



## EVALUACIÓN DE LOS ESFUERZOS DESTRUCTIVOS PARA EL COLAPSO DE SIETE TORRES DE 66 kV OCURRIDO EN FECHA 10/11/09

**Autor: Ing. Hugo C. Acosta E.**

**Administración Nacional de Electricidad - ANDE -**

**Paraguay**

### RESUMEN

El día 10 de noviembre del año 2009, en la línea de transmisión LT's VIN \_ PIL de 66 kV, se produjeron siete caídas de torres de 66 kV, ubicadas a 50 Km. de la ciudad de Pilar y 4 Km. de la ciudad de Villalbín debido al paso de una tormenta eléctrica de gran intensidad que azotó a gran parte del país. Las torres colapsadas con ubicación GPS son:

- LT 66 VIN PIL TORRE 16, 27° 7'27.66"S, 57°57'10.91"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 17, 27° 7'26.26"S, 57°57'21.49"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 18, 27° 7'24.95"S, 57°57'32.39"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 19, 27° 7'23.36"S, 57°57'42.93"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 20, 27° 7'22.11"S, 57°57'53.71"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 21, 27° 7'20.74"S, 57°58'4.51"O
- LT 66 VIN PIL TORRE 22, 27° 7'19.45"S, 57°58'15.27"O

El principal objetivo del trabajo es evaluar de modo inductivo las probables causas que precipitaron la caída de siete torres de 66 kV al sur del país. Son evaluadas: a) Los probables esfuerzos dinámicos aparecidos por acción de vientos turbulentos b) El estado de las torres colapsadas, mediante imágenes digitales captadas desde el aire y por tierra por el personal de mantenimiento de la empresa c) Como así mismo, las imágenes animadas en infrarrojo del severo evento meteorológico brindado por el Jefe *del Dpto de Climatología* de Asunción.

### PALABRAS CLAVES

Colapso, torre reticulada, esfuerzos estructurales, fuerza de arrastre, velocidad sostenida, tormentas severas, tornados, downbursts.

### 1. INTRODUCCION

Las líneas de transmisión de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) pertenecientes a un sistema de interconexión propia a fin de transmitir energía eléctrica a los centros de consumo y que es generado por centrales hidráulica, se ramifica a lo largo y ancho del territorio



**IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**13, 14 y 15 de Octubre de 2010**

nacional, en las cuales sus esfuerzos estructurales en estos últimos años fueron superados ampliamente por el embate de tormentas severas que azotaron en los años 2008-2009-2010 como caso palpable, se toma como ejemplo lo ocurrido en fecha 10/11/2009 en la zona sur del país debido a la acción de los vientos tormentosos actuando frontalmente a la LT's Villalbin-Pilar de 66 kV, los que fueron solicitados mecánicamente mediante ráfagas intermitentes de vientos en las estructuras de celosía, con esfuerzos de mayor capacidad a lo establecido en las condiciones iniciales de diseño, produciendo grandes momentos de flexión y torsión sobre siete estructuras, colapsándolos a tierra.

En el caso del dimensionado de líneas eléctricas de media y alta tensión, las normas americanas prevén la posibilidad de utilizar parámetros de carga producida por eventos meteorológicos en los que interviene el conocimiento de las características de viento utilizando el método probabilístico. Este método requiere contar con mediciones de viento durante grandes períodos de tiempo. Sin embargo, las estaciones de medición en el país están muy dispersas geográficamente y existe cierta incertidumbre en la utilización de estos métodos, sobre todo en los casos de relieve complejo, ya que las estadísticas de viento son confeccionadas utilizando el valor de velocidad media en zonas de terreno llano. Las estructuras colapsadas fueron diseñadas para soportar esfuerzos de vientos horizontales permanentes hasta 120 km/h o 66.5 nudos.

La formación y desarrollo de las tormentas locales severas (TLS) es una realidad a tener en cuenta, la cual se le ha dado poca atención por los medios meteorológicos, quizás por su carácter local, su escasa duración y de difícil detección, pero desastrosas por los efectos que ocasionan a su paso, como lo ocurrido en fecha 10/11/2009.

