

SALIDAS DE FUNCIONAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN EN URUGUAY Y SU RELACIÓN CON LA OCURRENCIA DE TORMENTAS SEVERAS

V. DURAÑONA*
Instituto de Mecánica de los Fluidos e
Ingeniería Ambiental, Facultad de
Ingeniería, Universidad de la República
Uruguay

J.A. CATALDO
Instituto de Mecánica de los Fluidos e
Ingeniería Ambiental, Facultad de
Ingeniería, Universidad de la República
Uruguay

Resumen – Gran parte de las fallas en sistemas de transmisión eléctricos se deben a la ocurrencia de vientos de velocidad elevada, y en particular, al desarrollo de tormentas severas, las cuales generan corrientes descendentes intensas y eventualmente tornados. Aunque la probabilidad de ocurrencia de una corriente descendente en un sitio determinado no es en general elevada debido a sus dimensiones reducidas, la probabilidad de que uno de estos eventos atraviere un sistema de transmisión eléctrico es significativa debido a la extensión importante que presentan los mismos. A pesar de esto, la mayoría de las normas de diseño todavía estiman las cargas que el viento impone sobre estos sistemas suponiendo flujos tipo Capa Límite Atmosférica (CLA), lo cual da lugar a una subestimación importante de estas cargas. En este trabajo se analiza una serie de salidas de línea de las líneas de alta tensión de la compañía eléctrica uruguaya y su correlación con el pasaje de tormentas severas sobre las mismas. Se caracterizan las velocidades generadas, direcciones y velocidades de traslación, épocas del año y horas del día típicas. Finalmente se realiza el cálculo de las cargas que estos flujos imponen sobre las líneas y del ángulo de balanceo que producen en sus conductores.

Palabras clave: Tormentas Severas – Corrientes Descendentes – Cargas por Viento – Normas de Diseño – Líneas de Transmisión de Alta Tensión

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace un tiempo, la compañía eléctrica uruguaya UTE se encuentra estudiando una serie de salidas de funcionamiento de dos líneas de 500kV que alimentan Montevideo desde la represa hidroeléctrica Constitución ubicada en el paraje Palmar, aproximadamente 300km al noroeste de Montevideo. Las características de estas salidas hicieron sospechar del viento como causante de las mismas y se propuso rever el método de cálculo del ángulo de balanceo de sus conductores debido a la acción del viento. Cuando estos conductores se acercan demasiado a las torres se puede producir una descarga a tierra que detiene el pasaje de energía por dicha línea. En algunos casos se produjo el corte de las dos líneas principales que se dirigen desde Palmar a Montevideo, produciéndose apagones en gran parte del país.

Utilizando bibliografía que manejan las compañías eléctricas para dicho cálculo, UTE no encontró razones que pudieran explicar la relativa frecuencia con que estos eventos ocurrían, por lo que consultó al Grupo de Eolo Dinámica del IMFIA sobre dicha problemática.

* Facultad de Ingeniería, J. Herrera y Reissig 565, IMFIA, Montevideo CP 11200, Uruguay – valeriad@fing.edu.uy

2 EVENTOS QUE PRODUCEN VIENTOS INTENSOS EN LA REGION

En nuestra región, los eventos responsables de vientos intensos se deben principalmente a la ocurrencia de ciclones extratropicales que se intensifican o a tormentas severas.

Los ciclones extratropicales son sistemas de baja presión, de diámetros del orden de los 1000 km, que en el Hemisferio Sur rotan en sentido horario. Cuando durante su trayectoria uno de estos ciclones se intensifica, los intensos gradientes de presión que se establecen pueden producir velocidades importantes a nivel del suelo durante algunas horas o algún día. Lejos de los frentes de tormenta que pueden generarse durante estos eventos, el flujo es de tipo Capa Límite Atmosférica (CLA).

