

BROCHURE TÉCNICO

# Estudio de Amortiguación en Líneas AT/EAT

*Ingeniería de vibración basada en datos reales de terreno · Metodología CIGRÉ SC B2*

<b>H/w</b> Criterio de riesgo vibratorio	<b>EBP</b> Método de balance de energía	<b>CIGRÉ</b> Estándar SC B2 / WG B2.11
---	--	---



## 1. EL FENÓMENO FÍSICO: POR QUÉ VIBRAN LOS CONDUCTORES

Los conductores de líneas AT/EAT expuestos al viento generan desprendimiento alternado de vórtices en su superficie cilíndrica (efecto Kármán). Este fenómeno excita el conductor a frecuencias que siguen la relación de Strouhal:

### Frecuencia de Strouhal $\rightarrow f = S \cdot V / d$

Donde  $f$  es la frecuencia de vibración [Hz],  $S$  es el número de Strouhal ( $\approx 0,18-0,22$  para conductores),  $V$  es la velocidad del viento [m/s] y  $d$  es el diámetro del conductor [m]. En la práctica, esto se traduce en rangos de vibración de 5 a 150 Hz con vientos de 1 a 7 m/s.

Los esfuerzos alternantes resultantes se concentran en los puntos de restricción mecánica grapas de suspensión, amortiguadores y empalmes donde la curvatura dinámica del conductor es máxima. Cuando la amplitud de vibración supera el umbral de fatiga del material, se inicia la nucleación de fisuras en las hebras externas.

#### Indicador H/w: la primera señal de alerta

El cociente  $H/w$  (tensión horizontal / peso unitario del conductor) es el parámetro de campo más directo para anticipar riesgo vibratorio. Un valor  $H/w > 1.000$  m en conductores ACSR con vanos  $> 300$  m implica alta susceptibilidad a vibración eólica sostenida y requiere estudio específico. No basta con tablas de catálogo.

### Tipos de Vibración en Conductores. No Todos se Tratan Igual

Confundir estos fenómenos o tratarlos con la misma solución es uno de los errores más frecuentes y costosos en la gestión de activos de transmisión.

Tipo	Frecuencia	Causa principal	Solución
Vibración eólica	5 – 150 Hz	Desprendimiento de vórtices (Strouhal)	Amortiguadores Stockbridge / espirales
Galope	< 1 Hz	Inestabilidad aerodinámica con hielo o aguanieve	Interphase spacers / detuning
Vibración de subvano	1 – 10 Hz	Estela aerodinámica entre subconductores (haz)	Separadores-amortiguadores de subvano

## 2. EL PROBLEMA REAL EN TERRENO

La norma establece que el sistema de amortiguamiento debe diseñarse para el conductor específico, el vano real y las condiciones de viento del sitio. En la práctica, sin embargo, la mayoría de los sistemas instalados en Chile y Latinoamérica fueron definidos con uno o más de estos criterios incorrectos:

Errores de diseño frecuentes	Consecuencias observadas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Uso de velocidad de viento de referencia de mapa (<math>V_{10}</math> normativo) sin corrección por rugosidad del terreno, topografía de canalización o efecto de borde de cerro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Corte de hebras a 1–3 años post-construcción en vanos expuestos.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Posicionamiento del amortiguador sin verificar la longitud de onda del modo fundamental del vano. Un amortiguador ubicado en un nodo de vibración tiene eficiencia cercana a cero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Daño acumulado invisible: la fatiga del conductor es un proceso silencioso que solo se detecta cuando ya hay hebras visibles cortadas o la falla es inminente.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Selección de amortiguador Stockbridge por catálogo sin curva de potencia disipada (P-f) validada para el conductor específico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Amortiguadores reemplazados 2 o 3 veces en la misma estructura sin resolver el problema de fondo.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ausencia de verificación por método EBP (Energy Balance Principle), único método reconocido por CIGRÉ para confirmar que la energía disipada supera la energía inyectada por el viento en todo el rango de frecuencias críticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Indisponibilidad no programada de líneas críticas del SEN, con impacto en la operación del sistema eléctrico nacional.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Costos de mantenimiento correctivo entre 5x y 15x superiores al costo de un estudio preventivo bien realizado.</li> </ul>

### 3. METODOLOGÍA RAYENCO

Aplicamos la metodología CIGRÉ SC B2 / WG B2.11 con datos instrumentales propios del sitio, no con suposiciones de escritorio.

#### Fase 1. Caracterización del Régimen de Viento en Sitio

La distribución de velocidades de viento en el eje del conductor es el insumo irremplazable del diseño. No existe una tabla que lo sustituya.

- ▶ Instalación de estaciones autónomas de monitoreo en las estructuras de mayor riesgo (criterio H/w + historial de daño + inspección visual).
- ▶ Registro continuo de velocidad escalar de viento V [m/s], dirección  $\theta$  [°], temperatura T [°C] y, cuando aplica, aceleración del conductor mediante acelerómetros triaxiales.
- ▶ Período mínimo de registro: 30 días continuos en período de mayor actividad eólica del vano/tramo particular.
- ▶ Procesamiento estadístico: Rosa de vientos, identificación de ventanas de excitación resonante por tramo.