La atmósfera como lo define Ed. Lorenz (1963) "es un sistema caótico en donde el clima puede cambiar y las series largas pueden no representar adecuadamente el clima presente". Con el correr de los tiempos, estas condiciones de borde extremo, han sido superadas con facilidad tanto en espacialidad y temporalidad. Sin embargo, realizar inferencias puede resultar oportuno, pero...¡¡no confundir relaciones estadísticas con relaciones causa-efecto!! La descripción de los datos observados puede ayudar a poner de manifiesto sus causas y efectos.

Un evento extremo meteorológico es un evento "raro" de un lugar en particular y época del año. La definición de "raro" puede variar, pero un evento extremo meteorológico puede considerarse cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. (Glosario IPCC).

## **2. TORMENTAS SEVERAS**

Se entiende por tormenta severa a aquellas que tienen, al menos uno o más de los siguientes fenómenos: "granizo de 2cm de diámetro o mayor, rachas de viento de más de 50 nudos (90 km./hora)". En estos últimos años, la mayor parte del área de Sudamérica, se observó altas probabilidades de tormentas severas, con granizo y vientos hasta marzo del presente año. Gran parte de las fallas en sistemas de transmisión eléctricos se deben a la ocurrencia de vientos de elevada velocidad, y en particular, al desarrollo de tormentas severas que generan corrientes descendentes intensas y eventualmente tornados. Se caracterizan por las velocidades de sus vientos, velocidad de traslación y su ocurrencia en determinadas épocas y horas del año.

### **2.1 Tormenta severa del día 10/11/2009**

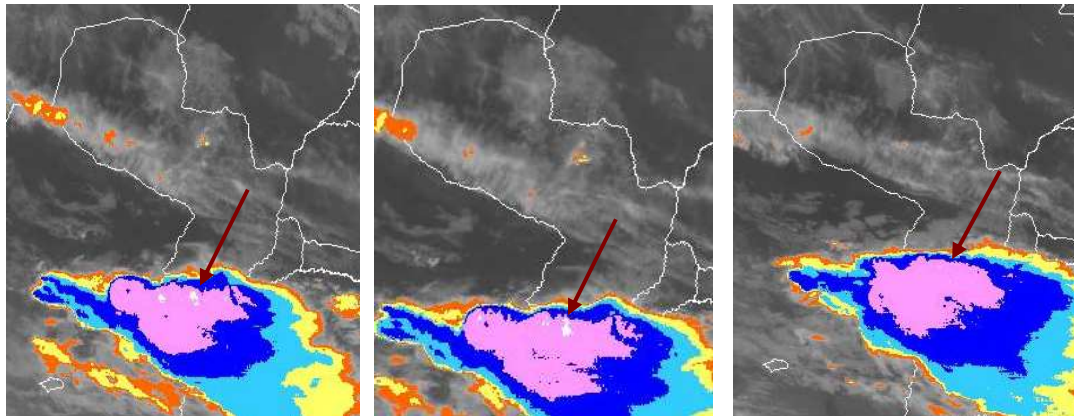
Durante la madrugada del día 10 de noviembre de 2009, ha ingresado desde el sur del país una fuerte tormenta eléctrica haciendo descender la temperatura en más de 15 grados centígrados en

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

poco tiempo, trayendo precipitación que alcanzó intensidad torrencial y arrastrando consigo a vientos que en algunos lugares superaron los 100 km./h entre las ciudades de Pilar y de Villalbin concretamente, entre las 06:15 y las 07:00 de la mañana, acompañada de granizo de un tamaño alrededor de 2 cm. El fenómeno meteorológico se desplazó en dirección Suroeste Noreste en donde fueron afectadas por el mismo evento en varias ciudades del país, aunque no llegaron a ser tan fuertes como la registrada entre las ciudades de Pilar y Villalbin.

### 2.2 Formación y avance del evento (imágenes proveídas por FP-UNA-py).

Fuente de datos: INPE/CPTEC/DSA/ Br - Satélite GOES 10 – Tipo de imagen: infrarrojo con realce – Ubicación: 36 Km. de altura – Lapso de imagen: 30 min.- Inicio de entradas del frente turbulento 05:45, Hora de satélite 08:45 UTM ; Finalización 06:45, Hora de satélite 09:45 UTM



