

## ACCIÓN DEL VIENTO COMO PROCESO ESTOCÁSTICO APLICADO A LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Julio A. Mercanti<sup>a</sup>, Horacio D. Pizzutti<sup>a</sup>, Miguel A. Aguirre<sup>a</sup>  
Pamela Y. Fank<sup>a</sup>, Oscar Möller<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones  
Rosas 325. 3360. Oberá. Misiones. Argentina  
e-mail: [mercanti@fiobera.unam.edu.ar](mailto:mercanti@fiobera.unam.edu.ar)  
<http://www.fiobera.unam.edu.ar>*

<sup>b</sup> *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE),  
Facultad de Cs.Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario,  
Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.  
e-mail: [moller@fceia.unr.edu.ar](mailto:moller@fceia.unr.edu.ar)  
<http://www.fceia.unr.edu.ar>*

**Palabrasclave:** Líneas aéreas de energía eléctrica; acción del viento; proceso estocástico

**Resumen.** Se presenta un procedimiento para aproximar numéricamente la acción dinámica del viento horizontal en dirección perpendicular a la línea, para su utilización en el análisis estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica. Se parte del modelo clásico de representación de la velocidad del viento como suma de un valor medio constante más una componente fluctuante.

Su consideración como proceso estocástico tiene como objetivo representar razonablemente la característica aleatoria del efecto dinámico del viento. Se utiliza el espectro de potencia de Kaimal para generar funciones de la componente turbulenta, miembros del proceso estocástico, considerando la correlación tanto espacial a lo largo de la línea como temporal.

El procesamiento numérico se aplica a un modelo estructural simplificado representativo de una estructura de suspensión simple de hormigón estructural de una línea de transmisión en 132kV, para la Provincia de Misiones, Argentina.

## 1. INTRODUCCIÓN

En estudios de confiabilidad estructural aplicados a líneas de transmisión de energía eléctrica en el nivel de 132kV que se ejecutan en el nordeste de Argentina, a efectos de evaluar el riesgo de colapsos resulta indispensable la estimación de la respuesta dinámica de las estructuras frente a las cargas eólicas, resultando de particular interés el análisis de comportamiento de la acción variable del viento en el tiempo y en el espacio, y la consideración de modelos y algoritmos que posibiliten cuantificar sus efectos.

Juntamente con la influencia de la temperatura, la acción de la velocidad del viento es aquí preponderante en el análisis de las cargas de diseño. Resulta habitual la adopción o asignación de parámetros de diseño contenidos en especificaciones técnicas y con sujeción a Reglamentos de referencia (DIN VDE, 1985; Asociación Electrotécnica Argentina, 2007). La variable velocidad del viento, en particular, es abordada con enfoques determinísticos, lo que proporciona razonable operatividad a las labores de proyecto. El análisis de los distintos componentes de sistemas estructurales se efectúa mediante la utilización de cargas estáticas equivalentes que contemplan la acción de las ráfagas (turbulencia) con magnitudes tales que provoquen desplazamientos similares a los que ocurrirían si sus efectos dinámicos fueran detalladamente considerados.

Pero en el análisis con criterios de confiabilidad estructural de sistemas de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, caracterizados en general por su considerable flexibilidad, adquiere especial significado la incidencia de las fuerzas dinámicas generadas por la acción del viento en conductores eléctricos, cables de guardia, aisladores y estructuras de soporte. Estas fuerzas, resultantes de la integración de presiones actuando sobre sus superficies incidentes, presentan un carácter no determinístico, pues derivan de la velocidad del viento, la que puede abordarse con adecuada aproximación a través de su consideración como procesos aleatorios o estocásticos (Möller, 2007).

La literatura técnica (Álvarez Marín, 2003; Castro et. al., 2007; Ribeiro de Oliveira, 2006) proporciona información sobre metodologías para la simulación digital de registros de velocidades de vientos. Los procedimientos suplen la habitual carencia de registros históricos de series de velocidades, y a partir de información estadística básica de carácter regional constituyen herramientas que satisfacen en general las demandas de procesamiento.

## 2. OBJETIVO

En esta perspectiva surge la necesidad de considerar y ajustar un modelo de comportamiento de la variable velocidad del viento que resulte suficientemente aproximado y relativamente accesible para su reproducción operativa. A cuyos fines se valora la conveniencia de efectuarlo con herramientas proporcionadas por la teoría de los procesos estocásticos.

El objetivo del presente trabajo consiste en formular un procedimiento aproximado para la simulación del comportamiento aleatorio de la acción dinámica del viento, susceptible de utilización en contextos geográficos con carencia o insuficiencia de registros históricos de velocidad, con vistas a su aplicación al análisis y obtención de la respuesta estructural de sistemas de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica.

## 3. PROCEDIMIENTO

En el presente trabajo se ha considerado solamente la acción del viento horizontal, perpendicular al eje de la línea, coincidente con la dirección de la componente principal del vector velocidad de viento, condición denominada de *viento longitudinal* (dirección X de un sistema cartesiano ortogonal de referencia, con origen a nivel del terreno natural),

despreciándose la influencia de las componentes vertical (dirección Z) y lateral (dirección Y, eje de la línea) (Rodríguez, 2004; Castro et al., 2007). El modelo adoptado para simular la velocidad del viento longitudinal parte de su consideración como variable aleatoria de un proceso estocástico que, como frecuentemente hallado en la literatura técnica (Blessmann, 1995; Carril Junior, 2000; Ribeiro de Oliveira, 2006), como hipótesis se asume ergódico, y según la forma,

$$V(z, t) = \overline{V(z)} + v(z, t) \quad (1)$$

suma del término que expresa la *velocidad media* del viento en una cierta localización  $\overline{V(z)}$ , función únicamente de la cota  $z$  e invariable con el tiempo  $t$ , y de la *componente longitudinal de velocidad de las fluctuaciones*  $v(z, t)$ , en torno de este valor medio, originada en la turbulencia del viento atmosférico.

