



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN SISTEMAS MECÁNICOS DESBALANCEADOS, MEDIANTE UN BANCO DE PRUEBAS

**EXPERIMENTAL STUDY OF ENERGY CONSUMPTION
IN UNBALANCED MECHANICAL SYSTEMS, USING A
TEST BENCH**

Ariel Pablo Mamani Duran

Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

Alejandro Martín Mayori Machica

Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

Estudio Experimental del Consumo Energético en Sistemas Mecánicos Desbalanceados, Mediante un Banco de Pruebas

Ariel Pablo Mamani Duran¹

apmamani4@umsa.com

<https://orcid.org/0009-0006-2087-9261>

Facultad de Ingeniería

Universidad Mayor de San Andrés- UMSA
Bolivia

Alejandro Martín Mayori Machica

amayori@umsa.bo

<https://orcid.org/0009-0009-9744-1147>

Facultad de Ingeniería

Universidad Mayor de San Andrés -UMSA
Bolivia

RESUMEN

El presente trabajo analiza el efecto del desbalance mecánico sobre el consumo energético en sistemas rotativos, a partir de ensayos realizados en un banco de pruebas bajo condiciones controladas. Para ello, se generaron distintos niveles de desbalance mediante la incorporación de masas en el rotor, registrándose variables como el consumo eléctrico, la velocidad de operación y los niveles de vibración. Se realizaron comparaciones entre el estado balanceado y diferentes condiciones de desbalance, con el fin de identificar variaciones en el comportamiento del sistema. Los resultados muestran una tendencia clara de aumento en el consumo energético a medida que se incrementa el desbalance, así como una relación directa con el crecimiento de las vibraciones. Asimismo, se evidenció que incluso pequeñas desviaciones en el balance pueden influir en la eficiencia del sistema. En este sentido, se resalta la importancia del control del desbalance como parte de las estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar el rendimiento energético.

Palabras clave: desbalance mecánico; consumo energético; sistemas rotativos; vibraciones.

¹ Autor principal.

Correspondencia: apmamani4@umsa.com

Experimental Study of Energy Consumption in Unbalanced Mechanical Systems, Using a Test Bench

ABSTRACT

This paper analyzes the effect of mechanical imbalance on energy consumption in rotating systems, based on tests conducted on a test bench under controlled conditions. Different levels of imbalance were generated by adding weights to the rotor, and variables such as electrical consumption, operating speed, and vibration levels were recorded. Comparisons were made between the balanced state and different imbalance conditions to identify variations in system behavior. The results show a clear trend of increased energy consumption as imbalance increases, as well as a direct relationship with vibration levels. Furthermore, it was shown that even small deviations in balance can influence system efficiency. In this regard, the importance of imbalance control as part of maintenance strategies aimed at improving energy performance is highlighted.

Keywords: mechanical imbalance; energy consumption; rotating systems; vibrations.

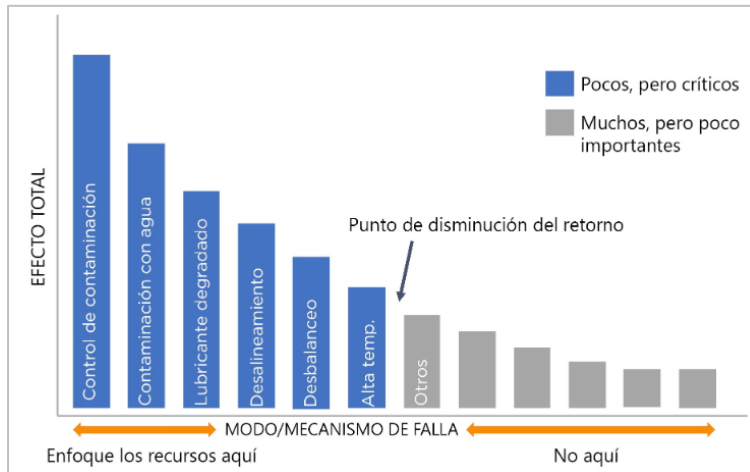
*Artículo recibido 25 marzo 2026
Aceptado para publicación: 25 abril 2026*



INTRODUCCIÓN

Los sistemas mecánicos rotativos son componentes fundamentales en la industria moderna, presentes en aplicaciones como turbinas, motores eléctricos, bombas y compresores, donde su desempeño influye directamente en la eficiencia global de los procesos productivos (Norton, 2011; Rao, 2017).

Figura N° 1 Modo o mecanismo de falla



Fuente: <https://noria.mx/lube-learn/lubricacion-maquinaria-lube-learn/certificacion-mlti/por-que-falla-la-maquinaria/>

En este contexto, la confiabilidad operativa y la eficiencia energética se han convertido en factores críticos dentro de la ingeniería moderna, especialmente en escenarios industriales donde la reducción del consumo energético es una prioridad estratégica (International Energy Agency, 2021; ISO, 2018).

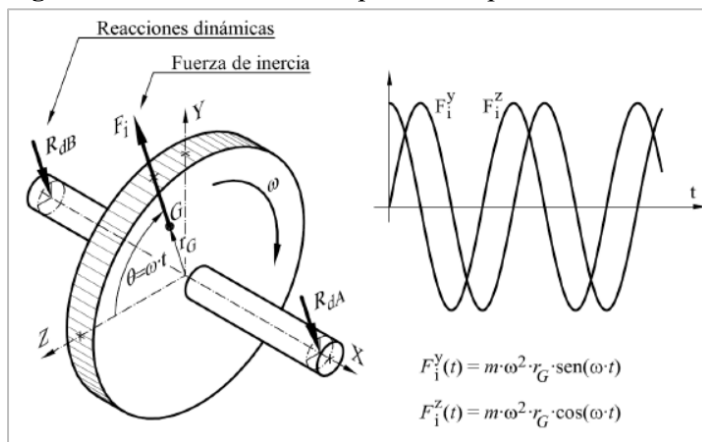
Uno de los problemas más comunes en maquinaria rotativa es el desbalance mecánico, el cual ocurre cuando la distribución de masa del rotor no es uniforme respecto a su eje de rotación (Ehrich, 1999; Childs, 2011). Esta condición genera fuerzas centrífugas no equilibradas que producen vibraciones excesivas, aumentando las cargas dinámicas sobre componentes como rodamientos y ejes (Vance, 1988; Harris & Kotzalas, 2006).