El otro tipo de evento responsable de vientos intensos son las tormentas severas, las cuales tienden a formarse cuando aire húmedo y cálido se eleva en una atmósfera inestable. El aire cálido puede elevarse debido a un calentamiento desigual de la superficie terrestre, a efectos del terreno, al encuentro con una masa de aire frío o a vientos convergentes en superficie. Cuando el flujo ascendente se ve fortalecido por alguno o varios de estos mecanismos se puede dar lugar a una tormenta severa, responsable de vientos extremos. Estas tormentas van acompañadas comúnmente de precipitación de granizo grande, chaparrones intensos y ráfagas violentas.

Las tormentas severas generan corrientes descendentes (CD) con escalas espaciales de 40m a 40km y escalas temporales de algunos minutos que pueden llegar a ser muy intensas, alcanzando velocidades de hasta 270km/h [1]. Estas CD se comportan como chorros que luego de impactar sobre el suelo, se explayan y conforman un anillo vorticoso, tal como indica la Figura 1, generando velocidades importantes generalmente en la región inferior del anillo y provocando daños a nivel del suelo. La mayoría de estos eventos ocurren entre octubre y marzo y el 80% se produce entre la tarde y la noche [2]. En nuestra región, las direcciones de desplazamiento más frecuentes son del suroeste al noreste y del oeste al este, y las ráfagas más intensas provienen en general del sector suroeste [2]. La Figura 2 muestra la zona más afectada por tormentas severas en América del Sur, la cual comprende a Uruguay.

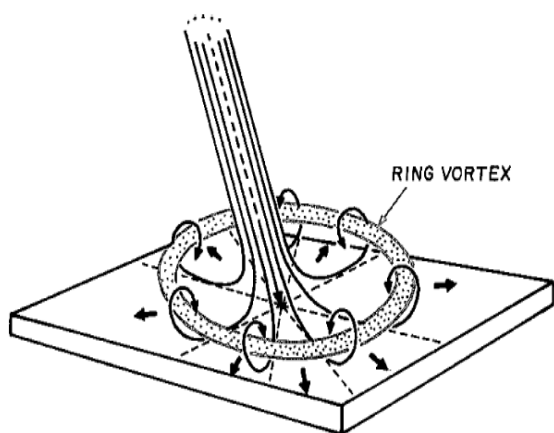


Fig. 1. Modelo de CD [1]



Fig. 2. Zona de ocurrencia de tormentas severas [3]

3 CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES DESCENDENTES

A diferencia de los flujos tipo CLA, las CD presentan una distribución de velocidad en altura con un máximo entre los 30 y los 100m, alta correlación de las velocidades más intensas en distancias del orden del kilómetro [4] y flujos que desarrollan velocidades importantes muy localizados tanto espacial como temporalmente.

En la Figura 3 se compara la distribución de velocidad en altura producida por un flujo tipo CLA y por una CD típica. En esta figura se aprecia que para este caso la CD produce velocidades mayores entre los 10 y los 120m, para una misma velocidad a 10m de altura. Por otra parte, la Figura 4 ilustra qué tan localizados pueden ser los daños producidos por CD. En este caso se muestran árboles caídos en un bosque, con una zona que presenta daños muy delimitados, en la que también se puede apreciar el patrón divergente del flujo.

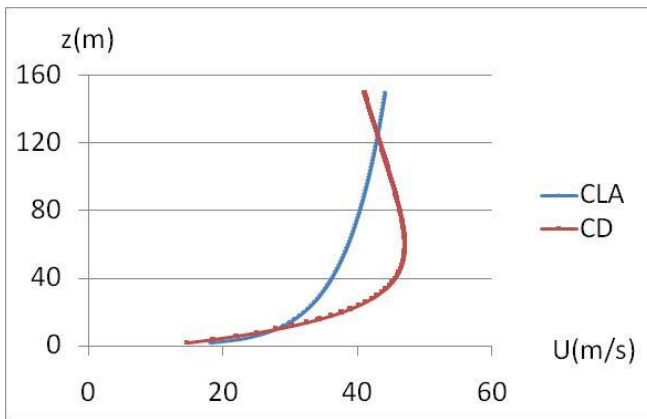


Fig. 3. Velocidad en altura en flujos tipo CLA y en CD



Fig. 4. Daños producidos por CD [5]

El área afectada puede presentar gradientes de velocidad similares a los indicados en la Figura 5. La velocidad varía en función de la proximidad al centro de la tormenta y del tiempo transcurrido desde el inicio de la misma, y su distribución, de su velocidad de traslación. Esta figura también ilustra sobre las dimensiones características que puede tener el área afectada.

