CMC CHILE 2026

Sesión

BRÚJULA

1

BRÚJULA SESIÓN 25

CONGRESO DE MANTENIMIENTO & CONFIABILIDAD CHILE 7ª EDICIÓN



Lo que las vibraciones no ven

Ampliar la cobertura de fallas en equipos trifásicos críticos y convertir cada alerta en una intervención planificada

El caso Cimpor

Marco Ferreira

Director General · Enging Portugal (Grupo Dynamox)

2

60k

EUR por cada hora de parada no planificada en Cimpor



Fallas eléctricas difíciles de anticipar:

- ruptura de aislamiento
- cortocircuitos a tierra
- degradación del rotor

Costo real por evento:

10 k€ – 300 k€

¿Cuánta información teníamos antes de que fallaran?

3

Cimpor: un contexto exigente

3 plantas

Península ibérica, producción continua de cemento

24/7

Solo paradas programadas, en entornos de alto desgaste

AT / MT / BT

Motores, transformadores, variadores de frecuencia, molinos y hornos

4

Cimpor: el problema

El ciclo a romper

- EQUIPO EN FUNCIONAMIENTO
- MANTENIMIENTO PREVENTIVO PROGRAMADO
- FALLO INESPERADO
- MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE EMERGENCIA
- MANTENIMIENTO PREVENTIVO PROGRAMADO
- FALLO INESPERADO ↻

COSTE REAL DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO

- Entre 3 y 5 veces más costoso que una intervención planificada
- Repuestos de emergencia con precios elevados
- Costos de mantenimiento en horas extra
- Pérdida de producción durante el tiempo de inactividad
- Riesgo de daños secundarios en cadena
- Incumplimiento del calendario de entregas

5

Por qué el calendario no bastaba para Cimpor

Tres situaciones que un calendario único no resuelve

Intervención prematura

Rodamiento reemplazado por calendario con ~40 % de vida útil remanente

Costo innecesario

Falla antes del plan

Falla en el día 28 con la revisión programada para el día 30

Parada de emergencia

Mismo plan, distinta condición

Equipos idénticos con degradaciones distintas bajo un calendario único

Exceso o déficit

Y, sobre todo: poca visibilidad sobre fallas eléctricas — aislamiento, cortocircuito a tierra y rotor —, las más costosas.

6

El problema no era hacer más mantenimiento.

Era no ver lo suficiente.

7

¿Qué pretendíamos lograr?



VISIBILIDAD

Sin una monitorización continua, los problemas permanecen ocultos hasta que se hacen evidentes, y a menudo ya es demasiado tarde.



ANTICIPACIÓN

El mantenimiento tradicional reacciona a los síntomas. El mantenimiento predictivo identifica los problemas antes de que tengan un impacto.



PRIORIZACIÓN

No todos los activos tienen el mismo riesgo. Sin datos en tiempo real, es difícil saber por dónde actuar primero.



HISTORIA

El historial operativo permite identificar tendencias y patrones de degradación.



CONFIANZA

Tener un activo solo por calendario genera incertidumbre. Conocer tu condición real te permite tomar decisiones con mayor seguridad y confianza.

8

¿Por qué análisis de firma eléctrica (ESA)?

Criterio de selección frente a la técnica ya disponible

Criterio	Vibraciones	Firma eléctrica (ESA)
Qué mide	Respuesta mecánica en la carcasa (aceleración, velocidad)	Corriente y tensión del motor, medidas desde el tablero eléctrico
Fortalezas	Rodamientos, desbalanceo, desalineación y holguras; diagnóstico mecánico detallado	Rotor, estator, aislamiento y alimentación; perturbaciones de carga y de transmission ; total visibilidad eléctrica
Limitaciones	Señal atenuada por acoplamientos elásticos y transmisiones; puntos de difícil acceso ; falta de visibilidad eléctrica	Menor sensibilidad a defectos incipientes de rodamientos; exige calibrar por régimen de carga y con VFD
Instalación	Sensores sobre la máquina, en cada punto de medición	Sin contacto con la máquina: < 2 h por activo, sin detener la producción

Criterios de decisión: cobertura de modos de falla, costo por activo monitoreado e instalación sin detener la producción.

