

Identificación experimental de una zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica de una centrifuga con soportes flexibles mediante prueba de arranque (Start-up Test)

Experimental identification of a zone potentially associated with the first critical speed of a centrifuge with flexible supports using a start-up test.

DOI: <https://doi.org/10.82951/0eee-cy02>

José Daniel Acosta Robles¹, Mario Alberto de La Cruz Padilla²,

Departamento de Mantenimiento Predictivo, Zucarmex.

José Acosta, dacosta@zucarmex.com, Tecnológico Nacional de México Campus

Tuxtla Gutiérrez Mario alberto de la Cruz, mario.dp@tuxtla.tecnm.mx.

Zucarmex, Planta Ingenio San Cristóbal S.A. de C.V., Veracruz, México.

Autor de correspondencia: dacosta@zucarmex.com

Recibido: 04 de agosto 2026

Aprobado: 16 de septiembre 2026

Publicado: 05 de octubre 2026

Resumen:

La identificación de las velocidades críticas en maquinaria rotativa permite establecer condiciones de operación que reduzcan la amplificación dinámica asociada con fenómenos de resonancia. En este trabajo se determinó experimentalmente la zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica de una centrifuga Western States modelo Titan-1300, utilizada para la separación de masa C y montada sobre soportes flexibles. Para ello, se realizó un análisis transitorio de vibraciones durante el arranque de la máquina, complementado mediante un diagrama de cascada para evaluar la evolución de los componentes espectrales en función de la velocidad de giro.

Los resultados mostraron una zona de máxima respuesta dinámica alrededor de 950 RPM, donde la amplitud global de vibración alcanzó aproximadamente 0.19 in/s, 0-pk, con predominio de la componente correspondiente a la frecuencia de giro (1X). Esta condición se consideró como una zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica del sistema. Al incrementar la velocidad hasta la condición normal de operación, aproximadamente 1450 RPM, la amplitud global de vibración disminuyó hasta aproximadamente 0.05 in/s, 0-pk, evidenciando una reducción significativa de la respuesta vibratoria al operar en una región supercrítica suficientemente alejada de la zona de máxima amplificación.

A partir de estos resultados se estableció un intervalo de velocidad no recomendado alrededor de la región de máxima respuesta dinámica y se definieron criterios operacionales para evitar la permanencia del equipo dentro de dicha región durante las etapas de arranque, operación y paro. Los resultados obtenidos proporcionan información aplicable a los procedimientos de operación y mantenimiento para este caso de estudio en particular.

Palabras clave: Resonancia, frecuencia natural, velocidad crítica, velocidad supercrítica, análisis de vibraciones.

2026 Volumen 1 Número 2	José Daniel Acosta Robles, Mario Alberto de La Cruz Padilla	PÁG. 130
-------------------------------	--	----------

Abstract (English Version)

Identifying critical speeds in rotating machinery enables the establishment of operating conditions that minimize dynamic amplification associated with resonance phenomena. This study experimentally determined the range potentially associated with the first critical speed of a Western States Titan 1300 model centrifuge used for C massecuite separation and mounted on flexible supports. To achieve this, a transient vibration analysis was conducted during machine start-up Test, supplemented by a waterfall plot to evaluate the evolution of spectral components relative to rotational speed.

The results revealed a zone of peak dynamic response around 950 RPM, where the overall vibration amplitude reached approximately 0.19 in/s, 0-pk, dominated by the component corresponding to the rotational frequency (1X). This condition was identified as a zone potentially associated with the system's first critical speed. Upon increasing the speed to the normal operating condition approximately 1450 RPM the overall vibration amplitude dropped to about 0.05 in/s, 0-pk, demonstrating a significant reduction in vibratory response when operating in a supercritical region sufficiently far removed from the zone of maximum amplification.

Based on these results, a speed range to be avoided was established around the region of maximum dynamic response, and operational criteria were defined to prevent the equipment from remaining within that region during start-up, operation, and shutdown. The results obtained provide information applicable to the operation and maintenance procedures for this specific case study.

Keywords: Resonance, natural frequency, critical speed, supercritical speed, vibration analysis.

1. Introducción: identificación de zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica de centrífuga de soportes flexibles.

Las máquinas centrífugas desempeñan una función fundamental en los ingenios azucareros, ya que permiten separar los cristales de azúcar de la melaza o miel remanente mediante la aplicación de fuerzas centrífugas generadas por la rotación a alta velocidad. Este proceso de purga y lavado constituye una etapa esencial para la obtención del producto sólido comercial y para la separación de los subproductos resultantes del proceso.

Diversas investigaciones han abordado el comportamiento dinámico de rotores y la determinación de sus velocidades críticas. Entre ellas se encuentra el trabajo desarrollado por Fernando Palmieri, Darío Violante y Andreas Klempnow, en el que se analiza la variación de las velocidades críticas de un rotor asociada con cambios en la rigidez de los cojinetes mediante fundamentos de dinámica de rotores [14]. A diferencia de los enfoques predominantemente analíticos, el presente trabajo aborda la identificación experimental de una región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica mediante técnicas de análisis de vibraciones aplicadas directamente en campo.

Para el desarrollo del estudio se empleó una prueba de arranque (*Start-up Test*), consistente en registrar de manera continua la respuesta vibratoria de la máquina desde el estado de reposo hasta alcanzar su velocidad de operación. Esta técnica permite analizar el comportamiento dinámico transitorio del sistema en función de la velocidad de giro e identificar zonas de incremento de amplitud asociadas con posibles velocidades críticas y fenómenos de resonancia [1], [3], [8].

