalineamiento en el plano vertical genera vibraciones en el plano horizontal y viceversa [12, 13]. Igualmente, la medición del nivel total de las vibraciones se realizó siempre en el mismo horario que las mediciones de las otras variables y en el mismo punto radial vertical en el que habitualmente se miden las vibraciones en el motor, cojinete lado acople.

Luego de realizadas las mediciones en virtud de los requisitos descritos anteriormente, se obtuvieron los resultados recogidos en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de las mediciones. Fuente: autores

OFFSET Horizontal (mm)	Fecha	Hora	RPM	Carga (%)	Nivel total (2RV) (mm/s)	Temperatura (°C)	Corriente (A)
0,17	04AGO15	15:32	1530	73	1,829	45	264
	04AGO15	09:57	1550	80	1,524	46	248
	05AGO15	15:49	1542	70	2,007	47	248
	06AGO15	15:58	1520	65	1,676	43	246
0,10	21AGO15	10:33	1607	77	2,235	46	237
	25AGO15	09:55	1515	65	1,676	48	233
	22SEP15	10:30	1653	66	1,880	47	239
0,05	27OCT15	10:08	1550	68	2,134	47	235
	28OCT15	10:54	1520	83	2,108	45	236
	29OCT15	10:36	1515	81	2,134	46	237
	30OCT15	10:17	1545	72	2,261	46	233

2.2. El análisis estadístico

El análisis se efectuó con el Statgraphics Plus, versión 5.1, edición profesional para Windows. Para ello, el desalineamiento se consideró la variable independiente y tanto la temperatura en los rodamientos como el nivel total de las vibraciones y el consumo de corriente fueron los efectos que se midieron, por lo cual se consideraron las variables dependientes. Corresponde ahora determinar la matriz de correlaciones, con el objetivo de identificar si existe relación lineal o no entre dichas variables.

El modelo más adecuado para este análisis es el de correlación y regresión, es decir, relacionar las mediciones que fueron tomadas en campo con el desalineamiento provocado y ajustar estos puntos de relación a una gráfica lineal.

A partir de este modelo matemático lineal, se analizó la relación del Desalineamiento (D) con las variables Consumo de corriente (I), Temperatura (T) y Vibraciones (Vib) que son las variables dependientes del modelo. El Desalineamiento (D) es la variable independiente o la variable explicativa que se utilizó para estudiar los consumos energéticos, la temperatura en rodamientos y las vibraciones en estos.

Con este modelo se pretende estudiar qué influencia tiene el desalineamiento sobre los consumos energéticos, la temperatura en rodamientos y las vibraciones en estos. Para poder cuantificar dicha relación, también se debe

representar la recta de regresión que subyace en el modelo matemático que relaciona ambas variables. Para cuantificar la relación entre las variables y poder disponer de una imagen aproximada de la influencia del desalineamiento sobre los consumos energéticos, la temperatura en rodamientos y las vibraciones en estos, se estimó el modelo por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) donde se minimiza la suma de los cuadrados de los residuos [14].

Como se puede observar en la tabla 2, la correlación del Desalineamiento con el consumo de Corriente es de 0,8085, lo cual evidencia una relación moderadamente fuerte entre las variables por lo cual, sólo se estudiará el comportamiento del consumo de corriente en función de los cambios en el Desalineamiento Paralelo Horizontal.

Tabla 2. Matriz de correlación. Fuente: autores

	Corriente	Desalineamiento	T2	Vibración
Corriente		0,8085 10 0,0046	- 0,4035 10 0,2475	- 0,5792 10 0,0793
Desalineamiento	0,8085 10 0,0046		-0,2909 10 0,4149	- 0,7550 10 0,0116
T2	- 0,4035 10 0,2475	- 0,2909 10 0,4149		- 0,0309 10 0,9324
Vibración	- 0,5792 10 0,0793	- 0,7550 10 0,0116	- 0,0309 10 0,9324	

Según se muestra en la tabla 3, el modelo lineal obtenido que describe la relación entre el consumo de Corriente y el Desalineamiento paralelo horizontal permitió escribir la ecuación 1.

Tabla 3. Resultados de la estimación del modelo. Fuente: autores

Parámetro	Estimado	Error Estándar	T Estadística	P-Valor
Intercepto	226,916	4,30887	52,66240	0,0000
Pendiente	138,743	35,70950	3,88533	0,0046

$$I = 138,743 \cdot D + 226,916 \quad (1)$$

Siendo:

I: consumo de Corriente (A)

D: desalineamiento paralelo horizontal (mm)

En la figura 2 se puede observar la representación gráfica del modelo obtenido y en la tabla 4 se muestran los descriptores estadísticos del modelo.