Para la determinación de la velocidad media a una determinada cota, se aplica la ley potencial (Simiu y Scanlan, 1986; Blessmann, 1995),

$$\overline{V(z)} = \overline{V(10)} (z/10)^p \quad (2)$$

que relaciona las velocidades medias en dos alturas cualesquiera dentro de la capa límite atmosférica, por ejemplo, en  $z$  genérica y en  $z = 10m$ , con  $p$ , exponente adimensional dependiente de la rugosidad del terreno. Según especificaciones contenidas en los Reglamentos, y (sin perder generalidad por la adopción de un marco reglamentario referencial determinado) tomando como ejemplo el del brasilero de fuerzas debidas al viento en edificaciones (ABNT, 1988), la velocidad media a la cota de referencia adoptada de  $10m$  sobre el nivel del terreno, se obtiene de,

$$\overline{V}_{10} = 0,69 S_1 S_3 V_0 \quad (3)$$

en la que  $S_1$  y  $S_3$  son factores de corrección topográfico y estadístico, respectivamente; y  $V_0$  [ $m/s$ ] es la *velocidad básica del viento* que representa el valor de la velocidad de ráfagas de tres segundos que es superado en promedio, una vez cada 50 años, a la altura de referencia, en campo abierto y plano. Conviene señalar que si bien se expresan diferencias en el formato determinístico que adoptan las reglamentaciones, es la variable  $V_0$  la que aparece en casi todos ellos, si bien con denominaciones diferentes) (ABNT, 1988; INTI-CIRSOC, 2005; Asociación Electrotécnica Argentina, 2007). Y que, tal como se apunta más adelante, sus valores resultan concordantes para el área de estudio.

El término  $v(z, t)$  en (1) expresa los efectos de la turbulencia atmosférica. Constituye la parte fluctuante de la velocidad del viento, reproduce el efecto de las ráfagas, y suele abordarse en la literatura como un proceso estocástico ergódico. Representa funciones temporales simuladas a partir de series de Fourier y con base en una función de densidad espectral de potencia. En el presente trabajo, es generada mediante una expresión que se asume preserva las propiedades estadísticas del proceso (Ribeiro de Oliveira, 2006),

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 S^v(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (4)$$

con:  $S^v(f_i)$  en [ $m^2/s$ ], *función de densidad espectral de potencia* del viento para un dado rango de frecuencias  $f_i$  [ $s^{-1}$ ];  $\Delta f$ , incremento de frecuencia [ $s^{-1}$ ];  $\theta_i$ , ángulo de fase aleatorio entre  $0$  y  $2\pi$ , y  $N$ , número de divisiones consideradas en el espectro.

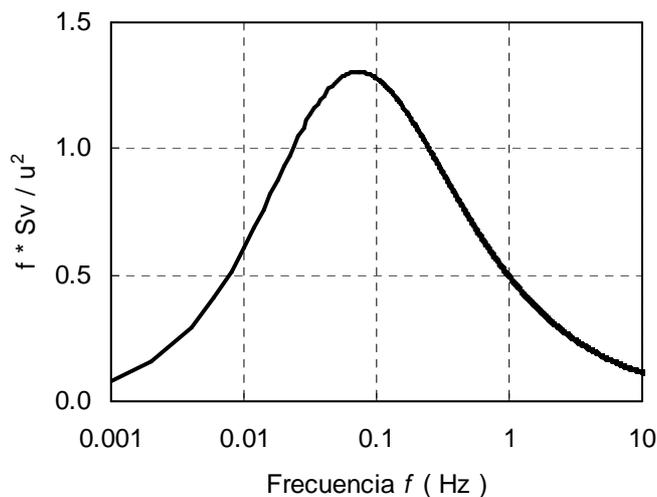
Para la cuantificación de  $S^v(f_i)$  se adopta la función de densidad espectral de potencia de *Kaimal*, ver Figura 1, cuya expresión (GavazzaMenin, 2002) es,

$$\frac{f S^v(z,f)}{u_*^2} = \frac{200 x}{(1+50 x)^3}; x(z, f) = \frac{z f}{\bar{v}_z} \quad (5)$$

con  $u_*$  velocidad de corte o de fricción [m/s] ,

$$u_* = \frac{0,4 \bar{V}_z}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (6)$$

$Y_{z_0}$ , la denominada *longitud o altura de rugosidad* (dependiente del tipo de rugosidad superficial), en [m]. La formulación de Kaimal, varía además de con  $f$ , con la altura  $z$  a la que se desea considerar los efectos de la turbulencia.



**Figura 1:** Espectro de Kaimal para una altura  $z$

Sistemas estructurales que se desarrollan linealmente en el terreno, como es el caso de las líneas de transmisión de energía eléctrica, hacen preciso tener en cuenta la variabilidad espacial de la velocidad del viento. En el caso específico del presente trabajo, de la componente longitudinal de la velocidad de turbulencia. Aquí se considera solamente la que acontece en dirección transversal horizontal, simplificación que se justifica en que las dimensiones horizontales del sistema (sea por caso, con vanos de 250 metros de extensión) superan ampliamente a las verticales: el desarrollo medio en altura de los elementos constitutivos (conductores, aisladores, postes y accesorios) es del orden de entre 10 y 25 metros. A este fin se utilizan otras propiedades físicas y estadísticas de las fluctuaciones de la velocidad del viento: las funciones de correlación temporal y espacial, y sus correspondientes espectros de potencia.

