

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**MECANISMOS PARA REDUCIR Y CONTROLAR EL
EFECTO GALLOPING EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JAN POL LASLO ALTAMIRANO DURAND

**PROMOCIÓN
2010 - I**

LIMA-PERÚ

2013

MECANISMOS PARA REDUCIR Y CONTROLAR EL EFECTO GALLOPING EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

DEDICATORIA

Mis agradecimientos van dirigidos principalmente a mis padres, Juana y Nolberto, que siempre me motivaron y apoyaron en la realización de esta tesis. Muchas gracias por el empuje y sobre todo en la paciencia que han tenido todo este tiempo. Un agradecimiento especial a mi madre que siempre estuvo conmigo apoyándome en todo incluso pagando mis estudios de la Universidad y ahora con esta obtención de mi título vera los frutos de mi esfuerzo.

Estoy totalmente agradecido con el Ing. Moisés Ariste Flores por su asesoría, y la confianza depositada en mí. Y de manera conjunta agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, y a todo el grupo humano que lo conforma, por haber contribuido en mi formación profesional.

SUMARIO

Este documento es el resultado de un estudio de investigación sobre mecanismos para controlar el efecto galloping en Líneas Transmisión. De los varios dispositivos antigalloping que han sido desarrollados a nivel mundial se mencionaran los más representativos y los que más eficiencia tuvieron al controlar el galloping durante su montaje, además se eligió a los separadores entre fases como dispositivo a controlar el galloping para poder instalar en el proyecto Línea 220 kV Chaglla - Paragsha.

Se hace una explicación detallada del procedimiento de cómo se originó el efecto galloping, y que consecuencias trae consigo el no poder controlar tal efecto, además mostrar las aplicaciones en líneas existentes de estos dispositivos antigalloping. Cada dispositivo será explicado de manera detallada, además mostrando resultados muy favorables. Además se utilizó el programa PLS-CADD, versión 9.23, para saber en qué vanos del proyecto Línea 220 kV Chaglla – Paragsha, va a ocurrir galloping, con intención de agilizar los cálculos.

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION	2
1.1 Problemática	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Alcance	3
1.4 Limitaciones	3
1.5 Estructura del presente informe	3
CAPITULO II	
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Introducción	4
2.2 Definición de Galloping	
2.3 Tipos de movimientos	6
2.4 Causas del Galloping: Las Fuerzas de acción	6
2.4.1 Fuerza de Arrastre	6
2.4.2 Fuerza de Elevación y el momento de cabeceo	8
2.5 Mecanismos del Galloping	11
2.5.1 Caso 1: Sin Torsión (infinitamente rígido)	13
2.5.2 Caso 2: Se produce Torsión	13
2.6 Tipos de Movimientos	14
2.7 Ecuación de Galloping	14
2.8 Estimación de las condiciones inestables	16
2.9 Factores que influyen en galloping	16
2.10 Daños que produce el galloping	17
2.11 Pruebas realizadas y descripción con formas de hielo artificial	18
2.12 Pruebas en túnel de viento	20
2.13 Galloping en un túnel de viento	21
2.14 Diseño de elipse de galloping	23
2.14.1 Parámetro de vano del conductor	23
2.14.2 El caso de líneas de un solo conductor	24

2.14.3 El caso de líneas de haz de conductores	24
2.15 Métodos de Protección sin dispositivos antigaloping	25
2.16 Métodos de Protección con dispositivos antigaloping	25
2.16.1 Separadores entre fases	25
2.16.2 Dispositivos de control aerodinámicos	29
2.16.3 Dispositivos de control de torsión	32
CAPITULO III	
DESCRIPCION DEL PROBLEMA	39
3.1 Daños y Consecuencias	39
3.2 Costos de Galloping	39
3.2.1 Costos relacionados con eventos galopantes	40
3.2.2 Los impactos sociales de las interrupciones debidas al galloping	41
CAPITULO IV	
APLICACIÓN DE SEPARADORES PARA CONTROLAR EL EFECTO GALLOPING PARA EL PROYECTO LINEA DE TRANSMISIÓN 220 kV CHAGLLA-PARAGSHA	43
4.1 Objetivo	43
4.2 Características Generales de la Línea de Transmisión	43
4.3 Hipótesis de Carga del Conductor	44
4.4 Características del conductor	46
4.5 Aislamiento	46
4.6 Siluetas de las Torres de Celosía para el Proyecto Línea de Transmisión 220kV Chaglla – Paragsha.	46
4.7 Reporte de vanos galopantes en la Línea 220 kV Chaglla – Paragsha.	49
4.8 Disposición de los separadores en los vanos galopantes de la Línea 220 kV Chaglla – Paragsha.	50
CAPITULO V	
ANALISIS DE RESULTADOS	51
5.1 Objetivo	51
5.2 Introducción	51
5.3 Modelamiento del Sistema a considerar	51
5.4 Resultados de la simulación	53
5.5 Análisis Económico del uso de separadores de entre fases vs el aumento de distancia entre las fases.	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
ANEXOS	59
BIBLIOGRAFÍA	62

PRÓLOGO

El propósito del presente informe es el dar a conocer la problemática de la continuidad de servicio de una línea de transmisión, uno de los principales efectos que causa que una línea salga fuera de servicio por accionamiento de los sistemas de protección es el efecto Galloping, ya que desde hace varios años es un tema que hasta ahora no se ha solucionado confiablemente pero gracias a países como Japón y Canadá, donde se invierte para el estudio de controlar este fenómeno producido en líneas existentes por condiciones climáticas específicas (combinación de viento y hielo), para que se produzca el efecto galloping. Los avances de estos estudios traen consigo la aplicación de dispositivos antigalloping. En el Perú, la demanda eléctrica viene teniendo un crecimiento mayor a la oferta, lo cual los concesionarios de la línea de transmisión deben garantizar el servicio continuo de la potencia transmitida por la línea hacia sus destinos finales (empresas distribuidoras, cargas industriales, mineras, etc.)

El presente informe detallará los dispositivos antigalloping fabricados y que han tenido gran aceptación a nivel mundial instalados en líneas existentes donde se produce galloping y tendrá como objetivo, cuales son los parámetros a considerar para controlar el galloping.

Con el fin de aplicar estos dispositivos, en la línea a proyectar de 220 kV Chaglla – Paragsha, donde se mostrará unos registros de los vanos que estarán expuestos al galloping dados por el software PLS-CADD, y se elegirá al separador entre fases como medida de solución de estos vanos galopantes.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

Actualmente el Perú se encuentra en un proceso de crecimiento muy acelerado a nivel económico, esto debido al crecimiento sostenido que viene experimentado la economía nacional, una de las causas es el boom por la minería que ha generado un mayor consumo de energía trayendo consigo el aumento de la demanda de carga , lo que conlleva a transmitir más energía, ya sea a través del tendido y montaje de nuevas líneas de transmisión o repotenciar las ya líneas existente, y así poder cubrir la demanda; para el funcionamiento normal de las líneas deben tener un buen sistema de protección y mantenimiento así evitar cualquier salida de servicio en la línea, las fallas más comunes en líneas de transmisión son las sobretensiones, la cual hoy en día con un adecuado sistema de protección como son los cables de guarda y puesta a tierra, pueden solucionar dicho problema, pero hay otro problema en las líneas que ocurre en épocas de invierno que en hace que la línea salga fuera de servicio debido al accionamiento del sistema de protección por fallas bifásicas, y es una problemática en países donde hay condiciones climáticas extremas donde trabaja la línea, este fenómeno se llama el efecto Galloping.

El galloping de hielo ha sido un problema de diseño y funcionamientos para las empresas eléctricas desde el año 1900. A través de los años ha sido objeto de numerosas investigaciones y programas de investigación, resultando una mejora en la comprensión de los mecanismos del galloping y en el desarrollo de dispositivos y procedimientos para controlar sus efectos.

El progreso, tanto analítico en el problema y en el desarrollo de contramedidas, ha sido lento, desde la publicación de análisis de Den Hartog, quedan preguntas importantes en cuanto a las variables y mecanismos utilizadas y la validación de las teorías de galloping no es satisfactoria. Ningún método de protección que se ha desarrollado se reconoce como totalmente fiable.

El propósito del presente informe es describir los avances para controlar el efecto galloping, así poder dar confiabilidad a la continuidad de servicio de la línea de transmisión. Los avances durante estos años han llevado a la construcción de dispositivos antigalloping y hacer más fiable la operación de las líneas y evitar cualquier salida de la línea por fallas

bifásicas. Varios análisis de una gran base de datos de observaciones al galloping han producido guías adecuadas a amplitudes máximas esperadas, y un estudio sistemático de películas de eventos de galloping, han proporcionado una mejor definición de las formas de las órbitas del galloping. El avance de software ha permitido investigar el impacto de las complejidades de este efecto, por ejemplo a través de simulaciones y mostradas en la pantalla de un ordenador.

1.2 Objetivo

El objetivo es dar solución a fallas por el efecto galloping en líneas de transmisión como son las fallas bifásicas, y proponer alternativas de solución mediante la instalación de dispositivos o accesorios en las líneas, que amortiguan las oscilaciones ya sea disipando la energía mecánica producto de la oscilación o cambiando la frecuencia de oscilación.

1.3 Alcance

En el presente trabajo primero se realizará un estudio de cómo se produce el galloping en líneas de transmisión, los nuevos dispositivos diseñados en base a estos estudios con pruebas en campo, obteniendo resultados cada vez más confiable para controlar el galloping, reduciendo considerablemente las pérdidas por falla bifásicas en la línea. Luego se mostraran aplicaciones de estos nuevos dispositivos en líneas existentes obteniéndose cada vez mejores resultados para la continuidad del servicio de la línea.

Además se incluirá solución de la problemática del efecto galloping en la Línea de Transmisión 220 kV Chaglla – Paragsha, a través de la aplicación de separadores entre fases.

1.4 Limitaciones

La aplicación de dispositivos antigalloping todavía no es 100% confiable debido al recubrimiento asimétrico que tiene el hielo sobre el conductor, y la base de su diseño es a través de los registros en campo de líneas de prueba, pero gracias al desarrollo de herramientas de simulación se pueden evaluar mejor las eficiencias de estos dispositivos y así poder encontrar el dispositivo anti-galloping más eficiente para su aplicación en la línea.

1.5 Estructura del presente informe

En el desarrollo del presente informe se ha considerado en el Capítulo I La introducción, Capítulo II Marco teórico, Capítulo III Descripción del problema, Capítulo IV Aplicación de separadores para controlar el efecto galloping para el proyecto de línea de transmisión 220 kV Chaglla-Paragsha, Capítulo V Análisis de resultados y finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El galloping en los conductores ha sido un problema en el diseño y funcionamiento desde principios de 1900. Las primeras apariciones de galloping no se pueden determinar con precisión, ya que una conexión entre los observados a baja frecuencia y alta amplitud de movimientos y los efectos aerodinámicos de depósitos de hielo en conductores no fue reconocido hasta finales de 1920 y no logró credibilidad general hasta 1932, cuando Den Hartog presentó su análisis clásico de mecanismos implicados.

El progreso de controlar el efecto Galloping es el resultado de varias cosas:

- Los datos cuantitativos se obtuvieron durante la larga campaña de observaciones, muchos sitios de ensayo y algunas pruebas de vano a escala real de resultados obtenidos (con hielo natural o artificial), sobre todo en Japón y Canadá.
- Cooperación internacional entre CIGRE y IEEE a través intercambios de datos, han mejorado en el diseño de dispositivos antigalloping.
- Análisis de pruebas dinámicas a través de una cámara de prueba denominado túnel de viento.
- Observaciones reales en la línea con las pruebas de hielo artificial.

El análisis analítico y numérico tiene que considerar una sección completa del tramo (desde torre de anclaje a torre anclaje), dentro del cual muchos movimientos de vibración pueden ocurrir, como el acoplamiento entre vanos debido al movimiento del aislador de suspensión. Las variaciones de tensión durante el galloping (que es una carga de diseño para ambas torres terminales y suspensión) se han investigado profundamente y la comparación entre el modelo y las observaciones están bastante de acuerdo, tanto en las amplitudes y contenido de frecuencia.

Un problema importante está relacionado con el carácter variado de los depósitos de hielo en un vano de línea. Aún quedan preguntas, con respecto a qué tan bien representan estas secciones de hielo artificial con la de hielo natural.

Además, algunos estudios importantes se han realizado para evaluar los procesos de acumulación de hielo en los conductores sobre la esperanza verdadera, teniendo en

cuenta la rigidez torsional del conductor, así como la acción velocidad del viento.

No existe un acuerdo general en cuanto a si un método es totalmente fiable y pueden ser utilizados para controlar eventualmente el Galloping. Es muy difícil evaluar la eficacia de estas contramedidas en base de la probabilidad de numerosos casos que deben ser obtenidos. Hoy en día se puede evaluar las eficiencias de los dispositivos de antigalloping por herramientas de simulación.

Fabricantes de conductores también trató de implementar algunos cambios para disminuir el riesgo al galloping, cambiando la forma de sección transversal del conductor, cambiando las formas de los hilos (alambres), cambio en las características del conductor (resistencia a la torsión, la autoamortiguación). Generalmente diseñado para controlar las vibraciones eólicas, algunos de estos nuevos conductores pueden tener efecto en el galloping pero no necesariamente de buena manera en todos los casos.

Separadores entre fases son en realidad propuestos y probados en varias líneas existentes, que es otra manera de atacar el problema de fallas bifásicas. En la actualidad, los diseñadores de línea tienen a su disposición un menú de esquemas de protección que difieren ampliamente en costo, la eficacia, el grado de evaluación y el nivel de uso. Ninguno de esos sistemas ha sido validado como plenamente efectiva, algunos son conocidos por ser parcialmente eficaces, algunos se creen son prometedores

En este informe se proporcionará:

- Una idea de la mecánica del galloping de los conductores de hielo y los factores que influyen en su aparición, tipo y gravedad.
- Visión general de observación del galloping.
- Dar un estudio de los métodos de protección.

El éxito del diseño para controlar el galloping implicará gastos de capital a los concesionarios de las líneas de transmisión.

2.2 Definición de Galloping

El galloping es un movimiento a baja frecuencia (0.1 a 1 Hz), de gran amplitud (desde ± 0.1 a ± 1 veces la flecha del vano, en algunos caso de hasta 4 veces la flecha de la líneas de distribución), la vibración inducida por el viento tanto en simple y haz de conductores, con uno solo o unos pocos lazos de ondas estacionarias por vano. Este fenómeno es siempre causado moderadamente por fuerte de viento lateral constante, que actúa sobre una superficie asimétricamente con hielo del conductor.

Las amplitudes grandes son en general (pero no siempre) en un plano vertical, mientras que las frecuencias son dependientes del tipo de construcción de la línea y el modo de oscilación excitada.

La mayoría del efecto galloping se debe a la formación de hielo de las líneas, que

puede ser hielo, glaseado, escarcha y depósito de nieve húmeda.

Galloping tiene un impacto importante en el diseño de líneas aéreas, tanto para la separación y diseño en las torres, debido a las variaciones de carga en la torre que se da entre las fases, causando carga horizontal, vertical y torsional en las torres y crucetas.

Se debe entender que los métodos de protección contra la vibración eólica, como amortiguadores Stockbridge o hueso de perro no tienen ningún efecto contra el galloping, debido a que éste se producen en el rango de frecuencias muy lejos de las vibraciones eólicas y también debido al hecho de que la cantidad de energía en el galloping es mucho más grande que la cantidad relacionada con vibraciones eólicas.

Como el galloping es un fenómeno de baja frecuencia, alta potencia, el control de la misma obligará a la utilización de material pesado, como veremos en los métodos preventivos. Los diseñadores de líneas aéreas tienen que tener cuidado con los efectos secundarios que podrían ser inducidas por dispositivos antigalloping. En efecto, una masa pesada situado en un punto fijo en el vano del conductor a altas frecuencias, pueden tener impacto dramático en la gravedad de vibraciones eólicas de manera que se recomienda encarecidamente cuidar tales consideraciones.

2.3 Tipos de movimientos

El diseño más común en líneas aéreas de transmisión se compone de muchos vanos, soportados por torres de celosía de acero con aisladores de suspensión. El galloping de estas líneas es por lo general en uno a dos lazos con amplitudes generalmente similares en cada vano. Aparte de los movimientos verticales claramente visibles, hay movimientos longitudinales generalmente perceptibles de las cadenas de aisladores de suspensión. Cuando los vanos están en soportes casi fijos, como en muchas líneas en baja tensión como las líneas de distribución, los movimientos son comúnmente de lazos, pero con amplitudes muy altas, en tal caso hay severos cambios de tensión y causa daños en postes y en las crucetas de maderas, además de causar fallas bifásicas en las líneas de distribución.

El conductor puede girar durante el galloping. Esto es raramente visible para los conductores individuales, pero es fácilmente evidente en haz de conductores a través del movimiento de balanceo de los espaciadores. El giro está sincronizado con el movimiento horizontal. El movimiento vertical puede estar acompañado por el movimiento horizontal, pero esto es normalmente por lo general menos del tercio de la componente vertical.

2.4 Causas del Galloping:

2.4.1 Fuerza de arrastre

El arrastre es una fuerza inducida por el viento en cualquier estructura, que está orientado en la dirección del viento (más exactamente en la dirección de la velocidad

relativa del viento en caso del movimiento de conductor). Con el reparto de presión del aire alrededor del conductor está el origen de esa fuerza denominado arrastre como se muestra en la figura 2.1.

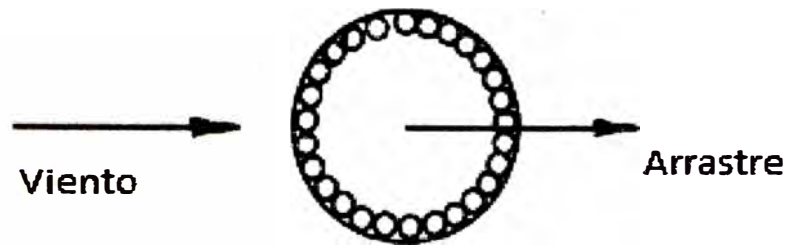


Fig. 2.1 Fuerza del viento sobre el conductor desnudo [1].

La fuerza de arrastre en su efecto estático es simplemente empujar al conductor hasta que la fuerza del viento que será equilibrado por la tensión interna (debido a la oscilación del conductor, apareció una componente de tensión en la dirección del viento). Fuerza de arrastre en su acción dinámica (imagine empujar un poco el conductor alrededor de una posición de equilibrio en la presencia de viento) tiene siempre una acción de amortiguación. Esto significa que cualquier perturbación causada desaparecerá después de un tiempo. Esto es así porque la fuerza de arrastre está orientada en la dirección de la velocidad relativa del viento, que tiene siempre un componente activa opuesta al movimiento del conductor. No hay manera que una fuerza de arrastre constante, pueda conseguir cualquier tipo inestabilidad basada sólo en esa fuerza.

La fuerza de arrastre está dada por esta fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{air} d C_D V_r^2 \quad (2.1)$$

Dónde:

- ρ_{air} : Densidad del aire (1,2 kg/m³ a condiciones estándar de temperatura, presión)
- d : Diámetro del conductor
- V_r : Velocidad relativa del viento
- C_D : Coeficiente de arrastre, de hecho no es una constante y depende de la velocidad del viento y rugosidad (k/h) de superficie aparente.

En la figura 2.2 muestra conductores trenzados suaves y clásicos, en comparación con el conductor de cilindro puro. A la derecha se muestran los conductores de sección transversales. Debajo la velocidad del viento equivalente, corresponde a diámetros de conductores alrededor de 31 mm. Como son el Aero-Z: 31.5 mm (k/h \approx 0,005) y para Aster: 31.05 mm (z/h \approx 0,02).

Estos conductores también ayudan a controlar el galloping pero tienen un alto costo en comparación a los conductores clásicos.

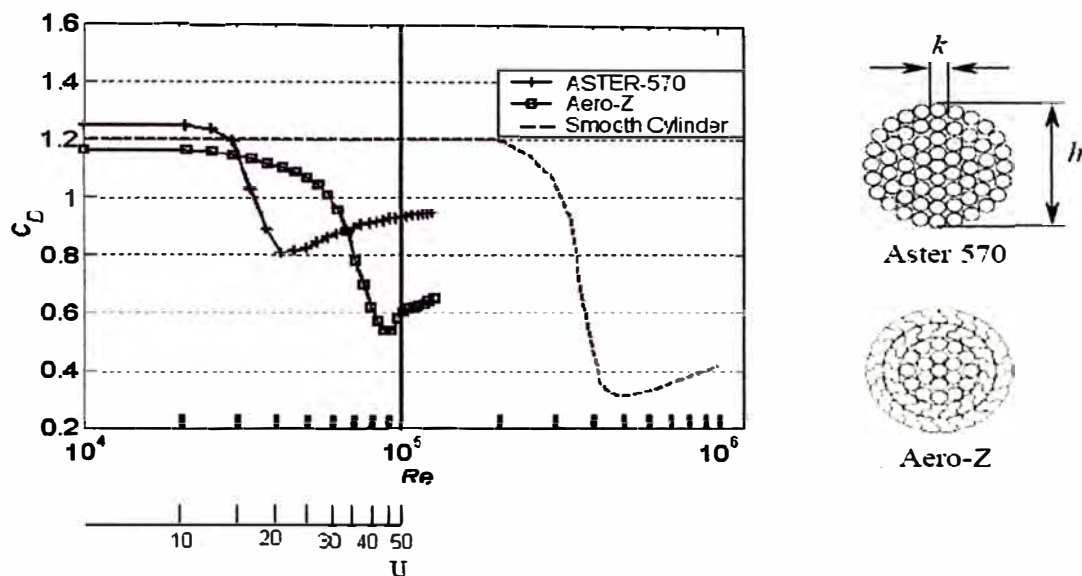


Fig. 2.2 Curvas C_D vs U [1].

Bajo viento turbulento, la fuerza de arrastre es capaz de imponer el movimiento dinámico del conductor en tres dimensiones como el cable reacciona ante la fuerza de arrastre por su rigidez. Esto no es una inestabilidad, este un movimiento forzado que puede ser muy grande durante el viento turbulento. Un evento de este viento turbulento sobre los conductores anteriormente mencionados se muestra en la figura 2.3.

