

Análisis Comparativo de la Respuesta Vibracional de un Motor Trifásico de Inducción en 220 V y 440 V Bajo Operación en Vacío y Carga Progresiva

Comparative Analysis of the Vibrational Response of a Three-Phase Induction Motor at 220 V and 440 V Under No-Load and Progressive Load Operation

**Rubén Darío Tirira Chulde¹, Cristian Fernando Arias Castellano², Esteban Alexander González Quinga³,
Jordan Ismael Guashpa Moreano⁴, Jonatan Ismael Oña Rubio⁵**

¹ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, dtirira@tecnologicosucre.edu.ec

² Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, carias@tecnologicosucre.edu.ec

³ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, egonzalez@tecnologicosucre.edu.ec

⁴ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, jordanmoreanogs@gmail.com

⁵ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, ona.r.jonatan@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.61236/ktdb1k63>

Recibido: 18 de diciembre de 2025 • Revisión aceptada: 27 de agosto de 2026.

Resumen

Este estudio analizó comparativamente la respuesta vibracional de un motor trifásico de inducción de 12 terminales bajo operación en vacío y exigencia operativa creciente, considerando configuraciones de alimentación en 220 V y 440 V. El diseño experimental se estructuró en campañas de 120 minutos, con registros en el instante inicial y posteriormente cada 10 minutos, utilizando como variables principales la velocidad vibracional y la aceleración, y como variable complementaria la velocidad de giro. Las condiciones de ensayo comprendieron una etapa inicial en vacío y cuatro etapas sucesivas de mayor exigencia operativa, ajustadas experimentalmente mediante corrientes objetivo para cada nivel de tensión. Los resultados evidenciaron una variación sistemática de la respuesta mecánica del motor en ambas configuraciones, con incremento progresivo de la velocidad vibracional y de la aceleración conforme aumentó la exigencia operativa, acompañado por una disminución sostenida de la velocidad de giro. La comparación entre 220 V y 440 V mostró una tendencia general similar, aunque con valores de vibración y aceleración ligeramente superiores en 220 V bajo las condiciones más exigentes. En conjunto, los hallazgos indican que el análisis vibracional permitió caracterizar comparativamente la respuesta mecánica del motor bajo un esquema experimental de doble tensión y exigencia operativa creciente definida mediante criterio eléctrico.

Palabras claves: motor de inducción trifásico; análisis vibracional; aceleración mecánica; carga progresiva; doble tensión.

Abstract

This study comparatively analyzed the vibrational response of a 12-lead three-phase induction motor under no-load operation and progressively increasing operating demand, considering both 220 V and 440 V supply configurations. The experimental design consisted of 120-minute test campaigns, with measurements recorded at the initial instant and subsequently every 10 min. Vibration velocity and acceleration were selected as the primary variables, while rotational speed was used as a complementary variable. The test conditions included an initial no-load stage followed by four successive stages of increasing operating demand, experimentally adjusted through target current values for each supply voltage. The results revealed a systematic variation in the motor's mechanical response under both configurations, characterized by a progressive increase in vibration velocity and acceleration as operating demand increased, accompanied by a sustained reduction in rotational speed. The comparison between the 220 V and 440 V configurations showed a similar overall trend, although vibration velocity and acceleration values were slightly higher at 220 V under the most demanding operating conditions. Overall, the findings indicate that vibration analysis enabled a comparative characterization of the motor's mechanical response under a dual-voltage experimental framework and progressively increasing operating demand defined according to an electrical criterion.

Keywords: *three-phase induction motor; vibration analysis; mechanical acceleration; progressive loading; dual voltage.*

1. INTRODUCCIÓN

En los motores trifásicos de inducción, la respuesta mecánica no permanece constante, sino que varía según las condiciones eléctricas y mecánicas a las que se somete la máquina [1], [2], [3]. Entre los parámetros más utilizados para examinar esta respuesta se encuentran la velocidad vibracional y la aceleración, debido a que permiten registrar de forma objetiva cambios asociados al comportamiento dinámico del sistema rotativo [4], [5], [6]. Esta perspectiva es compatible con los lineamientos generales de evaluación vibracional en maquinaria rotativa establecidos por la norma ISO 20816-1 [7], utilizada en este trabajo únicamente como referencia conceptual del campo de medición vibracional.

Dentro de este marco, el análisis vibracional aplicado a motores de inducción permite estudiar cómo la máquina responde ante variaciones del régimen de operación sin depender exclusivamente de apreciaciones cualitativas [8]. La literatura especializada sobre monitoreo de condición en motores de inducción reconoce a la vibración como una de las variables más utilizadas para examinar cambios en el estado mecánico, debido a su sensibilidad frente a alteraciones en la dinámica de funcionamiento [8], [9], [10].