El procedimiento simplificado utilizado en este trabajo (Ribeiro de Oliveira, 2006) consisten escoger una magnitud horizontal  $\Delta l$ , representativa de una longitud de influencia de la acción del viento, que aquí denominamos *ancho de faja o banda*, para la que se asume comportamiento homogéneo de la turbulencia (sea, por ejemplo, de un 10 a un 20% de la longitud de vano medio) y susceptible de simular mediante la expresión (4). Mediante la aplicación de la denominada *función de covariancia cruzada* de la velocidad de turbulencia,  $C^{v_1 v_2}$ :

$$C^{v_1 v_2}(\tau) = \lim(T \rightarrow \infty) \frac{1}{T} \int_0^T v_1(t) v_2(t + \tau) dt \quad (7)$$

calculada sin retardo, es decir, en el mismo instante (tiempo  $\tau$ , de desfase para evaluar correlación temporal, igual a cero) en los puntos 1 y 2, con velocidades  $v_1$  y  $v_2$ , y separados de  $y_2 - y_1 = \Delta l$ , se obtiene el valor  $C_I = C^{v_1 v_2}(0)$ :

$$C^{v_1 v_2}(0) = \lim_{(T \rightarrow \infty)} \frac{1}{T} \int_0^T v_1(t) v_2(t) dt = C_I \quad (8)$$

Se asigna el valor  $C_I$  a la *función de autocorrelación* de la variable  $v$ , que se expresa por:

$$C^v(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) v(t + \tau)) dt = C_I \quad (9)$$

El valor de  $\tau$  que satisface esta igualdad,  $\tau^*$ , expresa el tiempo que se puede utilizar como desfase para generar, con la misma función temporal presentada en (4), los miembros del proceso con comportamiento homogéneo en la extensión de la faja o banda contigua  $\Delta l$ , asegurando correlación susceptible de cuantificar.

Procediendo de la misma manera con sucesivas bandas o fajas, se puede cubrir la longitud del vano, obteniendo campos de turbulencia que exhiben comportamiento heterogéneo, aunque generados con funciones espacial y temporalmente correlacionadas.

La función dada por la expresión (7) se puede calcular por:

$$C^{v_1 v_2}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S^v(z, f) e^{-\hat{f}} df \quad (10)$$

en la que  $\hat{f}$  proviene de la función de coherencia espacial propuesta por A. Davenport, la que, despreciando la variación en altura posible entre los puntos a correlacionar se reduce, conforme a Simiu y Scanlan (Ribeiro de Oliveira, 2006) a:

$$\hat{f} = \frac{16(y_2 - y_1)}{\bar{V}(10)} f \quad (11)$$

La presión aerodinámica producida por la velocidad del viento sobre conductores, hilo de guardia, aisladores, postes y accesorios, como función de la velocidad del viento, obtenida según lo expresado en los apartados anteriores, responde a la expresión,

$$Q(z, t) = 0,613 [V(z, t)]^2 = 0,613 [\bar{V}(z) + v(z, t)]^2 \quad (12)$$

con  $Q(z, t)$  en  $[N/m^2]$ , en tanto que la fuerza aplicada sobre los distintos elementos resulta de integrar la presión dinámica sobre las superficies frontales (superficie proyectada sobre un plano vertical) de conductores, hilos de guardia, cadenas de aisladores, postes y accesorios,

$$F_v(z, t) = C_a A Q(z, t) = 0,613 C_a A V(z, t)^2 \quad (13)$$

donde  $C_a$  es el coeficiente de presión dinámica o de forma;  $A$  el área del elemento estructural expuesta al viento, y perpendicular a la dirección de su vector velocidad.

#### 4. APLICACIÓN PRÁCTICA

La aplicación del procedimiento considerado para aproximar numéricamente la acción dinámica del viento horizontal perpendicular a la línea, se efectuó sobre una porción en disposición rectilínea, a un tramo de 250m de longitud, representativo del vano medio de sistemas de transmisión de energía eléctrica en el nivel de 132kV, usuales en la Provincia de Misiones, Argentina, ver Figura 2, clase C (Asociación Electrotécnica Argentina, 2007).

Se considera topografía y rugosidad de terrenos abiertos a nivel, o aproximadamente a nivel, con pocos obstáculos aislados, compatible con Categoría II; construcción cuya ruina total o parcial puede afectar la seguridad o la posibilidad de auxiliar a personas en condición

de catástrofe general del tipo Grupo 1 (ABNT, 1988), grado de exposición C (Asociación Electrotécnica Argentina, 2007).

La acción dinámica considerada fue efectuada mediante la simulación de series de velocidades de 300 segundos de duración, con incrementos de tiempo de 0,05 segundos, generando un total de 6000 pulsos para cada serie.



**Figura 2:** Estructuras de suspensión simple, línea de 132kV en simple terna. Típica, Misiones, Argentina

#### 4.1 El modelo estructural simplificado

El objetivo más amplio del estudio iniciado propende a la obtención de la acción dinámica no determinística del viento sobre una porción espacialmente acotada del sistema estructural real que compone la línea de transmisión, considerando el funcionamiento conjunto de soportes, accesorios, aisladores y conductores e hilo de guardia. Sin embargo, el procesamiento realizado en el presente trabajo se aproxima de manera simplificada, trasladando la acción dinámica del viento actuante sobre estos últimos (conductores e hilo de guardia) a una única estructura de suspensión.

Ésta está constituida por un poste de hormigón pretensado centrifugado de 24,50m de longitud, con una altura libre de 22,05m referida al nivel del terreno, con un 10% de la longitud total empotrada en fundación tipo monoblock de hormigón simple, colada directamente en la excavación practicada en el terreno de fundación; diámetro en la cima de 0,21m y conicidad 0,015m/m.

Los accesorios de hormigón armado están constituidos por cruceta y ménsula que soportan, mediante cadenas múltiples de aisladores, dos y un conductor de fase, respectivamente; mensulín superior de fijación de hilo de guardia en el remate de la estructura.

#### 4.2 Generación de registros de velocidad del viento

La generación de los registros de velocidad a diferentes alturas sobre el terreno natural se efectuó por simulación numérica, considerando lineamientos generales del método de

representación espectral, a partir de las expresiones (1) a (6), empleando un programa desarrollado en Fortran para el procesamiento numérico.

Se utilizó una subrutina para generar ángulos de fase aleatorios  $\theta_i$ , ecuación (4), a partir de dos números naturales de 4 dígitos, utilizados como “semillas” de un pseudogenerador de distribución uniforme, lo que permitió generar registros de manera aleatoria, pero con la posibilidad de poder volver a simular el mismo miembro en caso de ser necesario.