El análisis de vibraciones ha sido ampliamente utilizado como herramienta para el diagnóstico de fallas en sistemas rotativos, permitiendo identificar condiciones como desbalance, desalineación y defectos en rodamientos (Randall, 2011; Randall & Antoni, 2011). En este sentido, el monitoreo basado en vibraciones se ha consolidado como una técnica clave dentro del mantenimiento predictivo moderno (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006).

Normativas internacionales como la ISO 1940-1 establecen criterios de calidad de balanceo para rotores, definiendo límites permisibles según la aplicación industrial y el nivel de precisión requerido (ISO, 2003). Estas normas permiten reducir vibraciones y mejorar el comportamiento dinámico de los sistemas rotativos.

Desde una perspectiva energética, el desbalance no solo afecta la integridad mecánica del sistema, sino también su consumo energético, debido al incremento de pérdidas por fricción y esfuerzos dinámicos adicionales (Bloch & Geitner, 2012; Harris & Kotzalas, 2006).

Figura N° 2 Fuerza oscilante provocada por el desbalance



Fuente: https://somim.org.mx/memorias/memorias2012/articulos/pdfs/A4/A4_105

Estas pérdidas se traducen en una disminución de la eficiencia global del sistema y un aumento del consumo eléctrico durante la operación.

Diversos estudios han demostrado que las condiciones dinámicas anómalas en maquinaria rotativa pueden generar incrementos en el consumo energético, especialmente cuando las vibraciones alcanzan niveles elevados (Ehrich, 1999; Tse et al., 2001). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se ha centrado en el diagnóstico de fallas mediante análisis vibracional, sin profundizar en la cuantificación directa del impacto energético del desbalance (Randall, 2011; Vance, 1988).

Algunos autores han señalado la posible relación entre el incremento de vibraciones y la reducción de la eficiencia energética en sistemas mecánicos, aunque esta relación aún requiere mayor validación experimental en condiciones controladas (Braun, 2011; Randall & Antoni, 2011). Esto evidencia una brecha en el conocimiento respecto a la interacción entre fallas mecánicas y consumo energético.

En este contexto, la eficiencia energética se ha convertido en un factor importante dentro del diseño y operación de sistemas industriales, impulsada por políticas internacionales de sostenibilidad y reducción de emisiones (International Energy Agency, 2021; ISO, 2018). Por ello, comprender el impacto de fallas como el desbalance sobre el consumo energético resulta altamente relevante e importante.

El uso de bancos de pruebas experimentales nos permite analizar de manera controlada el comportamiento dinámico y energético de sistemas rotativos bajo distintas condiciones de operación, facilitando la obtención de datos reproducibles y cuantificables (Childs, 2011; Ewins, 2000). Este tipo de metodologías es fundamental para establecer relaciones entre variables mecánicas y energéticas.

En consecuencia, la presente investigación se justifica en la necesidad de profundizar en el estudio del impacto del desbalance mecánico sobre el consumo energético en sistemas rotativos, aportando evidencia experimental que contribuya a la optimización del desempeño industrial y a la reducción de pérdidas energéticas (Bloch & Geitner, 2012; Mobley, 2002).

Finalmente, el objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente el efecto del desbalance mecánico sobre el consumo energético en un sistema rotativo mediante un banco de pruebas, analizando variables como consumo eléctrico, velocidad de rotación y vibraciones, con el fin de establecer una relación cuantitativa entre el nivel de desbalance y la eficiencia energética del sistema.

METODOLOGÍA

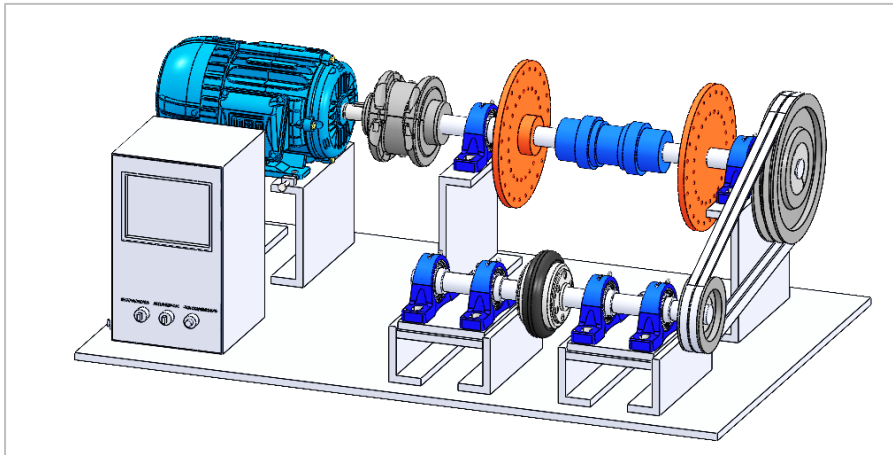
Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental cuantitativo, orientado a analizar el efecto del desbalance mecánico sobre el consumo energético en sistemas rotativos. El estudio se basó en la recolección de datos bajo condiciones controladas, con el fin de establecer relaciones entre variables dinámicas y energéticas del sistema.

Diseño experimental

Se implementó un banco de pruebas para sistemas rotativos, constituido por un motor eléctrico acoplado a un eje con elementos de carga balanceables (discos de inercia) y otros componentes que nos permiten simular el funcionamiento en la industria.

Figura N° 3 Vista isométrica del banco de pruebas empleado



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4 Motor eléctrico WEG W22



Fuente: <https://motecmex.com.mx/producto/motor-dos-velocidades-trifasicoconexion-dahlander-linea-w22/>

Tabla N° 1 Datos del motor

Norma	Frecuencia	Tensión	Amperaje	Velocidad	Potencia
NEMA MG-1	50 Hz	220//380 V	4,67/2.71 A	1430 rpm	1.5 HP / 1.1 kW