## 3. CONSIDERACIONES SOBRE VIENTOS

### 3.1 Vientos de superficies

Desde el punto de vista del estudio del efecto de los vientos fuertes sobre las estructuras resulta interesante conocer cuales son los patrones probables de flujos de vientos tanto en temporadas de calma, cuando se tiene un flujo quieto y uniforme que se le da el nombre de flujo laminar, como en temporadas de perturbaciones importantes, como las tormentas severas que presentan flujos con trayectorias impredecibles que se conocen como flujos turbulentos. El movimiento de masas de aire se debe a la existencia de presiones altas y bajas debidos al calentamiento de diversos lugares en la superficie terrestre, entonces el aire se eleva formando una corriente convectiva ascendente que llega tan alto como le sea posible, hasta que vuelve a enfriarse volviendo a la superficie nuevamente. La corriente convectiva al elevarse crea una zona de baja presión por pérdida de aire, y en su alrededor se encuentra a mayor presión, sucede esto en masas de aire calientes y húmedas. Estas masas se crean a partir de la superficie y hasta una altura de tres kilómetros aproximadamente, el cual confluye formando espirales debido a la fuerza de Coriolis (efecto o fuerza presente por el movimiento de la rotación de la tierra). Un aspecto que caracteriza el comportamiento del movimiento de la masa de aire durante una tormenta severa es la irregularidad de los niveles de velocidades de vientos registradas en un punto del fenómeno que se estaría desarrollando.

Para velocidades que se observan en la naturaleza y, principalmente para las velocidades de viento de un fenómeno meteorológico, la masa de aire presenta una gran irregularidad de movimiento, con numerosos vórtices de distintos tamaños denominados flujo turbulento. Este flujo tiende a presentarse en preferentemente cerca de las superficies inmóviles.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

La irregularidad en el movimiento genera lapsos cortos con velocidad mucho mayor que la velocidad que se da en promedio en un promedio en un intervalo de tiempo mayor. Las velocidades reportadas en el campo de vientos de un fenómeno meteorológicos se refiere a la velocidad media, sin embargo se acostumbra a utilizar el termino de velocidad sostenida para indicar el valor promedio en lapsos de tiempos de alrededor de un minuto, mientras que cuando se menciona a la velocidad de ráfagas, se refiere a los valores máximos de velocidad instantáneos registrados en intervalos de uno o dos segundos. La velocidad de la ráfaga es de un 30 o 35% más que la velocidad sostenida. Estas diferencias de velocidades se magnifican con la presencia de flujos turbulentos.

Existen estructuras vulnerables ante cargas repetidas y constantes, a las cuales les afectará el efecto de la velocidad sostenida del viento. Por otro lado, existen también estructuras más sensibles a cargas del tipo cíclico, para lo cual será importante conocer las propiedades de la velocidad de la ráfaga en cuanto a la magnitud y periodicidad. La distribución de las velocidades de viento en la altura resulta variable. Debido a que el efecto de la fricción cerca de la superficie decrece conforme nos apartamos de ella, la velocidad del viento tiende a aumentar con la altura sobre la superficie. Esta capa de la atmósfera en donde la fuerza de fricción tiene un efecto importante se llama *Capa Limite Planetaria*, y va desde la superficie hasta aproximadamente los 1000m. Así para un terreno relativamente liso, como un campo abierto con vegetación baja, el viento alcanzará velocidades muy altas y viceversa, para terrenos con gran rugosidad las velocidades del viento se tendrán a grandes alturas. Se puede esperar que la capa de formación de estos vientos de superficie conocido como capa limite en campo abierto estaría por una altura de 250 m y terrenos edificados entre 350 m y 400 m. La fuerza de fricción endentece el viento cerca de la superficie.

### 3.2 Vientos Turbulentos

#### 3.2.1 Tornados

Por qué se forman los tornados? De donde es que obtienen la fuerza y velocidad necesaria para destruir pueblos completos? Para que se origine un tornado, se necesitan tres componentes convergiendo en un mismo lugar: a) Un frente de aire cálido y húmedo b) Un frente de aire frío y seco, y c) Una corriente de viento ascendente.

La sola presencia de las condiciones descritas arriba no es suficiente. Al chocar los dos frentes de aire, uno caliente y el otro frío, se genera una enorme cantidad de condensación de agua, que causa la creación de un tipo especial de nube llamada cumulonimbos. Estas nubes son tormentas en lo alto de la atmósfera, que pueden hacer caer lluvia o granizo sobre el área. Adentro de estas tormentas, hay grandes cantidades de viento moviéndose rápidamente, ya que el aire frío va a querer bajar, mientras que el aire caliente intentará subir. Este efecto genera una primera columna ascendente de aire.