Como herramienta complementaria se utilizó el diagrama de cascada (*Waterfall Plot*), una representación tridimensional que integra múltiples espectros de frecuencia obtenidos secuencialmente durante la variación de velocidad de la máquina. Esta representación permite observar la evolución de los componentes espectrales durante el arranque o paro del equipo y

facilita la identificación de incrementos de amplitud relacionados con la velocidad de giro y con otras componentes dinámicas presentes en el sistema [9].

A partir de los resultados obtenidos se establece una zona de operación alejada de la región de máxima respuesta dinámica potencialmente asociada con la primera velocidad crítica, delimitando rangos de velocidad orientados a reducir la respuesta vibratoria del equipo. Estos resultados sirven como referencia para establecer criterios de operación durante el arranque, funcionamiento y paro de la centrífuga.

El objetivo de este estudio es identificar experimentalmente la zona de máxima respuesta dinámica potencialmente asociada con la primera velocidad crítica del conjunto centrífuga-soportes flexibles mediante una prueba transitoria de arranque (*Start-up Test*), utilizando el seguimiento de la componente (1X) y el análisis mediante un diagrama de cascada (*Waterfall Plot*). Como contribución práctica, los resultados permiten establecer criterios de operación relacionados con la programación de velocidades del VFD y con las estrategias de mantenimiento, orientados a reducir la permanencia del equipo dentro de regiones de elevada respuesta vibratoria.

2. Metodología.

2.1 Centrífuga Western States modelo Titan - 1300, separadora de masa de C.

El caso de estudio se centra en una máquina centrífuga Western States modelo Titan -1300, utilizada para la separación de masa C. El equipo dispone de un eje vertical soportado mediante dos rodamientos 7220-BECBM y un rodamiento 22217-CCW33, montados sobre soportes flexibles. El conjunto sostiene una canasta de 800 mm de altura y 1300 mm de diámetro. El cabezal está acoplado a un motor de inducción de 125 HP, con una velocidad nominal de 1785 RPM. Mediante la relación de transmisión por poleas se obtiene una velocidad máxima aproximada de 1450 RPM en la canasta. Adicionalmente, la velocidad de operación puede modificarse mediante un variador de frecuencia, VFD (*Variable Frequency Drive*). La máquina se encuentra instalada en un ingenio azucarero productor de azúcar estándar en México.

La función de la máquina, mostrada en la Figura 1, consiste en separar los sólidos presentes en la masa C mediante la aplicación de fuerza centrífuga. El conjunto eje-canasta está soportado mediante elementos flexibles, cuya configuración permite el desplazamiento dinámico del sistema durante las etapas transitorias de operación. Debido a esta característica, la respuesta vibratoria puede experimentar incrementos de amplitud cuando la frecuencia de excitación se aproxima a una frecuencia natural del conjunto, particularmente durante el proceso de aceleración hasta alcanzar la velocidad normal de operación [1], [3], [10].



Figura 1: Envolverte y canasta de la centrífuga modelo Titan-1300.

Para la adquisición de la señal de vibración se utilizó un acelerómetro triaxial con sensibilidad de 100 mV/g, instalado sobre el soporte de los rodamientos. La velocidad de giro de la canasta se monitoreó mediante un tacómetro óptico, utilizando una cinta reflectante colocada sobre el elemento rotativo como referencia. Esta configuración permitió registrar simultáneamente la respuesta vibratoria y la velocidad de rotación durante la prueba transitoria. Para el análisis presentado en este trabajo se utilizó principalmente la componente de vibración registrada en sentido horizontal, correspondiente a la dirección en la que se observó la respuesta vibratoria de mayor interés para el caso estudiado.

2.2 Prueba de arranque (Start-up Test).

La prueba de arranque (*Start-up Test*) consiste en registrar de manera continua la respuesta vibratoria de una máquina desde el estado de reposo hasta alcanzar su velocidad normal de operación [8]. El mismo principio puede aplicarse durante una prueba de paro, siguiendo la evolución de la respuesta dinámica conforme disminuye la velocidad de rotación.

En este estudio, la prueba se utilizó para analizar el comportamiento dinámico transitorio de la centrífuga y determinar la variación de la componente de vibración correspondiente a la frecuencia de giro (1X) en función de la velocidad. El seguimiento simultáneo de la amplitud y la velocidad de rotación, complementado con información de fase cuando esta se encuentra disponible, permite identificar zonas de incremento de la respuesta vibratoria potencialmente asociadas con velocidades críticas del sistema.

2.2.1 Recopilación de datos

La adquisición de datos se inició antes del movimiento de la canasta y se mantuvo durante todo el proceso de aceleración hasta alcanzar una condición estable de operación. Durante la prueba se registraron simultáneamente la señal de vibración y la velocidad de giro, con el propósito de relacionar la evolución de la respuesta dinámica con las RPM instantáneas del equipo.

2.2.2 Configuración de instrumentación

- Analizador multicanal para la adquisición y procesamiento de las señales de vibración.
- Acelerómetro triaxial instalado sobre el soporte de los rodamientos para el registro de la respuesta vibratoria.
- Tacómetro óptico sincronizado mediante una cinta reflectante colocada en el elemento rotativo, utilizado como referencia de velocidad.
- Registro de las señales iniciado antes de la aceleración de la máquina, con el propósito de capturar el comportamiento transitorio desde las primeras revoluciones.

2.2.3 Mediciones requeridas

2026 Volumen 1 Número 2	José Daniel Acosta Robles, Mario Alberto de La Cruz Padilla	PÁG. 133
-------------------------------	--	----------

- **Vibración:** registro continuo de la respuesta vibratoria en el punto de medición seleccionado sobre el soporte de los rodamientos.
- **Velocidad:** registro sincronizado de la velocidad de rotación mediante referencia de tacómetro, permitiendo relacionar cada lectura de vibración con las RPM instantáneas.
- **Duración:** registro del transitorio completo, desde el inicio de la aceleración hasta alcanzar la condición estable de operación.
- **Muestreo:** adquisición de datos con una resolución suficiente para seguir la evolución de la componente correspondiente a la frecuencia de giro (1X) durante el cambio de velocidad.