Finalmente, la Figura 6 muestra el registro de la evolución de la componente horizontal de la velocidad a 10m de altura durante una CD que tuvo lugar en Montevideo [7]. En ella se puede apreciar un incremento en la velocidad de 40 a prácticamente 200km/h en menos de 2 minutos, un mantenimiento de la misma por encima de los 100km/h durante 4 minutos y un descenso a valores similares a los anteriores nuevamente en pocos minutos. Aunque no existen demasiados registros de medidas de velocidad durante CD, debido a su baja escala espacial y temporal, los mismos presentan características similares a las presentadas por esta figura, es decir, escalas temporales de minutos, incrementos y descensos de velocidades repentinos entre 1 y 4 minutos, velocidades máximas horizontales generalmente mayores a los 100km/h, y en algunos casos en que se registró adicionalmente la dirección, cambios importantes en la dirección del viento.

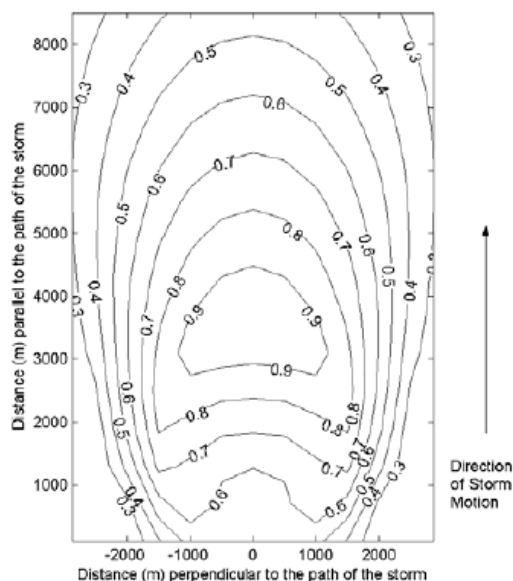


Fig. 5. Velocidad en plano horizontal de CD simulada [6]

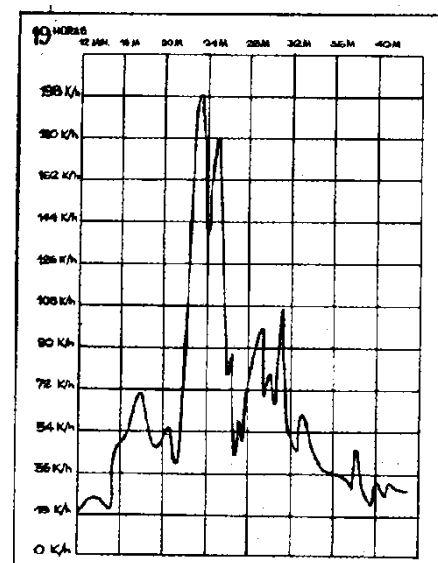


Fig. 6. Registro de velocidad durante CD en Montevideo [7]

4 TORMENTAS SEVERAS Y SISTEMAS ELÉCTRICOS

Aunque la probabilidad de que una CD ocurra en un sitio determinado es relativamente baja, la probabilidad de que atraviese un sistema de transmisión eléctrica no lo es, por las extensiones características de estos [2]. Esta probabilidad aumenta cuando las líneas se orientan de manera perpendicular a las direcciones predominantes de traslación de las tormentas, como es el caso de las líneas de UTE orientadas de noroeste a sureste, mientras que las tormentas severas en la región se trasladan mayoritariamente de suroeste a noreste.