En los motores de doble tensión, la comparación adquiere interés técnico porque una misma máquina puede operar con distintas tensiones nominales, como 220/440 V, mediante diferentes

conexiones de sus devanados. En el presente trabajo, esta condición dual forma parte del diseño experimental, ya que se dispusieron campañas de ensayo en baja tensión de 220 V y en alta tensión de 440 V, cada una con una condición inicial en vacío y etapas posteriores de carga progresiva definidas a partir de escalones de corriente observados experimentalmente [11].

Desde este punto de vista, el interés del trabajo no reside en realizar un diagnóstico integral del motor, sino en caracterizar experimentalmente la variación de su respuesta vibracional cuando opera en vacío y bajo exigencia operativa creciente, considerando también el efecto de dos tensiones nominales de alimentación sobre su comportamiento mecánico [12], [13]. Esta delimitación mantiene la coherencia entre el problema de investigación, las variables medidas y el nivel de inferencia que el estudio puede sostener, evitando atribuir a los ensayos alcances que no fueron verificados experimentalmente.

Aunque el análisis vibracional en motores de inducción cuenta con amplia aplicación técnica, aún resulta pertinente sistematizar comparaciones experimentales que integren, bajo un mismo esquema temporal y con variables mecánicas homogéneas, configuraciones nominales de doble tensión, operación en vacío y exigencia operativa creciente definida en laboratorio. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la respuesta vibracional de un motor trifásico de inducción mediante el análisis de la velocidad

vibracional y la aceleración, comparando su evolución temporal y su comportamiento final en 220 V y 440 V. Con ello se busca aportar una caracterización experimental comparativa del comportamiento mecánico del motor en condiciones operativas diferenciadas, basada en mediciones periódicas y en un diseño de ensayo reproducible.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño experimental

El estudio se realizó mediante un diseño experimental aplicado a un motor trifásico de inducción de 12 terminales, con el fin de analizar comparativamente su respuesta vibracional bajo operación en vacío e incremento progresivo de la exigencia operativa, considerando las configuraciones de conexión en 220 V y 440 V. Las variables principales fueron la velocidad vibracional, expresada en mm/s, y la aceleración, expresada en m/s^2 , por ser magnitudes complementarias para caracterizar la respuesta mecánica del motor [3], [4], [5]. De forma complementaria, se registraron la corriente de línea en las tres fases y la velocidad de giro en rpm, con el propósito de contextualizar el régimen de funcionamiento alcanzado en cada campaña. Antes del inicio de cada ensayo se verificó la resistencia de aislamiento del motor como criterio previo de aptitud para la prueba, sin que esta medición formara parte del eje principal de análisis.

2.2. Características del motor ensayado

Con el objetivo de poder identificar técnicamente el equipo ensayado, se resumen en la Tabla 1 las características nominales del motor utilizado. Estos datos establecen los límites de trabajo del sistema en estudio, sobre todo en cuanto a potencia, tensiones de conexión nominales, corrientes y velocidades nominales, que más tarde fueron el punto de partida para fijar y situar en contexto las condiciones de ensayo.

Tabla 1. Características nominales del motor trifásico de inducción.

Parámetro	Especificación
Tipo de máquina	Motor trifásico de inducción
Número de terminales	12
Potencia nominal	1 HP
Tensiones nominales de conexión	220/380/440 V
Frecuencia nominal	60 Hz
Corriente nominal	3,02 A / 1,75 A / 1,51 A
Velocidad nominal	1730 rpm
Factor de potencia	0,81
Factor de servicio	1,15
Clase de aislamiento	F
Grado de protección	IP55

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos nominales del motor ensayado.

Como se observa en la Tabla 1, el motor empleado corresponde a una máquina trifásica de inducción de 12 terminales con tres tensiones nominales de conexión. Sin embargo, para el presente estudio solo se utilizaron las configuraciones de 220 V y 440 V. Asimismo, las corrientes nominales de ambas conexiones se tomaron como referencia superior para establecer la condición final de ensayo en cada nivel de voltaje.

2.3. Instrumentación de medición

De manera complementaria, en la Tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas pertinentes del vibrómetro empleado para el registro de la respuesta vibracional del motor. Esta tabla se incorpora porque las variables centrales del estudio fueron precisamente la velocidad vibracional y la aceleración, por lo que resulta necesario identificar las capacidades básicas del instrumento de medición utilizado [3].