Para este caso se utilizó un analizador de vibraciones Adash de cuatro canales, con capacidad para registrar de manera sincronizada amplitud, fase y velocidad de rotación. La señal de referencia proporcionada por el tacómetro óptico permitió realizar el seguimiento de la componente (1X) a medida que aumentaba la velocidad del rotor. Los datos obtenidos fueron utilizados para construir las gráficas de amplitud en función de la velocidad y para analizar la respuesta dinámica de la máquina durante el transitorio.

Aunque el analizador empleado dispone de capacidad para registrar información de fase, durante la prueba analizada la disponibilidad de esta variable fue parcial debido a restricciones asociadas con el licenciamiento del software. Por esta razón, el análisis se fundamentó principalmente en la evolución de la amplitud de la componente (1X) y su relación con la velocidad de rotación, utilizando el diagrama de cascada como herramienta complementaria.

2.2.4 Identificación de zonas potencialmente asociadas con velocidades críticas.

- Los máximos locales de amplitud de la componente (1X) se consideran indicadores de zonas potencialmente asociadas con velocidades críticas [1], [3], [7].
- La presencia de una variación significativa de fase constituye un criterio complementario para la identificación de resonancia cuando dicha información está disponible [1], [3].
- Se analiza la respuesta dinámica en todo el intervalo comprendido entre 0 RPM y la velocidad final de operación.
- Los valores obtenidos se comparan con la evolución espectral observada en el diagrama de cascada.

2.2.5 Validación del procedimiento de arranque

2026 Volumen 1 Número 2	José Daniel Acosta Robles, Mario Alberto de La Cruz Padilla	PÁG. 134
-------------------------------	--	----------

- Verificar que la aceleración permita atravesar las zonas de máxima respuesta dinámica sin mantener la máquina operando de forma prolongada dentro de ellas.
- Evaluar la evolución de la amplitud de vibración durante el proceso transitorio e identificar incrementos significativos asociados con regiones de máxima respuesta dinámica.
- Identificar rangos de velocidad que deban evitarse durante la operación continua del equipo.

2.2.6 Evaluación periódica

- Realizar pruebas transitorias de arranque o paro de forma periódica para comparar la respuesta dinámica del equipo con valores de referencia.
- Evaluar posibles desplazamientos de la zona de máxima respuesta asociados con cambios en la rigidez, masa o condición mecánica del sistema.
- Analizar tendencias de amplitud que permitan identificar una degradación progresiva del comportamiento dinámico del equipo.

2.2.7 Solución de problemas

En condiciones de velocidad constante, el análisis de vibraciones permite evaluar la respuesta del equipo bajo un régimen de operación específico. Sin embargo, durante el arranque o paro, la variación progresiva de la velocidad permite observar la evolución de la respuesta dinámica en un intervalo amplio de frecuencias de excitación [2], [3].

Este tipo de análisis facilita la identificación de zonas donde la amplitud de vibración presenta incrementos significativos y permite relacionarlas con la velocidad de giro del rotor. Asimismo, proporciona información útil para evaluar la severidad de la respuesta dinámica y establecer rangos de velocidad que deban evitarse durante la operación continua [1], [2], [7].

2.3 Diagrama de cascada (Waterfall Plot).

A partir de los datos obtenidos durante la prueba de arranque se construye el diagrama de cascada (*Waterfall Plot*), una representación tridimensional que integra múltiples espectros de frecuencia obtenidos secuencialmente conforme cambia la velocidad de la máquina [9]. Esta herramienta permite observar la evolución de los componentes de vibración durante el proceso transitorio y analizar los cambios de amplitud asociados con la velocidad de giro.

2.3.1 Recopilación de Datos

Para la generación del diagrama de cascada se utilizaron los datos adquiridos durante la prueba de arranque mediante la instrumentación descrita previamente. Los espectros de frecuencia obtenidos en diferentes instantes del proceso de aceleración se organizaron en función de la velocidad de rotación, permitiendo analizar simultáneamente la evolución de la frecuencia, la amplitud de vibración y las RPM de la máquina.

2.3.2 Presentación del gráfico

El diagrama de cascada incorpora una tercera variable a la representación convencional del espectro de frecuencia. Mientras que un espectro FFT representa la amplitud en función de la frecuencia para una condición determinada, el diagrama de cascada organiza secuencialmente

múltiples espectros en función del tiempo o de la velocidad de rotación. De esta manera, es posible visualizar la evolución del contenido espectral durante el proceso transitorio.

Eje X (Frecuencia): representa el contenido espectral de la señal de vibración, expresado en Hz o en órdenes de la velocidad de giro cuando se utiliza seguimiento de órdenes.

Eje Y (Amplitud): representa la magnitud de cada componente espectral, expresada en unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración, según la variable analizada.

Eje Z (Tiempo o RPM): representa la variable utilizada para ordenar secuencialmente los espectros. En este estudio, la evolución se analiza principalmente en función de la velocidad de rotación de la máquina.

2.3.3 Interpretación del diagrama de cascada.

La interpretación del diagrama de cascada se basa en el seguimiento de los componentes espectrales y en la identificación de regiones donde se presentan incrementos significativos de amplitud.

Líneas de orden (crestas diagonales):

Las componentes relacionadas con la velocidad de giro evolucionan en frecuencia conforme aumenta la velocidad de rotación de la máquina, por lo que pueden observarse como trayectorias diagonales en el diagrama de cascada.

La componente de primer orden (1X) corresponde a una frecuencia igual a la velocidad de giro del rotor y constituye una de las principales referencias para el análisis de la respuesta síncrona del sistema [1], [2], [3].