A pesar que desde hace un tiempo se reconoce que muchas fallas de líneas de transmisión se deben a vientos intensos y localizados asociados al pasaje de tormentas severas [8], esto aun no se ha visto reflejado en las normas de diseño de estos sistemas, las cuales, con pocas excepciones, siguen suponiendo flujos tipo CLA para calcular sus cargas de diseño. Esto es de particular importancia en las regiones continentales entre los 10 y los 40° de latitud, donde las CD suelen ser las principales responsables de la ocurrencia de ráfagas intensas. Muchas de las compañías eléctricas de América del Norte, América del Sur, Australia y Sudáfrica informan que entre el 80 y el 100% de las fallas de sistemas eléctricos relacionadas con eventos climáticos se deben a flujos localizados producidos por tormentas severas.

En muchos casos la causa principal de la falla se debe a que aparecen cargas diferentes a las de diseño debido a la acción de estos tipos de flujos. En particular, las CD presentan ráfagas intensas con una mayor correlación que las correspondientes a los flujos tipo CLA [4] y una distribución de velocidad en altura tal que producen cargas mayores a las esperadas sobre el sistema. Así mismo, pueden producir velocidades intensas sobre las líneas con menores periodos de retorno que los flujos tipo CLA.

5 ANÁLISIS DE FALLAS EN LÍNEAS DE 500 KV PALMAR-MONTEVIDEO

Se realizó un análisis del estado del tiempo durante una serie de fechas en las que UTE indicó que se habían producido faltas de energía debido a cortes en las líneas de transmisión de 500kV Palmar-Montevideo. En particular, se buscó información en periódicos que permitiera establecer el pasaje de tormentas severas sobre las líneas en esas fechas, tales como informes de ocurrencia de vientos intensos y de corta duración, granizo o lluvias intensas.

De las 23 faltas estudiadas, en 16 se encontraron registros de vientos fuertes localizados, granizo o lluvias intensas en la zona, apoyando la hipótesis de que en su gran mayoría habían sido causadas por tormentas severas [9]. La distribución de la época del año de las fechas y las horas del día en las que ocurrieron las faltas coinciden con las distribuciones esperadas para tormentas severas. Por otra parte, cuando se tenía registro de la hora de ocurrencia de estos eventos, se encontró una alta correlación con la hora de la falta. Así mismo, cuando se tenía registro de la localización de la falta en la línea, ésta quedaba comprendida entre las zonas con daños más intensos por viento, como se muestra en la Figura 7.

En esta figura se presenta gráficamente el lugar de ocurrencia de las faltas sobre las líneas de las que se tenía información sobre su localización, y para las mismas fechas, con el mismo número y color, los lugares del país que se vieron afectados por viento, granizo y/o lluvia intensos y localizados, indicadores del pasaje de tormentas severas y de la ocurrencia de CD. También se pudo verificar que las tormentas cuyas trayectorias pudieron ser estudiadas se trasladaban principalmente de oeste a este y del suroeste al noreste, como era esperable para la región, con velocidades entre 50 y 90km/h. Los valores de las ráfagas más intensas que pudieron ser registradas durante estos eventos se ubicaron entre los 90 y 145km/h a 10m de altura y las direcciones predominantes correspondieron al suroeste y al oeste, valores y direcciones característicos de las velocidades producidas por CD en la región. Se debe indicar que las ráfagas desarrolladas pueden haber sido más intensas que las registradas, ya que no siempre se cuenta con anemómetros cercanos a las zonas más afectadas por las tormentas.

De este análisis también se pudo comprobar la relativa pequeña escala espacial y temporal de los eventos, al observar las áreas afectadas por cada uno de ellos, y la descripción de la duración de algunos de los eventos en los periódicos cuando se contaba con esta información.