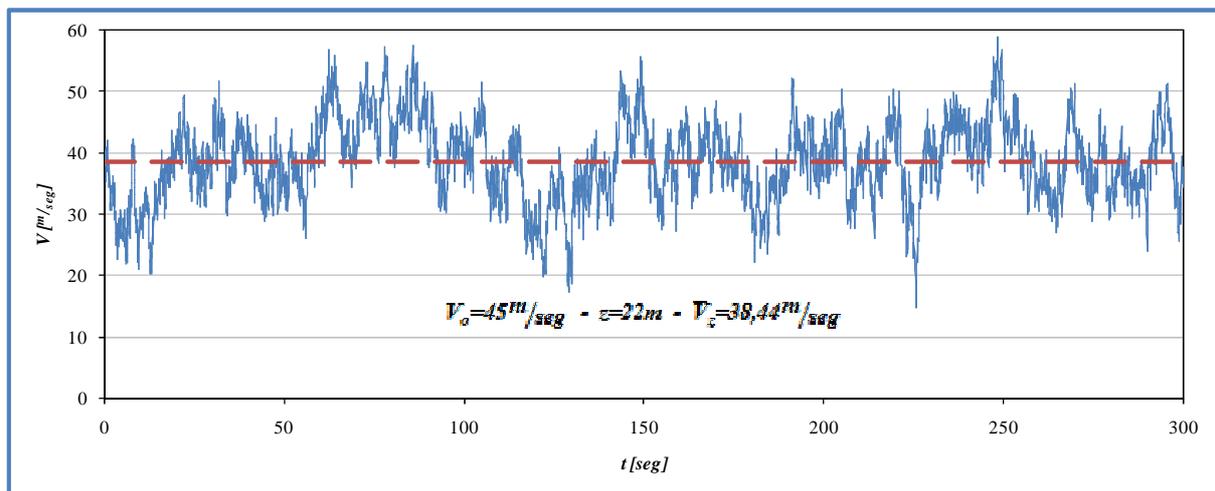
La simulación arraiga en el estudio de caso, a partir de la adopción de parámetros locales recomendados en reglamentos y provenientes de la bibliografía (Blessmann, 1995; Ribeiro de Oliveira, 2006): la velocidad básica  $V_0$ , de 45 m/s (Provincia de Misiones, Argentina), se obtiene de cartografía de isopleas, para la que en el área de estudio se verifican valores concordantes recomendados en distintas reglamentaciones (ABNT, 1988; INTI-CIRSOC, 2005; Asociación Electrotécnica Argentina, 2007).

Otros parámetros adoptados en correspondencia fueron: altura de rugosidad,  $z_0 = 0,07m$ ; coeficientes  $S_1 = 1,00$  y  $S_3 = 1,10$ ; coeficiente exponencial de la ley potencial del perfil vertical de velocidades medias,  $p = 0,15$ ; constante de Karman,  $k = 0,40$ . Por aplicación de las expresiones (3) y (6) resultan las velocidades medias y de corte o fricción que se consignan en Tabla 1, para la altura de referencia (10,00m) y en la cima del poste (22,00m).

Cota z (m)	$\overline{V(z)}$ (m/s)	$u_*$ (m/s)
10,00	34,16	2,71
22,00	38,46	2,67

**Tabla 1:** Velocidad media y velocidad de fricción a diferentes alturas

La Figura 3 muestra un registro de la velocidad total del viento en función del tiempo, de 300 segundos de duración, representativo de las series temporales generadas por simulación, a la cota  $z = 22,00m$ , y  $V_0 = 45m/s$ , y obtenida del procesamiento numérico.

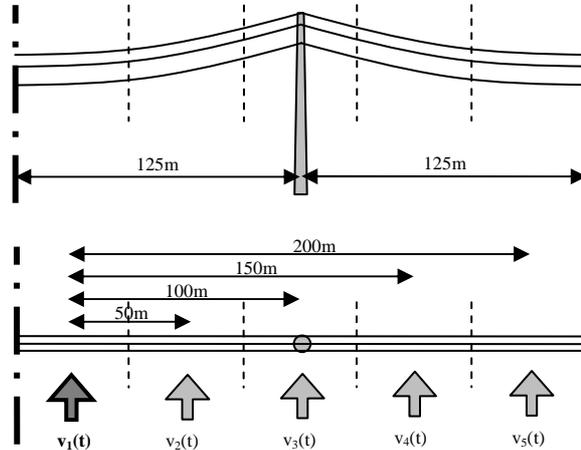


**Figura 3.** Registro simulado de la velocidad del viento, perpendicular a la línea.  
Generado para  $z = 22,00m$ ,  $V_0 = 45m/s$ . velocidad media  $\overline{V(22)} = 38,44m/s$ ,

### 4.3 Correlación espacial de la componente longitudinal de la velocidad de turbulencia

El procedimiento para obtener la distribución transversal de la componente longitudinal de la velocidad de turbulencia (perpendicular al eje de la línea) se apoyó en procesamiento numérico efectuado con planilla electrónica de cálculos y se ejecutó de la siguiente manera.

Se consideró una *longitud de aplicación*, apropiada al fin último de obtención de respuesta estructural frente a la acción del viento. En el presente trabajo se adoptó el valor del vano medio de 250m, dispuesto concéntrico con una estructura de suspensión simple, ver Figura 4, de manera que aquella asume la forma de una *longitud de influencia* de acciones sobre dicha estructura.



**Figura 4:** Subdivisión de la longitud de aplicación en bandas o fajas con campos homogéneos de velocidades espacialmente correlacionadas

Se adoptó una *longitud de banda o faja*  $\Delta l$  de 50m (20% de la longitud del vano medio), en cuya extensión se aceptó comportamiento homogéneo de la acción del viento, con lo que se obtuvieron  $m = 5$  bandas que cubren la totalidad de la longitud de aplicación. Se determinan los tiempos de retardo  $\tau^*_{\Delta l k}$ , asociados con distancias contadas a partir del baricentro de la primera faja,  $\Delta l_k = k\Delta l, k = 1, \dots, m-1$ , (es decir, 50m, 100m, 150m, 200m) que garantizan correlación espacial con la serie de velocidades simulada para la primera faja,  $v_1(t)$ .

