



MOBIUS INSTITUTE

---

# Manual de Entrenamiento en Análisis de Vibraciones




## Categoría III

Este manual está diseñado solo como guía.

En situaciones prácticas, hay muchas variables, así que por favor utilice esta información con cuidado.



 Copyright 2019 Mobius Institute – Todos los derechos reservados

[learn@mobiusinstitute.com](mailto:learn@mobiusinstitute.com)

[www.mobiusinstitute.com](http://www.mobiusinstitute.com)

**Versión 4.0**

Rev. 29-10-19

**NO COPIAR O REPRODUCIR  
EN CUALQUIER FORMA**

# Tabla de contenido

|                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| Capítulo 1 Programa de Monitoreo de Condición.....                             | 1-1  |
| <i>Prácticas de mantenimiento</i> .....                                        | 1-2  |
| <i>Diseñando el programa</i> .....                                             | 1-3  |
| Auditoría de equipos .....                                                     | 1-6  |
| Criticidad y Modos de Falla .....                                              | 1-9  |
| Criticidad.....                                                                | 1-9  |
| El intervalo P-F.....                                                          | 1-10 |
| Modos de falla.....                                                            | 1-10 |
| ¿Qué tecnologías utilizar? .....                                               | 1-11 |
| Problemas físicos .....                                                        | 1-11 |
| Frecuencia de prueba.....                                                      | 1-12 |
| ¿Cuántas máquinas probar? .....                                                | 1-12 |
| Establecer metas.....                                                          | 1-13 |
| Conozca su máquina.....                                                        | 1-13 |
| Condiciones de prueba estándar.....                                            | 1-14 |
| ¿Qué mide usted?.....                                                          | 1-14 |
| Configurando la base de datos .....                                            | 1-15 |
| Configurando la ruta.....                                                      | 1-15 |
| Estructura de la base de datos de la planta .....                              | 1-16 |
| Reportes .....                                                                 | 1-16 |
| Configuración de alarmas.....                                                  | 1-17 |
| Haciendo la recomendación .....                                                | 1-17 |
| Puede que usted no tenga apoyo al principio .....                              | 1-18 |
| No se limite a buscar las fallas. ....                                         | 1-18 |
| Reporte sus éxitos.....                                                        | 1-19 |
| <i>Por qué los programas fallan</i> .....                                      | 1-19 |
| El beneficio financiero no se entiende ni se reporta .....                     | 1-21 |
| No hay credibilidad en la alta gerencia ni en los trabajadores de planta. .... | 1-21 |
| Falta de estrategia .....                                                      | 1-22 |
| No hay compromiso .....                                                        | 1-22 |
| Gente equivocada.....                                                          | 1-22 |
| Mala ejecución.....                                                            | 1-22 |
| Monitoreo de condición versus resolución de problemas .....                    | 1-22 |
| Informes deficientes .....                                                     | 1-23 |
| Monitoreo de condición, no mejora. ....                                        | 1-23 |
| Plazo corto al fallo: ITTF.....                                                | 1-23 |
| Prevalece el mantenimiento basado en calendario y no basado en condición.....  | 1-23 |

|                                                                       |             |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>Conclusión.....</i>                                                | <i>1-24</i> |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>1-24</i> |
| <b>Capítulo 2    Tecnologías de Monitoreo de Condición.....</b>       | <b>2-1</b>  |
| <i>Introducción.....</i>                                              | <i>2-2</i>  |
| <i>Ultrasonido (ultrasonido aerotransportado y estructural).....</i>  | <i>2-4</i>  |
| Cómo funciona.....                                                    | 2-4         |
| Fugas de aire .....                                                   | 2-6         |
| Caldera, intercambiador de calor y fugas de condensador.....          | 2-7         |
| Detección de trampas de vapor defectuosas.....                        | 2-8         |
| Ultrasonidos y problemas eléctricos .....                             | 2-9         |
| Lubricación.....                                                      | 2-9         |
| Detección de fallas mecánicas .....                                   | 2-11        |
| Ventajas:.....                                                        | 2-11        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>2-12</i> |
| <i>Termografía infrarroja.....</i>                                    | <i>2-12</i> |
| Comparaciones de temperatura .....                                    | 2-14        |
| Algunas cosas que debe saber: .....                                   | 2-15        |
| Aplicaciones eléctricas.....                                          | 2-15        |
| Aplicaciones mecánicas.....                                           | 2-17        |
| Sistemas de vapor.....                                                | 2-18        |
| Planta refractaria .....                                              | 2-18        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>2-19</i> |
| <i>Pruebas de motores eléctricos.....</i>                             | <i>2-19</i> |
| Pruebas dinámicas en línea.....                                       | 2-20        |
| Análisis de firma de corriente del motor (MCSA).....                  | 2-20        |
| Análisis de Firma Eléctrica (ESA) .....                               | 2-21        |
| Pruebas fuera de línea.....                                           | 2-22        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>2-22</i> |
| <i>Análisis de aceite.....</i>                                        | <i>2-22</i> |
| Pruebas de análisis de aceite y lo que miden.....                     | 2-23        |
| Pruebas adicionales que se pueden realizar.....                       | 2-24        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>2-25</i> |
| <i>Análisis de partículas de desgaste.....</i>                        | <i>2-25</i> |
| Análisis de aceite vs. análisis de partículas de desgaste .....       | 2-26        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                              | <i>2-27</i> |
| <i>Monitoreo de Condición versus Mejora de la Confiabilidad .....</i> | <i>2-28</i> |
| <i>Seleccionar la mejor tecnología.....</i>                           | <i>2-28</i> |
| Análisis de riesgos .....                                             | 2-29        |