Las componentes de órdenes superiores, como (2X), (3X) y sucesivas, corresponden a múltiplos enteros de la frecuencia de rotación y pueden estar asociadas con diferentes fenómenos dinámicos o mecánicos [2], [3].

Resonancias (crestas de frecuencia aproximadamente constante):

Las respuestas asociadas con frecuencias naturales del sistema pueden manifestarse como regiones de amplificación localizadas alrededor de una frecuencia aproximadamente constante. Cuando una componente de excitación dependiente de la velocidad, como (1X), se aproxima a una frecuencia natural del sistema, puede producirse un incremento significativo de la amplitud vibratoria [1], [6], [10], [11].

La velocidad de rotación correspondiente a esta condición constituye una zona potencialmente asociada con una velocidad crítica [4], [5], [7], [12]. Su identificación se complementa mediante el análisis de la evolución de la amplitud y, cuando se dispone de la información necesaria, de la fase de la respuesta vibratoria.

2.3.4 Información a obtener.

- Visualización conjunta de frecuencia, velocidad de rotación y amplitud de vibración.
- Seguimiento de la evolución espectral durante el proceso de arranque.
- Identificación de la componente (1X) y de su evolución conforme aumenta la velocidad de giro.
- Identificación de regiones de frecuencia donde se producen incrementos significativos de la respuesta vibratoria.
- Correlación entre los incrementos de amplitud de la componente (1X) y la velocidad de rotación para identificar zonas potencialmente asociadas con velocidades críticas.

3. Caso de estudio: incremento de vibración en una centrífuga con soportes flexibles asociado con la modificación de la velocidad de operación.

Durante un ajuste operativo, la velocidad de la centrífuga fue modificada mediante el variador de frecuencia (VFD), pasando de una condición de operación de aproximadamente 1450 RPM a 950 RPM. Al establecerse esta nueva velocidad se observó un incremento significativo de la respuesta vibratoria del equipo, perceptible tanto en la estructura como en las tuberías del área.

El espectro de vibración obtenido en sentido horizontal mostró una amplitud global aproximada de 0.19 in/s, 0-pk, con predominancia de la componente correspondiente a la frecuencia de giro (1X), como se muestra en la Figura 2. Antes de la modificación de velocidad, el equipo presentaba una condición vibratoria estable. La aparición del incremento de amplitud al operar alrededor de 950 RPM sugirió la proximidad de una condición de amplificación dinámica asociada con la velocidad de rotación, por lo que se consideró necesario realizar un análisis transitorio para evaluar la presencia de una zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica.



Figura 2: Espectro de vibración de la canasta a 950 RPM, en sentido horizontal.

Los parámetros de adquisición empleados durante la prueba se muestran en la Figura 3. Para el registro de vibración en velocidad se configuró un intervalo de frecuencia de 10 a 1600 Hz, con 1600 líneas espectrales y ventana Hanning. Estos parámetros proporcionaron la resolución necesaria para identificar y realizar el seguimiento de la componente correspondiente a la frecuencia de giro (1X) durante la variación de velocidad de la máquina.

Espectro celda de datos

Nombre

[ID: 22,544]

HORIZONTAL Z

Aceptar

Cancelar

Plantilla de lectura (solo disponible para celda vacía)

ARTICLO

Eliminar plantilla

Guardar como plantilla

Propiedades

Ruta

Bandas

Límites

Datos

Referencia

Tipo	Valor
Cantidad	Velocidad [ips]
Entrada	Z
Fmin[Hz]	10
Rango[Hz]	1,600
Líneas	1,600
Tipo de ventana	Hanning
Tipo de promedio (AVG)	Lineal
Avg	Off
Overlap	0%
Tiempo estimado de medición	1 s

Figura 3: Parámetros seleccionados para la prueba de arranque y obtención de datos.

4. Resultados del caso de estudio: detección de una zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica de una centrifuga con soportes flexibles.

Para identificar la zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica del sistema se realizó un análisis transitorio de vibraciones durante el proceso de arranque, desde 0 RPM hasta alcanzar la velocidad normal de operación, cercana a 1450 RPM. Durante este proceso se realizó el seguimiento de la amplitud correspondiente a la componente de frecuencia de giro (1X) en función de la velocidad de rotación.