9

Complementaria, no sustitutiva

Cuándo usar cada técnica

Cobertura de modos de falla

Solo vibraciones

~60 %

Vibraciones + análisis eléctrico

hasta ~97 %

Referencia general. Fuente: estimación a partir de la distribución de fallas en motores (EPRI/IEEE)

Si una técnica alerta y la otra no, la discrepancia también es información.

ESA aporta más

Motores inaccesibles o en entornos agresivos · fallas de rotor, estator y aislamiento · transmisiones con acoplamientos elásticos o correas

La vibración sigue siendo referencia

Rodamientos en etapa incipiente · localización detallada del defecto mecánico · equipos no accionados por motor eléctrico

Combinar ambas

Activos críticos sin redundancia · cuando el costo de una falla no detectada supera el de una segunda técnica

10

Cómo se diseñó el despliegue

Cinco etapas, de la criticidad a la mejora continua

1	2	3	4	5
Análisis de criticidad	**Selección de activos**	**Instalación**	**Calibración y validación**	**Operación y mejora**
Inventario y matriz de criticidad vs. consecuencia	Solo donde el impacto en producción lo justifica	En el tablero: < 2 h por activo, sin parar producción	Perfiles por activo y régimen de carga; umbrales ajustados	Monitoreo continuo y revisión periódica con mantenimiento

Criterios de selección aplicados

Impacto directo en la línea (molinos, hornos) · costo de falla sobre el umbral definido · historial de fallas frecuentes o impredecibles · sin redundancia · media tensión y operación continua

11

Selección de activos

CRITICIDAD DE LOS ACTIVOS

MONITOREO	Evaluar caso por caso
ALTA PRIORIDAD	Instale ESA inmediatamente.
BAJA PRIORIDAD	Mantenimiento preventivo programado
MONITOREO	Evalúa el contexto.

Criterios de selección aplicados en Cimpor

- Impacto directo en la línea de producción (molinos, hornos)
- Coste estimado del fallo superior al umbral definido
- Historial de fallos frecuentes o impredecibles
- Ausencia de redundancia operativa
- Equipos de media tensión: transformadores de potencia y distribución
- Motores en funcionamiento continuo

12

Instalación

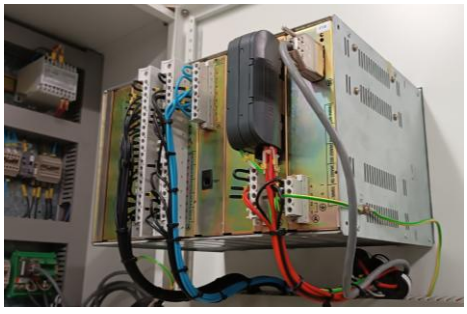




130 activos · < 2 h por activo · 0 h de parada

13

Instalación





130 activos · < 2 h por activo · 0 h de parada

14

El despliegue completo, no solo los éxitos

Visión consolidada del monitoreo

Población monitoreada

130

activos monitoreados en 3 plantas

1/2025 – 07/2026

periodo analizado

60kV – 0,48kV · 65% VFD

características principales

De las alertas a las decisiones

Alertas generadas **47**

Diagnósticos confirmados en campo **33**

Intervenciones planificadas **29**

Falsas alarmas

2 · 6 % del total

Fallas no detectadas

1 · descarga eléctrica externa

15

Dificultades encontradas



- Alarmas sensibles durante la fase inicial: necesidad de ajustar los umbrales en función del activo y del régimen de carga
- **Perfiles de carga variables: los activos que operan bajo diferentes regímenes requieren una calibración dinámica de los algoritmos**
- Validación de los diagnósticos iniciales: generar confianza en el equipo de mantenimiento requiere la confirmación física de las alertas
- **Participación tardía del equipo de mantenimiento: lo ideal sería que participaran desde la etapa de definición de la criticidad**
- KPI no definidos desde el inicio: dificultad para medir el impacto durante los primeros meses
- **Necesidad de revisar la priorización tras la instalación: algunos activos presentaron un nivel de criticidad distinto al previsto**

16

Calibración: los primeros meses

Lecciones cuantificadas del arranque

Arranque
semanas 1 - 3

- **+100** alarmas en las primeras **2** semanas
- **89** % atribuibles a umbrales genéricos

Ajuste
meses 1 – 2

- Umbrales ajustados en **98** activos
- Calibración dinámica en **87** activos con carga variable

Régimen
desde el mes 2

- **2** alarmas/mes en promedio
- **7** activos reclasificados en criticidad

Validar físicamente los primeros diagnósticos fue lo que construyó la confianza del equipo de mantenimiento.