|                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| Capítulo 3 <b>Procesamiento de señales</b> .....                | 3-1  |
| <i>Introducción</i> .....                                       | 3-2  |
| <i>Un repaso general</i> .....                                  | 3-2  |
| <i>Transductores</i> .....                                      | 3-3  |
| <i>Acondicionamiento de señal</i> .....                         | 3-4  |
| <i>Filtros</i> .....                                            | 3-5  |
| Comprensión de los filtros .....                                | 3-6  |
| <i>Integración, diferenciación y relación señal-ruido</i> ..... | 3-11 |
| Relación señal-ruido (S/N).....                                 | 3-13 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-15 |
| <i>Amplificación y ganancia</i> .....                           | 3-15 |
| <i>Rango dinámico</i> .....                                     | 3-18 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-20 |
| <i>El proceso de digitalización</i> .....                       | 3-20 |
| Muestreo de la señal y frecuencia de muestreo .....             | 3-20 |
| <i>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</i> .....               | 3-21 |
| Teorema/ Criterio de Nyquist .....                              | 3-22 |
| <i>Aliasing (solapamiento de señales)</i> .....                 | 3-24 |
| La conclusión sobre el aliasing .....                           | 3-25 |
| Delta – Método Sigma.....                                       | 3-26 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-26 |
| <i>Muestreo y resolución</i> .....                              | 3-27 |
| Tiempo de muestreo (T).....                                     | 3-28 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-30 |
| <i>Ventanas</i> .....                                           | 3-30 |
| El tipo de ventana afecta a la resolución de frecuencia.....    | 3-33 |
| Importancia de la resolución.....                               | 3-35 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-36 |
| <i>Promedio</i> .....                                           | 3-36 |
| ¿Cuántos promedios usar? .....                                  | 3-37 |
| Promedio de superposición o traslape .....                      | 3-38 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                       | 3-41 |
| <i>Activación (disparo o triggering)</i> .....                  | 3-41 |
| Fase, seguimiento de orden y TSA.....                           | 3-41 |
| Disparador impulsado por datos .....                            | 3-42 |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Promedio sincrónico de tiempo (ISA)</i> .....                         | 3-43       |
| <i>Autocorrelación</i> .....                                             | 3-45       |
| <i>Seguimiento de órdenes</i> .....                                      | 3-46       |
| Frecuencia de muestreo variable .....                                    | 3-49       |
| Sintetizador de relación de seguimiento .....                            | 3-51       |
| Codificador de eje .....                                                 | 3-53       |
| El enfoque digital .....                                                 | 3-53       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 3-54       |
| <b>Capítulo 4   Análisis de forma de onda de tiempo</b> .....            | <b>4-1</b> |
| <i>Análisis de forma de onda de tiempo</i> .....                         | 4-2        |
| Análisis de espectro frente al análisis de forma de onda de tiempo ..... | 4-3        |
| <i>Ajustes de forma de onda de tiempo</i> .....                          | 4-5        |
| Configuración de medición .....                                          | 4-12       |
| Calculando la configuración correcta .....                               | 4-15       |
| Unidades de vibración.....                                               | 4-16       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 4-17       |
| <i>Técnicas de análisis de forma de onda de tiempo</i> .....             | 4-17       |
| <i>Reconociendo patrones de vibración</i> .....                          | 4-21       |
| Fallas de rodamientos y modulación de amplitud .....                     | 4-22       |
| Vibración recortada “no lineal” .....                                    | 4-24       |
| Impactos .....                                                           | 4-25       |
| Holgura rotativa .....                                                   | 4-26       |
| Cavitación.....                                                          | 4-28       |
| <i>Direcciones de medición y almacenamiento</i> .....                    | 4-29       |
| <i>Análisis de fallos en cajas de engranajes</i> .....                   | 4-30       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 4-34       |
| <i>Diagramas circulares</i> .....                                        | 4-34       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 4-36       |
| <b>Capítulo 5   Análisis de fase</b> .....                               | <b>5-1</b> |
| <i>Introducción</i> .....                                                | 5-2        |
| <i>¿Qué es la fase?</i> .....                                            | 5-2        |
| La fase tiene que ver con el tiempo.....                                 | 5-3        |
| Fundamentos de la fase .....                                             | 5-4        |
| Comparación de dos formas de onda .....                                  | 5-6        |
| Uso de una referencia .....                                              | 5-7        |
| Fase de adelanto y retraso .....                                         | 5-9        |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| <i>Puntos clave</i> .....                             | 5-11       |
| <i>Tipo y posición del transductor</i> .....          | 5-11       |
| Sensores de vibración.....                            | 5-13       |
| Representación vectorial.....                         | 5-18       |
| Representando la fase.....                            | 5-20       |
| <i>Puntos clave</i> .....                             | 5-22       |
| <i>Midiendo fase</i> .....                            | 5-22       |
| Uso de un tacómetro.....                              | 5-22       |
| Fase de dos canales .....                             | 5-25       |
| Uso de un estroboscopio .....                         | 5-26       |
| <i>Aplicaciones de análisis de fase</i> .....         | 5-28       |
| Diagnóstico de fallas de la máquina .....             | 5-29       |
| Precauciones al recopilar datos de fase .....         | 5-29       |
| <i>Puntos clave</i> .....                             | 5-31       |
| <i>Diagnóstico del desbalance</i> .....               | 5-31       |
| Desbalance estático.....                              | 5-32       |
| Desbalance tipo cupla .....                           | 5-35       |
| Desbalance dinámico.....                              | 5-39       |
| Desbalance en máquina vertical.....                   | 5-42       |
| Desbalance de máquinas en voladizo .....              | 5-43       |
| <i>Desalineamiento</i> .....                          | 5-46       |
| Revisión rápida.....                                  | 5-47       |
| Relaciones de fase: .....                             | 5-49       |
| <i>Excentricidad</i> .....                            | 5-52       |
| <i>Eje doblado</i> .....                              | 5-54       |
| <i>Rodamiento torcido</i> .....                       | 5-56       |
| <i>Holgura/soltura</i> .....                          | 5-57       |
| <i>Conclusión</i> .....                               | 5-58       |
| <i>Puntos clave</i> .....                             | 5-58       |
| <b>Capítulo 6 Dinámica de sistemas</b> .....          | <b>6-1</b> |
| <i>Introducción</i> .....                             | 6-2        |
| <i>Masa, rigidez, amortiguación – lo básico</i> ..... | 6-3        |
| Masa .....                                            | 6-5        |
| Rigidez.....                                          | 6-6        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-6        |
| <i>Amortiguación</i> .....                                               | 6-7        |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-9        |
| <i>Sistemas de grado único de libertad</i> .....                         | 6-9        |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-12       |
| <i>Relación de amortiguación</i> .....                                   | 6-12       |
| Frecuencia natural sin amortiguación.....                                | 6-12       |
| Sistema amortiguado críticamente.....                                    | 6-13       |
| Sistemas sobreamortiguados .....                                         | 6-14       |
| Sistemas subamortiguados .....                                           | 6-15       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-16       |
| <i>Frecuencias naturales forzadas</i> .....                              | 6-16       |
| Excitando al sistema.....                                                | 6-17       |
| <i>Representación de datos complejos</i> .....                           | 6-20       |
| Lo que sucede en la resonancia.....                                      | 6-23       |
| Diagrama de Nyquist o Polar .....                                        | 6-25       |
| Magnitud, fase y amortiguación.....                                      | 6-27       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-29       |
| <i>Respuesta dinámica de un rotor</i> .....                              | 6-29       |
| “Punto pesado” versus “punto alto” .....                                 | 6-30       |
| Rotor rígido versus flexible.....                                        | 6-31       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-35       |
| <i>Sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF)</i> .....             | 6-35       |
| Modos y nodos.....                                                       | 6-37       |
| <i>¿Por qué es importante?</i> .....                                     | 6-40       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                | 6-41       |
| <b>Capítulo 7 Frecuencias naturales y resonancias .....</b>              | <b>7-1</b> |
| <i>¿Cómo puede usted saber si tiene un problema de resonancia?</i> ..... | 7-2        |
| Fallas inusuales.....                                                    | 7-2        |
| Señales características en el espectro: .....                            | 7-3        |
| “Jorobas” y “montañas” .....                                             | 7-3        |
| <i>Pruebas especiales para identificar frecuencias naturales</i> .....   | 7-4        |
| <i>Cambio de la velocidad de operación</i> .....                         | 7-5        |
| <i>Prueba de impacto</i> .....                                           | 7-6        |
| Uso de un promedio negativo (de resta).....                              | 7-8        |
| <i>Pruebas de arranque y paro</i> .....                                  | 7-9        |
| Diagrama de Campbell.....                                                | 7-11       |



