

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO
ELABORACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EL MONITOREO DE
VIBRACIONES ESTRUCTURALES EN MOTOCOMPRESORES HORIZONTALES
PARA EXTRACCIÓN DE GAS

Por:

Andrés Felipe Leguizamón Motta
Sergio Alejandro Cifuentes Lisarazo



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
BOGOTÁ
2026

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO
ELABORACIÓN DE UN PROTOCOLO PARA EL MONITOREO DE
VIBRACIONES ESTRUCTURALES EN MOTOCOMPRESORES HORIZONTALES
PARA EXTRACCIÓN DE GAS

Por:

Andrés Felipe Leguizamón Motta
Sergio Alejandro Cifuentes Lisarazo

Proyecto presentado como opción de grado para optar al título profesional de
Ingeniero Mecánico

Aprobado por:

Ing. Jorge René Silva Larrotta
Director



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
BOGOTÁ
2026

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado primeramente a Dios, quien es la fuente principal de fortaleza y quien nos dio la vida para culminar esta etapa tan importante de nuestra vida personal y profesional.

A mis padres, Alipio y Jeni, por su amor incondicional, su apoyo constante y el esfuerzo que hicieron para estar donde estoy, por ser el pilar fundamental en mi vida y la base de mis principios.

A mis padres, Santiago y Katherine, mis más grandes ejemplos y primeros maestros. Gracias por su sacrificio, su paciencia infinita y por enseñarme que el esfuerzo constante y la humildad son las llaves para alcanzar cualquier meta. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi novia Vanessa Londoño, por su compañía, apoyo incondicional y amor que me acompañaron en los momentos donde más lo necesitaba en este proceso. Gracias por hacerme mejor persona y por impulsarme a lograr todo lo que me proponga.

A mi novia, Sara, por ser mi compañera incondicional en este proceso. Gracias por tu comprensión en los momentos de mayor presión, por tu alegría que ilumina mis días grises y por recordarme siempre que valía la pena seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado:

A la universidad Santo Tomás, por brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente y proporcionar las herramientas necesarias para alcanzar este logro.

A nuestro director de trabajo de grado, René Silva, por su orientación, paciencia, dedicación y valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación.

A nuestros docentes, quienes compartieron sus conocimientos y contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y personal.

A nuestros compañeros y amigos, por su apoyo, colaboración y por hacer de este proceso una experiencia enriquecedora.

Agradecemos a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo, así como nuestro paso por esta etapa universitaria.

A todos, gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	6
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	6
1.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.4	JUSTIFICACIÓN	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3	MARCO DE REFERENCIA.....	11
3.1	MARCO CONCEPTUAL.....	11
3.2	ESTADO DEL ARTE	16
3.2.1	Revisión de la literatura en monitoreo de vibraciones	16
3.3	MARCO TEÓRICO.....	18
3.3.1	Vibraciones mecánicas.....	18
3.3.2	Medición de la vibración	19
4	MARCO NORMATIVO Y TEÓRICO.....	22
4.1	REVISIÓN DE NORMAS, MANUALES Y GUÍAS	23
4.1.1	ISO 10816-6	23
4.1.2	ISO 13373: procedimientos para la implementación de un sistema de monitoreo de condición.....	24
4.1.3	Directrices EFRC para vibraciones en sistemas de compresores alternativos.....	25
4.1.4	ISO 5348: montaje de sensores	28
4.1.5	Manual del fabricante	29
4.1.6	Síntesis normativa y criterios de aplicación para el protocolo	29
4.2	FUNDAMENTOS TÉCNICOS (FUENTES DE VIBRACIÓN).....	31
4.2.1	Caracterización del sistema estructural motocompresor	32
4.2.2	Frecuencias naturales	33
4.2.3	Resonancia estructural.....	34
4.2.4	Soltura mecánica.....	36

5	DISEÑO DEL PROTOCOLO DE MONITOREO DE VIBRACIONES ESTRUCTURALES	37
5.1	DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	37
5.2	ESTRATEGIA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	38
5.3	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.....	39
5.4	DIRECCIONES DE MEDICIÓN.....	2
5.4.1	Parámetros de configuración.....	2
5.5	CARACTERIZACIÓN DE CONDICIONES OPERATIVAS	2
5.6	PROCESAMIENTO	28
5.7	CLASIFICACIÓN DE LA SEVERIDAD VIBRATORIA	28
5.7.1	Revisión de espectros	28
5.8	ANÁLISIS ESPECTRAL E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES	29
6	PROTOCOLO	31
7	IMPLEMENTACIÓN CASO DE ESTUDIO	27
7.1	UNIDAD COMPRESORA DE GAS BOOSTER 1 - MONITOREO 1.....	27
7.1.1	Caracterización y antecedentes	38
7.1.2	Datos operacionales.....	38
7.1.3	Registro y clasificación de valores globales de vibración	39
7.1.4	Espectros de interés.....	27
7.1.5	Diagnóstico.....	28
7.1.6	Recomendaciones.....	29
7.2	UNIDAD COMPRESORA DE GAS BOOSTER 1 - MONITOREO 2.....	27
7.2.1	Caracterización y antecedentes	27
7.2.2	Datos operacionales.....	28
7.2.3	Registro y clasificación de valores globales	28
7.2.4	Espectros de interés.....	28
7.2.5	Diagnóstico.....	28
7.2.6	Recomendaciones.....	28
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
8.1	CONCLUSIONES.....	27
8.1.1	Validez del protocolo propuesto	¡Error! Marcador no definido.

8.1.2	Impacto de las correcciones implementadas	¡Error!	Marcador	no definido.	
8.1.3	Importancia del enfoque estructural.....				27
8.2	RECOMENDACIONES				28
8.2.1	Para Confipetrol.....				28
8.2.2	Para trabajos futuros				28
9	REFERENCIAS.....				28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Daño en la unión soldada de la PSV de primera etapa.	7
Ilustración 2. Motocompresor horizontal Ariel Corporation [5].	12
Ilustración 3. Acelerómetro digital [14].	14
Ilustración 4. Espectro frecuencial [17].	15
Ilustración 5. Amplitud [19].	15
Ilustración 6. Representación parámetros de señal en el dominio del tiempo [29].	16
Ilustración 7. Sensor triaxial sensing [25].	16
Ilustración 8. Acelerómetro digital [30].	20
Ilustración 9. Sensor de posición LVDT [30].	20
Ilustración 10 Mapa conceptual Normas y recursos.	23
Ilustración 11. Zonas de medición para un compresor horizontal [6].	28
Ilustración 12. Medición de conexiones típicas de pequeño calibre [6].	28
Ilustración 13. Esquema estructural.	32
Ilustración 14. Skid del equipo.	33
Ilustración 15 diagrama masa, resorte, amortiguador.	34
Ilustración 16 Componentes del espectro de vibraciones.	35
Ilustración 17. Comportamiento de fase y amplitud en la zona de resonancia [6].	36
Ilustración 18. Commtest vB8 [30].	38
Ilustración 19. Esquema motocompresor horizontal y puntos de medición.	40
Ilustración 20. Compresor de gas.	38
Ilustración 21. Tubería succión. Vibración punto 2.	27
Ilustración 22. Tubería succión. Vibración punto 3.	27
Ilustración 23. Abrazaderas Clamp y U-Bolt.	29
Ilustración 24. Compresor de gas.	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Norma ISO 10816-6, para equipos reciprocantes > 100 kW [27].	24
Tabla 2. Resumen de los valores generales de velocidad de vibración constante para diferentes partes del sistema de compresores [3].	26
Tabla 3. Descripción de zonas de evaluación [6].	26
Tabla 4. Niveles de vibración comunes para compresores reciprocantes de Ariel. Pulg/seg (mm/s) [5].	29
Tabla 5. Resumen de aplicaciones en parámetros clave de cada norma aplicable.	31
Tabla 6. Diagnóstico de fallas según frecuencias características de vibración [6].	35
Tabla 7. Lista de puntos para realizar monitoreo de vibraciones.	2
Tabla 8. Configuración de medición de vibraciones por componente.	2
Tabla 9. Valores sugeridos para la clasificación del estado.	28
Tabla 10. Diagnóstico de fallas según frecuencias características de vibración [6].	30
Tabla 11. Condición operacional del monitoreo 1.	38
Tabla 12. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk), skid - monitoreo 1.	28
Tabla 13. valores globales de vibración (in/s 0-Pk) en la tubería - monitoreo 1.	27
Tabla 14. Condición operacional - monitoreo 2.	28
Tabla 15. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk) skid - monitoreo 2.	28
Tabla 16. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk) tubería - monitoreo 2.	28

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este proyecto desarrolla un protocolo para el monitoreo de vibraciones estructurales en motocompresores horizontales utilizados en extracción de gas, con el fin de optimizar las técnicas de mantenimiento predictivo aplicadas por Confipetrol.

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Confipetrol es una empresa líder en Latinoamérica en servicios de operación, mantenimiento y gestión de activos, enfocados en técnicas de confiabilidad y predictivas con tecnología de punta, dirigido a los sectores industriales, gas, petroquímico, petrolero, minero y energético. Esta organización atiende a más de 40 clientes en los sectores productivos de la economía de cuatro países, y está en la capacidad de garantizar la continuidad operacional en redes eléctricas, oleoductos, gasoductos, poliductos, plantas de generación eléctrica, facilidades petroleras y, en general, en cualquier operación industrial de los sectores que atiende.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la industria moderna, la estandarización de procesos de mantenimiento se ha consolidado como un pilar fundamental para optimizar recursos, garantizar la confiabilidad de los activos y reducir costos operativos. Organizaciones internacionales, como la International Organization for Standardization (ISO), la American Society of Mechanical Engineers (ASME), el American Petroleum Institute (API) y el European Forum Reciprocating Compressors (EFRC), han desarrollado normas que orientan la implementación de estas prácticas; sin embargo, su aplicación no siempre es directa, pues deben adaptarse a las condiciones particulares de cada empresa, como el tipo de equipo, las cargas operativas y el entorno industrial. Cuando dichas normas se aplican de manera genérica, sin considerar las especificidades técnicas de los activos, se generan brechas que pueden comprometer la eficacia del mantenimiento predictivo y correctivo, con lo cual incrementan los riesgos de fallas, tiempos de inactividad y costos no planificados [2].

Entre los equipos críticos en procesos industriales destacan los compresores alternativos, cuya operación se caracteriza por fuerzas cíclicas, masas oscilantes y pulsaciones de presión. Todos estos eventos generan vibraciones en el equipo [8]. Así, debido a esta criticidad, Confipetrol ejecuta un programa de mantenimiento predictivo cuatrimestral en las estaciones a su cargo, para lo cual combina dos técnicas clave:

1. Monitoreo de desempeño dinámico (Windrock): mediante sensores conectados en tiempo real, analiza parámetros como presión, temperatura y eficiencia volumétrica, lo que permite evaluar el estado de componentes críticos (válvulas, cilindros, cigüeñal).

2. Monitoreo de vibraciones (Commtest): evalúa frecuencias y amplitudes vibratorias en bancadas, soportes y tuberías
3. Identificación de desbalances, desalineaciones o resonancias.

Esta estrategia busca detectar fallas incipientes y reducir paradas no planificadas, a fin de optimizar la confiabilidad de los activos. Pero, a pesar del mantenimiento predictivo aplicado en los motocompresores Waukesha/Caterpillar-Ariel de la estación del cliente, se han registrado fallas inesperadas, como fisuras en soportes y desalineaciones en acoplamientos. Un factor crítico identificado es la no adherencia a la norma ACI 351.3R-18 durante la instalación de los equipos, debido a que el cliente no considera apropiado realizar la cimentación que se recomienda en la norma. Esta es clave para equipos dinámicos, y especifica requisitos de rigidez, masa y amortiguamiento para minimizar vibraciones transmitidas al suelo. De esa forma, la omisión de estos criterios ha derivado en lo siguiente:

- Baja rigidez estructural: al no tener cimentación, no se absorben adecuadamente las fuerzas pulsantes y no se garantiza la planitud del equipo.
- Resonancia no controlada: interacción entre las frecuencias naturales de la superficie de apoyo y las del compresor, con lo que aumentan las vibraciones.

Estas condiciones aumentan el riesgo de fatiga en los componentes mecánicos y reducen la efectividad del monitoreo predictivo, dado que las vibraciones anómalas no siempre reflejan el estado real del equipo, sino deficiencias en la infraestructura de soporte. Esto se evidenció en un caso específico: en una unidad, se realizó mantenimiento predictivo siguiendo los criterios mencionados; sin embargo, el equipo falló debido a la fatiga en la unión soldada de la válvula PSV de la primera etapa (Ilustración 1). En consecuencia, fue necesario salir de la operación mientras se corregía la falla en la unión, la cual no fue prevista porque estaba fuera del alcance de la técnica aplicada.



Ilustración 1. Daño en la unión soldada de la PSV de primera etapa.

Nota. Imagen tomada por el operador del equipo.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

No existe en Confipetrol un protocolo de monitoreo de vibraciones estructurales que mejore y complemente las técnicas de mantenimiento predictivo para que, en casos como el identificado, se mejore la confiabilidad del activo y se prevean las fallas estructurales que son más probables en equipos con las características de cimentación propuestas.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El presente documento tiene como objetivo desarrollar un protocolo para el monitoreo basado en normas y guías aplicables al análisis de vibraciones estructurales en motocompresores Waukesha/Caterpillar-Ariel utilizados en la explotación de gas. La relevancia de este estudio radica en la necesidad de contar con una documentación técnica estandarizada que facilite la obtención, el procesamiento y el análisis de los valores y espectros de vibración, a fin de contribuir a la operación segura y eficiente de estos equipos.

Al respecto, cabe aclarar que el monitoreo de vibraciones es una técnica clave dentro del mantenimiento predictivo, la cual permite identificar zonas críticas, establecer valores permisibles de operación y detectar condiciones que podrían generar resonancia, lo que derivaría en vibraciones excesivas y posibles fallas. En el caso de los motocompresores de gas, que operan bajo condiciones de alta presión y temperatura, el control de vibraciones es esencial para evitar daños en componentes como cilindros, válvulas, soportes y tuberías. De esa forma, la falta de un protocolo de monitoreo adecuado puede ocasionar paradas no planificadas y pérdidas económicas significativas.

En cuanto al sector de hidrocarburos, este es estratégico para la economía nacional. En 2022, Ecopetrol registró ingresos por COP 159.5 billones, lo que representó aproximadamente el 10.9 % del Producto Interno Bruto (PIB). Además, el reciente hallazgo del yacimiento Sirius-2, con un volumen estimado superior a seis terapias cúbicas de gas *in place*, podría incrementar en un 200 % las reservas del país. Este crecimiento en la capacidad de explotación exige que los equipos involucrados en la cadena de valor, como los motocompresores, operen con máxima confiabilidad y disponibilidad. No obstante, la ausencia de documentación técnica estandarizada sobre el diagnóstico de vibraciones en estos equipos representa un desafío para los profesionales de mantenimiento, quienes suelen basarse en experiencia empírica o información dispersa.

Consecuentemente, el desarrollo de este protocolo de monitoreo podría contribuir a mejorar la confiabilidad de los activos, reducir los tiempos de parada no planificados y minimizar fallas en los equipos. Además, este permitiría optimizar la planificación del mantenimiento, al reducir los costos operativos y prolongar la vida útil de los motocompresores. Asimismo, esta investigación fomentaría la formación de profesionales en mantenimiento predictivo, para proporcionarles herramientas técnicas y metodológicas para abordar problemas de vibración en equipos críticos.

En conclusión, este estudio responde a una necesidad técnica específica dentro de un sector clave para la economía nacional, con lo que promueve la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad en la explotación de gas natural.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer y ejecutar un protocolo de monitoreo para vibraciones estructurales, alineado con la guía del EFRC y aplicable por Confipetrol en sus rutinas de mantenimiento predictivo, de manera que este permita diagnosticar el estado integral de la infraestructura de soporte (skid, cimentación, tuberías) de los motocompresores Waukesha/Caterpillar-Ariel, con el fin de prevenir fallas y optimizar la planificación del mantenimiento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar y analizar las normas y guías técnicas, con especial énfasis en la guía del EFRC (cuarta edición), para identificar los parámetros y metodologías aplicables.
- Caracterizar fuentes y patrones de vibración en motocompresores horizontales con motor Waukesha/Caterpillar y compresor Ariel.
- Proponer un protocolo para el monitoreo de vibraciones que incluya procedimientos para la recolección, el procesamiento y el análisis de datos.
- Ejecutar el protocolo de monitoreo propuesto mediante la aplicación en un caso de estudio o en condiciones controladas.

3 MARCO DE REFERENCIA

3.1 MARCO CONCEPTUAL

Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia que busca anticipar fallas en los equipos mediante el monitoreo continuo de sus condiciones operativas. A diferencia del mantenimiento correctivo, que actúa después de una falla, o del preventivo, que se basa en intervalos de tiempo fijos, el mantenimiento predictivo utiliza técnicas avanzadas –como el monitoreo de vibraciones, la termografía y el análisis de aceite– para detectar anomalías antes de que se conviertan en problemas críticos. Esta estrategia no solo reduce los costos asociados con paradas no planificadas, sino que también aumenta la confiabilidad de los activos y optimiza el uso de recursos [2].

Vibraciones en equipos industriales

Las vibraciones son movimientos oscilatorios que se producen en máquinas y estructuras debido a fuerzas dinámicas generadas durante su operación. En el contexto de los motocompresores horizontales, como los equipos con motor Waukesha/Caterpillar y compresor Ariel, las vibraciones son un fenómeno inherente a su funcionamiento, especialmente por la acción cíclica de componentes como pistones, bielas y válvulas. Sin embargo, cuando estas vibraciones superan los límites permisibles, pueden convertirse en un indicador crítico de desgaste, desajustes o fallas inminentes. Por tanto, su monitoreo es esencial para garantizar la integridad estructural, la eficiencia operativa y la seguridad en procesos de extracción de gas [1].

Fuentes de vibración

En motocompresores horizontales, las principales fuentes de vibración incluyen:

- **Desbalance mecánico:** causado por una distribución desigual de masas en componentes rotativos o alternativos, como el cigüeñal o los pistones.
- **Desalineación:** ocurre cuando los ejes del motor y el compresor no están correctamente alineados, lo que genera fuerzas laterales y momentos torsionales.
- **Holguras excesivas:** presentes en cojinetes, soportes o acoplamientos, que permiten movimientos no deseados durante la operación.
- **Resonancia:** fenómeno que amplifica las vibraciones cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema; por ejemplo, las tuberías o los soportes del compresor.
- **Fuerzas pulsantes:** producidas por la compresión intermitente del gas en los cilindros, típica de compresores alternativos, como el modelo Ariel.

Efectos de las vibraciones excesivas

Cuando las vibraciones superan los niveles recomendados por normas como la ISO 10816, pueden ocasionar:

- Fatiga de materiales: grietas o fracturas en componentes críticos, como cilindros, soportes o tuberías, debido a la acumulación de tensiones cíclicas.
- Fallos prematuros en sellos y cojinetes: pérdida de estanqueidad en el sistema de gas o desgaste acelerado en rodamientos.
- Paradas no planificadas: interrupciones en la producción por fallas repentinas, con costos asociados a la reparación y la pérdida de productividad.
- Daños en instrumentación: errores en mediciones de presión o temperatura debido a la vibración de sensores y manómetros [1].

Finalmente, en motocompresores utilizados para extracción de gas, estos representan riesgos de seguridad especialmente en entornos con presencia de gases inflamables.

Motocompresores horizontales

Los motocompresores son equipos utilizados para comprimir gases, como el gas natural, en procesos de extracción, transporte y almacenamiento. Están compuestos por un motor que proporciona la energía mecánica necesaria y un compresor que transforma esta energía en presión para mover el gas. En el caso de los motocompresores horizontales, su diseño permite una distribución equilibrada de cargas y una mayor estabilidad durante la operación, lo que los hace ideales para aplicaciones de alta presión y largos periodos de funcionamiento, como en la extracción de gas [5].