Tabla 2. Especificaciones técnicas del vibrómetro utilizado en el estudio.

Parámetro	Especificación
Equipo	Vibrómetro
Modelo	VM-424
Magnitudes disponibles	Aceleración, velocidad, desplazamiento y temperatura
Magnitudes empleadas en el estudio	Aceleración y velocidad vibracional
Rango de aceleración	0,1 a 199,9 m/s ²
Rango de velocidad	0,1 a 199,9 mm/s
Exactitud indicada por fabricante	±5 % ±2 dígitos
Tipo de sensor	Acelerómetro piezoeléctrico cerámico tipo shear
Ciclo de actualización	Aproximadamente 0,5 s

Fuente. Elaboración propia a partir de las especificaciones técnicas del vibrómetro VM-424.

Las mediciones vibracionales siempre se realizan en el mismo punto de la carcasa del motor y con la misma orientación de registro, para preservar la comparabilidad entre campañas. La lectura se efectuó en cada instante de muestreo cuando se alcanzó una indicación estable del instrumento, manteniendo constante el procedimiento de

contacto y la posición del sensor durante todos los ensayos. La secuencia temporal de adquisición y el criterio de ajuste de la condición operativa se mantuvieron constantes entre las campañas de 220 V y 440 V, con el objetivo de minimizar la influencia de factores externos sobre la comparación experimental.

2.4. Condiciones de ensayo

En cuanto a las condiciones de ensayo, el procedimiento experimental se dividió en dos bloques, uno correspondiente a la conexión del motor en 220 V y otro a la conexión en 440 V. En ambos casos se siguió la misma lógica metodológica, basada en una etapa inicial en vacío y en etapas posteriores con mayor exigencia mecánica aplicada al eje mediante un acople. Cada campaña experimental duró 120 minutos, con registros en el instante inicial y posteriormente cada 10 minutos. Las campañas con carga se llevaron a cabo en diferentes días, a una hora similar y con condiciones ambientales similares, con el fin de reducir la influencia del calentamiento remanente del ensayo previo sobre las mediciones posteriores [9], [14].

La primera campaña de cada bloque correspondió a la operación en vacío. En esta condición, el motor funcionó sin exigencia mecánica adicional aplicada al eje y se obtuvieron las mediciones de referencia para el análisis posterior. En 220 V, la corriente inicial en vacío se estableció a partir del promedio de las tres fases en el minuto 0, con valores de 1,93

A, 1,87 A y 1,90 A, lo que dio una corriente de referencia de 1,90 A. En 440 V, la misma condición se determinó a partir de 0,98 A, 0,95 A y 0,99 A, con una corriente de referencia de 0,97 A.

2.5. Criterio de ajuste operativo

A partir de las corrientes de referencia obtenidas en vacío y de las corrientes nominales correspondientes a cada conexión, se definieron las corrientes deseadas para las etapas siguientes. En 220 V se establecieron 2,18 A, 2,46 A, 2,74 A y una condición final próxima a 3,02 A. En 440 V, siguiendo el mismo criterio, se fijaron 1,11 A, 1,24 A, 1,38 A y una condición final próxima a 1,51 A. Con base en este criterio eléctrico, en la Tabla 3 se presentan las condiciones de ensayo según el nivel de voltaje y la corriente deseada en cada caso. Esta tabla resume el criterio práctico utilizado para definir las campañas experimentales sin recurrir a porcentajes reales de carga mecánica, los cuales no fueron medidos de forma directa.

Tabla 3. Condiciones de ensayo y corrientes deseadas según el nivel de voltaje.

Nivel de voltaje	Etapas de ensayo	Corriente deseada
220 V	Vacío	1,90 A
220 V	Escalón 1	2,18 A
220 V	Escalón 2	2,46 A
220 V	Escalón 3	2,74 A
220 V	Escalón 4	3,02 A
440 V	Vacío	0,97 A
440 V	Escalón 1	1,11 A
440 V	Escalón 2	1,24 A
440 V	Escalón 3	1,38 A
440 V	Escalón 4	1,51 A

Fuente. Elaboración propia a partir de las condiciones experimentales de ensayo.

Como se aprecia en la Tabla 3, la secuencia experimental se apoyó en corrientes deseadas específicas para cada configuración de tensión, manteniendo en ambos casos una etapa inicial en vacío y una etapa final próxima a la corriente nominal del motor. Esta organización permitió construir un esquema de comparación entre vacío y aumento de exigencia operativa tanto en 220 V como en 440 V, sin atribuir a las etapas una equivalencia directa con porcentajes reales de carga mecánica, ya que esta no fue cuantificada de forma independiente durante el estudio.