|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Seguimiento de órdenes .....                                                    | 7-12       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                       | 7-14       |
| <i>Caso práctico: Motor de CC en una imprenta</i> .....                         | 7-14       |
| <i>Análisis visual</i> .....                                                    | 7-17       |
| <i>Mediciones a canal cruzado</i> .....                                         | 7-17       |
| Comprendiendo las mediciones a canal cruzado .....                              | 7-18       |
| Aplicaciones de fase a canal cruzado .....                                      | 7-18       |
| Pruebas de respuesta de fuerza .....                                            | 7-18       |
| Transmisibilidad y FRF .....                                                    | 7-19       |
| Linealidad y coherencia.....                                                    | 7-21       |
| La medición de coherencia .....                                                 | 7-22       |
| Pruebas de no linealidades .....                                                | 7-23       |
| Uso de pruebas de impacto .....                                                 | 7-23       |
| Conjunto de datos completo .....                                                | 7-25       |
| Ejemplo de prueba de coherencia.....                                            | 7-28       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                       | 7-30       |
| <b>Capítulo 8   Análisis de Forma de Deflexión Operacional (ODS) .....</b>      | <b>8-1</b> |
| <i>Introducción a las pruebas de Forma de Deflexión Operacional (ODS)</i> ..... | 8-2        |
| ¿Por qué usar ODS? .....                                                        | 8-2        |
| Resumen rápido.....                                                             | 8-3        |
| Primer paso: Planificar el trabajo.....                                         | 8-3        |
| ¿Cuántos puntos de prueba debería haber? .....                                  | 8-3        |
| Haga un plan .....                                                              | 8-4        |
| Lecturas de fase .....                                                          | 8-6        |
| Fase con un analizador de un solo canal.....                                    | 8-6        |
| El valor de los datos de magnitud y fase.....                                   | 8-7        |
| Documentar las lecturas.....                                                    | 8-7        |
| Fase con un analizador de dos canales .....                                     | 8-7        |
| Nota importante: .....                                                          | 8-9        |
| Visualización del movimiento .....                                              | 8-9        |
| Creación del trabajo ODS.....                                                   | 8-10       |
| Interpretación de la animación.....                                             | 8-12       |
| Comprobación de resonancias .....                                               | 8-13       |
| ODS basados en el tiempo .....                                                  | 8-14       |