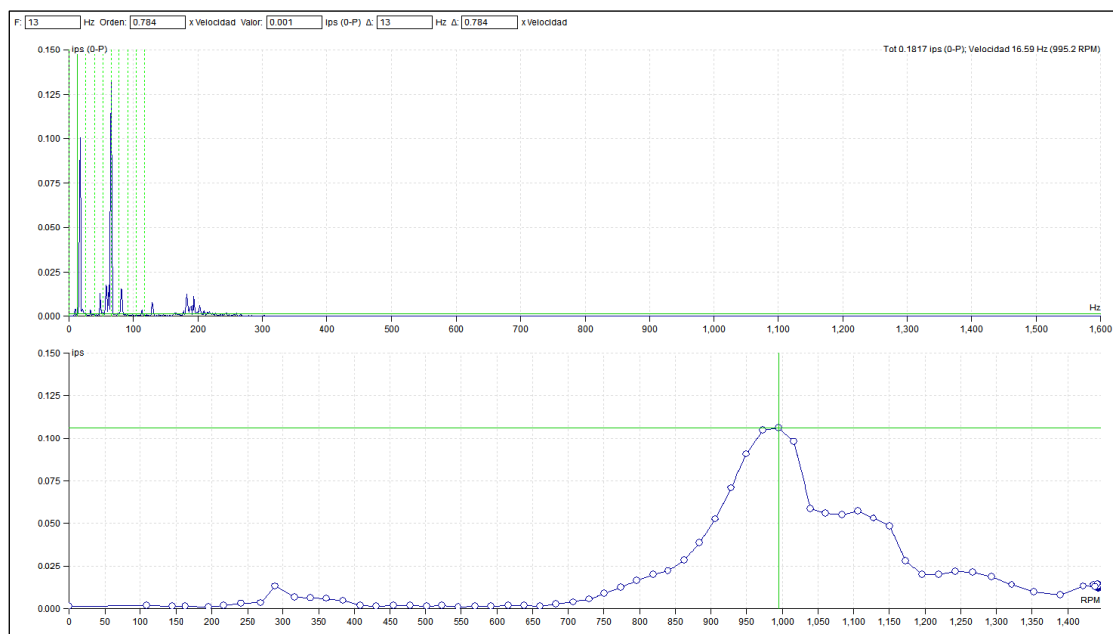


Figura 4: Gráfica resultante de la prueba de arranque (Start-up Test) de 0 RPM a 1450 RPM.

La Figura 4 muestra la evolución de la amplitud de vibración durante la prueba de arranque. A bajas velocidades, la componente (1X) mantiene amplitudes relativamente reducidas; sin embargo, conforme aumenta la velocidad de rotación, se observa un incremento progresivo de la respuesta vibratoria hasta alcanzar un máximo alrededor de 950 RPM. Aunque la respuesta en amplitud es evidente en esta zona, no puede establecerse como una determinación modal inequívoca debido a que no se dispone de información completa de fase.

Una vez superada esta velocidad, la amplitud de vibración disminuye progresivamente conforme el sistema continúa acelerando hasta alcanzar la condición final de operación. Este comportamiento evidencia una zona de máxima amplificación dinámica asociada con la velocidad de giro y resulta consistente con la proximidad a una posible primera velocidad crítica del sistema [4], [5], [7], [12].

Tomando como referencia como zona potencialmente asociada a la primera velocidad crítica, 950 RPM, un margen de separación del 20 % delimita un intervalo aproximado entre 760 y 1140 RPM. Estos valores se utilizaron como referencias iniciales para establecer una zona de operación alejada del máximo de respuesta observado. No obstante, la condición final de operación utilizada en este caso fue aproximadamente 1450 RPM, valor considerablemente superior a dicho intervalo. Este margen constituye un criterio operacional conservador definido específicamente para el equipo analizado y no pretende establecer un límite normativo ni un criterio general aplicable a otras máquinas.

El comportamiento observado en la prueba de arranque se complementó mediante el análisis del diagrama de cascada (*Waterfall Plot*). Esta representación permitió seguir la evolución de la componente (1X) durante el incremento de velocidad e identificar la región donde su amplitud presenta la mayor amplificación. Una vez superada dicha región, la amplitud disminuye progresivamente hasta alcanzar una condición más estable.

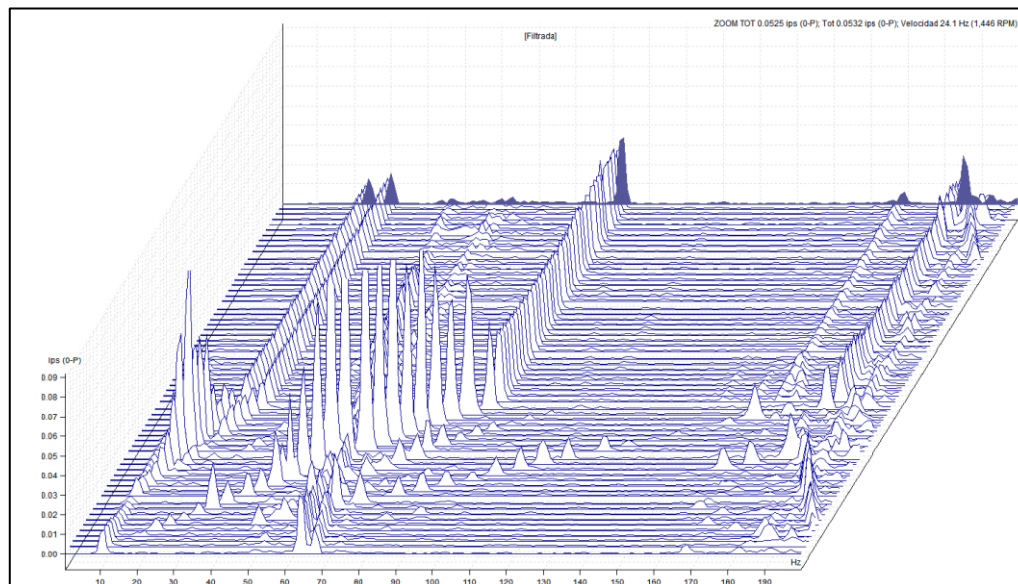


Figura 5: Espectro en cascada (*Waterfall Plot*) obtenido durante la prueba de arranque.

En el espectro en cascada (*Waterfall Plot*) mostrado en la Figura 5 se observa la evolución de la componente correspondiente a la frecuencia de giro (1X) durante el proceso de aceleración. La amplitud de esta componente presenta un incremento significativo en la región asociada con aproximadamente 950 RPM, en concordancia con el máximo identificado en la prueba de arranque. Aunque la respuesta en amplitud es evidente en esta zona, no puede establecerse como una respuesta modal inequívoca debido a que no se dispone de información completa de fase.

Asimismo, se observan otras componentes espectrales cuya amplitud varía durante el transitorio. Sin embargo, la respuesta predominante asociada con la condición analizada corresponde a la componente (1X). Al superar la región de máxima amplificación, la respuesta vibratoria disminuye conforme aumenta la velocidad de rotación.

