



# De los datos de vibración a la gestión del riesgo de activos críticos: Caso de estudio de excitación resonante de álabes de turbinas de vapor y su efecto sobre la fatiga de alto ciclo

Por: Juan Camilo Urango / Líder de Ingeniería  
Maria Alejandra Martínez / Gerente General

IDC Ingeniería de  
Confiability

De una excitación repetitiva a una decisión de  
gestión de riesgo en turbinas críticas de vapor.

22 | 23 | 24 ABRIL



28° CONGRESO INTERNACIONAL DE  
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS



EXPO  
MANTENER  
2026



# CONTEXTO DEL CASO

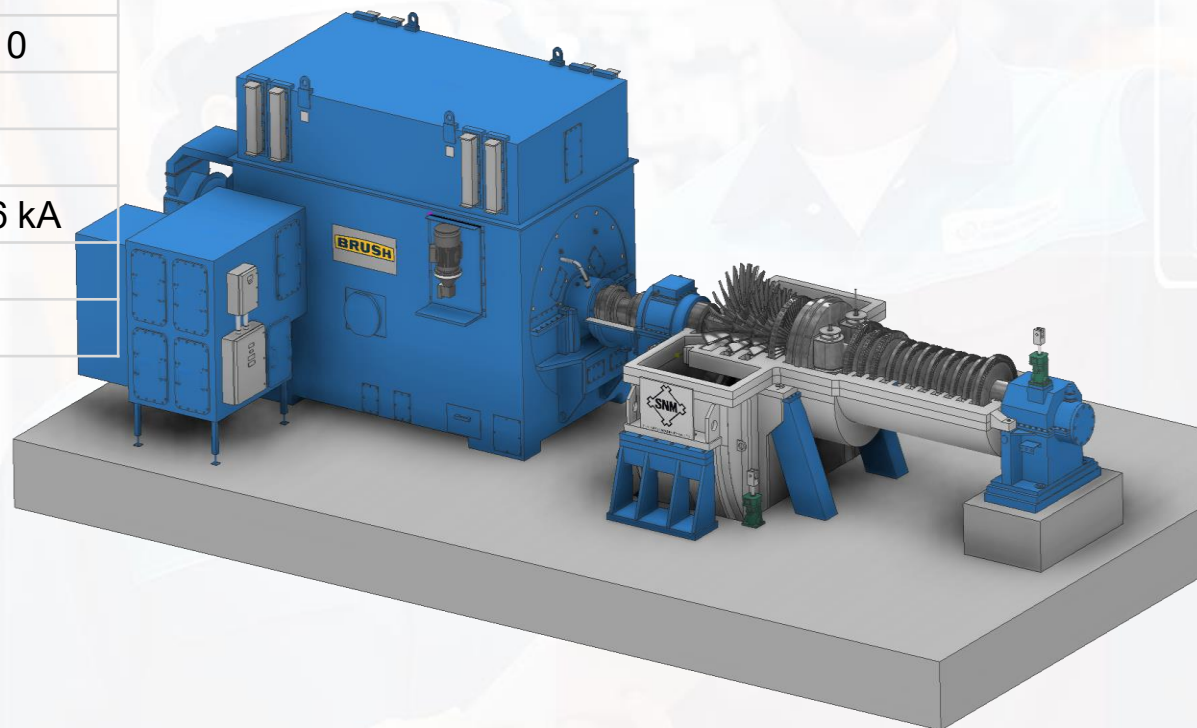
01 | Dos turbogeneradores - Un patrón repetitivo.

# CONTEXTO DEL CASO

## Dos turbogeneradores | Un patrón repetitivo.

### GENERATOR

<b>Manufacturer:</b> Brush
<b>Machine Number:</b> 924107.010
<b>Nominal rpm:</b> 3600
<b>Capacity:</b> 57500 kVA
<b>Volts/Amperes:</b> 13.8kV/2.406 kA
<b>Power factor:</b> 0.8
<b>Date:</b> 2014



Turbogeneradores de contrapresión (TG-1 y TG-2) |  
92 MW Total | Cogeneración industrial

### TURBINE

<b>Manufacturer:</b> Shin Nippon Machinery
<b>Model:</b> C10-R16-E
<b>Nominal rpm:</b> 3600
<b>Nominal Power output:</b> 46 MW
<b>Input Steam Pressure:</b> 1515 psia
<b>Input Steam Temperature:</b> 1000°F
<b>Date:</b> 2016

# No era un problema de vibración: Era un problema de integridad y disponibilidad

---

# 2

Turbogeneradores  
con eventos de falla

Eventos de desprendimiento  
de álabes en ambas unidades.

**~200 GWh+  
no generados.**

---

# 4

Eventos de pérdida  
de disponibilidad

4 periodos de indisponibilidad  
operativa – Todos por fallas en  
rueda número 12.