|                                                                                  |              |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Ejemplo 1 ODS – Soltura de soporte de tubería.....</i>                        | <i>8-15</i>  |
| <i>Ejemplo 2 – ODS de una sección de prensa de papel de molino de papel.....</i> | <i>8-18</i>  |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                         | <i>8-22</i>  |
| <b>Capítulo 9    <i>Análisis Modal.....</i></b>                                  | <b>9-1</b>   |
| <i>Introducción al análisis modal.....</i>                                       | <i>9-2</i>   |
| Definición de la geometría de la estructura sometida a prueba.....               | 9-4          |
| Pruebas modales .....                                                            | 9-4          |
| Función de respuesta de frecuencia (FRF).....                                    | 9-5          |
| Fuentes de excitación en pruebas modales.....                                    | 9-6          |
| La secuencia de pruebas modales.....                                             | 9-10         |
| La medición del punto de conducción.....                                         | 9-11         |
| La regla de la reciprocidad .....                                                | 9-12         |
| Visualización de datos de prueba modales.....                                    | 9-13         |
| Datos de prueba modal de ajuste de curva.....                                    | 9-16         |
| Consejos de medición modal FRF.....                                              | 9-17         |
| Los beneficios del análisis modal.....                                           | 9-17         |
| Análisis de elementos finitos (FEA).....                                         | 9-17         |
| Combinación del análisis modal con el análisis de elementos finitos.....         | 9-19         |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                         | <i>9-20</i>  |
| <b>Capítulo 10    <i>Tratando con resonancias.....</i></b>                       | <b>10-1</b>  |
| <i>Corrigiendo problemas de resonancia.....</i>                                  | <i>10-2</i>  |
| <i>Cambiar la velocidad de la máquina.....</i>                                   | <i>10-2</i>  |
| <i>Cambiar la rigidez.....</i>                                                   | <i>10-2</i>  |
| Análisis de elementos finitos (FEA).....                                         | 10-3         |
| Análisis modal .....                                                             | 10-3         |
| Estimación de las modificaciones estructurales necesarias .....                  | 10-4         |
| <i>Casos de estudio .....</i>                                                    | <i>10-5</i>  |
| Motor – Bomba sobre base de acero doblada.....                                   | 10-5         |
| Bombas en voladizo.....                                                          | 10-6         |
| Flexibilidad horizontal.....                                                     | 10-7         |
| Resonancia de base .....                                                         | 10-8         |
| Vibración de máquinas hermanas.....                                              | 10-9         |
| <i>Amortiguación.....</i>                                                        | <i>10-9</i>  |
| Adición de amortiguación.....                                                    | 10-10        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                         | <i>10-11</i> |
| <i>Absorbedores sintonizados.....</i>                                            | <i>10-11</i> |
| Amortiguadores de masa sintonizados.....                                         | 10-13        |