Posteriormente, la velocidad de operación se estableció nuevamente alrededor de 1450 RPM, condición ubicada por encima de la región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica. El espectro de vibración obtenido en esta condición mostró una amplitud global aproximada de 0.05 in/s, 0-pk, considerablemente inferior al valor de aproximadamente 0.19 in/s, 0-pk registrado alrededor de 950 RPM. Esta reducción, equivalente a aproximadamente 74 %, indica que la operación a 1450 RPM se encuentra suficientemente alejada de la región de máxima respuesta dinámica observada durante el análisis transitorio.

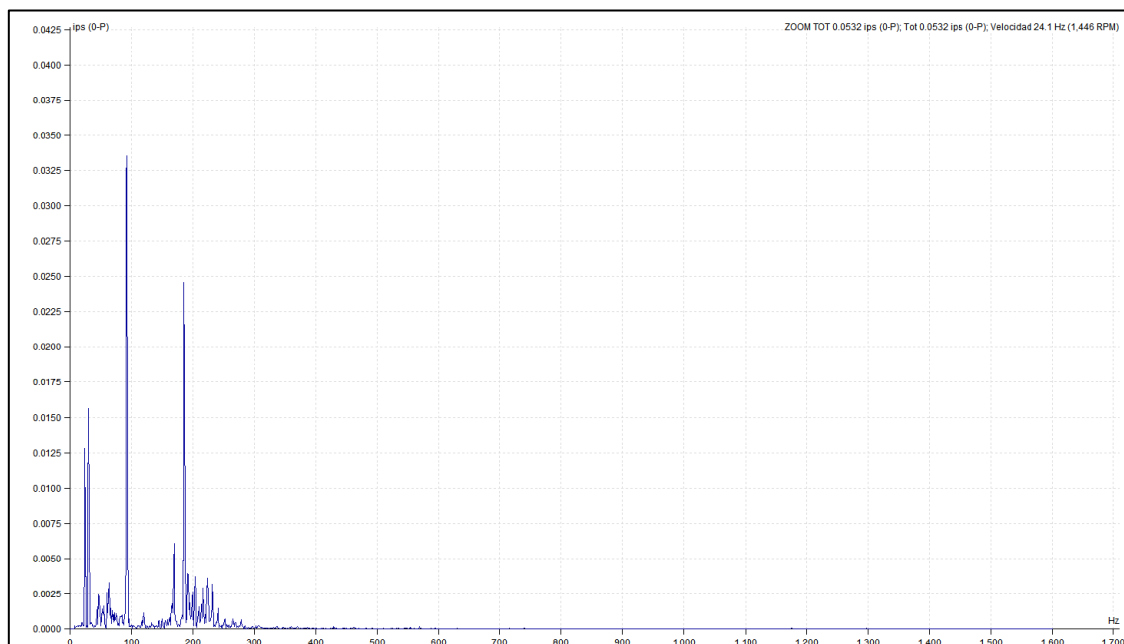


Figura 6: Espectro de vibración de canasta a 1450 RPM en sentido horizontal.

La Tabla 1 resume las principales condiciones evaluadas y permite comparar la velocidad de rotación, la frecuencia correspondiente a la componente (1X) y la amplitud global de vibración registrada en la zona de máxima respuesta y en la condición final de operación.

Condición	Velocidad [RPM]	Frecuencia 1X [CPM]	Vibración global [in/s, 0-pk]	Observación
Inicial / problemática	≈ 950	≈ 950	≈ 0,19	Zona de máxima respuesta / región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica
Operación final	≈ 1450	≈ 1450	≈ 0,05	Condición alejada de la región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica

Tabla 1: Resumen de los resultados de la prueba.

5. Discusión, limitaciones e implicaciones para la aplicación industrial

5.1 Consideraciones operacionales

Cuando la frecuencia de excitación asociada con la velocidad de giro se aproxima a una frecuencia natural del conjunto rotor-estructura, puede producirse un incremento significativo de la respuesta vibratoria. La magnitud de esta amplificación depende de las propiedades dinámicas del sistema, principalmente de su masa, rigidez y amortiguamiento. En una máquina con soportes flexibles, este comportamiento resulta especialmente relevante durante las etapas transitorias de aceleración y desaceleración, cuando la frecuencia de excitación atraviesa diferentes regiones del espectro dinámico [1], [3], [6], [10].

En el caso analizado, durante la prueba transitoria de arranque se observó una región de máxima respuesta dinámica alrededor de 950 RPM, caracterizada por un incremento predominante de la componente (1X). Este comportamiento es consistente con la proximidad a una posible primera velocidad crítica del conjunto centrífuga-soportes flexibles. Sin embargo, debido a que no se dispuso de información completa de fase durante el transitorio, esta condición se considera una zona potencialmente asociada con la primera velocidad crítica y no una determinación modal inequívoca. Por esta razón, resulta conveniente evitar la operación continua dentro de la región donde se presenta la mayor amplificación de vibración.

La norma ISO 20816-3 [15] se considera en este trabajo como marco de referencia complementario para la evaluación de vibraciones en maquinaria industrial. Debido a que la aplicación de sus criterios depende de la clasificación, configuración de soporte y condiciones particulares de la máquina, los valores experimentales obtenidos en este estudio no se interpretan directamente como límites normativos de aceptación. La comparación cuantitativa presentada se realiza entre las diferentes condiciones experimentales de velocidad analizadas.

