

"DETERMINACIÓN DE CARGAS EN ANTENAS MEDIANTE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO CON MODELOS REDUCIDOS Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO"

Udrizar¹Lezcano, Ma. Sandra; Rodríguez A.³, Juan Manuel; De Bortoli², Mario Eduardo; Marighetti¹, Jorge Omar

¹Msc. Ingeniero Mecánico; ²Dr. Ingeniero Civil; ³ Lic. en Física

Laboratorio de Aerodinámica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste
sudrizar@ing.unne.edu.ar; m_debortoli@yahoo.com.ar

RESUMEN

La evaluación de las cargas actuantes por acción del viento sobre torres de telecomunicaciones y los componentes soportados por ellas es compleja. En los últimos años las antenas celulares se implantaron en todo el país, pero con escasa información al momento de definir las cargas actuantes. Así, el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE abordó el estudio de las cargas provocadas por el viento mediante ensayos en túnel de viento con modelos reducidos. Se registraron valores obtenidos mediante tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición con 64 canales de presión simultáneos y adquisición remota. Se determinaron coeficientes de presión local medios e instantáneos y coeficientes de arrastre para dos modelos de antenas celulares, analizadas individualmente y en conjuntos de tres elementos, para distintas direcciones de viento incidente y tres inclinaciones respecto a la vertical. Utilizando técnicas de análisis multivariado se caracterizó el comportamiento del flujo alrededor de las antenas. En particular se aplicaron los métodos de Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés), y el de Análisis de Componentes Independientes (ICA), sobre los registros de las presiones fluctuantes en la superficie exterior del modelo reducido.

ABSTRACT

The evaluation of the loads acting by wind action on telecommunication towers and the components supported by them is complex. In recent years, cellular antennas have been implanted throughout the country, but with scarce information when defining the loads that are acting. Thus, the Aerodynamics Laboratory of the Faculty of Engineering of the UNNE addressed the study of the loads caused by the wind through wind tunnel tests with reduced models. Were recorded values of static pressure measurements, using a 64 simultaneous pressure channels and remote acquisition systems. Average, instantaneous local pressure and drag coefficients were obtained, for two models of cellular antennas, analyzed individually and in sets of three elements, for different incident wind directions and three inclinations respect to the vertical. The behavior of flow around the antennas was characterized with multivariate analysis techniques. Principal Component Analysis (PCA) and Independent Component Analysis (ICA) methods were applied to the fluctuating pressures on the outer surface of the reduced model.

Introducción

El sector de las telecomunicaciones tuvo una fuerte expansión en el último medio siglo, este proceso involucró la implantación de un gran número de torres metálicas a nivel mundial. Así torres soportes de antenas y estructuras de apoyo se diseñan y construyen cada vez más próximos a los límites de su capacidad de carga. Por tanto, es importante comprender el impacto que cada antena de telefonía móvil tiene en la carga total de la torre.

Por tratarse de estructuras livianas y esbeltas, la acción predominante es la carga del viento. De manera general, la fuerza actuante es función de la presión dinámica del viento, de un coeficiente de arrastre y de la sección efectiva del cuerpo en dirección normal a la acción de dicho evento climático.

Existiendo escasa información experimental sobre la respuesta de las antenas celulares, en el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE se efectuaron ensayos en túnel de viento con modelos reducidos. Se registraron valores obtenidos mediante tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición con 64 canales de presión simultáneos y adquisición remota.

La disponibilidad de escáneres multicanal de registro simultáneo de presiones estáticas permite medir el campo de presión simultáneo actuante sobre modelos. Los campos de presiones producidos por el viento incidente son aleatorios por ello las mediciones se consideran realizaciones de procesos aleatorios multivariados y deben ser analizados por medio de herramientas estadísticas que corrientemente implican suposiciones tales como estacionariedad y ergodicidad.

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una de las técnicas estadísticas multivariantes más populares en el análisis de datos. En 1939 Hotelling hizo la presentación formal y acuñó el término de componente principal (CP). Es una técnica de representación modal (Carassale y otros, 2011) que representa el campo de presión aleatoria como una suma de distribuciones de presión determinísticas llamadas modos, modulados por coeficientes aleatorios (según el tiempo) denominados Componentes Principales (CP). El PCA es una herramienta de una amplia utilidad cuyo uso principal es más descriptivo que inferencial (Bógalo Román, 2012). La mayor limitación referida al uso de PCA herramienta de identificación de patrones deriva de la ortogonalidad de sus modos, lo que no es explicable desde un punto de vista físico. Surge, así como método de representación análoga a PCA, pero basada en un conjunto de modos no ortogonales, el concepto de Análisis de Componentes Independientes (ICA) (Carassale y Vernazzani, 2009).

Se presentan algunos resultados derivados de los ensayos de los modelos reducidos de las antenas celulares TGA 2D3-800TV y KATHREIN 742 264 como ser distintos coeficientes de presiones, y los obtenidos del procesamiento de los registros completos simultáneos de presiones aplicando los métodos multivariados descritos.

Túnel de Viento

El túnel “Jacek P. Gorecki” de la UNNE (Figura 1), es un túnel de capa límite de circuito abierto, también denominado tipo Eiffel. La longitud total del túnel es de 39,65 m. La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho x 1,8 m de alto x 22,8 m de largo. Posee dos mesas de ensayos giratorias de 1,2 m de diámetro; una a 3,8 m del inicio de la cámara (mesa I), y la otra a 19,4 m (mesa II). Un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s en la mesa II (Wittwer, 2000). La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico.



Figura 1: Túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE

Ensayo Experimental de las Antenas

Se construyeron modelos en madera de las antenas celulares TGA 2D3-800TV y KATHREIN 742 264 en escala 1:5. La elección de los modelos de antena se realizó en base a consultas efectuadas sobre formas y tamaños de uso habitual en los sistemas de comunicaciones. Los modelos se montaron en el centro de la cámara de ensayo del Túnel de Viento, expuestas a viento incidente suave debido a que los prototipos se emplazarán en torres de altura elevada, lo que permite considerarlos sometidos a flujos de aire con baja turbulencia. La reproducción de la capa límite fue parcial reduciendo los obstáculos para obtener una turbulencia de aproximadamente 10%.

Los ensayos se efectuaron en forma individual y en conjunto conformado por tres modelos, según puede apreciarse en la Figura 2; en este caso sólo se instrumentó una de las maquetas de cada tipo colocando tomas de presión para determinar los coeficientes de presión local sobre la superficie (Figuras 2 y 3).