17

De la señal a la decisión

El flujo operativo que convierte información en intervención

Firma eléctrica	Análisis espectral	Diagnóstico	Alerta	Recomendación	Intervención
Corriente y tensión, en continuo	FFT e indicadores por activo	Tipo de defecto, severidad, activo	Automática, al especialista	Qué hacer, cuándo y con qué prioridad	En la ventana operativa adecuada

Tres preguntas que la información tiene que responder

- **¿Qué activo atiendo primero?**
- **¿Cuándo intervengo?**
- **¿Puede operar hasta la próxima parada programada?**

Una alerta solo genera valor cuando activa una decisión con responsable y plazo.

18

CASO DE ESTUDIO

La vibración decía «normal». La firma eléctrica, no.

19

Caso: acoplamiento flexible en un separador

Una paradoja diagnóstica

Motor	Reductor	Acoplamiento elástico	Separador
ESA: indicador mecánico elevado de forma constante	Vibración: dentro de límites normales	9 puentes flexibles por lado	Sin cambios en el lado del separador

Por qué la firma eléctrica lo ve

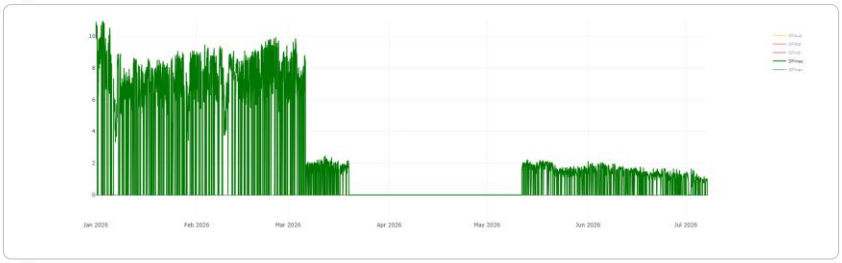
1. **Puentes agrietados** — Rigidez irregular en cada vuelta del eje
2. **Par fluctuante** — La carga oscila con la rotación
3. **Modulación** — Velocidad y flujo en el entrehierro varían
4. **Bandas laterales** — En la corriente: $f_s \pm k \cdot f_m$

El elastómero amortigua la vibración antes del acelerómetro; **la perturbación de par, en cambio, viaja por el eje hasta el motor.**

20

Detección: indicador, criterio y tiempos

Índice de severidad mecánica obtenido por ESA



Índice de severidad mecánica, enero – julio 2026

Criterio de alarma

Umbral: **2**
Persistencia: **90 días**
Nivel base: **1.5**

Primera alerta — Jan 26
Validación en campo — Abr 26
Intervención — Mai 26
Indicador normalizado — Mai 26

Detección → intervención: 4 meses

Vibración: normal todo el periodo

21

Validación en campo y decisión operacional

Confirmación de la causa raíz



Inspección: grietas en los 3 puentes superiores; puente central con desgaste y fatiga

Reductor descartado: componentes en excelente estado



Espectro de corriente: el pico característico se reduce tras el reemplazo

Decisión

- Reemplazo del elemento elástico
- Tras el cambio, el indicador vuelve a su nivel base

130 k€
costo evitado, validado por Cimpor

22

Otros diagnósticos confirmados en campo

Distintos modos de falla, la misma lógica

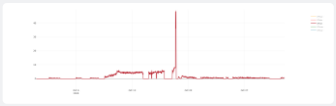


Acoplamiento de caucho

Indicador mecánico

El elastómero atenúa la vibración en el origen; la perturbación de par llega al motor.

Costo evitado **95 k€**

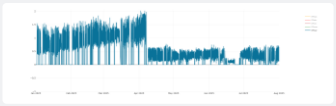


Arco en escobillas y anillos

Indicador de rotor

El daño avanza en la superficie de contacto eléctrico, oculto hasta que es severo.

Costo evitado **140 k€**



Correa floja y polea desgastada

Indicador de variación de carga

La perturbación nace en la transmisión y se atenúa antes de ser vibración clara.