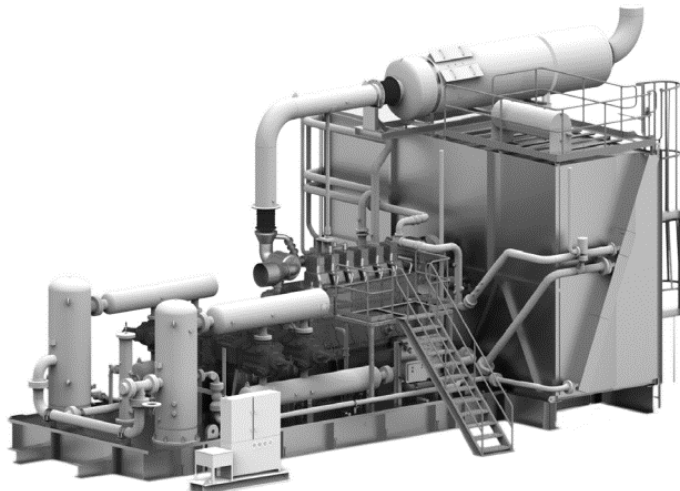


Ilustración 2. Motocompresor horizontal Ariel Corporation [5].

Componentes críticos

Los motocompresores horizontales cuentan con varios componentes críticos que son susceptibles a vibraciones y desgaste:

1. Cilindros: encargados de comprimir el gas mediante el movimiento alternativo de los pistones.
2. Válvulas: regulan el flujo de gas hacia y desde los cilindros, y son propensas a la fatiga debido a los ciclos repetitivos de apertura y cierre.
3. Soportes y bases: sostienen el motor y el compresor, y deben resistir las cargas dinámicas generadas durante la operación.
4. Tuberías y conexiones: transportan el gas comprimido y están expuestas a vibraciones y pulsaciones que pueden causar fatiga en las soldaduras y uniones.
5. Sistema de lubricación: asegura el correcto funcionamiento de cojinetes y pistones, y su falla puede generar fricción excesiva y vibraciones [6].

Normas y guías para el monitoreo de vibraciones

Directrices sobre vibraciones en compresores alternativos del EFRC, cuarta edición, de marzo de 2017

La guía del EFRC, en su cuarta edición, establece directrices integrales para el monitoreo de vibraciones en equipos rotativos y alternativos, con un enfoque particular en la prevención de fallas estructurales. Esta guía se destaca por los siguientes elementos:

Enfoque en análisis de vibraciones estructurales: incluye metodologías para evaluar vibraciones en componentes no rotativos, como soportes, tuberías y bases, críticos en motocompresores horizontales.

Recomendaciones adaptables: propone umbrales de vibración ajustables según el tipo de equipo, las condiciones operativas (presión, temperatura) y la criticidad del activo.

Aplicabilidad a motocompresores: aborda casos específicos de compresores alternativos, como los modelos Ariel, donde las fuerzas pulsantes y cargas cíclicas exigen un monitoreo riguroso [3].

Otras normas relevantes

1. ISO 13373-1:2022 (*Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration monitoring*):
 - Define procedimientos para la medición, el procesamiento y la interpretación de datos de vibración.
 - Incluye ejemplos de espectros de frecuencia y patrones de fallas comunes en equipos rotativos y alternativos.

- Es útil para estandarizar la recolección de datos en motocompresores (ISO, 2022).
2. ISO 10816-1:1995 (*Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*):
- Establece límites permisibles de vibración para máquinas industriales, basados en mediciones de partes no rotativas (soportes o carcasas).
 - Proporciona valores de referencia para motores y compresores, al clasificar la severidad de las vibraciones en rangos de "aceptable" a "peligroso".

EFRC: es una organización que promueve el uso eficiente y seguro de los compresores alternativos. Su guía proporciona buenas prácticas, metodologías y recomendaciones para el monitoreo de condiciones en este tipo de equipos, lo que incluye la vibración estructural, que es un factor crítico en su mantenimiento [3].

Acelerómetro: sensor que convierte la aceleración mecánica en una señal eléctrica proporcional. Es el dispositivo más usado para el monitoreo de vibraciones estructurales.



Ilustración 3. Acelerómetro digital [14].

Amplitud: hace referencia al valor más alto del movimiento de la vibración. Este valor puede expresarse en unidades de desplazamiento (miles o micras), velocidad (pulgadas por segundo o milímetros por segundo), o aceleración (pulgadas por segundo al cuadrado). Para la caracterización de la amplitud de la vibración, es común definir términos como valor pico a pico, valor cero-pico (0-Pk) y valor cuadrático medio (RMS) [13].

Amortiguamiento: capacidad de un sistema para disipar energía vibratoria, al reducir la amplitud de las oscilaciones [15].

Análisis espectral: técnica que descompone una señal vibratoria en sus componentes de frecuencia, lo que permite identificar fallas específicas; por ejemplo, el desbalanceo en 1X, la desalineación en 2X, etc. [16].

Espectro de frecuencia: representación gráfica de la amplitud de una señal en función de la frecuencia. Este permite relacionar componentes vibratorios con fallas mecánicas.

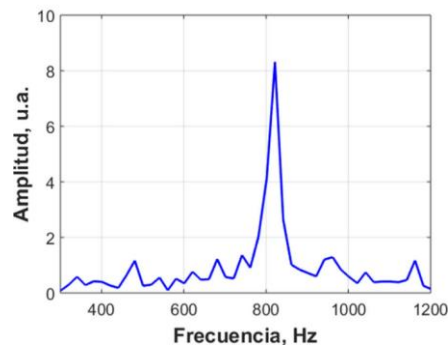


Ilustración 4. Espectro frecuencial [17].

Fase: relación temporal entre dos señales de vibración o entre una señal vibratoria y la referencia del eje (tacómetro). Su análisis ayuda a identificar resonancias y desalineaciones [18].

Forma de onda: es una representación gráfica de la señal de vibración en el dominio del tiempo. Muestra cómo varía la amplitud (desplazamiento, velocidad o aceleración) a lo largo del tiempo.

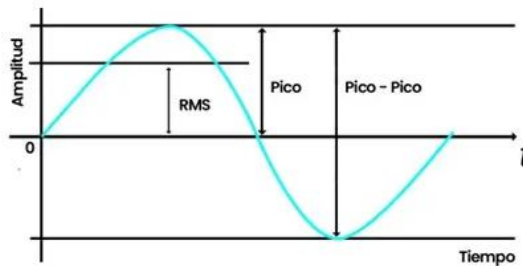


Ilustración 5. Amplitud [19].

Frecuencia excitatriz: frecuencia generada por una fuente de excitación, como la rotación del eje (1X RPM) o la pulsación del gas [20].

Monitoreo de desempeño dinámico: es una técnica predictiva aplicada en motocompresores que mide presión, temperatura y parámetros de cilindros en tiempo real para detectar problemas internos [21].

Pulsación de presión: variación periódica de la presión del gas en tuberías y cilindros de un compresor que puede inducir vibraciones estructurales [22].

Resonancia: fenómeno en el cual la frecuencia excitatriz coincide con la frecuencia natural de un sistema, dado que amplifica la vibración y puede causar fallas [23].

RMS: valor cuadrático medio, usado como medida global de la magnitud de vibración en velocidad (mm/s RMS) o aceleración (m/s² RMS) [24].

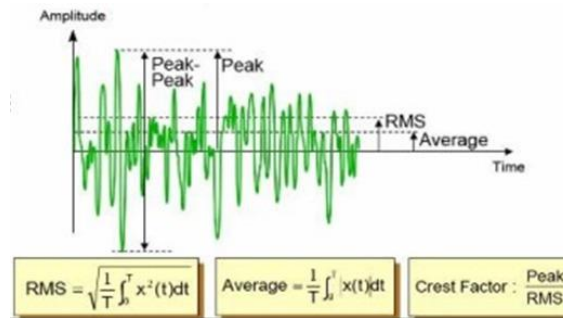


Ilustración 6. Representación parámetros de señal en el dominio del tiempo [29].

Sensor triaxial: tipo de acelerómetro que mide vibraciones en tres direcciones ortogonales (X, Y, Z) simultáneamente.



Ilustración 7. Sensor triaxial sensing [25].

Soltura mecánica: condición en la que componentes o uniones estructurales (pernos, soportes) pierden ajuste, por lo que generan vibraciones irregulares [26].

Velocidad de vibración: parámetro derivado de la vibración, expresado en mm/s RMS, útil para evaluar la severidad de vibraciones estructurales según normas como la ISO 10816 [23].

0-Pk: medida de amplitud que representa el valor máximo de la vibración respecto al nivel cero. Se usa en manuales de fabricantes como Ariel [27].

Armónicos de RPM y subarmónicos (1X, 2X, 0.5X): componentes de frecuencia que corresponden a la velocidad de rotación del eje (1X), su múltiplo (2X, típico de desalineación) o la mitad (0.5X, indicativa de holgura mecánica) [28].

3.2 ESTADO DEL ARTE

3.2.1 Revisión de la literatura en monitoreo de vibraciones

Fundamentos del monitoreo de vibraciones

El monitoreo de vibraciones es una técnica consolidada dentro del mantenimiento predictivo. Estudios pioneros han demostrado que el análisis mediante la transformada de Fourier (FFT) y el uso de acelerómetros permiten detectar patrones y frecuencias anómalas en maquinaria rotativa. Asimismo, diversas investigaciones han establecido metodologías para la identificación temprana de fallas en equipos

críticos, con base en análisis espectrales y en el uso de filtros digitales que separan el ruido operativo de los indicios de fallo. Además, estándares internacionales como la ISO 10816 y las normas API proporcionan parámetros de referencia para evaluar los niveles de vibración aceptables en equipos industriales [12].

Aplicaciones en equipos rotativos y compresores

La literatura muestra que, si bien existen numerosos estudios sobre el monitoreo de vibraciones en equipos rotativos (turbinas, bombas y motores), pocos se han centrado específicamente en compresores horizontales utilizados en la extracción de gas. Aunado a lo anterior, investigaciones en el sector petroquímico han evidenciado lo siguiente:

- La detección temprana de desequilibrios, desalineaciones y fallas en rodamientos puede lograrse mediante el análisis en tiempo real de los espectros de vibración.
- La integración de datos provenientes de sensores distribuidos y el análisis de tendencias mediante algoritmos de *machine learning* permiten predecir fallas con mayor precisión y anticipar intervenciones de mantenimiento. Estudios de caso en plantas de procesamiento de gas han demostrado que la aplicación de sistemas de monitoreo continuo reduce significativamente los tiempos de inactividad y extiende la vida útil de los equipos, al mismo tiempo que optimiza la planificación del mantenimiento [12].

Investigaciones específicas en motocompresores horizontales

Aunque la mayoría de los estudios se han orientado hacia equipos generales de maquinaria rotativa, existen investigaciones que abordan directamente las particularidades de los motocompresores horizontales:

- Diagnóstico de fallas mediante análisis espectral: diversos trabajos han aplicado técnicas de FFT y análisis modal para identificar fallas en compresores, lo que evidencia que ciertos picos en la frecuencia pueden correlacionarse con defectos en la estructura o desbalance en componentes críticos.
- Integración de tecnologías del internet de las cosas (IoT) y *big data*: recientes investigaciones han explorado la implementación de redes de sensores inalámbricos y el procesamiento en la nube para capturar datos de vibración en tiempo real. Estos sistemas, combinados con algoritmos de inteligencia artificial, permiten la detección de patrones de fallo antes de que se presenten daños severos.
- Modelado predictivo y *machine learning*: algunos estudios han desarrollado modelos predictivos basados en algoritmos de clasificación y *clustering* para analizar grandes volúmenes de datos de vibración. Estos modelos han mostrado resultados prometedores en la reducción de falsos positivos y en la mejora de la precisión en el diagnóstico de anomalías [12].

Protocolos y estándares vigentes

A pesar de que existen protocolos generales para el monitoreo de vibraciones, la literatura resalta la carencia de un protocolo adaptado a las condiciones específicas de los motocompresores horizontales en la industria de gas:

- Normas internacionales: las directrices de la ISO 10816 y otros estándares API ofrecen un marco de referencia, pero su aplicación directa en compresores sometidos a condiciones extremas requiere ajustes y validaciones adicionales.
- Propuestas de protocolos integrados: investigaciones recientes proponen la integración de análisis espectral, modelado predictivo y sistemas de alerta temprana, aunque la mayoría de estos estudios se han realizado en entornos controlados o en equipos no específicos del sector gasífero. Esto abre la oportunidad para desarrollar un protocolo que combine las mejores prácticas y tecnologías emergentes, validado mediante pruebas *in situ* [12].

Vacíos en la literatura y oportunidades de investigación

La revisión de investigaciones evidencia varios vacíos y áreas de oportunidad: especificidad del equipo, integración multidisciplinaria, validación en campo y adaptación de protocolos existentes.

3.3 MARCO TEÓRICO

3.3.1 Vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas son movimientos oscilatorios que se presentan en los sistemas físicos como resultado de fuerzas internas o externas. En equipos rotativos y compresores industriales, como los motocompresores horizontales utilizados en la extracción de gas, estas vibraciones pueden ser señales de funcionamiento normal o síntomas de fallas inminentes. Así las cosas, el estudio de las vibraciones permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo para garantizar la continuidad operativa y la seguridad.

Consecuencias de las vibraciones

Las vibraciones excesivas o no controladas pueden generar una serie de efectos perjudiciales, entre los que se destacan:

- Fatiga estructural y generación de grietas.
- Desalineación y desgaste prematuro de componentes.
- Daños en rodamientos y sellos.
- Pérdida de eficiencia energética y aumento de costos de operación.
- Riesgos para la seguridad del personal y del entorno.

Asimismo, en el caso de motocompresores horizontales, estas consecuencias pueden escalar rápidamente debido a su funcionamiento continuo y a las cargas dinámicas que manejan [11].

Tipos de vibraciones mecánicas

Las vibraciones se clasifican comúnmente en función de su causa, comportamiento dinámico y presencia de fuerzas externas. Entre los principales tipos se encuentran:

- Vibraciones libres: ocurren cuando un sistema vibra tras verse perturbado, sin influencia externa continua.
- Vibraciones forzadas: son inducidas por fuerzas externas periódicas o aleatorias, como desbalanceo o problemas en el acoplamiento.
- Vibraciones amortiguadas: pierden energía con el tiempo debido a la fricción u otros mecanismos disipativos.
- Vibraciones no amortiguadas: mantienen su amplitud constante en el tiempo, lo cual no es común en la práctica [8].

Vibraciones por frecuencias naturales

Todo sistema físico tiene una o más frecuencias naturales de vibración. Si una fuerza externa actúa cerca de una de estas frecuencias, el sistema puede entrar en un estado de oscilación elevada, incluso con una excitación mínima. Ante esto, identificar las frecuencias naturales de un motocompresor permite evitar condiciones peligrosas durante su operación.

Vibraciones por resonancias

La resonancia ocurre cuando la frecuencia de excitación coincide con una frecuencia natural del sistema. Este fenómeno puede amplificar drásticamente las amplitudes de vibración, lo cual causa daños severos. En motocompresores horizontales, la resonancia puede desencadenar fallas críticas, por lo que es esencial detectarla y evitarla mediante un monitoreo y un diseño estructural adecuado [10].

3.3.2 Medición de la vibración

El monitoreo de vibraciones es una técnica clave en el mantenimiento predictivo, especialmente en máquinas rotativas, como los motocompresores. La correcta medición y el análisis de las señales vibracionales permiten detectar desviaciones respecto al comportamiento normal del equipo, con lo que se anticipan fallas y se mejora la confiabilidad [11].

Parámetros de medición y análisis de vibración

Los principales parámetros que se utilizan en la medición de vibraciones son los siguientes:

- Desplazamiento: mide cuánto se mueve una parte respecto a su posición de reposo (usado para bajas frecuencias).
- Velocidad: relaciona el desplazamiento con el tiempo, lo cual es útil para evaluar el estado general de la máquina.
- Aceleración: mide la rapidez del cambio de velocidad; es sensible a defectos de alta frecuencia, como los generados por rodamientos defectuosos.

Además, el análisis espectral mediante la FFT permite descomponer las señales de vibración en frecuencias individuales, lo que facilita la identificación de problemas específicos, como desbalanceo, desalineación, holguras o defectos en elementos rodantes [9].

Tipos de sensores o transductores empleados en la medición de vibraciones

Para llevar a cabo el monitoreo de vibraciones, se utilizan diversos tipos de sensores; entre los más comunes están los siguientes:

- Acelerómetros: sensores piezoeléctricos o MEMS que convierten la aceleración en señales eléctricas. Son los más utilizados por su precisión y su amplio rango de frecuencia.
- Velocímetros: convierten la vibración en velocidad, por lo que son ideales para el monitoreo en frecuencias medias.



Ilustración 8. Acelerómetro digital [30].

- Sensores de desplazamiento: como los LVDT o sensores de proximidad (Eddy Current), se usan para detectar desplazamientos muy pequeños, generalmente en componentes de baja frecuencia.



Ilustración 9. Sensor de posición LVDT [30].

Unidades para la medición de vibraciones

La elección de las unidades de vibración a medir se relaciona con las frecuencias en las cuales se encuentran las fallas a estudiar. El desplazamiento es el parámetro

utilizado para máquinas de baja velocidad que presentan vibraciones de baja frecuencia, usualmente menores de 1000 Hz; y la velocidad es la variable más utilizada y es la referencia en las normas ISO de severidad de la vibración en máquinas rotativas y reciprocantes. Esta última usualmente se emplea para máquinas con frecuencias entre 10 Hz y 2000 Hz, y la aceleración se utiliza para medir máquinas de altas velocidades o fallas que se ubican en la región del espectro de alta frecuencia, arriba de los 2000 Hz y posiblemente arriba de los 30 kHz. Por otro lado, las unidades dependen del parámetro medido:

- Desplazamiento: se expresa en micrómetros (μm) o milímetros (mm).
- Velocidad: se expresa en milímetros por segundo (mm/s) o pulgadas por segundo (in/s).
- Aceleración: se expresa en metros por segundo al cuadrado (m/s^2) o en g (aceleración gravitacional).

4 MARCO NORMATIVO Y TEÓRICO

El diseño de un protocolo efectivo de monitoreo de vibraciones en motocompresores Waukesha/Caterpillar-Ariel requiere fundamentarse en dos pilares esenciales: el conocimiento técnico de las fuentes y los efectos de las vibraciones en estos equipos, y el marco normativo que establece los criterios para su evaluación y control. Este capítulo integra ambos aspectos, al revisar las normas internacionales –como la guía EFRC y la norma ISO 10816–, los manuales de fabricantes (Ariel Corporation, Waukesha Engine) y los principios de dinámica vibratoria aplicados a compresores alternativos.

La selección de estos referentes se basa en el hecho de que, mientras que normas genéricas como la ISO 10816-3 proporcionan límites de vibración para máquinas reciprocantes, estas no consideran variables clave en motocompresores de gas, como las fuerzas pulsantes o la interacción con sistemas de tuberías. Por ello, este análisis comparativo identifica brechas técnicas y propone adaptaciones basadas en evidencia empírica recopilada en plantas industriales.

Adicionalmente, se explican los fundamentos físicos de las vibraciones estructurales, desde su generación (desbalance mecánico, pulsaciones de presión) hasta su propagación en componentes críticos (válvulas, soportes, cilindros). Este enfoque dual (normativo y teórico) sirve como base para el protocolo de monitoreo desarrollado en el Capítulo 5, el cual asegura que no solo se cumpla con los estándares globales, sino que también se responda a las necesidades de los equipos que operan en las condiciones de presión y temperatura del proceso.

4.1 REVISIÓN DE NORMAS, MANUALES Y GUÍAS

Esta sección establece el marco de referencia y las prácticas identificadas que rigen el diseño, la ejecución y la evaluación del protocolo de monitoreo.