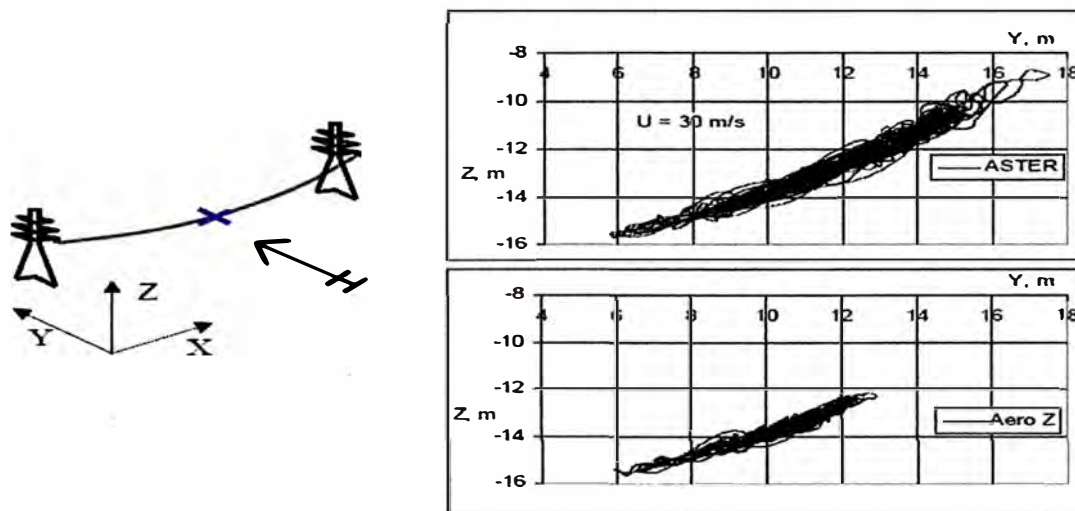


Fig. 2.3 Efecto de la turbulencia del viento, esto no es galloping [1].

En el punto medio la evolución de dos cables que se muestran a la derecha, en una longitud de vano de 500m. Velocidad del viento de 30 m/s, la escala de la turbulencia de viento: 200m, intensidad de la turbulencia: 19%.

2.4.2 Fuerza de elevación y el momento de cabeceo

Para obtener galloping, el conductor (simple o haz) debe tener más que la fuerza de

arrastre que es puramente una fuerza disipativa típica de la velocidad del viento de galloping. Esta fuerza adicional sería capaz de crear, en algunas condiciones particulares, un amortiguamiento negativo en todo el sistema. La fuerza de elevación necesita un perfil asimétrico del conductor al viento.

Una vez que existe asimetría, un nuevo factor tiene que ser definido: el ángulo de ataque. El ángulo de ataque es el ángulo entre dirección de la velocidad del viento (relativa) y la dirección de la asimetría que es generalmente una línea recta que une el centro de gravedad del conductor desnudo y el centro de gravedad de la capa de hielo.

Tan pronto como este presente este recubrimiento asimétrico sobre un conductor, existe elevación y arrastre. De hecho, estas dos fuerzas aerodinámicas se aplican sobre un punto dentro del conductor que se denomina "centro aerodinámico", que no es el centro del conductor. Para facilitar la comprensión, las mediciones y el modelado, el desplazamiento del punto de aplicación de estas fuerzas se sustituyen por las mismas fuerzas aplicadas en el centro de corte más un momento de cabeceo adicional que es físicamente evidente.

En la figura 2.3 tal momento de cabeceo es obviamente, cero en la imagen a, hacia la derecha en la imagen b y hacia la izquierda en la imagen c.

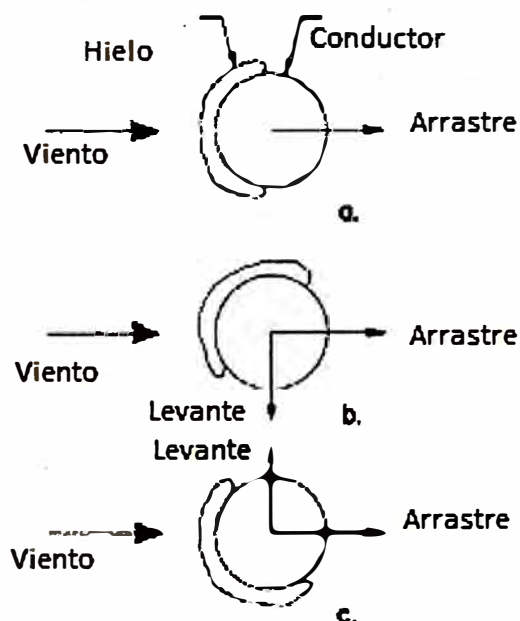


Fig. 2.3 Elevación es una fuerza perpendicular a la dirección del viento, que puede ser nula (a), negativos (b) o positivos (c) dependiendo de la posición del hielo [1].

La medición de pruebas en el túnel de viento puede fácilmente medir estos tres componentes de la acción del viento sobre las formas asimétricas de hielo, y se obtienen las curvas de la figura 2.4. Así que tenemos tres coeficientes aerodinámicos que están todos en función del ángulo de ataque.

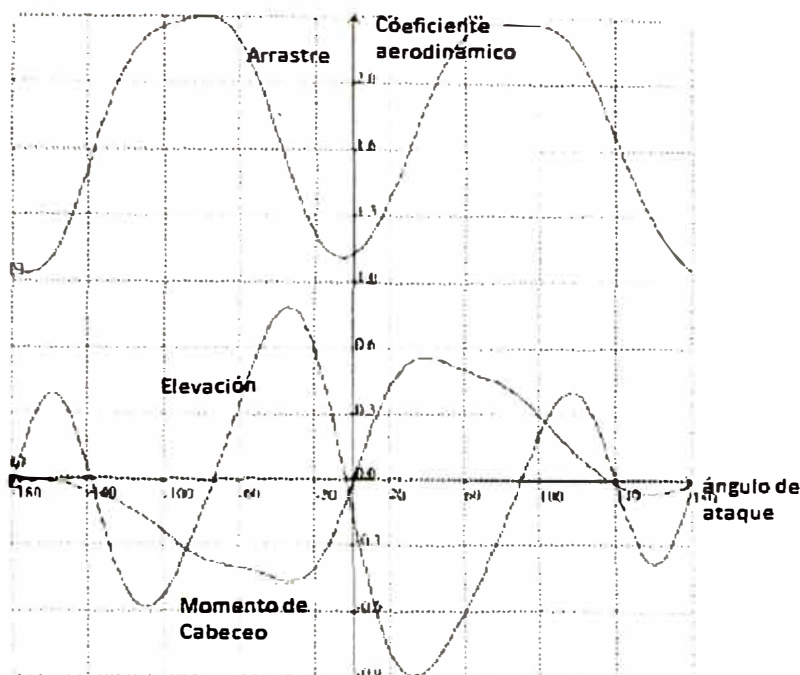


Fig. 2.4. Típicos coeficientes aerodinámicos [2].

En la figura 2.4 nos muestra un caso donde el hielo (tipo media luna) de espesor 1,1 cm sobre un diámetro de subconductor de 32,4 mm. Levante positivo hacia arriba, momento de cabeceo y de torsión de ángulo positivo en sentido antihorario. Ángulo cero cuando el hielo se enfrenta al viento en posición horizontal. La simetría con ángulo de ataque no es perfecta como las curvas se han medido en la forma de hielo real que no puede ser puramente simétrica.

Las dos fuerzas y el momento de cabeceo aerodinámico (todos por unidad de longitud) se han obtenido por leyes de similitud para ser expresado como sigue:

$$f_D = k_D v_r^2 C_D(\varphi) \quad (2.2)$$

$$f_L = k_D v_r^2 C_L(\varphi) \quad (2.3)$$

$$M_w = k_M v_r^2 C_M(\varphi) \quad (2.4)$$

$$k_D = \frac{1}{2} \rho_{air} d \quad (2.5)$$

$$k_M = \frac{1}{2} \rho_{air} d^2 \quad (2.6)$$

Dónde:

f_D : Fuerza de arrastre

f_L : Fuerza de elevación

M_w : Momento de cabeceo

ρ_{air} : Densidad del aire (1,2 kg/m³ a condiciones estándar de temperatura, presión)

d	Diámetro del conductor
V_r	Velocidad relativa del viento
C_D	Coefficiente de arrastre
C_L	Coefficiente de elevación
C_M	Coefficiente de cabeceo

Notar el exponente cuadrado del diámetro del conductor en el momento de cabeceo. Donde C_D , C_L y C_M son las tres curvas dadas como un ejemplo, para una forma de hielo particular, en la figura 2.4. La abscisa es φ (ángulo de ataque).

Orden de las amplitudes de las acciones del viento sobre los conductores de líneas eléctricas son (velocidad del viento 10 m/s, diámetro del conductor de 30 mm): $f_D= 2$ a 3 N/m $f_L=0$ a 1 N/m y $M_W=0$ a 0.003 N.m/m.

Es increíble que tal cantidad pequeña de fuerzas (momento) son capaces de generar amplitud enorme, está obviamente relacionado con el hecho de que las líneas de energía tienen muy pequeña autoamortiguación a las frecuencias de galloping.

Es importante darse cuenta de los signos de referencia para las fuerzas y ángulos:

- Fuerza de elevación será positivo hacia arriba.
- Fuerza de arrastre será positivo hacia la dirección del viento.
- Momento de cabeceo: hay dos maneras de elegir el momento positivo en sentido horario o antihorario.

En general vamos a suponer que el ángulo de ataque es cero cuando el hielo se está de cara al viento real.

2.5 Mecanismos del Galloping

Un ejemplo de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el conductor + hielo se muestra en la figura 2.5. En este caso el conductor se mueve hacia arriba (velocidad dy/dt) y también gira en sentido antihorario (a un ángulo θ).

La posición inicial del hielo está dada por θ_{ice} . Donde φ es el ángulo ataque que se compone de dos contribuciones: rotación + posición inicial del hielo de un lado y el ángulo α que forman la velocidad relativa del viento y la velocidad real del viento.

La fuerza de arrastre f_D está orientado en la dirección de la velocidad relativa del viento y la fuerza de elevación es perpendicular a la del arrastre. Ambas fuerzas actúan sobre el centro de corte del conductor y un momento de cabeceo M_w (positivo en sentido antihorario).

Si la elección de referencia para el ángulo está en sentido horario, el ángulo φ de ataque es negativo como se muestra en la figura 2.5, además se muestra el diagrama de un conductor simple con hielo.

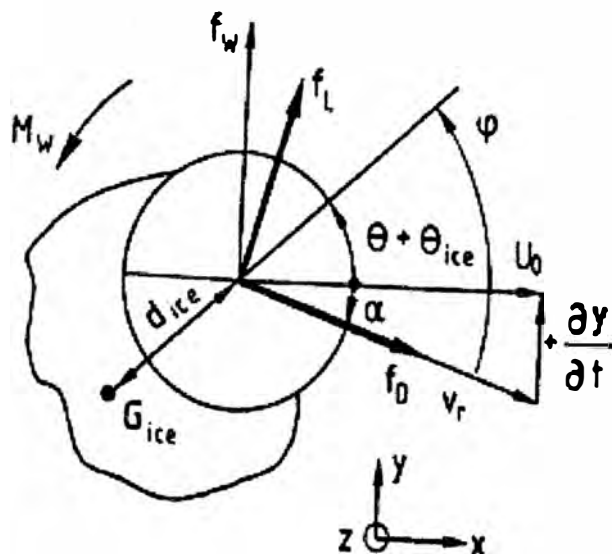


Fig. 2.5 Arrastre, elevación y momento de cabeceo para el caso de conductor simple [6].

La fuerza vertical que actúa sobre la disposición de conductor en la figura 2.5 está dada entonces por (α es negativo):

$$f_w = 2(f_L \cos \alpha + f_D \sin \alpha) \quad (2.7)$$

En esta esta expresión f_L y f_D son función de coeficiente aerodinámico de elevación y arrastre que están en función del ángulo de ataque completo " φ ".

$$\varphi = \theta_{ice} + \theta - \alpha \quad (2.8)$$

La inestabilidad produce un movimiento en la vertical, si una perturbación en el desplazamiento vertical ve un cambio en la fuerza aplicada. Por ejemplo, una velocidad vertical positiva generaría un aumento de la fuerza vertical neta en la misma dirección.

$$\Delta f_w > 0 \quad \text{inestable} \quad (2.9)$$

$$\Delta f_w < 0 \quad \text{estable} \quad (2.10)$$

Para establecer la variación de la fuerza, vamos a hacer la hipótesis simplificada, que el coeficiente de arrastre es constante y también tener en cuenta que el ángulo α es muy pequeña.

$$\Delta f_w = \Delta f_L + f_D \Delta \alpha \quad (2.11)$$

$$\Delta \alpha = -\frac{\Delta \dot{y}}{U_0} \quad (2.12)$$

$$\Delta f_L = k_D \frac{\partial C_L}{\partial \varphi} = K_D \frac{\partial C_L}{\partial \varphi} (\Delta \theta - \Delta \alpha) \quad (2.13)$$

$$\Delta f_w = k_D \left[C_D \Delta \alpha + \frac{\partial C_L}{\partial \varphi} (\Delta \theta - \Delta \alpha) \right] \quad (2.14)$$

En la figura 2.6 se muestra el coeficiente de arrastre y las derivadas del coeficiente de elevación y momento de cabeceo respecto al ángulo φ para una forma de hielo asumido. Las regiones en donde la curva derivada de elevación cruza a la curva de

arrastre, son regiones posibles de inestabilidad. Por ejemplo formas de hielo producen coeficientes de elevación asimétricos como se muestra en la figura 2.6 y da como resultado una inestabilidad para un ángulo de ataque alrededor de -50° , pero no en 50° .

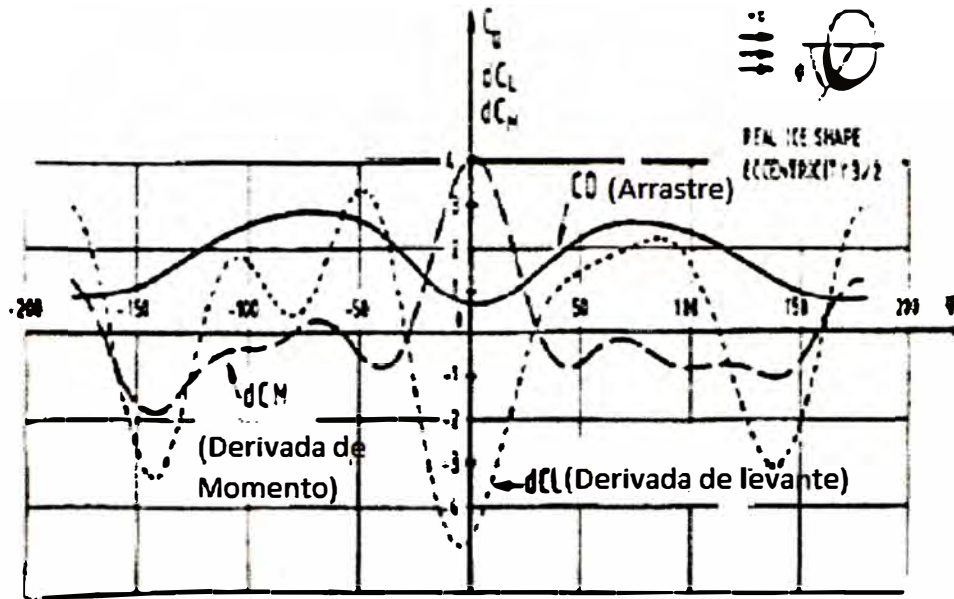


Fig. 2.6 Características aerodinámicas de un conductor con hielo [2].

Así que los criterios de inestabilidad son fáciles de predecir, señalando que $\Delta\alpha$ es negativo para un movimiento hacia arriba, que depende del comportamiento de torsión. Dos casos tienen que ser considerados.

2.5.1 Caso 1: Sin Torsión (infinitamente rígido)

$$\Delta\theta = 0 \rightarrow C_D - \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} > 0 \text{ (entonces } C_D - C_{L\alpha} > 0) \rightarrow \text{El sistema es estable} \quad (2.15)$$

$$\Delta\theta = 0 \rightarrow C_D - \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} < 0 \text{ (entonces } C_D - C_{L\alpha} < 0) \rightarrow \text{El sistema es inestable} \quad (2.16)$$

Por lo tanto el sistema puede ser inestable solo para $C_{L\alpha} > 0$ y mayor que el C_D . Este es el criterio clásico de Den Hartog (1932). El rango inestable de ataque se deduce de la figura 2.6, elaborado con la derivada de la elevación. Puede ocurrir que la curva de C_D cruza a la curva $C_{L\alpha}$. Así, solo una zona estrecha alrededor de -50° y otra alrededor de 180° puede ser inestable de acuerdo con el criterio de Den Hartog.

Para haz de conductor, la rigidez torsional depende de la tensión mecánica en los subconductores y el espaciado del haz, así como el número de subconductores y los espaciadores utilizados.

2.5.2 Caso 2: Se produce Torsión

$$\Delta\theta \neq 0 \quad (2.17)$$

En presencia de la torsión, al menos dos casos deben ser considerados:

a) $\Delta\theta$ en fase con la velocidad vertical (el caso de un solo conductor)

$$\Delta\theta = -k \cdot \Delta\alpha \quad (2.18)$$

El criterio no cambia en comparación con el criterio Den Hartog pero la derivada de la elevación se incrementa por el acoplamiento.

$$C_D - C_{L\alpha} \cdot (k + 1) \leq 0 \rightarrow \text{El sistema es inestable} \quad (2.19)$$

Para la torsión estar en fase con la velocidad requiere un movimiento forzado sin efectos inerciales. Esto necesitaría una gran diferencia entre las frecuencias verticales y de torsión, lo cual será posible para un solo conductor con depósito de hielo muy delgado.

b) $\Delta\theta$ en fase opuesta con la velocidad vertical (puede ser un caso particular de los haces)

Puede ocurrir incluso si $\partial C_L < 0$, pero no solo. En este caso el cambio de fase (vertical/torsión) juegan un papel importante, siendo este último muy relacionado con amortiguación torsional y la proximidad de la resonancia. Éste último caso se denomina "aleteo acoplado" o simplemente "aleteo" de galloping para la ingeniería eléctrica.

2.6 Tipos de Movimientos

El galloping toma una de las dos formas básicas, de ondas estacionarias y ondas viajeras o una combinación de ellos. Las ondas estacionarias pueden ocurrir con uno o hasta 10 bucles en un vano. Las ondas que viajan a menudo se observan y se acumulan en el transcurso del galloping real. Las ondas pueden ser sólo unas decenas de metros de longitud de largo, con amplitudes de unos pocos cm. Con el paso repetido de ida y vuelta a lo largo del vano, crecen en longitud y amplitud y eventualmente actúan entre sí para formar ondas estacionarias. Las ondas estacionarias resultan que tienen un gran número de bucles dentro de un vano, pero la adición de las ondas viajeras conduce a un cambio a un número menor de bucles, y finalmente se asienta en el vano en tres a menos bucles.

En otras ocasiones, la onda estacionaria de galloping se construye sin la participación de la onda viajera.

Las amplitudes observadas de pico a pico de galloping son a menudo tan grande como la flecha de un vano y son a veces mayor en vanos cortos. Las amplitudes que se aproximan a la flecha, se han observado hasta tres bucles en el vano, pero más allá de ese número las amplitudes se hacen más pequeñas.

2.7 Ecuación de Galloping

Hay muchos artículos que se ocupan de todos los detalles en relación con las ecuaciones de galloping. Como por ejemplo: Hunt y Richard, 1969; Keutgen, 1999; Lilien y Ponthot, 1988; Lilien y Dubois, 1988; Lilien, 1989; Lilien y Chabart, 1995; Nakamura, 1980; Nigol y Clarke, 1974; Nigol y Buchan, 1981; Parkinson, 1974; Rawlins, 1979; Richardson et al, 1963; Wang y Lilien, 1994; Wang, 1996; Wang y Lilien, 1998.

Para escribir esta ecuación, no podemos olvidar que:

Autoamortiguación, aunque sean muy pequeñas. Estos datos están relativamente cerca de 0,5% para el movimiento vertical y 2% para el movimiento torsional. Para el movimiento horizontal está muy cerca a cero. Amortiguación aerodinámica incluye automáticamente el coeficiente aerodinámico (principalmente es siempre positivo, y las derivadas de elevación y momento de cabeceo podrían ser valores negativos).

Como se está buscando inestabilidades únicamente (por lo tanto no es válido para estimar amplitudes), podemos limitar nuestra investigación a un movimiento muy pequeño y que el desarrollo se limita a primeras derivadas.

Este modo simplificado podría ser un buen punto de partida para estudiar las posibles inestabilidades en el movimiento vertical y torsional. Por el bien de la simplicidad, también limitará el caso de un modo único (en el modo de un ω_v de frecuencia en la vertical y en el modo de ω_θ de torsión).

La ecuación de galloping simplificada es:

$$\ddot{y} + \left[\frac{k_D U_0}{m} (C_D - C_{L\alpha}) + 2\xi_v \omega_v \right] \dot{y} + \omega_v^2 y = \frac{k_D U_0^2}{m} C_{L\alpha} \theta - \frac{m_{ice}}{m} d_i \sin \theta_0 \ddot{\theta} \quad (2.20)$$

$$\ddot{\theta} + 2\xi_\theta \omega_\theta \dot{\theta} + \omega_\theta^2 \left[1 - \frac{k_D U_0^2}{\omega_\theta^2} C_{M\alpha} + \frac{m_{ice} g d_i}{\omega_\theta^2 l} \sin \theta_0 \right] \theta = \frac{k_M U_0}{I} C_{M\alpha} \dot{y} + \frac{m_{ice} d_i}{I} \cos \theta_0 \dot{y} \quad (2.21)$$

Dónde:

C_D	:	Coeficiente de arrastre aerodinámico.
$C_{L\alpha}$:	$dC_L/d\alpha$.
$C_{M\alpha}$:	$dC_M/d\alpha$.
d_i	:	Distancia entre el centro de gravedad de la formación de hielo y el centro del conductor.
I	:	Momento de inercia respecto a un eje dado.
m	:	Masa por unidad de longitud de cable.
m_{ice}	:	Masa de hielo por unidad de longitud.
U_0	:	Velocidad horizontal del viento
\ddot{y}	:	Aceleración vertical del cable.
\dot{y}	:	Velocidad vertical del cable.
θ	:	Desplazamiento torsional del cable debido a las fuerzas dinámicas
θ_0	:	Desplazamiento inicial torsional del cable.
ξ_v	:	Factor de amortiguamiento vertical.
ξ_θ	:	Factor de amortiguamiento torsional.
ω_v	:	Frecuencia circular del modo vertical.
ω_θ	:	Frecuencia circular del modo torsional.

2.8 Estimación de las condiciones inestables

Para el análisis del galloping se presentan los parámetros en la tabla siguiente. Donde hay cuatro parámetros adimensionales para conductores individuales y cinco por haz.