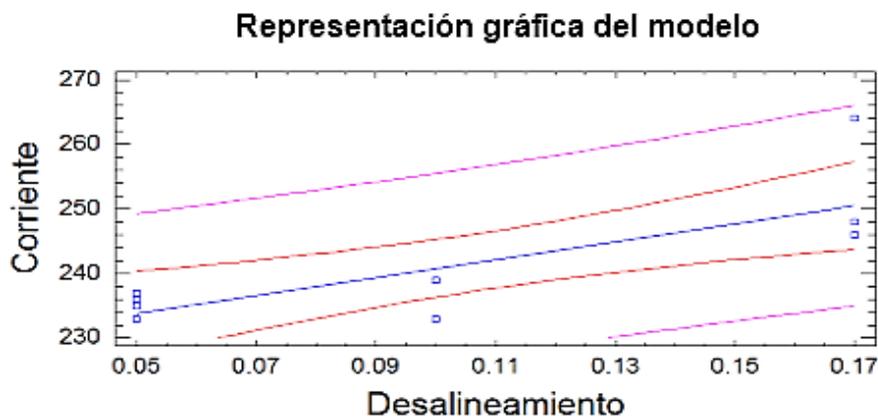


Fig. 2. Representación del modelo obtenido. Fuente: autores

Tabla 4. Descriptores estadísticos. Fuente: autores

Descriptor	Valor
Coefficiente de correlación	0,808466
R-Cuadrado	65,3617 %
Error estándar de la estimación	6,07691

Tal y como ya se ha mencionado, en la figura 2 se observa gráficamente el modelo ajustado pero resultó necesario validarlo y tal validación se realizó a través del análisis de los residuos y la prueba de la falta de ajuste. Este análisis de los residuos se ejecutó con el objetivo de verificar el supuesto de que los residuos constituyen una variable aleatoria que responde a una distribución normal, con media cero (0) y varianza constante. Para ello, bastó con verificar en el gráfico del análisis de los residuos basado en el desalineamiento y mostrado en la figura 3, que no hay evidencias de que no se cumpla este supuesto ya que las medidas se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero (0) y los valores de los residuos estandarizados se mantienen entre - 2 y 2.

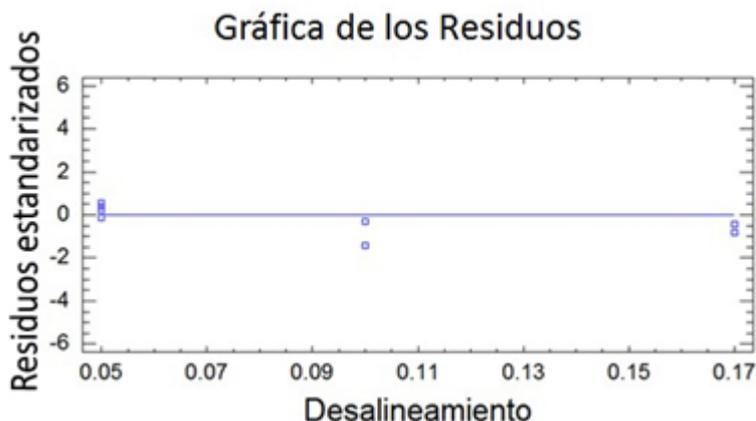


Fig. 3. Residuos estandarizados respecto al desalineamiento. Fuente: autores

Así mismo, se realizó la prueba de falta de ajuste para demostrar que el modelo lineal es adecuado. Observando la tabla 5, se puede realizar la comparación entre la variabilidad del modelo residual actual con la variabilidad entre las observaciones y las réplicas de los valores del Desalineamiento paralelo horizontal, que es la variable independiente. Puesto que el p-valor para la falta de ajuste en la tabla ANOVA es mayor que 0,10, no existe suficiente evidencia estadística para rechazar que el modelo lineal es adecuado [15].

Tabla 5. Análisis estadístico de la falta de ajuste del modelo. Fuente: autores

Análisis de varianza con falta de ajuste					
Fuente	Suma de Cuadrados (SC)	Grado de Libertad (GL)	Cuadrado Medio (CM)	F-Ratio	P-Valor
Modelo de regresión	557,4700	1	557,4700	15,1000	0,0046
Residual	295,4300	8	36,9288		
Falta de ajuste	57,6802	1	57,6802	1,7000	0,2337
Error puro	237,7500	7	33,9643		
Total de correlación	852,9000	9			

3. Resultados y Discusión

De lo anterior se puede concluir que existe una relación estadística significativa entre el consumo de Corriente y el Desalineamiento paralelo horizontal. El estadígrafo R-Cuadrado indica que el modelo como ajuste explica el 65,3617 % de la variabilidad del consumo de Corriente y el coeficiente de correlación de 0,808466, indica una relación moderadamente fuerte entre el consumo de Corriente y el Desalineamiento paralelo horizontal, mostrando el error estándar del estimado una desviación estándar de los residuales de 6,07691.

Como resultado del análisis, se puede afirmar que los residuos constituyen variables aleatorias independientes pues de acuerdo con la figura 4, no hay evidencia de que exista dependencia entre los residuos correspondientes a esas mediciones.



Fig. 4. Residuos estandarizados respecto al orden de las mediciones. Fuente: autores

Los resultados de las pruebas realizadas indican que aún con desalineamientos residuales tolerables, estos provocan cambios en el consumo de corriente del motor, de acuerdo con el modelo lineal representado por la ecuación (1).