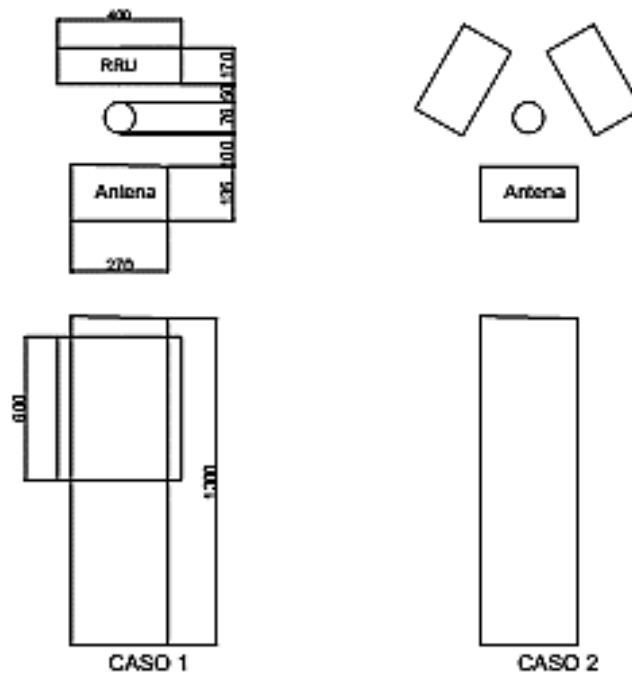


Figura 2: Montaje Individual con RRU (Caso 1) y Montaje en Conjunto (Caso 2)

Las antenas se montaron individualmente, con y sin la presencia de un dispositivo denominado RRU (Remote Radio Unit) colocado en la parte posterior y ulteriormente en arreglos de tres según se indica. Los modelos se fijaron a un tubo de aproximadamente un metro de longitud y diámetro de 2,5 cm ajustándose la inclinación de las antenas en 0° , 6° y 12° respecto a la vertical (Figura 3).

Para medir las presiones se instrumentó el modelo de la antena TGA colocando 28 tomas de presión, cantidad mínima que permite la determinación de los coeficientes en las cuatro caras del modelo ya que el mismo es simétrico (Figura 4). Se midieron las presiones fluctuantes en la superficie exterior del modelo reducido por medio de tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición con escáner miniatura ZOC33 con 64 canales de presión simultáneos y sistema de adquisición remoto E-RAD4000. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde 0° a 360° , girando el modelo a intervalos de $\alpha=30^\circ$, tomando cada una de las 12 posiciones señaladas en la Figura 5.

Los ensayos de las antenas KATHREIN se realizaron siguiendo el mismo procedimiento descrito para las antenas TGA, excepto que en este caso el número de tomas de presión fue de 18, ya que el modelo era de menor tamaño. Se ensayó en forma individual también con y sin la presencia elemento denominado RRU.



Figura 3: Conjunto de antenas con distinta inclinación (Figura 2 -Caso 2).

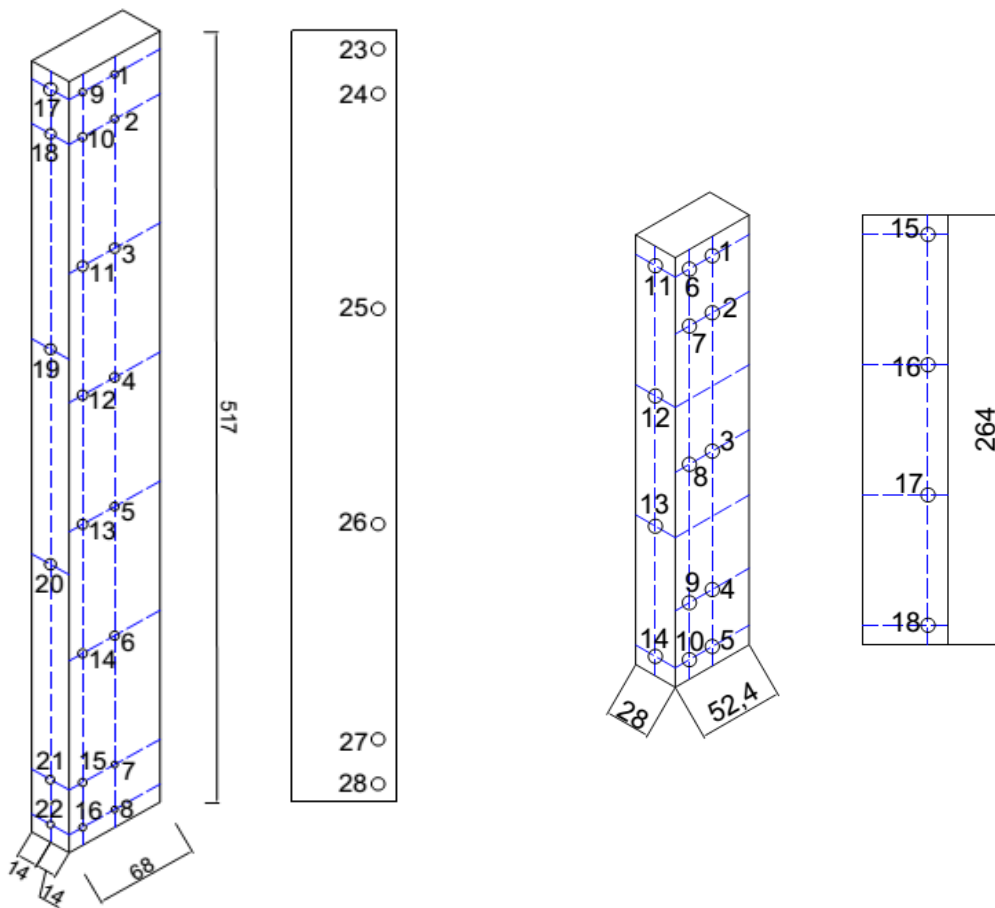


Figura 4: Distribución de las tomas de presión en los modelos. Izquierda TGA.; derecha Kathrein

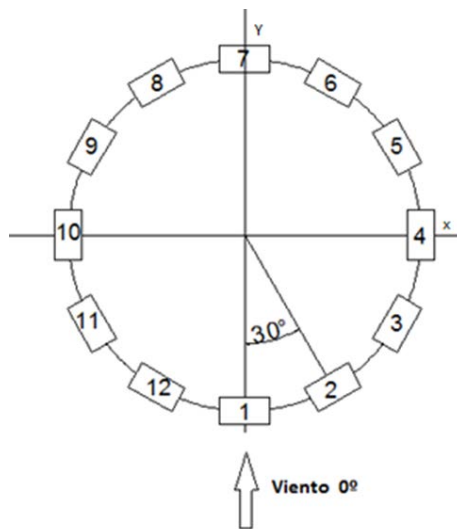


Figura 5: Posiciones sucesivas del modelo de la antena durante el ensayo ($\alpha=30$).

Coefficientes de presión local y fuerza global

Los coeficientes de presión local y fuerza global son adimensionales y dependen de variables relacionadas con la geometría del cuerpo y con las características de flujo incidente.

Conforme a la literatura especializada, se dan las siguientes definiciones que son compatibles con las que indica el reglamento CIRSOC 102. El coeficiente de presión local exterior está definido por la expresión:

$$Cp_m = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) dt}{q} \quad (1)$$

donde:

Δp es la diferencia de presión estática entre el punto de medición (toma de presión sobre la superficie) y la presión estática de referencia (toma estática del tubo Pitot-Prandtl ubicado en la posición de referencia).

q es la presión dinámica medida a la altura de referencia

T es el intervalo de tiempo de adquisición

Cp es el Coeficiente de presión local media

Valores positivos de los coeficientes de presión local corresponden a acciones dirigidas hacia la superficie. Los coeficientes de presión local se determinaron a partir de las presiones fluctuantes medidas en cada toma, de forma tal que fue posible obtener el coeficiente local medio, rms, mínimo y máximo, respectivamente para cada ángulo de incidencia del viento (Figura 6).