Por otra parte, personal de UTE indicó que durante estos eventos muchas veces se intentó el reenganche manual de la línea sin éxito durante algunos minutos. Este periodo coincide con la escala temporal de las velocidades más intensas asociadas a CD, las cuales producirían cargas lo suficientemente elevadas como para poder mantener a los conductores cerca de las torres e impedir el reenganche hasta que la velocidad no haya descendido a valores menores, como se verá en el numeral 6.

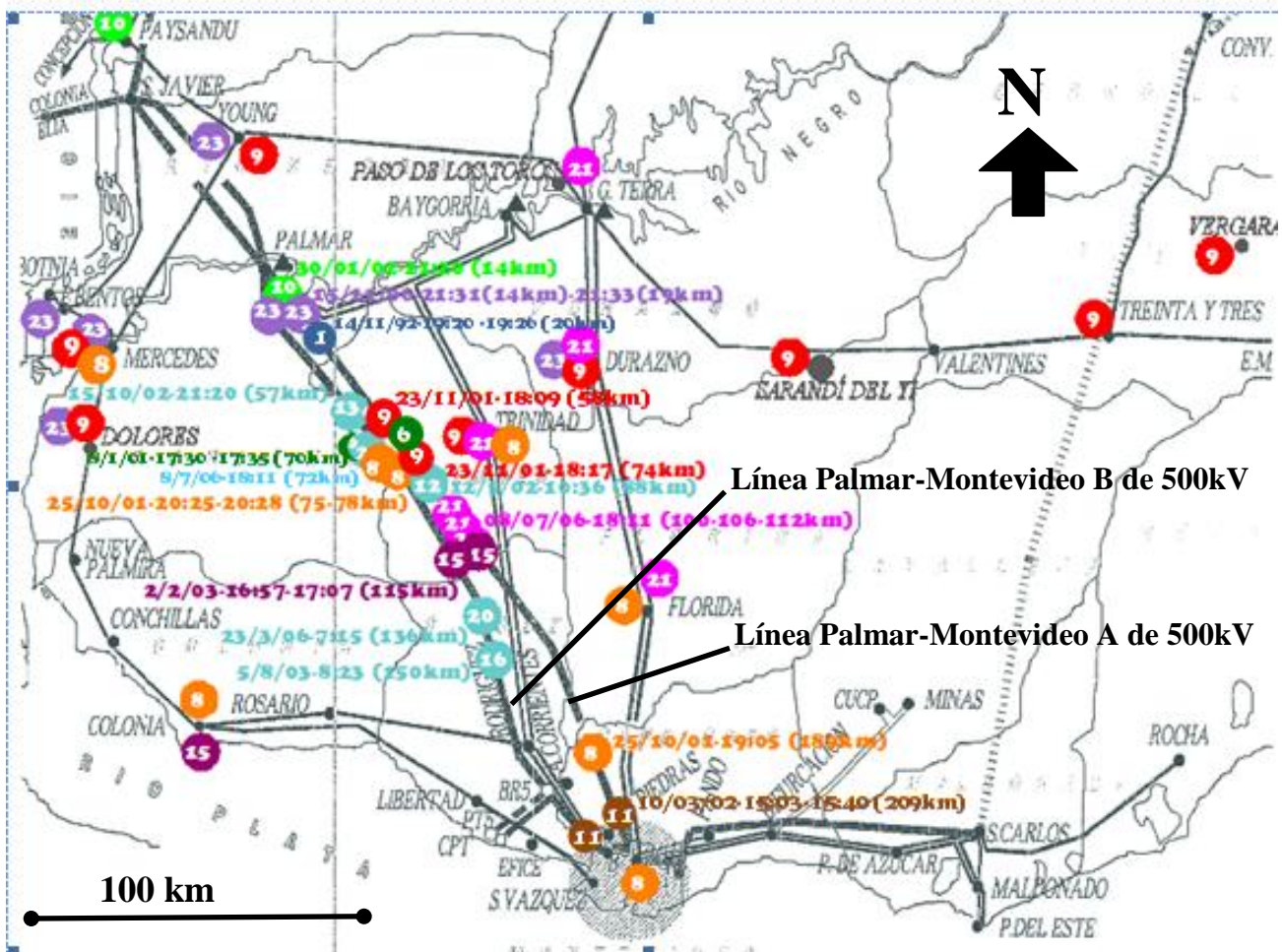


Fig. 7. Localización de incidencias y zonas con daños registrados por viento

Así mismo, en los casos en que las incidencias afectaron a ambas líneas a la vez, se comprobó que la distancia entre éstas era lo suficientemente corta como para poder ser causadas por la misma CD. En estos casos se afectaba primero la línea B y luego la A, indicando el sentido de avance de la tormenta de oeste a este. Adicionalmente, las incidencias se registraron en la ménsula oeste de las líneas el 85% de los casos en los que se contaba con este dato. Éste es otro indicador de que la mayoría de las incidencias fueron producidas por viento, ya que las ráfagas más intensas producidas por CD en la región son del suroeste y del oeste y es en la ménsula oeste donde la fuerza del viento haría que los conductores se acercaran a la torre, generando la salida de la línea.

De este análisis se pudo comprobar también que se tendrían varios eventos al año atravesando las líneas con velocidades mayores a 100km/h a 10m de altura. La frecuencia de estos eventos es significativamente mayor a la correspondiente a eventos similares generados por ciclones extratropicales. Por otra parte, es altamente probable que durante las CD estudiadas se hayan producido velocidades aun más elevadas, debido a que la localización de los anemómetros donde se logra registrar su velocidad no siempre coincide con las zonas donde se desarrollan las velocidades más intensas.