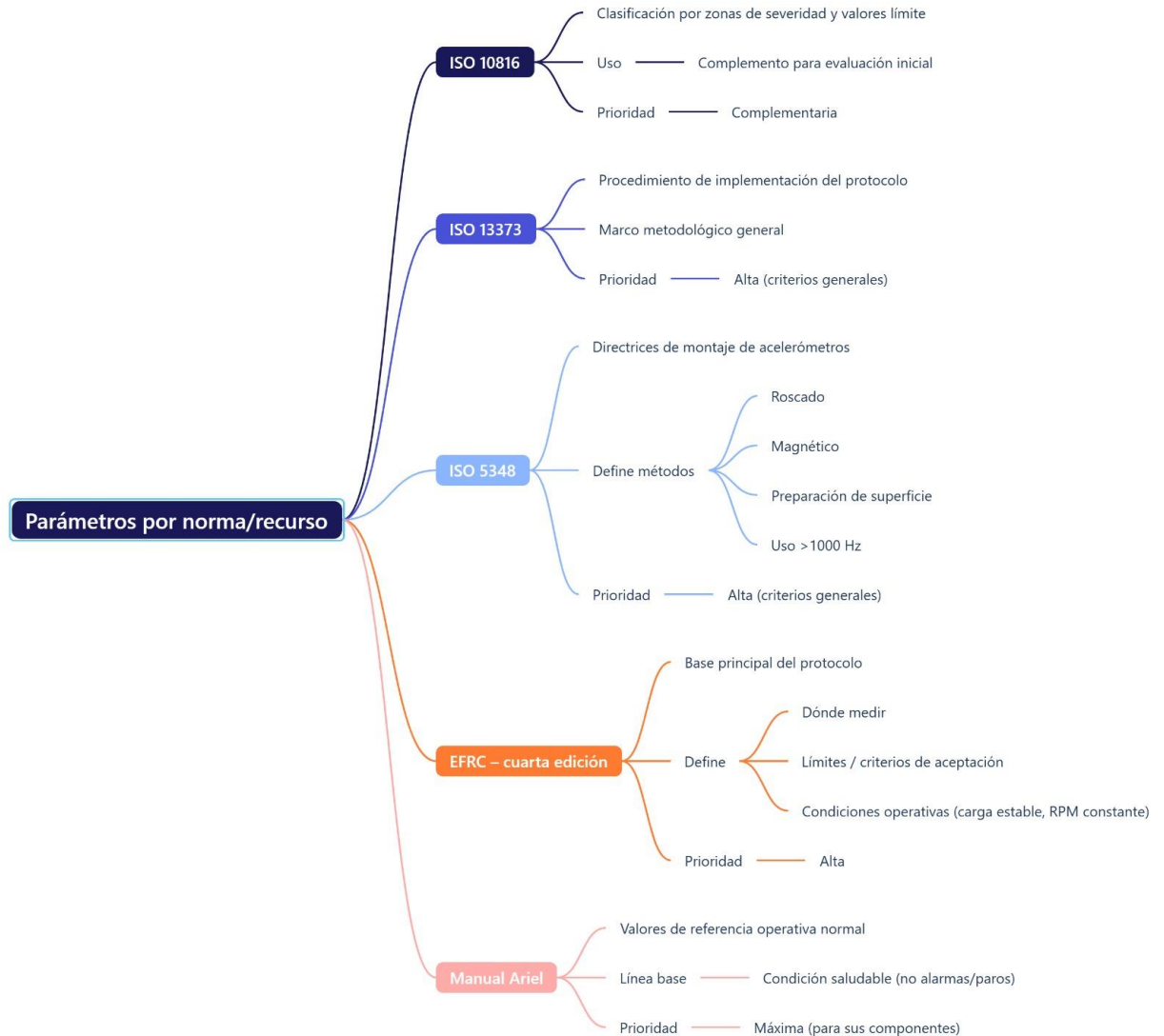


Ilustración 10 Mapa conceptual Normas y recursos.

4.1.1 ISO 10816-6

“Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en piezas no giratorias. Parte 6: Máquinas alternativas con potencias superiores a 100 kW”.

La norma internacional ISO 10816-6 proporciona directrices para la evaluación de la severidad de las vibraciones en máquinas; ello, mediante la clasificación de su

estado mecánico en función de los valores globales de vibración medida. Esta norma establece una escala de clasificación basada en cuatro zonas de severidad:

Interpretación de las zonas de severidad

- **Zona A (estado óptimo):** corresponde a los niveles de vibración típicos de una máquina nueva o recién instalada, y representa la condición operativa ideal.
- **Zona B (estado aceptable):** indica que la vibración se encuentra en un rango considerado normal para una operación continua, segura y a largo plazo. No se anticipa ningún riesgo de daño.
- **Zona C (alerta/condición de precaución):** los niveles de vibración en esta zona se clasifican como insatisfactorios para la operación permanente. Por ello, se recomienda incrementar la frecuencia de monitoreo y planificar una intervención de mantenimiento para identificar y corregir la causa raíz.
- **Zona D (peligro/condición crítica):** la severidad de la vibración en esta zona es elevada e implica un alto riesgo de falla catastrófica. Ante esto, se prescribe detener el equipo de inmediato para realizar una inspección exhaustiva y efectuar las reparaciones necesarias.

De esa forma, para el caso específico de los equipos reciprocantes con potencia superior a 100 kW, clasificados dentro de la clase de máquina 5, la norma ISO 10816-6 define los siguientes límites de referencia (RMS) entre zonas:

Zona de severidad	Estado de la máquina	Desplazamiento (μm, RMS)	Velocidad (mm/s, RMS)	Aceleración (m/s ² , RMS)
Zona A	Excelente/nueva	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2
Zona B	Aceptable/normal	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2
Zona C	Precautorio	> 448 < 710	> 28.2 < 44.6	> 44.2 < 70.1
Zona D	Peligro/inaceptable	>710	> 44.6	> 70.1

Tabla 1. Norma ISO 10816-6, para equipos reciprocantes > 100 kW [27].

4.1.2 ISO 13373: procedimientos para la implementación de un sistema de monitoreo de condición

Tras revisar la norma, se encontró que la información relevante para el protocolo de monitoreo de vibraciones planteado es la que se describe a continuación.

4.1.2.1 Definición del sistema de monitoreo

La implementación de un sistema de monitoreo de condición debe basarse en un análisis de necesidades técnicas y viabilidad de implementación. Como primer paso, se debe seleccionar el tipo de sistema entre las siguientes opciones:

- **Permanente:** monitoreo continuo con sensores fijos.
- **Semipermanente:** instalación temporal para diagnóstico.
- **Portátil:** mediciones con equipos móviles.

4.1.2.2 Estrategia de recolección de datos

Se establecerá uno de los siguientes enfoques según los requisitos operativos:

- Continua: adquisición ininterrumpida de datos.
- Periódica: mediciones programadas a intervalos definidos.

4.1.2.3 Componentes clave del programa

- Parámetros de monitoreo y datos esenciales:
 - Vibraciones (espectro, amplitud, frecuencia).
 - Condiciones operativas (RPM, carga, temperatura).
- Protocolos de medición:
 - Consistencia: todas las mediciones deben realizarse en condiciones operativas normales para garantizar comparabilidad. Cualquier desviación debe documentarse.
 - Validez de tendencias: se deben mantener parámetros operativos constantes en mediciones sucesivas para evitar interpretaciones erróneas. En ese sentido, las variaciones de carga no deben confundirse con fallos mecánicos.
 - Frecuencia adaptativa: ajustar la tasa de adquisición según el estado crítico del equipo.

4.1.3 Directrices EFRC para vibraciones en sistemas de compresores alternativos

EL EFRC se fundó en 1999. Este señala que las vibraciones son un criterio importante para juzgar la seguridad integridad y la eficacia de las instalaciones de compresores. Al respecto, las normas existentes son poco específicas y no distinguen entre los niveles de vibración de las distintas partes del sistema de compresores alternativos, como los cimientos y tuberías; por este motivo, se desarrollaron las *Directrices EFRC para vibraciones en sistemas de compresores alternativos* [3]. Dicho documento, al ser específicamente para compresores alternativos, contiene más información que puede aplicarse para la creación del protocolo de monitoreo.

4.1.3.1 Condiciones operativas durante la medición

- **Requisitos de operación:** el compresor debe verse estable (carga, presión y temperatura constantes) durante las mediciones.
- **Registro de datos:** se deben documentar la carga del compresor, la presión de descarga, la temperatura y la velocidad de rotación para correlacionar vibraciones con condiciones operativas.

4.1.3.2 Criterios de aceptación por componente

El EFRC establece límites diferenciados según el componente y el tipo de compresor. Además, según los equipos a monitorear, los valores podrían ser los siguientes.

Parte del sistema de compresor	Valores de velocidad de vibración RMS para compresores horizontales (mm/s)		
	Límite de zona de evaluación		
	A/B	B/C	C/D
Cimiento	2.0	3.0	4.5
Marco (parte superior)	5.3	8.0	12.0
Cilindro (lateral)	8.7	13.0	19.5
Cilindro (vara)	10.7	16.0	24.0
Amortiguadores	12.7	19.0	28.5
Tubería	12.7	19.0	28.5
Conexión de pequeño diámetro	12.7	19.0	28.5

Tabla 2. Resumen de los valores generales de velocidad de vibración constante para diferentes partes del sistema de compresores [3].

Zona	Rango	Criterio	Acción
A	$\leq A/B$	Aceptable	Continuar monitoreo.
B	$> A/B$ y $\leq B/C$	Aceptable	Los sistemas de compresores con vibraciones dentro de estas zonas se consideran normalmente aceptables para un funcionamiento a largo plazo.
C	$> B/C$ y $\leq C/D$	Marginal	Análisis y posible corrección para tener en cuenta. Hay que aclarar que el compresor es adecuado para un funcionamiento seguro a largo plazo.
D	$> C/D$	Inaceptable	Corrección urgente o parada a realizar.

Tabla 3. Descripción de zonas de evaluación [6].

4.1.3.3 Equipos y especificaciones técnicas mínimas

- Capacidades del analizador de vibraciones: rango de frecuencia desde 0.5 Hz (para desplazamiento) hasta ≥ 5 kHz (para aceleración).
- Resolución FFT: mínimo 800 líneas, pero se recomiendan ≥ 1600 para análisis espectral detallado).
- Sensores: acelerómetros con rango ≥ 500 Hz para vibraciones estructurales. Asimismo, se deben incluir sensores de velocidad para frecuencias medias (10-1000 Hz).
- Calibración: equipos certificados según ISO 16063 (calibración de sensores vibratorios).

4.1.3.4 Documentación y registro de resultados

- Registros obligatorios:
 - FFT para cada punto de medición.
 - Valores globales (RMS) de velocidad, desplazamiento y aceleración.
 - Condiciones ambientales (temperatura, humedad) que puedan afectar las mediciones.
- Formato de reporte: incluir diagramas de ubicación de sensores y direcciones de medición.

4.1.3.5 Ubicaciones básicas de medición

Las mediciones deben realizarse en las siguientes ubicaciones (figuras 10 y 11 del EFRC):

- Cimentación: en todos los puntos de pernos del marco del compresor.
- Marco del compresor: en cada esquina superior y entre cilindros (para compresores con >2 cilindros).
- Cilindros (lateral y del vástago): en la parte rígida de la brida de la tapa de cada cilindro.
- Amortiguadores de pulsación (succión/descarga): en bridas de entrada/salida y cabezas (solo la superior para amortiguadores verticales).
- Tuberías: en partes críticas del sistema, determinadas por inspección y acuerdo con el comprador.
- Conexiones de pequeño diámetro.

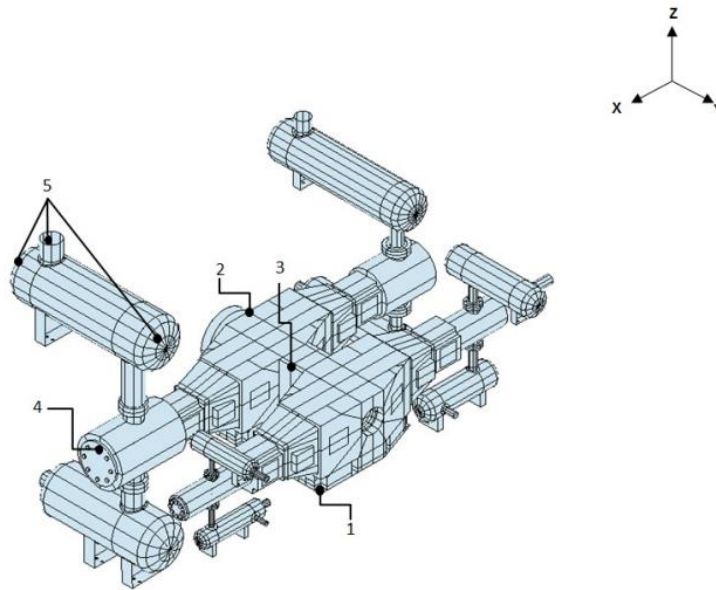


Ilustración 11. Zonas de medición para un compresor horizontal [6].

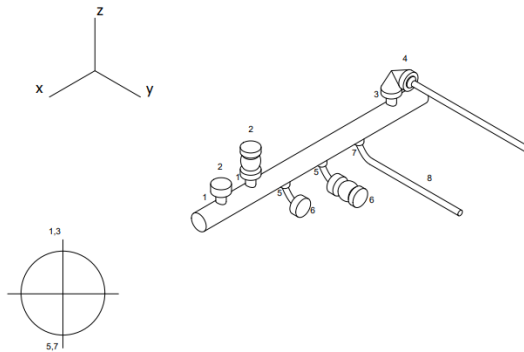


Ilustración 12. Medición de conexiones típicas de pequeño calibre [6].

4.1.4 ISO 5348: montaje de sensores

El montaje del acelerómetro es crítico para garantizar la fidelidad de las mediciones de vibración. A continuación, se sintetizan las directrices clave basadas en la norma ISO 5348 y las experiencias prácticas en compresores recíprocos.

Métodos de montaje (priorizados)

- Montaje con espárrago roscado (método preferido):
 - Ventaja: máxima transferencia de señales de alta frecuencia (pérdida mínima de señal).
 - Requisito: superficie lisa, plana y limpia; se requiere taladrar y roscar el equipo.

- **Aplicación:** ideal para puntos fijos en bancadas o cilindros donde se permita modificar la superficie.
- Montaje magnético:
 - Ventaja: no intrusivo, rápido y adecuado para frecuencias ≤ 1000 Hz (rango aplicado a los compresores de estudio).
 - Requisito: superficies planas y magnéticas; usar imanes de doble pie para superficies curvas.
 - Aplicación: bridas de tuberías, amortiguadores de pulsación y bastidores.

4.1.5 Manual del fabricante

El fabricante Ariel Corporation establece límites de vibración en velocidad (0-Pk) filtrada en 10-250 Hz para componentes específicos de sus compresores (Tabla 4). Estos valores, basados en experiencia de campo, aseguran que los esfuerzos por fatiga se mantengan bajo umbrales críticos. Ello contrasta con las directrices EFRC, que usan RMS, pero son consistentes en magnitud para cilindros y bastidores [5].

Componentes del paquete	JG:A:M:P:N:Q:R:W, KB 100	JGJ:H:E:K:T, KBE:K:T	JGC:D:F:B:V:Z:U, KBB:V:Z:U
Patín	<0.10 (<2.5)	<0.15 (<3.8)	<0.20 (<5.1)
Frame del compresor (Carcasa)	<0.20 (<5.1)	<0.40 (<10)	<0.50 (<13)
Cilindro del compresor	<0.45 (<11)	<0.80 (<20)	<1.0 (<25)
Cilindro en tándem	<0.70 (<18)	<1.0 (<25)	<1.0 (<25)

Tabla 4. Niveles de vibración comunes para compresores recíprocos de Ariel. Pulg/seg (mm/s) [5].

Los fabricantes de los motores Waukesha y Caterpillar no tienen recomendaciones para los valores de vibración del conjunto motriz.

4.1.6 Síntesis normativa y criterios de aplicación para el protocolo

4.1.6.1 Priorización de normas en caso de conflictos

Para resolver discrepancias entre normas, se establece la siguiente jerarquía:

1. Manual del fabricante (Ariel): tiene prioridad para componentes específicos (cilindros, bastidor), debido a que está diseñado para el equipo. No obstante, para el protocolo, estos elementos no se analizan en profundidad, dado que se abarcan en el monitoreo de desempeño dinámico.
2. Guía EFRC: se aplica para componentes estructurales generales (bancadas, soportes, tuberías).
3. Normas ISO: se usan como referencia general cuando las anteriores no cubren un aspecto específico.

4.1.6.2 Selección de parámetros de vibración para el monitoreo de compresores reciprocantes

La elección del parámetro de vibración (desplazamiento, velocidad o aceleración) está determinada por el rango de frecuencia de las fallas a diagnosticar. Para compresores reciprocantes, como los modelos Ariel en estudio, cuyas frecuencias operativas típicas se encuentran entre los 5 Hz y 1000 Hz, la velocidad (in/s 0-Pk) se establece como el parámetro principal. Esta elección se fundamenta en lo siguiente:

- La velocidad es el parámetro de severidad vibratoria especificado en la norma ISO 10816-8 y la guía EFRC para la evaluación de máquinas de velocidad media, como en el caso de los motocompresores (usualmente entre 300 y 1800 RPM).
- El rango de frecuencia de interés para fallas estructurales (10-1000 Hz) coincide con la sensibilidad óptima de la velocidad. Por ejemplo, el desbalanceo (1X RPM) y la desalineación (2X RPM) son claramente visibles en este dominio.
- El valor 0-Pk representa la deformación máxima instantánea que sufre un componente. Para evaluar la fatiga de materiales y la integridad estructural en puntos críticos –como soldaduras o conexiones–, el pico de esfuerzo es a veces más relevante que el valor RMS, que es un promedio de la energía.

De otra parte, la unidad in/s se adopta para mantener la consistencia con el sistema de unidades utilizado en la instrumentación del motocompresor (presión en psi, velocidad en RPM). Esto facilita la integración de datos y evita las discrepancias en el análisis correlacional entre vibración y parámetros operativos.

4.1.6.3 Parámetros clave extraídos de cada recurso

Recurso/norma	Parámetro clave	Aplicación en el protocolo	Prioridad en caso de conflicto
Norma ISO 10816	Clasificación por zonas de severidad y valores límite	Complemento de criterios EFRC, evaluación inicial de severidad	Complementaria

Norma ISO 13373	Procedimiento de implementación del protocolo	Procedimiento de implementación del protocolo	Alta (para criterios generales)
Norma ISO 5348	Directrices para el montaje de acelerómetros (métodos roscados, magnéticos)	Selección del método de montaje. Define el uso de imanes para superficies planas (>1000 Hz) y la preparación de la superficie	Alta (para criterios generales)
EFRC, cuarta edición	Condiciones operativas, criterios de aceptación. Especificaciones de equipos, documentación y ubicaciones de medición	Base principal del protocolo. Define: 1. Dónde medir (ubicaciones específicas) 2. Límites a aplicar (criterios de aceptación) 3. Condiciones requeridas (carga estable, RPM constante)	Alta (para criterios generales)
Manual Ariel	Valor de referencia operativo normal. No son límites de alarma/paro, sino valores típicos de operación saludable	Línea base de condición saludable	Máxima (para sus componentes)

Tabla 5 Resumen de aplicaciones en parámetros clave de cada norma aplicable.

4.2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS (FUENTES DE VIBRACIÓN)

Esta sección establece los fundamentos teóricos de las vibraciones mecánicas que podrían servir como base para el análisis y la interpretación de los datos del protocolo de monitoreo. Ante esto, es crucial destacar que, si bien las vibraciones pueden originarse por diversas fallas, este protocolo se enfoca exclusivamente en la vibración estructural (soportes, cimentación y tuberías). De ese modo, el diagnóstico de componentes internos (válvulas, rodamientos, cojinetes) y fallas como desbalanceo o desalineación se ve cubierto por el monitoreo de desempeño dinámico con Windrock, el cual opera en paralelo.

4.2.1 Caracterización del sistema del estructural motocompresor

El sistema estructural analizado corresponde al motocompresor Ariel JG/4 accionado por un motor CAT G3516, instalado en la estación. El equipo se encuentra montado sobre un skid metálico de aproximadamente 4.5 m de longitud, fabricado en perfiles de acero ASTM A36, el cual se apoya sobre una base de mezcla granular (arena y grava triturada) compactada, con un espesor promedio de 30 cm.