Un patrón que no se podía ignorar

**~10 años+  
de historial.**

---

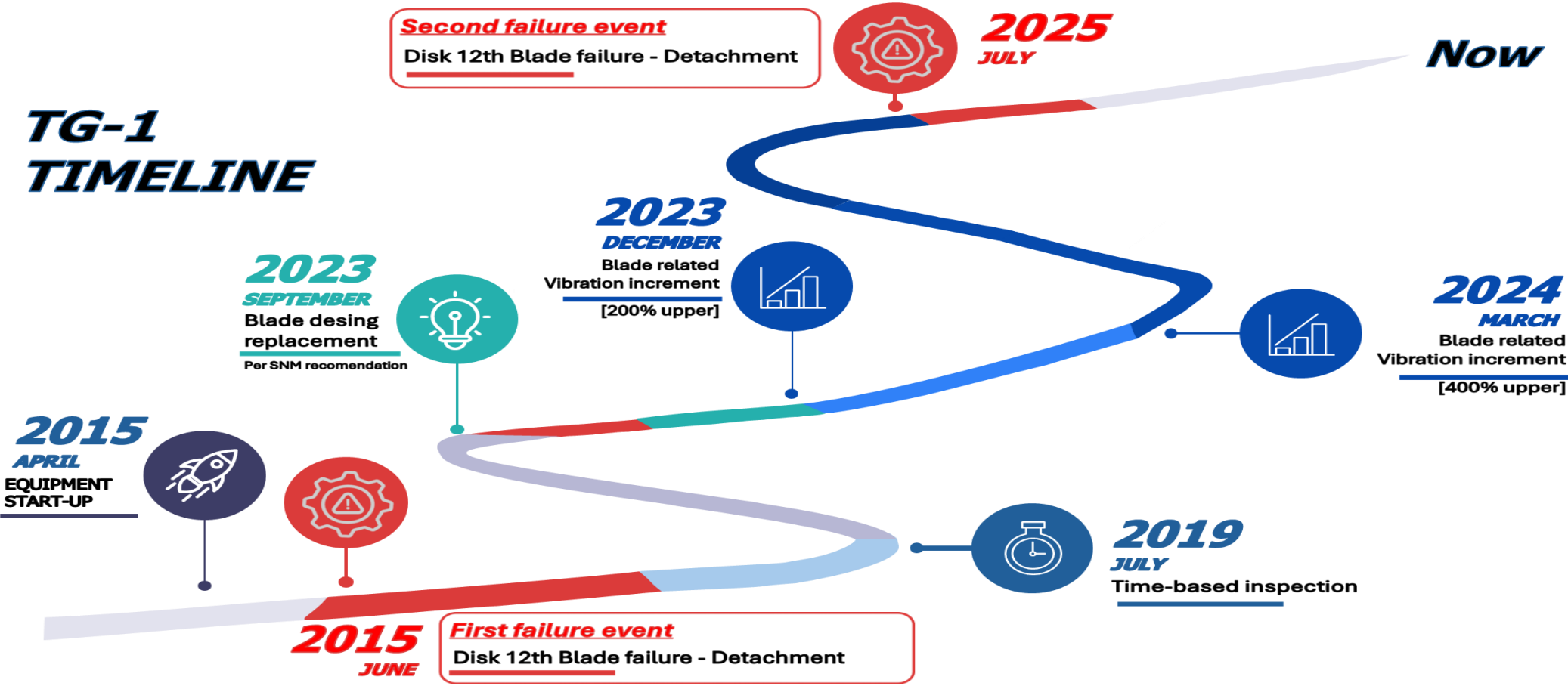
# HCF

Evidencia metalográfica  
compatible con Fatiga de alto ciclo

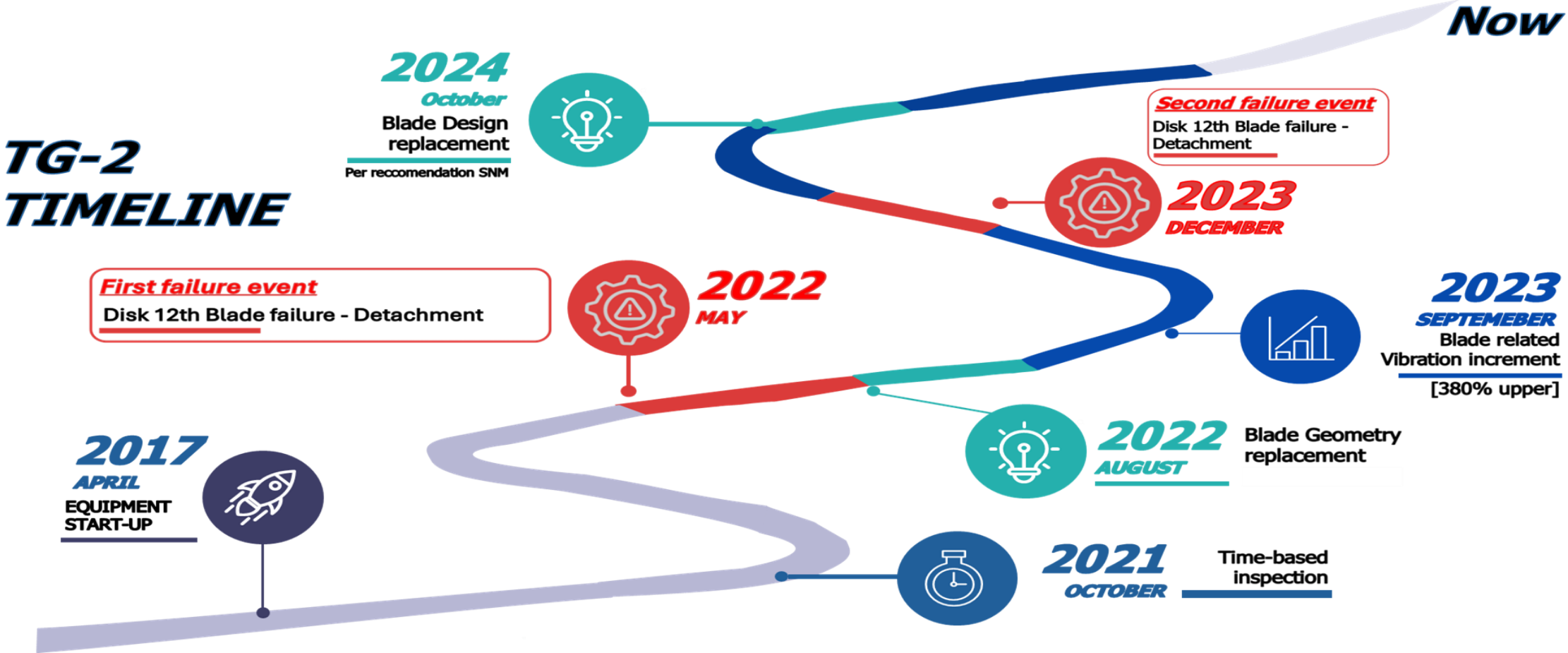
Marcas de fatiga presentes  
como mecanismo de falla.

# La evidencia se construyó durante años y en dos unidades diferentes

## TG-1 TIMELINE



# La evidencia se construyó durante años y en dos unidades diferentes



# El patrón común fue la aparición persistente de una excitación a 95X

El análisis vibratorio multicanal mostró de forma consistente una componente dominante alrededor de 95X, asociada a la BPF de la rueda Curtis.



**Monitoreo y análisis de Vibraciones Multicanal**



**Registro de Vibraciones relativas desde sistema de protección**



**Registro de vibraciones absolutas con acelerómetros sobre carcasa**

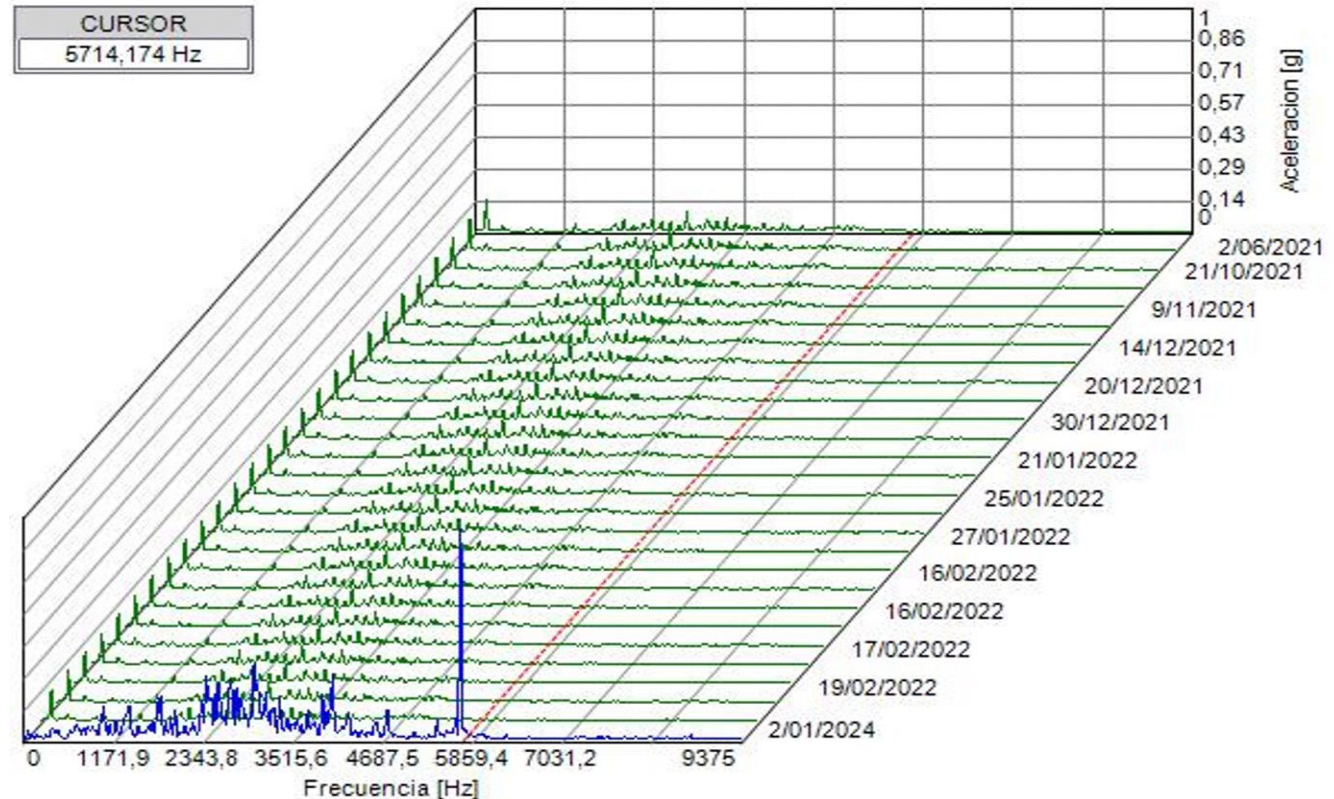
# El patrón común fue la aparición persistente de una excitación a 95X

El análisis vibratorio multicanal mostró de forma consistente una componente dominante alrededor de 95X, asociada a la BPF de la rueda Curtis.