A diferencia de los sistemas diseñados para operar por debajo de su primera velocidad crítica, algunas máquinas con rotores y soportes flexibles pueden operar de manera estable en régimen supercrítico, siempre que las velocidades críticas sean atravesadas durante los procesos transitorios sin permanecer de forma prolongada dentro de las regiones de máxima respuesta dinámica [4], [5], [7], [12]. Por ello, se deben considerar los siguientes aspectos:

- La velocidad de operación continua debe mantenerse suficientemente alejada de la región de máxima respuesta dinámica. Para el presente caso se adoptó un margen de separación del 20 % respecto de la velocidad correspondiente a la máxima respuesta dinámica observada. Este margen constituye un criterio operacional conservador definido específicamente para el equipo analizado y no pretende establecer un límite normativo ni un criterio general aplicable a otras máquinas. Tomando como referencia aproximadamente 950 RPM, el intervalo resultante se encuentra entre aproximadamente 760 y 1140 RPM.
- La condición normal de operación evaluada se estableció alrededor de 1450 RPM, por encima del intervalo definido como no recomendado. En esta condición se registró una amplitud global aproximada de 0.05 in/s, 0-pk, considerablemente inferior al valor aproximado de 0.19 in/s, 0-pk observado alrededor de 950 RPM. La comparación entre ambas condiciones muestra una reducción aproximada del 74 % de la respuesta vibratoria, lo que evidencia que la operación evaluada a 1450 RPM se encuentra suficientemente alejada de la región de máxima amplificación identificada durante el análisis transitorio.
- Durante las etapas de arranque y paro se recomienda minimizar el tiempo de permanencia dentro de la región de máxima respuesta dinámica. La programación adecuada de las rampas de aceleración y desaceleración mediante el variador de frecuencia (VFD) permite atravesar este intervalo de manera controlada, reduciendo la exposición del sistema a amplitudes elevadas de vibración y limitando la acumulación de ciclos de carga dinámica [7], [11], [13].

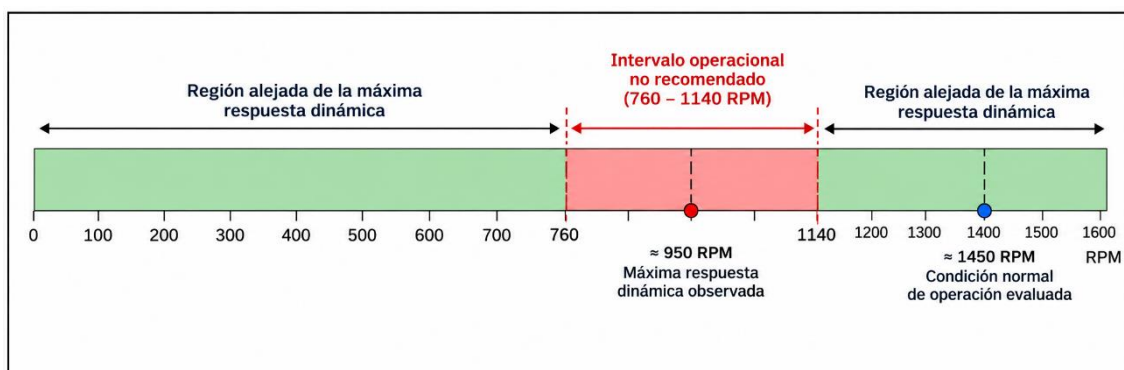


Figura 7: Intervalo operacional definido a partir de la región de máxima respuesta dinámica observada en la centrífuga utilizada para masa C.

5.2 Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones del estudio fue la disponibilidad parcial de funciones avanzadas del analizador de vibraciones debido a restricciones asociadas con el licenciamiento del software. Esta condición limitó el análisis detallado de la evolución de fase durante la prueba transitoria.

Debido a esta limitación, la identificación de la región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica se fundamentó principalmente en la evolución de la amplitud de la componente (1X) y en su comportamiento observado mediante el diagrama de cascada (*Waterfall Plot*). La incorporación de información completa de fase permitiría fortalecer la caracterización dinámica del sistema en estudios posteriores.

5.3 Implicaciones para la operación y mantenimiento.

La combinación de la prueba de arranque (*Start-up Test*) y el diagrama de cascada (*Waterfall Plot*) permitió evaluar la respuesta dinámica del equipo durante una condición transitoria real de operación e identificar de manera consistente la región de máxima amplificación.

El procedimiento permite relacionar directamente la evolución de la componente (1X) con la velocidad de rotación, proporcionando información útil para establecer criterios de operación del equipo.

La metodología utilizada puede aplicarse a otras máquinas rotativas con configuraciones dinámicas similares, considerando las características particulares de instrumentación y operación de cada equipo.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos se proponen acciones orientadas a mejorar la gestión de mantenimiento y confiabilidad del equipo. Estas medidas deberán evaluarse técnicamente antes de su implementación y pueden incorporarse progresivamente dentro de los planes de mantenimiento y control operacional.

- **Estandarización de procedimientos operativos:** Con base en la región de máxima respuesta identificada experimentalmente, se recomienda documentar y estandarizar los

parámetros de velocidad, aceleración y desaceleración utilizados durante la operación del equipo, considerando las características particulares de cada máquina.

- **Balanceo dinámico en sitio:** Dado el predominio de la componente (1X) observado en la región de máxima respuesta, se recomienda verificar periódicamente la condición de balanceo de la canasta y evaluar, cuando el diagnóstico lo justifique, la ejecución de un balanceo dinámico de precisión. La reducción del desbalance residual puede disminuir la fuerza de excitación síncrona y, consecuentemente, la amplitud de la respuesta (1X) durante el cruce de la región de máxima amplificación [1], [2], [3].
- **Monitoreo continuo:** Considerar la instalación permanente de sensores de vibración en los soportes de los rodamientos para el monitoreo continuo de la respuesta vibratoria, considerando los criterios técnicos y normativos que resulten aplicables a la configuración específica del equipo [15].
- **Programación de “Skip Frequencies” (frecuencias de salto):** Debido a que la máxima amplificación de la respuesta vibratoria se observó alrededor de 950 RPM, se recomienda programar el VFD para minimizar el tiempo de permanencia dentro del intervalo de 760–1140 RPM durante las etapas de aceleración y desaceleración.
- **Límites de enclavamiento (interlocks):** Considerando el incremento significativo de vibración observado en la región cercana a 950 RPM, se recomienda evaluar restricciones de control que eviten establecer de manera prolongada velocidades dentro del intervalo definido como no recomendado.
- **Actualización del AMEF (FMEA):** Incorporar la condición de elevada vibración asociada con la proximidad a la región potencialmente asociada con la primera velocidad crítica dentro del análisis de modos y efectos de falla, considerando la valoración y seguimiento de las acciones propuestas.