Fuente: Elaboración propia en base a la placa del motor

Figura N° 5 Variador de frecuencia ACS 150 01E 09 A8-2



Fuente: <https://www.abb.com/global/en/products/68581991>

Tabla n° 2 Datos Variador de frecuencia ACS 150 01E 09 A8-2

Potencia	Fase	Tensión	Amperaje	Serie
2,2 kW	1~	220 V	9,8 A	ACS150

Fuente: <https://www.abb.com/global/en/products/68581991>

Figura N° 6 Acople PHE 1050 H



Fuente: SKF Catalogo de acoples

Tabla N° 3 Datos Acople PHE 1050 H

Modelo	Marca	Tipo
PHE 1050 H	SKF	SEMI FLEXIBLE

Fuente: SKF Catalogo de acoples

Figura N° 7 Acople PHE L100



Fuente: SKF Catalogo de acoples

Tabla N° 4 Datos Acople PHE L100

Modelo	Marca	Tipo
PHE L100	SKF	SEMI FLEXIBLE

Fuente: SKF Catalogo de acoples

Figura N° 8 Acople PHE F50



Fuente: SKF Catalogo de acoples

Tabla N° 5 Datos Acople PHE F50

Modelo	Marca	Tipo
PHE F50	SKF	FLEXIBLE

Fuente: SKF Catalogo de acoples

Figura N° 9 Ejes del sistema



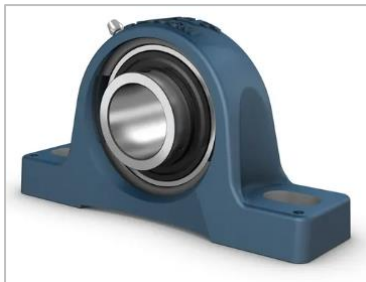
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6 Datos de ejes utilizados

Ejes	Diametro nominal (mm)	Longitud Nominal (mm)
EJE 1,2,3,	30	60

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 10 Soportes y rodamientos del sistema



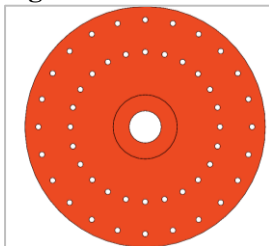
Fuente: SKF Catalogo de soportes y rodamientos

Tabla N° 7 Datos Soportes y rodamientos

Modelo	Marca	Tipo
SY 506 M	SKF	Soporte
YAR 206-2F	SKF	Rodamiento

Fuente: SKF Catalogo de soportes y rodamientos

Figura n° 11 Disco de inercia



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 8 Datos del disco de inercia

Material	Diametro nominal (mm)	Tipo
Acero	60	Disco de inercia

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 12 Poleas SPA del sistema



Fuente: SKF Catalogo de poleas de SKF

Tabla N° 9 Datos Poleas SPA del sistema

Modelo	Marca	Perfil
PHP 2SPA224TB	SKF	SPA
PHP 2SPA112TB	SKF	SPA

Fuente: Catalogo de poleas de SKF

Figura N° 13 Correa SPA1500



Fuente: Catalogo de correas de SKF

Tabla N° 10 Datos Correa SPA1300

Modelo	Marca	Tipo
PHG SPA1300	SKF	SPB

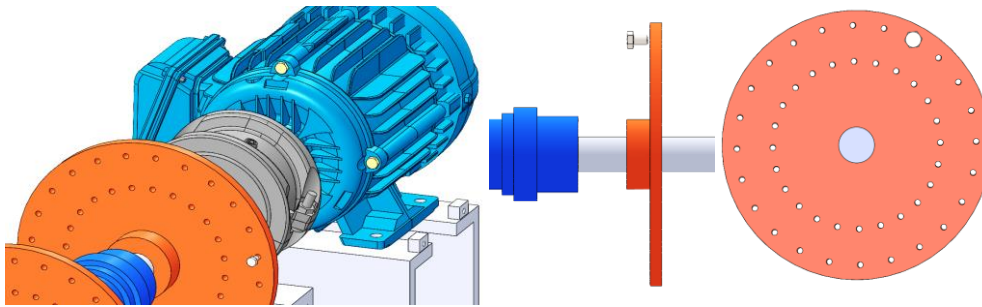
Fuente: Catalogo de correas de SKF

El diseño permitió la modificación controlada del desbalance mediante la incorporación de masas en posiciones específicas del rotor (discos).

Se establecieron condiciones experimentales principales que se mencionan a continuación, Condición balanceada (referencia), desbalance leve, desbalance moderado, desbalance alto

Cada condición fue evaluada bajo las mismas condiciones de operación para garantizar la comparabilidad de los resultados.

Figura N° 14 Sistema de desbalance.



Fuente: Elaboración propia

Sistema de adquisición y experimental de datos

Este tipo de configuración experimental es consistente con metodologías utilizadas en análisis de rotodinámica y monitoreo de condición (Childs, 2011; Vance, 1988).

Procedimiento experimental

El procedimiento se desarrolló en las siguientes etapas, que se mencionan a continuación.

La calibración del sistema donde, se verificó el funcionamiento del motor y sensores en condición sin carga adicional.

La condición balanceada, donde se realizaron mediciones del sistema sin masas adicionales, registrando consumo energético, velocidad y vibración.

La generación de desbalance, donde se colocaron masas en el rotor (disco de inercia) en posiciones definidas angularmente para generar distintos niveles de desbalance.

El registro de datos, para cada condición, el sistema operó en régimen estable, registrando variables durante intervalos de tiempo definidos.

La repetición de ensayos por cada configuración fue repetida varias veces para asegurar la reproducibilidad de los resultados. El diseño experimental se compone de un diseño factorial completo que combina cada nivel de desbalance con distintas velocidades de operación.

Repeticiones por configuración. 3 ciclos (para asegurar validez estadística).

Esto da como resultado para el caso de estudio, un total de 63 ensayos individuales: 3 niveles de velocidades \times 7 niveles de desbalance \times 3 repeticiones.

Este procedimiento sigue principios estándar de análisis experimental en maquinaria rotativa (Randall, 2011; Mobley, 2002).

Variables de estudio

Variabes independiente.

Nivel de desbalance mecánico (masa y posición angular)

Tabla N° 11 Niveles de desbalance aplicado

Nivel	Masa (g)	Radio (cm)	Desbalance (g·cm)
1	0	12	0
2	5	12	60
3	10	12	120
4	20	12	240
5	30	12	360
6	40	12	480
7	50	12	600

Fuente: Elaboración propia

Nivel de velocidad angular.

Tabla N° 12 Niveles de Velocidad aplicado.

Nivel	Frecuencia Hz	Velocidad angular del eje (ω) en RPM
1	40	1144
2	45	1287
3	50	1430

Fuente: Elaboración propia

Variables dependientes

Consumo eléctrico (A)

Nivel de vibración (mm/s)

Instrumentación y adquisición de datos

Los datos fueron adquiridos mediante sensores electrónicos y lecturados de manera directa

El consumo energético se midió mediante un analizador de motores , mientras que las vibraciones fueron registradas mediante un analizador de vibraciones y un acelerómetro montado en un de los soportes cercanos al disco de inercia montado en el sistema.