## 95X

### Patrón repetitivo

La misma familia espectral apareció de manera recurrente en TG1 y TG2.



# El patrón común fue la aparición persistente de una excitación a 95X

El análisis vibratorio multicanal mostró de forma consistente una componente dominante alrededor de 95X, asociada a la BPF de la rueda Curtis.

## 95X

### Patrón repetitivo

La misma familia espectral apareció de manera recurrente en TG1 y TG2.

## ~5,700 Hz

### De excitación fundamental

La ubicación de 95X en torno a 5,700 Hz la conectó físicamente con la BPF de la rueda Curtis (95 álabes).

NÚMERO DE PRODUCTO		TRIN-7E-11707.	TIPO	C10-R16-ES	GIRO	CW	ELEMENTO ACCIONADO				generador de energía	RENDIMIENTO/RPM				46050 kW/3600 rpm	
Puntos clave Apartado n°.	unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P.C. φ	mm	1030	876	876	878	878	882	890	896	1042	1056	1080	1138	1174	1198	1283	1399
												1082		1176	1220	1315	1450
U/C0	-	0,3612	0,4431	0,4451	0,4381	0,4611	0,4440	0,5024	0,4905	0,4262	0,4215	0,4419	0,5156	0,5398	0,5183	0,5288	0,5328
ángulo de Salida	°	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28	13,5	14,5	15,5	20,0	22,5	28,0
superficie requerida	cm2	45,692	78,569	95,335	114,225	145,659	171,784	220,855	258,581	269,079	379,444	604,540	1048,190	1675,898	2498,996	4319,113	8195,793
Tipo de boquilla	-	OB37.	OB37I Especial	OB37I Especial	OB37I Especial	Aumento de OB37L	Aumento de OB37L	Aumento de OB37L	Aumento de OB37L	Aumento de OB37L	Aumento de OB37L	t=3 Junta	t=5 Junta	t=5 Junta	t=8 Junta	t=10 Junta	t=10 Junta
Gama de boquillas	-	0,2401	0,5647	0,6857	0,7512	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8940	1,0	1,0	1,0	1,0
Número de Piezas	-	21	42	51	56	74	74	76	76	88	90	80	68	80	80	80	80
tipo de perfil	-	HB-5061.	HB-2561.	HB-2561.	HB-2561.	HB-2561.	HB-2561.	HB-2561.	HB-2561.	HB-3061.	HB-3061.	HB-3561.	HB-5013.	HB-5023.	HB-5631X	HB-8031Y.	HB-123Z.
tipo de raíz del álabe	-	BR-509.	BR-2520.	BR-2520.	BR-2520.	BR-2520.	BR-2520.	BR-2520.	BR-2520.	BR-309.	BR-309.	BR-359.	BR-508.	BR-508.	BR-172.	BR-232.	BR-292.
Diámetro de la raíz del álabe	mm	1000	850	850	850	850	850	850	850	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Tipo de cuchilla		en una sola pieza	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	pasador intermedio	tipo C	tipo C	arco	arco	arco	-
Número de álabes		95	161	161	161	161	161	161	161	161	166	166	145	102	105	94	71

$$\text{BPF}_{\text{CURTIS}}[\text{cpm}] = \text{Vel}_{\text{nom}} \cdot n_{\text{alabes}} = 3600 \cdot 95$$

$$\rightarrow \text{BPF}_{\text{CURTIS}}[\text{cpm}] = 342\,000$$

$$\rightarrow \text{BPF}_{\text{CURTIS}}[\text{Hz}] = 5\,700$$

# El patrón común fue la aparición persistente de una excitación a 95X

El análisis vibratorio multicanal mostró de forma consistente una componente dominante alrededor de 95X, asociada a la BPF de la rueda Curtis.

## 95X

### Patrón repetitivo

La misma familia espectral apareció de manera recurrente en TG1 y TG2.