2.6. Procedimiento experimental y criterio de comparación

Una vez fijada la corriente deseada para cada etapa, la exigencia operativa del motor se incrementó progresivamente mediante el sistema de acople conectado al eje hasta aproximarse a la condición establecida. Alcanzada esa condición, se desarrolló la campaña correspondiente con el mismo esquema temporal de adquisición de datos utilizado en vacío, es decir, mediciones en el instante inicial y luego cada 10 minutos durante 120 minutos de funcionamiento. En todas las campañas se registraron tensión de línea, corriente por fase, velocidad de giro, temperatura de carcasa, vibración y aceleración, aunque para el presente estudio el análisis se concentró principalmente en la velocidad vibracional y en la aceleración como indicadores de la respuesta mecánica del motor [3].

Bajo este procedimiento de adquisición, la metodología se estructuró para comparar la respuesta vibracional del motor en dos planos complementarios. El primero correspondió a la comparación entre la operación en vacío y las condiciones sucesivas de ensayo dentro de una misma tensión de alimentación. El segundo correspondió a la comparación entre el comportamiento del motor en 220 V y en 440 V bajo esquemas equivalentes de duración, frecuencia de registro y criterio de ajuste operativo. De esta manera, el procedimiento experimental permitió obtener registros comparables de velocidad vibracional y aceleración en condiciones controladas de ensayo, manteniendo continuidad con el enfoque planteado en la introducción y correspondencia con las variables efectivamente medidas durante el estudio [1], [2].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Vibración y velocidad de giro por etapa de ensayo

Los Se exponen los resultados a partir de la evolución de la velocidad vibracional y de la aceleración del motor trifásico de inducción bajo las configuraciones de alimentación en 220 V y 440 V, considerando en cada caso una condición inicial a vacío y cuatro etapas sucesivas de mayor exigencia operativa. Los valores iniciales, finales y las variaciones netas obtenidas en cada campaña experimental se resumen en las Tablas 4, 5 y 6,

mientras que en las Figuras 1 y 2 se muestra la evolución temporal de ambas variables mecánicas durante los 120 minutos de ensayo. En líneas generales, los registros demuestran una respuesta mecánica creciente en ambas tensiones de alimentación, que se caracteriza por un aumento progresivo de la velocidad vibracional y de la aceleración, acompañado por una disminución sostenida de la velocidad de giro. Esta tendencia general guía el análisis particular de los resultados que se exponen a continuación.

En la Tabla 4 se presentan los valores iniciales y finales de la velocidad vibracional y de la velocidad de giro registrados en cada etapa de ensayo para las configuraciones de 220 V y 440 V.

Tabla 4. Valores iniciales y finales de vibración y velocidad de giro por etapa de ensayo.

Voltaje (V)	Etapas de ensayo	Vibración inicial (mm/s)	Vibración final (mm/s)	RPM inicial	RPM final
220	Vacío	0,61	0,65	1794	1790
220	Escalón 1	0,69	0,89	1783	1774
220	Escalón 2	0,82	1,07	1773	1763
220	Escalón 3	1,00	1,34	1761	1750
220	Escalón 4	1,28	1,77	1744	1730
440	Vacío	0,58	0,67	1795	1791
440	Escalón 1	0,69	0,91	1783	1775
440	Escalón 2	0,82	1,06	1771	1762
440	Escalón 3	1,01	1,38	1757	1746
440	Escalón 4	1,24	1,66	1740	1731

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos experimentales.

Como se observa en la Tabla 4, la velocidad vibracional aumentó progresivamente desde la condición en vacío hasta la etapa final de mayor exigencia en ambas tensiones de alimentación,

mientras que la velocidad de giro presentó una disminución sostenida. En 220 V, la vibración final pasó de 0,65 mm/s en vacío a 1,77 mm/s en el escalón final, mientras que en 440 V evolucionó de 0,67 mm/s a 1,66 mm/s. De forma paralela, las rpm descendieron desde 1790 rpm y 1791 rpm en vacío hasta 1730 rpm y 1731 rpm, respectivamente, lo que muestra una variación consistente del régimen de funcionamiento del motor conforme aumentó la exigencia operativa.

3.2. Aceleración por etapa de ensayo

En la Tabla 5 se presentan los valores iniciales y finales de la aceleración registrados en cada etapa de ensayo para las configuraciones de 220 V y 440 V.

Tabla 5. Valores iniciales y finales de aceleración por etapa de ensayo.