La velocidad de rotación fue medida mediante un tacómetro óptico. La masa de las masa adicionadas a los discos fueron medidas mediante una balanza de presicion calibrada.



El balanceo se verifico mediante un kit de balanceo

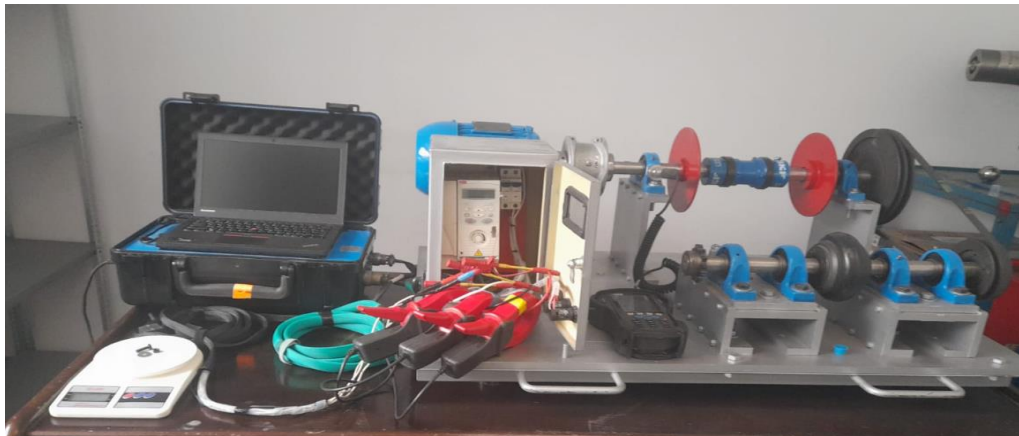
Tabla N° 13 Instrumentación y adquisición de datos

		
Equipo Microlog serie GX SKF Analizadores de vibración	Tacómetro SKF TKRT 10	Analizador dinámico de motores
		
Acelerómetro de vibraciones	Balanza calibrada	Equipo kit de balanceo

Fuente: Elaboración propia, en base a los instrumentos utilizados

Los datos fueron almacenados en un ordenador de manera manual y procesados posteriormente para su análisis.

Figura N° 15 Sistema de adquisición de datos.



Fuente: Elaboración propia

Tratamiento de datos

Los datos obtenidos fueron organizados en tablas y analizados mediante estadística descriptiva para validar el experimento. Se calcularon variaciones porcentuales del consumo energético respecto a la condición base y se evaluó la correlación entre desbalance y consumo.

Adicionalmente, se realizaron gráficos de tendencia para identificar el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de desbalance.

Consideraciones metodológicas

Se asumió que las condiciones ambientales (temperatura, humedad y alimentación eléctrica) permanecieron constantes durante los ensayos. Asimismo, se consideró que el sistema alcanzaba régimen estacionario antes de cada medición, garantizando la estabilidad de los datos obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis experimental permiten observar el comportamiento del sistema rotativo bajo diferentes niveles de desbalance mecánico y niveles de varición en velocidad , evaluando su influencia sobre el consumo energético, la vibración.

Tabla N° 14 Datos adquiridos

Orden	Replica	Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Corriente (A)	Vibración (mm/s)
1	1	40	0	4,015	0,10
2	2	40	0	4,046	0,10
3	3	40	0	4,047	0,10
4	1	40	5	4,036	0,33
5	2	40	5	4,027	0,24
6	3	40	5	4,003	0,35
7	1	40	10	4,013	0,74
8	2	40	10	4,033	0,79
9	3	40	10	4,024	0,63
10	1	40	20	4,091	1,56
11	2	40	20	4,062	1,51
12	3	40	20	4,048	1,52
13	1	40	30	4,126	2,21
14	2	40	30	4,126	2,34
15	3	40	30	4,117	2,29
16	1	40	40	4,138	3,37
17	2	40	40	4,170	3,26
18	3	40	40	4,148	3,31
19	1	40	50	4,231	3,91
20	2	40	50	4,191	3,98
21	3	40	50	4,186	3,96
22	1	45	0	3,964	0,02
23	2	45	0	3,998	0,05
24	3	45	0	3,981	0,03
25	1	45	5	4,021	0,32
26	2	45	5	4,047	0,36
27	3	45	5	4,025	0,38
28	1	45	10	4,056	1,04
29	2	45	10	4,021	1,05
30	3	45	10	4,055	1,09

31	1	45	20	4,093	1,93
32	2	45	20	4,080	1,83
33	3	45	20	4,099	2,01
34	1	45	30	4,128	2,99
35	2	45	30	4,125	3,03
36	3	45	30	4,147	3,08
37	1	45	40	4,188	4,11
38	2	45	40	4,179	4,09
39	3	45	40	4,174	4,07
40	1	45	50	4,190	5,20
41	2	45	50	4,249	5,30
42	3	45	50	4,183	5,41
43	1	50	0	3,970	0,01
44	2	50	0	3,985	0,01
45	3	50	0	3,968	0,03
46	1	50	5	4,071	0,58
47	2	50	5	4,049	0,66
48	3	50	5	4,064	0,66
49	1	50	10	4,058	1,17
50	2	50	10	4,010	1,21
51	3	50	10	4,058	1,15
52	1	50	20	4,107	2,40
53	2	50	20	4,156	2,33
54	3	50	20	4,120	2,63
55	1	50	30	4,185	3,91
56	2	50	30	4,162	4,05
57	3	50	30	4,143	3,63
58	1	50	40	4,176	5,07
59	2	50	40	4,208	5,03
60	3	50	40	4,244	5,43
61	1	50	50	4,269	6,12
62	2	50	50	4,264	6,39
63	3	50	50	4,264	6,15

Fuente: Elaboración propia

Validación del experimento, mediante estadística descriptiva

Tabla N° 15 Tabla resumen ANOVA del experimento.