## ~5,700 Hz

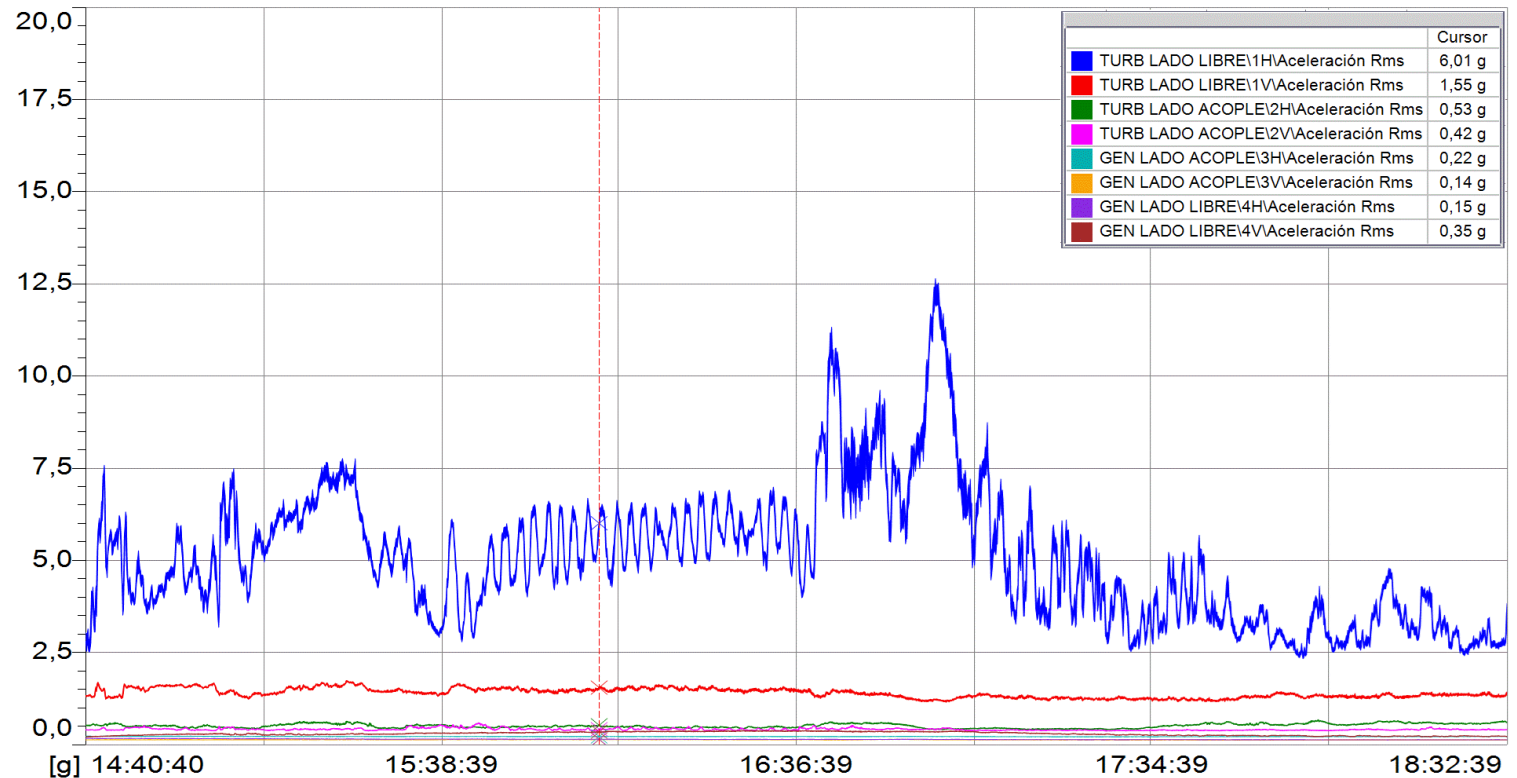
### De excitación fundamental

La ubicación de 95X en torno a 5,700 Hz la conectó físicamente con la BPF de la rueda Curtis (95 álabes).

## 12 g

### Severidad observada

En algunos escenarios la amplitud llegó a valores de 12 g RMS, reforzando que era anomalía mayor.





# Después de los cambios de álabes, la excitación BPF no desapareció

## Antes

El historial ya mostraba eventos repetidos en la etapa 12 compatibles con HCF y excitación forzada de alta frecuencia.

## Intervención

Hubo reemplazos y ajustes geométricos buscando cerrar la causa del daño en TG-1 y TG-2.

## Resultado

Pese a las intervenciones, la componente 95X continuó detectándose — confirmando que se debía a un mecanismo dinámico aún activo, y no a factor geométrico.

---

La hipótesis ya no buscaba explicar una vibración anómala, sino demostrar si la **95X BPF de la rueda Curtis**, cercana a **5,700 Hz**, entraba en zona de **excitación modal** y generaba **amplificación dinámica** y elevaba el riesgo de **fatiga de alto ciclo** en función de la condición operativa.

22 | 23 | 24 ABRIL



28° CONGRESO INTERNACIONAL DE  
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS



EXPO  
MANTENER  
2026



# HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

02 | Del patrón al mecanismo de daño

## HIPÓTESIS DE TRABAJO

*"La BPF de la rueda Curtis (95X ≈ 5.700 Hz) se acopla intermitentemente con un modo natural de flexión o torsión de la etapa 12, amplificando los esfuerzos alternantes y acelerando el daño acumulativo por Fatiga de Alto Ciclo (HCF).*

*El nivel de excitación — y el riesgo — está modulado por la condición operativa, lo que explica la variabilidad observada entre condensación y extracción."*

## CADENA CAUSAL



# El monitoreo de condición mostraba la excitación, pero no podía probar la resonancia

## ¿Qué exigía el caso para pasar a decisión?

Una validación modal con bump test y FRF para medir frecuencias naturales, proximidad resonante y capacidad de amplificación — traduciendo la señal vibratoria en riesgo gestionable.

**✓ LO QUE SÍ ENTREGA el monitoreo**

- ✓ Identificación de componente 95X en espectros de vibración
- ✓ Tendencia de amplitud vs. modo de operación (condensación / extracción)
- ✓ Correlación temporal con eventos de falla previos
- ✓ Caracterización de niveles globales de vibración (API 670)
- ✓ Alarmas por desplazamiento vibratorio en cojinetes

**✗ LO QUE FALTABA demostrar con bump test**

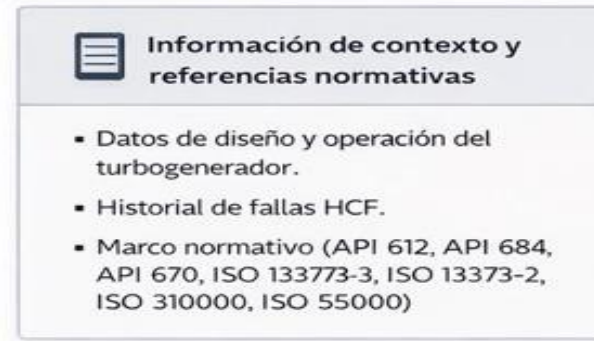
- ✗ Frecuencias naturales por etapa del rotor (fn específica)
- ✗ Factor de amortiguamiento modal ( $\zeta$ ) y factor de calidad Q
- ✗ Margen de resonancia cuantificado (proximidad fn vs BPF)
- ✗ Amplificación dinámica real (valor pico FRF)
- ✗ Evaluación de riesgo modal por etapa vs. historial de falla

Hacer la transición requirió caracterización modal experimental — el salto del dato operativo al criterio de riesgo.

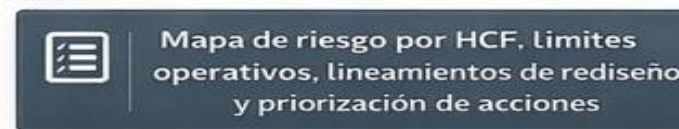
# METODOLOGÍA PROPUESTA

Esta propuesta metodológica es un esquema integrado de la metodología para capturar y transformar datos de vibración en criterios de riesgo por HCF en álabes de turbina.

### Entradas



### Salida



### Fase I – Diagnóstico rotodinámico y caracterización operativa



**Fase I.1** (Adquisición multicanal de vibraciones)



**Fase I.2** (Procesamiento y análisis de señales)



**Fase I.3** (Identificación de excitaciones críticas)

Hipótesis de excitación resonante BPF-modos de alabe y rango de frecuencias críticas

