

# DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CARGAS EÓLICAS SOBRE ESTRUCTURA TIPO RADAR

Andrés Cánchero<sup>b</sup>, Mariano García Sainz<sup>b,d</sup>, Ana Scarabino<sup>a,b</sup>, Federico Bacchi<sup>a,b</sup> & J. Sebastián Delnero<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>*Grupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, gfc@ing.unlp.edu.ar*

<sup>b</sup>*Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, lacyfa@ing.unlp.edu.ar*

<sup>c</sup>*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, CP C1033AAJ, Cdad. de Buenos Aires, Argentina*

<sup>d</sup>*Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. De Bs. As., Calle 526 y 10, CP 1899, La Plata, Argentina*

**Palabras Clave:** Radar, cargas eólicas, distribución de presiones.

**Resumen.** Las características de la estructura de una antena tipo radar no están contempladas en las normas de construcción civil ordinarias (CIRSOC), por lo que el dimensionado de componentes estructurales requiere de la validación en túnel de viento de las cargas aerodinámicas de diseño. Bajo este contexto, y en carácter de ampliación de los análisis sobre el patrón fluidodinámico sobre una antena radar publicados con anterioridad, el presente trabajo analiza de manera experimental y numérica, las cargas de viento y las configuraciones de flujo en secciones transversales de paneles rectangulares (L/h 5:1), montados sobre marcos estructurales formados por barras rectangulares (L/h 0.5:1), de una antena tipo radar. Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos en túnel de viento de capa límite atmosférica del modelo a escala de la estructura rectangular de la antena, a fin de determinar la influencia del perfil de velocidad en altura y la tridimensionalidad del volumen de flujo alrededor de la estructura. Además, se presentan las conclusiones respecto a la validación del esquema numérico mediante la comparación con los resultados de los ensayos en túnel de viento de cargas medias y medición de presiones sobre el modelo a escala de la antena completa.

Se ha observado que la interacción fluido-dinámica de las estelas de los paneles y la estructura impone sobre los elementos radiantes, una carga dinámica a frecuencias y números de Strouhal particulares, diferentes a las frecuencias y números de Strouhal que presentarían los elementos aislados.

## 1 INTRODUCCIÓN

Es un hecho conocido que un cuerpo como 2D inmerso en una corriente libre introduce en el flujo vórtices periódicos, los cuales causan cargas fluctuantes que a su vez, pueden producir vibraciones mecánicas. Esto justifica estudios experimentales y numéricos con el objetivo de obtener información detallada sobre la estructura de flujo y los diferentes mecanismos de interacción fluido-estructura (So et al. 2001, Blackburn and Henderson, 1999, Freitas, 1995). Al introducir un conjunto de cilindros en una corriente libre, el patrón de flujo es más complejo que el que se presenta alrededor de un solo cilindro, naturalmente. Lam et al (2003) demostraron que el flujo alrededor de cuatro cilindros dispuestos de manera cuadrangular es mucho más complejo que en una configuración de dos cilindros. Los coeficientes de fuerza y números de Strouhal son modificados por la interacción no lineal con otros cuerpos, en función de la distancia entre los mismos, tamaño (diámetro), orientación y número de elementos. Debido a la importancia práctica de este fenómeno en numerosos problemas de la ingeniería, esta interacción fue y es estudiada en un gran número de casos particulares. En estos estudios, se observa claramente que las frecuencias e intensidades de las cargas aerodinámicas dependen fuertemente de las características de cada conjunto.

En nuestro caso, el problema físico es la determinación de cargas de viento sobre una antena tipo radar de paneles rectangulares (de relación de aspecto 5:1 aprox.), que presenta un determinado ángulo de tilt sobre la horizontal, montados sobre un marco estructural de elementos más pequeños (de relación de aspecto 0,5:1 aprox.), para distintos ángulos de incidencia y velocidades de la corriente libre. En trabajos previos se determinaron en forma numérica y experimental los valores instantáneos de cargas sobre los paneles que componen la estructura, en su posición frontal al viento incidente. Además, se realizó una validación y calibración previa del modelo numérico, ensayando en túnel de viento un modelo de paneles y elementos estructurales de escala 1:1, para comprender de manera más profunda la interacción fluido-dinámica generada por la configuración (Scarabino et al 2011, Bacchi et al 2011). En el trabajo actual, se realizaron ensayos en túnel de viento para determinar las presiones medias y las resultantes de cargas normales y tangenciales sobre un modelo de antena completa a escala 1:20, en un flujo de capa límite atmosférica.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Ensayo modelo 3D en túnel de viento

Para cumplir con los objetivos propuestos y poder determinar la distribución de cargas sobre la antena y considerar los efectos tridimensionales, se fabricó un modelo a escala 1:20 de la estructura de la antena de 8m x 7m con 20 niveles de paneles. El mismo fue ensayado en el túnel de viento de capa límite del Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, de la Universidad Nacional de La Plata. La capa límite atmosférica turbulenta fue modelada por medio de elementos turbuladores y álabes ajustables, definiendo un perfil de velocidades que ajusta con una ley de potencia exponencial de 0.21, correspondiente a ambientes rurales o suburbios abiertos con obstáculos tales como árboles o edificios de baja estatura (Sachs, 1978).