El coeficiente de presión local rms está definido por la expresión (2):

$$\tilde{Cp}_{rms} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - p)^2 dt}{q} \quad (2)$$

Donde,

$\tilde{C}_{p_{rms}}$: coeficiente local rms

Los coeficientes de presión local máxima y mínima están definidos por:

$$\hat{C}_p = \frac{p_{max}}{q} \quad (3)$$

$$\check{C}_p = \frac{p_{min}}{q} \quad (4)$$

Donde, p_{max} ; p_{min} : valor máximo y mínimo de presión correspondiente al registro medido

\hat{C}_p : coeficiente local máximo

\check{C}_p : coeficiente local mínimo

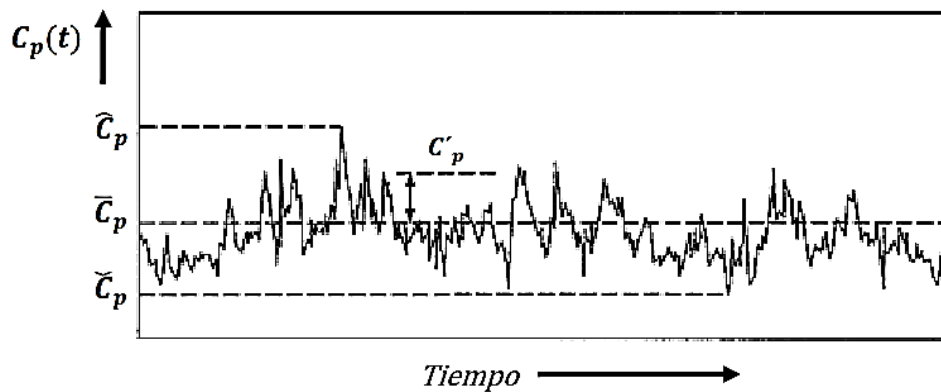


Figura 6: Tipos de coeficientes de presión: medio, pico máximo, pico mínimo y de desviación estándar (rms) (Cook, 1990)

Además se determinaron los coeficientes de fuerza a partir de los coeficientes de presión, integrando las acciones sobre cada área tributaria. Los coeficientes de fuerza globales para cada eje, C_{Fx} y C_{Fy} están dados por:

$$C_{Fx} = \frac{\sum_{j=1}^n C_{pj} A_j \text{sen} \beta_j}{A_R} \quad (5)$$

$$C_{Fy} = \frac{\sum_{j=1}^n C_{pj} A_j \text{coseno} \beta_j}{A_R} \quad (6)$$

Donde,

n es el número de tomas

C_{pj} es el coeficiente de presión media correspondiente a la toma j

A_j es el área tributaria de la toma j

β_j ángulo que forma la fuerza normal superficial respecto al eje y positivo en sentido contrario a las agujas del reloj

A_R área maestra de referencia

El área maestra de referencia, A_R , está dada por el ancho del modelo (b) por la altura del modelo (h). El área tributaria define el espacio de la superficie de la estructura donde se admite una correlación espacial unitaria de los coeficientes de presión local, es decir, el valor del coeficiente de presión local permanece constante sobre esa área. Las áreas tributarias correspondientes a cada toma de presión local fueron definidas como la separación media ente tomas en la dirección horizontal y vertical respectivamente. Las cargas globales se obtienen a partir de multiplicar los coeficientes globales por la presión dinámica del sitio de emplazamiento y por el área de referencia considerada.

Discusión de resultados de los ensayos sobre Antenas

En Tabla 1 y 2 se presentan algunos valores de los distintos coeficientes correspondientes a las antenas ensayadas en forma individual (Figura 2- Caso 1), para las posiciones 1 y 5 representadas en Figura 5. La distribución de las tomas sobre los modelos se observa en Figura 4.

Tabla 1: Coeficientes de presión Antena TGA (Sin dispositivo RRU)

	α N° Toma	Posición 1; $\alpha=0^\circ$				Posición 2; $\alpha=120^\circ$			
		Cpm	Cpm _{máx}	Cpm _{mín}	Cprms	Cpm	Cpm _{máx}	Cpm _{mín}	Cprms
Cara Frontal	2	0,91	1,01	0,80	0,04	-0,89	-0,66	-1,18	0,07
	4	0,97	1,11	0,82	0,05	-0,57	-0,37	-0,85	0,06
	6	0,99	1,12	0,88	0,04	-0,58	-0,38	-0,84	0,05
	8	0,77	0,88	0,63	0,04	-0,65	-0,47	-0,90	0,05
	9	0,61	0,72	0,49	0,04	-0,85	-0,62	-1,16	0,07
	11	0,72	0,83	0,62	0,04	-0,72	-0,47	-1,00	0,06
	13	0,74	0,87	0,57	0,05	-0,50	-0,28	-0,72	0,05
	15	0,76	0,84	0,65	0,04	-0,66	-0,46	-0,94	0,05
Lateral	17	-0,82	-0,19	-1,06	0,07	0,34	0,49	0,18	0,04
	18	-0,86	-0,26	-1,00	0,08	0,44	0,59	0,28	0,04
	19	-0,70	-0,45	-1,18	0,08	0,53	0,71	0,39	0,04
Posterior	25	-0,67	0,14	-1,18	0,08	0,56	0,70	0,42	0,04
	26	-0,58	0,12	-1,14	0,08	0,53	0,68	0,36	0,05
	27	-0,73	0,11	-0,16	0,05	0,68	0,82	0,50	0,05
	28	-0,71	0,13	-0,14	0,05	0,83	0,98	0,61	0,04

Tabla 2: Coeficientes de presión Antena Kathrein (ensayada con dispositivo RRU)

	α	0°				120°			
	N° Toma	C _{pm}	C _{pmáx}	C _{pmín}	C _{prms}	C _{pm}	C _{pmáx}	C _{pmín}	C _{prms}
Cara Frontal	2	1,02	1,03	0,84	0,04	-0,88	-0,63	-1,28	0,05
	4	1,08	1,09	0,82	0,04	-0,62	-0,37	-1,01	0,06
	6	0,81	0,87	0,57	0,05	-0,89	-0,58	-1,37	0,06
	7	0,87	0,89	0,66	0,04	-0,87	-0,59	-1,27	0,06
	9	0,87	0,88	0,70	0,04	-0,65	-0,40	-1,04	0,06
	10	0,86	0,88	0,64	0,04	-0,65	-0,36	-1,19	0,07
Lateral	11	-0,78	-0,38	-1,5	0,08	-0,88	-0,56	-1,35	0,06
	14	-0,81	-0,46	-1,13	0,06	-0,72	-0,33	-1,23	0,08
Posterior	16	-0,21	0,60	-1,02	0,25	-0,73	-0,48	-1,09	0,05
	18	-0,67	-0,36	-0,92	0,07	-0,93	-0,52	-1,49	0,08

En las tablas precedentes se observa que para los modelos colocados en posición 1 (Figura 5) las tomas de presión ubicadas en la cara frontal presentan valores positivos aproximadamente iguales, en tanto en los laterales y en la parte posterior se registran elevadas succiones producto de desprendimientos y zonas de flujo inestable. Particularmente en las tomas a sotavento de la antena TGA se observan valores máximos de presión y mínimos de succión, lo que señalaría presencia de valores instantáneos positivos y negativos con entrecruzamiento de flujo. En tanto que para la disposición a 120° (posición 5), en el modelo TGA se observa succión en la cara frontal y valores positivos en el lateral y tomas posteriores; en cambio en el modelo Kathrein la presencia del dispositivo RRU provocaría perturbaciones en el flujo que se traducen en elevados valores negativos en las tomas laterales y posteriores. Estos resultados se condicen con la existencia de tres zonas distintas en flujo que rodea un cuerpo de sección rectangular (Figura 7), con desprendimiento de líneas de flujo en los lados y remolinos o vórtices en la parte trasera conocidos como vórtices de Von Karman.