En la Tabla 2 se muestran los valores de la función de covariancia cruzada  $C^{v_1 v_k}$  sin retardo ( $\tau = 0$ ), para 50m, 100m, 150m y 200m, esto es, el valor de  $C_1$ , según la expresión (8).

$\Delta l_k$ [m]	$C_1 = C^{v_1 v_k}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\tau^*_{\Delta l k}$ [seg]
50	58,0421	2,85
100	37,1487	4,55
150	27,4700	5,90
200	21,7873	7,05

**Tabla 2:** Valor de  $C_1$  (covariancia cruzada sin retardo) y de  $\tau^*_{\Delta l k}$  para diferentes distancias  $\Delta l_k$

Para obtener los valores de  $\tau^*_{\Delta l k}$  para cada  $C^{v_1 v_k}$  se calculó la función de autocorrelación  $C^v(\tau)$  para un intervalo de 0 a 40seg en la forma

$$C^v(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S^v(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{\infty} S^v(f) [\cos(2\pi f\tau) + i \text{sen}(2\pi f\tau)] df \quad (14)$$

habiendodespreciado, como sugerido en la literatura (Ribeiro de Oliveira, 2006), las contribuciones de la componente imaginaria.

Así, a partir de los registros utilizados para determinar el campo de velocidades  $v_1(t)$  fue posible generar los restantes:  $v_2(t) = v_1(t+\tau_{50})$ ;  $v_3(t) = v_1(t+\tau_{100})$ ;  $v_4(t) = v_1(t+\tau_{150})$ ;  $v_5(t) = v_1(t+\tau_{200})$ . De tal manera fue posible obtener una distribución de velocidades de comportamiento homogéneo por bandas o fajas, y correlacionadas, actuando sobre la totalidad de la longitud de aplicación.

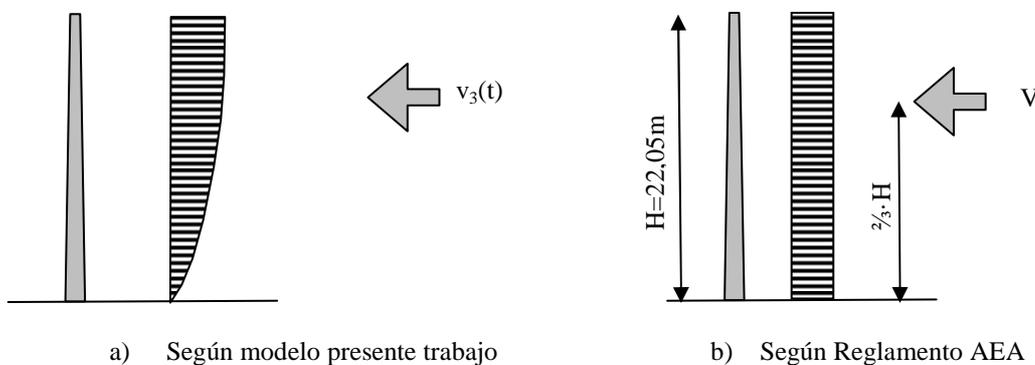
#### 4.4 Presiones y fuerzas generadas sobre la estructura por la acción dinámica del viento

En la Tabla 3 se indican características y propiedades geométricas y aerodinámicas asignadas a los distintos elementos constitutivos del modelo estructural considerado, para el procesamiento numérico. Las superficies frontales de conductores e hilo de guardia, se obtuvieron del producto del diámetro por la longitud de banda de 50 metros.

Elemento	Diámetro [m]	Superficie frontal [m <sup>2</sup> ]	Coefficiente de forma C <sub>a</sub> [adim]	Cota de aplicación de cargas al poste [m]
	(1)	(2)	(3)	(4)
Hilo de Guardia	0,009	0,45	1,00	22,05
Conductor de fase	0.0278	1,39	1,00	De ménsula: 20,95
				De cruceta: 17,50
Cadena de Aisladores	-	0,29	1,00	De ménsula: 20,95
				De cruceta: 17,50
Poste L = 24,50m h <sub>L</sub> = 22,05m	0,21 (cima)	8.277	0,90	-
	0.54(base)			

**Tabla 3:** Propiedades geométricas y aerodinámicas de los elementos estructurales

En la aplicación práctica realizada no se tuvieron en cuenta los efectos inerciales ni el amortiguamiento de los distintos componentes (cables, aisladores, postes y accesorios). El procedimiento seguido parte de la generación de las series de velocidades  $V_{22}(t)$ , correspondientes a la cota  $z = 22,00m$ , en el coronamiento del poste, que tiene en cuenta un perfil de velocidades medias, ec. (2), como el esquemáticamente indicado en la Figura 5.a. ( $v_3(t)$ , obtenido según explicado más adelante). En la Figura 5.b, se esquematiza el procedimiento sugerido en (Asociación Electrotécnica Argentina, 2007)



**Figura 5.** Hipótesis de acción dinámica del viento sobre el poste

Las acciones computadas, provenientes de las presiones dinámicas  $Q_z = 0,613 V_z^2$ , fueron determinadas de la manera diferenciada que se indica, según actúen sobre el poste, o sobre cables y aisladores.