Los ensayos se realizaron para cinco velocidades (5, 8, 11, 14 y 17m/s), y cinco ángulos de incidencia respecto a la corriente libre ( $0^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ), siendo el caso  $0^\circ$  cuando la superficie de la antena es normal a la dirección del flujo incidente. La velocidad media de la corriente libre fue adquirida con un anemómetro de hilo caliente, Dantec Flowmaster, ubicado 1.5m aguas arriba y a una altura del piso coincidente con el centro de presiones estimado para el modelo de antena (20cm desde el piso del túnel, aprox.). La Figura 1 muestra al modelo en la sección

de prueba del túnel de viento, los elementos turbuladores y la ubicación de la punta del anemómetro Flowmaster. Se realizaron ensayos de caracterización del túnel de viento, de distribución de presiones sobre la antena y de cargas mediante la utilización de celdas de cargas.



Figura 1. Implementación del ensayo.

### ***2.1.1 Ensayo de presiones sobre el modelo completo***

La sección de prueba del túnel de viento en el cual se desarrollaron los ensayos, tiene 7.5m de longitud, 1.40m de ancho y 1m de altura. (Boldes *et al*, 1995). Para la caracterización de la turbulencia se utilizó un anemómetro de hilo caliente de seis canales marca Dantec Streamline, adquiriendo y procesando datos on-line. Los sensores empleados con el anemómetro son puntas dobles 55R51. El perfil de velocidades utilizado en el ensayo se puede observar en la Figura 2.

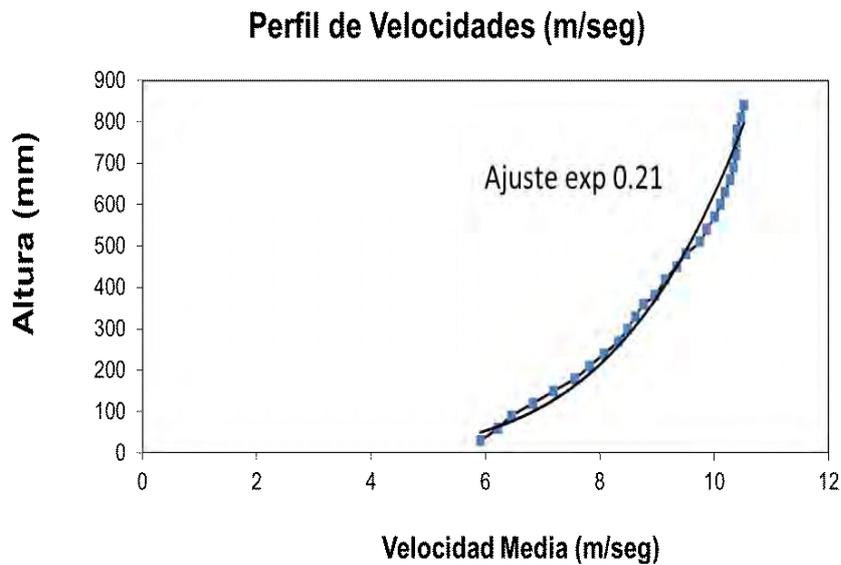


Figura 2. Ajuste del perfil de velocidades.

Algunos paneles del modelo de antena fueron instrumentados con tomas de presión en sus caras frontales y posteriores. Por simetría, sólo la mitad del modelo fue instrumentado. Se tomaron medidas de presión utilizando un escáner de presiones modelo NetScanner 98RK-9816. El modelo contaba con 49 tomas distribuidas sobre los paneles. En la Figura 3 se pueden ver dos etapas de construcción del modelo para medir distribución de presiones.