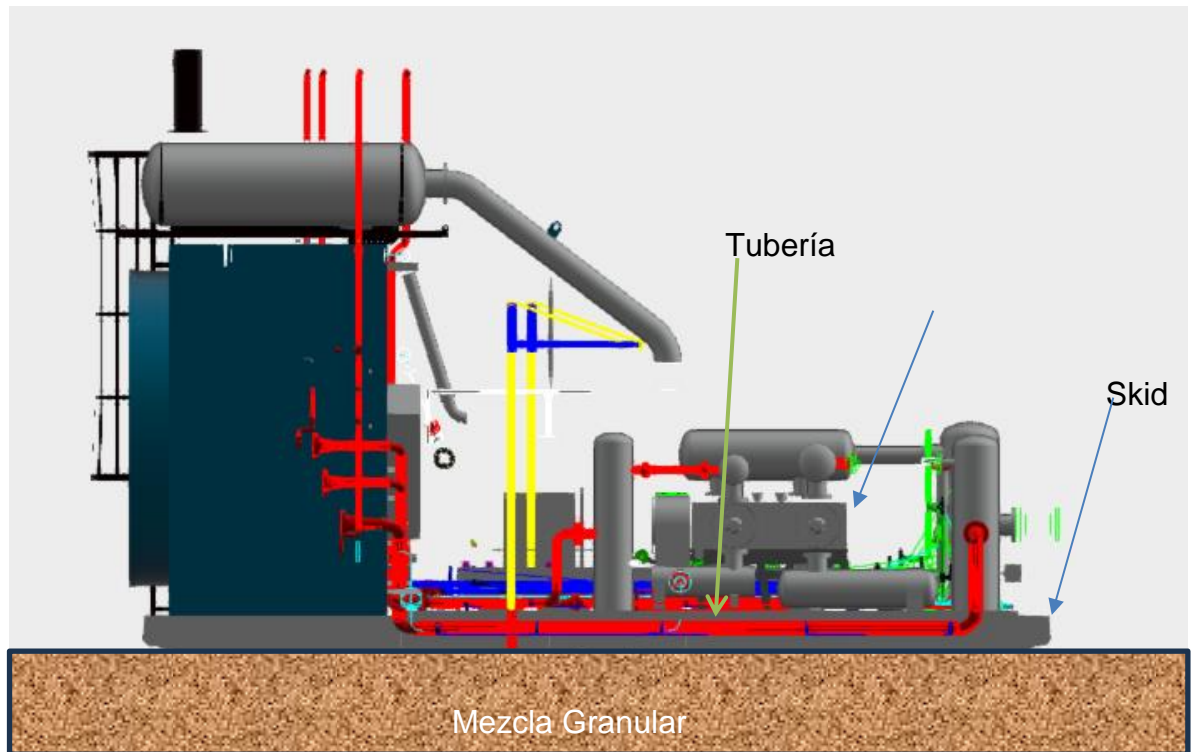


Ilustración 13. Esquema estructural.

Fuente: bibliocad

4.2.1.1 Componentes críticos del sistema

- Bancada principal o skid: estructura de soporte del motor y el compresor; punto de transferencia de fuerzas dinámicas.

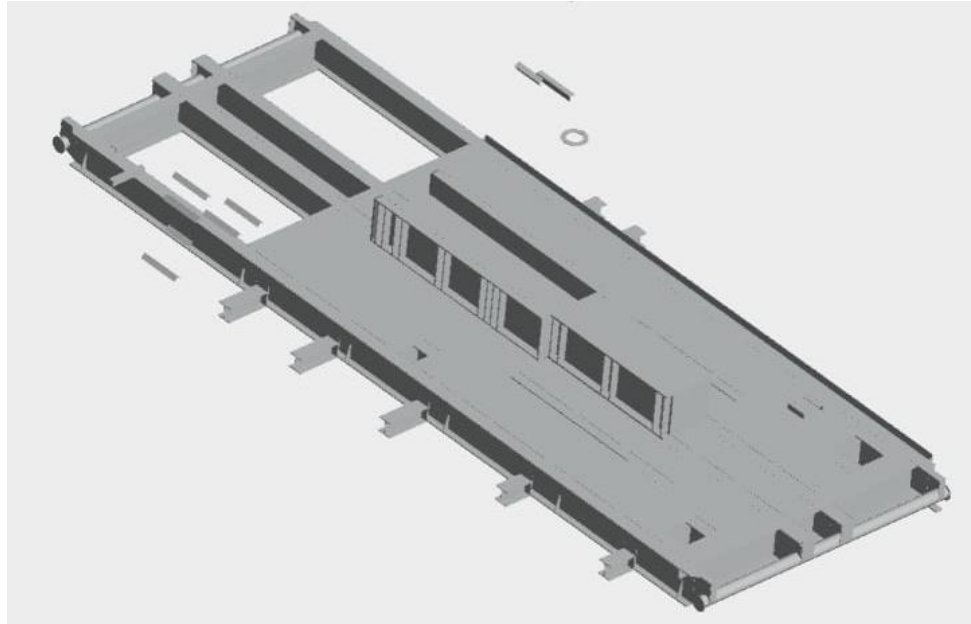


Ilustración 14. Skid del equipo.

Fuente: bibliocad

- Soportes de tuberías: abrazaderas y soportes que fijan las líneas de succión y descarga de gas.
- Base granular: capa de suelo mejorado que proporciona el apoyo final al sistema.

4.2.2 Frecuencias naturales

Cualquier estructura física (bancadas, soportes, tuberías) puede modelarse como un sistema de masas, resortes y amortiguadores. La interacción entre estos elementos define la respuesta vibratoria del sistema y su susceptibilidad a la resonancia.

Ecuación fundamental

La frecuencia natural (f_n) de un sistema no amortiguado se calcula de la siguiente manera:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación 1. Ecuación fundamental de la frecuencia natural

Donde:

- f_n = frecuencia natural (Hz).
- k = rigidez del sistema (N/m).
- m = masa (kg).

Relaciones clave

- Rigidez (k) aumenta \rightarrow frecuencia natural aumenta.
- Masa (m) aumenta \uparrow \rightarrow frecuencia natural disminuye.
- Amortiguamiento: reduce ligeramente f_n y limita la amplitud en resonancia.

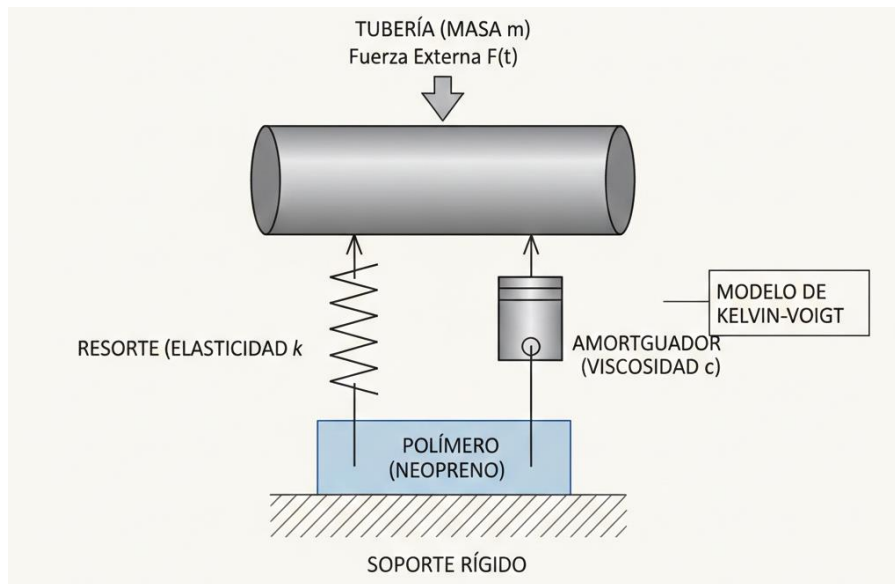


Ilustración 15 diagrama masa, resorte, amortiguador.

4.2.3 Resonancia estructural

La resonancia es un fenómeno crítico en vibraciones que ocurre cuando una frecuencia excitadora –como 1X RPM del motor (velocidad de rotación del eje)– coincide con la frecuencia natural de un componente estructural (bancada, soporte, tubería), lo que amplifica drásticamente la amplitud vibratoria incluso con fuerzas excitadoras pequeñas.

Causas en motocompresores

- Frecuencias excitadoras comunes:
 - 1X y 2X RPM (masas rotativas y recíprocas).
 - Frecuencias de pulsación de gas (armónicos de la velocidad).
- Componentes susceptibles:
 - Bancadas, soportes, tuberías, cimentaciones, debido a su baja rigidez o masa inadecuada.

Identificación de resonancia

- Cambio de fase de 90°: al variar ligeramente la velocidad de operación, la fase de la vibración cambia abruptamente (~90°) cerca de la frecuencia natural.
- Pico de amplitud: la amplitud vibratoria aumenta significativamente en un rango estrecho de velocidad.
- Frecuencia dominante: presencia de 1X RPM en el espectro (para resonancia estructural).

Frecuencia identificada	Causa probable	Recomendación de acción
Alta amplitud en 1X RPM	Desbalanceo	Realizar balanceo dinámico en el volante o el acoplamiento
Alta amplitud en 2X RPM	Desalineación	Verificar y corregir alineación láser motor-compresor
Pico en frecuencia natural (Fn)	Resonancia	1. Modificar la rigidez o la masa de la estructura. 2. Ajustar la velocidad de operación (si es posible)
Subarmónicos (0.5X)	Holgura mecánica	Verificar apriete de pernos de anclaje, estado de soportes y bases
Amplitud alta en múltiples armónicos	Soltura general	Inspeccionar soldaduras, grietas e integridad estructural

Tabla 6. Diagnóstico de fallas según frecuencias características de vibración [6].

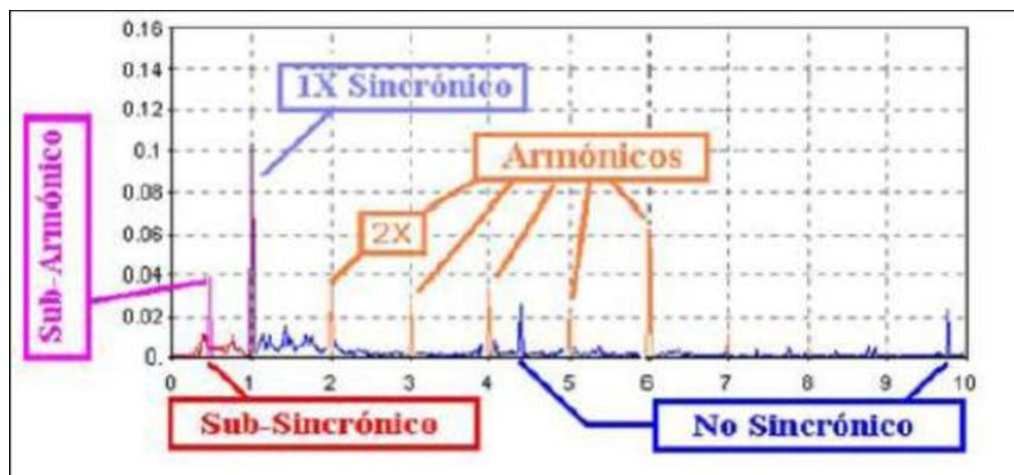


Ilustración 16 Componentes del espectro de vibraciones.

Fuente: (n.d.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-28-Componentes-del-espectro-de-vibraciones-Fuente-Lavanderos-2013_fig3_374534101

Soluciones aplicables

1. Modificar la rigidez: aumentar la rigidez (añadir refuerzos) eleva la frecuencia natural.
2. Modificar la masa: añadir masa (contrapesos) reduce la frecuencia natural.
3. Ajustar la velocidad de operación: alejar la RPM de la velocidad crítica.
4. Amortiguamiento: incorporar materiales absorbentes de vibración (bases elastoméricas) [13].

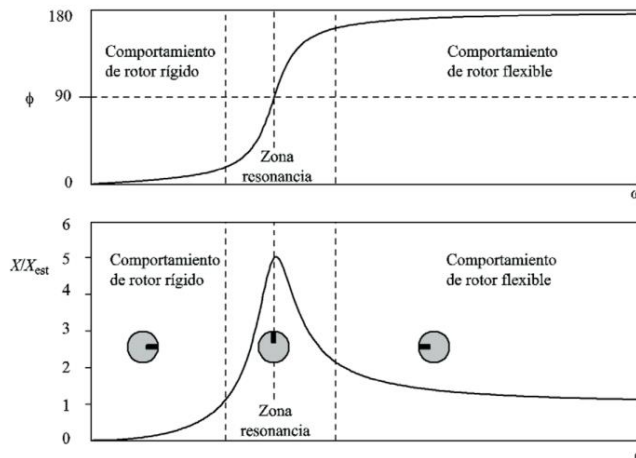


Ilustración 17. Comportamiento de fase y amplitud en la zona de resonancia [6].

4.2.4 Soltura mecánica

Se manifiesta con la presencia de armónicos y subarmónicos en el espectro de frecuencia, lo que resulta de la falta de sujeción en pernos de anclaje, grietas en soldaduras o bases flojas. Este fenómeno genera impactos de baja frecuencia que comprometen la integridad estructural.

5 DISEÑO DEL PROTOCOLO DE MONITOREO DE VIBRACIONES ESTRUCTURALES

El diseño del protocolo de monitoreo de vibraciones estructurales se basa en la integración de normativas internacionales (EFRC, ISO) y especificaciones del fabricante (Ariel Corporation), adaptadas a las condiciones operativas y estructurales de los motocompresores Waukesha-Ariel en Confipetrol.

5.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

El protocolo debe implementar un sistema de monitoreo portátil para la evaluación de vibraciones estructurales en los motocompresores. Esta elección se fundamenta en las siguientes consideraciones técnicas y operativas:

1. Adecuación a las condiciones operativas: a diferencia de los equipos de alta criticidad (turbinas o compresores centrífugos en procesos continuos), los motocompresores recíprocos en las estaciones del cliente se someten a ciclos de operación intermitentes y se evalúan bajo programas de mantenimiento predictivo periódico. Un sistema portátil es suficiente para obtener datos representativos en intervalos definidos, sin necesidad de la inversión y la complejidad de un sistema de monitoreo continuo permanente.
2. Optimización de recursos: Confipetrol cuenta con colectores de vibración portátil Commtest VB8. La utilización de este equipo permite:
 - Reducción de costos: evita la inversión capital en sensores permanentes, cableado, *hardware* y *software* de adquisición continua.
 - Versatilidad: un único equipo portátil puede utilizarse para monitorear todos los activos recíprocos de la estación, a fin de maximizar la utilización del recurso.
3. Capacidades técnicas: los analizadores portátiles (Commtest VB8) poseen capacidades técnicas que los hacen idóneos para esta aplicación:
 - Precisión y rango de frecuencia para las frecuencias de interés (<1000 Hz, según EFRC y <1600 líneas).
 - Capacidad de almacenamiento masivo para espectros y formas de onda.
 - *Software* para el FFT y tendencias.



Ilustración 18. Commtest vB8 [30].

4. Complementariedad con el sistema existente: este protocolo de monitoreo portátil de vibraciones estructurales se complementa con el sistema Windrock instalado, el cual se enfoca en el monitoreo del desempeño dinámico (análisis de presión, temperatura y eficiencia). Esta estrategia híbrida permite una evaluación integral del activo sin duplicidad de funciones.

En conclusión, el sistema de monitoreo portátil no solo es el más económicamente idóneo, dada la infraestructura disponible, sino también técnicamente suficiente para cumplir con los objetivos del protocolo, esto es, evaluar la integridad estructural de los motocompresores bajo las condiciones operativas y de mantenimiento de Confipetrol.

5.2 ESTRATEGIA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La selección de un sistema de monitoreo portátil define una estrategia de recolección de datos periódica y no continua. Esta estrategia se operativiza mediante un programa estructurado que garantiza la consistencia, la comparabilidad y la confiabilidad de los datos a lo largo del tiempo. Así las cosas, la estrategia se compone de los siguientes elementos clave:

1. Frecuencia de monitoreo

- Se establece una frecuencia base de medición trimestral, alineada con el programa de mantenimiento predictivo existente en Confipetrol. Esto permite obtener una tendencia clara de la evolución de las vibraciones estructurales.
- Se definen frecuencias aumentadas bajo condiciones específicas:
 - Mensual: si los niveles de vibración en cualquier punto superan el 75 % del límite de alarma establecido (zona amarilla), según los criterios de la EFRC y el manual de Ariel.
 - Por oportunidad: luego de eventos operativos anómalos (paradas de emergencia, operación en condiciones fuera de diseño) y luego de eventos de mantenimiento mayor.

2. Condiciones operativas para la medición

Para asegurar la comparabilidad de los datos, todas las mediciones se deben realizar únicamente cuando el motocompresor se encuentre en condiciones estables de operación:

- Carga estabilizada (± 5 % de variación).
- Presión de succión y descarga en régimen.
- Temperaturas de operación estables.
- Velocidad (RPM) constante.
- Se deben registrar estos parámetros en la hoja de campo para cada conjunto de datos.

3. Ruta de medición

- Se debe crear una ruta de medición estandarizada en el colector de datos (Commtest VB8), que incluya todos los puntos definidos en la sección 5.1.3.
- La ruta debe seguir un orden lógico y eficiente para minimizar el tiempo de intervención en campo.
- Cada punto de medición debe tener un nombre único y descriptivo, como Skid Compresor R1 - Horizontal.

4. Protocolo de validación en campo

- Integridad de la señal: el operador debe verificar en tiempo real la forma de onda y el espectro en el equipo portátil para detectar señales distorsionadas o interferencias (rampa de esquí). Además, debe repetir la medición si es necesario.
- Condiciones de montaje: se debe verificar que el sensor (acelerómetro magnético) esté correctamente fijado y que el cable no induzca vibraciones parásitas.

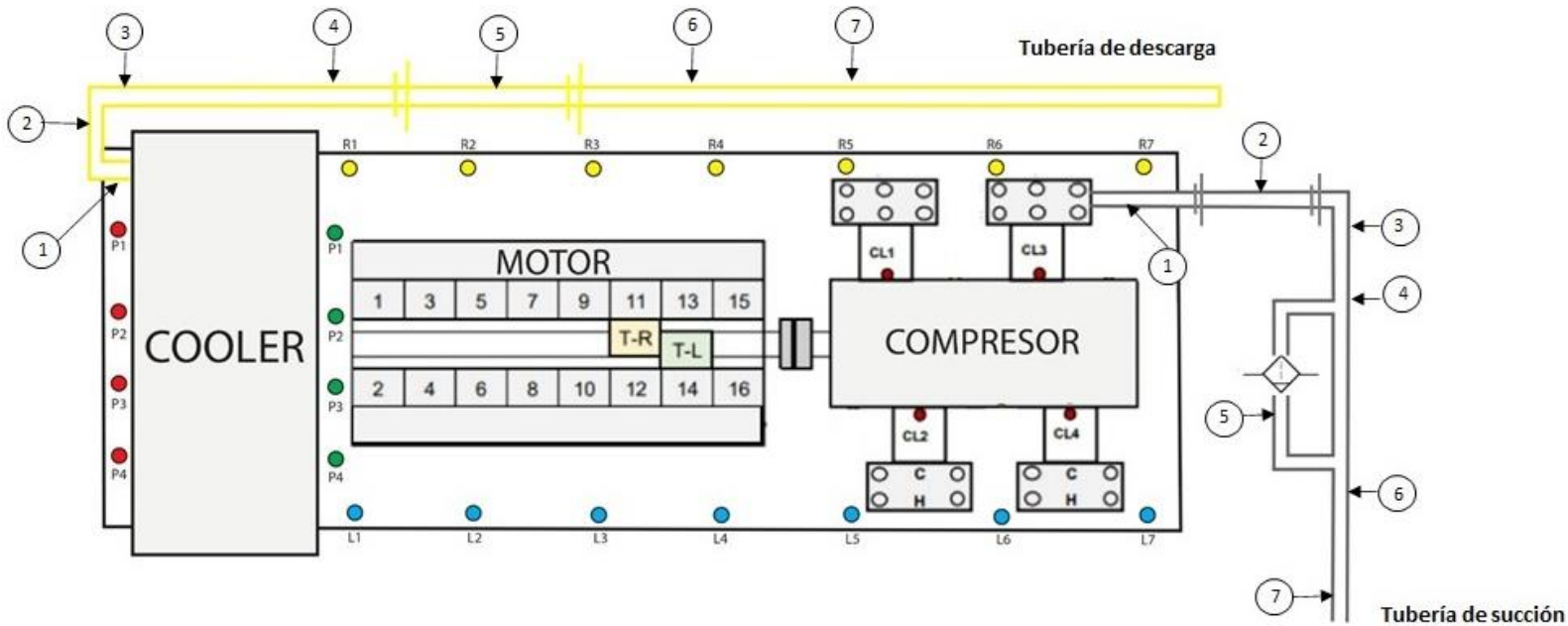
Esta estrategia periódica, pero rigurosa, equilibra la eficiencia operativa con la obtención de datos de alta calidad, de manera que sea posible la detección de tendencias degradantes y la validación efectiva del protocolo propuesto.

5.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN

Se recomienda marcar en el punto para realizar la medición en la misma ubicación en monitoreos posteriores. De esa forma, se deben priorizar los siguientes puntos críticos para medición:

- Skid o base del conjunto motocompresor:
 - Ubicación: pernos de anclaje del compresor y el marco del skid con una separación aproximada de 1 m.

- Justificación: captura de fuerzas transmitidas desde el motor y el compresor hacia la cimentación.