Tabla 2.1 Parámetros de Galloping

Parámetro		Rango	
		conductores individuales	haz de conductor
Frecuencia vertical/ torsional	ω_v/ω_θ	0.1 a 0.3	0.8 a 1.2
diámetro del conductor/diámetro del haz	d/a	No aplicable	0.03 a 0.13
Reducción de la velocidad de viento	$V/(\omega_v.d)$	15 a 1000	15 a 1000
Reducción de inercia de hielo	$(m_{ice}.d_{ice})/(m.d)$	0.01 a 5	0.01 a 5
Parámetro de vano de conductor	$12.5d/f$	0.01 a 1	0.01 a 0.12

Dónde:

ω_v	:	Frecuencia vertical.
ω_θ	:	Frecuencia torsional.
d	:	Diámetro del conductor.
d_i	:	Distancia entre el centro de gravedad de la formación de hielo y el centro del conductor.
a	:	Diámetro del haz de conductor.
V	:	Velocidad de viento.
m_{ice}	:	Masa de hielo por unidad de longitud.
m	:	Masa por unidad de longitud de cable
f	:	Flecha

2.9 Factores que influyen en el Galloping

Galloping requiere de un viento fuerte moderada a un ángulo de ataque mayor a 45° a la línea, un depósito de hielo o escarcha sobre el conductor presentando adecuadas características aerodinámicas y como para favorecer la inestabilidad.

Los depósitos de hielo ocurre en tres formas como se muestra en la figura 2.7, escarcha suave, escarcha dura y glaseado.

El de escarcha suave tiene un aspecto plumoso y por lo general tiene una densidad inferior a 0,6 g/cm³, se adhiere mal a los conductores y rara vez se asocia con el galloping. El escarcha duro es amorfo, su densidad es por lo general entre 0,6 a 0,9 g/cm³ y se adhiere fuertemente a los conductores. El de glaseado o también llamado hielo azul. Su densidad es de 0,90 g/cm³ a 0.92 g/cm³ y su adhesión a los conductores es

excelente. El escarchado duro y el glaseado son responsables de la mayoría de galloping en el conductor de las líneas aéreas.

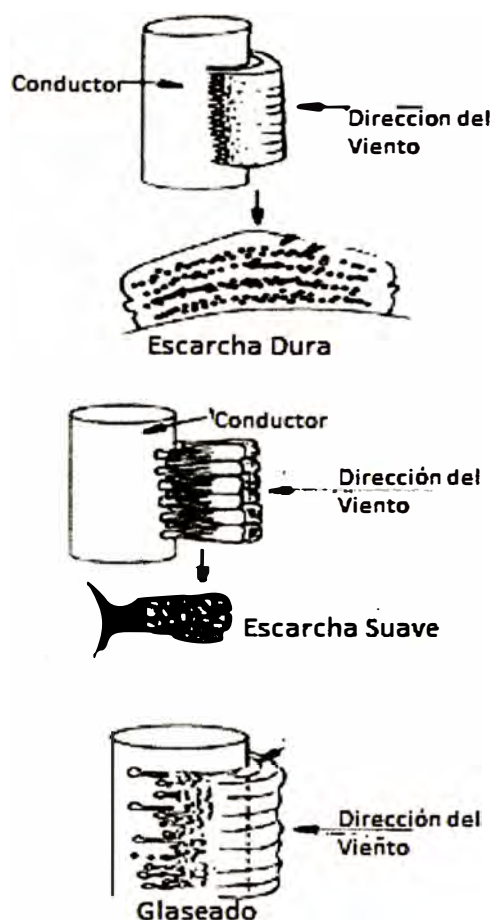


Fig. 2.7 Tipos de depósitos de hielo [1].

Los efectos de rigidez torsionales se cree que influyen en el número de bucles que se producen en el galloping. Vanos con baja rigidez torsional, debido a la gran longitud del vano o el pequeño diámetro del conductor, tienden a experimentar gran rotación en el vano medio resultando una forma de hielo que características poco adecuadas para el galloping. La cantidad de rotación es menor cerca de las torres, tales como puntos ubicados en la cuarta parte del vano. La rigidez torsional en conductores en haz es de 5 a 10 veces comparados en vanos de un solo conductor. Por lo cual los conductores en haz se creen que son más propensos a producir galloping.

2.10 Daños que produce el galloping

Galloping ha causado diversos tipos de daño en las estructuras en líneas aéreas. Algunos tipos de daños resultados directamente de las grandes fuerzas que las ondas o bucles de galloping aplican a los soportes. Por ejemplo, han dañados crucetas en las estructuras de madera y metálicas.

En otros casos pasadores han sido dañadas, lo que permite el desacoplo en las

cadenas de aisladores.

Las cargas dinámicas, como el choque que se produce una onda de galloping de frente que se refleja en una torre, dañan amortiguadores de vibración, a veces chasqueando los pesos y a veces con reflexiones repetidas fatigan la amortiguación de los cables. Las cargas dinámicas también han causado desprendimiento de cruceta y pernos en estructuras de madera y el aflojamiento de postes de madera en si en la tierra. Los jumpers en las torres terminales han sacudido a las crucetas producto del galloping.

2.11 Pruebas realizadas y descripción con formas de hielo artificial

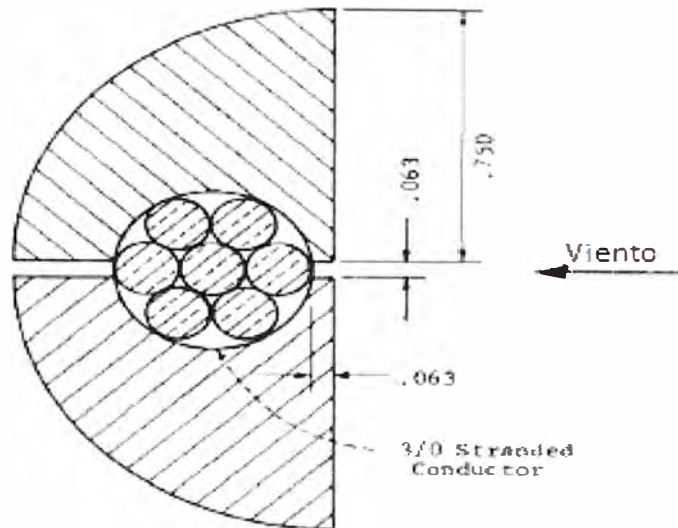
Como se mencionó anteriormente, para obtener resultados de la prueba de galloping en un tiempo relativamente corto y con una prueba bien definida, es posible instalar formas artificiales de hielo en el conductor de una línea de prueba de escala completa. Hay pocas líneas de este tipo en el mundo. Los dos más conocidos aún en servicio, se instalan en Japón (donde muchos de estos sitios existen, el más famoso es la línea de prueba Mogami) y en Cánada (instalaciones IREQ longitud total de 1,6 km).

Estas instalaciones pueden tener hasta tres vanos de suspensión en fase de prueba. Investigadores de Japón están llevando a cabo estas pruebas por más de treinta años.

Diferentes formas de hielo artificiales se han utilizado para inducir galloping en líneas de prueba. Las formas más comunes de hielo artificiales utilizados en líneas de prueba son la forma en D, la media luna, triangular y formas en D modificadas. Las reproducciones de formas de hielo naturales también se han utilizado y la formas de media luna es uno de aquellos. Sin embargo, en estas pruebas, se utiliza la misma forma en todo el vano, mientras que en una acumulación real varía en función de la rigidez torsional del cable, que disminuye a medida que va más allá de la torre. La velocidad del viento también varía a lo largo del vano y con la altura del cable y también puede influir en la forma y cantidad de acumulación de hielo.

El prisma cuadrado que induce al galloping en el túnel de viento (Parkinson y Smith, 1964), se puso a prueba en la línea de prueba de IREQ durante cuatro semanas. El uso de un prisma habría sido ventajoso, ya que han inducido galloping con vientos provenientes de ambos lados de la línea de prueba. Sin embargo, en un conductor de 27,8 mm ACSR, indujo sólo inestabilidad torsional con un desplazamiento vertical limitado a una amplitud del orden del diámetro del conductor. Esta diferencia de comportamiento se explica por la baja rigidez torsional del conductor.

En las siguientes figuras 2.8 y 2.9 se muestran los perfiles de hielo artificial en forma en D y en la figuras 2.10 y 2.11 los perfiles en forma triangular y media luna respectivamente.



Todas las dimensiones estan
en pulgadas

Fig. 2.8 Sección de hielo simulado empleado por Tornquist y Becker [1].

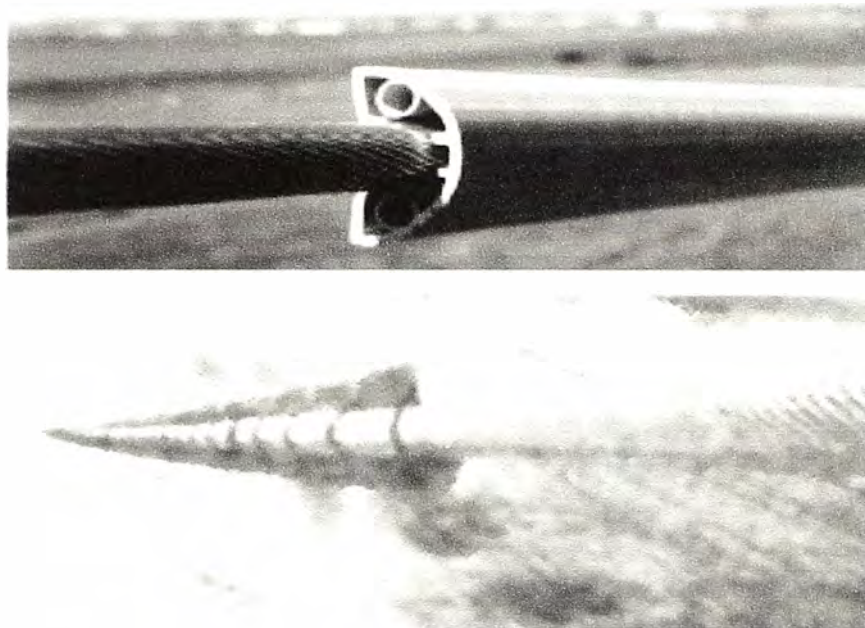


Fig. 2.9 Sección de hielo artificial en forma D (cortesía Hydro Québec) [1].

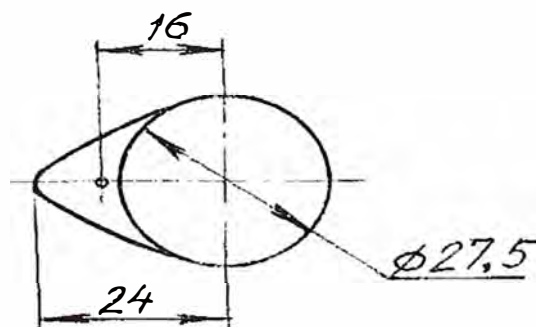


Fig. 2.10 Sección de hielo simulado empleado por D.C. Stewart (1937) [8].



Fig. 2.11 Sección de perfil de hielo artificial en forma de media luna [2].

Es difícil crear galloping de tipo de inestabilidades cuando se prueba con hielo artificial, perfiles triangular o de forma de media luna. Sólo los ángulos de ataque en particular permitirían significativas amplitudes de galloping. Pero las formas reales de hielo están más cerca de estos perfiles triangulares o en forma de media luna.

Gallopig puede ser fuertemente dependiente de las pruebas de las propiedades estructurales, tales como la rigidez torsional, momento de inercia, frecuencia naturales, la relación entre frecuencias en diferentes direcciones de movimiento, etc. Vanos de pruebas deben ser diseñados para reproducir estas propiedades, que no siempre es fácil. Por ejemplo, las pruebas en solo vano no será capaz de dar cuenta de las influencias importantes, especialmente de vano a vano movimientos de cadenas de aisladores de suspensión. Por esa razón, la mayoría de los montajes de prueba existentes de suspensión tienen al menos dos vanos en la sección de prueba.

Las pruebas de hielo artificial usualmente son vistas que no proporcionan validación suficiente para soportar el uso seguro de los sistemas de protección.

2.12 Pruebas en el túnel de viento

Las fuerzas que actúan en un conductor con hielo puede ser medido en túneles de viento. En estas mediciones, las pruebas estáticas en la cámara aislada llamado| túnel de viento se llevan a cabo mediante la instalación del conductor con su forma de hielo apoyado rígidamente dentro de un túnel de viento con sensores para medir la elevación, arrastre y el momento de cabeceo para elegir la velocidad de viento. El sistema de soporte puede girar el conductor permitiendo la medición de propiedades aerodinámicas con diferentes ángulos de ataque. El soporte del conductor debe ser diseñado para permitir la medición del momento de cabeceo apropiado.

Algunos de estos equipos estaban tratando de reproducir las formas reales de hielo debido a la nieve húmeda o lluvia helada. Para obtener estas formas se utilizaron dos métodos:

- Recoger las formas de hielo caídos desde la línea de los eventos al galloping. Luego se reprodujo la forma de hielo mediante un molde, utilizando caucho de silicona, y aún más la creación de réplicas de la formas de hielo utilizando ese molde, que se adjunta a continuación a un conductor para su uso en el túnel de viento.
- Creación de acumulaciones de hielo en un túnel de viento, de la formación de hielo en el que las muestras de los conductores se colocan a través del túnel de viento, la lluvia helada o la nieve se depositan en los conductores durante un tiempo dado. Las muestras de conductores están instalados con soportes de extremo que tiene una rigidez a la torsión equivalente a la del vano del conductor.

2.13 Galloping en un túnel de viento

Es posible recrear una parte del vano dentro de un túnel de viento por medio de un soporte y resortes, como se muestra en la figura 2.12, que será sintonizado a las frecuencias apropiadas resonantes horizontales, verticales y de torsión con el fin de reflejar los modos bajo investigación. En caso de los haces, el número apropiado de tubos rígidos pueden ser instalados en paralelo. Keutgen y Lilien (2000) han utilizado este tipo de configuración para inducir galloping en el interior de un túnel de viento. Ellos han obtenido un aleteo con desplazamientos descritos en las figura 2.13 hasta 2.16.

Las frecuencias de los tres movimientos son los mismo, 0,89 Hz, que corresponde a la frecuencia de galloping (con reducción de velocidad de viento de 335). La trayectoria de un punto de la muestra en el plano XY se llama elipse de galloping.

Fue interesante observar que los mismos parámetros con una velocidad de viento ligeramente diferente han inducido diferentes elipses de galloping.

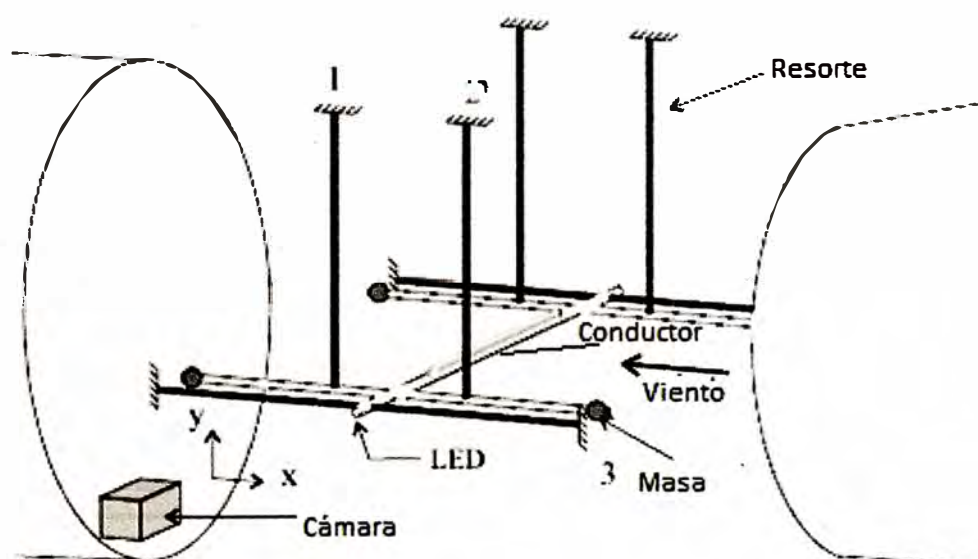


Fig. 2.12 Esquema del sistema dinámico en el túnel de viento [5].

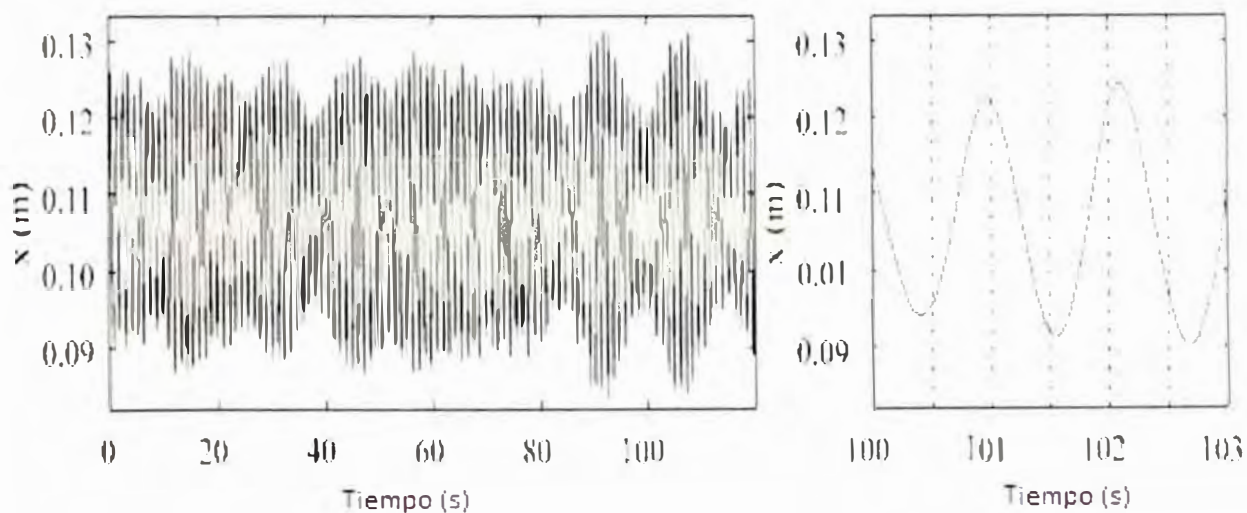


Fig. 2.13 Desplazamiento horizontal, $U_0=9,7$ m/s, $\theta_0=-30^\circ$, $f_v/f_0=0,98$, $U_0/(fd)=335$ [5].

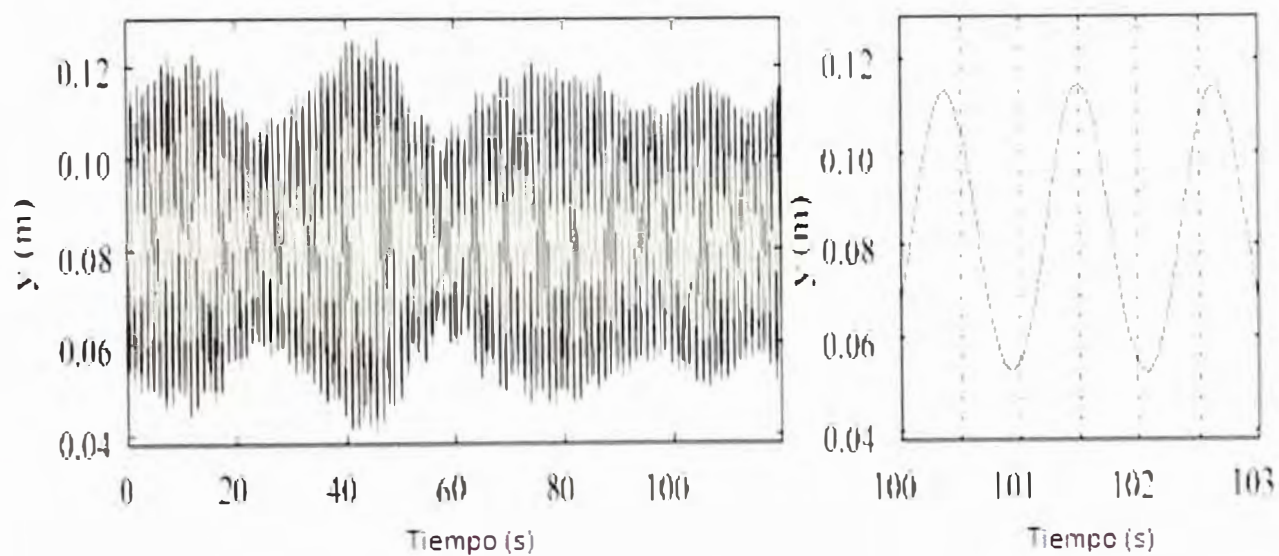


Fig. 2.14 Desplazamiento vertical, $U_0=9,7$ m/s, $\theta_0=-30^\circ$, $f_v/f_0=0,98$, $U_0/(fd)=335$ [5].

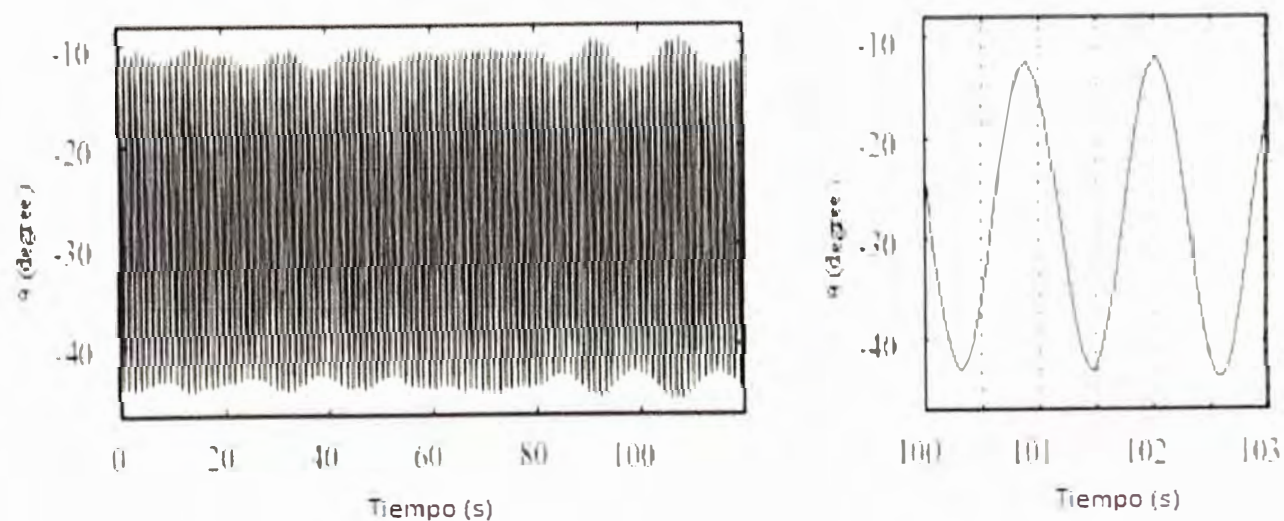


Fig. 2.15 Posición angular del hielo, $U_0=9,7$ m/s, $\theta_0=-30^\circ$, $f_v/f_0=0,98$, $U_0/(fd)=335$ [5].