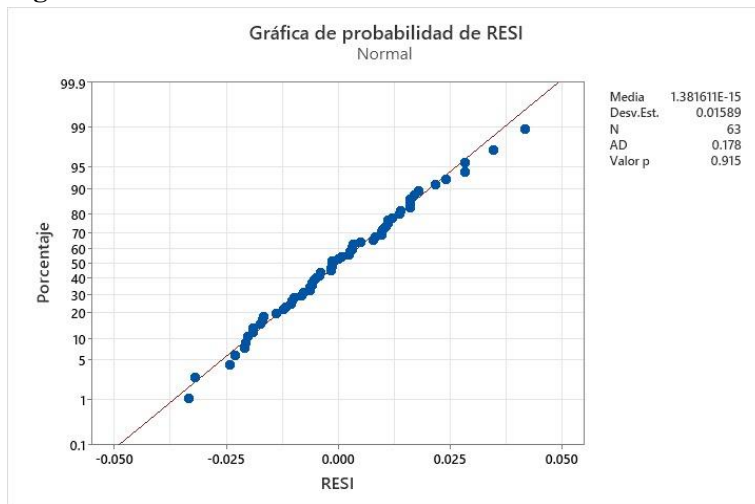
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia (Hz)	2	0.01144	0.005721	15.36	0.000
Masa (g)	6	0.37997	0.063328	170.00	0.000
Frecuencia (Hz)*Masa (g)	12	0.01933	0.001610	4.32	0.000
Error	42	0.01565	0.000373		
Total	62	0.42638			

Fuente: Elaboración propia



Prueba normalidad de los errores (residuos).

Figura N° 16 Probabilidad de Residuos



Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

H0 Los errores tienen distribución normal

H1 Los errores no tienen distribución normal

Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

Estadístico de prueba

$$AD = 0.178$$

$$P = 0.915$$

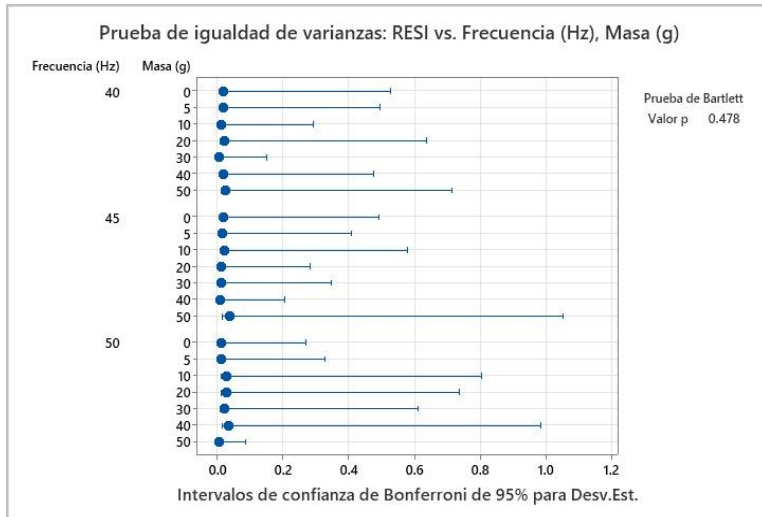
No se rechaza la hipótesis nula

Con una significancia del 5% se concluye que los errores tienen una distribución normal (se cumple el supuesto)

Homogeneidad de las varianzas.

Figura N° 17 Prueba igualdad de varianzas

	Estadística	
Método de prueba	Valor p	
Bartlett	19.68	0.478



Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

H0 Las varianzas son iguales

H1 Al menos una varianza es diferente

Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

Estadístico de prueba

$$Bartlett = 19.68$$

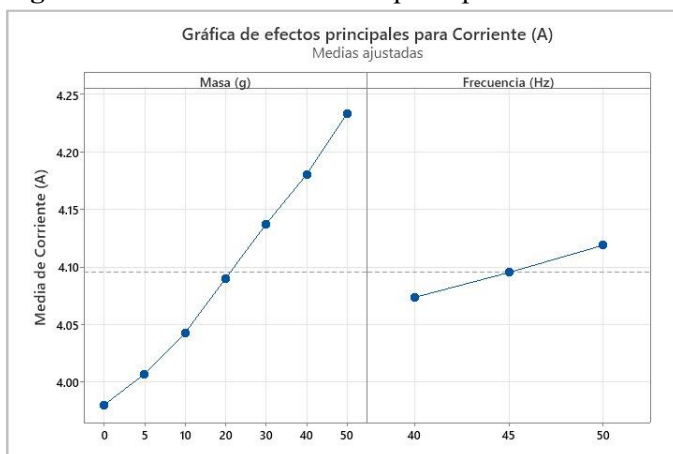
$$P = 0.478$$

No se rechaza la hipótesis nula

Con una significancia del 5% se concluye que las varianzas son homogéneas (se cumple el supuesto)

Interacción de los factores desbalance y velocidad desbalance estático

Figura N° 18 Gráfica de efectos principales desbalance estático



Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

H0 No hay interacción entre los niveles de desbalance y velocidad

H1 Existe interacción entre los niveles de desbalance y velocidad

Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

Estadístico de prueba

$$F = 4.32$$

$$P = 0.000$$

Se rechaza la hipótesis nula

Con una significancia del 5% se concluye que hay interacción entre los niveles de desbalance y velocidad.

Análisis de Factor desbalance, desbalance estático

Hipótesis

H0 No hay efecto de la alineación sobre el consumo de energía eléctrica

H1 Hay efecto de la alineación sobre el consumo de energía eléctrica

Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

Estadístico de prueba

$$F = 170$$

$$P = 0.000$$

Se rechaza la hipótesis nula

Con una significancia del 5% se concluye que hay efecto de la masa de desbalance sobre el consumo de energía eléctrica

Análisis de Factor Velocidad, desbalance estático

Hipótesis

H0 No hay efecto de la velocidad sobre el consumo de energía eléctrica

H1 Hay efecto de la velocidad sobre el consumo de energía eléctrica



Nivel de significación

$$\alpha = 0.05$$

Estadístico de prueba

$$F = 15.36$$

$$P = 0.000$$

Se rechaza la hipótesis nula

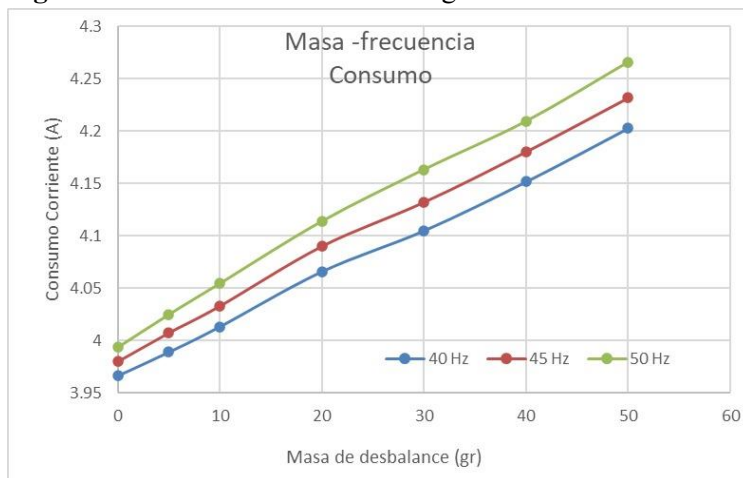
Con una significancia del 5% se concluye que hay efecto de algún nivel de la velocidad sobre el consumo de energía eléctrica en sistemas desbalanceados.