6 ANÁLISIS DE CARGAS SOBRE CONDUCTORES Y DE SUS ANGULOS DE BALANCEO

Las cargas sobre los conductores de una línea de transmisión se deben a su peso y a la interacción de estos con el viento. Esta interacción ejerce una fuerza sobre los conductores, generalmente en la dirección del viento, debida a las pérdidas que sufre el flujo al escurrir alrededor del conductor. Las características del escurrimiento varían con el número de Reynolds (Re), por lo que esta fuerza depende del valor que tome este parámetro.

La fuerza sobre los conductores se puede calcular como:

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \alpha \cdot A_c \cdot C_D \cdot \hat{U}_c^2 \quad (1)$$

donde \hat{U}_c es la componente de la velocidad de ráfaga normal a la línea, calculada como:

$$\hat{U}_c = \text{sen} \beta \cdot \hat{U}_{Z_{ref}} \quad (2)$$

En esta expresión β es el ángulo comprendido entre la velocidad y la recta definida por los extremos del conductor y Z_{ref} es la altura significativa de los conductores, definida como:

$$Z_{ref} = \frac{0,5(Z_1 + Z_2) + Z_{min}}{2} \quad (3)$$

con Z_1 , Z_2 y Z_{min} como indica la Figura 8. Para las líneas de UTE, $Z_{ref}=15,7\text{m}$ en promedio.

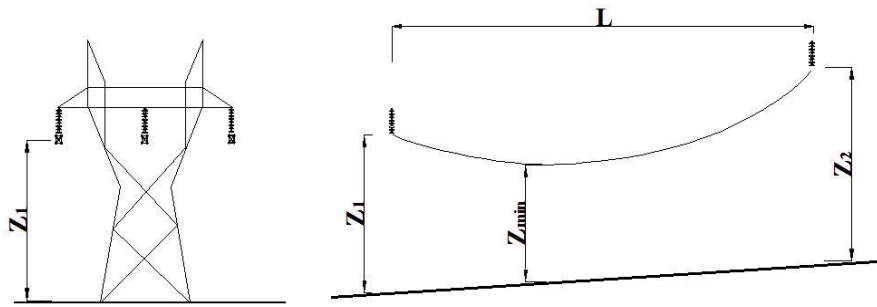


Fig. 8. Definición de Z_1 , Z_2 y Z_{min}

Por otra parte, C_D es el coeficiente de arrastre del conductor, el cual se puede obtener por ejemplo de [10] y A_c es el área expuesta de referencia del conductor, calculada como:

$$A_c = N_c \cdot d_c \cdot L \quad (4)$$

donde N_c es el número de conductores, normalmente 4 por fase; d_c es el diámetro de los conductores, en este caso 23,6mm y L es el vano, distancia entre las torres, la cual sería en promedio 381m para las líneas de UTE estudiadas.