Símbolo	Punto de referencia
	Skid cooler ventilador
	Skid cooler motor
	Skid compresor - izquierda
	Skid compresor - derecha

Simbología	
	Brida
	Filtro coalescente

Ilustración 19. Esquema motocompresor horizontal y puntos de medición.

Fuente: autor.

- Tuberías:
 - Ubicación: cambios de dirección, conexiones a amortiguadores y válvulas, soportes de tubería, y puntos intermedios con una distancia de 1 m entre ellos.
 - Justificación: Previene fatiga por pulsaciones de fluido y resonancia.
- Amortiguadores de pulsación:
 - Ubicación: bridas de entrada/salida.
 - Justificación: monitoreo de la vibración inducida por pulsaciones de gas.

Nota: los componentes internos (válvulas, pistones, bancadas) se excluyen por estar cubiertos por el monitoreo de desempeño dinámico (Windrock).

Compresor de gas Booster 1 - estructura	Skid Compresor L1 - Vertical	Skid Cooler P4 - LVen - Vertical
Ubicación	Skid Compresor L2 - Horizontal	Skid Cooler P1 - LMot - Vertical
Skid Compresor R1 - Horizontal	Skid Compresor L2 - Vertical	Skid Cooler P2 - LMot - Vertical
Skid Compresor R1 - Vertical	Skid Compresor L3 - Horizontal	Skid Cooler P3 - LMot - Vertical
Skid Compresor R2 - Horizontal	Skid Compresor L3 - Vertical	Skid Cooler P4 - LMot - Vertical
Skid Compresor R2 - Vertical	Skid Compresor L4 - Horizontal	Tub Suc P1 - Horizontal
Skid Compresor R3 - Horizontal	Skid Compresor L4 - Vertical	Tub Suc P1 - Vertical
Skid Compresor R3 - Vertical	Skid Compresor L5 - Horizontal	Tub Suc P1 - Axial
Skid Compresor R4 - Horizontal	Skid Compresor L5 - Vertical	Tub Suc P2 - Horizontal
Skid Compresor R4 - Vertical	Skid Compresor L6 - Horizontal	Tub Suc P2 - Vertical
Skid Compresor R5 - Horizontal	Skid Compresor L6 - Vertical	Tub Suc P2 - Axial
Skid Compresor R5 - Vertical	Skid Compresor L7 - Horizontal	Tub Suc P3 - Horizontal
Skid Compresor R6 - Horizontal	Skid Compresor L7 - Vertical	Tub Suc P3 - Vertical
Skid Compresor R6 - Vertical	Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	Tub Suc P3 - Axial
Skid Compresor R7 - Horizontal	Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	Tub Suc P4 - Horizontal
Skid Compresor R7 - Vertical	Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	Tub Suc P4 - Vertical
Skid Compresor L1 - Horizontal		Tub Suc P5 - Horizontal
		Tub Suc P5 - Vertical
		Tub Suc P5 - Axial

Tub Suc P6 - Horizontal	Tub Des P1 - Axial	Tub Des P5 - Horizontal
Tub Suc P6 - Vertical	Tub Des P2 - Horizontal	Tub Des P5 - Vertical
Tub Suc P7 - Horizontal	Tub Des P2 - Vertical	Tub Des P6 - Horizontal
Tub Suc P7 - Vertical	Tub Des P3 - Horizontal	Tub Des P6 - Vertical
Tub Suc P7 - Axial	Tub Des P3 - Vertical	Tub Des P7 - Horizontal
Tub Des P1 - Horizontal	Tub Des P4 - Horizontal	Tub Des P7 - Vertical
Tub Des P1 - Vertical	Tub Des P4 - Vertical	

Tabla 7. Lista de puntos para realizar monitoreo de vibraciones.

5.4 DIRECCIONES DE MEDICIÓN

Para cada punto, se deben realizar las mediciones triaxiales (X, Y, Z) para capturar modos vibratorios completos. No obstante, en el caso de las tuberías donde no se puede tomar la medida axial, solo se toman la vertical y la horizontal.

5.4.1 Parámetros de configuración

Componente	Parámetro principal	Frecuencia de interés	Sensor recomendado
Bancada	Velocidad (mm/s RMS)	10-100 Hz	Acelerómetro o triaxial
Tuberías	Velocidad (mm/s RMS)	50-500 Hz	Acelerómetro o triaxial

Tabla 8. Configuración de medición de vibraciones por componente.

Fuente: autor.

5.5 CARACTERIZACIÓN DE CONDICIONES OPERATIVAS

La confiabilidad de los datos de vibración está intrínsecamente ligada a las condiciones bajo las cuales se registran. Para garantizar la repetibilidad y la validez del análisis, es mandatorio documentar los parámetros operativos del motocompresor al momento de cada medición. Toda la información debe consignarse en el Formato de Registro de Condiciones Operativas (Anexo A), el cual incluye, como mínimo, velocidad (RPM), carga (porcentaje de capacidad),

presiones de succión y descarga, temperaturas clave y cualquier observación relevante, como la presencia de ruidos anómalos.

5.6 PROCESAMIENTO

El procesamiento de datos transforma las señales vibratorias crudas en información estructurada para su análisis. Este proceso se ejecuta utilizando el *software* Commtest Ascent, asociado al colector de vibraciones Commtest VB8, el cual permite el almacenamiento de datos históricos, la configuración de rutas de medición y la aplicación de técnicas de procesamiento de señales.

5.7 CLASIFICACIÓN DE LA SEVERIDAD VIBRATORIA

La priorización del análisis se realiza mediante la clasificación de los valores globales de vibración (velocidad RMS) en zonas de severidad, basadas en los límites de la guía EFRC y el manual de Ariel (Tabla 3). Esta clasificación se realiza de forma semiautomática utilizando reglas condicionales en una hoja de cálculo y se verifica con apoyo visual.

Valor (in/s 0-Pk)		Criterio	Acción	Alcance
Skid	Tubería			
≤0.19	≤0.78	Normal	Continuar monitoreo	Frecuencia matriz CBM
> 0.19 y ≤ 0.24	> 0.79 y ≤ 1.12	Observación	Registrar tendencias	Frecuencia matriz CBM
> 0.24 y ≤ 0.26	> 1.12 y ≤ 1.6	Alerta	-Generar planes de acción. -Hacer seguimiento teniendo en cuenta las características del hallazgo mientras de ejecute el plan de acción recomendado.	Definir alcance teniendo en cuenta: -Norma relacionada con la técnica predictiva. -Análisis por tendencia. -Casos históricos.
> 0.26	> 1.6	Urgencia	-Generar planes de acción. -Realizar la parada de la unidad y ejecutar los planes de acción propuestos.	Menor a 1 semana

Tabla 9. Valores sugeridos para la clasificación del estado.

5.7.1 Revisión de espectros

Luego de la clasificación, los puntos que estén en alerta y urgencia deben analizarse a través del espectro para identificar la fuente y la recomendación más apropiada.

Los puntos clasificados en la zona de alerta y urgencia se someten a un análisis de FFT para diagnosticar la causa raíz de la vibración.

5.8 ANÁLISIS ESPECTRAL E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES

Una vez identificados los puntos críticos mediante la clasificación por zonas de severidad, se procede al análisis espectral detallado. El protocolo de análisis sigue el siguiente flujo:

Paso 1: identificación de FFT

1. Objetivo: reconocer los picos dominantes y relacionarlos con posibles fallas.
2. Procedimiento:
 - Localizar y anotar la amplitud y la frecuencia de los picos más altos en el espectro.
 - Comparar estas frecuencias con las frecuencias características del equipo:
 - 1X RPM: frecuencia fundamental de rotación. Su posible causa es el desbalanceo.
 - 2X RPM. Posible causa: desalineación o fuerza alternante.
 - Frecuencia natural (F_n): preidentificada en el análisis modal. Posible causa: resonancia.
 - Subarmónicos (0.5X, 0.43X) y armónicos (3X, 4X). Posible causa: holgura mecánica, fricción o grietas.
 - Frecuencias de engranajes o rodamientos: aunque el enfoque es estructural, su vibración se propaga y debe complementar la información del análisis de desempeño dinámico.

Paso 2: correlación con condiciones operativas

1. Objetivo: validar si la vibración es inherente a la operación o indica una falla.
2. Procedimiento:
 - Consultar los registros de carga, presión y RPM del equipo al momento exacto de la medición.
 - Preguntar: ¿el pico espectral es constante o varía con la carga? Por ejemplo, un pico en 1X que crece con la carga sugiere fuertemente un desbalanceo.

Paso 3: elaboración de recomendaciones accionables

1. Objetivo: traducir el diagnóstico en una acción de mantenimiento clara y priorizada.
2. Procedimiento: utilizar la siguiente tabla de referencia para generar la recomendación.

Frecuencia identificada	Causa probable	Recomendación de acción
Alta amplitud en 1X RPM	Desbalanceo	Realizar balanceo dinámico en el volante o el acoplamiento
Alta amplitud en 2X RPM	Desalineación	Verificar y corregir la alineación láser motor-compresor
Pico en frecuencia natural (F_n)	Resonancia	1. Modificar la rigidez o la masa de la estructura. 2. Ajustar la velocidad de operación (si es posible)
Subarmónicos (0.5X)	Holgura mecánica	Verificar apriete de pernos de anclaje, estado de soportes y bases
Amplitud alta en múltiples armónicos	Soltura general	Inspeccionar soldaduras, grietas e integridad estructural

Tabla 10. Diagnóstico de fallas según frecuencias características de vibración [6].

Paso 4: registro y priorización

1. Objetivo: documentar el hallazgo y definir su criticidad.
2. Procedimiento:
 - Registrar el diagnóstico y la recomendación en el reporte de mantenimiento.
 - Priorizar las acciones:
 - Prioridad alta: vibraciones en zona roja o con amplitud creciente.
 - Prioridad media: vibraciones en zonas amarillas estables.
 - Prioridad baja: vibraciones en zona verde.

Nota sobre la aplicabilidad de las guías de diagnóstico: las correlaciones entre frecuencias y fallas aquí presentadas constituyen una guía inicial de diagnóstico. No obstante, dada la complejidad de los sistemas dinámicos, es imperativa la validación de cada caso particular mediante un análisis exhaustivo que contraste los hallazgos experimentales con los principios fundamentales de la teoría de vibraciones. Para ello, podrían requerirse análisis complementarios, como el de las fases o el análisis modal; esto, para un diagnóstico concluyente.

6 PROTOCOLO

Paso 1. Realizar las acciones preliminares (peligros y riesgos contemplados para toda la actividad)

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Tránsito de vehículos. Cargas por transportar (equipos, herramientas y accesorios).	Choque vehicular, volcamiento. Accidente de tránsito, Atrapamiento y golpes por caída de objetos.	<ul style="list-style-type: none"> • Estar autorizado para conducir por parte del programa de seguridad vial. • Uso del medidor de tope de velocidad con registro (GPS). • Realización de sensibilización en campañas de seguridad vial. • Reportar los vehículos en mal estado. • Realizar inspección preoperacional del vehículo. • Acatar las normas de seguridad vial impartidas por la empresa, el cliente o las leyes gubernamentales. • No permitir que el conductor exceda los límites de velocidad. • No conducir bajo efectos de alcohol y/o drogas. 	Supervisor de mantenimiento y personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>
Locativos. Biológicos. Físicos.	Caídas a nivel, resbalones, golpes. Mordeduras y picaduras. Fatiga, dolores de cabeza.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar botas caña alta en los sitios definidos. • Reportar condición insegura de presencia de panales de abejas para remoción controlada. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>

		<ul style="list-style-type: none"> • Reportar condición insegura de la falta de rocería en áreas cercanas de trabajo. • Aplicar medidas de bioseguridad. • Mantener orden y aseo en las áreas. • No capturar ofidios por personal no autorizado de la operación. • No provocar animales. • Realizar inspección visual del área de trabajo. 	
Biomecánico. Adopción de posturas.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas. Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar inspección preoperacional de las herramientas a utilizar. • Usar las guardas de seguridad de los equipos. • Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. • Uso de equipos de protección personal (EPP), como casco, gafas, guantes y protección auditiva. • Conocimiento para la selección adecuada de las 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>

		herramientas y los equipos. <ul style="list-style-type: none"> • Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	
1.1 Reportar la actividad en la minuta del recorridor u operador dueño del área donde se encuentran localizados los equipos a inspeccionar.			
1.2 Identificar el equipo a intervenir.			
1.3 Delimitar o demarcar el área de trabajo.			
1.4 Inspeccionar el área circundante y el sitio de trabajo, a fin de identificar desviaciones de seguridad.			
Paso 2. Identificar y registrar (según aplique para el elemento a inspeccionar)			
Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Superficies irregulares.	Desplazamiento por superficies irregulares y lisas y obstáculos.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar inspección visual de superficies de trabajo, definir rutas seguras o pasos peatonales. • Transitar sin afán, sin correr; realizar desplazamientos con precaución. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>
2.1 En todos los casos, realizar inspección visual de la unidad, en busca de problemas evidentes. Identificar fugas y soldaduras de componentes que puedan afectar la integridad de la unidad.			

2.2 Registrar datos de placa y codificación del activo.

	MOTOR	COMPRESOR
<i>Placa</i>		
<i>Marca</i>		
<i>Serial</i>		
<i>Potencia</i>		
<i>Modelo</i>		
<i>Año</i>		
Antecedentes:		

2.3 Verificar la instalación de guarda de protección en el acople (si aplica) y/o en las transmisiones flexibles, esto es, poleas y correas (si aplica).

Paso 3. Configurar el software y el equipo de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Biomecánico. Adopción de posturas.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>

3.1 Configurar en el *software* de vibraciones los puntos y variables de medida de acuerdo con la configuración del conjunto de máquinas a monitorear y analizar, y según las condiciones de operación de este, de manera que se pueda coleccionar una data confiable.

Compresor de gas Booster 1 - estructura

Ubicación

Skid Compresor R1 - Horizontal

Skid Compresor R1 - Vertical

Skid Compresor R2 - Horizontal	
Skid Compresor R2 - Vertical	
Skid Compresor R3 - Horizontal	
Skid Compresor R3 - Vertical	
Skid Compresor R4 - Horizontal	
Skid Compresor R4 - Vertical	
Skid Compresor R5 - Horizontal	
Skid Compresor R5 - Vertical	
Skid Compresor R6 - Horizontal	
Skid Compresor R6 - Vertical	
Skid Compresor R7 - Horizontal	
Skid Compresor R7 - Vertical	
Skid Compresor L1 - Horizontal	
Skid Compresor L1 - Vertical	
Skid Compresor L2 - Horizontal	
Skid Compresor L2 - Vertical	
Skid Compresor L3 - Horizontal	
Skid Compresor L3 - Vertical	
Skid Compresor L4 - Horizontal	
Skid Compresor L4 - Vertical	
Skid Compresor L5 - Horizontal	
Skid Compresor L5 - Vertical	
Skid Compresor L6 - Horizontal	
Skid Compresor L6 - Vertical	
Skid Compresor L7 - Horizontal	

Skid Compresor L7 - Vertical	
Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P4 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P1 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P2 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P3 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P4 - LMot - Vertical	
Tub Suc P1 - Horizontal	
Tub Suc P1 - Vertical	
Tub Suc P1 - Axial	
Tub Suc P2 - Horizontal	
Tub Suc P2 - Vertical	
Tub Suc P2 - Axial	
Tub Suc P3 - Horizontal	
Tub Suc P3 - Vertical	
Tub Suc P3 - Axial	
Tub Suc P4 - Horizontal	
Tub Suc P4 - Vertical	
Tub Suc P5 - Horizontal	
Tub Suc P5 - Vertical	
Tub Suc P5 - Axial	
Tub Suc P6 - Horizontal	
Tub Suc P6 - Vertical	

Tub Suc P7 - Horizontal
Tub Suc P7 - Vertical
Tub Suc P7 - Axial
Tub Des P1 - Horizontal
Tub Des P1 - Vertical
Tub Des P1 - Axial
Tub Des P2 - Horizontal
Tub Des P2 - Vertical
Tub Des P3 - Horizontal
Tub Des P3 - Vertical
Tub Des P4 - Horizontal
Tub Des P4 - Vertical
Tub Des P5 - Horizontal
Tub Des P5 - Vertical
Tub Des P6 - Horizontal
Tub Des P6 - Vertical
Tub Des P7 - Horizontal
Tub Des P7 - Vertical

3.2 Para la fijación de los niveles de alarmas en el *software* de vibraciones en cada uno de los conjuntos de máquina, se toma como dato el histórico de mediciones por cada caso particular. **Tabla 8. Valores sugeridos para la clasificación del estado.**

Paso 4. Tomar mediciones de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspección preoperacional de 	Personal CBM

	Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	con con	las herramientas a utilizar. <ul style="list-style-type: none"> • Usar las guardas de seguridad de los equipos. • Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. • Uso de EPP (casco, gafas, guantes, protección auditiva). • Conocimiento en la selección adecuada de las herramientas y los equipos. • Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	Ejecutado: <input type="checkbox"/>
4.1 Sujetar el sensor (acelerómetro) en la posición deseada (horizontal, vertical o axial) contra la máquina en el punto de medida correcto; presionar el botón “medir” en el equipo o monitor (colector de datos); esperar que la medición se registre; y presionar el botón “salvar” para guardar la información. Tener cuidado de alejar el cable de comunicaciones de cualquier elemento giratorio en el equipo.				
4.2 Esperar hasta que el monitor de datos se mueva al siguiente punto de medición para remover el sensor. Posteriormente, mover el sensor a la otra posición y repetir los pasos anteriores para recolectar la información.				
4.3 En caso de ser necesario, realizar mediciones de fase de vibración, para descartar problemas de desbalance, desalineación u otra sintomatología de la máquina, de modo que el análisis de fases contribuya a un mejor diagnóstico del equipo o el conjunto de máquina.				
4.4 Determinar el grado de severidad de vibración, según lo indicado en la Tabla.				
Valor (in/s 0-Pk)		Criterio	Acción	Alcance
Skid	Tubería			

≤ 0.19	≤ 0.78	Normal	Continuar monitoreo	Frecuencia matriz CBM
> 0.19 y ≤ 0.24	> 0.79 y ≤ 1.12	Observación	Registrar tendencias	Frecuencia matriz CBM
> 0.24 y ≤ 0.26	> 1.12 y ≤ 1.6	Alerta	-Generar planes de acción. -Hacer seguimiento teniendo en cuenta las características del hallazgo mientras de ejecute el plan de acción recomendado.	Definir alcance teniendo en cuenta: -Norma relacionada con la técnica predictiva. -Análisis por tendencia. -Casos históricos.
> 0.26	> 1.6	Urgencia	-Generar planes de acción. -Realizar la parada de la unidad y ejecutar los planes de acción propuestos.	Menor a 1 semana

Paso 5. Registrar variables operacionales de los equipos

Peligros/aspectos

Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
5.1 Registrar variables operacionales del equipo, temperatura, RPM, torque, corrientes, etc. Lo anterior, siempre y cuando aplique y el acceso a estos registros no implique la apertura de gabinetes, variadores o borneras. Emplear	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>

sonda de temperatura y RPM del equipo de vibraciones o pirómetro.			
---	--	--	--

Condición operacional del compresor xxxx					
Unidad	xxxx	Estación		Cliente	
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)
Antecedentes:					

Paso 6. Descargar los datos

Peligros/aspectos

Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
6.1 Una vez en la oficina, descargar los datos registrados en el equipo colector de vibraciones al software de análisis (PC). Analizar los espectros y la información colectados, a fin de determinar la condición actual de los equipos y/o conjuntos de máquina monitoreados.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>

Paso 7. Documentar mantenimiento y generar aviso en SAP de ser necesario

Peligros/aspectos			
Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
7.1 Documentar el análisis realizado y generar el "aviso" en SAP cuando sea necesario Reportar cualquier desviación de un parámetro monitoreado.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>
7.2 Elaborar un informe en el formato indicado y, en caso necesario, asegurarse de divulgarlo con el ingeniero de CBM. Si se encuentran equipos en condiciones subestándar y ameritan intervención urgente, informar de inmediato para su corrección a la mayor brevedad (evaluar según la matriz de condición CBM).			
7.3 Luego de realizada la corrección al hallazgo, se realiza un monitoreo CBM nuevamente para validar la corrección.			
7.4 generar el informe de hallazgos para presentar al cliente las condiciones y recomendaciones generadas, siguiendo el siguiente formato.			