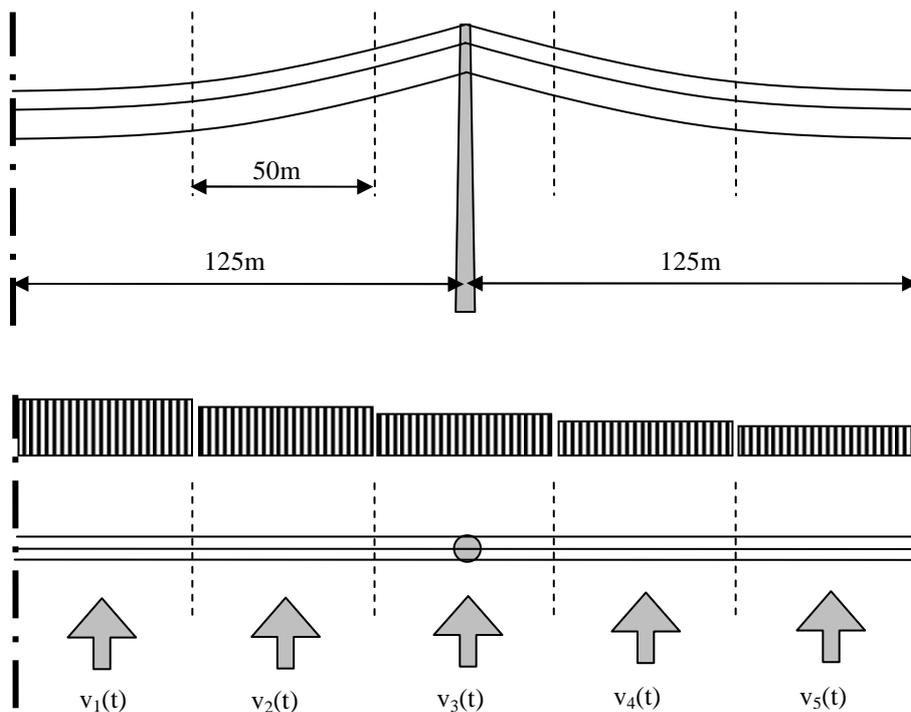
*Acciones sobre el Poste.* Aplicando la ec. (12) se calcularon las presiones dinámicas  $Q_{22}(t) = Q(22,t)$ . En las restantes alturas de interés  $z$ , situadas todas por debajo de ese nivel, las presiones  $Q_z$  fueron obtenidas en función directa de  $Q_{22}$  mediante:

$$Q_z = Q_{22} \left( \frac{\overline{Q_z}}{\overline{Q_{22}}} \right) \tag{15}$$

siendo  $\overline{Q_z}$  y  $\overline{Q_{22}}$  las presiones medias (obtenidas como  $0,613 \overline{V^2}$ ) a las cotas  $z$  y  $22m$ , respectivamente. La fuerza total se obtuvo por integración numérica de las presiones dinámicas, ec. (15), sobre el área frontal, discretizada en elementos de  $\Delta z = 0,25m$  de altura por el ancho  $b_z$ , variable con la altura debido a la conicidad del poste. Se procesaron los momentos flectores respecto de la sección situada a nivel del terreno, los que resultaron de la integración en la altura del poste, del producto de las fuerzas elementales calculadas, por sus respectivas cotas  $z$ . Fueron despreciadas las acciones sobre los accesorios.

*Acciones sobre los cables (conductores e hilo de guardia) y las cadenas de aisladores.* Las presiones dinámicas fueron aplicadas sobre la configuración no deformada por el viento de cables y aisladores; esto es, considerando solamente las deformadas por peso propio de conductores e hilo de guardia, y cadenas de aisladores en posición vertical.

A fin de contemplar la coherencia espacial de los campos de velocidades en la dirección longitudinal a la línea (transversal a la componente longitudinal de las velocidades fluctuantes), la obtención de las series temporales de velocidades se efectuó para las distintas fajas o bandas de 50m en que fuera dividida la longitud de aplicación de 250m, en forma separada para conductores (*conductor x 1*, afianzado a ménsula; *conductores x 2*, conectados a cruceta) e hilo de guardia, y en correspondencia con alturas medias representativas de las variaciones de cotas de los cables en esas bandas, ver Figura 6.



**Figura 6:** Hipótesis de acción dinámica del viento sobre conductores, hilo de guardia y aisladores

Así, en función de una serie de velocidades  $V_{22}(t)$ , asumida como “de partida”, y arbitrariamente asignada a la banda N° 1, primera de la izquierda en la Figura 6, y siguiendo el procedimiento de correlación espacial descripto, se obtuvieron, con valores  $\tau^*_{\Delta k}$  de Tabla 2, las series correlacionadas:  $V_{22}^1(t) = V_{22}(t)$ ;  $V_{22}^2(t) = V_{22}(t + \tau^*_{50})$ ;  $V_{22}^3(t) = V_{22}(t + \tau^*_{100})$ ;  $V_{22}^4(t) = V_{22}(t + \tau^*_{150})$ ;  $V_{22}^5(t) = V_{22}(t + \tau^*_{200})$ .

Se calcularon las series de presiones dinámicas:  $Q_{22}^1(t)$ ;  $Q_{22}^2(t)$ ;  $Q_{22}^3(t)$ ;  $Q_{22}^4(t)$ ;  $Q_{22}^5(t)$ . Aplicando la ec. (15), se determinaron las series a las alturas (cotas) representativas de los centros de presiones de cables y aisladores indicados en Tabla 4. Con la expresión (13) y los valores del coeficiente de forma  $C_a$  y de superficie frontal indicados en Tabla 3, se calcularon las fuerzas dinámicas.

Banda o faja con	$v_1(t)$	$v_2(t)$	$v_3(t)$	$v_4(t)$	$v_5(t)$
	Alturas medias / cotas adoptadas [m]				
Hilo de guardia	18,92	19,50	21,12	19,50	18,92
Conductor de ménsula (x 1)	14,80	15,85	17,85	15,85	14,80
Conductores de cruceta (x 2)	11,35	12,40	14,40	12,40	11,35
Aislador de ménsula	-	-	19,90	-	-
Aisladores de cruceta	-	-	16,45	-	-

**Tabla 4:** Alturas medias/cotas adoptadas para el cálculo de presiones dinámicas

Los momentos flectores respecto de la sección situada a nivel del terreno (de aquí en adelante invocados como momentos flectores en la base del poste) fueron procesados aplicando estas fuerzas al poste en las cotas que se indican en Tabla 3, col. (4).

Por vía separada se calcularon los momentos flectores obtenidos en la misma sección por la acción de las cargas de viento procesadas según el formato determinístico (que no contempla correlación espacial de las velocidades), indicado en la *Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de media Tensión y Alta Tensión*, apartado 10.2.2. (Asociación Electrotécnica Argentina, 2007), aplicadas en los mismo puntos a que corresponden las cotas señaladas en Tabla 3.