La mayoría de tornados duran poco tiempo, usualmente alrededor de 5 minutos, aunque se ha dado el caso de tornados que duran más de una hora. El vórtice de un tornado puede ser de solamente unos pocos metros de ancho, hasta tener más de 2 kilómetros de ancho en casos extremos. Los tornados necesitan ciertas características geográficas y climatológicas para poder generarse. Usualmente, requieren de grandes cantidades de aire frío y seco, que pueda mezclarse con frentes de aire caliente y húmedo, al mismo tiempo que hayan grandes áreas planas en el suelo, usualmente áridas o semi-áridas, sujetas a ser calentadas fácilmente por el sol. También, es importante la hora del día, ya que el tornado depende de aire caliente cerca del suelo para poder formarse. La gran mayoría de tornados suceden entre las 3PM y 7PM hora local, con un



IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

pico cerca de las 5PM. Sin embargo, han sucedido grandes tornados antes de las 9AM, Escalas Fujita y Torro Existen diversos métodos para categorizar la fuerza de los tornados, usualmente dependiendo de la velocidad del viento que generen. Los rangos en la escala mejorada de Fujita son los siguientes:

- EF0 - Vientos de menos de 116 km/h, comprenden un 40% de todos los tornados.
- EF1 - Vientos de entre 116 km/h y 180 km/h, suceden aproximadamente un 35% de las veces.
- EF2 - Vientos de entre 181 km/h y 250 km/h, suceden aproximadamente un 19% de las veces.
- EF3 - Vientos de entre 250 km/h y 330 km/h, suceden aproximadamente un 5% de las veces.
- EF4 - Vientos de entre 330 km/h y 415 km/h, suceden aproximadamente un 1% de las veces.
- EF5 - Vientos de entre 415 km/h y 510 km/h, suceden menos de un 0.1% de las veces.

### 3.2.2 Downbursts / Macrobursts - Microbursts

El Downbursts (conocido en como aeroavalancha) es un fenómeno presente en nuestro país, poco difundido y escasamente detectado por instrumentos meteorológicos debido a su corta duración y difícil localización. Fueron detectados en Uruguay, norte de Argentina y sur del Brasil, ocasionando severas fallas a los sistemas de transmisión eléctrica de esos países. Sus características notorias pasamos a detallar: Es una corriente vertical de aire que se desploma desde la base de una célula convectiva hasta los niveles bajos de la troposfera. Este término anglosajón fue introducido por Fujita (1978) para referirse a corrientes de descenso que originan vientos de carácter muy fuertes cerca del suelo. Para los fenómenos que se desarrollan entre 4 Km. y una pocas decenas de metros, se utiliza el nombre de Microbursts o micro ráfaga- Fujita (1981) para referirse a una intensa y breve ráfaga de algunos centenares de metros de anchura y que tiene lugar cerca del suelo. Es una intensa y localizada corriente vertical descendente de muy poco diámetro y muy corta vida. Esta acompañada de torbellino curvilíneos de eje horizontal que se originan a consecuencia del impacto y divergencia en tierra de la corriente de aire descendente. Generalmente, los Downbursts se originan, en las fases de comienzo del estado de madurez de una tormenta, aunque también pueden desencadenarse en torno a fenómenos convectivos de carácter seco que es la menos frecuente. Los Downbursts no deben confundirse con el Tornado, puesto que la circulación vertical del aire difiere en forma opuesta entre ambos: como se ha indicado, en el Downbursts las corrientes son descendentes, mientras en el tornado se genera una combinación entre circuitos de ascenso y en espiral. La duración de este mecanismo es relativamente breve y se ha estimado que oscila entre 15 minutos. Otros lo clasifican al microdownburst con una duración menor a 15 minutos y macrodownbursts menor a 30 minutos. Estos eventos recién pudieron ser conocidos a partir de la década de los años 80.