Voltaje (V)	Etapas de ensayo	Aceleración inicial (m/s ²)	Aceleración final (m/s ²)
220	Vacío	0,37	0,42
220	Escalón 1	0,42	0,52
220	Escalón 2	0,50	0,63
220	Escalón 3	0,61	0,83
220	Escalón 4	0,75	1,01
440	Vacío	0,33	0,39
440	Escalón 1	0,42	0,54
440	Escalón 2	0,50	0,62
440	Escalón 3	0,61	0,83
440	Escalón 4	0,74	0,95

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos experimentales.

La Tabla 5 confirma una tendencia de crecimiento de la aceleración similar a la observada para la velocidad vibracional. En ambas tensiones, la condición en vacío presentó los menores valores, mientras que las etapas de mayor exigencia concentraron los niveles más altos al final de cada campaña. En 220 V, la aceleración final aumentó de 0,42 m/s² en vacío a 1,01 m/s² en el escalón final, mientras que en 440 V evolucionó de 0,39 m/s² a 0,95 m/s². Esta correspondencia refuerza la consistencia interna de los resultados experimentales.

3.3. Variación neta de las variables mecánicas

En la Tabla 6 se presentan las variaciones netas de la velocidad vibracional, de la aceleración y de la velocidad de giro durante cada campaña de 120 minutos, calculadas como la diferencia entre el valor final registrado al minuto 120 y el valor inicial de cada etapa de ensayo.

Tabla 6. Variación de vibración, aceleración y velocidad de giro por etapa de ensayo.

Voltaje (V)	Etapas de ensayo	Δ vibración (mm/s)	Δ aceleración (m/s ²)	Δ rpm
220	Vacío	0,04	0,05	-4
220	Escalón 1	0,20	0,10	-9
220	Escalón 2	0,25	0,13	-10
220	Escalón 3	0,34	0,22	-11
220	Escalón 4	0,49	0,26	-14
440	Vacío	0,09	0,06	-4
440	Escalón 1	0,22	0,12	-8
440	Escalón 2	0,24	0,12	-9
440	Escalón 3	0,37	0,22	-11
440	Escalón 4	0,42	0,21	-9

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos experimentales.

Según se observa en la Tabla 6, la variación neta de la velocidad vibracional y de la aceleración tendió a incrementarse con el aumento de la exigencia operativa del motor, mientras que la reducción de la velocidad de giro acompañó este comportamiento con una magnitud menor. A 220 V, la variación mayor se dio en el último escalón, con un incremento de 0,49 mm/s en vibración y 0,26 m/s² en aceleración, así como una disminución de 14 rpm. A 440 V, las mayores variaciones también se concentraron en los pasos de mayor exigencia, alcanzando 0,42 mm/s en vibración en el paso final y 0,22 m/s² en aceleración en el paso 3. En conjunto, estos resultados indican que el cambio interno desarrollado durante cada campaña no fue uniforme entre etapas, sino que se intensificó a medida que el motor operó bajo condiciones de mayor demanda mecánica.

3.4. Evolución temporal de la velocidad vibracional

Con el fin de examinar con mayor detalle la evolución de la velocidad vibracional a lo largo del tiempo, en la Figura 1 se presenta su comportamiento temporal durante los 120 minutos de ensayo para cada etapa experimental en 220 V y 440 V. Esta representación permite identificar de forma simultánea el efecto del tiempo de operación y el nivel de exigencia aplicado en cada campaña.

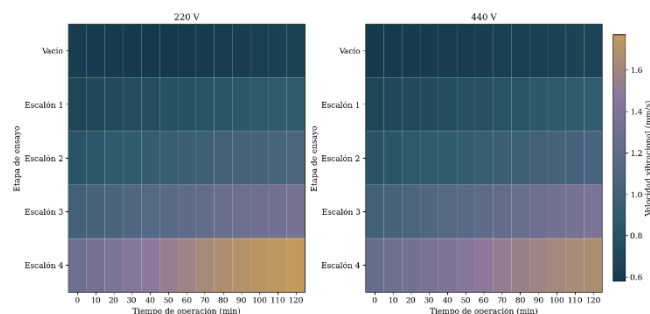


Figura 1. Evolución temporal de la velocidad vibracional en 220 V y 440 V.

En la Figura 1, la velocidad vibracional evidenció una evolución temporal en ascenso en ambas tensiones de alimentación, con claras diferencias entre la condición en vacío y las etapas de mayor exigencia operativa. En vacío, la variación a lo largo de los 120 minutos fue reducida tanto en 220 V como en 440 V, indicando un comportamiento mecánico comparativamente estable. En cambio, a medida que subía el escalón de ensayo, las trayectorias temporales mostraron incrementos más notorios y sostenidos, sobre todo en las etapas finales, donde se alcanzaron los niveles más altos de vibración. En conjunto, esta distribución temporal indica que la respuesta vibracional no sólo dependió de la condición inicial de cada etapa, sino también del tiempo de operación bajo una mayor demanda mecánica.