Esto quiere decir, que dentro del rango de entre 0,05 mm y 0,17 mm de desalineamiento residual paralelo horizontal, en el que es válido el modelo obtenido, se pueden tomar decisiones y proponer la realineación de la máquina, cuando se considere que el consumo de corriente redonde en un consumo energético considerable. Tenga presente que para un desalineamiento residual de 0,17 mm, aun cuando es tolerable por el acoplamiento, el consumo de corriente es de 31 Ampere más que si el desalineamiento residual fuese de 0,05 mm. Esta diferencia de 31 Ampere en un motor como el estudiado representa casi 30 kW de potencia instantánea, lo cual constituye un valor considerable con una repercusión económica importante.

No existen referencias en Internet a investigaciones realizadas con este enfoque y por ello resulta imposible realizar comparaciones.

Los resultados obtenidos pueden servir de referencia para realizar el estudio del comportamiento del consumo de corriente en motores similares al estudiado en función del desalineamiento paralelo horizontal.

Conclusiones

El modelo obtenido permitió estimar el desalineamiento midiendo la corriente, siendo útil, aún sin exceder los límites tolerables, para la planificación de acciones correctivas optimizando así el consumo energético.

Los resultados tienen un carácter novedoso, pues fueron obtenidos a partir de una máquina real trabajando en un proceso productivo real, sobre la que se indujeron desalineamientos tolerables que provocaron, a pesar de ser tolerables, consumos energéticos inadmisibles. La práctica habitual de mantenimiento plantea que las máquinas se deben realinear cuando las desviaciones en los ejes están fuera del rango permisible influyendo negativamente en el comportamiento vibratorio del sistema accionamiento-máquina y en este caso, es el consumo energético el que indica cuando es necesario alinear, aun cuando el desalineamiento sea tolerable desde el punto de vista mecánico.

Referencias

- Xu M, Marangoni RD. Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, part I: theoretical model and analysis. *Journal of sound and vibration*. 1994;76(5):663-79.
- Xu M, Marangoni RD. Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, part II: experimental validation. *Journal of sound and vibration*. 1994;176(5):681-91.
- Sekhar A.A., Prabhu B.S. Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery. *Journal of Sound and vibration*. 1995;185(4):655-71.
- Obaid RR, Habetler TG, Tallam RM. Detecting load unbalance and shaft misalignment using stator current in inverter-driven induction motors. In: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03*. Madison, WI, USA: IEEE; 2003. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210643
- Saavedra P., Ramirez DE. Vibration analysis of rotors for the identification of shaft misalignment Part 1: theoretical analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2004;218(9):971-85.
- Saavedra PN, Ramirez DE. Vibration analysis of rotors for the identification of shaft misalignment Part 2: experimental validation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2004;218(9):987-99.
- Sawalhi N, Ganeriwala S, Tóth M. Parallel misalignment modeling and coupling bending stiffness measurement of a rotor-bearing system. *Applied Acoustics*. 2019;144:124-41.
- Arun KJ, Shital P, Gaurav M. A review on fault diagnosis of misaligned rotor systems. *International Journal of Performability Engineering*. 2020;16(4):499.
- Verucchi CJ, Giraldo E, Meira M, Ruschetti CR, Bossio JM, Bossio GR. Efficiency assessment of induction motors drives operating under shaft misalignment conditions. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2020;18(3):142-52.
- Albdery MH, Szabo I. Experimental Study of the Effect of Misalignment on Rolling Element Bearing. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2021;6(7):87-90.
- Abouelanouar B, Elkihel A, Gziri H. Experimental study on energy consumption in rotating machinery caused by misalignment. *SN Applied Sciences*. 2020;2:1-6.

12. Nawir R, Dwianda Y, Febrianton A, et al. The Effect of Misalignment to Vibration, Electric Current and Shaft Rotation Speed on Gear Transmission. *Journal of ocean, mechanical and aerospace - science and engineering*. 2022;66(1):14-9. DOI: 10.36842/jomase.v66i1.278
13. Chai N, Yang M, Ren B, Huang X, Xu D. Misalignment detection of rotor system based on adaptive input-output model identification of motor speed. In: 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control. Conference. Nanjing, China: IEEE; 2020 DOI: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367979
14. Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. Arizona State University. John Wiley & Sons Inc.; 2017. ISBN 1119113474.
15. Bertinetto C, Engel J, Jansen J. ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review. *Analytica Chimica Acta*: X. 2020;6:100061.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Evelio Palomino Marín. <http://orcid.org/0000-0001-7417-6189>

Participó en el diseño de la investigación, diseño de los modelos, implementación de los modelos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Fausto Taveras Lay. <https://orcid.org/0009-0002-9851-516X>

Trabajó en el diseño de la investigación, implementación de los modelos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Alfredo del Castillo Serpa. <https://orcid.org/0000-0001-5051-8324>

Diseño de la investigación, implementación de los modelos, análisis de los resultados y participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Armando Díaz Concepción. <https://orcid.org/0000-0001-9849-0826>

Diseño de la investigación, implementación de los modelos, análisis de los resultados y participó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Jesús Cabrera Gómez. <https://orcid.org/0000-0002-9884-3692>

Diseño de la investigación, análisis de las herramientas, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final..