### Fase III - Integración de indicadores de riesgo por HCF y clasificación por etapa



**Fase III.1** (Cálculo de proximidad resonante)



**Fase III.2** (Estimación amplificación dinámica)

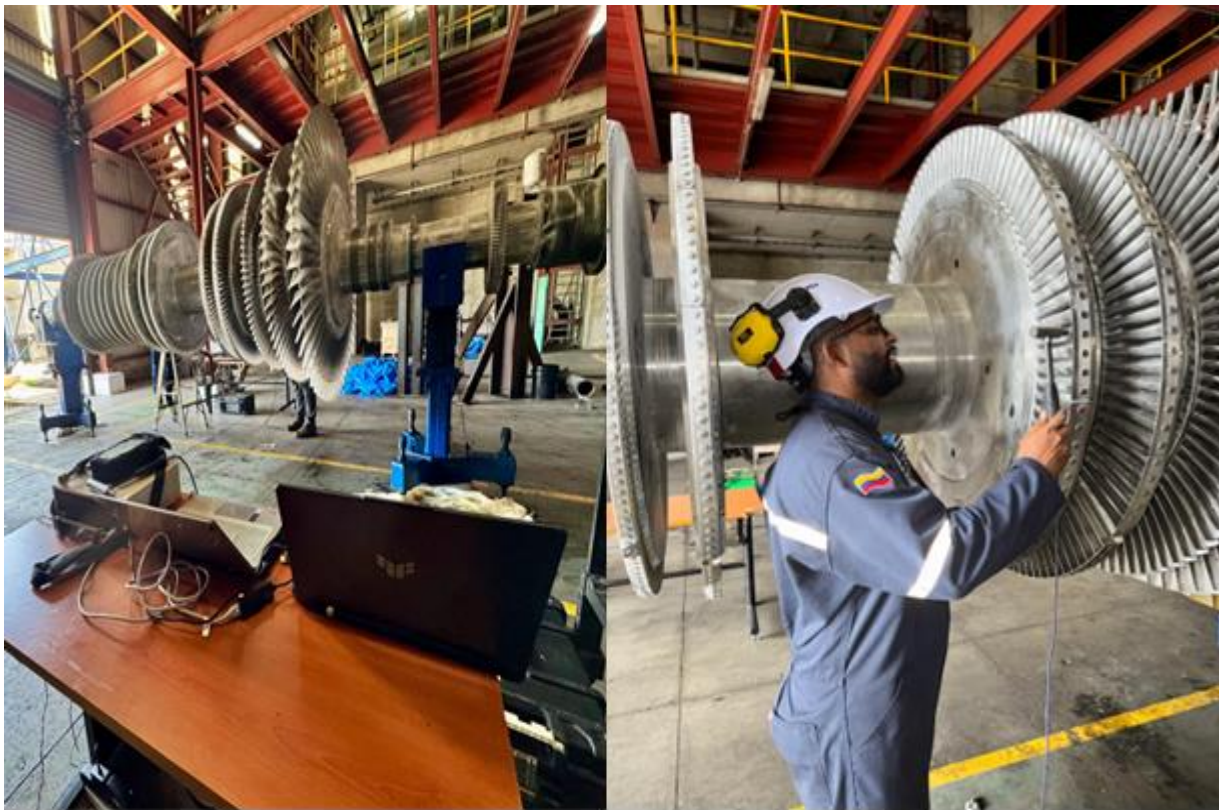


**Fase III.3** (Evaluación de criticidad y exposición)



**Fase III.4** (Mapa de riesgo por etapa)

# Se diseñó una campaña modal para pasar de la sospecha a la demostración



Campaña de ensayos de impacto — Rotor desmontado

**ISO 7626-5**

Norma de ensayo de impacto

**2 canales**

Martillo + acelerómetro uniaxial

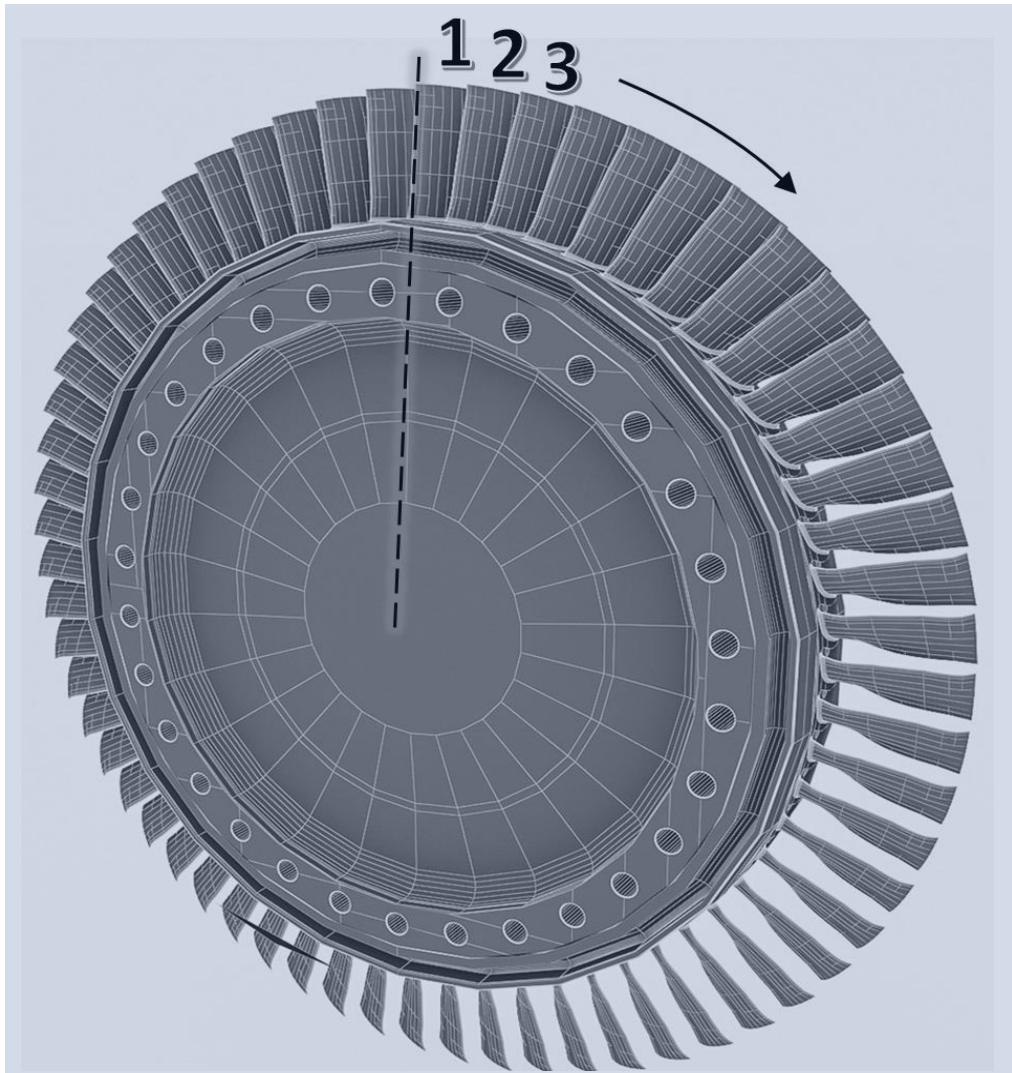
**16 etapas**

Cobertura completa del rotor

**52 horas**

Trabajo experimental acumulado

Esta campaña constituye el puente entre el diagnóstico operativo y la cuantificación del riesgo modal — una inversión de ingeniería que reemplaza la incertidumbre con datos.



# Diseño de la campaña modal

## Rotor nuevo vs. rotor en servicio

Benchmarking comparativo: Se tomaron datos de rotor nuevo (post-adquisición) contrastados con datos del rotor anterior.

## Malla de medición por etapa

Al menos 50% de los álabes por conjunto rueda-álabe, excitación en dirección flexional para cada posición.

## Parámetros de calidad

Coherencia de señal  $> 0.9$ , ventanas apropiadas para impacto, resolución espectral hasta 10 kHz.

## Salida por etapa

Frecuencias naturales ( $f_n$ ), ancho de banda (BW  $-3$  dB), amortiguamiento ( $\zeta$ ) y factor de calidad (Q) para cada modo dominante.

# No medimos solo picos: medimos frecuencias naturales, amortiguamiento y calidad modal

## Frecuencia natural (fn)

Identifica en qué frecuencia el sistema alabe-disco amplifica la excitación.

## Amplitud pico FRF |H(fn)|

Mide la capacidad de amplificación por unidad de fuerza en la resonancia.

## Ancho de banda (BW -3 dB)

Define el rango de frecuencias donde la respuesta es significativa.