6. Conclusiones.

1. El análisis transitorio de vibraciones durante el arranque permitió identificar una región de máxima respuesta dinámica alrededor de 950 RPM, caracterizada por el predominio de la componente (1X). Debido a la ausencia de información completa de fase, esta región se considera potencialmente asociada con la primera velocidad crítica del conjunto centrífuga-soportes flexibles, sin establecerla como una determinación modal inequívoca.

2. Al incrementar la velocidad desde aproximadamente 950 RPM hasta la condición normal de operación cercana a 1450 RPM, la amplitud global de vibración disminuyó de aproximadamente 0.19 in/s, 0-pk a 0.05 in/s, 0-pk, lo que representa una reducción cercana al 74 % y evidencia una respuesta vibratoria considerablemente menor al operar alejado de la región de máxima amplificación.

3. Para el caso estudiado se adoptó como criterio operacional conservador un margen de separación del 20 % respecto de la velocidad correspondiente a la máxima respuesta dinámica observada, aproximadamente 950 RPM, delimitando un intervalo aproximado de 760–1140 RPM. En consecuencia, se recomienda evitar la operación continua y minimizar el tiempo de permanencia dentro de este intervalo durante los procesos de aceleración y desaceleración.

4. Los resultados proporcionan criterios técnicos para la programación del VFD y para el desarrollo de estrategias de mantenimiento, incluyendo frecuencias de salto, restricciones de operación, monitoreo de vibraciones, balanceo dinámico y actualización del AMEF/FMEA.

7. Referencias.

- [1] R. L. Eshleman, Vibraciones básicas de máquinas: Una introducción a la prueba de maquinaria, análisis y monitoreo. Clarendon Hills, IL, EE. UU.: VIPress, 2002.
- [2] D. O. Bukowitz K., Diagnóstico de fallas en máquinas mediante análisis de vibraciones: 16 casos de estudio. Maracaibo, Venezuela: Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 2002.
- [3] R. K. Mobley, Vibration Fundamentals. Boston, MA, EE. UU.: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [4] L. A. Saavedra Collazos, "Velocidades críticas en ejes," Trabajo de grado en Ingeniería Mecánica, Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 1984.
- [5] F. Palmieri, L. D. Violante y A. E. Klempnow, "Aplicación del método de la matriz de transferencia para la determinación de las formas modales y velocidades críticas en rotores flexibles," en III Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM 2012), Buenos Aires, Argentina, 2012.
- [6] C. E. Torres, "Resonancia de maquinaria," Power-MI. [En línea]. Disponible en: <https://www.power-mi.com/es/content/resonancia-de-maquinaria>. [Consultado: septiembre 2022].
- [7] M. A. Mohamed, "Understanding Critical Speed in Rotating Machinery," CBM Connect, 19 feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cbmconnect.com/understanding-critical-speed-in-rotating-machinery/>. [Consultado: marzo 2025].
- [8] Vibromera, "Análisis de arranque: Guía de pruebas de vibración en puesta en marcha," Vibromera, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://vibromera.eu/es/glossary/run-up-analysis/>. [Consultado: agosto 2026].
- [9] Vibromera, "Comprensión de los diagramas de cascada," Vibromera, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://vibromera.eu/es/glossary/cascade-plot/>. [Consultado: agosto 2026].
- [10] T. Erbesd, "Resonancia y frecuencia natural," Erbesd Instruments, 5 feb. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.erbesd-instruments.com/es/articulos/resonancia-frecuencia-natural/>. [Consultado: agosto 2026].
- [11] J. Evans, "Resonant Frequency & Critical Speed," Pumps & Systems, 17 dic. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.pumpsandsystems.com/article/resonant-frequency-and-critical-speed/>. [Consultado: julio 2026].
- [12] C. Labowsky, "Undamped Critical Speeds for Simple Rotors – Plus Cheat Sheet," enDAQ. [En línea]. Disponible en: <https://blog.endaq.com/undamped-critical-speeds-for-simple-rotors>. [Consultado: septiembre 2026].
- [13] Predyc, "El riesgo de las frecuencias de resonancia en máquinas," Predyc, 9 ene. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://predyc.com/blog/frecuencias-resonancia>. [Consultado: septiembre 2026].
- [14] F. Palmieri, L. D. Violante y A. E. Klempnow, "Análisis de variaciones de las velocidades críticas de un rotor producto de cambios de rigidez de los cojinetes," en Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM 2016), Buenos Aires, Argentina, 2016.
- [15] International Organization for Standardization, ISO 20816-3:2022, Mechanical vibration—Measurement and evaluation of machine vibration—Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. Ginebra, Suiza: ISO, 2022.

Declaración ética

Conflicto de Interés: Nada que declarar. **Financiamiento:** Nada que declarar. **Revisión por Pares:** Doble ciego.



Todo el contenido de la RIMCEO — Revista de Activos de Ingeniería en Mantenimiento, Confiabilidad y Excelencia Operacional, está licenciada bajo Creative Commons, a menos que se especifique lo contrario o se trate de contenido recuperado de otras fuentes bibliográficas.

2026 Volumen 1 Número 2	José Daniel Acosta Robles, Mario Alberto de La Cruz Padilla	PÁG. 145
-------------------------------	--	----------