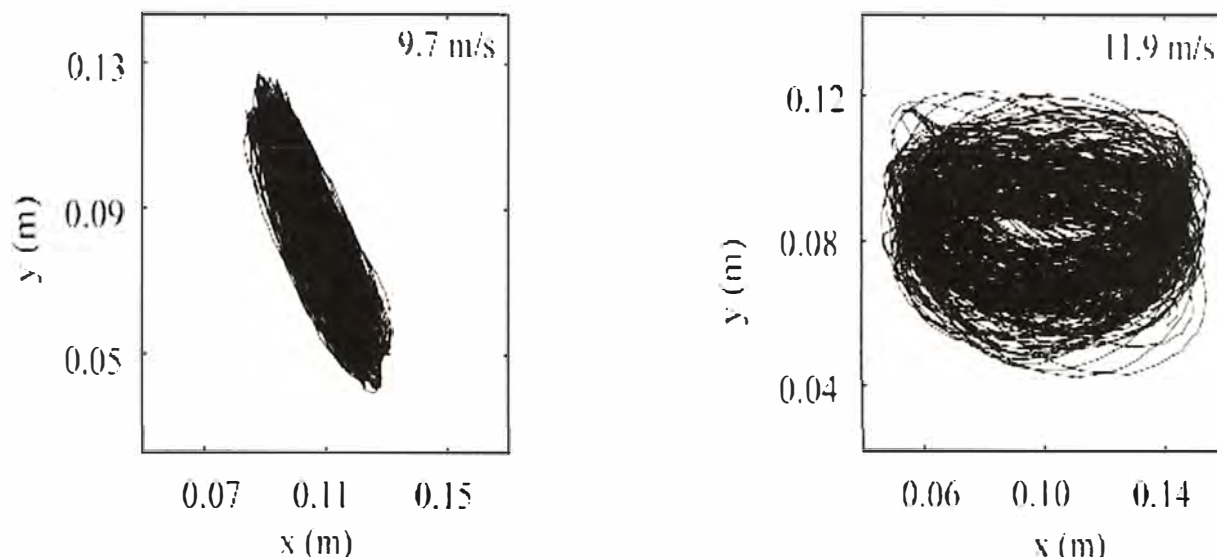


Fig. 2.16 Elipse de galloping para diferentes velocidades de viento, $\theta_0=-30^\circ$, $f_v/f_0=0,98$ [5].

2.14 Diseño de elipse de galloping

Los expertos de CIGRE han aprobado las fórmulas siguientes para estimar los movimientos máximos al galope para tramos sin control al galloping. El mejor modelo de ajuste numérico para cables simples utiliza la amplitud de pico a pico al galloping sobre el diámetro del conductor, frente al parámetro del vano del conductor. El modelo de mejor ajuste para haz de conductores utiliza la amplitud de pico a pico al galloping sobre el diámetro del subconductor como una función del parámetro de vano del conductor.

2.14.1 Parámetro de vano del conductor

El enfoque emplea la amplitud reducida, que es una relación de la amplitud pico a pico de galloping (A_{pk-pk}) sobre el diámetro del conductor (φ), en m:

$$\frac{A_{pk-pk}}{\varphi} \quad (2.22)$$

Esta amplitud reducida tiene un rango de 0 y 500.

El parámetro de vano de conductor es una combinación del parámetro de catenaria con la relación de diámetro del conductor (φ) sobre el cuadrado de la longitud del tramo (L), que también se puede expresar como la relación del diámetro del conductor sobre la flecha (f). El parámetro del vano del conductor es adimensional:

$$100 \frac{T\varphi}{mgL^2} = \frac{100\varphi}{8f} \quad (2.23)$$

Debido a su definición y datos prácticos, el parámetro de vano del conductor está en el intervalo:

- Para conductor simple de 0 a 1
- Para haz de conductor de 0 a 0.12

2.14.2 El caso de líneas de un solo conductor

Este parámetro tiene un rango de 0 a 1, con la tensión en N, la masa en kg/m, longitud de vano, flecha y el diámetro en metros.

Para conductores simples, la curva ajustada a la amplitud máxima sobre el diámetro del conductor según la figura 2.17, está dada por:

$$\frac{A_{pk-pk}}{\phi} = 80Ln \frac{8f}{50\phi} \quad (2.24)$$

Esto es sólo válido para en el intervalo de 0-1 del parámetro de vano del conductor.

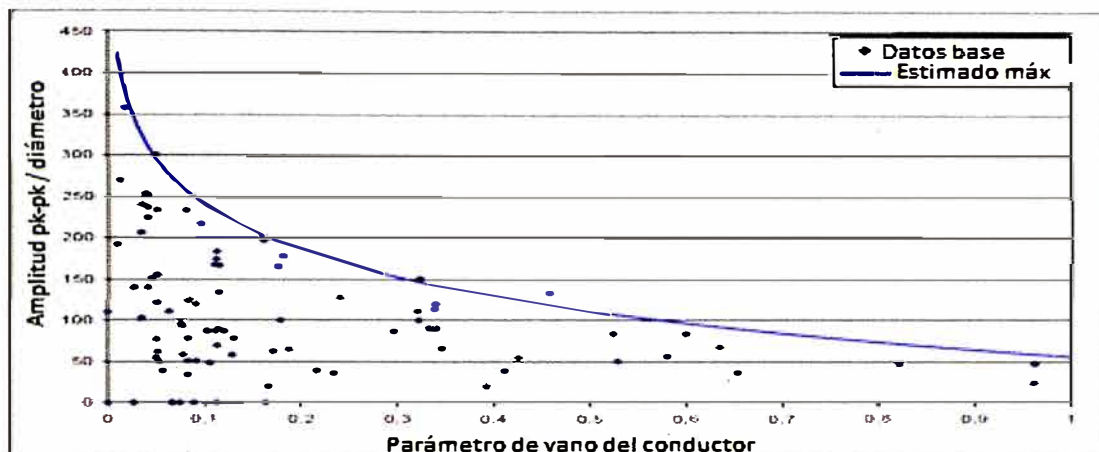


Fig. 2.17 Variación máxima observada de la amplitud pico a pico al galloping / diámetro de conductor simple como una función del parámetro de vano del conductor [12].

2.14.3 El caso de líneas de haz de conductores

Para haz de conductores, la curva ajustada correspondiente a la figura 2.18 es:

$$\frac{A_{pk-pk}}{\phi} = 170Ln \frac{8f}{500\phi} \quad (2.25)$$

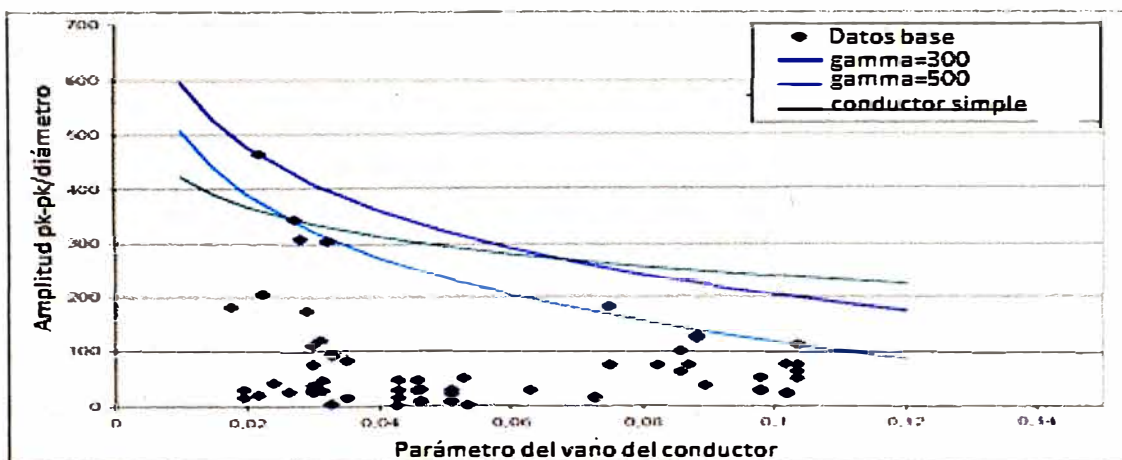


Fig. 2.18 Variación máxima observada de la amplitud pico a pico al galloping / diámetro de haz de conductor como una función del parámetro de vano del conductor [12].

Debido a las observaciones de varios casos, se recomienda utilizar una elipse vertical para el diseño. El nuevo diseño sería utilizar la figura 2.19 con A_4 de amplitud deducida de las expresiones de curvas ajustadas dependiendo del caso.

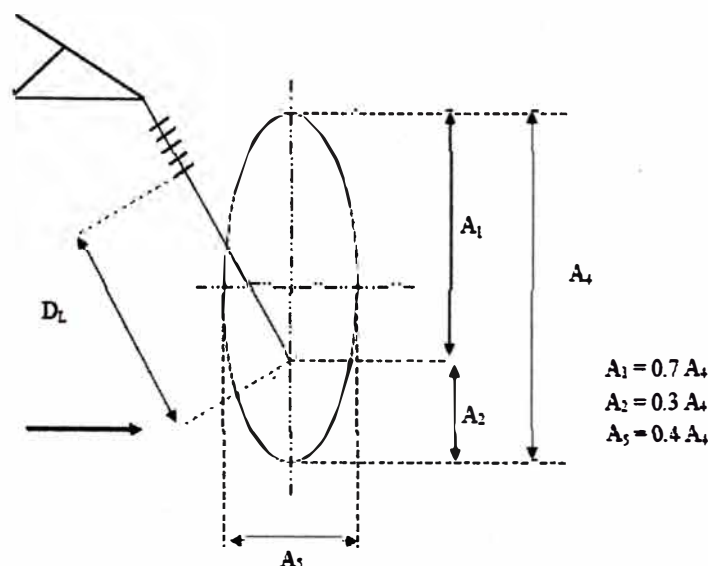


Fig. 2.19 Propuesta de diseño de elipse galopante [12].

2.15 Métodos de Protección sin dispositivos antigalloping

Prevención de la formación de hielo y el derretimiento de hielo depositado, por calentamiento eléctrico de los conductores, se aplicaron a partir de 1920. Corriente de carga normal es pocas veces lo suficiente grande como para causar una cantidad útil de calefacción, pero cantidades grandes puede obtenerse a través de procedimientos especiales. Uno es dirigir toda la carga en una línea de multi-circuito a través de un circuito, con el fin de mantenerlo libre de hielo. Los otros circuitos podrían estar al galloping, pero que estén fuera de servicio, las descargas disruptivas no puede ocurrir. Otro método consiste en cortocircuitar un extremo de una línea y energizar el otro extremo a un voltaje reducido.

2.16 Métodos de Protección con dispositivos antigalloping

2.16.1 Separadores entre fases

El dispositivo de control de galloping más usado es el separador entre fases. Los separadores de entre fases rígida y flexible se han utilizado en líneas de 115, 230 y 500 kV desde los años 1970. Los primeros separadores rígidos se ensamblan a partir de secciones de aisladores cerámicos unidos con un tubo de aluminio, y se unen a los conductores utilizando grapas de suspensión estándar. Estos separadores son pesados y difíciles de manejar e instalar.

En la figura 2.20 se muestra la instalación de estos separadores.

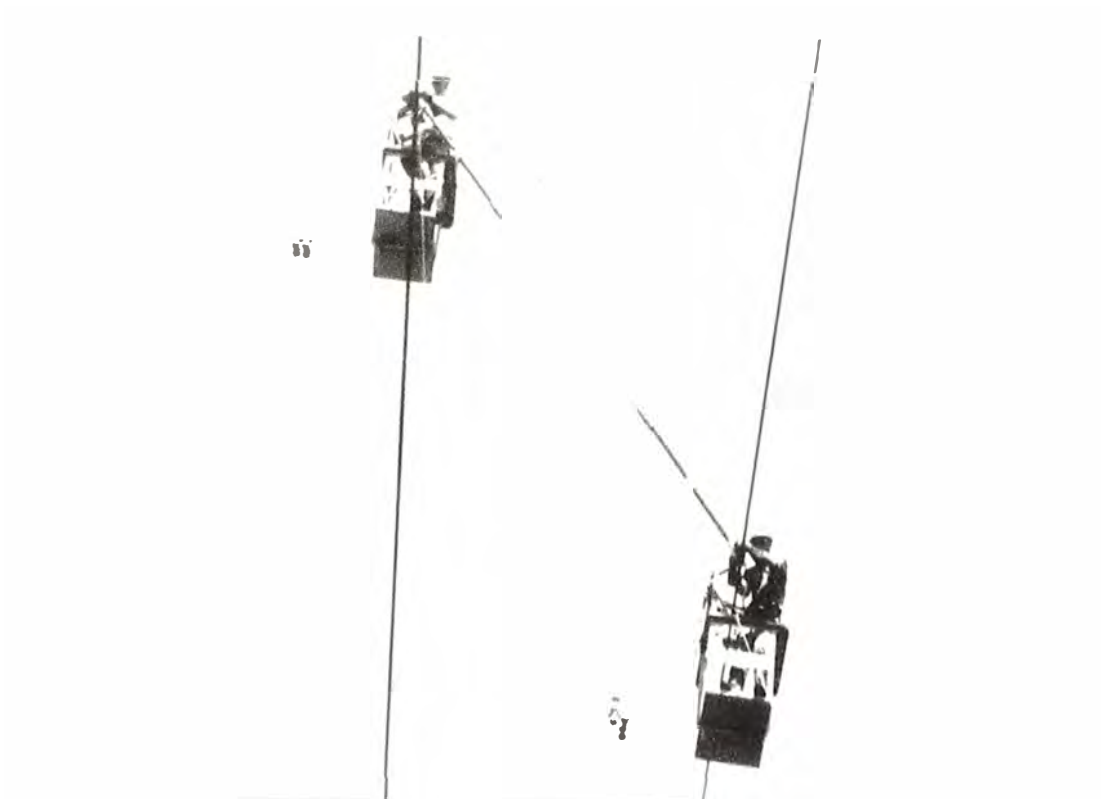


Fig. 2.20 Separadores de interfase rígidos (Havard, 1978) [12].

Algunos separadores rígidos primeros sufrieron roturas en las secciones de aislamiento debido a las fuerzas de compresión elevadas que se producen durante el galloping, y hubo fallas en las uniones soldadas en los extremos del tubo central de aluminio. Más tarde aisladores poliméricos sustituyeron a las secciones de cerámica creando un conjunto más ligero y más manejable, pero todavía rígido como se muestra en la figura 2.21.



Fig. 2.21 Separadores rígido híbrido de 115 kV (Pon, 1982) [12].

Diseños posteriores se hicieron más flexibles a través de las articulaciones dentro de la longitud de los separadores, manteniendo inicialmente la sección central de metal, una muestra de este tipo de separador se muestra en la figura 2.22 para una línea de haz de cuatro conductores de 500 kV.



Fig. 2.22 Separador flexible para el uso en 500 kV (Pon, 1982) [12].

Diseños posteriores se utilizan gomas de varilla de fibra de vidrio, cubierto de silicona en las secciones de metal; estos cambios crean efectivamente una cadena de enlaces con aislamiento entre las fases, dichos diseños fueron utilizados para líneas de 230 y 500 kV. Las articulaciones están puenteadas con tiras flexibles de unión de metal para eliminar la formación de arcos de movimientos de las articulaciones sueltas. Además anillos de corona se montan en los extremos de los cobertizos de los aisladores poliméricos para reducir el gradiente de campo eléctrico y minimizar el daño a los cobertizos de formación de arcos como se muestra en la figuras 2.23 y 2.24.

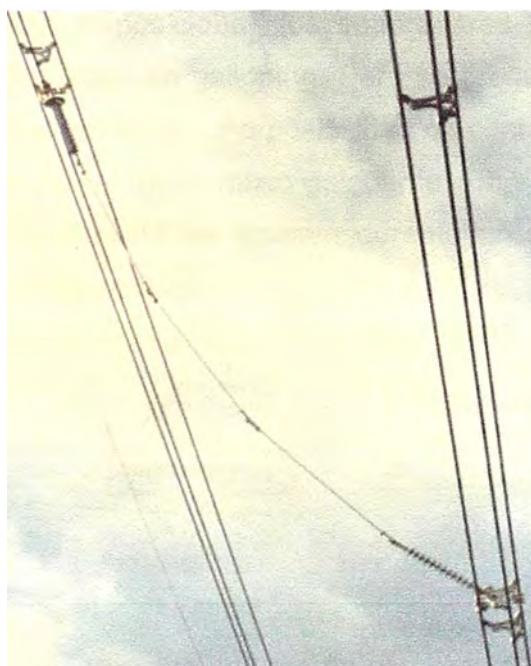


Fig. 2.23 Separador flexible polimérico de interfase en una línea de 500 kV con haz triple en Manitoba Hydro (Pon y Havard, 1994) [12].

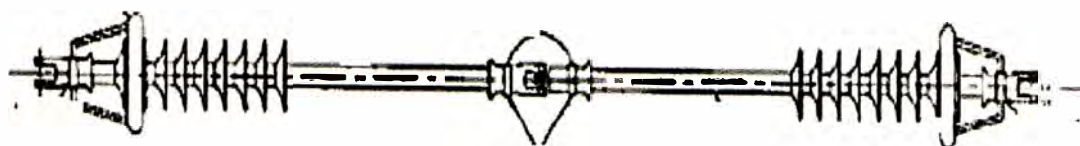


Fig. 2.24 Separador flexible polimérico de interfase para 230 kV (Pon y Havard, 1994) [12].

El separador entre fases que se colocan en uno o más en un vano para hacer cumplir la separación entre fases. El galloping no se impide, pero el movimiento que se produce es forzado en un modo que reduce el movimiento relativo de las fases y por lo tanto la probabilidad de que se produzca fallas bifásicas.

El uso recomendado de dos o cuatro separadores de interfase por espacio de un circuito orientado verticalmente en el año 1979 como se muestra en la figura 2.25.

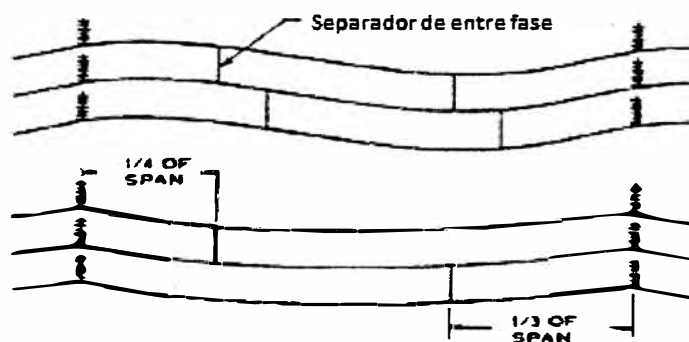


Fig. 2.25 Arreglos alternativos de separadores de interfase en un vano de un circuito vertical (Edwards y Ko, 1979) [11].

En cualquiera de estas disposiciones los separadores entre fases podrían ser eficaces tanto para uno y dos lazos de galloping. Pero se prefiere la alternativa de usar cuatro espaciadores, porque todavía hay una posibilidad de contacto entre las fases en la cuarta parte de un vano durante el modo mixto galopante con solo dos separadores. Un diagrama de este tipo de movimiento se observa durante un evento galopante en las líneas de Ontario Hydro, en la figura 2.26.

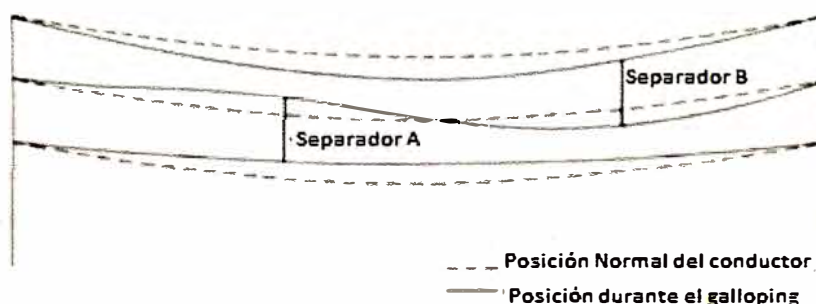


Fig. 2.26 Movimiento del conductor de fase intermedia al galope con dos separadores (Pon, 1982) [11].

En resumen, los separadores de interfase tienen un buen historial para eliminar fallas bifásicas durante el galloping, pero que no impiden los movimientos al galloping.

2.16.2 Dispositivos de control aerodinámicos

a) Alerones de flujo de aire

El galloping también se puede suprimir mediante la modificación aerodinámica a lo largo de la línea, como el alerón de flujo de aire que es de material de PVC. Los alerones de flujo de aire estándar se utilizan principalmente en cables simples de hasta 230 kV, por encima de 230 kV el material de PVC estándar se puede degradar por el alto gradiente eléctrico. Para conductores empaquetados por encima de 230 kV, un material especial de PVC se utiliza para sobrevivir al alto gradiente eléctrico. El alerón de flujo de aire se compone de una sección transversal circular, resistente a la luz ultra violeta, varilla de PVC con un diámetro casi tan grande como el conductor y una longitud de 4,3m. Los alerones de flujo de aire ascienden alrededor del 25% de la longitud de vano y se aplican en dos grupos, que son el cuarto y tres cuartos puntos de los vanos. Un muestra de cómo se instala este alerón de flujo de aire sobre un vano del conductor se muestra en la figura 2.27.

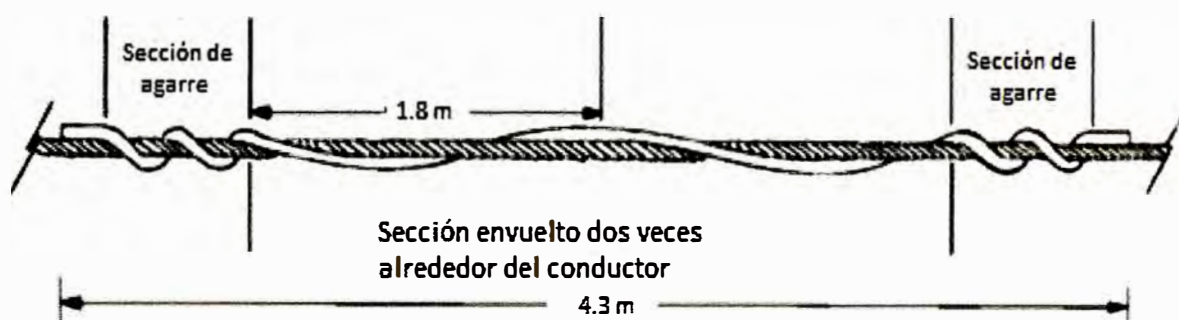


Fig. 2.27 Alerón de flujo de aire sobre los conductores (Whapham, 1982) [12].

b) Pesas Excéntricas

El galloping puede reducirse cuando el perfil del hielo es suave y menos excéntrico. Este dispositivo diseñado para fomentar la oscilación del conductor durante una tormenta de hielo para crear un perfil de hielo más suave con un nivel inferior de elevación aerodinámica y momento de cabeceo. Este dispositivo se usa para haz de conductores.