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



Tipo de reporte	ESTRUCTURAL	Consecutivo	
Cliente		Estación	
Áreas Inspeccionadas	COMPRESOR GAS	Equipo de medición	Commtest Vb8
Fecha de monitoreo		Fecha de reporte	

Caracterización y antecedentes:

En la sección de antecedentes, se debe documentar la procedencia, el historial de ubicaciones operativas y las intervenciones mayores o mantenimientos tipo overhaul realizados previamente. Posteriormente, en la caracterización, se deben reportar las especificaciones técnicas actuales, incluyendo presiones de diseño, tipo de fluido, etapas de compresión y potencia del motor, asegurando que la información coincida con las placas de identificación y el estado físico real del compresor al momento de la inspección."

	MOTOR	COMPRESOR
Placa		
Marca		
Serial		
Potencia		
Modelo		
Año		

Datos Operacionales:

Condición operacional del compresor xxxx					
Unidad	xxxx	Estación		Cliente	
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)

Registro y clasificación de valores globales de vibración:

Para el correcto registro y clasificación de los valores globales de vibración, el personal técnico deberá medir la severidad en unidades de velocidad (in/s 0-Pk) en todos los puntos críticos definidos del sistema. Una vez obtenidos los datos, se deben categorizar obligatoriamente según los niveles de severidad establecidos en la siguiente tabla, la cual integra los límites técnicos de la guía EFRC y los estándares del manual del fabricante Ariel. Este registro es fundamental para



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



identificar desviaciones y priorizar aquellos puntos que presenten condiciones de alerta para un posterior análisis espectral detallado.

Valor (in/s 0-Pk)		Criterio	Acción	Alcance
Skid	Tubería			
≤0.19	≤0.78	Normal	Continuar monitoreo	Frecuencia matriz CBM
> 0.19 y ≤ 0.24	> 0.79 y ≤ 1.12	Observación	Registrar tendencias	Frecuencia matriz CBM
> 0.24 y ≤ 0.26	> 1.12 y ≤ 1.6	Alerta	-Generar planes de acción. -Hacer seguimiento teniendo en cuenta las características del hallazgo mientras de ejecute el plan de acción recomendado.	Definir alcance teniendo en cuenta: -Norma relacionada con la técnica predictiva. -Análisis por tendencia. -Casos históricos.
> 0.26	> 1.6	Urgencia	-Generar planes de acción. -Realizar la parada de la unidad y ejecutar los planes de acción propuestos.	Menor a 1 semana

Espectros de interés

En la sección de espectros de interés, el especialista deberá adjuntar y describir las gráficas de frecuencia obtenidas en aquellos puntos que presentaron niveles de vibración fuera de los rangos normales. Es necesario identificar y etiquetar las frecuencias dominantes (como 1X, 2X o bandas) para determinar la causa raíz de la anomalía.

Diagnostico

En esta sección, se debe emitir un juicio técnico claro sobre la condición mecánica del compresor, identificando causas raíz de la anomalía detectada.



7 IMPLEMENTACIÓN CASO DE ESTUDIO

Para validar la efectividad del protocolo propuesto en el Capítulo 6, se seleccionó un motocompresor horizontal Ariel impulsado por un motor Caterpillar G3516, de características operativas similares a los equipos Waukesha VGF P48GSI existentes en la flota. El equipo seleccionado se encontraba en proceso de puesta en servicio en la estación, lo cual permitió evaluar el comportamiento vibratorio desde su estado inicial y detectar posibles problemas de instalación o fabricación. Así, el plan de implementación consistió en dos ciclos de monitoreo, con el objetivo de dar seguimiento a las recomendaciones emitidas y cuantificar la mejora en los valores globales de vibración mediante análisis de tendencias. Por otro lado, el plan de implementación consistió en dos ciclos de monitoreo, con los siguientes objetivos:

1. Establecer una línea base de vibración estructural en condiciones reales de operación.
2. Identificar y diagnosticar fallas incipientes típicas de esta fase (desajustes, desalineaciones posteriores a asentamiento, resonancias).
3. Dar seguimiento a la efectividad de las acciones correctivas implementadas y cuantificar la mejora en los valores globales de vibración, a fin de verificar la transición del equipo hacia una operación estable.

7.1 UNIDAD COMPRESORA DE GAS BOOSTER 1 - MONITOREO 1

Paso 1. Realizar las acciones preliminares (peligros y riesgos contemplados para toda la actividad)			
Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Tránsito de vehículos. Cargas por transportar (equipos, herramientas y accesorios).	Choque vehicular, volcamiento. Accidente de tránsito, Atrapamiento y golpes por caída de objetos.	<ul style="list-style-type: none"> • Estar autorizado para conducir por parte del programa de seguridad vial. • Uso del medidor de tope de velocidad con registro (GPS). • Realización de sensibilización en campañas de seguridad vial. 	Supervisor de mantenimiento y personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; text-align: center; margin: 0 auto;">X</div>



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

		<ul style="list-style-type: none"> • Reportar los vehículos en mal estado. • Realizar inspección preoperacional del vehículo. • Acatar las normas de seguridad vial impartidas por la empresa, el cliente o las leyes gubernamentales. • No permitir que el conductor exceda los límites de velocidad. • No conducir bajo efectos de alcohol y/o drogas. 	
Locativos. Biológicos. Físicos.	Caídas a nivel, resbalones, golpes. Mordeduras y picaduras. Fatiga, dolores de cabeza.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar botas caña alta en los sitios definidos. • Reportar condición insegura de presencia de panales de abejas para remoción controlada. • Reportar condición insegura de la falta de rocería en áreas cercanas de trabajo. • Aplicar medidas de bioseguridad. • Mantener orden y aseo en las áreas. • No capturar ofidios por personal no autorizado de la operación. • No provocar animales. • Realizar inspección visual del área de trabajo. 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>
Biomecánico.	Ergonómico.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar pausas activas adecuadas 	Personal CBM



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

Adopción de posturas.	Posturas inadecuadas.	para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular.	Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas. Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspección preoperacional de las herramientas a utilizar. Usar las guardas de seguridad de los equipos. Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. Uso de equipos de protección personal (EPP), como casco, gafas, guantes y protección auditiva. Conocimiento para la selección adecuada de las herramientas y los equipos. Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>
1.1 Reportar la actividad en la minuta del recorridor u operador dueño del área donde se encuentran localizados los equipos a inspeccionar.			
1.2 Identificar el equipo a intervenir.			
1.3 Delimitar o demarcar el área de trabajo.			
1.4 Inspeccionar el área circundante y el sitio de trabajo, a fin de identificar desviaciones de seguridad.			
Paso 2. Identificar y registrar (según aplique para el elemento a inspeccionar)			
Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

Superficies irregulares.

Desplazamiento por superficies irregulares y lisas y obstáculos.

- Realizar inspección visual de superficies de trabajo, definir rutas seguras o pasos peatonales.
- Transitar sin afán, sin correr; realizar desplazamientos con precaución.

Personal CBM
Ejecutado:

2.1 En todos los casos, realizar inspección visual de la unidad, en busca de problemas evidentes. Identificar fugas y soldaduras de componentes que puedan afectar la integridad de la unidad.

2.2 Registrar datos de placa y codificación del activo.

	MOTOR	COMPRESOR
<i>Marca</i>	CATERPILLAR	ARIEL
<i>Serial</i>	xxxxx	xxxx
<i>Potencia (Kw)</i>	1492	
<i>Modelo</i>	G3516 TALE	JGT/4
<i>Año</i>	Abr-24	-

Antecedentes:

El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, el cual se instaló sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada) nivelada y compactada. Sin embargo, el equipo ha experimentado reiteradas paradas no programadas debido a activaciones del interruptor de vibración, tanto en el cooler como en el frame del compresor, lo que indica niveles vibratorios excesivos que superan los límites seguros de operación.

2.3 Verificar la instalación de guarda de protección en el acople (si aplica) y/o en las transmisiones flexibles, esto es, poleas y correas (si aplica).

Paso 3. Configurar el software y el equipo de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Biomecánico. Adopción de posturas.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

		sujeción de las herramientas manipular.	las a
3.1 Configurar en el <i>software</i> de vibraciones los puntos y variables de medida de acuerdo con la configuración del conjunto de máquinas a monitorear y analizar, y según las condiciones de operación de este, de manera que se pueda coleccionar una data confiable.			
Compresor de gas Booster 1 - estructura			
Ubicación			
Skid Compresor R1 - Horizontal			
Skid Compresor R1 - Vertical			
Skid Compresor R2 - Horizontal			
Skid Compresor R2 - Vertical			
Skid Compresor R3 - Horizontal			
Skid Compresor R3 - Vertical			
Skid Compresor R4 - Horizontal			
Skid Compresor R4 - Vertical			
Skid Compresor R5 - Horizontal			
Skid Compresor R5 - Vertical			
Skid Compresor R6 - Horizontal			
Skid Compresor R6 - Vertical			
Skid Compresor R7 - Horizontal			
Skid Compresor R7 - Vertical			
Skid Compresor L1 - Horizontal			
Skid Compresor L1 - Vertical			
Skid Compresor L2 - Horizontal			
Skid Compresor L2 - Vertical			
Skid Compresor L3 - Horizontal			



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

Skid Compresor L3 - Vertical	
Skid Compresor L4 - Horizontal	
Skid Compresor L4 - Vertical	
Skid Compresor L5 - Horizontal	
Skid Compresor L5 - Vertical	
Skid Compresor L6 - Horizontal	
Skid Compresor L6 - Vertical	
Skid Compresor L7 - Horizontal	
Skid Compresor L7 - Vertical	
Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P4 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P1 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P2 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P3 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P4 - LMot - Vertical	
Tub Suc P1 - Horizontal	
Tub Suc P1 - Vertical	
Tub Suc P1 - Axial	
Tub Suc P2 - Horizontal	
Tub Suc P2 - Vertical	
Tub Suc P2 - Axial	
Tub Suc P3 - Horizontal	
Tub Suc P3 - Vertical	



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

Tub Suc P3 - Axial
Tub Suc P4 - Horizontal
Tub Suc P4 - Vertical
Tub Suc P5 - Horizontal
Tub Suc P5 - Vertical
Tub Suc P5 - Axial
Tub Suc P6 - Horizontal
Tub Suc P6 - Vertical
Tub Suc P7 - Horizontal
Tub Suc P7 - Vertical
Tub Suc P7 - Axial
Tub Des P1 - Horizontal
Tub Des P1 - Vertical
Tub Des P1 - Axial
Tub Des P2 - Horizontal
Tub Des P2 - Vertical
Tub Des P3 - Horizontal
Tub Des P3 - Vertical
Tub Des P4 - Horizontal
Tub Des P4 - Vertical
Tub Des P5 - Horizontal
Tub Des P5 - Vertical
Tub Des P6 - Horizontal
Tub Des P6 - Vertical
Tub Des P7 - Horizontal



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



CONFIPETROL

Tub Des P7 - Vertical

3.2 Para la fijación de los niveles de alarmas en el *software* de vibraciones en cada uno de los conjuntos de máquina, se toma como dato el histórico de mediciones por cada caso particular. **Tabla 8. Valores sugeridos para la clasificación del estado.**

Paso 4. Tomar mediciones de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas. Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspección preoperacional de las herramientas a utilizar. Usar las guardas de seguridad de los equipos. Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. Uso de EPP (casco, gafas, guantes, protección auditiva). Conocimiento en la selección adecuada de las herramientas y los equipos. Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>

4.1 Sujetar el sensor (acelerómetro) en la posición deseada (horizontal, vertical o axial) contra la máquina en el punto de medida correcto; presionar el botón “medir” en el equipo o monitor (colector de datos); esperar que la medición se registre; y presionar el botón “salvar” para guardar la información. Tener cuidado de alejar el cable de comunicaciones de cualquier elemento giratorio en el equipo.



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

4.2 Esperar hasta que el monitor de datos se mueva al siguiente punto de medición para remover el sensor. Posteriormente, mover el sensor a la otra posición y repetir los pasos anteriores para recolectar la información.

4.3 En caso de ser necesario, realizar mediciones de fase de vibración, para descartar problemas de desbalance, desalineación u otra sintomatología de la máquina, de modo que el análisis de fases contribuya a un mejor diagnóstico del equipo o el conjunto de máquina.

4.4 Determinar el grado de severidad de vibración, según lo indicado en la Tabla.

Valor (in/s 0-Pk)		Criterio	Acción	Alcance
Skid	Tubería			
≤0.19	≤0.78	Normal	Continuar monitoreo	Frecuencia matriz CBM
> 0.19 y ≤ 0.24	> 0.79 y ≤ 1.12	Observación	Registrar tendencias	Frecuencia matriz CBM
> 0.24 y ≤ 0.26	> 1.12 y ≤ 1.6	Alerta	-Generar planes de acción. -Hacer seguimiento teniendo en cuenta las características del hallazgo mientras de ejecute el plan de acción recomendado.	Definir alcance teniendo en cuenta: -Norma relacionada con la técnica predictiva. -Análisis por tendencia. -Casos históricos.
> 0.26	> 1.6	Urgencia	-Generar planes de acción. -Realizar la parada de la unidad y ejecutar los planes de acción propuestos.	Menor a 1 semana

Paso 5. Registrar variables operacionales de los equipos



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

Peligros/aspectos																																	
Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables																														
5.1 Registrar variables operacionales del equipo, temperatura, RPM, torque, corrientes, etc. Lo anterior, siempre y cuando aplique y el acceso a estos registros no implique la apertura de gabinetes, variadores o borneras. Emplear sonda de temperatura y RPM del equipo de vibraciones o pirómetro.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px;">X</div>																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Condición operacional del compresor Booster 1</th> </tr> <tr> <th>Unidad</th> <th>Booster 1</th> <th>Estación</th> <th></th> <th>Cliente</th> <th></th> </tr> <tr> <th>Fecha</th> <th>Velocidad motor (RPM)</th> <th>Horómetro (Hr)</th> <th>Presión succión (Psi)</th> <th>Presión descarga (Psi)</th> <th>Flujo (MMSCFD)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23/08/2024</td> <td>1144</td> <td>24</td> <td>42</td> <td>142</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td colspan="6"> Antecedentes: El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, el cual se instaló sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada) nivelada y compactada. Sin embargo, el equipo ha experimentado reiteradas paradas no programadas debido a activaciones del interruptor de vibración, tanto en el cooler como en el frame del compresor, lo que indica niveles vibratorios excesivos que superan los límites seguros de operación. </td> </tr> </tbody> </table>				Condición operacional del compresor Booster 1						Unidad	Booster 1	Estación		Cliente		Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)	23/08/2024	1144	24	42	142	7	Antecedentes: El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, el cual se instaló sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada) nivelada y compactada. Sin embargo, el equipo ha experimentado reiteradas paradas no programadas debido a activaciones del interruptor de vibración, tanto en el cooler como en el frame del compresor, lo que indica niveles vibratorios excesivos que superan los límites seguros de operación.					
Condición operacional del compresor Booster 1																																	
Unidad	Booster 1	Estación		Cliente																													
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)																												
23/08/2024	1144	24	42	142	7																												
Antecedentes: El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, el cual se instaló sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada) nivelada y compactada. Sin embargo, el equipo ha experimentado reiteradas paradas no programadas debido a activaciones del interruptor de vibración, tanto en el cooler como en el frame del compresor, lo que indica niveles vibratorios excesivos que superan los límites seguros de operación.																																	
Paso 6. Descargar los datos																																	
Peligros/aspectos																																	
Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables																														



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

<p>6.1 Una vez en la oficina, descargar los datos registrados en el equipo colector de vibraciones al <i>software</i> de análisis (PC). Analizar los espectros y la información colectados, a fin de determinar la condición actual de los equipos y/o conjuntos de máquina monitoreados.</p>	<p>Ergonómico. Posturas inadecuadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	<p>Personal CBM Ejecutado:</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; text-align: center; margin: 0 auto;">X</div>
Paso 7. Documentar mantenimiento y generar aviso en SAP de ser necesario			
Peligros/aspectos			
<p>Biomecánico. Adopción de posturas.</p>	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
<p>7.1 Documentar el análisis realizado y generar el “aviso” en SAP cuando sea necesario Reportar cualquier desviación de un parámetro monitoreado.</p>	<p>Ergonómico. Posturas inadecuadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	<p>Personal CBM Ejecutado:</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; text-align: center; margin: 0 auto;">X</div>
<p>7.2 Elaborar un informe en el formato indicado y, en caso necesario, asegurarse de divulgarlo con el ingeniero de CBM. Si se encuentran equipos en condiciones subestándar y ameritan intervención urgente, informar de inmediato para su corrección a la mayor brevedad (evaluar según la matriz de condición CBM).</p>			
<p>7.3 Luego de realizada la corrección al hallazgo, se realiza un monitoreo CBM nuevamente para validar la corrección.</p>			
<p>7.4 generar el informe de hallazgos para presentar al cliente las condiciones y recomendaciones generadas, siguiendo el siguiente formato.</p>			



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

Tipo de reporte	ESTRUCTURAL	Consecutivo	
Cliente		Estación	
Áreas Inspeccionadas	COMPRESOR GAS	Equipo de medición	Commtest Vb8
Fecha de monitoreo	23/08/2024	Fecha de reporte	28/08/2024

7.1.1 Caracterización y antecedentes

El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, el cual se instaló sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada) nivelada y compactada. Sin embargo, el equipo ha experimentado reiteradas paradas no programadas debido a activaciones del interruptor de vibración, tanto en el *cooler* como en el *frame* del compresor, lo que indica niveles vibratorios excesivos que superan los límites seguros de operación.



Ilustración 20. Compresor de gas.

7.1.2 Datos operacionales

Condición operacional del compresor de gas Booster 1					
Unidad: Booster 1					
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)
23/08/2024	1144	24	42	142	7

Tabla 11. Condición operacional del monitoreo 1.



Logo Cliente



7.1.3 Registro y clasificación de valores globales de vibración

Se registraron los valores globales de vibración (in/s 0-Pk) para los puntos críticos y se clasificaron según los criterios de severidad establecidos en la Tabla 7, basada en los límites de la guía EFRC y el manual de Ariel. Este proceso permitió priorizar los puntos críticos para el análisis espectral detallado.

Compresor de gas Booster 1 - estructura (in/s 0-Pk)	
Ubicación	23/08/2024
Skid Compresor R1 - Horizontal	0.13
Skid Compresor R1 - Vertical	0.28
Skid Compresor R2 - Horizontal	0.11
Skid Compresor R2 - Vertical	0.23
Skid Compresor R3 - Horizontal	0.11
Skid Compresor R3 - Vertical	0.25
Skid Compresor R4 - Horizontal	0.11
Skid Compresor R4 - Vertical	0.22
Skid Compresor R5 - Horizontal	0.12
Skid Compresor R5 - Vertical	0.22
Skid Compresor R6 - Horizontal	0.12
Skid Compresor R6 - Vertical	0.2
Skid Compresor R7 - Horizontal	0.09
Skid Compresor R7 - Vertical	0.14
Skid Compresor L1 - Horizontal	0.14

Skid Compresor L1 - Vertical	0.24
Skid Compresor L2 - Horizontal	0.09
Skid Compresor L2 - Vertical	0.21
Skid Compresor L3 - Horizontal	0.12
Skid Compresor L3 - Vertical	0.12
Skid Compresor L4 - Horizontal	0.12
Skid Compresor L4 - Vertical	0.25
Skid Compresor L5 - Horizontal	0.11
Skid Compresor L5 - Vertical	0.23
Skid Compresor L6 - Horizontal	0.1
Skid Compresor L6 - Vertical	0.11
Skid Compresor L7 - Horizontal	0.11
Skid Compresor L7 - Vertical	0.07
Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	0.38
Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	0.2
Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	0.19
Skid Cooler P4 - LVen - Vertical	0.39



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

Skid Cooler P1 - LMot - Vertical	0.1
Skid Cooler P2 - LMot - Vertical	0.1

Skid Cooler P3 - LMot - Vertical	0.19
Skid Cooler P4 - LMot - Vertical	0.22

Tabla 12. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk), skid - monitoreo 1.