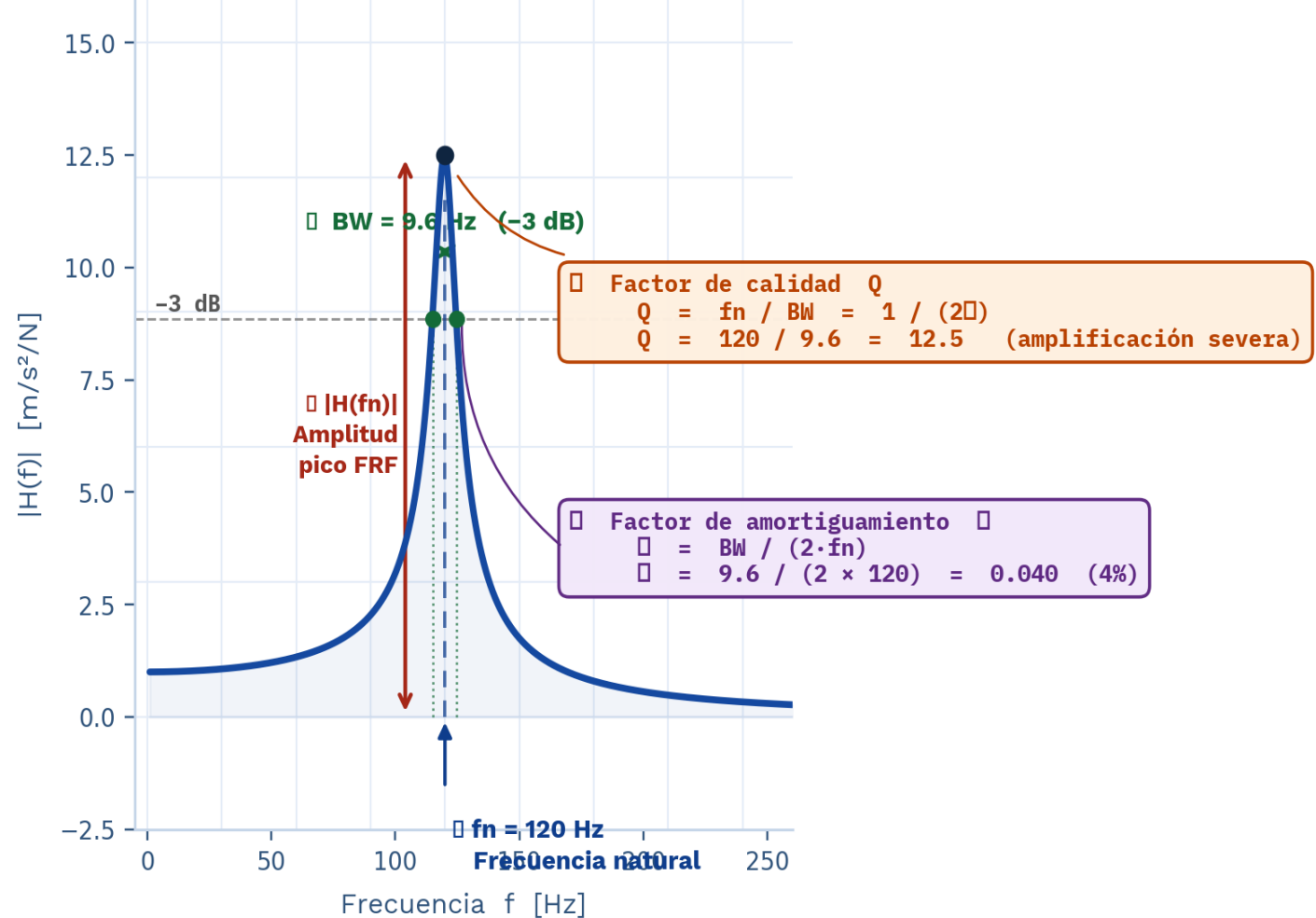
## Factor de amortiguamiento $\zeta$

Cuantifica qué tan rápido disipa energía el sistema; bajo  $\zeta$  = mayor riesgo.

## Factor de calidad Q

Inverso del amortiguamiento: Q alto indica amplificación severa.

Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) — Parámetros del análisis modal



22 | 23 | 24 ABRIL



28° CONGRESO INTERNACIONAL DE  
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS



EXPO  
MANTENER  
2026



# RESULTADOS Y DECISIONES

## 03 | Cuantificando el riesgo, habilitando la decisión

# La etapa 12 mostró un rango modal crítico exactamente donde importaba

## Frecuencias naturales identificadas – Etapa 12

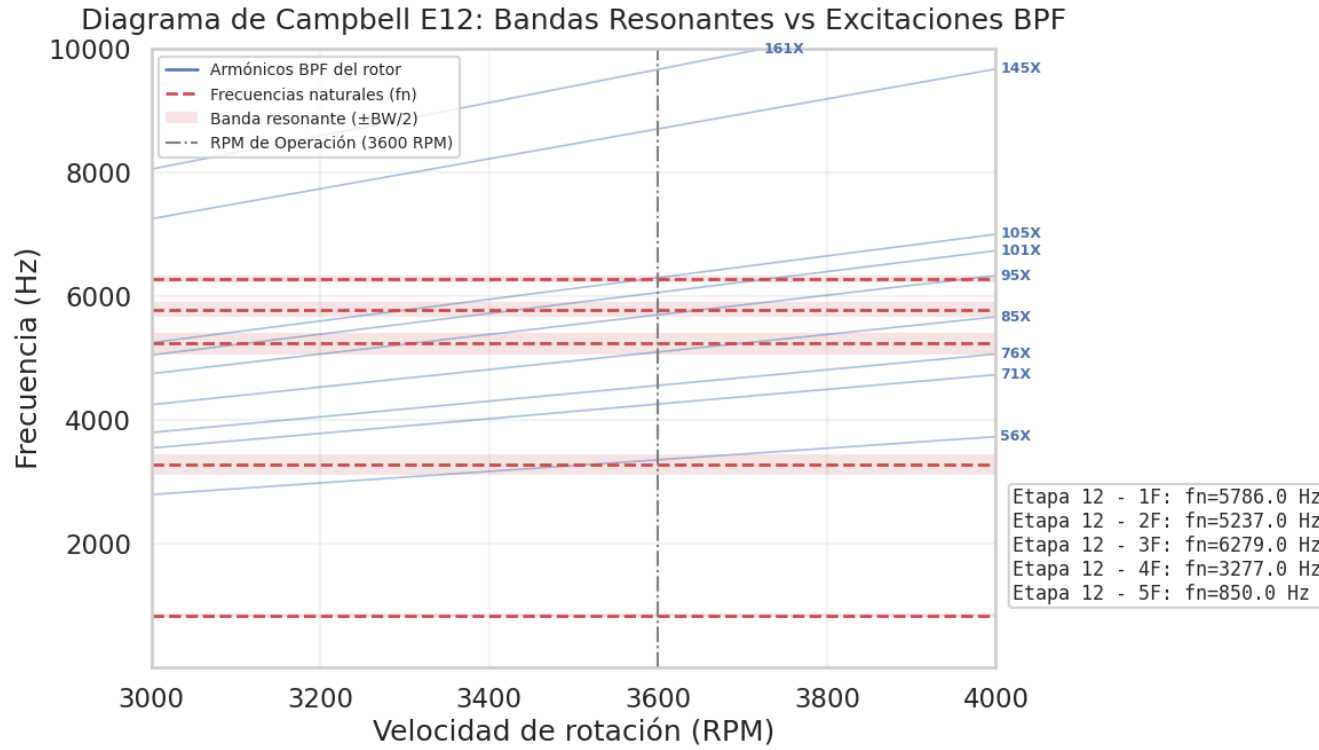
**5.237 Hz** **Modo 1**  
 $\Delta = 463 \text{ Hz desde BPF}$   
 (8.1% debajo de 5.700 Hz) **Cercano**