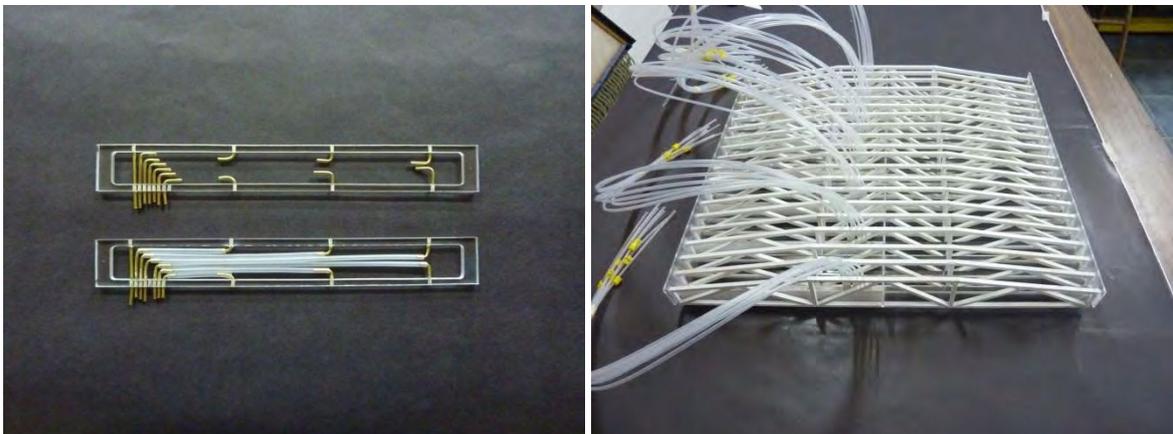


Figura 3. Construcción del modelo.

### ***2.1.2 Ensayo de cargas aerodinámicas sobre el modelo completo***

Para determinar la carga total sobre la antena, se modificó el modelo para acoplarle una balanza aerodinámica de dos componentes. La misma estaba vinculada al modelo desde un eje colocado en su parte inferior, de manera tal de quedar por debajo del nivel del piso del túnel de viento (ver Figura 4). Se adquirieron las fuerzas normales y tangenciales mediante un sistema adquireedor-amplificador National Instruments por medio de un bloque terminal (NI SXCI 1314). La adquisición se realiza en PC a través de software LabView®.

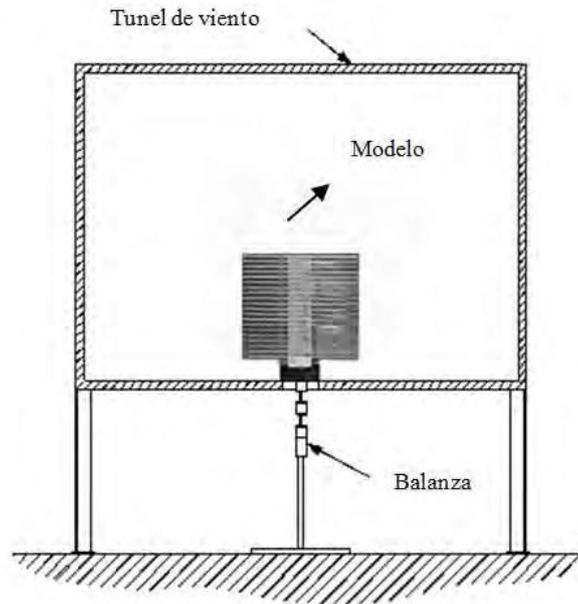


Figura 4. Esquema de medición de cargas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Esquema de la distribución de las tomas de presión

Los elementos radiantes se definen con letras mayúsculas, mientras que la posición de las tomas de presión en cada elemento radiante se corresponde con los números. El eje vertical central constituye un eje de simetría. En la Figura 5 se representan los esquemas de las tomas de presión en las caras a barlovento y sotavento, respectivamente.

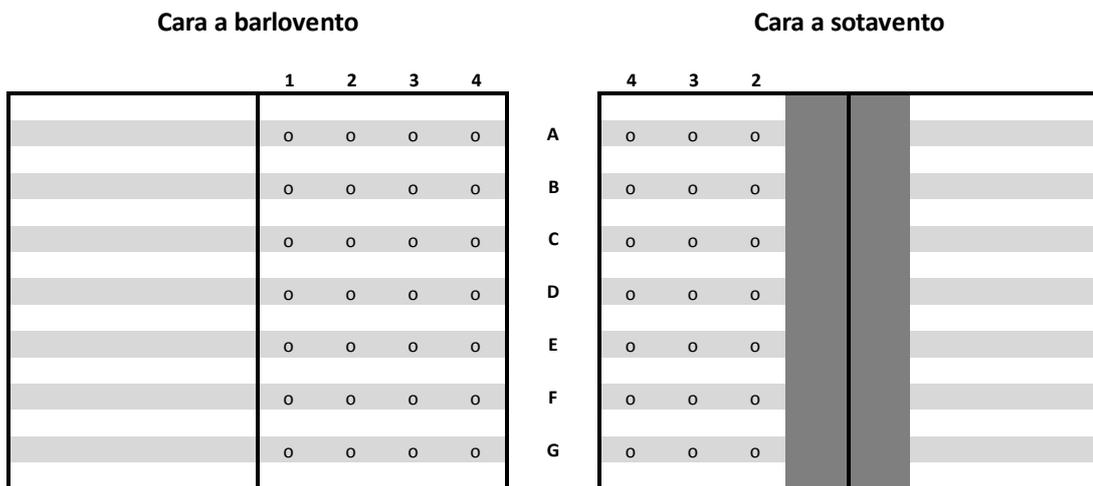


Figura 5. Esquema de la distribución de tomas de presión.