3.5. Evolución temporal de la aceleración

Dado De forma complementaria, en la Figura 2 se presenta la evolución temporal de la aceleración del motor durante los 120 minutos de ensayo para cada etapa experimental en 220 V y 440 V. Esta figura permite contrastar el comportamiento temporal de

la segunda variable mecánica principal del estudio bajo la misma estructura comparativa empleada para la velocidad vibracional.

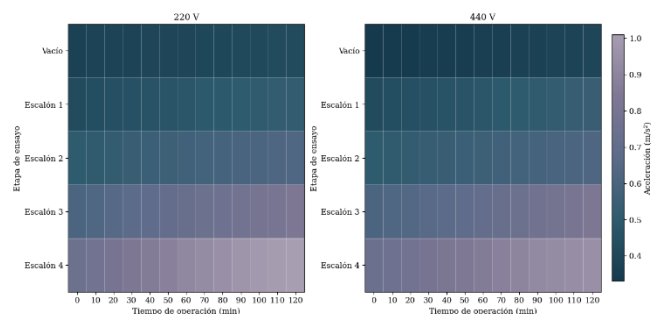


Figura 2. Evolución temporal de la aceleración en 220 V y 440 V.

En ambas tensiones de alimentación, la aceleración evolucionó temporalmente de forma coherente con la evolución de la velocidad vibracional, tal como se muestra en la Figura 2. Los cambios más pequeños se produjeron en vacío, mientras que los momentos más complicados mostraron aumentos más importantes al final de cada campaña. Esta coincidencia temporal confirma que ambas magnitudes respondieron de forma convergente al incremento de la demanda operativa.

3.6. Relación final entre velocidad de giro y vibración

Para unificar en una misma representación los estados finales de la velocidad de giro y de la velocidad vibracional alcanzados al final de cada campaña, se presenta en la Figura 3 la comparación correspondiente para las etapas de ensayo desarrolladas en 220 V y 440 V. Esta figura permite relacionar el descenso de las rpm con el incremento de la vibración en la condición final de cada escalón.

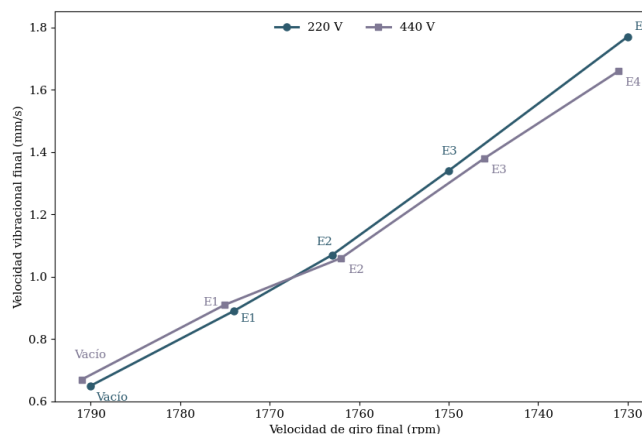


Figura 3. Relación entre velocidad de giro y vibración final por etapa de ensayo.

Como se observa en la Figura 3, los estados finales de cada campaña muestran una relación consistente entre la disminución de la velocidad de giro y el aumento de la velocidad vibracional conforme se incrementó la exigencia operativa. En ambas tensiones, las etapas iniciales se ubicaron en la zona de mayores rpm y menores niveles de vibración, mientras que las etapas finales se desplazaron hacia valores inferiores de velocidad y superiores de vibración. Aunque el comportamiento general fue similar en 220 V y 440 V, los valores finales en 220 V tendieron a concentrar los niveles más altos de vibración en la condición de mayor exigencia, lo que refuerza la utilidad de esta representación para sintetizar la respuesta mecánica final del motor.

3.7. Relación final entre velocidad de giro y aceleración

En la Figura 4 se presenta la comparación de los estados finales de la velocidad de giro y de la aceleración registrados al término de cada campaña experimental en 220 V y 440 V. Esta

representación permite examinar la relación entre la reducción de las rpm y el incremento de la aceleración bajo las distintas etapas de ensayo.