Por otra parte, α es un factor de corrección por correlación de las ráfagas en la distancia L , el cual toma la siguiente expresión para flujos tipo CLA en terreno rural, según [11]:

$$\alpha = 0,58 + 0,42 \cdot e^{-\frac{L}{180}} \quad (5)$$

En este caso α vale 0,63, mientras que para flujos generados por CD α toma valores más cercanos a 1, debido a la alta correlación que presentan las velocidades más intensas en estos flujos [4], tal como indica la Figura 9. Para CD y vanos de 381m, α tomaría un valor de 0,89.

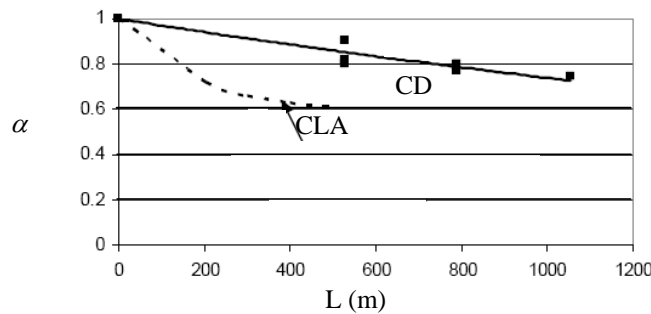


Fig. 9. Valores de α para flujos tipo CLA y CD (adaptada de [4])

Si se tiene una velocidad media a 10m de altura de 100km/h, la velocidad media a la altura de los conductores sería 30,5m/s si el flujo fuera tipo CLA. Para obtener la velocidad media a la altura de los conductores para un flujo producido por una CD se utilizó el modelo analítico presentado en [12]. En este caso se obtuvo una velocidad media de 34m/s a 1000m del centro de la CD, suponiendo que ésta desarrolla su velocidad máxima a una distancia de 1500m y tomando valores típicos para los restantes parámetros. La velocidad media máxima desarrollada por esta CD en el plano horizontal a la altura de los conductores sería 39,5m/s, es decir, un 22% mayor que la desarrollada por el flujo tipo CLA. La velocidad de ráfaga se estimó en un 30% por encima de la velocidad media en ambos casos.

Finalmente, el ángulo de balanceo se podría calcular como:

$$\theta = \arctg(F_c / P) \quad (6)$$

donde F_c se calcula a partir de la ecuación 1 y P es el peso de los conductores, de densidad 2714kg/m³. En este planteo se desprecia la fuerza sobre los aisladores, la cual es del orden del 0,5% de F_c y la velocidad vertical, la cual se estima entre 3 y 5m/s para CD a esa altura, y se supone válida la aproximación cuasi estacionaria, hipótesis que pudo ser verificada. En la siguiente tabla se consignan los resultados obtenidos:

TABLA I. FUERZAS SOBRE LOS CONDUCTORES Y ANGULO DE BALANCEO

Tipo de flujo	\hat{U}_c (m/s) (a Zref=15.7m)	C_D	α	F_c (kN)	θ (°)
CLA	39,7	1,14	0,63	24,4	54
CD	44,2	1,14	0,63	30,2	60
CD	44,2	1,14	0,89	42,7	68
CD	97,9	1,06	0,63	13,8	83
CD	97,9	1,06	0,89	194,7	85

En esta tabla se puede observar que en el caso de que el flujo sea tipo CLA se tendría una velocidad de ráfaga a la altura de los conductores de 39,7m/s y un ángulo de balanceo de 54° si se tiene una velocidad media de 100km/h a 10m de altura. Si por el contrario el flujo fuera el generado por una CD, esta velocidad sería de 44,2m/s y el ángulo de balanceo 60° si se supone un factor α igual al del flujo tipo CLA, y 68° en el caso de que este factor sea 0,89. Las dos últimas filas corresponden al caso de una CD como la mostrada en la Figura 6, que desarrollara una velocidad media de 200km/h a 10m de altura.