Costo evitado **80 k€**

23

Resultados validados por Cimpor

Proyecto en 3 plantas

+500 k€
ahorrados en los primeros 12 meses

< 6 meses
de payback

3x
valor invertido recuperado en ~18 meses



Casos documentados: 95 k€ · 140 k€ · 80 k€ · 130 k€ de costo evitado por evento

24

Cómo se calcularon los resultados

Metodología económica

1 Línea base del costo de falla

Eventos previos: 10 – 300 k€ por falla

- Producción perdida (horas × costo/hora)
- Reparación y repuestos de urgencia
- Horas extra y daños secundarios

2 Costo evitado por evento

Costo evitado =
costo del escenario de falla – costo de la intervención planificada

Escenario de falla definido con el equipo de mantenimiento de Cimpor

3 Payback y retorno

Payback =
inversión total ÷ ahorro mensual promedio

Retorno acumulado =
Σ costos evitados ÷ inversión

Inversión: equipos + instalación + servicio

Cálculo y validación: Cimpor.

25

Ejemplo ilustrativo: cómo se llega a 130 k€

Desglose ilustrativo de la metodología · el total de 130 k€ fue validado por Cimpor

A · Falla sin detección		k€
Producción perdida	16 h × 5 k€/h	80
Daños secundarios	rodamientos y eje del reductor	35
Reparación urgente	repuestos exprés y montaje	15
Horas extra y externos	turnos extra, grúa	8
Costo del escenario de falla (A)		**138**
B · Intervención planificada		
Elemento elástico y montaje	en parada programada · 0 h perdidas	– 8
Costo evitado = A – B total validado por Cimpor		**130 k€**

Supuestos y criterio

- Escenario: rotura del acoplamiento con daño al reductor
- Se detiene el molino, no toda la planta: 5 k€/h
- Reparación de urgencia: 16 h hasta volver a operar
- Criterio conservador: solo costos directos, sin penalizaciones comerciales

26

Lo aprendido y lo que haríamos distinto

Lo que aprendimos

- Empezar por los activos y la criticidad, no por la tecnología
- El éxito depende más de la implementación que del algoritmo
- Una alerta sin proceso de respuesta es solo ruido
- Empezar por lo crítico y escalar después

Lo que haríamos diferente

- Mantenimiento en la matriz de criticidad desde el día 1
- Revisar la matriz antes de instalar, no después
- KPI y línea base de costos antes de arrancar
- Protocolo de respuesta a alertas antes de activar el monitoreo
- Formación para interpretar los diagnósticos ESA

27

Antes y después

ANTES		DESPUÉS
Fallos detectados solo después de la avería		Fallos detectados en una etapa temprana
Paradas frecuentes no programadas		Funcionamiento continuo y predecible
Intervenciones urgentes y desorganizadas	VS	Intervenciones planificadas con antelación
Sin visibilidad sobre el estado de los activos		Monitoreo en tiempo real las 24 horas, los 7 días de la semana
Decisiones basadas en supuestos empíricos		Decisiones basadas en datos reales
Programa de mantenimiento genérico		Mantenimiento basado en la condición real

28

Más allá del cemento

Transferible a cualquier planta con equipos trifásicos

Mismo método, otros contextos

Minería
Chancadores, molinos, correas

Agua y saneamiento
Bombas y sopladores

Celulosa y papel
Refinadores y ventiladores

Alimentos y bebidas
Compresores y mezcladores

Energía y química
Bombas y ventiladores de tiro

5 recomendaciones para cualquier planta

1. Evalúe la criticidad antes de elegir tecnología
2. Elija técnicas según los modos de falla que necesita cubrir
3. Cuantifique hoy el costo de una hora de parada
4. Defina quién responde a cada alerta y en qué plazo
5. Mida desde el día 1: paradas, costo correctivo y fallas evitadas

29

«El mantenimiento predictivo no comienza cuando instalamos tecnología.

Comienza cuando convertimos datos en decisiones.»

30


SESIÓN 25
ESCANEA EL CÓDIGO QR
RESPONDE UNA BREVE ENCUESTA
CONGRESO DE MANTENIMIENTO & CONFIABILIDAD CHILE
7ª EDICIÓN
¡GRACIAS!
Marco Ferreira · Director General, Enging Portugal
Grupo Dynamox · marco.ferreira@enging.pt · +351 911 733 155 · www.enging.pt

31