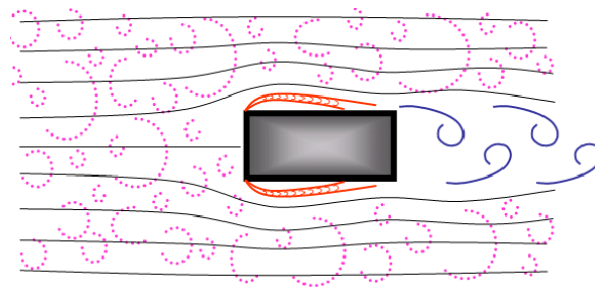
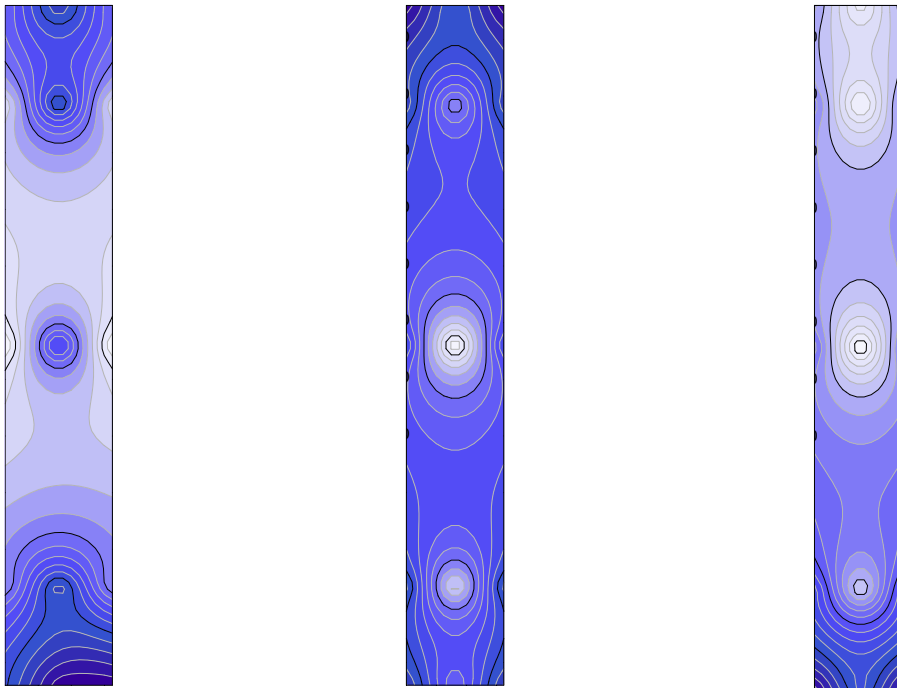


Figura 7: Esquema del flujo alrededor de un cuerpo de sección rectangular (Kareem, 2012)

En Figura 8 se presenta gráficamente la distribución de Coeficientes de presiones locales medias (Cpm) registradas en la cara frontal de la antena KATHREIN ensayada con la presencia del dispositivo RRU en su parte posterior y para tres inclinaciones de ésta. Se advierte que los valores máximos de Cpm se manifiestan en todo el ancho de la parte central del modelo cuando está en posición vertical, y a medida que el modelo se inclina, alejándose del dispositivo RRU, éstos máximos se tornan más localizados. Con la inclinación de 12° se aprecia además un desplazamiento de los valores máximos hacia la parte superior.

En Figura 9 se advierten diferencias en la distribución de los Cpm sobre la cara frontal del modelo cuando se ensaya el dispositivo individual y en conjunto (Caso 2- Figura 2), siendo los valores similares, presentándose variaciones en la distribución.



a) vertical 0°

b) 6° inclinación

c) 12° inclinación

Figura 8: Distribución de los Cpm en cara frontal de antena Kathrein con viento actuando en dirección normal y dispositivo RRU colocado.

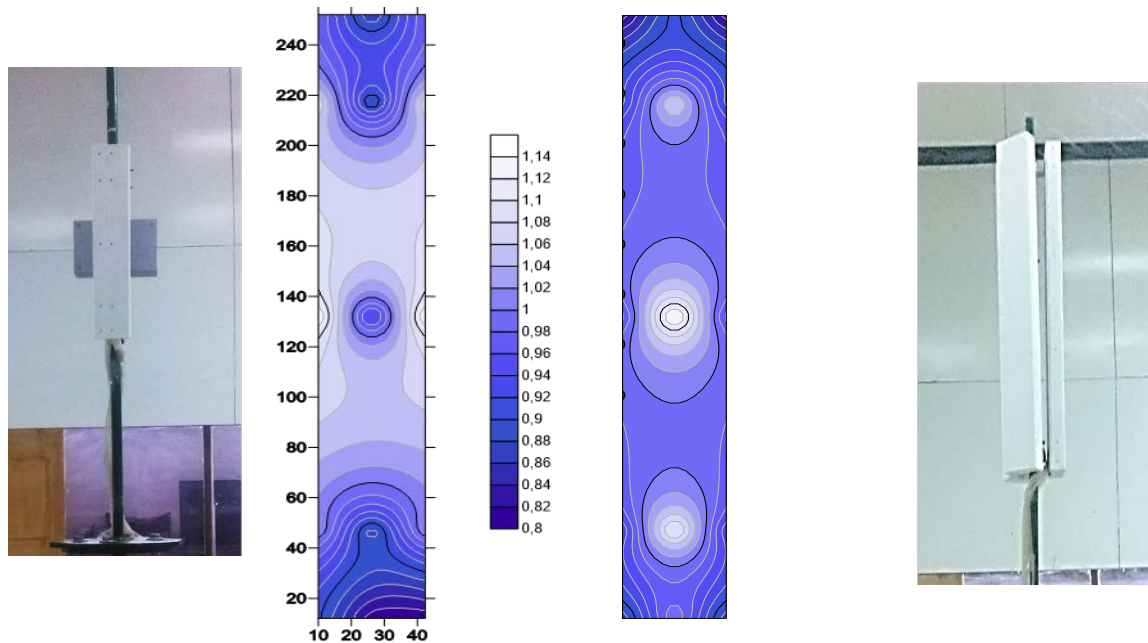
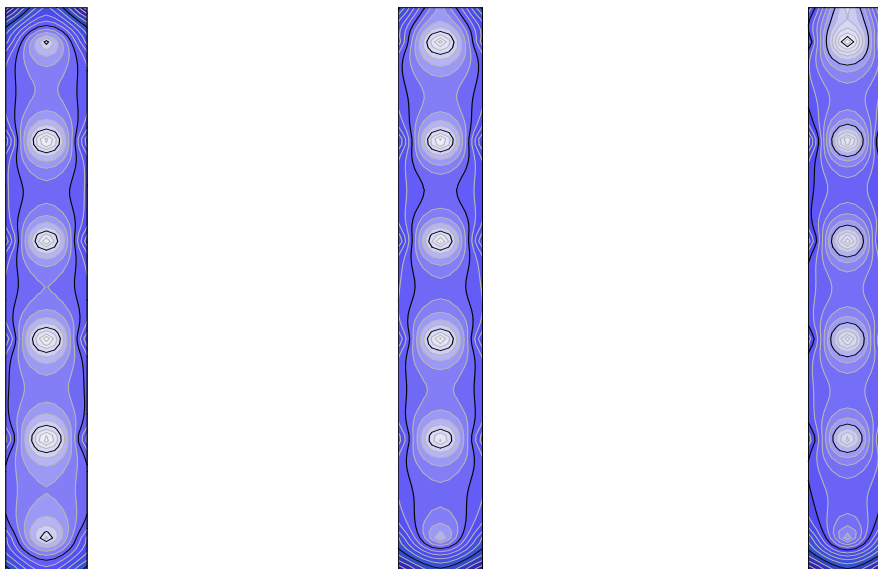