Consumo energético

En condición balanceada, el sistema presentó un consumo eléctrico estable de referencia. A partir de la introducción de desbalance, se observó un incremento progresivo del consumo energético.

La condición balanceada, se toma como referencia.

Figura N° 19 Grafica Consumo energético



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 16 Datos adquiridos promediados en energía

Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Consumo de Corriente (A)	Porcentaje de incremento Corriente (%)	Perdida de Potencia (W)
40	0	3,966	0,00%	0,00
40	5	3,989	0,57%	2,78
40	10	4,013	1,18%	13,07
40	20	4,066	2,51%	16,68
40	30	4,105	3,50%	19,19
40	40	4,152	4,67%	19,64
40	50	4,203	5,96%	36,46



Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Consumo de Corriente (A)	Porcentaje de incremento Corriente (%)	Perdida de Potencia (W)
45	0	3,980	0,00%	0,00
45	5	4,008	0,69%	6,32
45	10	4,033	1,33%	9,51
45	20	4,090	2,76%	19,25
45	30	4,132	3,82%	24,05
45	40	4,180	5,02%	34,19
45	50	4,232	6,31%	38,43
Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Consumo de Corriente (A)	Porcentaje de incremento Corriente (%)	Perdida de Potencia (W)
50	0	3,994	0,00%	0,00
50	5	4,025	0,78%	19,71
50	10	4,055	1,53%	24,73
50	20	4,114	3,01%	41,78
50	30	4,163	4,25%	46,52
50	40	4,209	5,40%	59,05
50	50	4,266	6,81%	67,07

Fuente: Elaboración propia

Desbalance leve: incremento entre el 0.57 a 1.53%

Desbalance moderado: incremento entre 2.51 a 3.01%

Desbalance alto: incremento entre 4.67 a 6.81%

Estos resultados evidencian que el desbalance mecánico influye directamente en el requerimiento energético del sistema, generando un mayor esfuerzo del motor para mantener la velocidad de operación.

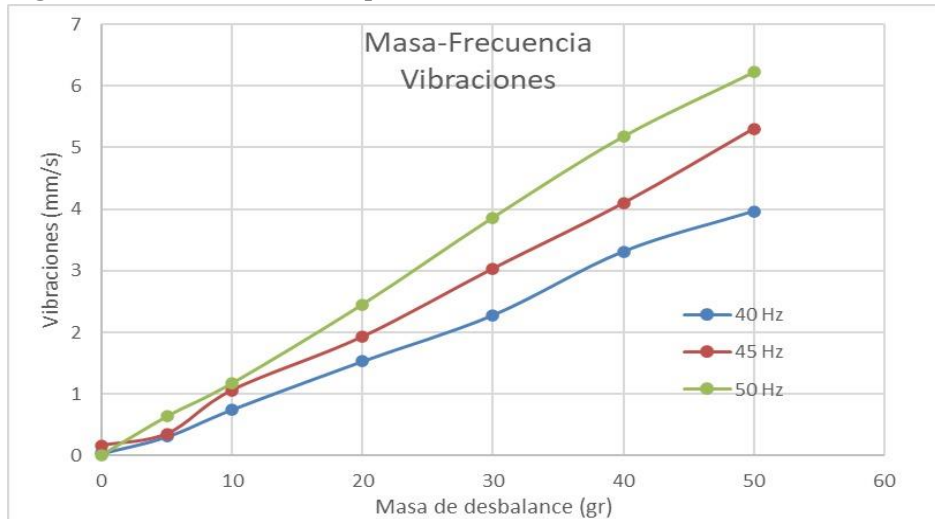
Y también nos muestra que si se incrementa la velocidad rotacional del sistema con un mismo valor de masa de desbalance, afectará en la respuesta del sistema en el consumo de energía de manera creciente, esto también se pudo observar en la interacción de estas variables de entrada..

Comportamiento vibracional

El análisis de vibraciones mostró un incremento claro en la amplitud de señal conforme aumentaba el nivel de desbalance y el nivel de velocidad.



Figura N° 20 Grafica del comportamiento de la vibración



Fuente: Elaboración propia

En condición balanceada, las vibraciones se mantuvieron dentro de niveles bajos y estables.

Con desbalance leve, se detectó un aumento perceptible de la amplitud.

En condiciones moderadas y altas, las vibraciones crecieron de forma significativa, evidenciando inestabilidad dinámica.

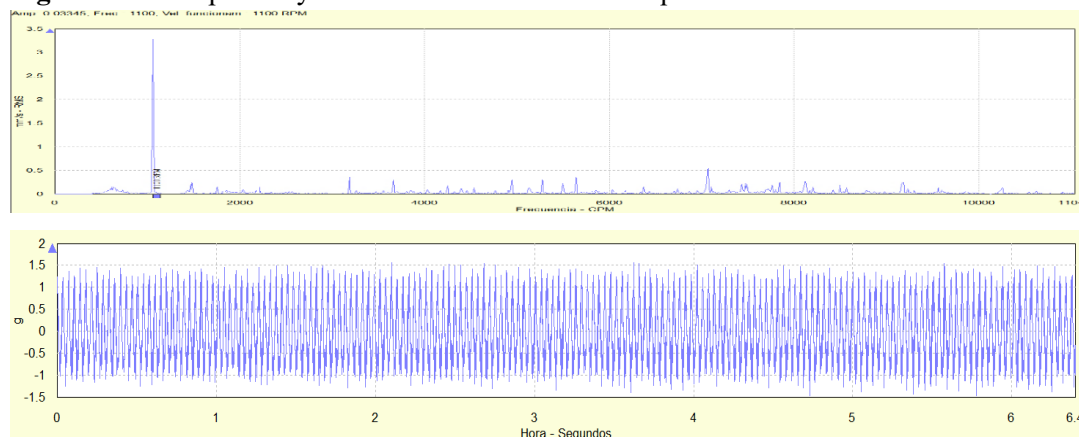
Se observó una relación directa entre el incremento de vibraciones y el aumento del consumo energético, lo que sugiere una pérdida de eficiencia asociada a la condición de desbalance.