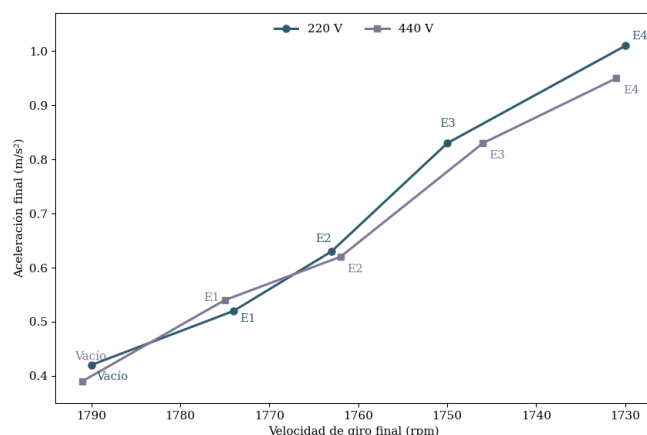


Figura 4. Relación entre velocidad de giro y aceleración final por etapa de ensayo.

En la Figura 4 puede observarse que la aceleración final aumentó cuando se redujo la velocidad de giro en ambas tensiones de alimentación, manteniendo un comportamiento general similar al ya visto anteriormente para la vibración. En las primeras etapas se registraron rpm más altas y niveles de aceleración más bajos, mientras que en las etapas posteriores se concentraron los valores más elevados de esta variable mecánica y las velocidades de rotación más bajas. Comparativamente, el comportamiento en 220 V presentó los mayores niveles finales de aceleración en la condición de mayor exigencia, pero la tendencia global entre ambas tensiones conservó la misma dirección. Esta representación confirma que la aceleración acompaña de forma sistemática la modificación del régimen mecánico observada al cierre de cada campaña.

4. DISCUSIÓN

El aumento progresivo de la velocidad vibracional y de la aceleración conforme se incrementó la exigencia operativa del motor es coherente con el comportamiento mecánico esperado en una máquina de inducción sometida a mayor demanda en el eje. Desde una perspectiva física, el aumento de carga modifica el equilibrio dinámico del sistema rotativo y favorece una respuesta vibracional más intensa, especialmente cuando el régimen de giro se aleja de la condición en vacío. En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con lo planteado en [1] y [2], donde se reconoce que la vibración en motores de inducción depende de la interacción entre condiciones eléctricas, mecánicas y constructivas de la máquina. Asimismo, la evolución paralela observada entre vibración y aceleración respalda el uso de ambas magnitudes como indicadores complementarios de la respuesta mecánica, tal como se ha señalado en estudios de monitoreo vibracional aplicados a motores de inducción. La diferencia entre la estabilidad registrada en vacío y el incremento progresivo observado en las etapas de mayor demanda indica que el comportamiento del motor estuvo marcado por una modificación gradual del régimen dinámico, y no por un cambio brusco o una condición anómala puntual. Esta precisión es necesaria para no sobrevalorar el alcance del estudio. Si bien los incrementos de vibración y aceleración muestran

una respuesta sensible al cambio de condición operativa, por sí solos no demuestran una falla específica, sino que caracterizan experimentalmente la forma en que la máquina responde al incremento de exigencia. Esta interpretación es coherente con la literatura sobre monitoreo de condición, donde se reconoce que la vibración es una variable sensible, pero su lectura debe contextualizarse según el régimen de funcionamiento y el diseño del ensayo [8], [9], [10].

La comparación entre 220 V y 440 V mostró una tendencia global similar, aunque con valores finales ligeramente superiores de vibración y aceleración en 220 V durante las etapas de mayor exigencia. Este comportamiento sugiere que la configuración de alimentación puede asociarse con diferencias observables en la respuesta mecánica final del motor dentro del mismo esquema experimental. Sin embargo, esta diferencia no debe interpretarse como evidencia concluyente de superioridad dinámica de una conexión sobre otra, ya que el diseño del estudio no permitió aislar de forma independiente la contribución de todos los factores electromagnéticos, mecánicos y operativos involucrados. En consecuencia, el hallazgo debe entenderse como una diferencia experimental consistente dentro del marco de ensayo aplicado, no como una generalización absoluta sobre el comportamiento de motores de doble tensión.

La disminución sostenida de la velocidad de giro a medida que aumentó la exigencia operativa, en paralelo con el incremento de las magnitudes vibracionales, refuerza la coherencia interna del comportamiento observado. En este contexto, la reducción de rpm no debe interpretarse como una variable diagnóstica independiente, sino como una magnitud complementaria para contextualizar el cambio mecánico del motor bajo distintas condiciones de operación. Por tanto, el análisis desarrollado permite sostener que la velocidad vibracional y la aceleración fueron variables útiles para caracterizar comparativamente la respuesta mecánica del motor bajo operación en vacío y exigencia operativa creciente, manteniendo correspondencia con el alcance delimitado del estudio.