Figura 9: Distribución de C_{pm} en cara frontal antena Kathrein Individual (con RRU) y en Conjunto (Caso 2- Figura 2) con viento actuando en dirección normal.

La disposición de algunos valores determinados en los ensayos de las antenas modelo TGA se observan en las Figura 10 y Figura 11, ensayada de manera individual, en posición frontal al viento sin dispositivo RRU. Al igual que en el modelo Kathrein los máximos se ubican sobre el centro del modelo y se observa un desplazamiento hacia el borde superior cuando se lo inclina.



a) vertical

a) 6° inclinación

a) 12° inclinación

Figura 10: Distribución de los C_{pm} en cara frontal de antena TGA Individual con viento actuando en dirección normal sin dispositivo RRU colocado.

Existe una variación leve de los valores de C_{pm} entre los dos tipos de antenas ensayados, pero se conserva el patrón de distribución, con máximos en el centro del modelo y disminuyendo hacia los bordes.

En Figura 11 b) se observa la distribución de los C_{pm} en la antena modelo TGA ensayada en Conjunto (Figura 2-Caso 2) en posición frontal al viento (Figura 10a) y a 180° (posición 7 Figura 5). En este caso el patrón de distribución se modifica notablemente, como así también los valores, existiendo en el último caso valores correspondientes a succión.

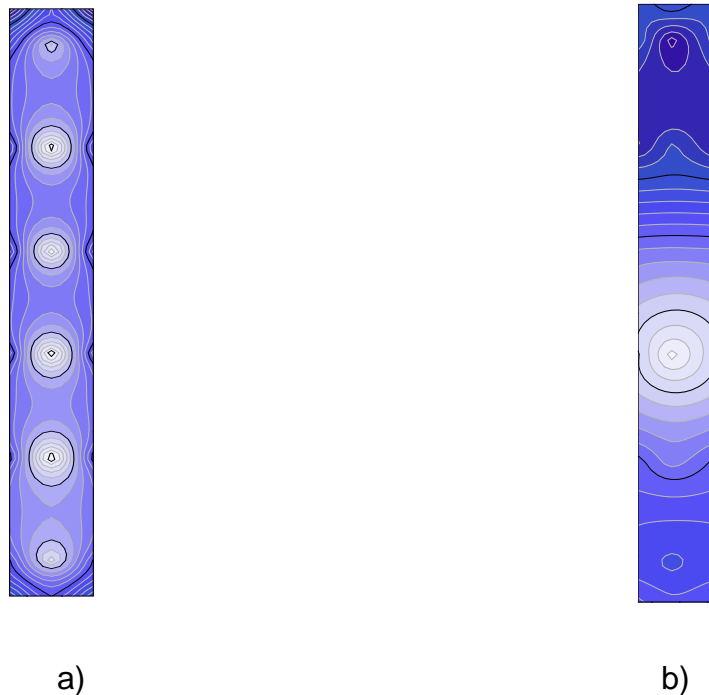


Figura 11: C_{pm} en cara frontal de antena TGA montada en conjunto (Caso 2 – Figura 2), a) con viento actuando en dirección normal, y b) en posición 7 (180°).

Estudio Cuantitativo de los Campos de Presiones

En esta sección se describe la aplicación de técnicas conocidas como análisis de Componentes Principales (PCA) y Análisis de Componentes Independientes (ICA). Para ello matrices, vectores y elementos, se denotarán mediante mayúsculas en negritas, minúsculas en negritas y minúsculas en itálicas, respectivamente. Matrices, vectores y elementos de la misma matriz usarán la misma letra, por ejemplo, X , x , x . La transpuesta de una matriz se representará con el superíndice T. En este trabajo se empleó un programa escrito en lenguaje Python, en particular para el método ICA se aplicó el algoritmo de punto fijo llamado FastICA, Hyvärinen y Oja (1997).

El análisis estadístico usual no considera estructura probabilística espacial ni temporal del campo de presiones, los valores más utilizados son: el valor medio

(mean), el desvío estándar (SD), la asimetría (Skewness) y curtosis. Tanto el valor medio, como el DS poseen un significado cuantitativo obvio y a menudo se utilizan como descriptores para localizar zonas con presencia de fenómenos inestables como vórtices (Gioffre, 2001). Estas cantidades se estiman de manera sencilla a partir de los datos y se representan sobre la superficie del cuerpo considerando las 16 tomas frontales y seis tomas posteriores del modelo TGA (Figura 11).