Tabla N° 17 Datos adquiridos promediados en vibración

Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Vibración (mm/s)
40	0	0,03
40	5	0,31
40	10	0,75
40	20	1,53
40	30	2,28
40	40	3,31
40	50	3,97
Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Vibración (mm/s)
45	0	0,16
45	5	0,35
45	10	1,06
45	20	1,93
45	30	3,03
45	40	4,09
45	50	5,30

Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Vibración (mm/s)
50	0	0,01
50	5	0,63
50	10	1,17
50	20	2,45
50	30	3,86
50	40	5,18
50	50	6,22

Figura N° 21 Espectro y forma de onda de un dato adquirido



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la imagen del espectro y forma de onda de un dato adquirido, que el fenómeno de desbalance está presente en el estudio, por la presencia de un pico a la frecuencia de rotación del sistema.

Relación consumo, desbalance

El análisis comparativo muestra una tendencia creciente del consumo energético en función del nivel de desbalance aplicado.

De manera general, se identificó un comportamiento aproximadamente creciente no lineal, donde pequeños incrementos en el desbalance generan variaciones progresivas en el consumo del sistema.

Este comportamiento es consistente con la literatura en dinámica rotacional, donde el incremento de fuerzas desequilibradas produce mayores pérdidas mecánicas y energéticas (Randall, 2011; Vance, 1988).

Correlación entre variables

El análisis conjunto de las variables indica una correlación positiva entre vibración y consumo energético. A mayor nivel de vibración, mayor fue el consumo registrado.

Este resultado sugiere que la vibración puede utilizarse como indicador indirecto de eficiencia energética en sistemas rotativos, lo cual es relevante para aplicaciones de mantenimiento predictivo.

Análisis del impacto económico

El análisis del impacto económico permite evaluar las pérdidas generadas por la desbalance mecánico en los equipos rotativos, principalmente debido al incremento en el consumo de energía. Para este estudio se considera una operación anual de 5000 horas, correspondiente a una máquina de uso estándar en la industria.

Asimismo, se toma como referencia la tarifa industrial de energía eléctrica en Bolivia, la cual puede variar entre 0.60 y 1.00 Bs/kWh dependiendo de la demanda y las condiciones de operación. Con el propósito de obtener una evaluación más representativa, se consideran tres escenarios tarifarios: tarifa baja (0.60 Bs/kWh), tarifa media (0.80 Bs/kWh) y tarifa alta (1.00 Bs/kWh).

A partir de estos parámetros, se determina el costo de la energía desperdiciada ocasionada por la desalineación en sus distintos niveles. Los resultados obtenidos permiten estimar el impacto económico para la empresa o planta industrial, así como el potencial ahorro que podría lograrse mediante la corrección proactiva del desbalance. Analizaremos el estado más crítico que sería, cuando la velocidad o frecuencia está en 50 Hz, para los tres escenarios de tarifa.

Tabla N° 18 Datos análisis de impacto económico

Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Perdida de Potencia (kW)	de Horas de operación (5000h/año)	de Energía Adicional (kWh/año)	Tarifa industrial escenario 0.60Bs/kWh	Ahorro (Bs/año)
50	0	0,000	5000	0	0,60	0,0
50	5	0,020	5000	99	0,60	59,1
50	10	0,025	5000	124	0,60	74,2
50	20	0,042	5000	209	0,60	125,3
50	30	0,047	5000	233	0,60	139,6
50	40	0,059	5000	295	0,60	177,2
50	50	0,067	5000	335	0,60	201,2
Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Perdida de Potencia (W)	de Horas de operación (5000h/año)	de Energía Adicional (kWh/año)	Tarifa industrial escenario 0.80Bs/kWh	Ahorro (Bs/año)
50	0	0,00	5000	0	0,80	0,0
50	5	6,32	5000	99	0,80	78,8
50	10	9,51	5000	124	0,80	98,9
50	20	19,25	5000	209	0,80	167,1

50	30	24,05	5000	233	0,80	186,1
50	40	34,19	5000	295	0,80	236,2
50	50	38,43	5000	335	0,80	268,3
Frecuencia (Hz)	Masa (g)	Perdida de Potencia (W)	Horas de operación (5000h/año)	Energía Adicional (kWh/año)	Tarifa industrial escenario 1.00Bs/kWh	Ahorro (Bs/año)
50	0	0,00	5000	0	1,00	0,0
50	5	19,71	5000	99	1,00	98,6
50	10	24,73	5000	124	1,00	123,7
50	20	41,78	5000	209	1,00	208,9
50	30	46,52	5000	233	1,00	232,6
50	40	59,05	5000	295	1,00	295,3
50	50	67,07	5000	335	1,00	335,4

Fuente: Elaboración propia

Se realiza este análisis, por que se observa la influencia de la tarifa , contemplando que bolivia dentro de sus matriz energetica sufrira cambios, debido a que el paiz esta agotando sus recursos de gas, y la principal fuente de generacion es por ciclos de generacion a base gas, se plante una solucion que demandara un cambio en los costos de la energia en Bolivia, lo que ara mas factible la aplicación de tecnicas de mantenimiento de presicion como el balanceo, para atender estos problemas relacionados ala mantenimiento.

Contemplando que en Bolivia entre el 25% y el 30% de la demanda eléctrica total corresponde al sector industrial —equivalente aproximadamente a 3.278 GWh de un consumo nacional de 11.706 GWh en 2024 (11.477 GWh en 2023 y 10.645 GWh en 2022), según estadísticas energéticas internacionales y datos oficiales de entidades como ENDE, el Balance Energético Nacional (BEN), el Ministerio de Hidrocarburos y Energías (MHE), la International Energy Agency (IEA) y el U.S. Department of Energy—, se estima que los motores eléctricos representan entre el 60% y el 70% del consumo eléctrico industrial.

Tomando estos valores como referencia, el consumo asociado a motores eléctricos en Bolivia alcanzaría aproximadamente 1.967 GWh/año, lo que equivale a una potencia promedio cercana a 225 MW. Diversos estudios y mediciones experimentales muestran que las pérdidas energéticas ocasionadas por desalineación mecánica pueden variar entre un 1% y un 7%, dependiendo del nivel de desalineación presente en los equipos.



Bajo este escenario, las pérdidas energéticas estimadas serían las siguientes:

Con 1%: aproximadamente 19,7 GWh/año, equivalentes a 2,25 MW promedio.