Las pesas excéntricas son de unos 20 kg, y se montan horizontalmente en direcciones alternas en los subconductores, y luego los movimientos que se producen al galloping tuercen las pesas alrededor de los subconductores y crean un perfil suave de hielo con menor elevación aerodinámica.

Un ejemplo de la instalación en el conductor de las pesas de este dispositivo se muestra en la figura 2.28.

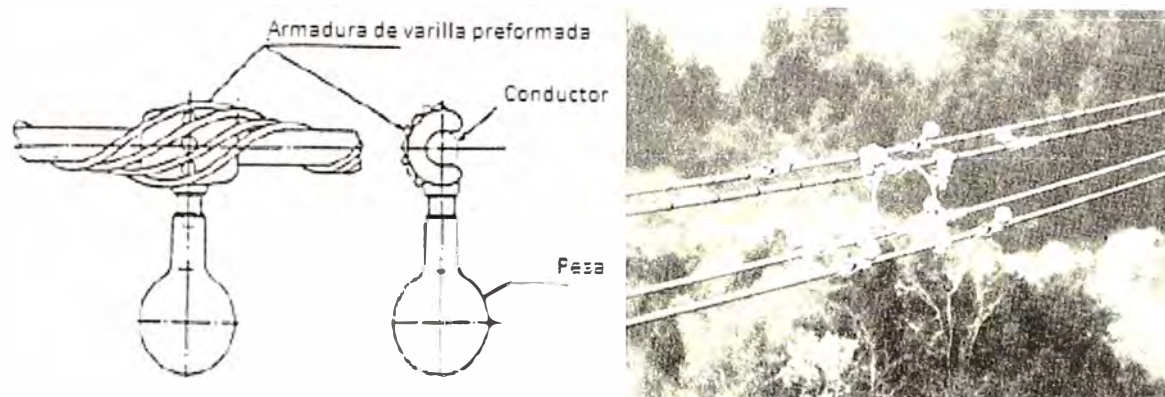


Fig. 2.28 Pesas excéntricas (GCD) para el control del galloping (Otsuki y Kojima) [12].

c) AR Twister

Este dispositivo AR Twister se basa en un principio, que es de crear un perfil de hielo suave, y se usa para los conductores simples. Este dispositivo es un peso unido rígidamente al conductor por una abrazadera de conductor estándar como se muestra en la figura 2.29. Los pesos son alrededor de 3,6 kg. El AR Twister está instalada verticalmente por encima del conductor en la mitad del vano, donde el peso total y el número de dispositivos se eligen para hacer girar a través del conductor entre 90 y 140 grados. Con este dispositivo se obtienen las formas de depósito de hielo con un perfil más suave, lo cual hace menos probable que ocurra galloping. No parece haber ninguna evaluación de campo documentado de este dispositivo.



Fig. 2.29 Instalación de cinco dispositivos AR Twister sobre el conductor [12].

d) AR Windamper

Es dispositivo AR windamper como se muestra en la figura 2.30, empleado a suavizar el perfil del hielo y aumentar la resistencia aerodinámica y la amortiguación aerodinámica del conductor. La disposición tiene características de arrastre capaces de ayudar a girar, sobre una parte suficiente del vano, y evitar una cierta que cantidad de hielo permanezca en el conductor. Existen dispositivos tanto ligero y pesado, y se eligen en función de la rigidez torsional del conductor.



Fig. 2.30 AR Windamper (Richardson, 1979) [12].

e) Amortiguador de arrastre modificado (MDD)

El windamper fue investigado en Ontario Hydro y sometido a los estudios analíticos y modelado al túnel de viento, los resultados incluyen el descubrimiento de que bajo fuertes vientos el dispositivo podría girar lejos de la posición vertical y convertirse en inestable aerodinámicamente. Estos estudios condujeron a una versión más del dispositivo denominado el amortiguador de arrastre modificado o MDD (ver figura 2.31).

El diseño modificado tiene un ligero cambio de ángulo de las dos superficies cóncavas para optimizar las características aerodinámicas. Para estabilizar el comportamiento en caso de fuerte viento, se sugirió la adición de un segundo dispositivo, más pesado y geoméricamente similares en cada vano. Esta versión se instaló con diseño tanto pesado (45 kg) y ligero (14 kg) en cada vano, y este sistema de control se incluyó en los ensayos de campo realizados en líneas operativas de Ontario Hydro (1978). Los dispositivos fueron evaluados bajo condiciones de galloping en líneas de pruebas en conductores individuales y múltiples.

Los resultados obtenidos en los conductores simples comparando las amplitudes de pico a pico de movimiento de conductores no tratados con los conductores utilizando los MDD's en el mismo vano, después de ocho eventos de galloping se muestran que el MDD reduce las amplitudes máximas de 0,85 veces a 0,22 veces la flecha. Esto es una mejora en aproximadamente en un 75%.



Fig. 2.31 Amortiguador de arrastre modificado (MDD) utilizado en los sitios de campo de prueba de Ontario Hydro (Havard, 1978) [12].

f) Controlador aerodinámico galopante (AGC)

Otro dispositivo de control aerodinámico recientemente introducido en el mercado, es el AGC (ver figura 2.32). Este dispositivo incluye la mejora de eficacia aerodinámica, aplicación a todos los tipos de conductores y longitudes de vano, menor peso, mejores sistemas de sujeción, cálculo basado desde en un ordenador de los lugares de instalación y facilidad de instalación. No aparecen datos publicados sobre el desempeño en campo del AGC durante los eventos de galloping reales.



Fig. 2.32 Controlador aerodinámico galopante (2005) [12].

2.16.3 Dispositivos de control de torsión

a) Dispositivo de control de torsión (TCD)

A principios el dispositivo para el control de galloping de conductores de haz doble, que reconocen y utilizan los movimientos de torsión, es el TCD (ver figura 2.33). El amortiguador de TCD es un resorte de torsión ajustado y un sistema de inercia. Dos o tres de estos dispositivos se han montado en cada haz de conductor del vano. Bajos condiciones que inducen galloping el amortiguador oscila el haz de conductor y reduce la amplitud global de galloping.

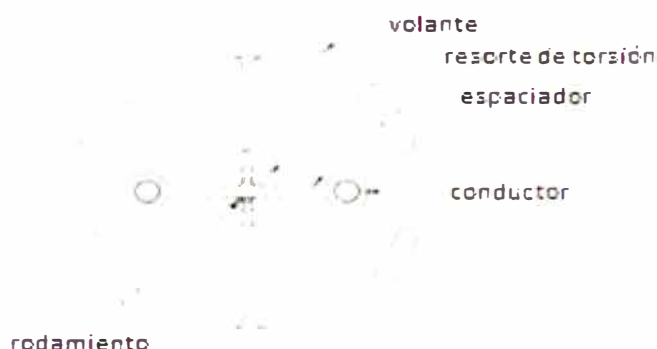


Fig. 2.33 Dispositivo de control de la torsión (TCD) para conductores de haz doble (Sasaki, 1986) [12].

b) Dispositivo de control galopante (GCD)

Este dispositivo llamado control de galope o GCD como se muestra en la figura 2.34, unido a un sistema de inercia, es utilizado en haz de conductor. Este método se ha extendido a grandes haces y un ejemplo de instalación en un haz de seis subconductores

se muestra en la figura 2.35.

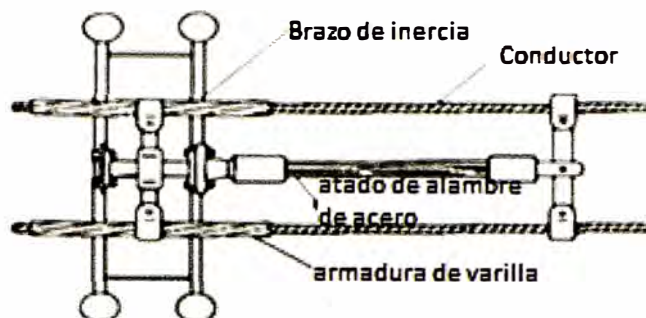


Fig. 2.34 Dispositivo de control de galloping (GCD) para conductores de haz doble (Fujii, 1997) [12].

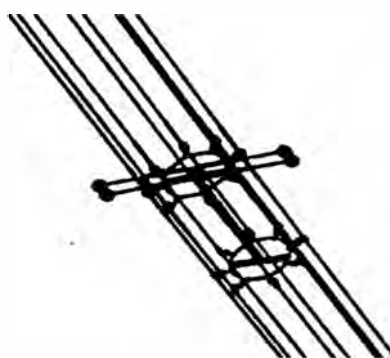


Fig. 2.35 Dispositivo de control de galloping instalado en una prueba en un haz de seis conductores (Yanagisawa, 1990) [12].

Un ejemplo de su eficacia se muestra en un vano de 360 m de largo de una zona montañosa de Japón, durante un evento de galloping inducido a nieve húmeda (figura 2.36). En esta figura se muestra las orbitas de movimiento de las dos fases, una con los controles de galloping y el otro sin control, donde se muestra la oscilación de 4,2 m vertical y 1,2 m horizontal en la fase sin control y 1,1 m vertical con 0,3 m horizontal en la fase con control de galloping.

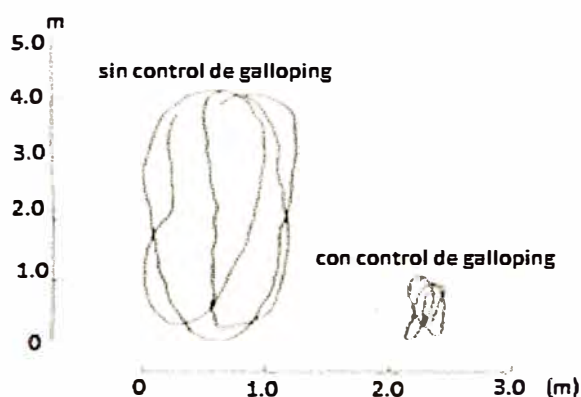


Fig. 2.36 Orbitas de movimiento del conductor durante el galloping de un haz de seis conductores en un vano de prueba (Yanagisawa, 1990) [12].

c) Péndulos de desintonización para grandes conductores individuales

Estos dispositivos fueron diseñados para controlar la frecuencia de oscilación torsional del vano y que le mantenga separada de las frecuencias naturales verticales durante los eventos de formación de hielo. El más exitoso de estos dispositivos es el péndulo de desintonización (ver figura 2.37).

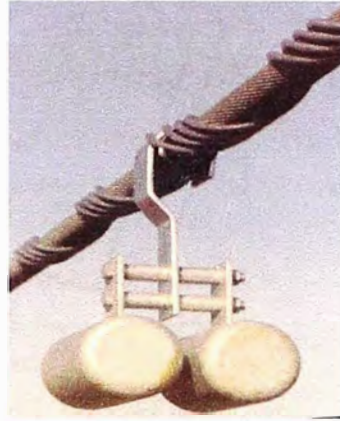


Fig. 2.37 Péndulo de desintonización para conductores simples (Havard, 1997) [12].

En la figura 2.38 se muestra la configuración típica de un solo conductor helado, que ilustra el peso y las fuerzas de viento que actúan sobre la sección transversal.

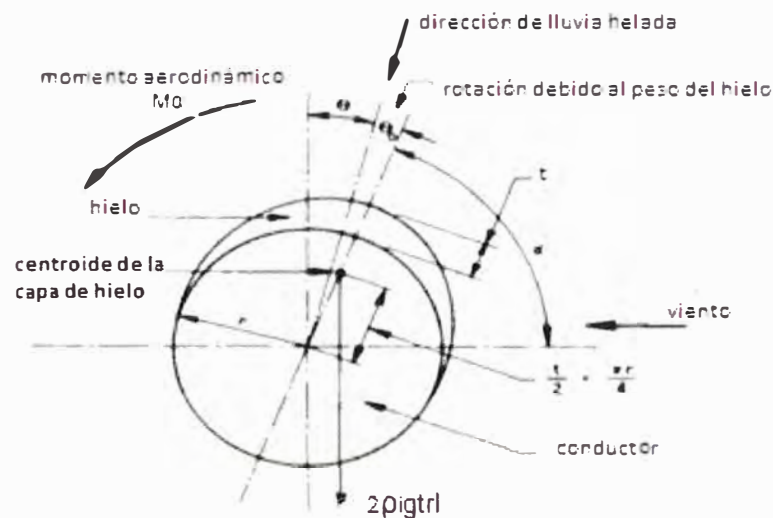


Fig. 2.38 Presentación esquemática de fuerzas de peso y el viento en un conductor con hielo (Havard, 1979) [12].

Además las fuerzas adicionales cuando se añade un péndulo de desintonización se incluyen en la figura 2.39. Las propiedades necesarias en la selección de los parámetros para los péndulos de desintonización son las frecuencias naturales del vano en la vertical y frecuencia de oscilación torsional con hielo y viento aplicado.

También se supone que las fuerzas de hielo, el viento y el momento de los péndulos, son constantes en cada vano.

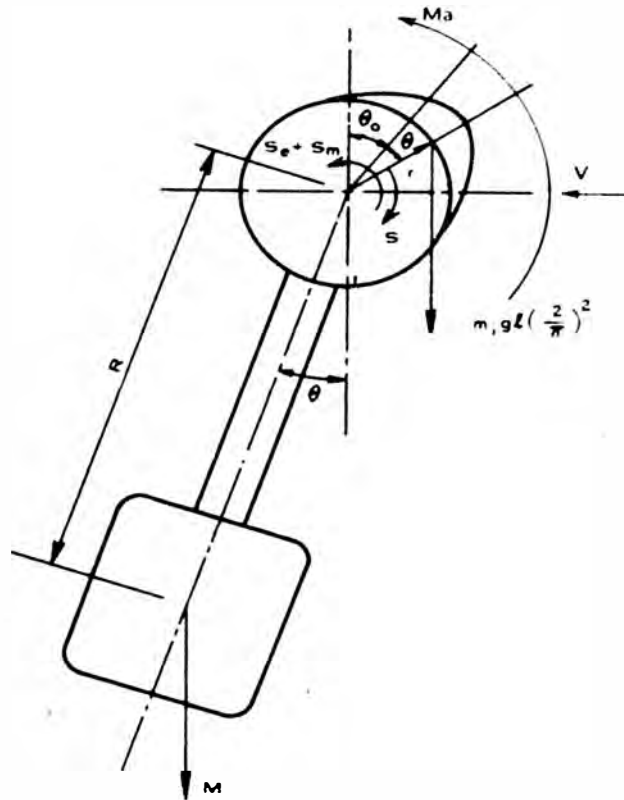


Fig. 2.39 Presentación esquemática de fuerzas de peso y el viento en un conductor con hielo con un péndulo de desintonización adjunto (Havard, 1979) [12].

La tensión es el valor calculado a la temperatura galopante, incluyendo el efecto del peso de hielo y los péndulos. Las dos ecuaciones siguientes se asumen que los extremos del vano del conductor están fijados. La frecuencia vertical natural fundamental está dada por:

$$f_{v1} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m+m_{ice}+\frac{M}{L}}} \quad (2.26)$$

Dónde:

- L : Longitud del vano
T : Tensión del conductor
M : Masa por unidad de longitud del conductor
M_{ice} : Masa de hielo por unidad de longitud del conductor
M : Masa total de todos los péndulos en un vano

La frecuencia fundamental de torsión en un vano f_{t1} , está dado por:

$$f_{t1} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{4s-2m_{ice}gdL^2 \cos(\theta+\theta_0) \frac{dM\alpha}{d\alpha} + MgRL \cos \theta}{d^2 \left(\frac{m}{2} + m_{ice} \right) + \frac{\pi^2 MR^2}{L}}} \quad (2.27)$$

Dónde:

- S : Rigidez torsional del conductor

g	:	Constante gravitacional
d	:	Diámetro del conductor
M _α	:	Momento aerodinámico por unidad de longitud del conductor
R	:	Longitud de brazo
M	:	Masa total de todos los péndulos en un vano

La longitud del brazo esta entre 150 y 450 mm, y se elige para controlar las frecuencia natural de torsión de modo que sea al menos dos veces la frecuencia vertical bajo la carga de diseño de hielo.

La cantidad de masa por vano esta entre 34 y 68 kg, dependiendo del tamaño del conductor y longitud de vano; la cantidad de masa se elige para mantener la diferencia de frecuencias hasta un cantidad preseleccionada de momento de vuelco debido al peso del hielo y de la fuerza del viento, con base en la experiencia con aplicaciones en líneas eléctricas.

d) Péndulos de desintonización para haz de conductores

Los sitios donde se realizan las pruebas de campo para estos dispositivos de control para haz de conductores en líneas aéreas son EE.UU, Europa y Canadá. La principal diferencia entre el comportamiento de los conductores de haz frente a los conductores simples es que la tensión del conductor contribuye a la rigidez a la torsión y la frecuencia natural de torsión. También se supone que las fuerzas de hielo y viento, y el momento de estabilización de los péndulos, son constantes a través del vano. La tensión es el valor calculado a la temperatura galopante, incluyendo el efecto del peso de hielo y los péndulos.

Todos los símbolos de las ecuaciones tienen el mismo significado de las ecuaciones anteriores para conductores simples y el único término que aparece es el n_c que es el número de subconductores en el haz, la frecuencia vertical natural fundamental para un haz viene dado por:

$$f_{v1} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m+m_{ice}+\frac{M}{n_cL}}} \quad (2.28)$$

La frecuencia fundamental de torsión de un vano de haz, f_{t1} está dado por:

$$f_{t1} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Td^2 \cos \theta + 4s + \frac{MgRL \cos \theta}{n_c} - \frac{2m_{ice}gdL^2 \cos(\theta+\theta_0)}{\pi^2}}{d^2(m+m_{ice}) + \frac{\pi^2 MR^2}{n_cL}}} \quad (2.29)$$

En las figuras 2.40 y 2.41 se muestran la instalación de estos péndulos de desintonización en conductores de haz en líneas existentes y líneas de prueba, para controlar el efecto galloping.



Fig. 2.40 Péndulo de desintonización instalado en un conductor de haz doble en Nebraska (Pon y Havard, 1994) [12].

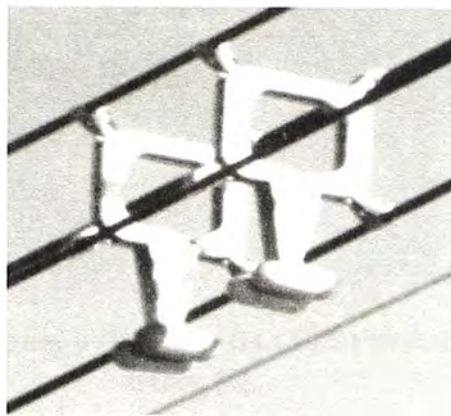


Fig. 2.41 Péndulo de desintonización instalado en un haz de cuatro conductores en Ontario (Pon y Havard, 1990) [12].

e) Amortiguador torsional y desafinado (TDD)

El dispositivo de amortiguador de torsión y desafinado o TDD de control de galloping que ha sido diseñado para hacer utilizado en haz de conductor durante el galloping para activar amortiguación (ver figura 2.42). Estos dispositivos están sintonizados a oscilar a la frecuencia fundamental galopante y cambiar la frecuencia de resonancia del vano lejos de esa frecuencia. El dispositivo está conectado a un haz doble con abrazaderas metálicas. Un brazo de inercia con una masa concentradora en cada extremo, gira alrededor de un cojinete de 505 mm por debajo del haz. El centroide del dispositivo es por debajo del haz y por lo que también actúa como un péndulo. La amortiguación se genera al girar los rodillos de goma instalados dentro de los tubos horizontales, que se sitúan debajo de la línea. El dispositivo pesa aproximadamente 30 kg y su centro de masa esta aproximadamente a 350 mm por debajo del haz. Otras pruebas con el diseño actual de los TDD se muestran en la figura 2.43, donde se han realizado en un sitio de terreno abierto propensos a fuertes vientos en Kazajistán (Lilien y Vinogradov, 2002).



Fig. 2.42 Amortiguador torsional y desafinado (TDD) [8].



Fig. 2.43 Amortiguador torsional y desafinado (TDD) instalado en una haz de línea triple [8].

Se llevaron a cabo ensayos preliminares de prototipos del dispositivo en un vano de 310 m de largo de la línea de operación de 380 kV, 2 x 620 mm². Esto se encuentra a una altura de 550 m sobre el nivel del mar, en la región de Ardenes en Bélgica, y las pruebas continuaron durante un periodo de dos años (1993). Este ensayo produce datos de un evento de galloping, durante del cual se midieron las tensiones en una fase con el TDD y el de una fase similar sin TDD. Los máximos de las tensiones de pico a pico fueron de 10 kN sin el TDD y se reducen a 1,3 kN con el TDD (ver figura 2.44).

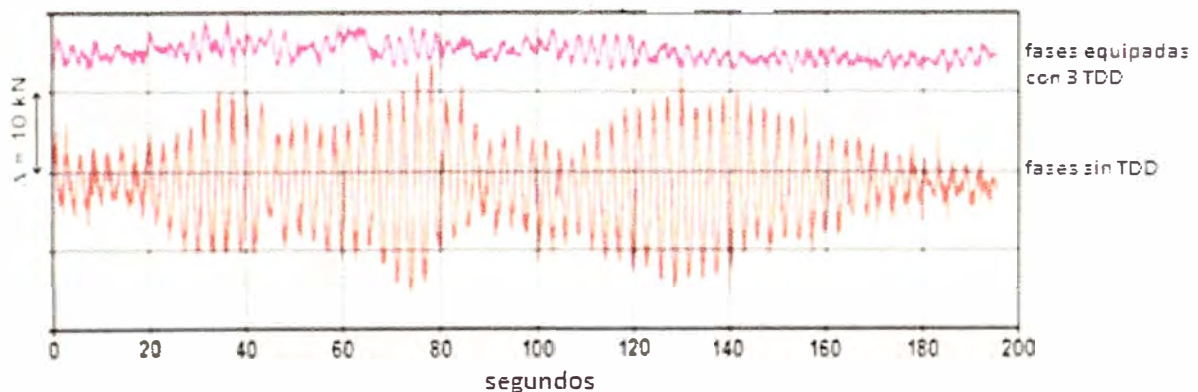


Fig. 2.44 Observación de la eficiencia del TDD en la operación de la línea de 380 kV en Bélgica [3].

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó en el capítulo anterior de los factores que influyen para que se forme el efecto galloping en líneas de transmisión. En este capítulo se detallara la descripción del problema y las consecuencias negativas que trae este efecto en las líneas de transmisión ya montadas.