#### 3.2 Distribución del factor de carga (ensayo de presiones en túnel de viento)

En la Figura 3 y Figura 5 se observan las posiciones de las tomas de presión, y en la Figura 6 y Figura 7 respectivamente, los valores de presiones obtenidos para una velocidad de la corriente libre de 11m/s y 0° de incidencia, tanto en la cara a barlovento como a sotavento. A su vez, en la Tabla 1 y Tabla 2 se presentan los valores para cada toma de presión.

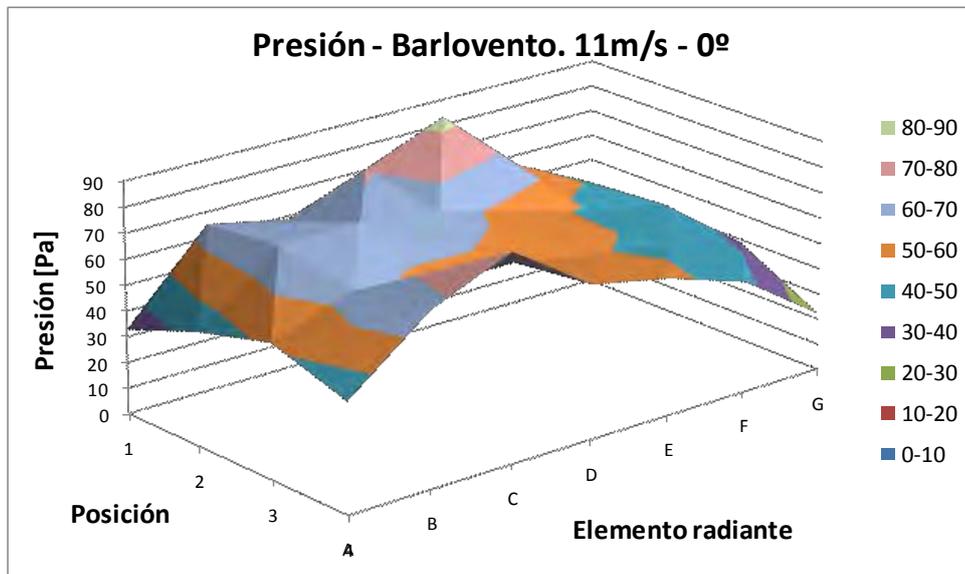


Figura 6. Valores de presiones sobre la cara a barlovento.

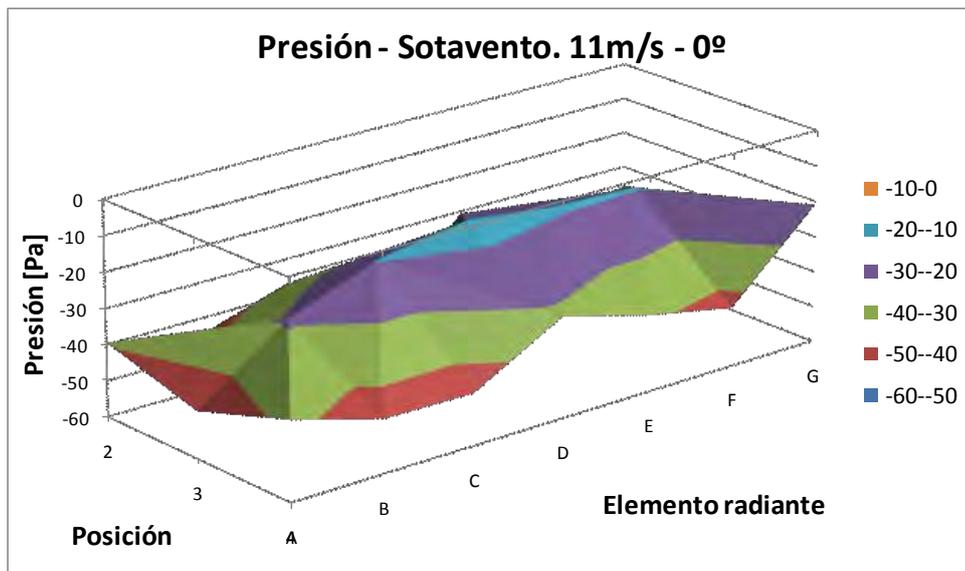


Figura 7. Valores de presiones sobre la cara a sotavento.