|                                                                   |             |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>Aislamiento</i> .....                                          | 10-17       |
| <i>Conclusión</i> .....                                           | 10-19       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                         | 10-20       |
| <b>Capítulo 11    <i>Análisis de Rodamientos</i></b> .....        | <b>11-1</b> |
| <i>Introducción</i> .....                                         | 11-2        |
| <i>Confiableidad</i> .....                                        | 11-2        |
| El enfoque proactivo.....                                         | 11-5        |
| <i>Condiciones de falla del rodamiento</i> .....                  | 11-5        |
| <i>Rodamientos y lubricación</i> .....                            | 11-6        |
| <i>Errores de instalación</i> .....                               | 11-8        |
| <i>Holgura</i> .....                                              | 11-9        |
| La causa .....                                                    | 11-10       |
| <i>Soltura giratoria</i> .....                                    | 11-10       |
| Rodamiento suelto en la carcasa o resbaladizo en el eje .....     | 11-10       |
| <i>Tensión o corriente excesivas</i> .....                        | 11-11       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                         | 11-13       |
| <i>Frecuencias de defectos</i> .....                              | 11-13       |
| Frecuencia Fundamental del Tren (FTF).....                        | 11-15       |
| La frecuencia de giro de la bola (BSF).....                       | 11-15       |
| Frecuencia de paso de bolas - Pista Interna (BPI).....            | 11-16       |
| Frecuencia de paso de bolas - Pista Externa (BPFO).....           | 11-16       |
| <i>Consejos sobre frecuencia de defectos de rodamiento</i> .....  | 11-17       |
| Las frecuencias de defectos no son sincrónicas .....              | 11-21       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                         | 11-21       |
| <i>Vibración – la imagen completa</i> .....                       | 11-21       |
| <i>Fallas de rodamientos en la primera etapa</i> .....            | 11-24       |
| <i>Fallas de rodamientos en la segunda etapa</i> .....            | 11-25       |
| <i>Técnicas de análisis de vibración de alta frecuencia</i> ..... | 11-27       |
| Ondas de esfuerzos (pulsos de choque) .....                       | 11-28       |
| Desafío tres: Medición.....                                       | 11-31       |
| Soluciones: Cuatro enfoques diferentes.....                       | 11-32       |
| <i>Demodulación/envolvente</i> .....                              | 11-33       |
| Paso uno: Filtro paso alto o paso banda .....                     | 11-33       |
| Paso dos: Rectificar (o Envolvente) .....                         | 11-35       |
| Paso tres: Filtro de paso bajo .....                              | 11-36       |
| Configuración de la medición .....                                | 11-36       |
| Paso cuatro: Analizado .....                                      | 11-36       |

|                                                                                                      |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Configuración del filtro .....                                                                       | 11-38       |
| Tasa de muestreo .....                                                                               | 11-39       |
| <i>El método de Pulso de Choque (ShockPulse)</i> .....                                               | 11-39       |
| Lubricación .....                                                                                    | 11-39       |
| El sensor SPM .....                                                                                  | 11-41       |
| <i>El método PeakVue®</i> .....                                                                      | 11-42       |
| <i>El método Spike Energy</i> .....                                                                  | 11-44       |
| Resumen .....                                                                                        | 11-45       |
| <i>Rodamientos de baja velocidad</i> .....                                                           | 11-45       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                                            | 11-46       |
| <i>Fallas de rodamientos en la tercera etapa</i> .....                                               | 11-46       |
| Fallo de pista externa (pista interna girando) .....                                                 | 11-47       |
| Fallo de pista externa (pista externa girando) .....                                                 | 11-47       |
| Fallo de pista interna .....                                                                         | 11-48       |
| Daño en la bola o en el rodillo .....                                                                | 11-48       |
| Visión general de las técnicas .....                                                                 | 11-49       |
| Análisis del espectro .....                                                                          | 11-50       |
| Gráficos con escala logarítmica .....                                                                | 11-50       |
| Análisis de forma de onda de tiempo .....                                                            | 11-51       |
| Caso de estudio .....                                                                                | 11-52       |
| <i>Fallas de rodamientos en etapa cuatro</i> .....                                                   | 11-54       |
| <i>Optimización de los resultados</i> .....                                                          | 11-57       |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                                            | 11-58       |
| <i>Caso de estudio: Planta de secado de alimento para animales</i> .....                             | 11-58       |
| <i>Caso de estudio: Acoplamiento de cuchara conveyor GRS38</i> .....                                 | 11-63       |
| <i>Caso práctico: SCA Hygiene Australasia PM4 - M05-04 outer wire drive</i> .....                    | 11-64       |
| <i>Caso práctico: Visypaper 4 secador #32 lado de transmisión</i> .....                              | 11-65       |
| <i>Caso práctico: Visypaper 4 bomba de ventilador de primera línea BMP470</i> .....                  | 11-67       |
| <i>Caso de estudio: Visypaper 5 Unipress rodamiento interno de rodillo de succión</i> .....          | 11-68       |
| <i>Caso de estudio: 133" Nicholson molino, rodamiento de extremo de transmisión tipo 23260</i> ..... | 11-70       |
| <i>Caso de estudio: Visypaper 3 secador #47 lado tiemo</i> .....                                     | 11-71       |
| <i>Caso de estudio: Lavadora de aire #1</i> .....                                                    | 11-73       |
| <b>Capítulo 12   Análisis de cojinetes de deslizamiento</b> .....                                    | <b>12-1</b> |
| <i>Diagnóstico de fallas en máquinas con cojinetes de deslizamiento</i> .....                        | 12-2        |
| Cojinetes esféricos lisos .....                                                                      | 12-4        |
| Cojinetes elípticos y de tres lóbulos .....                                                          | 12-6        |
| Cojinetes de presión estanco .....                                                                   | 12-6        |