3.1 Daños y Consecuencias

El galloping ha causado varios tipos de daño en las estructuras, como daños debido a grande fuerzas que aplican las ondas o los lazos de galloping a los soportes; por ejemplo crucetas dañadas en estructuras de metal y madera, pasadores dañados en cadenas de aisladores por consecuencia se han desacoplado, pernos rotos y gastados en los soportes, etc.

Cargas de choque dinámico ocurren cuando una onda fuerte de galloping de frente se ve reflejado en una torre; reflexiones repetidas pueden causar la caída de los amortiguadores. También cargas dinámicas han causado aflojamiento de los postes de madero del suelo. Grandes amplitudes del galloping permiten fallas bifásicas entre fases o entre fase y tierra, y daños en la superficie del conductor por formación de arcos.

Interrupciones forzadas causadas por galloping da resultado las pérdidas de ingresos y en ocasiones costos asociados con el restablecimiento del servicio. Esta consecuencia se considera en general más severa que el daño directo a las líneas debido al alto costo que genera.

3.2 Costos de Galloping

El galloping no es solo un fenómeno espectacular y molesto, en algunos casos puede tener consecuencias muy costosas. Los costos asociados con eventos de galloping pueden ser debido a los componentes dañados que requieren inspección y reparación.

Los costos pueden variar desde muy bajo a muy alto, dependiendo de las circunstancias de cada caso.

También hay costos relacionados con la prevención de galloping. El aumento de espaciamientos del conductor y el uso de los dispositivos anti-galloping generan costos directos, mientras que las inversiones en los estudios, la investigación y el desarrollo también deben tenerse en cuenta.

3.2.1 Costos relacionados con eventos galopantes

a) Reparación de daños

Galloping no es necesariamente daños a los componentes de las líneas de transmisión. Cuando se produce el galloping, el daño puede variar de leves, tales como quemaduras de filamentos del conductor, a extrema, tales como el colapso de la línea como el resultado de rotura del conductor o sobrecarga dinámicas. Los costos de reparación pueden variar en gran medida dependiendo de la magnitud de los daños.

Reparación de los hilos de conductores rotos puede costar unos cuantos miles de dólares para las líneas de fácil acceso. Para las líneas en área remota o los que no son de fácil acceso, tales como cruces de ríos, técnicas especiales pueden tener que ser utilizados como el trabajo de helicóptero. Los costos pueden aumentar de manera significativa.

Aunque es raro, se han producido derrumbes de líneas debidos al galloping. Por ejemplo se registró un fallo en cascada de un tramo de una línea de alta tensión durante una tormenta de hielo de 1998 que afecto el noreste de américa del norte. Otro caso se registró en 1997, cuando dos torres de 120 kV se derrumbaron debido a la rotura del conductor en condiciones de galloping. Los costos van desde no menos de \$100, 000 de las dos torres hasta de millones de dólares para la línea de alta tensión en cascada en 1998. La experiencia de Rusia muestra que el colapso de la torre puede costar \$50, 000 por torres de 110 a 220 kV, mientras que la reparación de una cadena de aisladores de suspensión puede costar de 2 a 4 mil dólares.

b) Inspección

Un evento de galloping causa salidas repetidas de la línea y requiere una inspección de emergencia para identificar la causa y aplicar medidas correctivas. Esto tiene que hacerse en condiciones meteorológicas adversas en momentos impredecibles.

Dependiendo de las prácticas de la empresa de servicios públicos, las líneas que galopaban posiblemente tengan que llevar a cabo una inspección para detectar cualquier daño. Esto puede hacerse ya sea por un equipo de tierra o en helicóptero. Los costos pueden no aparecer significativo si esta obra es considerada como parte de tareas normales de los equipos de mantenimientos. Sin embargo, ya que el trabajo es a menudo no planificado, puede introducir costos adicionales.

c) Pérdidas de ingresos

La mayoría de las veces, la salida de la línea debido al galloping será de corta duración, con efectos significantes sobre los ingresos de la empresa que presta los servicios. En algunos casos fallas bifásicas repetidas harán que los sistemas de protección automáticas habrán el circuito hasta que la causa de la falla sea identificado y reparado.

Una pérdida real de ingresos dará lugar si no hay una ruta alternativa para llegar al

cliente y el costo del galloping a continuación puede ser significativo.

d) La fiabilidad del sistema y la calidad del servicio

No hay duda de que muchas empresas de servicios eléctricos están cada vez más preocupados por el impacto de galloping en la fiabilidad y la calidad de servicio, pero se establece costos de galloping. Puede que no halla costos directos, ya que los clientes rara vez obtienen una indemnización por un fallo de energía de corta duración. Los costos indirectos pueden ciertamente ser importante, por ejemplo, puede ser necesario contar con una línea de respaldo para importantes clientes industriales. También puede haber un riesgo de perder clientes de alta tecnología que son muy sensibles a la calidad de energía.

3.2.2 Los impactos sociales de las interrupciones debidas al galloping

a) Impacto de la imagen ante los clientes

Todas las interrupciones no programadas en el suministro a los clientes dan lugar a la publicidad adversa. La medida de la publicidad adversa se verá influenciada por un número de factores: por ejemplo, los números de clientes afectados, la duración de la falla y la época de año cuando se produce el fallo. Si los cortes son frecuentes y duran por largos periodos durante la temporada de invierno, los concesionarios de los sistemas de transmisión pueden esperar una publicidad negativa de los medios de comunicación nacionales. Esto puede influir negativamente en la confianza pública en la empresa y también los valores de las acciones de la sociedad anónimas. Sin embargo, puede haber un lado positivo a las fallas en que el aumento de la conciencia pública sobre la importancia y la vulnerabilidad de los sistemas de transmisión se pueden utilizar para ayudar a justificar las inversiones en mantenimiento o en la aplicación de contramedidas.

b) Impacto en los hospitales

Interrupciones causadas por el galloping son normalmente corto, pero incluso las interrupciones breves pueden ser críticos en los hospitales. La mayoría de los países exigen que los hospitales tengan respaldo de fuentes de alimentación en caso de cortes de energía, por lo que el impacto en los hospitales debe ser limitado. Si la fuente de alimentación de reserva falla, lo más probables es que la crítica pública estará dirigida a los hospitales y no a la utilidad en cuestión.

c) Impacto en la industria de la producción

Algunos tipos de industria son muy sensibles tanto a los cortes de energía y calidad de energía. Las industrias pesadas como las mineras y de fundiciones de metales, pueden tener enormes costos iniciales si una larga interrupción hace que cese de la producción. Otras industrias como las fábricas de papel, requieren una buena calidad de la energía para evitar interrupciones en la producción. En algunos países, las empresas de servicios eléctricos tienen que pagar una indemnización a clientes industriales de la energía que no

se ha suministrado. Por ejemplo en Noruega un breve apagón que duro pocos minutos puede llegar a costar más de \$100, 000 y una interrupción en una fundición de aluminio podría costar a la empresa de electricidad de aproximadamente \$150, 000 por hora. En este caso los costos de compensación podrían ser fácilmente muchos más grande que los costos de reparación de daños a las torres y componentes de la línea si el corte fuera a durar varias horas.

d) Impacto en la confianza y la seguridad de la población

Apagones siempre tendrán un impacto negativo en la confianza en la utilidad, sobre todo entre los clientes afectados. Normalmente los clientes no saben la razón de los apagones y probablemente no tendrán ningún conocimiento del fenómeno de galloping al conductor. Las personas que viven en las proximidades de líneas galopantes pueden observar los fenómenos y preocuparse por el daño a la propiedad o de la persona debido a conductores rotos o caída de las torres. Tomar medidas para mantener a la gente lejos de la línea de galloping. Esta situación ocurrió cuando un haz de cuatro conductores que empezó a galopar sobre una carretera y el tráfico tuvo que ser detenido por unas horas. En otro caso, durante la tormenta de hielo de 1998 en Canadá, el acceso a la zona de la ciudad de Montreal fue cerrado debido a una línea de haz doble galopante.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DE SEPARADORES PARA CONTROLAR EL EFECTO GALLOPING PARA EL PROYECTO LINEA DE TRANSMISIÓN 220 kV CHAGLLA – PARAGSHA

La Línea de Transmisión 220 kV Chaglla – Paragsha, forma parte integrante del Proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla de la Empresa de generación de Huallaga S.A. Geográficamente el área del proyecto se ubica en los departamentos de Huánuco y Cerro de Pasco.

La línea de transmisión a proyectar deberá transmitir en condiciones normales 230 MW por terna y tendrá una longitud total aproximada de 127,5 km, ubicando a lo largo de la ruta un total de cuarenta y uno (41) vértices, siendo el mayor ángulo aproximadamente de 58° y al llegar a la subestación Paragsha es aproximadamente a 80°. En general el área del proyecto presentara terrenos con topografía ondulada.

En este capítulo tiene por finalidad la instalación de separadores entre las fases de la línea, para controlar el efecto galloping así evitar fallas bifásicas. Las condiciones climáticas donde se va hacer el tendido de la línea en 220 kV, existe la probabilidad de que ocurra galloping.

Para saber que vanos, durante el recorrido de la línea va a ocurrir galloping, se utilizó el programa PLS-CADD 9.20, el cual hace cálculos para las combinaciones de casos de climas de acuerdo con el boletín REA 1724E-200 (REA, 1992) o el reporte CIGRE 322 (CIGRE, junio 2007), para que ocurra galloping en los vanos de la línea, el programa nos dará un reporte donde nos indica en que vanos de la línea ocurre galloping, además el programa nos mostrara de manera gráfica las elipses galopantes que forman los conductores. En el anexo N°1 se mostrará las ecuaciones con las cuales generan las elipses galopantes según el boletín REA 1724E-200.

4.1 Objetivo

El objetivo principal es controlar el galloping, evitando fallas bifásicas y que salga fuera de servicio debido al galloping, además se detallara como se van a instalar los separadores en los vanos galopantes de la línea.

4.2 Características Generales de la Línea de Transmisión

La Línea de Transmisión 220 kV Chaglla - Paragsha, presenta las siguientes características:

- Nivel de tensión : 220 kV
- Número de circuitos : Dos (02)
- Tipo de estructuras : Metálicas de acero en celosía
- Conductor : 2 conductores por fase AAAC
2x700 MCM (2 x 355mm²)
- Cable de guarda óptico : OPGW 108 mm²
- Cable de guarda : EHS 70 mm²
- Aislamiento con Cadenas de Aisladores Cerámicos estándar : h < 3000 msnm, Suspensión 19u y Anclaje 20u; CR 120kN
h > 3000 msnm , Suspensión 19u y Anclaje 20u; CR 210 kN
- Longitud : 127,5 km
- Capacidad de transmisión : 230 MW por circuito
- Subestación de salida : SE Chaglla (930 msnm)
- Subestación de llegada : SE Paragsha (4 371 msnm)

4.3 Hipótesis de Carga del Conductor

Para el cálculo mecánico del conductor se han considerado las siguientes hipótesis de acuerdo a las condiciones ambientales para las zonas respectivas del Proyecto:

Tabla 4.1 Zona de Carga I: para altitudes < 3 000 msnm

N°	DESCRIPCION	CONDICIONES	CONDUCTOR
	HIPOTESIS 1	E.D.S.	
1.1	Temperatura	°C	18
1.2	Presión de viento	Pa	0
1.3	Esfuerzo	MPa	51.8
	HIPOTESIS 2	VIENTO MAXIMO	
2.1	Temperatura	°C	10
2.2	Presión de viento	Pa	414.4
2.3	Tense Máximo	% de Tr	60
	HIPOTESIS 3	MINIMA TEMPERATURA	
3.1	Temperatura	°C	0
3.2	Presión de viento	Pa	0
3.3	Tense Máximo	% de Tr	33
	HIPOTESIS 4	FLECHA MAXIMA	
4.1	Temperatura	°C	$T = 55^{\circ}\text{C} + \text{Creep}$
4.2	Presión de viento	Pa	0
	HIPOTESIS 5	OSCILACION DE CADENA	
5.1	Temperatura	°C	18
5.2	Presión de viento	Pa	290.0

4.4 Características del conductor

Las características del conductor de fase de la Línea en 220 kV son las siguientes:

- Nivel de Tensión : 220 kV
- Denominación : AAAC
- Sección nominal : 2 x 700 MCM
- Sección real : 2 x 355 mm²
- Diámetro exterior : 2 x 24,45 mm
- Masa unitaria : 2 x 0,978 kg/m
- Carga de rotura : 10 417kgf (102,16 kN)
- Resistencia en CC a 20° C : 0,0944 Ohm/km
- Coeficiente de resistividad : 0,0036 1/°C
- Módulo de elasticidad final : 57 kN/mm²
- Coeficiente de dilatación : 0,000023 1/°C

4.5 Aislamiento

El aislamiento a instalar será con cadenas de aisladores estándar de vidrio templado o cerámico, y será en base a cadenas de aisladores tipo estándar, para ser utilizados en posición de anclaje y orientación. En la tabla 4.4 se muestran las cantidades y características de los aisladores dependiendo su altitud

Tabla 4.4 Cantidad de Aisladores por cadenas de acuerdo a la altitud.

Altitudes (msnm)	Cadena en Suspensión	Cadena en Anclaje	Carga de Rotura (kN)
<3 000	19	20	120
>=3 000	19	20	210

Los herrajes de la cadena de aisladores de suspensión y anclaje deben de resistir hasta 120 kN y 210 kN respectivamente.

4.6 Siluetas de las Torres de Celosía para el Proyecto Línea de Transmisión 220 kV Chaglla – Paragsha.

Con la finalidad de cubrir ampliamente las necesidades de la línea de transmisión con respecto a los vértices definidos en el trazo de ruta y además que nos permita cruzar grandes quebradas, se definen los siguientes tipos de estructuras:

- Estructura de suspensión tipo SPS (2°).
- Estructura de ángulo mediano y vano grande tipo SPA (30°).
- Estructura de ángulo mayor hasta 60° y como estructura Terminal hasta 80°, tipo SPT.
- Estructura de Transposición SPX (2°).

- Estructura para grandes vanos SPL (2°)

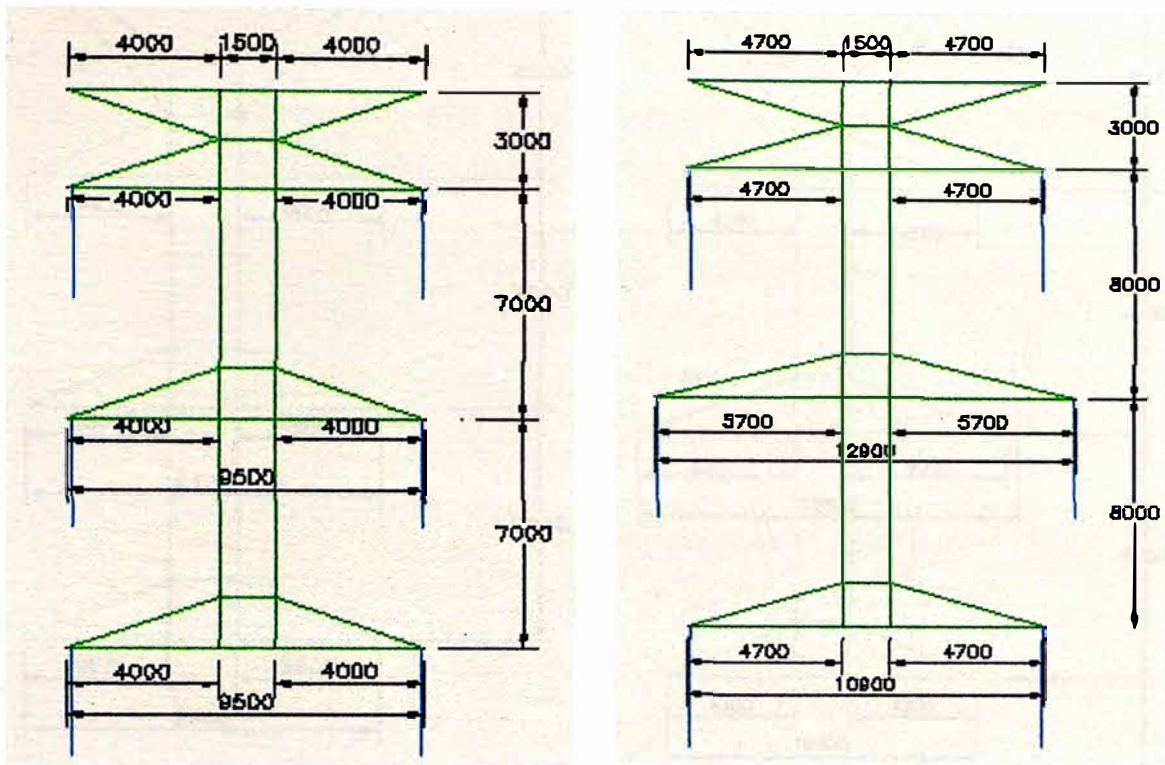


Fig. 4.1 Estructuras de Suspensión, a la izquierda SPS-1 y la derecha SPS-2.

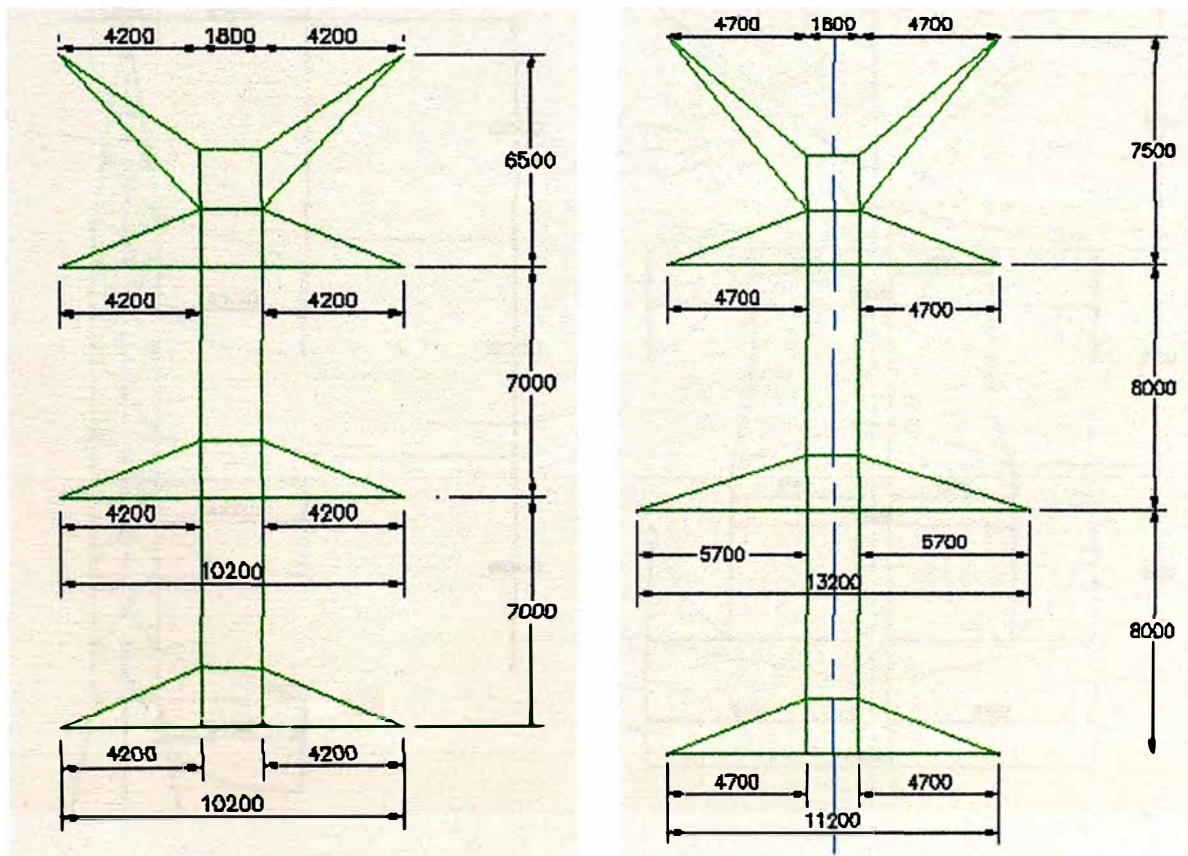


Fig. 4.2 Estructuras Angular, a la izquierda SPA-1 y la derecha SPA-2.