Presión [Pa]	Posición			
Elemento radiante	1	2	3	4
A	32.871	44.031	52.103	42.607
B	65.197	68.399	62.946	67.380
C	58.852	69.058	56.014	80.889
D	70.540	64.295	56.484	59.788
E	83.158	56.651	51.190	53.481
F	55.902	47.620	46.793	43.437
G	40.652	42.741	38.801	22.185

Tabla 1. Presión sobre cara a barlovento [Pa],  $V_0 = 11\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  incidencia.

Presión [Pa]	Posición		
Elemento radiante	2	3	4
A	39.344	46.933	37.854
B	44.852	28.806	45.108
C	36.850	19.580	45.584
D	58.599	15.684	31.759
E	30.613	18.612	38.444
F	40.837	19.507	43.433
G	35.573	32.245	20.980

Tabla 2. Presión sobre la cara a sotavento [Pa],  $V_0 = 11\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  incidencia.

En la Tabla 3 se encuentra la distribución de los coeficientes de presiones calculados como la presión de la cara a barlovento menos la presión en la cara a sotavento, dividido por la presión dinámica (de acuerdo a la ecuación 2).

Cp	Posición			
Elemento radiante	1	2	3	4
A	0.455	1.153	1.370	1.113
B	0.902	1.567	1.269	1.556
C	0.814	1.465	1.046	1.750
D	0.976	1.700	0.999	1.267
E	1.151	1.207	0.966	1.272
F	0.773	1.223	0.917	1.201
G	0.562	1.083	0.982	0.597

Tabla 3. Distribución de Cp,  $V_0=11\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  incidencia.

Los factores de carga mostrados en la Figura 8 son calculados utilizando la diferencia de presiones entre las caras frontales y traseras, según:

$$f_i = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \quad (1)$$

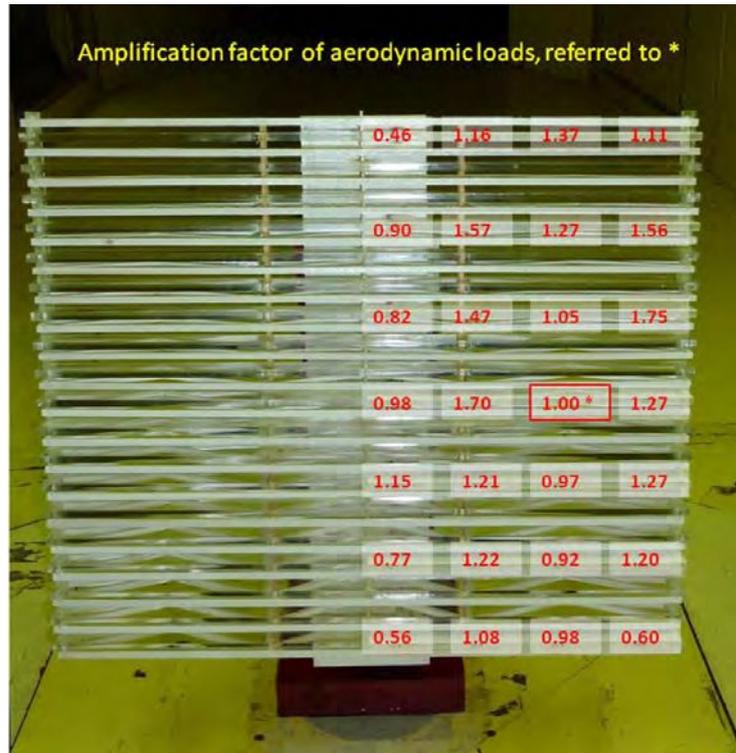


Figura 8. Factores de carga.

$\Delta P_{ref}$  es medida en el panel central, en el punto indicado con \* en la Figura 8. Podemos observar que en algunos paneles existen incrementos de carga locales de hasta un 75%. Este caso es para velocidad de 11 m/seg y dirección del viento frontal ( $0^\circ$  de incidencia).

Se muestran a continuación los resultados a diferentes velocidades y ángulos de incidencia respecto de la corriente libre. Para cada ángulo de incidencia se cálculo el promedio de los coeficientes de presiones para las diferentes velocidades (8, 11, 14 y 17 m/seg) y para las incidencias de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $-30^\circ$ .

El coeficiente de presión es definido como:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad (2)$$

$C_p$  = coeficiente de presiones

$\rho$  = densidad

$V$  = velocidad

$\Delta P$  = diferencia de presiones entre las caras.