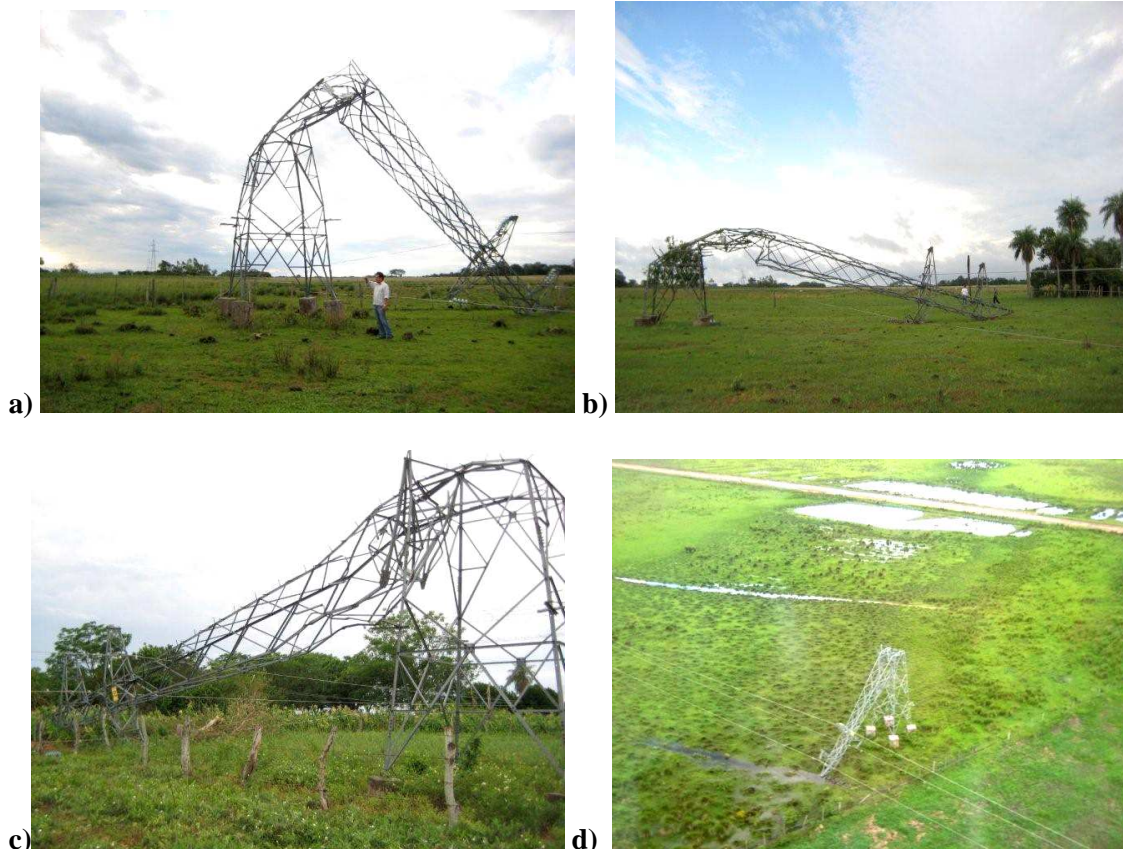
## 4. EFECTO DEL VIENTO EN LAS ESTRUCTURAS METALICAS

El viento que se ve obstaculizado por un objeto fijo, tendrá que desviarse para poder rodearlo, lo cual producirá una distribución de presiones y succiones sobre las caras del cuerpo. Resulta claro que las partículas de aire al golpear las caras expuestas directamente al efecto del viento es conocida por el nombre de cara de *barlovento* y produce un empuje o presión sobre la misma. En la cara opuesta, llamada de *sotavento*, las líneas de flujo presentan un carácter turbulento, tendiendo separar al objeto y provocar una succión al mismo. Los dos efectos podrían sumarse dando lugar a lo que generalmente se define como fuerza de arrastre sobre el objeto. En las

**IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**13, 14 y 15 de Octubre de 2010**

caras laterales también se presentan el flujo turbulento, que provocará un cambio de distribución de las presiones sobre las caras, variando el efecto de succión. Las fuerzas de arrastre, que son la conjunción de las presiones en la cara de barlovento y las succiones en la cara de sotavento, generan momentos de volteo en la base de las estructuras de soporte. Los efectos de los momentos de volteo que se generan por la incidencia de las fuerzas de arrastre, producto del carácter dinámico y aleatorio del flujo de viento que genera incrementos intempestivos en la magnitud de la velocidad, denominadas ráfagas, se genera en efecto cíclico de aumento y decremento del nivel de la fuerza de arrastre. Este tipo de carga cíclica reversible, independientemente que no alcance magnitudes que superen la resistencia de fluencia de los elementos de soporte, debida a la fatiga, pueden llegar a generar daños de consideración e, incluso la falla de la estructura. Para un profesional de evaluación post-desastre del comportamiento de las estructuras ante la incidencia de un fenómeno, y con el objeto de determinar el tipo de mecanismo de falla, no siempre se puede ser concluyente. Obviamente se podrá emitir una opinión la que será necesario observar, si es posible, el comportamiento de las estructuras en la vecindad de la estructura dañada, de igual manera que el comportamiento de la vegetación en la zona, lo que a partir de eso se podrá suponer un cierto valor de la velocidad del viento.