7 CONCLUSIONES

Se pudo verificar que la mayoría de las incidencias ocurridas en las líneas Palmar-Montevideo de 500kV coinciden con el pasaje de tormentas severas sobre la zona estudiada. Estas tormentas producen CD intensas que pueden ocasionar velocidades y cargas elevadas sobre los conductores por periodos del orden de los minutos, imponiendo ángulos de balanceo excesivos que acercarían los conductores a las torres a una distancia capaz de producir descarga a tierra e impedirían el reenganche de la línea durante ese lapso.

Dada una misma velocidad a 10m de altura, CD como las estudiadas imponen cargas mayores sobre los conductores, y por ende, mayores ángulos de balanceo que los flujos tipo CLA, debido a su particular distribución de velocidad en altura y a sus mayores correlaciones sobre los vanos. Por otra parte, se han encontrado indicios que los periodos de retorno para velocidades elevadas que ocurren sobre las líneas analizadas, como por ej., de 100km/h o más, serían menores para las CD que para los flujos tipo CLA. Para poder cuantificar estos periodos de retorno se hace necesario llevar adelante una investigación más detallada sobre las CD en Uruguay.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T.T. Fujita, "The downburst: microburst and microburst". Paper No. 210, Satellite and Mesometeorology Research Project, Dep. of Geophysical Sciences, The University of Chicago, Chicago, IL, 122p, 1985.
- [2] M.L. Altinger de Schwarzkopf, L.C. Rosso, *Riesgo de tornados y corrientes descendentes en la Argentina*, Universidad de Buenos Aires, Argentina, editado por INTI, 1993.
- [3] E.L. Nascimento and C.A. Doswell, "The need for an improved documentation of severe thunderstorms

- and tornadoes in South America". in *Severe Local Storms Special Symposium, 86th AMS Annual Meeting*, Atlanta/USA, paper P1.18, in CD-ROM,2006.
- [4] J. Holmes, H.M. Hangan, J.L. Schroeder, C.W. Letchford, "A forensic study of the Lubbock-Reese downdraft of 2002. II. Running-mean wind speeds and turbulence", in *12th International Conference on Wind Engineering*, Cairns, Australia, 1-6 julio 2007.
 - [5] T.T. Fujita, "Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales", *J. of the Atmospheric Sciences*, vol. 38, n°8, pp. 1511-1534, 1981.
 - [6] M.T. Chay, F. Albermani, H.Hawes, "Wind loads on transmission line structures in simulated downbursts", in *1st World Congress on Eng. Asset Management*, 11-14 Julio, Gold Coast, Queensland, Australia, 2006.
 - [7] S.E. Vieira, 1969, *Tiempo y Clima*, ed. nuestra tierra, vol. 8, 68pp.
 - [8] *Memorias de la Task Force on High Intensity Winds on Transmission Lines*, 19-23 de abril de 1993, Buenos Aires, Argentina, 1993.
 - [9] V. Durañona y J. Cataldo, "Caracterización de corrientes descendentes y su impacto en líneas de transmisión", Informe para UTE, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Mayo 2008.
 - [10] CSIR, *Transmisión Line Loading, Part I: Recommendations and Commentary*, Sudáfrica.1990.
 - [11] ASCE, *Guidelines for electrical transmission line structural loading, Committee on Analysis and Design of Structures*, Struct. Div., Amer. Soc. of Civil Engineers, Oct. 1990.
 - [12] M.T. Chay, F. Albermani, R. Wilson, "Numerical and analytical simulation of downbursts wind loads", *J. of Eng. Struct.*, 28(2), pp.240-254, 2006.