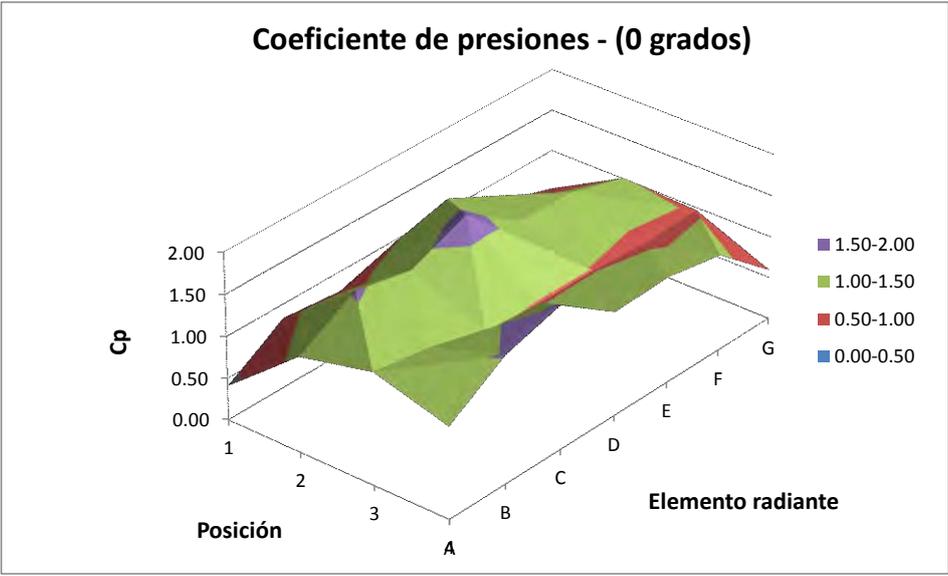


Figura 9. Coeficiente de presiones promedio en velocidades. 0° incidencia.

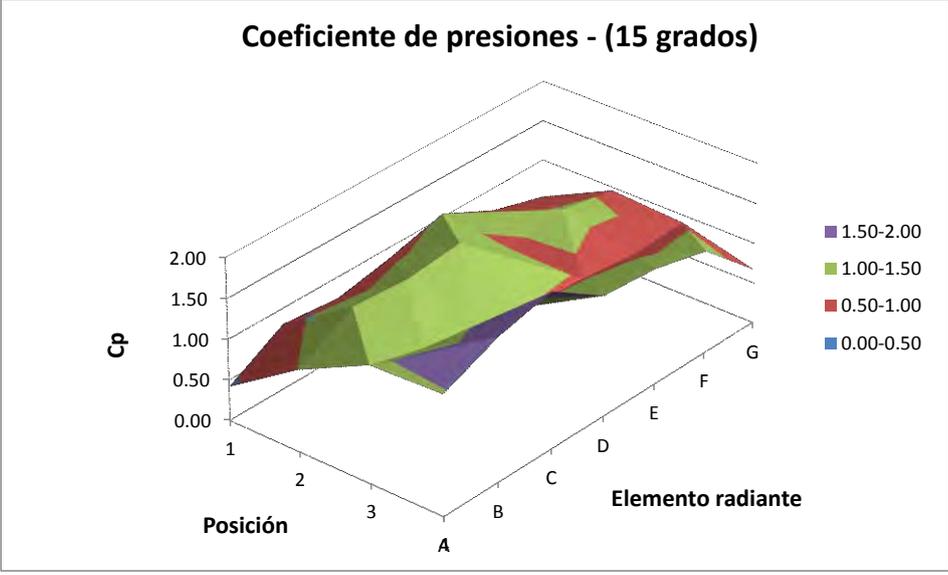


Figura 10. Coeficiente de presiones promedio en velocidades. 15° incidencia.

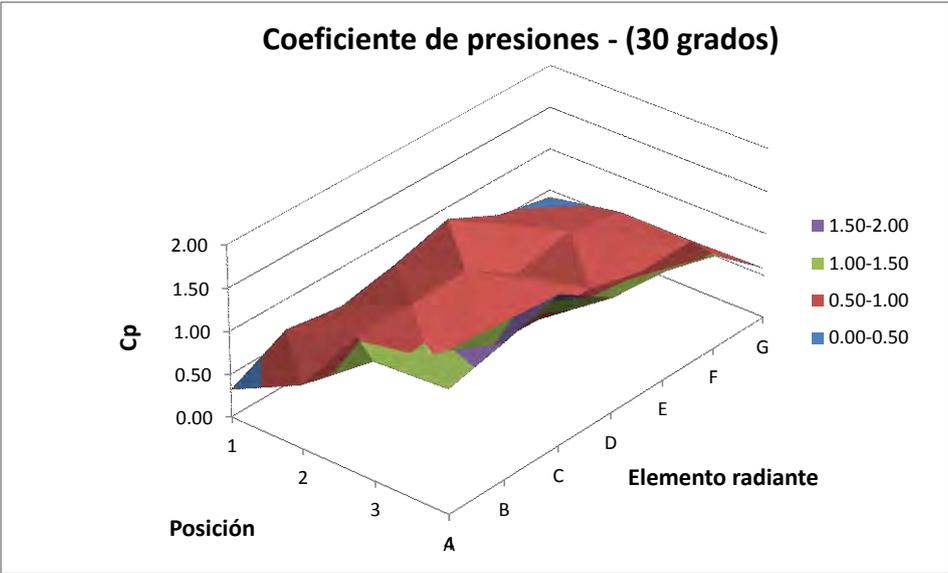


Figura 11. Coeficiente de presiones promedio en velocidades. 30° incidencia.