**5.786 Hz** **Modo 2 ★**  
 $\Delta = 86 \text{ Hz desde BPF}$   
 (1.5% sobre 5.700 Hz) **CRÍTICO**

**6.279 Hz** **Modo 3**  
 $\Delta = 579 \text{ Hz desde BPF}$   
 también dentro de 101X **Medio**

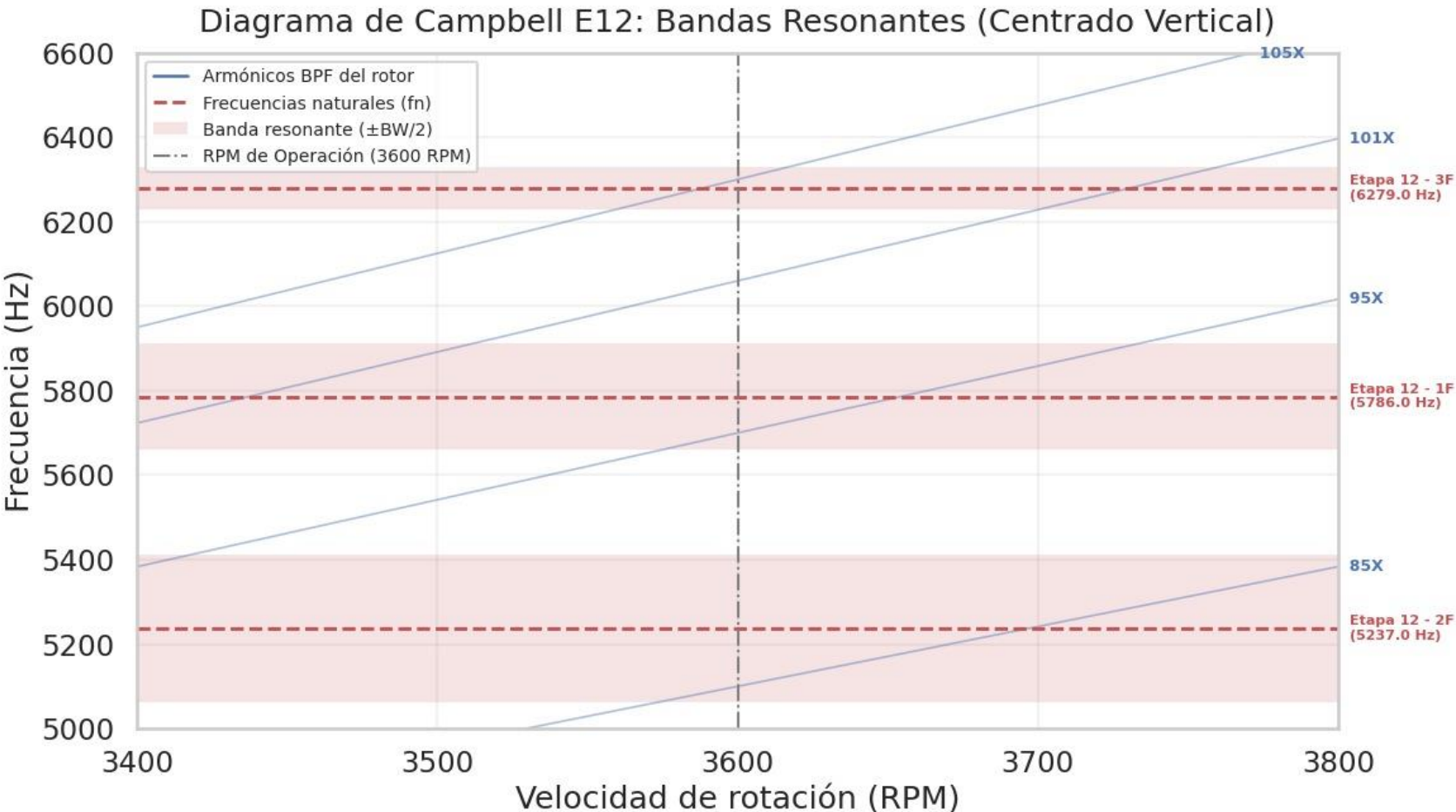
**Franja crítica identificada: 5.100 – 6.600 Hz**  
 Contiene: BPF Curtis 95X = 5.700 Hz y BPF Etapa 12 101X = 6.060 Hz

## Diagrama de Campbell – Etapa 12



# La etapa 12 mostró un rango modal crítico exactamente donde importaba

HALLAZGO  
TÉCNICO DECISIVO



Modo 1  
**5.237 Hz**

Modo 2 ★  
**5.786 Hz**

Modo 3  
**6.279 Hz**

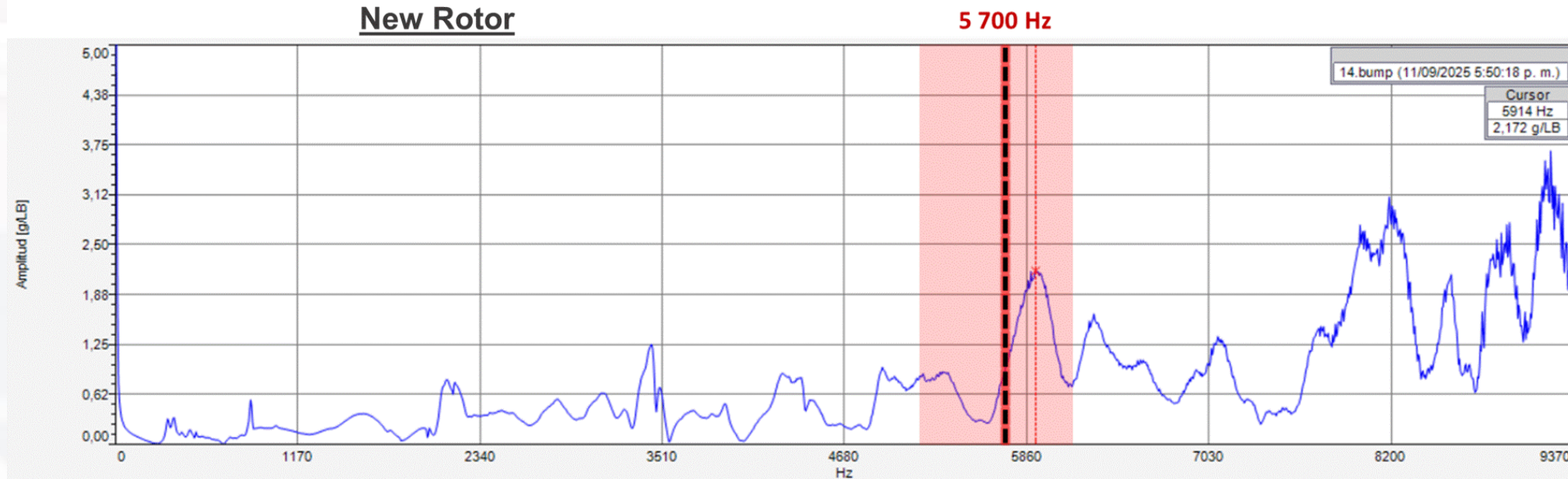
Frecuencias  
naturales  
identificadas  
— Etapa 12 —

Franja crítica identificada: 5.100 – 6.600 Hz  
Contiene: BPF Curtis 95X = 5.700 Hz y BPF  
Etapa 12 101X = 6.060 Hz

## Las FRF de etapa 12 mostraron presumible relación incremental con las horas de operación

EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Los ensayos de impacto sobre el rotor nuevo (TG-2) confirmaron experimentalmente la existencia de modos naturales en la franja crítica desde el diseño; y además que con H.O el FRF incrementa:



★ Ambos rotores presentaron modos naturales dentro de  $\pm 500$  Hz de la excitación  $95X = 5.700$  Hz — consistente con el mecanismo de acoplamiento resonante planteado en la hipótesis.