|                                                                                                |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Cojinete de 5 almohadillas/zapatillas basculantes.....                                         | 12-7        |
| Cojinetes de empuje.....                                                                       | 12-7        |
| <i>Sensores de proximidad - corrientes de eddy.....</i>                                        | 12-8        |
| Señales disponibles en sensores de desplazamiento.....                                         | 12-9        |
| Sensibilidad del sensor (sonda) de desplazamiento .....                                        | 12-10       |
| Polaridad del sensor de desplazamiento .....                                                   | 12-11       |
| Convenciones de sensores de desplazamiento.....                                                | 12-13       |
| Keyphasor: referencia una vez por revolución.....                                              | 12-15       |
| <i>Análisis de vibración de máquinas con cojinetes de deslizamiento.....</i>                   | 12-17       |
| Comprendiendo las lecturas de desplazamiento.....                                              | 12-18       |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                                       | 12-18       |
| <i>Trazados de órbita, o figuras de Lissajous.....</i>                                         | 12-19       |
| Uso de osciloscopios.....                                                                      | 12-20       |
| Sistemas de monitoreo .....                                                                    | 12-21       |
| Señales directas y filtradas .....                                                             | 12-22       |
| <i>Compensación de imperfecciones.....</i>                                                     | 12-24       |
| Uso de recopiladores o analizadores de datos portátiles para realizar análisis de órbita ..... | 12-25       |
| Uso del promedio sincrónico de tiempo (TSA).....                                               | 12-27       |
| <i>Análisis de la línea central de leje mediante el voltaje D.C.....</i>                       | 12-28       |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                                       | 12-31       |
| <i>Diagnóstico de fallas con órbitas y análisis de línea central.....</i>                      | 12-31       |
| Diagnóstico de precargas con análisis de órbita.....                                           | 12-32       |
| Resumen de precargas.....                                                                      | 12-34       |
| Dirección de la órbita y precesión de vibración.....                                           | 12-35       |
| Diagnóstico de condiciones de falla con órbitas .....                                          | 12-35       |
| Diagnóstico del desbalance.....                                                                | 12-36       |
| Diagnóstico de la desalineación.....                                                           | 12-37       |
| Estudiando lazos y contando puntos en la órbita .....                                          | 12-37       |
| Inestabilidades inducidas por el fluido: Batido de aceite y látigo de aceite .....             | 12-38       |
| Rozamiento del eje.....                                                                        | 12-40       |
| Resumen.....                                                                                   | 12-42       |
| <i>Puntos clave.....</i>                                                                       | 12-42       |
| <b>Capítulo 13    Análisis de Motores Eléctricos.....</b>                                      | <b>13-1</b> |
| <i>Introducción.....</i>                                                                       | 13-2        |
| <i>Los fundamentos del magnetismo.....</i>                                                     | 13-2        |
| Creación de un campo magnético con flujo de corriente .....                                    | 13-2        |
| Bobinas y campos magnéticos.....                                                               | 13-4        |
| Induciendo corriente en un conductor.....                                                      | 13-5        |

|                                                                     |              |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>La aplicación a motores eléctricos.....</i>                      | <i>13-6</i>  |
| <i>Motores sincrónicos.....</i>                                     | <i>13-7</i>  |
| <i>Motores de inducción.....</i>                                    | <i>13-7</i>  |
| Motores de inducción de jaula de ardilla.....                       | 13-8         |
| <i>Puntos clave.....</i>                                            | <i>13-10</i> |
| <i>Diagnóstico de fallas.....</i>                                   | <i>13-10</i> |
| Fuentes de vibración en motores eléctricos.....                     | 13-11        |
| Variadores de frecuencia .....                                      | 13-12        |
| <i>Problemas en el estator.....</i>                                 | <i>13-12</i> |
| Excentricidad estática.....                                         | 13-12        |
| Caso de estudio.....                                                | 13-13        |
| Pata coja .....                                                     | 13-14        |
| <i>Problemas con el rotor.....</i>                                  | <i>13-15</i> |
| Rotores excéntricos .....                                           | 13-16        |
| Problemas con las barras del rotor.....                             | 13-16        |
| Barras de rotor agrietadas .....                                    | 13-17        |
| Caso de estudio.....                                                | 13-17        |
| Frecuencia de paso de la barra del rotor.....                       | 13-19        |
| Pandeo del rotor.....                                               | 13-20        |
| Rotor suelto.....                                                   | 13-21        |
| Bobinas de estator sueltas .....                                    | 13-21        |
| Problemas de laminado.....                                          | 13-21        |
| Conexiones sueltas .....                                            | 13-22        |
| <i>Análisis de la corriente del motor.....</i>                      | <i>13-23</i> |
| <i>Puntos clave.....</i>                                            | <i>13-25</i> |
| <b>Capítulo 14   Bombas, Ventiladores y Compresores.....</b>        | <b>14-1</b>  |
| <i>Bombas, ventiladores y compresores.....</i>                      | <i>14-2</i>  |
| Frecuencia de paso de paleta/álabe .....                            | 14-3         |
| Cavitación.....                                                     | 14-4         |
| Turbulencia.....                                                    | 14-5         |
| Armónicos .....                                                     | 14-6         |
| <i>Puntos clave.....</i>                                            | <i>14-7</i>  |
| <i>Caso de estudio: Minera Yanacocha- Newmont Gold en Perú.....</i> | <i>14-8</i>  |
| Introducción.....                                                   | 14-8         |
| <b>Capítulo 15   Análisis de cajas de engranajes.....</b>           | <b>15-1</b>  |
| <i>Cajas de engranajes.....</i>                                     | <i>15-2</i>  |
| <i>Comprendiendo las cajas de engranajes.....</i>                   | <i>15-2</i>  |
| Engrane correcto .....                                              | 15-4         |