Con 3%: aproximadamente 59,0 GWh/año, equivalentes a 6,7 MW promedio.

Con 7%: aproximadamente 137,7 GWh/año, equivalentes a 15,7 MW promedio.

Estos resultados demuestran que la desalineación mecánica constituye una fuente importante de ineficiencia energética en la industria, la cual puede prevenirse mediante estrategias adecuadas de mantenimiento predictivo, monitoreo continuo y correcta alineación de maquinaria y equipos rotativos. En un contexto donde Bolivia podría enfrentar incrementos en las tarifas eléctricas debido a la disminución de las reservas y producción de gas natural, la eficiencia energética deja de ser una alternativa opcional y se convierte en una necesidad estratégica para mejorar la competitividad industrial, reducir costos operativos y optimizar el uso de la energía disponible.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el desbalance mecánico tiene un impacto directo tanto en el consumo energético como en el comportamiento vibracional del sistema rotativo. Este comportamiento es consistente con los principios fundamentales de la dinámica de rotores, donde la presencia de masas desbalanceadas genera fuerzas centrífugas no compensadas que incrementan las cargas dinámicas sobre el sistema (Vance, 1988; Ehrich, 1999).

El incremento progresivo del consumo energético observado en las condiciones de desbalance puede explicarse por el aumento de las pérdidas mecánicas internas, principalmente asociadas a fricción adicional en rodamientos y elementos de soporte. Estas pérdidas obligan al motor a entregar mayor potencia para mantener condiciones de operación similares, lo que se traduce en un aumento del consumo eléctrico (Harris & Kotzalas, 2006; Bloch & Geitner, 2012).

Por otro lado, el incremento de vibraciones registrado en el sistema confirma el efecto dinámico del desbalance sobre la estabilidad del rotor. Este comportamiento ha sido ampliamente descrito en la literatura, donde se establece que las vibraciones inducidas por desbalance son una de las principales fuentes de excitación en sistemas rotativos (Randall, 2011; Randall & Antoni, 2011). En este sentido, los resultados obtenidos concuerdan con estudios previos que asocian el aumento de vibración con la disminución de la eficiencia operativa.



Un aspecto relevante observado en este estudio es la relación entre vibración y consumo energético. Los resultados sugieren una correlación positiva entre ambas variables, lo que indica que el nivel de vibración podría ser utilizado como un indicador indirecto del consumo energético en sistemas rotativos. Este hallazgo es particularmente relevante para estrategias de mantenimiento predictivo, donde la monitorización de vibraciones podría extenderse no solo al diagnóstico de fallas, sino también a la estimación de eficiencia energética (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006).

Adicionalmente, el comportamiento no lineal observado en el incremento del consumo energético sugiere que el impacto del desbalance no es proporcional, sino que se amplifica a medida que aumenta la severidad de la condición. Este fenómeno puede estar asociado a efectos acumulativos de vibración, incremento de cargas dinámicas y posibles resonancias parciales en el sistema, lo cual ha sido discutido en estudios de rotodinámica avanzada (Childs, 2011; Norton, 2011).

Desde una perspectiva industrial, estos resultados tienen implicaciones importantes, ya que evidencian que incluso niveles moderados de desbalance pueden generar incrementos significativos en el consumo energético. Esto refuerza la necesidad de implementar estrategias de balanceo dinámico y monitoreo continuo como parte de programas de mantenimiento predictivo orientados a la eficiencia energética (Mobley, 2002; ISO 50001, 2018).

Finalmente, los resultados obtenidos son coherentes con la literatura existente en dinámica de máquinas y eficiencia energética, lo que valida la consistencia del enfoque experimental utilizado en este estudio. Sin embargo, también evidencian la necesidad de profundizar en modelos cuantitativos que permitan predecir con mayor precisión la relación entre desbalance, vibración y consumo energético en diferentes tipos de sistemas rotativos.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar experimentalmente el efecto del desbalance mecánico sobre el consumo energético en un sistema rotativo, evidenciando una relación directa entre el nivel de desbalance, el incremento de vibraciones y el aumento del consumo eléctrico.

Se concluye que el desbalance mecánico genera un incremento progresivo del consumo energético, el cual se intensifica conforme aumenta la severidad de la condición de desbalance.

Este comportamiento se asocia al aumento de fuerzas dinámicas no compensadas, que derivan en mayores pérdidas mecánicas y una disminución de la eficiencia global del sistema.

Asimismo, se determinó que el incremento de vibraciones está estrechamente relacionado con el aumento del consumo energético, lo que sugiere que la vibración puede ser utilizada como un indicador indirecto de eficiencia energética en sistemas rotativos.

Los resultados obtenidos confirman que incluso niveles moderados de desbalance pueden generar incrementos significativos en el consumo energético, lo cual tiene implicaciones directas en la operación industrial, especialmente en términos de costos energéticos y mantenimiento de equipos.

Se evidencia además que el comportamiento del sistema no es estrictamente lineal, sino que presenta tendencias de amplificación del consumo energético a medida que aumenta el nivel de desbalance, lo cual refuerza la importancia del control dinámico en sistemas rotativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.

Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. (2006). *Rolling bearing analysis* (5th ed.). CRC Press.

Norton, R. L. (2011). *Machine design: An integrated approach* (4th ed.). Pearson.

Vance, J. M. (1988). *Rotordynamics of turbomachinery*. Wiley.

Ehrich, F. F. (1999). *Handbook of rotordynamics*. McGraw-Hill.

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.

Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). *Machinery failure analysis and troubleshooting*. Gulf Professional Publishing.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.

Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring*. Wiley.

Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics—A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485–520.

Tse, P. W., Peng, Y. H., & Yam, R. (2001). Condition monitoring of rotating machinery using wavelet analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 234(1), 81–96.



- Braun, S. (2011). *Mechanical signature analysis*. Academic Press.
- Childs, D. W. (2011). *Turbomachinery rotordynamics*. Wiley.
- Childs, D. W. (1993). *Rotordynamics: A simplified, applied approach*. McGraw-Hill.
- ISO. (2003). *ISO 1940-1: Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state*.
- International Energy Agency. (2021). *Energy efficiency 2021*. IEA.
- ISO. (2018). *ISO 50001: Energy management systems — Requirements with guidance for use*.
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption. *Friction*, 5(3), 263–284.
- Tiwari, R. (2017). *Rotordynamics: Problems in engineering*. Springer.
- Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice and application*. Research Studies Press.