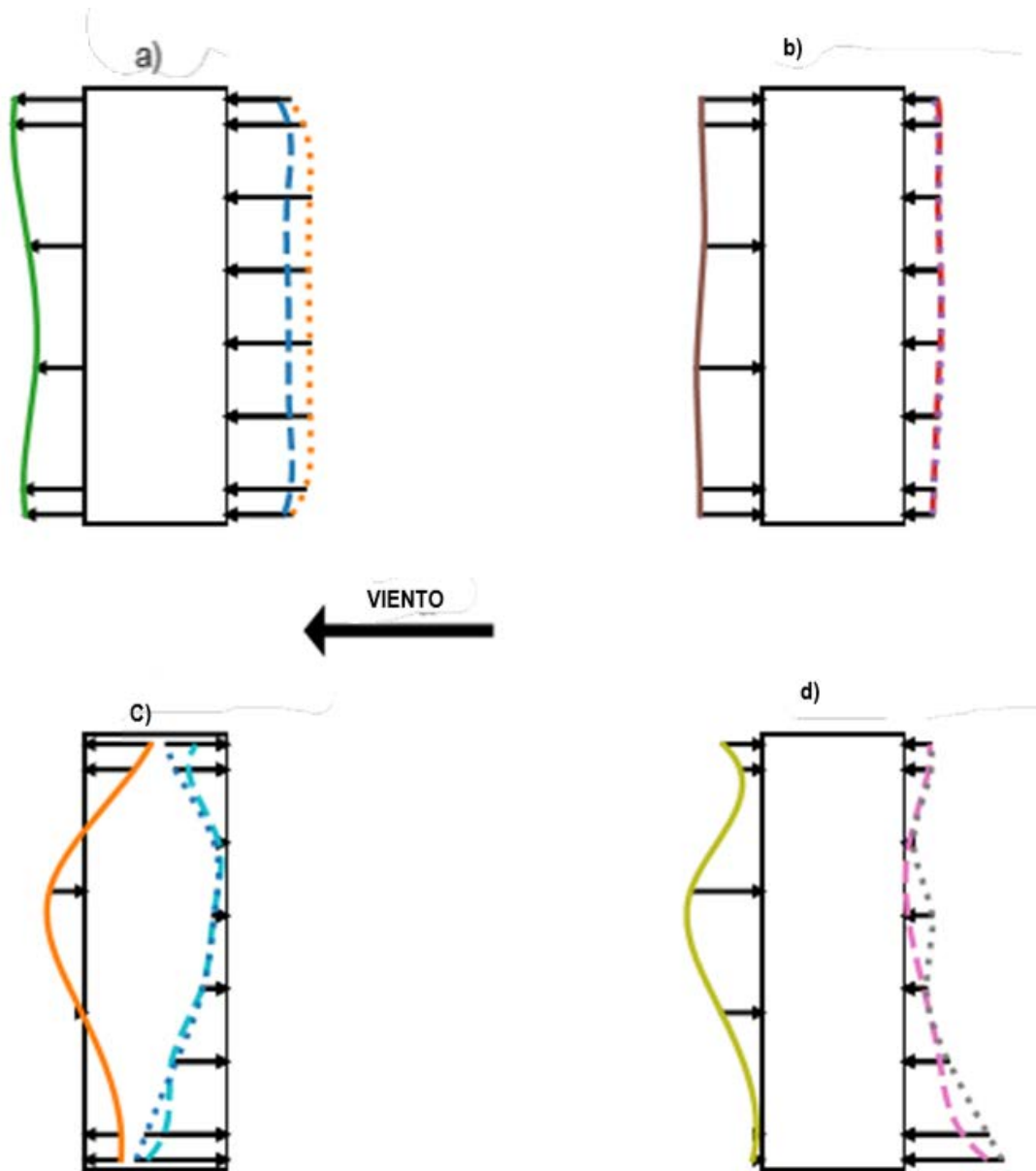


Figura 11: Principales estadísticos de los registros de presión q .

En la Figura 11, la imagen a) representa los valores medios correspondientes a los registros obtenidos en las tomas 1 a 8 ubicadas en la línea central (línea de puntos) y las tomas 9 a 16 cercanas al borde (línea de trazos) de la cara frontal del modelo, y las tomas 23 a 28 de la cara posterior, correspondientes a presión los de

la cara frontal y succión los de la cara trasera. En la imagen b) se representa el desvío estándar y se observa que los valores registrados en la parte posterior exhiben una mayor dispersión que los de la cara frontal; en la gráfica c) se representó la curtosis. Se advierte en la cara frontal valores positivos de curtosis, que estarían indicando una distribución de los registros de forma afilada; en tanto en la cara posterior el comportamiento es variable según se analicen las tomas próximas a los bordes o las tomas ubicadas en el centro del modelo, presentando los valores registrados en las primeras una distribución más aplanada. En tanto los valores de asimetría o skewness de la gráfica d) presenta en la cara frontal valores negativos, que indicarían valores sesgados hacia el lado de la succión, en tanto que en la cara posterior los valores positivos, indicarían que la “cola” de la distribución se encuentra hacia la derecha. Los valores negativos de skewness se relacionan con la formación de vórtices en el flujo con intensos picos de succión que surgen en forma rápida y la fase siguiente de presiones positivas de evolución más lenta

Análisis de Componentes Principales (PCA)

PCA es un tipo de transformación lineal aplicada a un conjunto de datos multivariantes habitualmente correlacionados entre sí, para convertirlos en un menor número de variables no correlacionadas y ortogonales entre sí, que representen de forma decreciente la varianza de los datos originales (Jolliffe, 2002; Wilks, 1995), o sea transforma un conjunto de variables, a las que se denomina originales, en un nuevo conjunto de variables denominadas componentes principales. Varios autores aplicaron los modos PCA para identificar patrones de presiones típicos posiblemente asociados a fenómenos físicos específicos (Solarí y otros, 2007); los modos son obtenidos como los vectores propios de la matriz de covarianza estimada a partir de los datos y geoméricamente ortogonales entre sí. Como medida de la cantidad de información incorporada en una componente se utiliza su varianza. Es decir, cuanto mayor sea su varianza mayor es la cantidad de información que lleva incorporada dicha componente. El primer modo PCA representa la mejor aproximación monovariada del campo de presión y generalmente se interpreta como la estructura coherente dominante o como la firma del fenómeno de flujo dominante que dimensiona el cuerpo (Carassale, 2012). Los modos subsiguientes tienen propiedades análogas, pero se refieren a subespacios de datos ortogonales a los modos de orden superior.

Sea $q(t) = [q_1(t), \dots, q_N(t)]^T$ un proceso aleatorio de N-variables que contenga fluctuación de media cero de las mediciones derivadas de las tomas de presión; t es el tiempo discretizado.

Sea C_{qq} la matriz de covarianza estimada a partir de los datos:

$$C_{qq} = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} \mathbf{q}(t) \mathbf{q}(t)^T \quad (1)$$

De acuerdo con el PCA el campo de presiones aleatorio $q(t)$ puede representarse por la expansión modal:

$$\mathbf{q}(t) = \sum_{k=1}^N \boldsymbol{\phi}_k x_k(t) = \boldsymbol{\mu}_q + \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

Donde los vectores $\boldsymbol{\phi}_k$ ($k = 1, \dots, N$) son los autovectores de la matriz C_{qq} de covarianza de \mathbf{q} , conocidos como los modos PCA, en tanto que los coeficientes x_k ($k = 1, \dots, N$) son las componentes principales (PC). Dichos modos son ortogonales entre sí y son normalizados de manera que posean norma unitaria. Las componentes principales son mutuamente descorrelacionadas y su varianza está determinada por la covarianza de los autovalores $\lambda_k \cdot \mu_q$ es el valor esperado de \mathbf{q} ; la matriz $\boldsymbol{\Phi}$ que tiene componentes $\Phi_{j,k}$ ($j, k = 1, \dots, N$) se obtiene ensamblando en columnas los autovectores $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$ que se enumeran de tal manera que sus valores propios correspondientes λ_k están ordenados en orden decreciente.

$$C_{qq} \boldsymbol{\phi}_k = \lambda_k \boldsymbol{\phi}_k \quad (k = 1, \dots, N) \quad (3)$$

Los modos PCA son vectores que pueden representarse gráficamente como si realmente fueran distribuciones de presiones; las componentes principales pueden calcularse a partir de los registros con la siguiente proyección ortogonal:

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = \boldsymbol{\Phi}^{(n)T} \mathbf{q}(t) \quad n \leq N \quad (4)$$

A continuación, se presentan algunos resultados del análisis efectuado al campo de presiones actuante sobre el modelo TGA. El mismo es observado en esta instancia en un dominio mono dimensional constituido por las tomas 9 a 16 de la cara frontal ubicadas próximas al borde (ver Figura 3) y las correspondientes a la cara posterior, teniéndose un total de 14 tomas en análisis. Se procedió de esta manera porque se contaba un mayor número de registros que si consideráramos una sección horizontal transversal del modelo.