### 5. RESULTADOS

Un primer aspecto de interés a partir del procesamiento numérico fue relevar el comportamiento de las series simuladas mediante la expresión (4) y verificar si su valor medio es igual a 0, como suponen las bases del modelo teórico que expresa la ecuación (1). En la Tabla 5, y a modo de ejemplo, se resumen los valores medios de 10 registros de 300 segundos de duración (6000 pulsos de  $t$ ), obtenidos a 22m de altura, para velocidad básica de  $V_o = 45m/s$  y velocidad media de referencia  $\bar{V}(10) = 34,16m/s$ , en los que se aprecia su razonable proximidad a 0.

Registro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio de $v(t)$ [m/s]	-0.0271	0.0734	-0.4868	1.2784	-0.8143	0.8289	1.1694	0.3381	-0.5550	0.1368

**Tabla 5:** Valor medio de la velocidad de fluctuaciones (turbulencia)

Sobre 10 registros de 300seg, a 22m de altura,  $V_o = 45m/s$ , y velocidad media  $\bar{V}(10) = 34,16m/s$

En el caso ejemplificado, el mayor apartamiento de 0 que se aprecia (1,278m/s), expresa un error inferior al 4 por ciento (3,74%) respecto de la velocidad media de referencia.

La Tabla 6, resume valores calculados de la función de autocorrelación  $C^v(\tau)$ , evaluada numéricamente siguiendo la expresión (14), transformada de Fourier de la función de densidad espectral, para un rango de hasta 10 segundos de la variable independiente,  $\tau$ , computada a una cota fija,  $z$ .

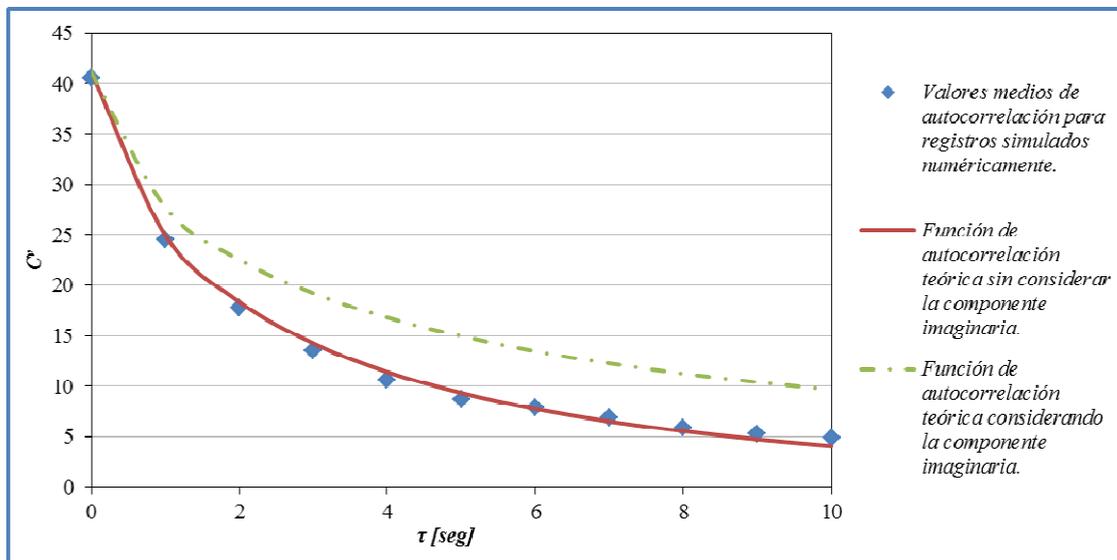
En la fila 1 se indican los valores obtenidos considerando la componente imaginaria, y en la 2, la misma expresión, despreciando dicha componente.

En la fila 3 aparecen los valores medios de la función de autocorrelación, para el mismo rango, evaluada por integración numérica de la ecuación (9), sobre diez registros simulados para 22m de altura y  $V_o = 45m/s$

Retardo, $\tau$ (seg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$C^v(\tau)$ según (14)												
1	Con comp.imag.	41.155	27.754	22.560	19.226	16.817	14.968	13.492	12.281	11.267	10.405	9.662
2	Sin comp.imag.	41.155	24.991	18.379	14.267	11.425	9.346	7.767	6.533	5.548	4.748	4.090
$C^v(\tau)$ evaluada con valores medios de 10 registros, según (9)												
3	Prom 10 registros	40.567	24.529	17.732	13.515	10.637	8.732	7.921	6.920	5.889	5.259	4.854

**Tabla 6:** Cuantificación de la función de Autocorrelación.  
Evaluada a 22m de altura,  $V_o = 45m/s$ , y velocidad media  $\bar{V}(10) = 34,16m/s$

En la Figura 7, se han dibujado los mismos resultados, y en la superposición se puede apreciar la mejor aproximación a la definición de la función de autocorrelación que se obtiene con la expresión de la Transformada de Fourier, evaluada sin computar la componente imaginaria.



**Figura 7:** Cuantificación de la función de autocorrelación.

Como transformada de la función de densidad espectral y por integración directa de registros simulados

Se ensayaron comparaciones entre resultados de solicitaciones obtenidas con el procedimiento implementado y con el consignado reglamentariamente. Para ello, se generaron aleatoriamente 50 registros de velocidad de viento. Siguiendo los pasos descritos, se obtuvieron las presiones, fuerzas y momentos flectores  $M_f$  en la base de la estructura, procesando por separado: a) las presiones actuantes sobre el poste, únicamente; b) las presiones actuantes sobre hilo de guardia y conductores, únicamente.

Para cada registro se procesaron los valores medios y máximos de  $M_f^a$  (presiones de viento incidentes sobre poste, únicamente) y  $M_f^b$  (presiones de viento incidentes sobre cables, únicamente). Luego, para los 50 registros se computó el valor medio de las medias y máximos, su desvío estándar y coeficientes de variación, los que se indican en Tabla 7. También se indican los valores correspondientes obtenidos aplicando el criterio reglamentario, que como se ha dicho, se efectúa mediante aplicación de campos de velocidades no correlacionadas.