|                                                             |              |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Diseño de engranajes.....</i>                            | <i>15-5</i>  |
| Engranajes de espuela.....                                  | 15-5         |
| Engranajes helicoidales .....                               | 15-6         |
| Engranajes biselados helicoidales.....                      | 15-8         |
| Engranajes helicoidales dobles o de espiga.....             | 15-8         |
| Engranajes biselados .....                                  | 15-9         |
| Engranajes de tornillo sin fin (gusano) .....               | 15-11        |
| Cremallera y piñón.....                                     | 15-13        |
| Engranajes planetarios .....                                | 15-14        |
| <i>Cálculo de frecuencias forzadas.....</i>                 | <i>15-16</i> |
| Frecuencias forzadas en tornillos sin fin.....              | 15-16        |
| Desgaste del equipo y factores comunes .....                | 15-18        |
| Frecuencia de repetición de diente.....                     | 15-22        |
| Frecuencia fantasma .....                                   | 15-23        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                    | <i>15-24</i> |
| <i>Análisis de vibración.....</i>                           | <i>15-24</i> |
| <i>Formas de onda y análisis de engranajes.....</i>         | <i>15-25</i> |
| Promedio sincrónico de tiempo .....                         | 15-26        |
| Desgaste de dientes.....                                    | 15-26        |
| Dientes cargados.....                                       | 15-27        |
| Engranajes excéntricos.....                                 | 15-28        |
| Juego de engranajes (backlash) .....                        | 15-29        |
| Engranajes desalineados.....                                | 15-29        |
| Engranajes con radios.....                                  | 15-32        |
| Diente agrietado o roto.....                                | 15-32        |
| <i>La importancia de las formas de onda del tiempo.....</i> | <i>15-33</i> |
| <i>Análisis de partículas de desgaste.....</i>              | <i>15-35</i> |
| <i>Puntos clave.....</i>                                    | <i>15-35</i> |
| <i>Cajas de engranajes planetarios (epicíclicas).....</i>   | <i>15-36</i> |
| Portador estacionario .....                                 | 15-37        |
| Portador giratorio .....                                    | 15-37        |
| Diferentes configuraciones .....                            | 15-38        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                    | <i>15-39</i> |
| <i>Monitoreo de cajas de engranajes.....</i>                | <i>15-39</i> |
| <b>Capítulo 16   Balanceo de maquinaria rotativa.....</b>   | <b>16-1</b>  |
| <i>Balanceo de maquinaria rotativa.....</i>                 | <i>16-2</i>  |
| Los objetivos de este capítulo.....                         | 16-2         |

|                                                                                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <i>¿Qué es el balanceo?</i> .....                                                 | 16-2  |
| <i>El balanceo es un procedimiento</i> .....                                      | 16-3  |
| <i>Preparación para el trabajo de balanceo - una palabra de advertencia</i> ..... | 16-4  |
| <i>¡La seguridad es primero!</i> .....                                            | 16-4  |
| <i>¿La máquina está realmente desbalanceada?</i> .....                            | 16-5  |
| <i>¿Se puede balancear la máquina?</i> .....                                      | 16-5  |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                         | 16-6  |
| <i>Vectores y diagramas polares</i> .....                                         | 16-6  |
| <i>Suma de vectores</i> .....                                                     | 16-10 |
| <i>Resta de vectores</i> .....                                                    | 16-13 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                         | 16-14 |
| <i>Balanceo a un plano</i> .....                                                  | 16-14 |
| Resumen del método de un plano .....                                              | 16-14 |
| Uso de vectores.....                                                              | 16-15 |
| Configuración de medición.....                                                    | 16-16 |
| Comida inicial de balanceo .....                                                  | 16-17 |
| Añadir el peso de prueba .....                                                    | 16-18 |
| Selección de la posición para el peso de prueba.....                              | 16-20 |
| Comida de prueba.....                                                             | 16-21 |
| Si se elimina el peso de prueba.....                                              | 16-22 |
| Dejando el peso de prueba .....                                                   | 16-23 |
| Desbalance residual.....                                                          | 16-25 |
| Recorte de balanceo.....                                                          | 16-25 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                         | 16-28 |
| <i>Dividiendo pesos</i> .....                                                     | 16-28 |
| <i>Combinando pesos</i> .....                                                     | 16-32 |
| Otros desafíos .....                                                              | 16-33 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                         | 16-34 |
| <i>Balanceo de cuatro comidas sin fase</i> .....                                  | 16-34 |
| Balanceo con el método de cuatro comidas .....                                    | 16-35 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                                         | 16-41 |
| <i>Balanceo a dos planos</i> .....                                                | 16-41 |
| Normas ISO.....                                                                   | 16-41 |
| Regla general.....                                                                | 16-42 |
| La comida original (inicial).....                                                 | 16-44 |
| Comida de prueba uno .....                                                        | 16-44 |
| Comida de prueba dos.....                                                         | 16-45 |
| Cálculo del balanceo.....                                                         | 16-45 |