La Figura 12 muestra los seis primeros modos PCA correspondientes a la adquisición \mathbf{q} efectuada sobre la antena modelo TGA con viento actuante en dirección normal a ésta, sin inclinación. En los modos 2 a 6 se utilizó una escala de representación de 20 veces la del modo 1 para poder apreciar los valores.

Algunos autores (Kikuchi y otros, 1997) señalan que los primeros modos PCA tienden a estar asociados a diferentes acciones globales. En este caso, la observación del primer modo PCA al presentar en ambas caras una estructura

simétrica estaría asociado a fuerzas netas coincidentes con la dirección del viento, lo que se interpreta como la estructura dominante, de similar intensidad y signos opuestos. Aunque es conocido que la succión tiende a ser más violenta que la sobrepresión (confirmado por el valor negativo de skewness). En el segundo modo se aprecia una estructura antisimétrica, los cambios de signo observados sugieren vientos cruzados y/o acciones torsionales. Lo que sería consistente con el desprendimiento de vórtices de distinto signo en los bordes superior e inferior del modelo.

Al no disponer de una distribución de tomas lo suficientemente densa sobre las caras del modelo, resulta poco fiable la interpretación que pudiera efectuarse de los modos superiores, sin embargo, en la mayoría se advierten disposiciones antisimétricas. Estos modos superiores se relacionan con estructuras turbulentas de flujo asociadas a correlaciones temporales y espaciales de pequeña magnitud, lo que no permite asociar las fluctuaciones de presión a estructuras de flujo incidente. Asimismo, es importante tener presente que los modos PCA se determinan sobre una estructura probabilística del campo de presiones, sin incluir información de la naturaleza física del fenómeno observado, por esto no es extraño si la forma de los modos PCA no reflejen algún mecanismo físico en particular (Carassale y Brunenghi, 2011).

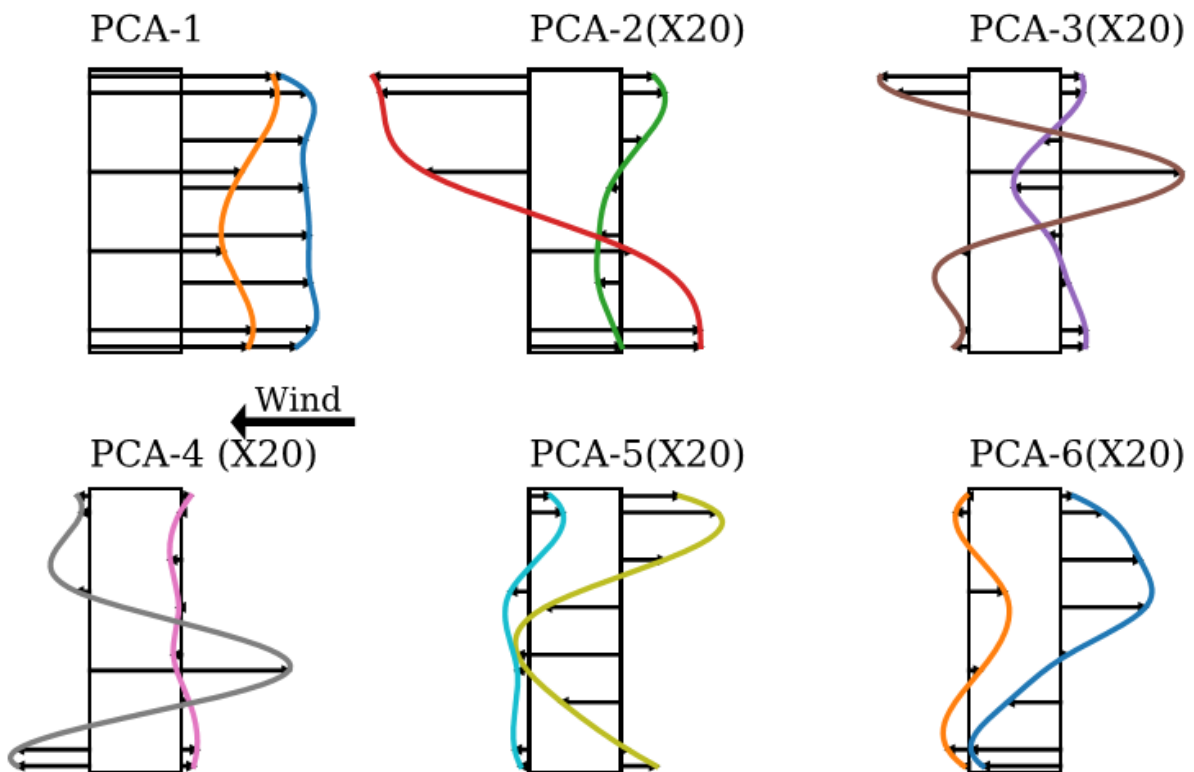


Figura12: Modos PCA

Análisis de Componentes Independientes (ICA)

El uso de ICA como herramienta de reconocimiento de características para el análisis de campos de presión aleatorios es interpretado como la búsqueda de un conjunto de estructuras coherentes, que evolucionan en el tiempo con amplitudes que son estadísticamente independientes como sea posible. Este modelo es del tipo generativo, lo que implica que describe de qué manera los datos observados x_i se generan mediante un proceso de mezcla de los componentes principales s_j , variables latentes no observables directamente, afectadas además por unos coeficientes de mezcla a_{ij} también desconocidos.

La técnica ICA ha sido extensamente empleada en diferentes campos para la resolución de los denominados problemas de separación de fuente ciega (BBS Blind Source Separation) y en herramientas de reconocimiento de imágenes. El vector $\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \dots \dots q_N(t)]^T$ contiene los valores de presión registrados en el instante t . El fenómeno se asume ergódico y estacionario.

De acuerdo con el método ICA el campo de presiones se representa mediante la expansión modal no-ortogonal:

$$\mathbf{q}(t) = \mu_q + \sum_{k=1}^{\bar{N}} a_k s_k(t) = \mu_q + A s(t) \quad (3)$$

Donde A es la denominada matriz de mezcla y sus columnas a_k son los modos ICA; los coeficientes aleatorios s_k son las componentes independientes (IC). Tanto la matriz de mezcla como los componentes independientes son estimados a partir de los registros medidos, con la sola condición de que éstos sean estadísticamente independientes.