#### 4.1 Colapso de las torres de 66 kV



#### 4.2 Vórtices de “Von Karman”

Cuando el aire rodea un obstáculo que en este caso consideremos una estructura metálica tipo tronco piramidal, en un día de viento, no suele pasar a su alrededor suavemente sino que genera

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

turbulencias y vórtices, llamados “vórtices de Von Karman”. Los drapeos de una bandera al viento nos pueden dar una idea de la existencia de estos vórtices. Los vórtices son zonas de alta presión seguidas de baja presión, cambiando en el tiempo. Las variaciones de presión del aire también son conocidas como “sonido”. Y se propagan a la velocidad del sonido (~333 m/s en aire en condiciones normales). Cuando el aire entra en una cavidad interior de la estructura metálica, la presión en su interior crece. Si dejamos de forzar la entrada de aire, como el interior está a mayor presión que el exterior, el habitáculo perderá algo de aire para igualar presiones con el exterior, pero se pasará un poco por, llamémoslo, inercia, y acabará con una presión levemente menor que la del exterior. Entonces el aire del exterior vuelve a entrar para compensar. Obtenemos un movimiento oscilatorio en la presión del aire, que se va atenuando. En cada cavidad interior tiene una frecuencia determinada a la que esto pasa, que depende de varios factores: la velocidad del sonido, el volumen de la cavidad, el área de entrada del aire y la distancia que separa la entrada del interior. Cuando la presión de la cavidad interna de la estructura sube por el aumento de aire que entra, tardará en bajar de nuevo lo mismo, cuando la presión tarde en recorrer la estructura por dentro, desde sus aberturas reticuladas hasta la cara opuesta. Esto lo suele hacer a la velocidad del sonido, por lo que duración suele ser la centésima de segundo (suponiendo un habitáculo de un poco menos de dos metros de largo). Pero a cierta velocidad dependerá del tamaño de la estructura y otros factores, de esta manera ocurre la resonancia: cuando la presión en el interior de la estructura está subiendo por culpa de una parcela de aire turbulento, entra la siguiente parcela de flujo turbulento, y cuando ésta está provocando otra subida de presión, entra la siguiente. Las parcelas de flujos así ingresados entran al ritmo justo para amontonarse en el interior de la estructura para volver a salir del recinto tronco trapecial. *Resultado:* Variaciones muy grandes de la presión, que la estructura percibe como sonidos. Son lo suficientemente grandes como para provocar vibraciones. A veces, esta vibración puede sentirse en todo el volumen interno de la estructura reticulada y otras veces son sólo la cara posterior o sotavento los que notan la vibración. Hay muchos factores que hacen difícil cuantificar este efecto. Pero si es una resonancia de cavidad.