|                                                           |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Camera de recorte .....                                   | 16-45 |
| <i>Balanceo de rotores en voladizo</i> .....              | 16-45 |
| <i>Método de un plano</i> .....                           | 16-47 |
| <i>Método de dos planos</i> .....                         | 16-47 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                 | 16-48 |
| <i>Máquinas de balanceo con rotores flexibles</i> .....   | 16-48 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                 | 16-50 |
| <i>Normas de balanceo</i> .....                           | 16-50 |
| Límite de balanceo “luz apagada” .....                    | 16-50 |
| Especificación genérica de desbalance .....               | 16-50 |
| <i>Normas de balanceo</i> .....                           | 16-51 |
| Límites de amplitud .....                                 | 16-51 |
| ISO 7919 .....                                            | 16-51 |
| ISO 10816 .....                                           | 16-52 |
| ISO 14694: 2003 .....                                     | 16-53 |
| <i>Desbalance residual</i> .....                          | 16-55 |
| Revisión rápida .....                                     | 16-56 |
| <i>Desbalance residual ISO 1940</i> .....                 | 16-57 |
| Asignación de $U_{per}$ .....                             | 16-62 |
| Simétrico .....                                           | 16-63 |
| No simétrico .....                                        | 16-64 |
| “La campana” .....                                        | 16-65 |
| Voladizo .....                                            | 16-66 |
| Ejemplo .....                                             | 16-67 |
| <i>Puntos clave</i> .....                                 | 16-68 |
| Capítulo 17 <b>Alineación de ejes</b> .....               | 17-1  |
| <i>¿Por qué es tan importante la desalineación?</i> ..... | 17-2  |
| <i>Tareas de pre-alineación</i> .....                     | 17-2  |
| Tolerancia de alineación .....                            | 17-3  |
| Tolerancias y velocidad .....                             | 17-4  |
| Recopilar lecturas “tal como se encuentra” .....          | 17-5  |
| Crear un área de trabajo limpia .....                     | 17-5  |
| Prepare sus calzas (shims) .....                          | 17-6  |
| Revise los pernos .....                                   | 17-6  |
| Prepare los cimientos de la máquina .....                 | 17-7  |
| Compruebe el estado físico de la máquina .....            | 17-7  |
| Compruebe y corrija la pata coja .....                    | 17-8  |
| Comience el proceso de alineación .....                   | 17-10 |

|                                                             |              |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Determinación del estado de alineación.....</i>          | <i>17-10</i> |
| <i>Uso de un filo recto o galgas (calibre fijo).....</i>    | <i>17-11</i> |
| <i>Utilizando indicadores de carátula.....</i>              | <i>17-12</i> |
| <i>Limitaciones del indicador de carátula.....</i>          | <i>17-13</i> |
| Flexión de las barras .....                                 | 17-13        |
| Precisión de la lectura.....                                | 17-14        |
| Problemas adicionales.....                                  | 17-14        |
| <i>El método de borde y cara.....</i>                       | <i>17-14</i> |
| <i>El método de indicadores invertidos.....</i>             | <i>17-16</i> |
| <i>Sistemas de alineación láser.....</i>                    | <i>17-17</i> |
| <i>Movimiento dinámico.....</i>                             | <i>17-20</i> |
| <i>Moviendo la máquina.....</i>                             | <i>17-21</i> |
| Moviendo la máquina verticalmente – calzas (shim).....      | 17-22        |
| Moviendo la máquina lateralmente.....                       | 17-23        |
| <i>Conclusión.....</i>                                      | <i>17-24</i> |
| <i>Puntos clave.....</i>                                    | <i>17-25</i> |
| <b>Capítulo 18   Generación de Alamas Estadísticas.....</b> | <b>18-1</b>  |
| <i>Generación de alamas con estadísticas:.....</i>          | <i>18-2</i>  |
| La necesidad de alamas .....                                | 18-2         |
| El problema de las alamas .....                             | 18-3         |
| Configuración de límites de alama.....                      | 18-3         |
| <i>Alamas de banda.....</i>                                 | <i>18-3</i>  |
| <i>Alamas de máscara o envolvente.....</i>                  | <i>18-6</i>  |
| <i>Repaso de estadística.....</i>                           | <i>18-8</i>  |
| Variación.....                                              | 18-11        |
| Desviación estándar.....                                    | 18-11        |
| Uso de estadísticas para establecer límites de alama .....  | 18-14        |
| Calidad de los datos.....                                   | 18-16        |
| Normalización: Tratando con la variación de velocidad.....  | 18-16        |
| Conclusión.....                                             | 18-17        |
| <i>Puntos clave.....</i>                                    | <i>18-17</i> |