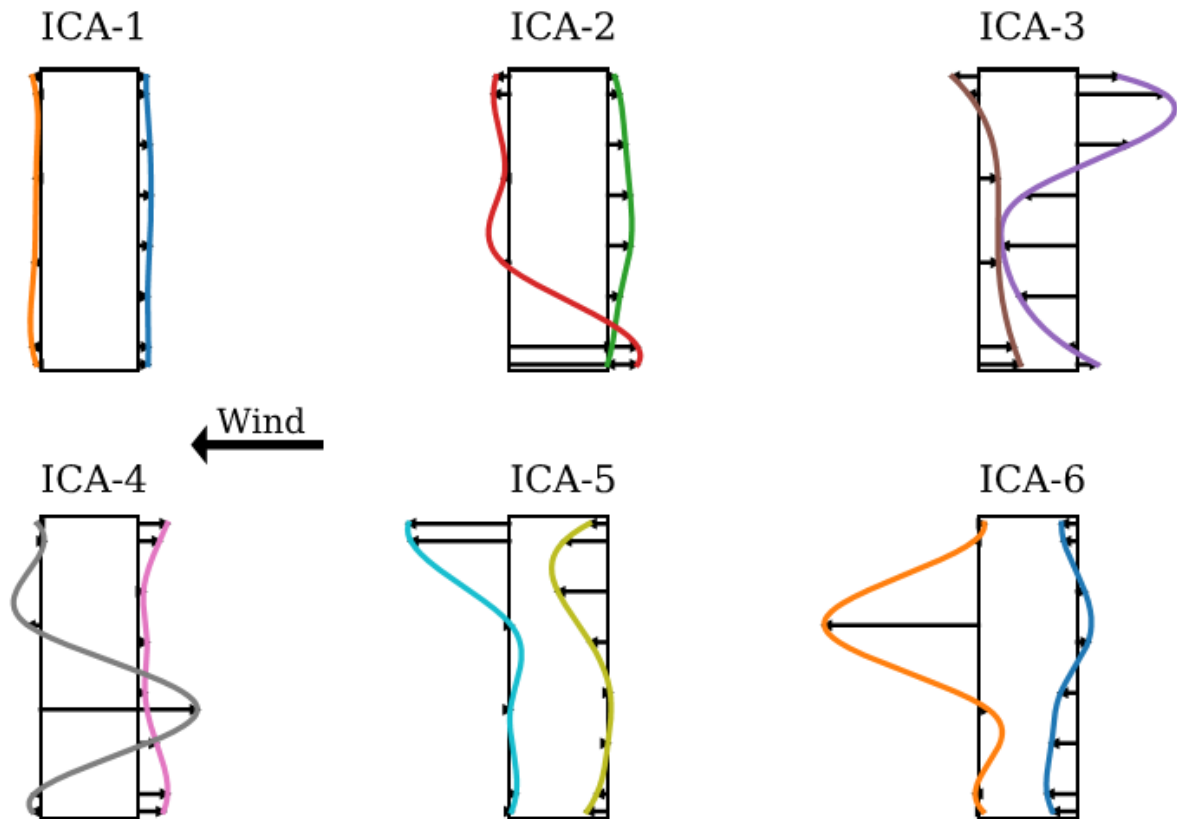


Figura 13: Modos ICA

De igual manera que en el análisis PCA expuesto anteriormente, se consideraron aquí 14 tomas de presión, 8 frontales y 6 de la cara posterior. El modo 1 representa principalmente las fluctuaciones de las presiones en las caras frontal y posterior. La acción de vientos cruzados se aprecia en cuatro de los modos, con cambios de signos, dos para la cara frontal y dos para la cara opuesta (modos 3, 4, 5 y 6). En el modo 3 se observa una intensa succión en el borde superior. El modo 4 ICA es muy similar al modo 4 PCA.

Mientras que en la representación PCA, la acción del viento cruzado está completamente contenida en el segundo modo, en la representación ICA, los modos 3 a 6 contribuyen a la fuerza del viento cruzado más o menos con la misma importancia. Esta dimensión superior del espacio empleado para representar la acción de viento cruzado se refleja en una mejor capacidad de ICA para identificar mecanismos físicos relevantes (Carassale, 2009).

Conclusiones

Los valores de C_{pm} registrados en la cara frontal de ambos modelos de antenas presentan distribuciones cuyos valores máximos se observan en la parte central de la cara frontal del modelo y se desplazan hacia el borde superior cuando

la antena presenta inclinación respecto a la vertical y el viento actúa en dirección normal. Los registros obtenidos son consistentes con las características del flujo observado para un cuerpo como sumergido en un fluido, con valores de succión y signos alternados señalando la presencia de vórtices y desprendimientos de flujo.

PCA e ICA se han aplicado para estimar estructuras del campo de presión inducido por el viento que actúa sobre un modelo inmerso en una capa límite con baja turbulencia. Ambas técnicas estadísticas representan las mediciones como una suma de modos determinísticos, que son constantes en el tiempo (su amplitud cambia debido a las componentes principales CP o las componentes independientes, pero su forma es invariable). Está claro que el uso de modos estáticos es una gran limitación cuando la intención del análisis es identificar estructuras coherentes en un fenómeno de propagación (por ejemplo, los efectos de un vórtice).

Este trabajo refleja las primeras etapas de análisis, siendo necesarias efectuar nuevas adquisiciones con una distribución de un mayor número de tomas en las cuatro caras del modelo para poder efectuar mejores observaciones de los resultados de los métodos multivariados.

Bibliografía

Berkooz G., Holmes P., Lumley J. L. (1993) "*The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows*". An. Rev. of Fluid Mech., 25(1):539– 575, 30

Bógalo Román, Juan V. (2012): "*Componentes Subyacentes Comunes en Series Temporales*". Tesis Maestría Matemáticas Avanzadas. Universidade Aberta de Portugal.

Cook, N. J. (1990): "*The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures.*", ISBN. 0-408-00870-9.

Carassale L. (2012) "*Analysis of aerodynamic pressure measurements by dynamic coherent structures*". Probabilistic Engineering Mechanics 28, 66–74.

Carassale L, Marrè-Brunenghi M. (2011) "*Statistical analysis of wind-induced pressure fields: a methodological perspective*". J Wing Eng Ind Aerodyn. 99:700–10.

Carassale L, Vernazzani A. (2009) "*Interpretation of aerodynamic pressure measurements by Independent Component Analysis*", In: Proc. 5th European and African conf. on wind engineering. EACWE 5. Florence (Italy).

Dray S. (2008) "*On the number of principal components: A test of dimensionality based on measurements of similarity between matrices*". Comp. Stat. and Data Analysis, 52(4):2228–2237.

Gioffre M.; Gusella V.; Grigoriu M. (2001): "Non-Gaussian Wind Pressure on Prismatic Buildings. I: Stochastic Field". Journal of Structural Engineering Vol. 127, Issue 9.

Hyvärinen, A. y Oja, E. (1997). "A fast-fixed-point algorithm for independent component analysis". *Neural Computation*, 9 (7), 1483-1492.

Hotelling H. (1933) "Analysis of a complex of statistical variables into principal components". *J. of Educational Psychology*, 24(6):417–441.

Jolliffe I. T. (2002) "Principal component analysis". Springer-Verlag, New York.

Kareem, A.; Wu, T. (2012): "Wind induced effects on bluff bodies in turbulent flows: nonstationary, non-Gaussian and nonlinear features". The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and its Applications (BBAA7). Shanghai, China.

Kikuchi, Y. Tamura, H. Ueda and K. Hibi (1997) "Dynamic wind pressure acting on a tall building model - proper orthogonal decomposition", *J. Wind Engng. Ind. Aerodyn.*, 69-71, 631–646

Pires J. C., Pereira M. C., Alvim-Ferraz M. C., and Martins F. G. (2009) "Identification of redundant air quality measurements through the use of principal component analysis". *Atm. Env.*, 43(25):3837–3842.

Solari G, Carassale L, Tubino F. (2007) "Proper orthogonal decomposition in wind engineering: part 1: a state-of-the-art and some prospects". *Wind & Structure*; 10:153–76.

Wilks D. S. (1995) "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences". Academic Press, London.

Wittwer, A. R.; Möller, S. V. (2000): "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 84 (3), pp. 307-320,