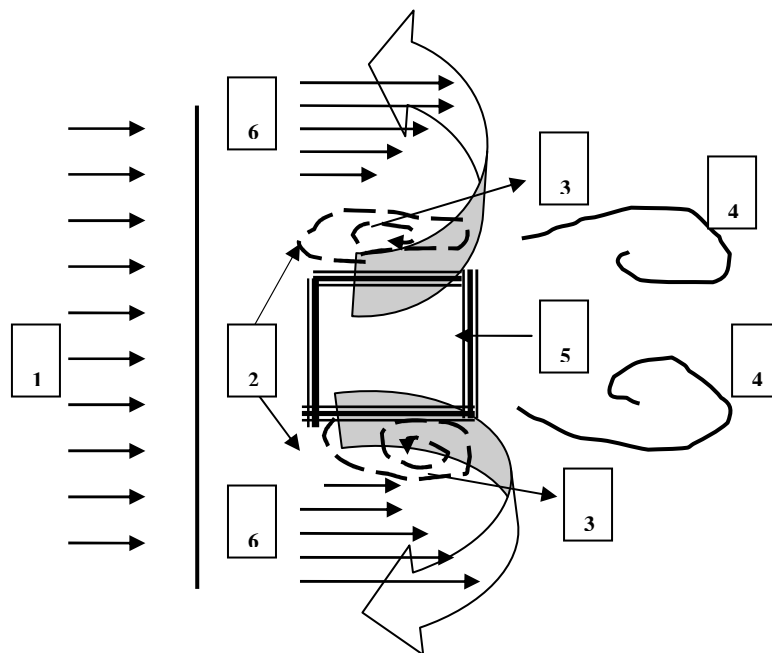


Tabla Nª I

Items	Referencias
5	Torre Reticulada
1	Velocidad Instantánea
2	Recirculación Laterales
3	Vortices Laterales
6	Estela Turbulenta
4	Vortices Antisimétricos

Figura 1: Efectos de vientos turbulentos sobre superficies cuadradas

---

## 5. CONCLUSION

- Las orientaciones de construcción de los tendidos eléctricos de transmisión del país es por lo general casi perpendicular a las direcciones predominantes de traslación de las tormentas, como es el caso de la línea LT's PIL-VIL de 66 kV orientada de este a oeste, mientras que las tormentas severas en la región se trasladan mayoritariamente de suroeste a noreste como se observa en las imágenes satelitales en el desplazamiento de esta tormenta severa.
- Ha influido notoriamente la formación de corrientes de gran intensidad en la zona del colapso de torres, debido fundamentalmente a la ubicación de las torres en un campo sin vegetación ni presencia de obstáculos importantes para que disminuyan la intensidad de los efectos de los vientos turbulentos ocasionados por el paso del fenómeno meteorológico..
- Se ha comprobado que las estructuras colapsadas han acusado esfuerzos dinámicos superiores a su diseño original, traducidas en enormes momentos de torsión sobre los puntos de apoyo de cimentación, así como máximos momentos de pandeo ubicado a 1/3 de altura de su base de apoyo.
- Debidas a ráfagas de vientos aparecidas con gran turbulencia y desplazamiento ha provocado probablemente vibraciones de resonancia como consecuencia de los llamados vórtices de "Von Karman", produciendo debilitamientos internos a consecuencia de las entradas y salidas de parcelas de vientos en la superficies de barlovento de la estructura expuestas directamente al efecto del viento dando un empuje o presión sobre la misma. y en la cara opuesta o sotavento, tendiendo separar al objeto y provocar una succión al mismo.
- La empresa ha tenido que soportar dentro de su historial a eventos catastróficos producidos por tormentas a su paso dentro del Sistema Interconectado Nacional, en el cual se verifican que muchas fallas de las líneas de transmisión se deben a vientos intensos y localizados asociados al pasaje de tormentas severas, pero aún así, estos no se han visto reflejado en las normas de diseño de estos sistemas, en donde los datos estadísticos no tienen en cuenta a estos fenómenos con esta intensidad y actividad, sin embargo esto es de particular importancia en Sudamérica (se incluye a países como Argentina, Uruguay, Sur de Brasil y Paraguay).

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- V. Durañona; J.A. cataldo "Salidas de funcionamiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en Uruguay y su relación con la ocurrencia de tormentas severas"/ XIII ERIAC (2009)
- Bortoli et al "Sobre la caracterización de vientos producidos por tormentas eléctricas y su utilización en Ingeniería" bajado de Internet 09/05/2010
- Alvarez y Alvarez et al "Análisis de las características turbulentas del flujo de capa límite reproducido en el Túnel de viento TV2 de la Facultad de Ingeniería" Facultad de Ingeniería, (UNNE) C.P. 3500 – Resistencia – Chaco – Argentina (2004)
- M salinas et al "Simulación de la turbulencia de un flujo que pasa alrededor de un cilindro de sección cuadrada a partir de la utilización de la simulación de grandes escalas y de fronteras inmersas" Investigación revista mexicana de física S3(6) 461-469 diciembre 2007.
- INPE/CPTEC/DSA/ Br - Satélite GOES 10 – imágenes proveídas por Lic. Max Pasten Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción- (2009)
- Datos fotográficos de la División de Mantenimiento de la Gerencia Técnica (ANDE)