Compresor de gas Booster 1 - estructura (in/s 0-Pk)	
Ubicación	23/08/2024
Tub Suc P1 - Horizontal	0.63
Tub Suc P1 - Vertical	0.24
Tub Suc P1 - Axial	0.47
Tub Suc P2 - Horizontal	0.95
Tub Suc P2 - Vertical	0.49
Tub Suc P2 - Axial	0.49
Tub Suc P3 - Horizontal	1.12
Tub Suc P3 - Vertical	0.52
Tub Suc P3 - Axial	0.48
Tub Suc P4 - Horizontal	0.43
Tub Suc P4 - Vertical	0.49
Tub Suc P5 - Horizontal	0.28
Tub Suc P5 - Vertical	0.17
Tub Suc P5 - Axial	0.22
Tub Suc P6 - Horizontal	0.31
Tub Suc P6 - Vertical	0.37
Tub Suc P7 - Horizontal	0.41

Tub Suc P7 - Vertical	0.23
Tub Suc P7 - Axial	0.18
Tub Des P1 - Horizontal	0.34
Tub Des P1 - Vertical	0.23
Tub Des P1 - Axial	0.19
Tub Des P2 - Horizontal	0.42
Tub Des P2 - Vertical	0.22
Tub Des P3 - Horizontal	0.45
Tub Des P3 - Vertical	0.38
Tub Des P4 - Horizontal	0.48
Tub Des P4 - Vertical	0.21
Tub Des P5 - Horizontal	0.23
Tub Des P5 - Vertical	0.15
Tub Des P6 - Horizontal	0.27
Tub Des P6 - Vertical	0.37
Tub Des P7 - Horizontal	0.24
Tub Des P7 - Vertical	0.19
Tub Des P8 - Horizontal	0.18
Tub Des P8 - Vertical	0.14



Tabla 13. valores globales de vibración (in/s 0-Pk) en la tubería - monitoreo 1.

7.1.4 Espectros de interés

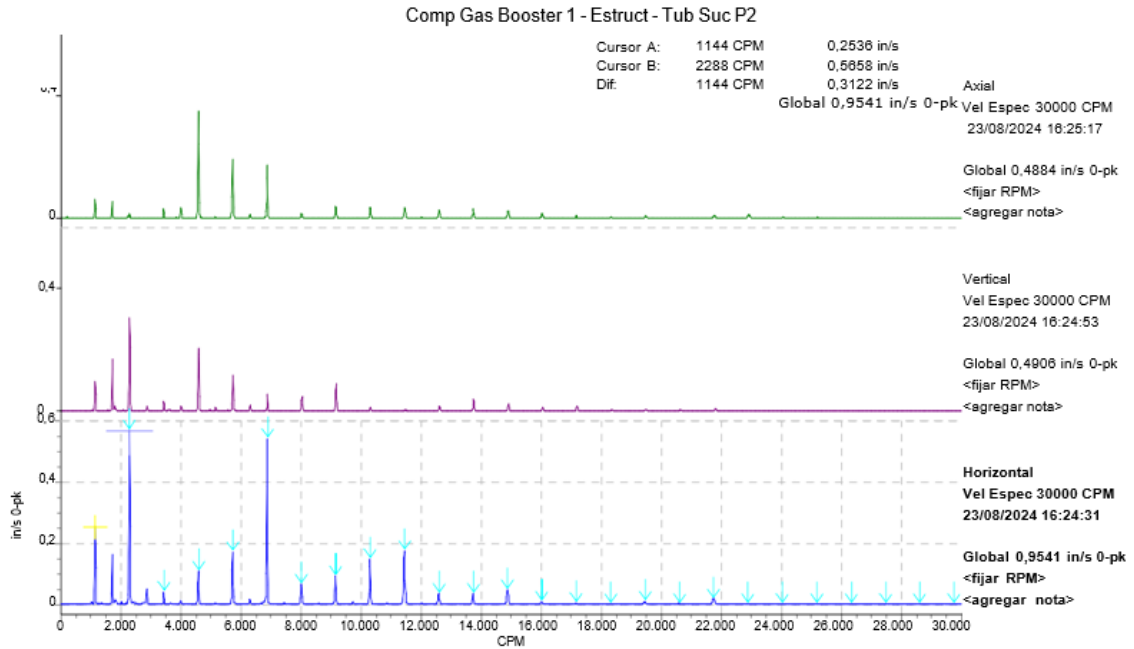


Ilustración 21. Tubería succión. Vibración punto 2.

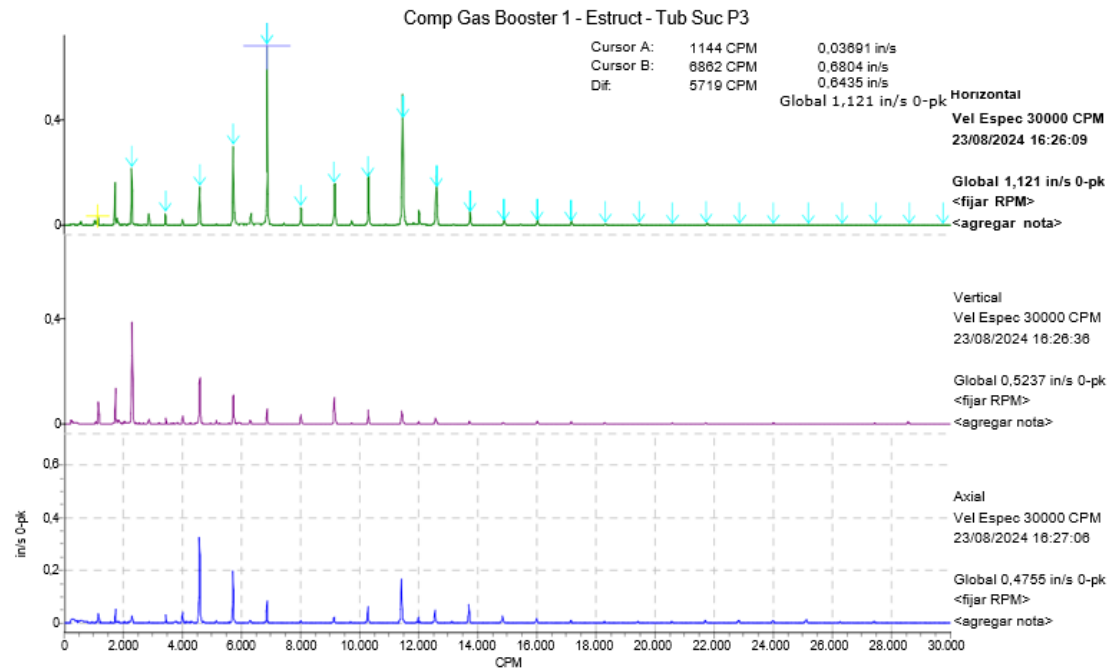


Ilustración 22. Tubería succión. Vibración punto 3.



Logo Cliente

7.1.5 Diagnóstico

- Skid motocompresor: valores de vibración global altos con máximo de 0.28 ips 0-Pk.
 - Puntos R1, R3 y L4. En dirección vertical, valores de vibración global alto por excitación de múltiples frecuencias armónicas, debido a baja rigidez por soldadura.
- Skid ventilador: valores de vibración global altos con máximo de 0.39 ips 0-Pk.
 - Puntos LVen P1 y LVen P4. En dirección vertical, valores de vibración global alto por excitación de múltiples frecuencias armónicas, debido a la baja rigidez por soldadura.
- Tubería de descarga. Valores de vibración global aceptables, con máximo de 0.48 ips 0-Pk. No cuenta con abrazaderas en los soportes de concreto. No hay polímero entre tubería y soportes metálicos. No se evidencia pulsación.
 - Punto 4. En dirección horizontal, valores de vibración global aceptables con máximo de 0.48 ips 0-Pk por excitación de múltiples frecuencias armónicas, en especial del $1X = 0.40$ ips 0-Pk, debido a la baja rigidez por soldadura.
- Tubería de succión. Valores de vibración global urgentes, con máximo de 1,2 ips-Pk. No cuenta con abrazaderas en los soportes de concreto. No hay polímero entre tubería y soportes metálicos.
 - Punto 2. En dirección horizontal, valores de vibración global altos con máximo de 0.95 ips 0-Pk por excitación de múltiples frecuencias armónicas, en especial del $3X = 0.56$ ips 0-Pk, debido a la baja rigidez por soldadura de la tubería. No tiene soporte vertical ni abrazadera (Ilustración 15).
 - Punto 3. En dirección horizontal, valores de vibración global altos con máximo de 1.12 ips 0-Pk por excitación de múltiples frecuencias armónicas, en especial del $6X = 0.68$ ips 0-Pk, debido a la baja rigidez por soldadura de la tubería. No tiene soporte vertical ni abrazadera (Ilustración 16).



Logo Cliente

7.1.6 Recomendaciones

- Tubería succión - punto 2. Instalar base de concreto y soporte vertical (viga H, I). Instalar abrazadera Clamp o U-Bolt para anclaje de tubería (ilustraciones 17 y 18).
- Tubería succión - punto 3. Instalar base de concreto y soporte vertical entre codo de 90° y brida (viga H, I). Instalar abrazadera Clamp o U-Bolt para anclaje de tubería (ilustraciones 17 y 18).
- Instalar encofrado con relleno de material triturado al skid del compresor de gas, con el objetivo de aumentar la masa y la rigidez del sistema, a fin de modificar la frecuencia natural para mitigar las vibraciones excesivas.
- Instalar polímeros (caucho, neopreno) entre los soportes metálicos y la tubería de succión y descarga.

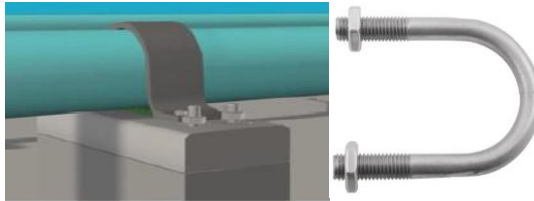


Ilustración 23. Abrazaderas Clamp y U-Bolt.

7.2 UNIDAD COMPRESORA DE GAS BOOSTER 1 - MONITOREO 2

Paso 1. Realizar las acciones preliminares (peligros y riesgos contemplados para toda la actividad)			
Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Tránsito de vehículos. Cargas por transportar (equipos, herramientas y accesorios).	Choque vehicular, volcamiento. Accidente de tránsito, Atrapamiento y golpes por caída de objetos.	<ul style="list-style-type: none"> • Estar autorizado para conducir por parte del programa de seguridad vial. • Uso del medidor de tope de velocidad con registro (GPS). • Realización de sensibilización en campañas de seguridad vial. • Reportar los vehículos en mal estado. • Realizar inspección preoperacional del vehículo. • Acatar las normas de seguridad vial impartidas por la empresa, el cliente o las leyes gubernamentales. • No permitir que el conductor exceda los límites de velocidad. • No conducir bajo efectos de alcohol y/o drogas. 	Supervisor de mantenimiento y personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>
Locativos. Biológicos. Físicos.	Caídas a nivel, resbalones, golpes. Mordeduras y picaduras. Fatiga, dolores de cabeza.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar botas caña alta en los sitios definidos. • Reportar condición insegura de presencia de panales de abejas para remoción controlada. 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>

		<ul style="list-style-type: none"> • Reportar condición insegura de la falta de rocería en áreas cercanas de trabajo. • Aplicar medidas de bioseguridad. • Mantener orden y aseo en las áreas. • No capturar ofidios por personal no autorizado de la operación. • No provocar animales. • Realizar inspección visual del área de trabajo. 	
Biomecánico. Adopción de posturas.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas. Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar inspección preoperacional de las herramientas a utilizar. • Usar las guardas de seguridad de los equipos. • Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. • Uso de equipos de protección personal (EPP), como casco, gafas, guantes y protección auditiva. • Conocimiento para la selección adecuada de las 	Personal CBM Ejecutado: <input checked="" type="checkbox"/>

		herramientas y los equipos. <ul style="list-style-type: none"> • Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	
1.1 Reportar la actividad en la minuta del recorridor u operador dueño del área donde se encuentran localizados los equipos a inspeccionar.			
1.2 Identificar el equipo a intervenir.			
1.3 Delimitar o demarcar el área de trabajo.			
1.4 Inspeccionar el área circundante y el sitio de trabajo, a fin de identificar desviaciones de seguridad.			
Paso 2. Identificar y registrar (según aplique para el elemento a inspeccionar)			
Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Superficies irregulares.	Desplazamiento por superficies irregulares y lisas y obstáculos.	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar inspección visual de superficies de trabajo, definir rutas seguras o pasos peatonales. • Transitar sin afán, sin correr; realizar desplazamientos con precaución. 	Personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px;">X</div>
2.1 En todos los casos, realizar inspección visual de la unidad, en busca de problemas evidentes. Identificar fugas y soldaduras de componentes que puedan afectar la integridad de la unidad.			

2.2 Registrar datos de placa y codificación del activo.

	MOTOR	COMPRESOR
Marca	CATERPILLAR	ARIEL
Serial	xxxxx	xxxx
Potencia (Kw)	1492	
Modelo	G3516 TALE	JGT/4
Año	Abr-24	-

2.3 Verificar la instalación de guarda de protección en el acople (si aplica) y/o en las transmisiones flexibles, esto es, poleas y correas (si aplica).

Paso 3. Configurar el software y el equipo de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Biomecánico. Adopción de posturas.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 5px auto;">X</div>

3.1 Configurar en el software de vibraciones los puntos y variables de medida de acuerdo con la configuración del conjunto de máquinas a monitorear y analizar, y según las condiciones de operación de este, de manera que se pueda coleccionar una data confiable.

Compresor de gas Booster 1 - estructura

Ubicación

Skid Compresor R1 - Horizontal

Skid Compresor R1 - Vertical

Skid Compresor R2 - Horizontal	
Skid Compresor R2 - Vertical	
Skid Compresor R3 - Horizontal	
Skid Compresor R3 - Vertical	
Skid Compresor R4 - Horizontal	
Skid Compresor R4 - Vertical	
Skid Compresor R5 - Horizontal	
Skid Compresor R5 - Vertical	
Skid Compresor R6 - Horizontal	
Skid Compresor R6 - Vertical	
Skid Compresor R7 - Horizontal	
Skid Compresor R7 - Vertical	
Skid Compresor L1 - Horizontal	
Skid Compresor L1 - Vertical	
Skid Compresor L2 - Horizontal	
Skid Compresor L2 - Vertical	
Skid Compresor L3 - Horizontal	
Skid Compresor L3 - Vertical	
Skid Compresor L4 - Horizontal	
Skid Compresor L4 - Vertical	
Skid Compresor L5 - Horizontal	
Skid Compresor L5 - Vertical	
Skid Compresor L6 - Horizontal	
Skid Compresor L6 - Vertical	
Skid Compresor L7 - Horizontal	

Skid Compresor L7 - Vertical	
Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P4 - LVen - Vertical	
Skid Cooler P1 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P2 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P3 - LMot - Vertical	
Skid Cooler P4 - LMot - Vertical	
Tub Suc P1 - Horizontal	
Tub Suc P1 - Vertical	
Tub Suc P1 - Axial	
Tub Suc P2 - Horizontal	
Tub Suc P2 - Vertical	
Tub Suc P2 - Axial	
Tub Suc P3 - Horizontal	
Tub Suc P3 - Vertical	
Tub Suc P3 - Axial	
Tub Suc P4 - Horizontal	
Tub Suc P4 - Vertical	
Tub Suc P5 - Horizontal	
Tub Suc P5 - Vertical	
Tub Suc P5 - Axial	
Tub Suc P6 - Horizontal	
Tub Suc P6 - Vertical	

Tub Suc P7 - Horizontal
Tub Suc P7 - Vertical
Tub Suc P7 - Axial
Tub Des P1 - Horizontal
Tub Des P1 - Vertical
Tub Des P1 - Axial
Tub Des P2 - Horizontal
Tub Des P2 - Vertical
Tub Des P3 - Horizontal
Tub Des P3 - Vertical
Tub Des P4 - Horizontal
Tub Des P4 - Vertical
Tub Des P5 - Horizontal
Tub Des P5 - Vertical
Tub Des P6 - Horizontal
Tub Des P6 - Vertical
Tub Des P7 - Horizontal
Tub Des P7 - Vertical

3.2 Para la fijación de los niveles de alarmas en el *software* de vibraciones en cada uno de los conjuntos de máquina, se toma como dato el histórico de mediciones por cada caso particular. **Tabla 8. Valores sugeridos para la clasificación del estado.**

Paso 4. Tomar mediciones de vibraciones

Peligros/aspectos	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
Uso de herramientas y equipos.	Manipulación inadecuada de herramientas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspección preoperacional de 	Personal CBM

	Trabajos con herramientas desgastadas, fisuradas, incompletas, con fatiga de material.	las herramientas a utilizar. <ul style="list-style-type: none"> • Usar las guardas de seguridad de los equipos. • Operar los equipos con las guardas de protección y con los dispositivos de seguridad. • Uso de EPP (casco, gafas, guantes, protección auditiva). • Conocimiento en la selección adecuada de las herramientas y los equipos. • Capacitación y entrenamiento en el manejo seguro de las herramientas y los equipos. 	Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; text-align: center; margin: 5px auto;">X</div>
<p>4.1 Sujetar el sensor (acelerómetro) en la posición deseada (horizontal, vertical o axial) contra la máquina en el punto de medida correcto; presionar el botón “medir” en el equipo o monitor (colector de datos); esperar que la medición se registre; y presionar el botón “salvar” para guardar la información. Tener cuidado de alejar el cable de comunicaciones de cualquier elemento giratorio en el equipo.</p>			
<p>4.2 Esperar hasta que el monitor de datos se mueva al siguiente punto de medición para remover el sensor. Posteriormente, mover el sensor a la otra posición y repetir los pasos anteriores para recolectar la información.</p>			
<p>4.3 En caso de ser necesario, realizar mediciones de fase de vibración, para descartar problemas de desbalance, desalineación u otra sintomatología de la máquina, de modo que el análisis de fases contribuya a un mejor diagnóstico del equipo o el conjunto de máquina.</p>			
<p>4.4 Determinar el grado de severidad de vibración, según lo indicado en la Tabla.</p>			

Valor (in/s 0-Pk)		Criterio	Acción	Alcance
Skid	Tubería			
≤0.19	≤0.78	Normal	Continuar monitoreo	Frecuencia matriz CBM
> 0.19 y ≤ 0.24	> 0.79 y ≤ 1.12	Observación	Registrar tendencias	Frecuencia matriz CBM
> 0.24 y ≤ 0.26	> 1.12 y ≤ 1.6	Alerta	-Generar planes de acción. -Hacer seguimiento teniendo en cuenta las características del hallazgo mientras de ejecute el plan de acción recomendado.	Definir alcance teniendo en cuenta: -Norma relacionada con la técnica predictiva. -Análisis por tendencia. -Casos históricos.
> 0.26	> 1.6	Urgencia	-Generar planes de acción. -Realizar la parada de la unidad y ejecutar los planes de acción propuestos.	Menor a 1 semana
Paso 5. Registrar variables operacionales de los equipos				
Peligros/aspectos				
Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables	
5.1 Registrar variables operacionales del equipo, temperatura, RPM, torque, corrientes, etc. Lo anterior, siempre y cuando aplique y el	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, 	Personal CBM Ejecutado: <input type="checkbox"/>	

acceso a estos registros no implique la apertura de gabinetes, variadores o borneras. Emplear sonda de temperatura y RPM del equipo de vibraciones o pirómetro.		y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular.	
---	--	---	--

Condición operacional del compresor Booster 1					
Unidad	Booster 1	Estación		Cliente	
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)
23/11/2024	1100	172	37	150	7.3

Antecedentes:
 El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, instalado originalmente sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada), nivelada y compactada. Tras el primer monitoreo de vibraciones, se identificó que la rigidez de la base era insuficiente, lo que generaba resonancias estructurales y activaciones recurrentes de los vibration switches del equipo. Como medida correctiva derivada del diagnóstico, se ejecutó un encofrado perimetral al skid, relleno con material triturado de gradación controlada (mezcla de arenas y gravas de diferentes tamaños de grano). Esta solución buscó aumentar la masa global del sistema y mejorar la amortiguación mediante la fricción interna entre partículas, con el fin de modificar la frecuencia natural de la estructura y reducir la amplitud de las vibraciones resonantes.