5. CONCLUSIONES

- El La respuesta mecánica del motor trifásico de inducción presentó una variación sistemática bajo operación en vacío y exigencia operativa creciente, tanto en la configuración de 220 V como en la de 440 V. En ambas condiciones de alimentación, la velocidad vibracional y la aceleración mostraron una tendencia creciente conforme aumentó la exigencia operativa, mientras que la velocidad de giro disminuyó de manera sostenida. Esta correspondencia entre variables

confirma la coherencia interna del comportamiento experimental registrado y la utilidad de las magnitudes vibracionales empleadas para caracterizar la respuesta mecánica del motor bajo regímenes diferenciados de ensayo.

- La comparación entre tensiones reveló un patrón general similar en ambas configuraciones nominales, lo que indica que la respuesta mecánica del motor mantuvo una tendencia estable ante la variación de alimentación cuando se conservaron la duración del ensayo, la frecuencia de registro y el criterio de ajuste operativo. No obstante, en las condiciones más exigentes se registraron valores ligeramente superiores de vibración y aceleración en 220 V con relación a 440 V. Esta diferencia debe interpretarse como un resultado comparativo del esquema experimental aplicado y no como evidencia suficiente para establecer una superioridad generalizable entre configuraciones nominales de tensión.
- El aporte principal del estudio radica en la caracterización comparativa de la respuesta mecánica del motor mediante variables vibracionales medidas directamente bajo un diseño

experimental reproducible. El trabajo no tuvo como propósito identificar una falla particular ni formular un diagnóstico integral de condición, sino establecer una base experimental consistente para comparar el comportamiento vibracional del motor en dos configuraciones de alimentación y bajo etapas sucesivas de mayor exigencia operativa. Desde esta perspectiva, el estudio constituye una referencia útil para trabajos posteriores orientados a profundizar la relación entre tensión de alimentación, condición operativa y respuesta vibracional en máquinas de inducción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, and Steven D. Pekarek, *ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS*, John Wiley & Sons,. Hoboken, New Jersey, 2013.
- [2] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson, 2014.
- [3] H. Amroliya, S. C. Vora, and K. P. Badgujar, "Understanding Frequency Response of Induction Motor Winding through Electromagnetic Wave Equations," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 216–225, Sep. 2023, doi: 10.15598/aeec.v21i3.5029.

- [4] C. Wang and J. C. S. Lai, "VIBRATION ANALYSIS OF AN INDUCTION MOTOR," 1999. [Online]. Available: <http://www.idealibrary.comon>
- [5] S. Zhong and S. Yu, "Analysis on circumferential natural frequencies of stator in permanent magnet synchronous motor," *Journal of Vibroengineering*, vol. 21, no. 2, pp. 431–449, Mar. 2019, doi: 10.21595/jve.2018.19857.
- [6] J. Vance, • Fouad, Z. • Brian, M. Vance, and Z. Murphy, "machinery machinery vibration vibration and and rotordynamics rotordynamics machinery vibration machinery vibration and and rotordynamics rotordynamics," 2010. [Online]. Available: www.rotordynamics.org.
- [7] W. T. Thomson, *Vibration Monitoring of Induction Motors: Practical Diagnosis of Faults via Industrial Case Studies*. Cambridge University Press, 2020. doi: 10.1017/9781108784887.
- [8] P. J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 215–247, 2008, doi: 10.1049/iet-epa:20070280.
- [9] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and • Homayoun Meshgin-Kelk, "ELECTRIC MACHINES ModELINg, CoNdITIoN MoNIToRING, ANd FAuLT dIAgNoSIS."
- [10] E. Stephano and O. Zuñiga, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA ELÉCTRICAS DE POTENCIA TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO."
- [11] B. Ge, J. Zhang, and D. Tao, "Thermal analysis of axial-radial hybrid ventilation motor and stator ventilation channel improvement," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 16, no. 11, pp. 1330–1338, Nov. 2022, doi: 10.1049/elp2.12230.
- [12] O. Badran, H. Sarhan, B. Alomour, and A. Balqà, "THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR."
- [13] Yunyan Xia, Yongming Xu, Mengmeng Ai, and Jinhui Liu, *2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. IEEE, 2018.
- [14] International Organization for Standardization, "Mechanical vibration-Measurement and evaluation of machine vibration-Part 1: General guidelines(E) ii COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT," 2016. [Online]. Available: www.iso.org/iso/standard/preview