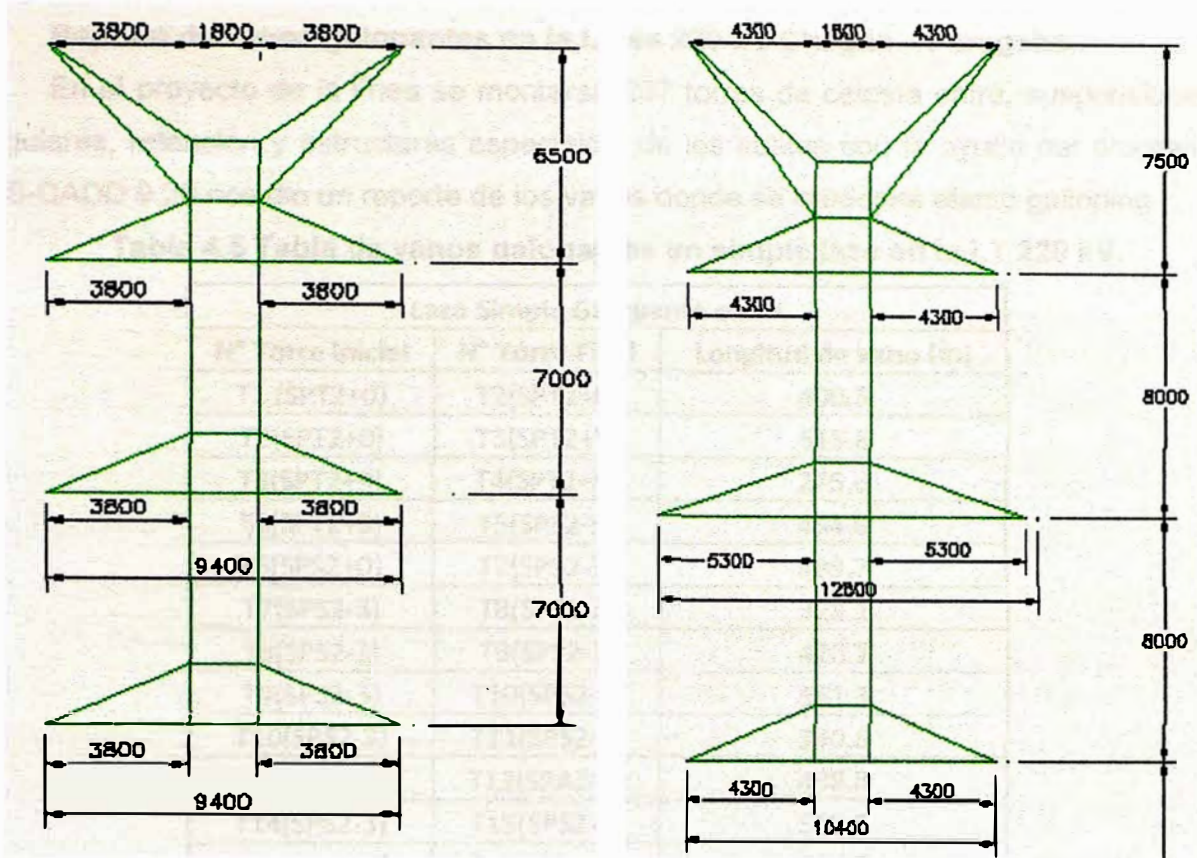


Fig. 4.3 Estructuras Angular-Terminal, a la izquierda SPT-1 y la derecha SPT-2

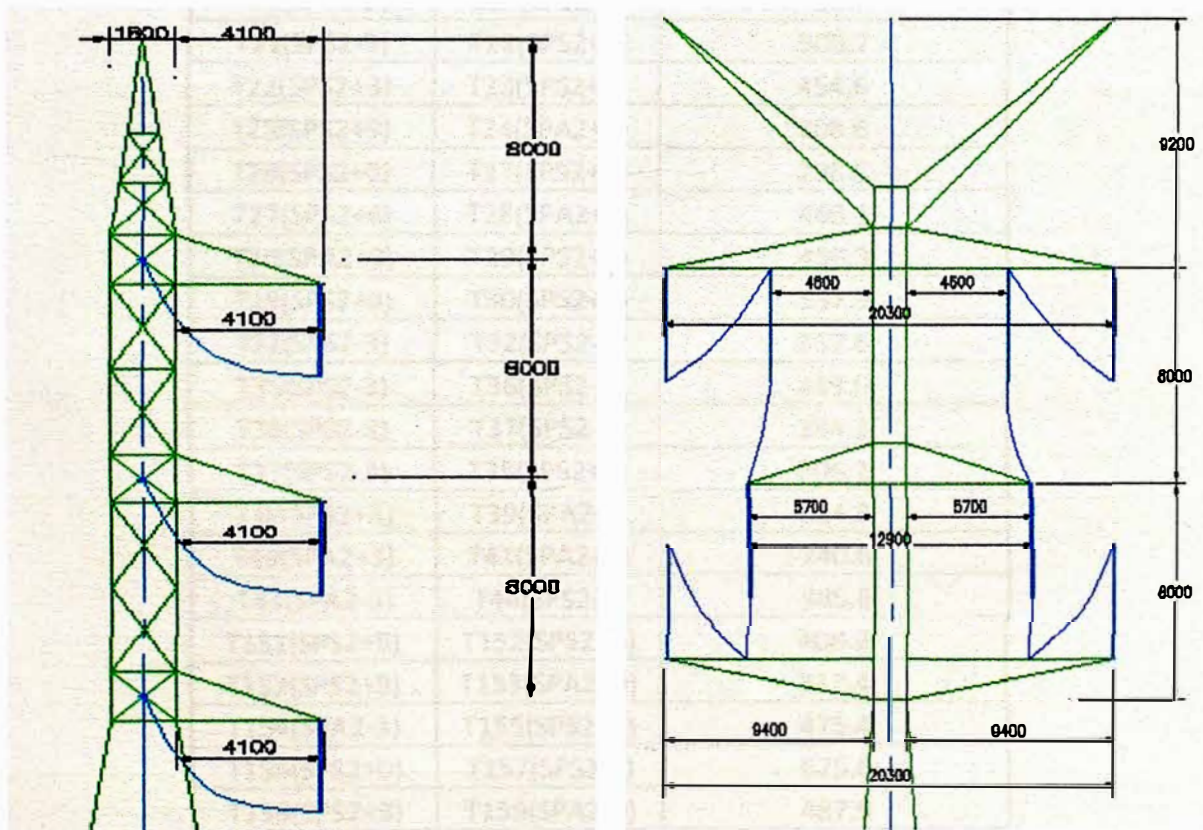


Fig. 4.4 Estructuras Especiales, a la izquierda SPL y la derecha Estructura de Transposición SPX

4.7 Reporte de vanos galopantes en la Línea 220 kV Chaglla – Paragsha.

En el proyecto de la línea se montaran 297 torres de celosía entre, suspensiones, angulares, retención y estructuras especiales, de los cuales con la ayuda del programa PLS-CADD 9.20 nos dio un reporte de los vanos donde se producirá efecto galloping.

Tabla 4.5 Tabla de vanos galopantes en simple lazo en la LT 220 kV.

Lazo Simple Galopante entre		
N° Torre Inicial	N° Torre Final	Longitud de vano (m)
T1 (SPT2+0)	T2(SPT2+0)	400.5
T2(SPT2+0)	T3(SPT2+9)	615.8
T3(SPT2+9)	T4(SPT2+9)	275.6
T4(SPT2+9)	T5(SPS2-3)	464.6
T6(SPS2+0)	T7(SPS2-3)	489.7
T7(SPS2-3)	T8(SPS2-3)	328.1
T8(SPS2-3)	T9(SPS2-3)	426.2
T9(SPS2-3)	T10(SPS2-3)	551.3
T10(SPS2-3)	T11(SPS2-3)	340.6
T11(SPS2-3)	T12(SPA2-3)	438.8
T14(SPS2-3)	T15(SPS2-3)	563.5
T18(SPS2+6)	T19(SPA2-3)	314.8
T19(SPA-3)	T20(SPS2-3)	457.6
T20(SPS2-3)	T21(SPS2-3)	486.7
T21(SPS2-3)	T22(SPS2+3)	500.7
T22(SPS2+3)	T23(SPS2+9)	454.6
T23(SPS2+9)	T24(SPA2+3)	308.6
T26(SPS2+0)	T27(SPS2+6)	298.5
T27(SPS2+6)	T28(SPA2+0)	463.1
T28(SPA2+0)	T29(SPS2+0)	450.3
T29(SPS2+0)	T30(SPS2+3)	532.9
T31(SPS2-3)	T32(SPS2-3)	357.6
T35(SPS2-3)	T36(SPS2-3)	419.5
T36(SPS2-3)	T37(SPS2-3)	294.2
T37(SPS2-3)	T38(SPS2+3)	306.2
T38(SPS2+3)	T39(SPA2-3)	614.9
T40(SPA2+3)	T41(SPA2+0)	240.6
T43(SPA2-3)	T44(SPS2-3)	385.6
T151(SPS2+9)	T152(SPS2+9)	408.2
T152(SPS2+9)	T153(SPA2+9)	337.4
T154(SPA2-3)	T155(SPS2+3)	475.4
T156(SPS2+0)	T157(SPS2-3)	625.6
T158(SPS2+3)	T159(SPA2-3)	487.9
T163(SPA2-3)	T164(SPS2+6)	557.1
T165(SPA2-3)	T166(SPS2+6)	270.2

Tabla 4.6 Tabla de vanos galopantes en doble lazo en la LT 220 kV.

Lazo doble Galopante entre		
N° Torre Inicial	N° Torre Final	Longitud de vano (m)
T2(SPT2+0)	T3(SPT2+9)	615.8
T9(SPS2-3)	T10(SPS2-3)	551.3
T14(SPS2-3)	T15(SPS2-3)	563.5
T29(SPS2+0)	T30(SPS2+3)	532.9
T38(SPS2+3)	T39(SPA2-3)	614.9
T156(SPS2+0)	T157(SPS2-3)	625.6
T163(SPA2-3)	T164(SPS2+6)	557.1

4.8 Disposición de los separadores en los vanos galopantes de la Línea 220 kV Chaglla – Paragsha.

En esta sección de todos los dispositivos antigalloping que se mencionó en capítulos anteriores, se eligió el separador entre fases por ser unos de los más usados en líneas existentes y hasta el momento dan buenos resultados para controlar el galloping y también no es muy caro en comparación de otros dispositivos, además se mostrara el esquema de la disposición de estos separadores más conveniente entre los vanos de la línea a proyectar de Chaglla – Paragsha para controlar el galloping.

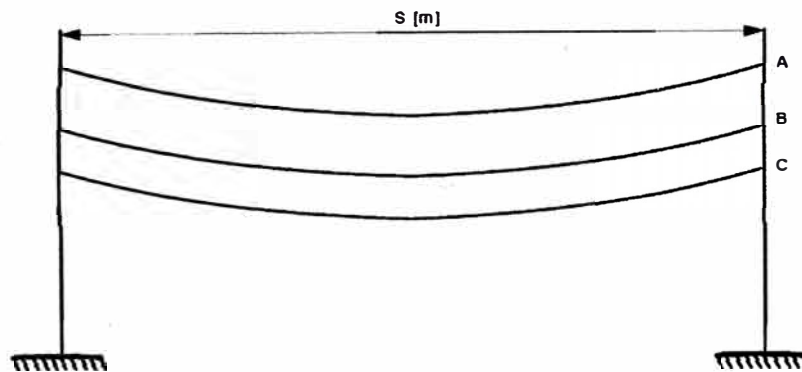


Fig. 4.5 Sección de un vano de conductores de 3 fases sin separadores [10].

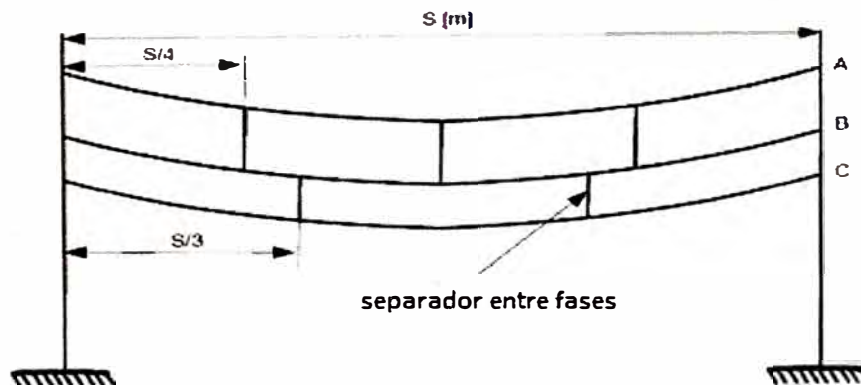


Fig. 4.6 Disposición de cinco separadores de entre fases para los vanos galopantes [10].

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se mencionará el resultado de eventos de galloping simulados para una disposición de separadores entre fases ya mencionados en el capítulo anterior.

5.1 Objetivo

El Objetivo principal de estos resultados es ver el comportamiento de los separadores entre fases para reducir la amplitud del galloping en los conductores, según una disposición mostrada en los vanos de una terna de la línea a proyectar de 220 kV de Chaglla – Paragsha

5.2 Introducción

El capítulo muestra la simulación de las tres fases del conductor simulado sin y con separadores entre fases, tomado de un paper de la IEEE de Hwan-Seong Kim y Tuong-Long Nguyen. Los métodos utilizados para estos resultados son una simulación numérica de elementos finitos implícitos y explícitos para calcular la respuesta transitoria de las amplitudes de los vanos de la línea. El programa ANSYS / LS-DYNA muestra los resultados según la posición que se tenga de los separadores entre fases en la línea. En esta simulación las líneas de transmisión son modeladas por elementos de viga que se someten a grandes desplazamientos; descrito por Belytschko en el paper de la IEEE.

5.3 Modelamiento del Sistema a considerar

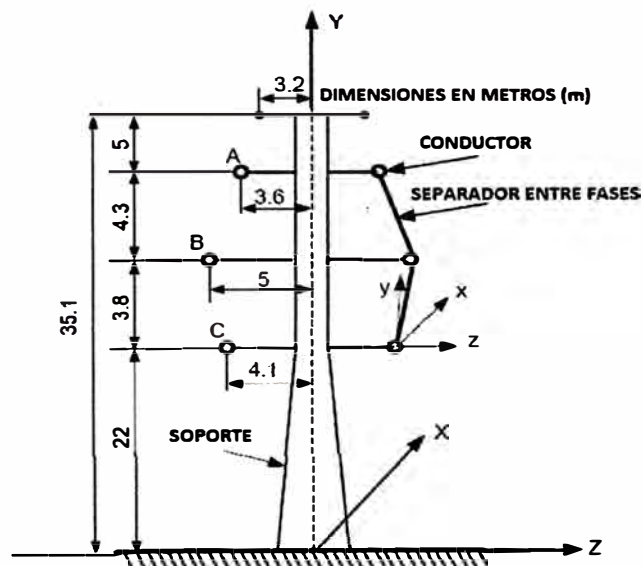


Fig. 5.1 Esquema de las dimensiones de la estructura a simular [10].

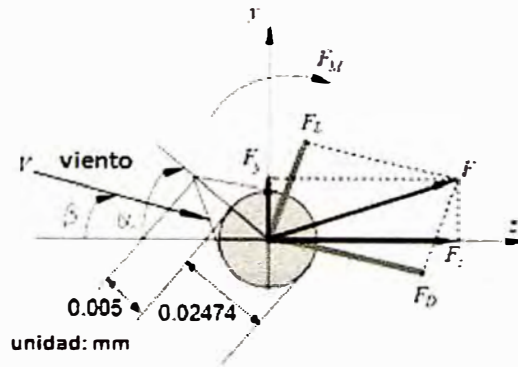


Fig. 5.2 Diagrama de fuerzas sobre el conductor con hielo a considerar en la simulación [10].

Las fuerzas en el eje Y y Z son:

$$F_z = F_D \cos \beta + F_L \sin \beta \quad (5.1)$$

$$F_y = F_L \cos \beta + F_D \sin \beta \quad (5.2)$$

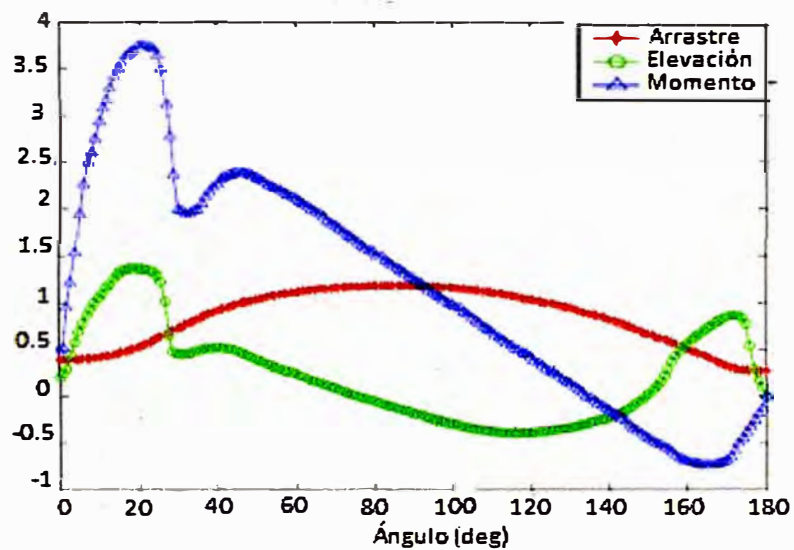


Fig. 5.3 Características aerodinámicas [10].

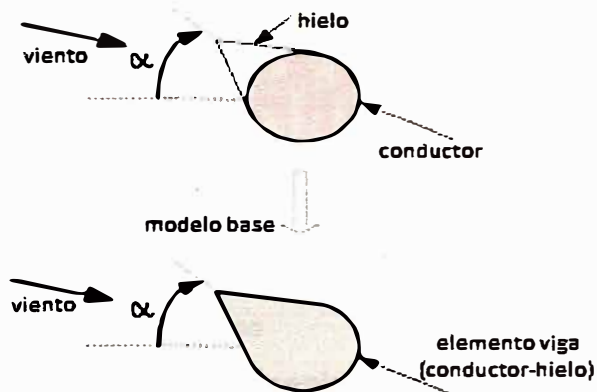


Fig. 5.4 Sección del conductor helado [10].

5.4 Resultados de la simulación

Para este análisis se obtiene una frecuencia de resonancia de 4,22 rad/s. En esta simulación la velocidad del viento es $25\sin\omega t$

Los resultados para el caso de galloping sin separador se obtienen amplitudes máximas en el tiempo de 150 s son:

Tabla 5.1 Amplitudes del centro del vano

Amplitudes en el centro del vano (Max)			
Fases	Uz (m)	Uy (m)	Rot x (rad)
R	2.34	1.78	0.97
S	2.34	1.78	0.97
T	2.34	1.78	0.97

En esta simulación de las tres fases para con línea de haz de dos conductores por fase, muestra el comportamiento de los espaciadores para reducir la amplitud de galloping de los conductores con hielo. En la simulación se ve la respuesta transitoria, y predecir la posición a insertar los separadores entre fases de los conductores.

Tabla 5.2 Amplitudes del centro del vano

Amplitudes en el centro del vano (Min & Max)			
Fases	Uz (m)	Uy (m)	Rot x (rad)
R	-1.2	-0.2	-0.2
	1.3	0.6	0.2
S	-1.2	-0.1	-0.2
	1.3	0.6	0.2
T	-1.3	-0.2	-0.1
	1.3	0.9	0.1

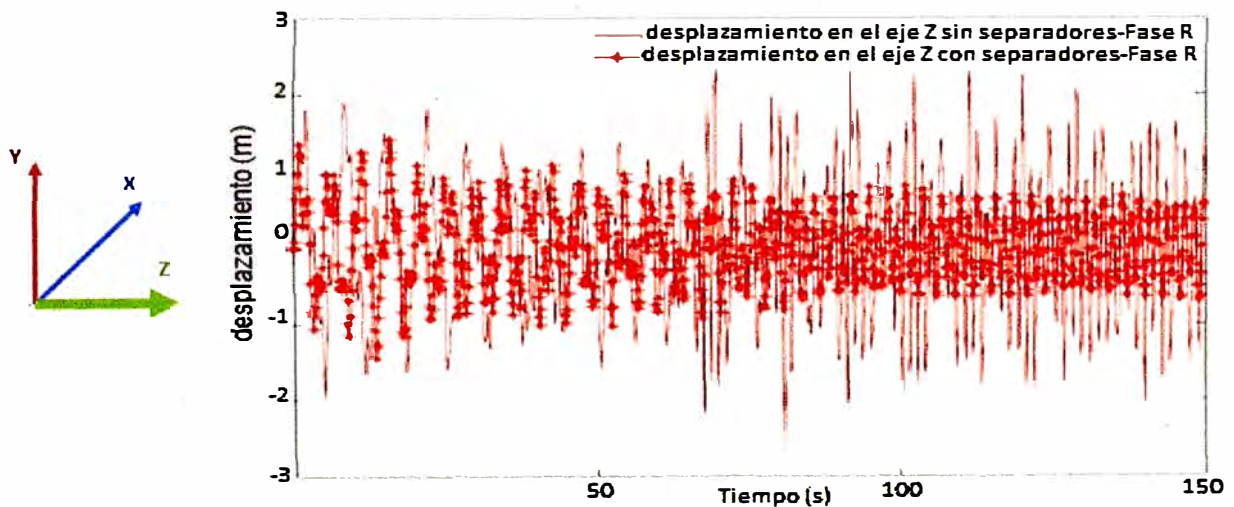


Fig. 5.5 Respuesta Transitoria del desplazamiento (m) en el eje Z, para la fase R sin y con separadores [10].

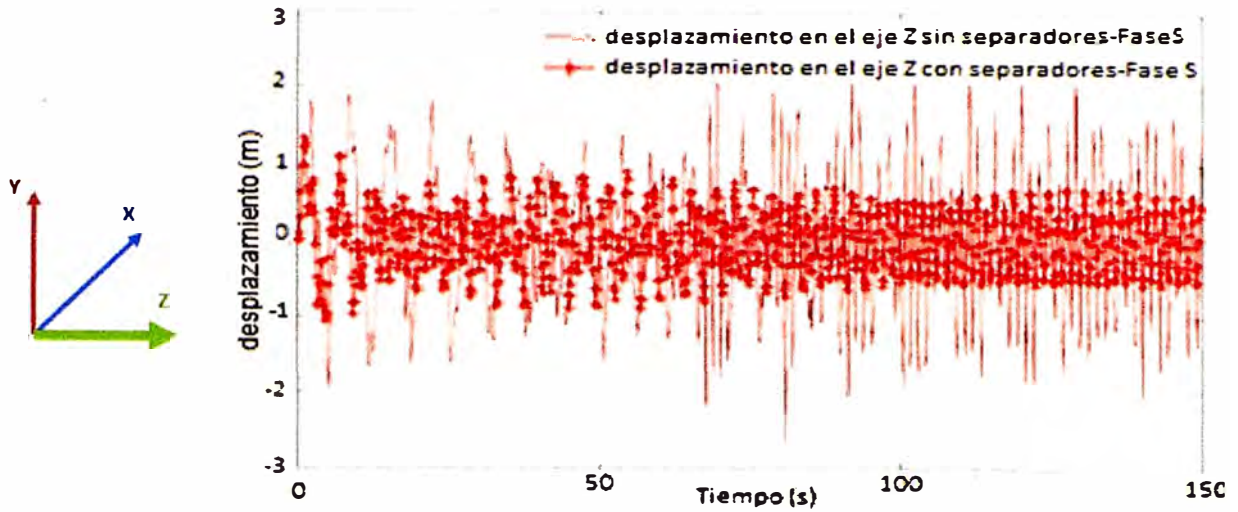


Fig. 5.6 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Z, para la fase S sin y con separadores [10].

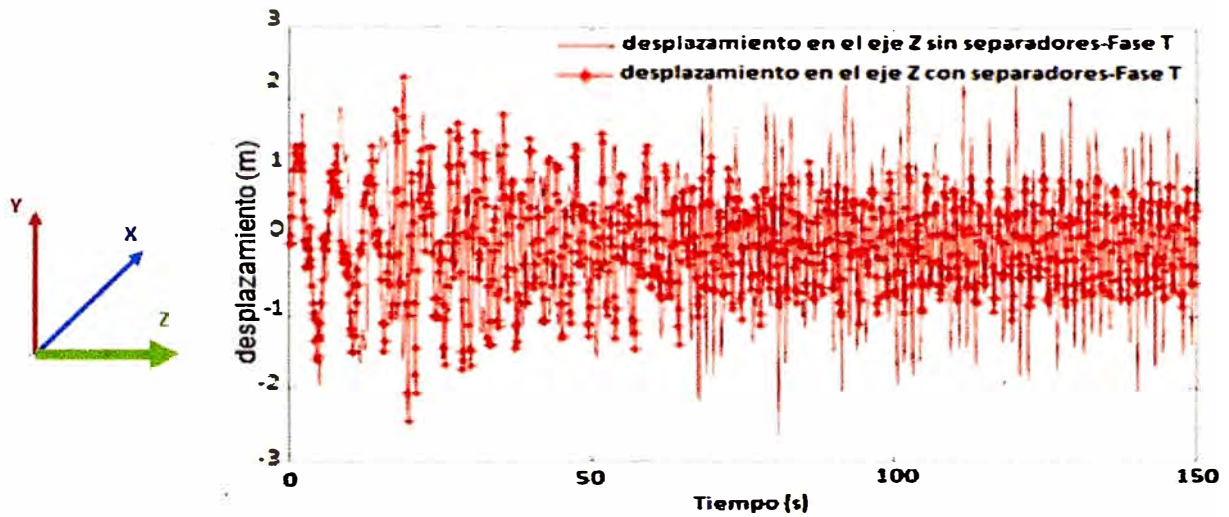


Fig. 5.7 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Z, para la fase T sin y con separadores [10].