Paso 6. Descargar los datos

Peligros/aspectos

Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
6.1 Una vez en la oficina, descargar los datos registrados en el equipo colector de vibraciones al <i>software</i> de análisis	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las 	Personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px;">X</div>

(PC). Analizar los espectros y la información colectados, a fin de determinar la condición actual de los equipos y/o conjuntos de máquina monitoreados.		rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular.	
Paso 7. Documentar mantenimiento y generar aviso en SAP de ser necesario			
Peligros/aspectos			
Biomecánico. Adopción de posturas.	Riesgos/impactos	Controles	Responsables
7.1 Documentar el análisis realizado y generar el "aviso" en SAP cuando sea necesario Reportar cualquier desviación de un parámetro monitoreado.	Ergonómico. Posturas inadecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pausas activas adecuadas para la actividad cada hora por cinco minutos; tener la espalda recta, las rodillas flexionadas, y hacer buena sujeción de las herramientas a manipular. 	Personal CBM Ejecutado: <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 30px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 5px auto;">X</div>
7.2 Elaborar un informe en el formato indicado y, en caso necesario, asegurarse de divulgarlo con el ingeniero de CBM. Si se encuentran equipos en condiciones subestándar y ameritan intervención urgente, informar de inmediato para su corrección a la mayor brevedad (evaluar según la matriz de condición CBM).			
7.3 Luego de realizada la corrección al hallazgo, se realiza un monitoreo CBM nuevamente para validar la corrección.			
7.4 generar el informe de hallazgos para presentar al cliente las condiciones y recomendaciones generadas, siguiendo el siguiente formato.			



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



Tipo de reporte	ESTRUCTURAL	Consecutivo	
Cliente		Estación	
Áreas Inspeccionadas	COMPRESOR GAS	Equipo de medición	Commtest Vb8
Fecha de monitoreo	23/11/2024	Fecha de reporte	28/11/2024

7.2.1 Caracterización y antecedentes

El compresor de gas se encuentra montado sobre un skid, instalado originalmente sobre una base de mezcla granular (arena y piedra triturada), nivelada y compactada. Tras el primer monitoreo de vibraciones, se identificó que la rigidez de la base era insuficiente, lo que generaba resonancias estructurales y activaciones recurrentes de los *vibration switches* del equipo.

Como medida correctiva derivada del diagnóstico, se ejecutó un encofrado perimetral al skid, relleno con material triturado de gradación controlada (mezcla de arenas y gravas de diferentes tamaños de grano). Esta solución buscó aumentar la masa global del sistema y mejorar la amortiguación mediante la fricción interna entre partículas, con el fin de modificar la frecuencia natural de la estructura y reducir la amplitud de las vibraciones resonantes.



Ilustración 24. Compresor de gas.



7.2.2 Datos operacionales

Condición operacional del compresor de gas Booster 1 - clarinete 1					
Fecha	Velocidad motor (RPM)	Horómetro (Hr)	Presión succión (Psi)	Presión descarga (Psi)	Flujo (MMSCFD)
23/11/2024	1100	172	37	150	7.3

Tabla 14. Condición operacional - monitoreo 2.

7.2.3 Registro y clasificación de valores globales

Se registraron los valores globales de vibración (in/s 0-Pk) para los puntos críticos definidos en el apartado 5.3. Posteriormente, estos datos se procesaron y clasificaron según los criterios de severidad establecidos en la Tabla 7, basada en los límites de la guía EFRC y el manual de Ariel. Este proceso permitió priorizar los puntos críticos para el análisis espectral detallado.

Compresor de gas Booster 1 - estructura (in/s 0-Pk)			
Ubicación	23/08/2024	23/11/2024	% cambio
Skid Compresor R1 - Horizontal	0.13	0.11	-15.38 %
Skid Compresor R1 - Vertical	0.28	0.15	-46.43 %
Skid Compresor R2 - Horizontal	0.11	0.09	-18.18 %
Skid Compresor R2 - Vertical	0.23	0.18	-21.74 %
Skid Compresor R3 - Horizontal	0.11	0.09	-18.18 %
Skid Compresor R3 - Vertical	0.25	0.23	-8.00 %
Skid Compresor R4 - Horizontal	0.11	0.1	-9.09 %
Skid Compresor R4 - Vertical	0.22	0.18	-18.18 %
Skid Compresor R5 - Horizontal	0.12	0.09	-25.00 %

Skid Compresor R5 - Vertical	0.22	0.2	-9.09 %
Skid Compresor R6 - Horizontal	0.12	0.09	-25.00 %
Skid Compresor R6 - Vertical	0.2	0.24	20.00 %
Skid Compresor R7 - Horizontal	0.09	0.07	-22.22 %
Skid Compresor R7 - Vertical	0.14	0.09	-35.71 %
Skid Compresor L1 - Horizontal	0.14	0.1	-28.57 %
Skid Compresor L1 - Vertical	0.24	0.1	-58.33 %
Skid Compresor L2 - Horizontal	0.09	0.08	-11.11 %
Skid Compresor L2 - Vertical	0.21	0.17	-19.05 %
Skid Compresor L3 - Horizontal	0.12	0.08	-33.33 %
Skid Compresor L3 - Vertical	0.12	0.13	8.33 %



INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)



Skid Compresor L4 - Horizontal	0.12	0.09	-25.00 %
Skid Compresor L4 - Vertical	0.25	0.19	-24.00 %
Skid Compresor L5 - Horizontal	0.11	0.08	-27.27 %
Skid Compresor L5 - Vertical	0.23	0.16	-30.43 %
Skid Compresor L6 - Horizontal	0.1	0.07	-30.00 %
Skid Compresor L6 - Vertical	0.11	0.08	-27.27 %
Skid Compresor L7 - Horizontal	0.11	0.07	-36.36 %
Skid Compresor L7 - Vertical	0.07	0.08	14.29 %

Skid Cooler P1 - LVen - Vertical	0.38	0.13	-65.79 %
Skid Cooler P2 - LVen - Vertical	0.2	0.18	-10.00 %
Skid Cooler P3 - LVen - Vertical	0.19	0.13	-31.58 %
Skid Cooler P4 - LVen - Vertical	0.39	0.1	-74.36 %
Skid Cooler P1 - LMot - Vertical	0.1	0.14	40.00 %
Skid Cooler P2 - LMot - Vertical	0.1	0.08	-20.00 %
Skid Cooler P3 - LMot - Vertical	0.19	0.12	-36.84 %
Skid Cooler P4 - LMot - Vertical	0.22	0.08	-63.64 %

Tabla 15. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk) skid - monitoreo 2

Compresor de gas Booster 1 - estructura			
Ubicación	23/08/2024	23/11/2024	Variación
Tub Suc P1 - Horizontal	0.63	0.43	-47.00 %
Tub Suc P1 - Vertical	0.24	0.2	-20.00 %
Tub Suc P1 - Axial	0.47	0.47	1.00 %
Tub Suc P2 - Horizontal	0.95	0.44	-114.00 %
Tub Suc P2 - Vertical	0.49	0.21	-133.00 %
Tub Suc P2 - Axial	0.49	0.49	-1.00 %
Tub Suc P3 - Horizontal	1.12	0.68	-64.00 %
Tub Suc P3 - Vertical	0.52	0.23	-129.00 %
Tub Suc P3 - Axial	0.48	0.28	-74.00 %

Tub Suc P4 - Horizontal	0.43	0.17	-156.00 %
Tub Suc P4 - Vertical	0.49	0.2	-141.00 %
Tub Suc P5 - Horizontal	0.28	0.12	-128.00 %
Tub Suc P5 - Vertical	0.17	0.19	12.00 %
Tub Suc P5 - Axial	0.22	0.22	-1.00 %
Tub Suc P6 - Horizontal	0.31	0.38	19.00 %
Tub Suc P6 - Vertical	0.37	0.35	-6.00 %
Tub Suc P7 - Horizontal	0.41	0.15	-165.00 %
Tub Suc P7 - Vertical	0.23	0.23	0.00 %
Tub Suc P7 - Axial	0.18	0.18	0.00 %



Logo Cliente

INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM

XXX-XXX-X-XX (Código informe)

**CONFIPETROL**

Tub Des P1 - Horizontal	0.34	0.34	0.00 %	Tub Des P5 - Horizontal	0.23		0.00 %
Tub Des P1 - Vertical	0.23	0.23	0.00 %	Tub Des P5 - Vertical	0.15		0.00 %
Tub Des P1 - Axial	0.19	0.19	0.00 %	Tub Des P6 - Horizontal	0.27		0.00 %
Tub Des P2 - Horizontal	0.42	0.42	0.00 %	Tub Des P6 - Vertical	0.37		0.00 %
Tub Des P2 - Vertical	0.22	0.22	0.00 %	Tub Des P7 - Horizontal	0.24		0.00 %
Tub Des P3 - Horizontal	0.45		0.00 %	Tub Des P7 - Vertical	0.19		0.00 %
Tub Des P3 - Vertical	0.38		0.00 %	Tub Des P8 - Horizontal	0.18		0.00 %
Tub Des P4 - Horizontal	0.48		0.00 %	Tub Des P8 - Vertical	0.14		0.00 %
Tub Des P4 - Vertical	0.21		0.00 %				



Tabla 16. Valores globales de vibración (in/s 0-Pk) tubería - monitoreo 2.

7.2.4 Espectros de interés

Posterior al muestreo, se pudo evidenciar que las vibraciones apuntaron a una reducción y que no hay espectros que requieran analizarse.

7.2.5 Diagnóstico

- Skid motocompresor. Valores de vibración global bajos con máximo de 0.20 ips 0-Pk. Valor en el monitoreo anterior: 0.28 ips 0-Pk.
- Skid ventilador. Valores de vibración global bajos con máximo de 0.13 ips 0-Pk. Valor en el monitoreo anterior: 0.39 ips 0-Pk.
- Tubería de descarga. Valores de vibración global normales con máximo de 0.48 ips 0-Pk. No cuenta con abrazaderas en los soportes de concreto. No hay polímero entre tubería y soportes metálicos. No se evidencia pulsación.
 - Punto 4. En dirección horizontal valores de vibración global aceptables con valor máximo de 0,48 ips 0-Pk, por excitación de múltiples frecuencias armónicas, en especial del 1X= 0,40 ips 0-Pk debido a baja rigidez por soldadura. No tiene abrazadera.

 Logo Cliente	INFORME VIBRACIONES EQUIPO CBM	 CONFIPETROL
	XXX-XXX-X-XX (Código informe)	

- Tubería de succión. Valores de vibración global seguros a largo plazo, con máximo de 0.63 ips-Pk. Monitoreo anterior de 1.12 ips 0-Pk. No cuenta con abrazaderas en los soportes de concreto, y no se ha finalizado la instalación del soporte recomendado.
 - Punto 2. En dirección horizontal, valores de vibración global con máximo de 0.44 ips-Pk. Monitoreo anterior de 0.95. Se da una reducción en el valor de vibración del 114 %, que lo cambia el nivel de vibración de urgente a normal.
 - Punto 3. En dirección horizontal, valores de vibración global altos con máximo de 0.68 ips 0-Pk. Monitoreo anterior de 1.12 ips 0-Pk, por lo que se observa una reducción en el valor de vibración del 64 %, que lo cambia de un nivel de vibración urgente al de normal.

7.2.6 Recomendaciones

Se recomienda mantener la rutina de monitoreo de vibraciones estructurales cada tres meses para garantizar la estabilidad a largo plazo del sistema tras las correcciones implementadas. El equipo puede operar con normalidad, dado que los valores actuales se encuentran en la zona normal según los criterios de EFRC y Ariel; sin embargo, es crucial reportar inmediatamente cualquier parada no programada o reactivación de alarmas de vibración para investigar potenciales recurrencias. Adicionalmente, los resultados deben integrarse al historial técnico del activo para facilitar el análisis de tendencias y la optimización continua del plan de mantenimiento predictivo de Confipetrol.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

8.1.1 Análisis normativo y metodológico

Se revisaron y analizaron exhaustivamente las normas y guías técnicas internacionales, con especial énfasis en la guía EFRC (4.^a edición) y la norma ACI 351.3R-18. Este proceso permitió validar los parámetros de severidad y las metodologías de evaluación necesarios para establecer un marco de referencia sólido, identificando que el cumplimiento de estas normas es crítico para la integridad de equipos con cimentaciones no adherentes.

8.1.2 Caracterización de fuentes y patrones de vibración

Se caracterizaron con éxito los patrones vibratorios en el conjunto motor Caterpillar G3516 y compresor Ariel, identificando una condición de resonancia y amplificación crítica en la frecuencia 6X (6862 CPM). El análisis permitió determinar que la falta de soporte vertical adecuado desplazó la frecuencia natural de la tubería hacia el rango de excitación del motor, alcanzando niveles de 1.12 in/s 0-Pk, superando los límites de operación segura.

8.1.3 Propuesta y validación del protocolo de monitoreo

El protocolo diseñado demostró su eficacia al estandarizar la recolección de datos en puntos estratégicos (Skid, Succión, Descarga, Cilindros) y definir parámetros de configuración (Fmax y resolución) que permitieron diferenciar entre vibración mecánica normal y soltura estructural. La implementación de este estándar asegura la repetibilidad de las mediciones y la construcción de una base de datos confiable para el mantenimiento predictivo.

8.1.4 Ejecución del protocolo y evaluación de impacto

Se ejecutó el protocolo propuesto en un caso de estudio real, donde la implementación de medidas correctivas (encofrado con material triturado) validó la efectividad del monitoreo. Las intervenciones lograron una reducción de vibraciones de hasta el 74.3% en los puntos críticos, trasladando el equipo desde un estado de falla potencial hacia una zona de operación segura según los criterios de la guía EFRC.

8.2 RECOMENDACIONES

8.2.1 Recomendaciones de mitigación

Se definieron soluciones de ingeniería específicas para corregir la baja rigidez detectada: el uso de soportes tipo Viga H/I, la implementación de abrazaderas Clamp para restringir el movimiento en los tres ejes y el uso de polímeros de neopreno para el aislamiento de vibraciones. Estas medidas, junto con el relleno del skid para aumentar la masa, constituyen una estrategia técnica integral para desplazar las frecuencias naturales y reducir la energía vibratoria del sistema.

8.2.2 Recomendaciones para Confipetrol

- Implementar el protocolo de vibraciones estructurales de manera permanente; ello, al integrar mediciones cada tres meses en todos los motocompresores críticos.
- Actualizar los planes de mantenimiento para incluir la evaluación de la cimentación y los soportes como parte de las rutinas predictivas.
- Documentar sistemáticamente los resultados en una base de datos centralizada para facilitar el análisis de tendencias.

8.2.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Extender el monitoreo a más equipos de la flota para validar la escalabilidad del protocolo.

9 REFERENCIAS

- [1] WHITE, Glen. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima Dli.
- [2] OLARTE C., William; BOTERO A., Marcela; CAÑÓN A., Benhur. Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, vol. 2 (2010), núm. (45), pp. 223-226.
- [3] EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS (EFRC) (Ed.). *Guidelines for Vibrations in Reciprocating Compressor Systems* (Número Cuarto). Disponible en: <https://www.recip.org/wp-content/uploads/2020/04/EFRC-Scope-of-Standards-and-Guidelines-for-Reciprocating-Compressor-Systems-20190408.pdf>

- [4] MORALES, Daniela. *Ingresos de Ecopetrol por \$159 billones, son el 10,9% del PIB del país*. Portafolio. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/ecopetrol-registra-ingresos-de-159-billones-el-10-del-pib-acional-579208>
- [5] ARIEL CORPORATION. *Operating and Maintenance Manual for Ariel JGC Compressors*. Disponible en: <https://www.arielcorp.com/content/dam/fmdita-outputs/en/pdfs/Ariel-Application-Manual/PDF/Ariel-Application-Manual.pdf>
- [6] EUROPEAN FORUM RECIPROCATING COMPRESSORS (EFRC) (Ed.). *Guidelines for Vibrations in Reciprocating Compressor Systems* (Número Cuarto). Disponible en: <https://www.recip.org/wp-content/uploads/2020/04/EFRC-Scope-of-Standards-and-Guidelines-for-Reciprocating-Compressor-Systems-20190408.pdf>
- [7] WINDROCK. *Monitoreo Superior Portátil de Maquinaria Alternativa*. Cyingenieria.cl. Disponible en: https://www.cyingenieria.cl/wp-content/uploads/2018/06/Windrock_6400_Brochure_Espanol.pdf
- [8] HENRÍQUEZ, Jesús. (2017). *Monitoreo de válvulas en compresores recíprocos de ENAP Refinería Bío Bío, mediante análisis de vibraciones en alta frecuencia*.
- [9] PENKOVA, María. Mantenimiento y análisis de vibraciones. Ciencia y sociedad. *Ciencia y Sociedad*, Vol. XXXII (2007), núm. 4, pp. 668-678.
- [10] PERALTA; José Antonio; REYES, Porfirio; GODÍNEZ, Alfredo. El fenómeno de la resonancia. *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 3 (2009) núm. (3), pp. 18.
- [11] ISLAS, A. L. *Prototipo didáctico para el estudio del fenómeno de resonancia producido por desbalanceo rotatorio*. Doctoral dissertation. Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [12] ROBLES, Jonathan. *Análisis de vibraciones torsionales de elementos oscilantes en un motor de combustión interna como aporte al monitoreo de la condición de automotores*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2022. Disponible en: <https://dspace.esoch.edu.ec/items/10dd90f6-6125-4c95-ba2f-334eaa5959b2>

- [13] QUINTERO, Héctor Fabio; LÓPEZ, Juan Fernando. *Vibraciones Mecánicas: un enfoque Teórico-Práctico*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2016. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11059/14910>
- [14] POZO, David Fernando. *Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio*. Bachelor's thesis, 2010. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1794>
- [15] MANRIQUE, Sebastián; HERNÁNDEZ, Alain (2012, August). *Principios Básicos De Las Vibraciones Eólicas*. En Líneas De Transmisión Y Sistema De Amortiguamiento. In Conferencia Vibraciones Eólicas en Líneas de Transmisión (pp. 1-10).
- [16] CORTÉS, Jimmmy; Medina, Francisco, CHAVES, José Andres. Del análisis de fourier a las wavelets análisis de fourier. *Scientia et technica*, Vol. 1 (2007), núm. (34).
- [17] ARELLANO, Rolando. El espectro de frecuencias y sus aplicaciones. *Cultura, Ciencia y Tecnología. ASDOPEN-UNMSM*, Vol. 6 (2014), pp. 3-10.
- [18] MOSQUERA, Genaro; PIEDRA, Margarita; ARMAS, Raúl. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Caracas.
- [19] GWIRC, Sergio; FERDEGHINI, Fernando; Comastri, Agata; Lupi, Daniel. (1998). *Sensores ultrasónicos: respuesta a distintas formas de onda De emisión*. Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica e Informática (CITEI) Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
- [20] CEBALLOS, Marcelo; PRATO, Carlos A. Ajuste Experimental de Perfiles de Suelo a Través del Análisis de Fases Espaciales de Ondas Superficiales. *Mecánica Computacional*, (2008), núm, (35), pp. 2733-2751.
- [21] PREDICTIVA. *Monitoreo de condición a equipos dinámicos*. Disponible de: <https://predictiva21.com/monitoreo-condicion-equipos-dinamicos>
- [22] GUARDO, Alfredo; FONTANALS, A; COUSSIRAT, Miguel. Estudio numérico de la interacción rotor estator en el difusor de una bomba. *Mecánica Computacional*, Vol. 32 (2013), núm. (14), pp. 1155-1168.
- [23] RAO, Singiresu. (2012). *Vibraciones mecánicas* (Vol. 776). Pearson educación.
- [24] SERYASAT, O. R; HONARVAR, Farhang; RAHMANI, Abolfazl. (2010, October). Multi-fault diagnosis of ball bearing using FFT, wavelet energy entropy mean and root mean square (RMS). In *2010 IEEE international conference on systems, man and cybernetics* (pp. 4295-4299). IEEE.

- [25] WANG, Xiaoying; TAN, Bowen; LONG, Haochen; HUANG, Jie. (2025). Material and Structural Innovations for High-Performance Flexible Triaxial Force Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, vol. 99, pp. 1-1.
- [26] CONTRERAS, Leonardo; LUCIETTO, Dianelle; SANTOS, Joaquín; AGUILLÓN, Orlando. *Análisis causa raíz de un sistema de generación de vapor*.
https://www.iiis.org/CDs2012/CD2012ADII/ATIC_2012/PapersPdf/AT754HU.pdf
- [27] ISO 10816-6:1995. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW. International Organization for Standardization.
- [28] Hernández, D., & Jesús, A. (2017). Monitoreo de válvulas en compresores recíprocos mediante análisis de vibraciones. ENAP Refinería Bío Bío.
- [29] NATIONAL INSTRUMENTS. *Time Domain Signal Parameters: RMS, Average, Peak and Crest Factor*. NI. <https://www.ni.com>
- [30] SENSING S.L. *Acelerómetro con salida 4-20mA para medir vibración en velocidad MMF KSI*. Sensing, Sensores de Medida. Disponible en: <https://sensores-de-medida.es/catalogo/acelerometro-con-salida-4-20ma-para-medir-vibracion-en-velocidad-mmf-ksi/>