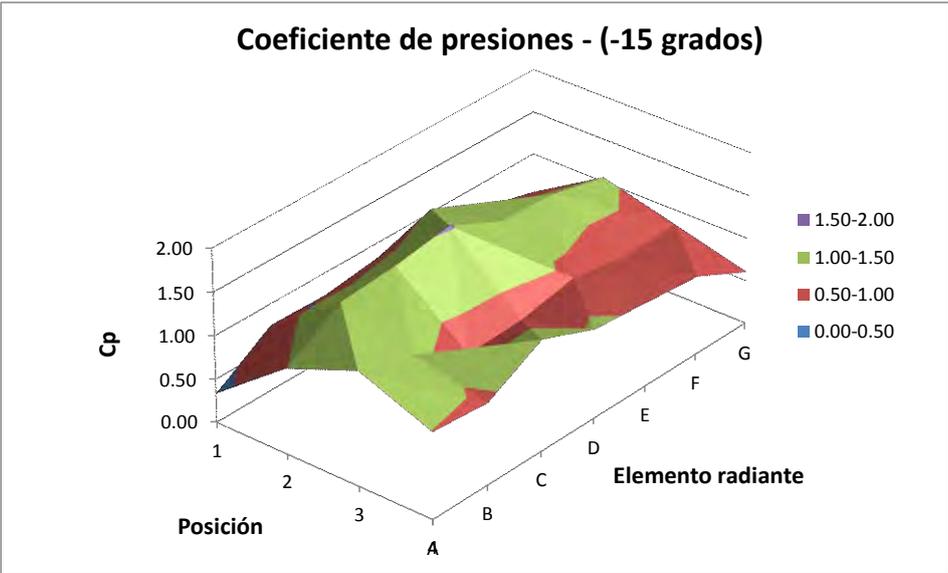


Figura 12. Coeficiente de presiones promedio en velocidades. -15° incidencia.

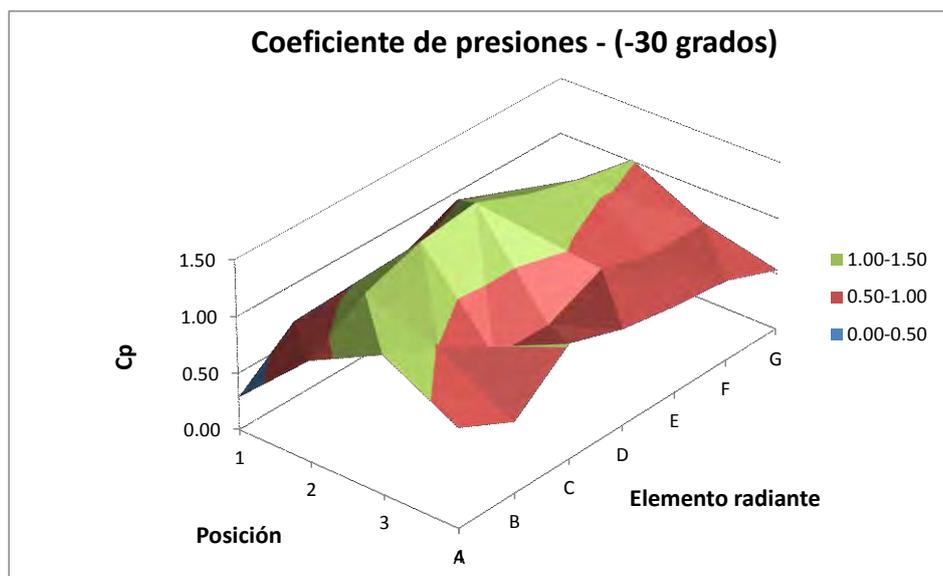


Figura 13. Coeficiente de presiones promedio en velocidades. -30° incidencia.

La distribución de  $C_p$  sobre la superficie de la antena permite hallar los máximos valores y su ubicación. Esta información es de importancia para el diseño estructural de los paneles radiantes montados sobre la estructura, ya que en esos puntos se tendrán las mayores cargas eólicas. En las tablas siguientes se muestran dichos valores en diferentes configuraciones de incidencias. Dichas tablas se confeccionaron tomando el promedio de los  $C_p$  en las diferentes velocidades. Se observó que la dispersión más grande que se daba era del orden del 30% en algún panel. El promedio estaba en el orden del 7%.