	Viento sobre poste, únicamente		Viento sobre cables, únicamente	
	$M_f^a$ [kNm]		$M_f^b$ [kNm]	
	Momento flector Medio	Momento flector Máximo	Momento flector Medio	Momento flector Máximo
Valor Medio	53,92	143,24	310,77	611,61
Valor Máximo	58,17	169,98	335,27	767,04
Desvio	2,52	13,43	14,51	55,39
Coef. Var. (adim)	0,05	0,09	0,05	0,09
Seg. Reglam.	144,40		552,50	

**Tabla 7:** Comparación de momentos flectores en la base de la estructura Evaluada a 22m de altura,  $V_0 = 45m/s$ , y velocidad media  $\overline{V}(10) = 34,16m/s$

De las comparaciones se aprecia que considerando únicamente la acción del viento sobre el poste, el valor de la media de los momentos máximos registrados, apenas difiere del obtenido con algoritmo de Reglamento: relación  $143,24/144,40 = 0,992$ . En cambio, para la acción del viento considerada únicamente sobre conductores e hilo de guardia, la media de los valores máximos obtenidos supera al obtenido con el procedimiento reglamentario, en alrededor de un 10% ( $611,61/552,50 = 1,107$ ).

## 6. CONCLUSIONES

La simulación de registros de la velocidad fluctuante del viento mediante procesamiento numérico utilizando la expresión (4), generadas para distintas alturas  $z$  y velocidades básicas  $V_0$ , y el análisis de resultados similares a los obtenidos en tabla 5, verifica que sus valores medios calculados resultan razonablemente próximos a 0. Se cumplimenta aceptablemente el requerimiento de valor medio nulo de la componente longitudinal de la velocidad de las fluctuaciones del viento medio atmosférico en torno de la velocidad media longitudinal total, según las bases teóricas del modelo que expresa la ecuación (1). Se concluye que aporta una herramienta útil para el procesamiento numérico de la velocidad del viento atmosférico como proceso estocástico capaz de reproducir el comportamiento aleatorio de los efectos dinámicos del viento.

El procesamiento de la función de autocorrelación, ec. (9), en base a registros simulados, concuerda razonablemente con la de su evaluación a través de la transformación de la función de densidad espectral de potencia, ec. (14), despreciando en ella la contribución de la componente imaginaria.

Estas verificaciones concurren satisfactoriamente al objetivo de simular la aleatoriedad propia de la acción del viento mediante las propiedades de los procesos estocásticos, generando funciones que contemplen la correlación de las velocidades, tanto temporal como espacialmente a lo largo de una línea de transmisión de energía eléctrica.

Del análisis de series de momentos flectores producidos en la base del poste, surge que la media de los valores máximos, determinados mediante el procesamiento implementado, que

contempla la aleatoriedad propia de la acción del viento, es comparable con las magnitudes obtenidas con el procedimiento determinístico prescrito en la reglamentación. La comparación de las acciones consideradas de manera independiente sobre poste y sobre cables, permite apreciar una notable aproximación en el primer caso, y una diferencia algo mayor en el segundo, con solicitaciones superiores (del orden del 10%) obtenidas según el procedimiento de cargas aleatorias.

Si bien el modelo estructural utilizado para procesar las comparaciones resulta considerablemente simplificado se considera que, con los resultados alcanzados mediante la utilización del procedimiento implementado, se satisface razonablemente el objetivo de aproximar numéricamente la acción dinámica del viento horizontal en dirección perpendicular a la línea, particularmente en contextos geográficos con carencia o insuficiencia de registros históricos de velocidades.

Según se ha indicado, en la aplicación práctica no se han incluido efectos inerciales ni de amortiguamiento de los distintos componentes del sistema estructural modelado. A pesar de carecer, al momento de efectuar los procesamientos, de un modelo más refinado capaz de reflejar y en lo posible explicitar esos efectos (en especial los aportados por cables y aisladores, que se estima pudieran tener un mayor peso), se estiman incidencias de relevancia acotada, con posibilidad de quedar circunscriptas al orden de las solicitaciones alcanzadas en el procesamiento realizado. De todas maneras, esta circunstancia abunda en la apreciación sobre el carácter de aproximado que se asigna al modelo formulado.

Estas últimas consideraciones, alientan las expectativas de desarrollo de los estudios en que se enmarca el presente trabajo, que propenden a la implementación de modelos más ajustados para relevar la interacción entre los distintos componentes (soportes, cables, aisladores), para su utilización en el análisis estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica, en general, y con particular aplicación a los de niveles de tensión en 132kV.

## REFERENCIAS

- Álvarez Marín, D. A.: *Control estructural estocástico de puentes sometidos a vibraciones producidas por el viento usando aletas separadas*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2003.
- Asociación Electrotécnica Argentina (AEA): *Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de media Tensión y Alta Tensión*. AEA 95301. Buenos Aires, 2007.
- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT): *NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1988.
- Blessmann, J. : *O vento na engenharia estrutural*. Editora da Universidade/UFRGS, 1ª edição. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.
- Carril Junior, C. F. : *Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- Castro, H. G., DeBortoli, M. E., Wittwer, A. R., Marighetti, J. O.: Simulación numérica del campo de velocidades del viento atmosférico utilizando el Método de Representación Espectral. *Mecánica Computacional*, 26:144-160, 2007 .
- DIN VDE 0210/12.85: *Construcción de líneas aéreas de energía eléctrica de tensiones nominales mayores de 1kV* (versión en español, por Schiffrer, M. y Bruschi, M. G., de la obra original “VDE 0210 – Bau von Starkstrom – Freileitungen mit Nennspannungen über 1kV”). 1985.
- Gavazza Menin, R. C.: *Análise Estática e Dinâmica de Torres Metálicas Estaiadas*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

- INTI-CIRSOC: *CIRSOC 102. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las construcciones*. Buenos Aires, 2005.
- Möller, O.: *Confiabilidad de Estructuras*. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario. Rosario, 2007.
- Ribeiro de Oliveira, M. I. : *Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- Rodrigues, R. S.: *Mecânica do colapso aeroelástico de torres TEE*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.
- Simiu, E., Scanlan, R.H.: *Wind Effects on Structures*. John Wiley&Sons, Inc. 1986.
- Zampiron, I.: *Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.