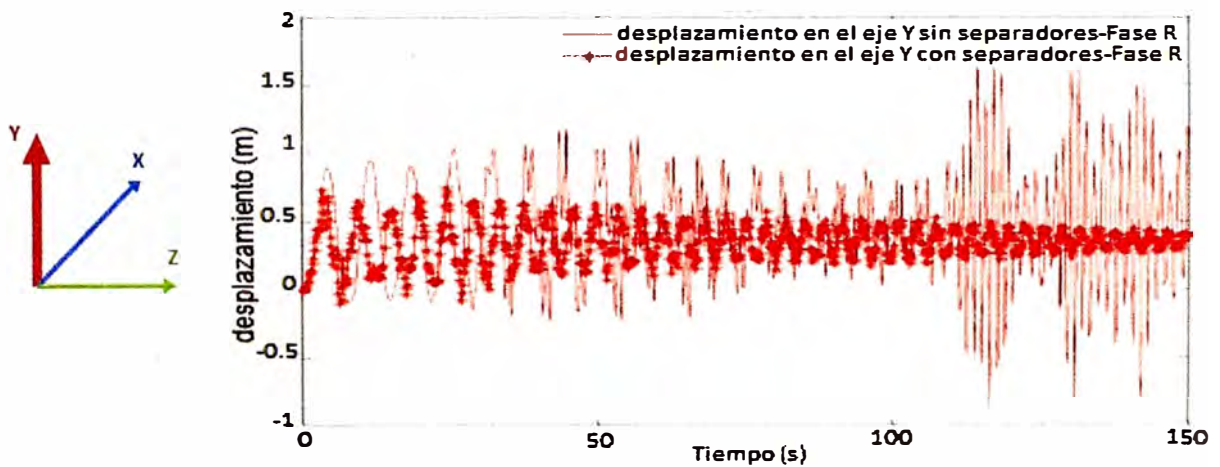


Fig. 5.8 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Y, para la fase R sin y con separadores [10].

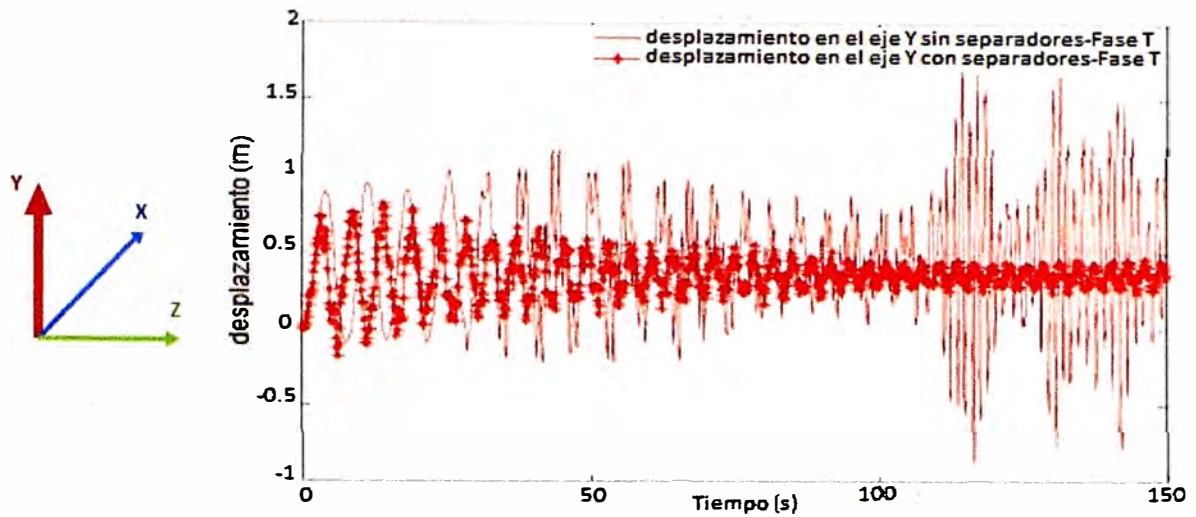


Fig. 5.9 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Y, para la fase S sin y con separadores [10].

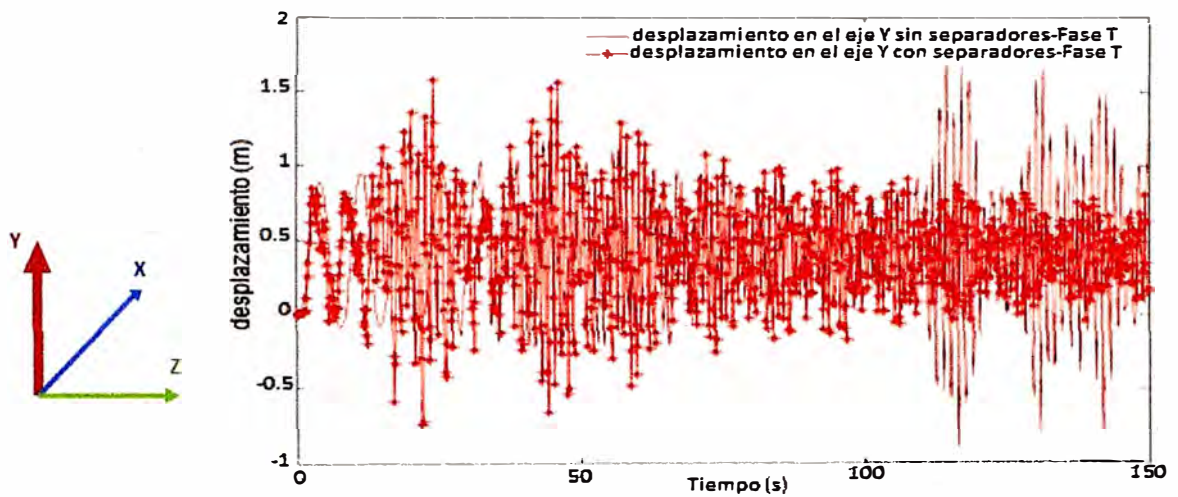


Fig. 5.10 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Y, para la fase T sin y con separadores [10].

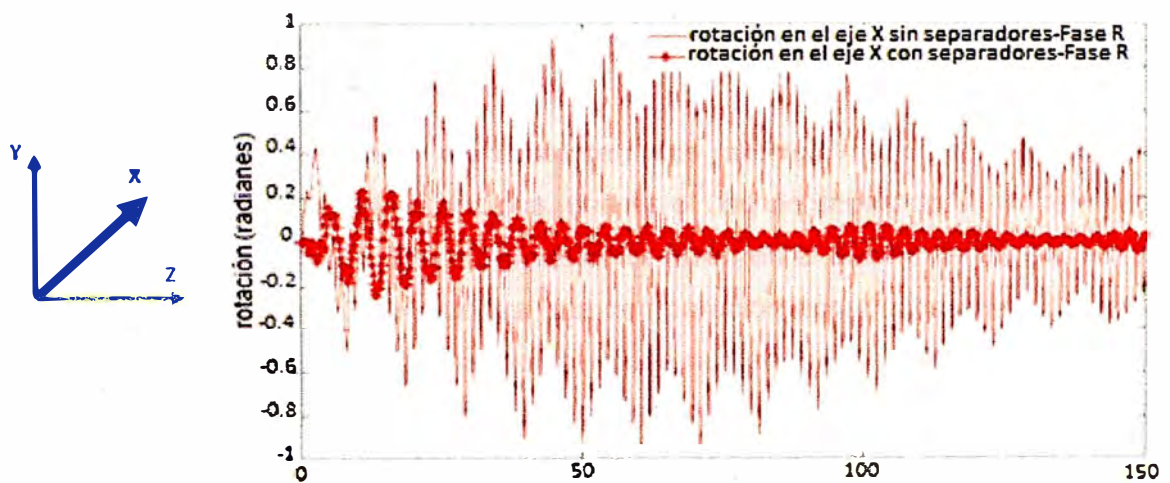


Fig. 5.11 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Rot X, para la fase R sin y con separadores [10].

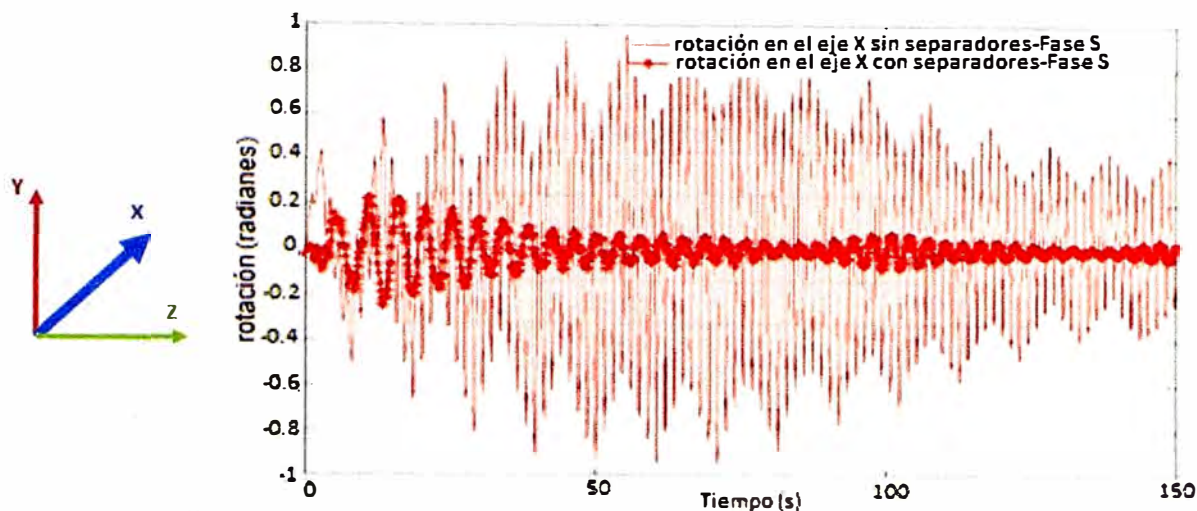


Fig. 5.12 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Rot X, para la fase S sin y con separadores [10].

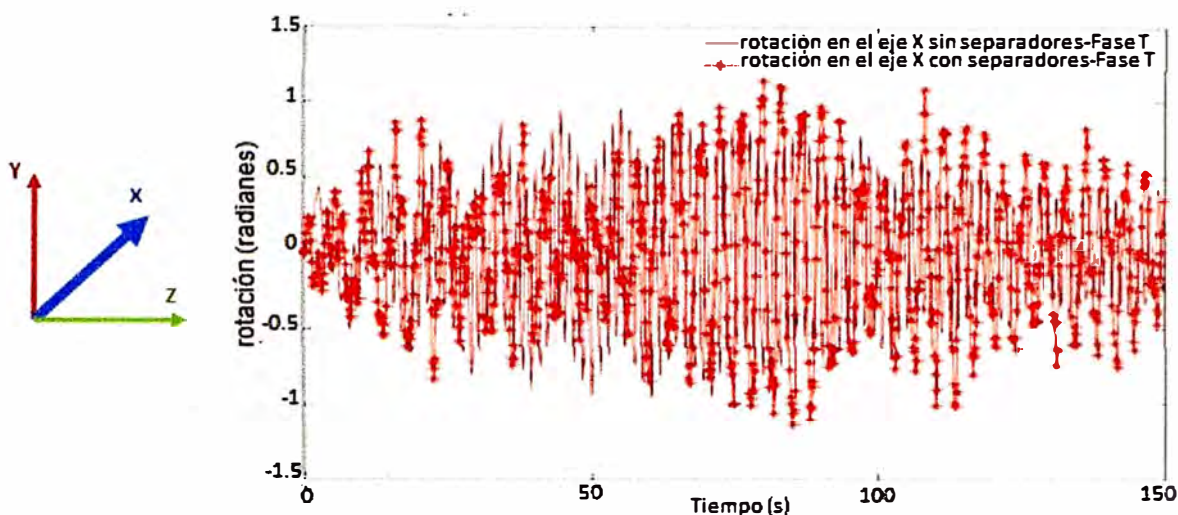


Fig. 5.13 Respuesta Transitoria del desplazamiento en el eje Rot X, para la fase T sin y con separadores [10].

5.5 Análisis Económico del uso de separadores de entre fases vs el aumento de distancia entre las fases.

En este análisis económico se evaluarán dos alternativas para el control del galloping y evitar que ocurra fallas bifásicas, una es el uso de separadores entre fases y la otra alternativa es el aumento de distancias entre fases en el diseño de las estructuras de transmisión. En la tabla 5.3 se muestra una comparación económica entre los costos de usar separadores entre fases contra los costos de aumentar las distancias entre fases en la torre de transmisión. De esta tabla se puede apreciar que al aumentar las distancias entre fases el costo es casi el doble que utilizar los separadores de entre fases, por lo tanto el uso de separadores de entre fases resulta conveniente aplicarlos por su eficiencia y bajo costo.

Tabla 5.3 Cantidad de Aisladores por cadenas de acuerdo a la altitud.

Estructuras		Costos (\$)	
N° Torre Inicial	N° Torre Final	Uso de Separadores	Aumento de distancia
T1 (SPT2+0)	T2(SPT2+0)	2550	8652
T2(SPT2+0)	T3(SPT2+9)	2550	8652
T3(SPT2+9)	T4(SPT2+9)	2550	8652
T4(SPT2+9)	T5(SPS2-3)	2550	6049
T6(SPS2+0)	T7(SPS2-3)	2550	3446
T7(SPS2-3)	T8(SPS2-3)	2550	3446
T8(SPS2-3)	T9(SPS2-3)	2550	3446
T9(SPS2-3)	T10(SPS2-3)	2550	3446
T10(SPS2-3)	T11(SPS2-3)	2550	3446
T11(SPS2-3)	T12(SPA2-3)	2550	5582
T14(SPS2-3)	T15(SPS2-3)	2550	3446
T18(SPS2+6)	T19(SPA2-3)	2550	5582
T19(SPA-3)	T20(SPS2-3)	2550	5582
T20(SPS2-3)	T21(SPS2-3)	2550	3446
T21(SPS2-3)	T22(SPS2+3)	2550	3446
T22(SPS2+3)	T23(SPS2+9)	2550	3446
T23(SPS2+9)	T24(SPA2+3)	2550	5582
T26(SPS2+0)	T27(SPS2+6)	2550	3446
T27(SPS2+6)	T28(SPA2+0)	2550	5582
T28(SPA2+0)	T29(SPS2+0)	2550	5582
T29(SPS2+0)	T30(SPS2+3)	2550	3446
T31(SPS2-3)	T32(SPS2-3)	2550	3446
T35(SPS2-3)	T36(SPS2-3)	2550	3446
T36(SPS2-3)	T37(SPS2-3)	2550	3446
T37(SPS2-3)	T38(SPS2+3)	2550	3446
T38(SPS2+3)	T39(SPA2-3)	2550	5582
T40(SPA2+3)	T41(SPA2+0)	2550	7718
T43(SPA2-3)	T44(SPS2-3)	2550	5582
T151(SPS2+9)	T152(SPS2+9)	2550	3446
T152(SPS2+9)	T153(SPA2+9)	2550	5582
T154(SPA2-3)	T155(SPS2+3)	2550	5582
T156(SPS2+0)	T157(SPS2-3)	2550	3446
T158(SPS2+3)	T159(SPA2-3)	2550	5582
T163(SPA2-3)	T164(SPS2+6)	2550	5582
T165(SPA2-3)	T166(SPS2+6)	2550	5581
	Total (\$)	89250.00	170870.00

De esta tabla se puede apreciar que el aumentar las distancias entre fases el costo es casi el doble que utilizar los separadores de interfase para controlar el efecto galloping.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. De los resultados de la simulación se concluye que los separadores de entre fases controlan el efecto galloping en la línea de transmisión 220 kV Chaglla - Paragsha.
2. Aumentar las distancias entre fases para evitar fallas bifásicas entre conductores debido al galloping, es más costoso con respecto al uso de separadores de entre fases para la línea de transmisión 220 kV Chaglla - Paragsha.
3. En el Perú se produce galloping en líneas existentes pero no necesariamente en presencia de hielo y viento, mayormente ocurre con el desprendimiento del manguito de hielo del conductor sin presencia del viento, que es un caso particular del galloping, pero se concluye que también se puede evitar con el uso de separadores de entre fases.

RECOMENDACIONES

1. En líneas existentes donde ocurren galloping, se recomienda tomar en cuenta estas observaciones a través de bases de datos, para justificar y tomar la decisión de usar los dispositivos antigallopings en las líneas de transmisión a proyectar en zonas aledañas a las líneas existentes galopantes.
2. Se recomienda que las empresas concesionarias de líneas de transmisión hagan un monitoreo de acumulación de hielo en el conductor en líneas existentes, para tratar los eventos de formación de hielo en el conductor y evitar que se produzca galloping.
3. Se recomienda que se debe invertir tanto dinero como tiempo, en el estudio en campo del efecto galloping para comprender mejor este efecto y desarrollar medios eficaces en su contra y así proteger a la línea transmisión.

ANEXOS

ANEXO A.
REPRESENTACIÓN GRÁFICA A TRAVÉS DE ELIPSES DE LOS VANOS GALOPANTES DE LA LINEAS DE TRANSMISIÓN

El PLS-CADD puede dibujar elipses galopantes de lazo simple y lazo dobles que simulan las envolventes empíricas de un conductor galopantes, de acuerdo con el Boletín REA 1724E-200 (REA, 1992). Puede también determinar las distancias más cercanas entre estas elipses, los parámetros que determinan la localización y geometría de una elipse como se muestra en la figura A1 son: la longitud de la flecha, el ángulo de balanceo del tramo "SSW", la distancia "B", los ejes de la elipse mayor y menor, la inclinación del balanceo de la elipse "ESW".

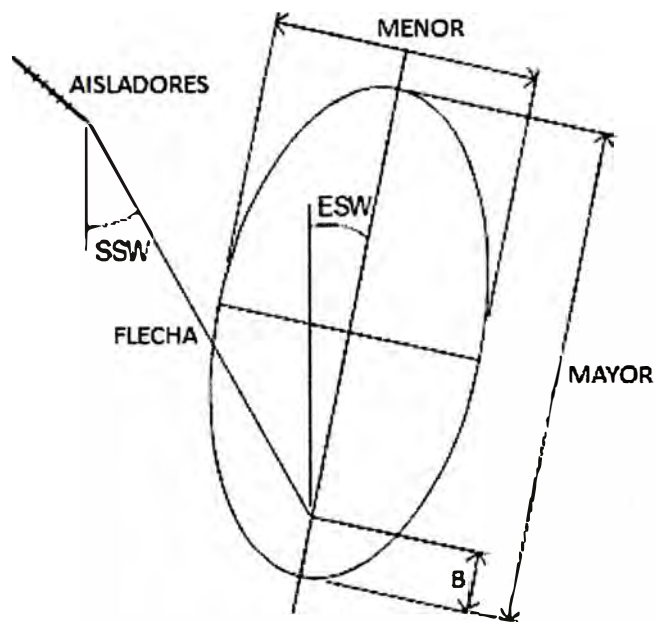


Fig. A1 Elipse Galopante [14].

Para elipses de un solo lazo, PLS-CADD usa las siguientes ecuaciones del Boletín REA para determinar los valores numéricos de los parámetros de la elipse:

$$\text{ESW} = \text{SSW}/2 \quad (\text{a.1})$$

$$\text{MAYOR} = 1,25 \times \text{Flecha} + 0,3048 \quad (\text{a.2})$$

$$\text{MENOR} = 0,4 \times \text{MAYOR} \quad (\text{a.3})$$

$$\text{B} = 0,25 \times \text{Flecha} \quad (\text{a.4})$$

Para elipses de lazo doble, se usan las siguientes ecuaciones:

$$MAYOR = \sqrt{\frac{3A(L + \frac{8FLECHA^2}{L}) - 2A}{8}} + 0,3048 \quad (a.5)$$

$$MENOR = 1,104\sqrt{MAYOR - 0,3048} \quad (a.6)$$

$$B = 0,2x \text{ MAYOR} \quad (a.7)$$

Los cálculos se hacen para la combinación de casos de clima y condiciones del cable de acuerdo con el Boletín REA, una combinación de 1,27 cm de hielo, presión de viento 95,8 Pa y temperatura de 0°C debe ser especificada para el cálculo de la posición del aislador y del ángulo de balanceo del tramos SSW. Otra combinación de 1,27 cm de hielo, sin viento y 0°C es especificada para la flecha del vano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jean Louis Lilien, "State of The Art Conductor Galloping", CIGRE-Francia, 2007.
- [2] Jean Louis Lilien, "Overhead transmission lines design some mechanical aspects", Universidad de Lieja-Bélgica, 1990.
- [3] Jean Louis Lilien, "Overhead line galloping field experience during one event Belgium on last February 13th 1997", Universidad de Lieja-Bélgica, 1997.
- [4] Jean Louis Lilien, "Overhead transmission line galloping a comparative study between 2-DOF and 3-DOF models", Universidad de Lieja-Bélgica, 1990.
- [5] Jean Louis Lilien, "Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities", Universidad de Lieja-Bélgica, 1995.
- [6] Jean Louis Lilien, "Overhead line vertical galloping on bundle configurations", Universidad de Lieja-Bélgica, 1988.
- [7] Jean Louis Lilien, "Galloping data base on single and blundle conductors prediction of maximum amplitudes, IEEE-USA, 2000.
- [8] Jean Louis Lilien, "Full scale tests of torsional damper and detuner (TDD) antigalloping device", IEEE-USA, 2000.
- [9] Jean Louis Lilien, "High voltage overhead lines three mechanisms to a avoid bundle galloping", Universidad de Lieja-Bélgica, 1995.
- [10] Hwan Seong Kim, "Analysis of galloping amplitude for conductors with inter-phase spacers", Universidad de Korea-Korea, 2006.
- [11] Electric power Research Institute (EPRI), "Transmission Line Reference Book 115-345 kV Compac Line Design", California-USA, 2007.
- [12] Electric power Research Institute (EPRI), "Transmission Line Reference Book Wind-Induced Conductor Motion", California-USA, 2005.
- [13] Rural Electrification Administration, "Boletín REA 1724E-200", Washington D.C-USA, 1992.
- [14] Power Line Systems, "Manual de PLS-CADD", Madison-USA, 2009.