#### Fase 2. Cálculo de Vibración del Conductor

- ▶ Determinación de la frecuencia natural de cada modo de vibración del vano:  $f_n = (n/2L) \cdot \sqrt{(H/m)}$ , donde L es la longitud del vano, H la tensión horizontal y m la masa por unidad de longitud.
- ▶ Construcción del espectro de frecuencias de excitación para las velocidades de viento medidas en sitio (relación de Strouhal).
- ▶ Identificación de los modos resonantes: frecuencias donde el espectro de excitación se solapa con los modos naturales del vano.
- ▶ Cálculo de la amplitud de vibración en la grapa de suspensión (Yb/d) y verificación respecto al límite de la curva de fatiga (norma IEEE 1283 / CIGRÉ B2.25.06).

#### Fase 3. Diseño del Sistema de Amortiguamiento (Método EBP)

El Método de Balance de Energía (EBP) es el único enfoque que garantiza que el amortiguador seleccionado efectivamente controla la vibración:

- ▶ Curva de potencia del viento  $P_w(f)$ : energía por unidad de tiempo inyectada al conductor por el viento en cada frecuencia, función del régimen medido en sitio.
- ▶ Curva de disipación del conductor  $P_c(f)$ : capacidad de amortiguamiento intrínseco del conductor (histéresis de la trenza metálica), obtenida de ensayos normalizados.
- ▶ Curva de disipación del amortiguador  $P_d(f)$ : potencia disipada por el amortiguador seleccionado, obtenida de catálogo del fabricante con datos de ensayo según IEC 61897.
- ▶ Condición de diseño:  $P_c(f) + P_d(f) \geq P_w(f)$  para todo f en el rango de excitación. Si no se cumple, se ajusta tipo, masa o posición del amortiguador.
- ▶ Verificación de posicionamiento: el amortiguador se ubica a 70–80% de la longitud de onda del modo dominante (antinode placement), maximizando la amplitud relativa en el punto de fijación.

### 4. ENTREGABLES DEL ESTUDIO

El estudio entrega un conjunto de documentos técnicos de ingeniería, listos para implementar sin interpretación adicional por parte del operador:

#	Entregable	Contenido y valor técnico
1	<b>Informe de caracterización eólica</b>	Distribución de velocidades, rosa de vientos y ventanas de excitación resonante por tramo. Base del diseño, reproducible y auditable.
2	<b>Mapa de riesgo vibratorio</b>	Clasificación por tramo/vano según criterio H/w, historial de daño e índice de severidad CIGRÉ. Priorización objetiva de intervenciones.
3	<b>Análisis modal del conductor</b>	Frecuencias naturales de vibración, espectro de excitación y amplitud Yb/d por modo resonante. Identificación de modos críticos por vano.
4	<b>Verificación EBP por vano</b>	Curvas $P_w(f)$ , $P_c(f)$ y $P_d(f)$ superpuestas. Comprobación gráfica y numérica del balance energético para el amortiguador seleccionado.
5	<b>Especificación técnica del sistema</b>	Tipo y modelo de amortiguador, masa de las pesas terminales, cantidad por vano y por subconductor (si aplica), con justificación técnica documentada.
6	<b>Plano de posicionamiento</b>	Distancia exacta de instalación desde la grapa (en mm), con criterio de antinode placement verificado para el modo dominante de cada vano.
7	<b>Protocolo de instalación y recepción</b>	Criterios de torque, orientación y aceptación en terreno. Lista de verificación para cuadrilla y supervisor de obra. Apto para auditoría regulatoria.

## 5. QUE NOS HACE ESPECIALISTAS

Diferenciadores técnicos	Contexto chileno
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Diseño basado en datos instrumentales reales del sitio, no en tablas genéricas ni velocidades de referencia normativas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Conocimiento de los corredores críticos del SEN: zona costera de la Región del Biobío, pasos andinos y norte de Chile, donde las condiciones eólicas no admiten metodología estándar aplicada directamente.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Aplicación íntegra del método EBP conforme a CIGRÉ WG B2.11, con entrega de curvas de balance energético por vano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Experiencia con conductores del parque chileno: ACSR (Hawk, Drake, Cardinal), AAAC y conductores de alta temperatura (HTLS).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Verificación de posicionamiento por antinode placement, garantizando eficiencia máxima del amortiguador instalado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Familiaridad con las exigencias de la CNE, la SEC y los contratos de transmisión bajo la Ley 20.936.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Diferenciación explícita entre vibración eólica, galope y vibración de subvano: cada fenómeno recibe la solución que le corresponde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Adaptación de metodologías CIGRÉ a las condiciones específicas del territorio chileno: topografía de canalización, régimen térmico del desierto y vientos de borde costero.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Entregables de ingeniería listos para implementar, licitación de suministro o auditoría regulatoria CNE/SEC.</li> </ul>	

**«Cuando necesitas certeza técnica»**



**+56 9 6355 1190**  
Teléfono / WhatsApp

**contacto@rayencoconsultores.cl**  
Correo electrónico

**www.rayencoconsultores.cl**  
Sitio web