Excitation peak = 5 914 Hz  
Excitation range ( $\pm 10\%$ ) = (5 322 Hz, 6 504 Hz)

Max Amplification Factor = 2,172 g/Lb

# El siguiente paso fue traducir resonancia en riesgo de falla potencial

Marco de evaluación: ISO 31000 + ISO 55000

PROBABILIDAD DE FALLA HCF ( $\Sigma P$ )	
<b>P<sub>1</sub></b>	<b>Proximidad resonante</b> Índice adimensional: $ f_n - BPF  / (BW/2)$ Valores $\leq 1$ indican coincidencia resonante.
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>Amplificación dinámica</b> Valor máximo de FRF en banda modal. Relacionado con tensiones alternantes en álabe.
<b>P<sub>3</sub></b>	<b>Exposición operativa</b> Tiempo en condición donde BPF cae dentro de banda modal crítica.

CONSECUENCIA ( $\Sigma C$ )	
<b>C<sub>1</sub></b>	Potencia captada por etapa: Participación relativa en captación de energía del vapor.
<b>C<sub>2</sub></b>	Daño colateral potencial: Impacto sobre carcasa, diafragmas y etapas adyacentes.
<b>C<sub>3</sub></b>	Dificultad de intervención: Complejidad de acceso, tiempo de parada y reposición.

Mapa de riesgo: P × C

$$\text{Riesgo HCF} = \Sigma P \times \Sigma C$$

> 50

RIESGO ALTO

25 – 50

RIESGO MEDIO

0 – 25

RIESGO BAJO

Alineación normativa:

- ◆ API 612 / API 684 — márgenes dinámicos de diseño
- ◆ ISO 31000 / ISO 55000 — gestión de riesgo de activos
- ◆ ISO 13373-2 — análisis de vibraciones en máquinas

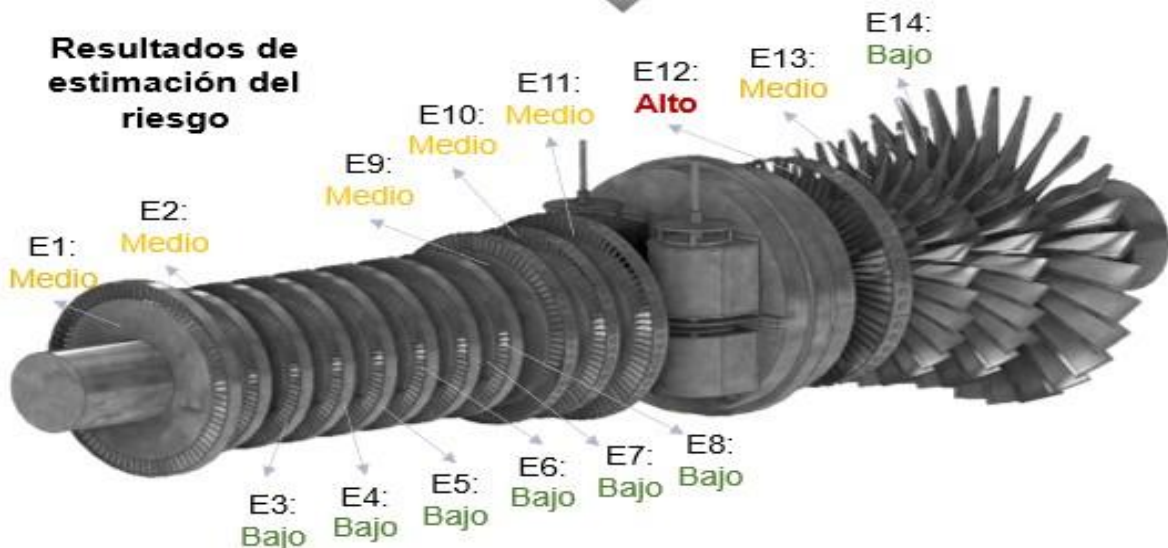
Matriz de evaluación del riesgo de HCF para cada etapa de turbina

Conjunto Rueda-Álabe:	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
Riesgo HCF (Px C):	30,6	25,4	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	27,9	27,3	29,7	61,1	29,0	23,8
Probabilidad (ΣP) [1-10]:	4,40	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,85	4,55	4,95	9,25	5,00	4,10
P1. Indicador de proximidad Resonante [0-5]	1,40	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	2,10	2,40	2,80	4,85	2,80	1,90
P2. Indicador de amplificación resonante [0-3]	2,80	2,80	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,20	1,80	1,80	2,50	1,80	1,80
P3. Indicador de horas de exposición [0-2]	0,20	0,40	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35	0,35	1,90	0,80	0,80
Consecuencia (ΣC) [1-10]:	6,95	6,20	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,60	5,80	5,80
C1. Indicador de potencia captada [0-5]	4,95	3,80	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	2,80	2,40	2,40	1,80	1,00	1,00
C2. Indicador de potencial de daño colateral [0-2,5]	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20	1,40	1,40	2,40	2,40	2,40
C3. Indicador de dificultad de intervención para puesta en marcha [0-2,5]	1,20	1,40	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	2,00	2,20	2,20	2,40	2,40	2,40

Escala de evaluación del Riesgo



Resultados de estimación del riesgo



RESULTADO CUANTITATIVO

El mapa de riesgo lo concentró donde la historia ya apuntaba

# RESULTADOS EVALUACIÓN DE RIESGO HCF

Resultados clave

E12 – RIESGO ALTO  
**61.1 / 100**

E1, E2, E9-E11, E13: MEDIO  
**25 – 31 / 100**

E3-E8, E14: BAJO  
**< 25 / 100**

E12 es el único álabe que históricamente ha fallado por HCF en ambas unidades.  
El modelo cuantificó lo que la máquina ya venía diciendo.



# El resultado no fue un diagnóstico más: Fue una base para tomas decisiones de Gestión de Activos

Decisiones de gestión de activos habilitadas por la metodología:

---

# 1

## **Definición informada de restricciones operativas**

La metodología permitió definir umbrales de velocidad y carga que mantengan la BPF fuera de la banda modal crítica. Límites respaldados por datos modales — No solo por experiencia o criterio experto.

---

# 2

## **Asignación focalizada de recursos de Inspección**

La metodología permitió priorizar recursos de inspección hacia las etapas con mayor índice de riesgo HCF. Etapa 12 y etapas iniciales como prioridad 1 dentro del plan de inspección con boroscópica.

---

# 3

## **Monitoreo de condición direccionado a HCF**

La metodología permitió configurar alarmas y alertas de monitoreo centradas hacia la componente 95X — no solo niveles globales. Se convirtió en indicador de proximidad resonante en monitoreo continuo.

---

# 4

## **Solicitud de rediseño con criterio de aceptación**

La metodología permitió estructurar los criterios de aceptación para la solicitud de rediseño del sistema álabes-rueda de la etapa 12 para el fabricante.

# La contribución no fue identificar 95X fue convertir la 95X en criterio de riesgo

*"El valor de este caso no está en haber visto una excitación de alta frecuencia. Está en haber conectado años de evidencia operativa, validación modal experimental y evaluación por criticidad para transformar una señal vibratoria en una decisión de gestión del riesgo del activo."*

◆ Evidencia operativa  
multicanal años TG8 + TG9

◆ Validación modal  
experimental ISO 7626-5

◆ Mapa de riesgo  
por etapa (ISO 31000)

# ¡Gracias!