En la Tabla 4 se aprecian los  $C_p$  promedios para el caso de 0° de incidencia. Se observan que los paneles más cargados son el C4 (1.718), D2 (1.676) y B2 (1.528). En la Tabla 5 que corresponde a 15° de incidencia se observa que los paneles más cargados son C4 (1.928), B4 (1.767) y D4 (1.493). En la Tabla 6 observamos los valores de  $C_p$  para el caso de -15° de incidencia. En este caso los paneles más cargados son aquellos en las posiciones C4 (1.759), B4 (1.577) y A4 (1.433). En la Tabla 7 se puede ver los coeficientes de presión para el caso de 30° de incidencia y los paneles más cargados en este caso son el D2 (1.528), C2 (1.427) y B2 (1.374). En la Tabla 8 podemos observar los coeficientes correspondientes a -30° de incidencia y se ve que los paneles más cargados son el D2 (1.436), C3 (1.368) y E2 (1.242).

<b>CP: 0°</b>	<b>Posición</b>			
<b>Elemento radiante</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
A	0.406	1.138	1.343	1.093
B	0.834	1.528	1.239	1.524
C	0.762	1.391	1.030	1.718
D	0.972	1.676	0.981	1.244
E	1.140	1.226	0.985	1.274
F	0.736	1.208	0.936	1.154
G	0.524	1.009	0.967	0.591

Tabla 4.  $C_p$  promedios para el caso de 0° de incidencia.

<b>CP: 15°</b>	<b>Posición</b>			
<b>Elemento radiante</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
A	0.417	1.011	1.446	1.480
B	0.806	1.390	1.264	1.767
C	0.736	1.337	1.024	1.928
D	0.865	1.409	0.994	1.493
E	1.045	0.968	0.955	1.439
F	0.718	1.084	0.871	1.275
G	0.525	0.958	0.904	0.668

Tabla 5. Cp promedios para el caso de 15° de incidencia

<b>CP: -15°</b>	<b>Posición</b>			
<b>Elemento radiante</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
A	0.318	0.739	1.377	1.433
B	0.646	0.921	1.029	1.577
C	0.545	0.931	0.760	1.759
D	0.675	0.955	0.728	1.342
E	0.857	0.561	0.730	1.280
F	0.549	0.702	0.564	1.099
G	0.411	0.572	0.568	0.584

Tabla 6. Cp promedios para el caso de -15° de incidencia

<b>CP: 30°</b>	<b>Posición</b>			
<b>Elemento radiante</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
A	0.334	0.984	1.319	0.994
B	0.754	1.374	1.126	0.939
C	0.738	1.427	0.759	1.283
D	0.829	1.528	0.787	1.030
E	1.037	1.231	0.911	0.972
F	0.709	1.200	0.796	0.911
G	0.539	1.050	0.828	0.606

Tabla 7. Cp promedios para el caso de 30° de incidencia

CP: -30°	Posición			
Elemento radiante	1	2	3	4
A	0.288	0.892	1.221	0.875
B	0.675	1.198	0.986	0.628
C	0.663	1.368	0.633	1.018
D	0.716	1.436	0.621	0.858
E	0.929	1.242	0.838	0.775
F	0.619	1.107	0.695	0.720
G	0.490	1.012	0.698	0.536

Tabla 8. Cp promedios para el caso de -30° de incidencia

Comparando valores podemos inferir que los paneles más cargados en general son el C4 y el D2, siguiéndoles el B2 y B4. Entre estos es el C4 el que más carga soporta, con un valor de 1.928.

### 3.3 Coeficientes de fuerza globales

Los coeficientes aerodinámicos adimensionales para la carga normal y carga lateral de la estructura completa, fueron obtenidos con las siguientes fórmulas:

$$C_{normal} = \frac{F_{normal}}{\frac{1}{2} \rho_{test} V_{test}^2 S_{ref}} \quad (3) \quad C_{lat} = \frac{F_{lat}}{\frac{1}{2} \rho_{test} V_{test}^2 S_{ref}} \quad (4)$$

$S_{ref}$  es el área frontal de la estructura,  $V_{test}$  es la velocidad de referencia y  $\rho_{test}$  es la densidad del aire en el túnel de viento (corregida por temperatura).

En la Figura 14 se muestran los coeficientes de fuerzas normales obtenidos para los casos considerados. El ángulo de 90° se corresponde con un ángulo de incidencia de 0° respecto a la corriente libre, empleado para los resultados de presiones.

El coeficiente de fuerza normal para una placa plana cuadrada normal al flujo libre es 1.18 (Hoerner, 1957). Para la estructura ensayada, que es abierta, pero compleja, el valor es 1.04. Los coeficientes de carga laterales hallados fueron del orden de 0.01, considerados despreciables para propósitos de diseño estructural.

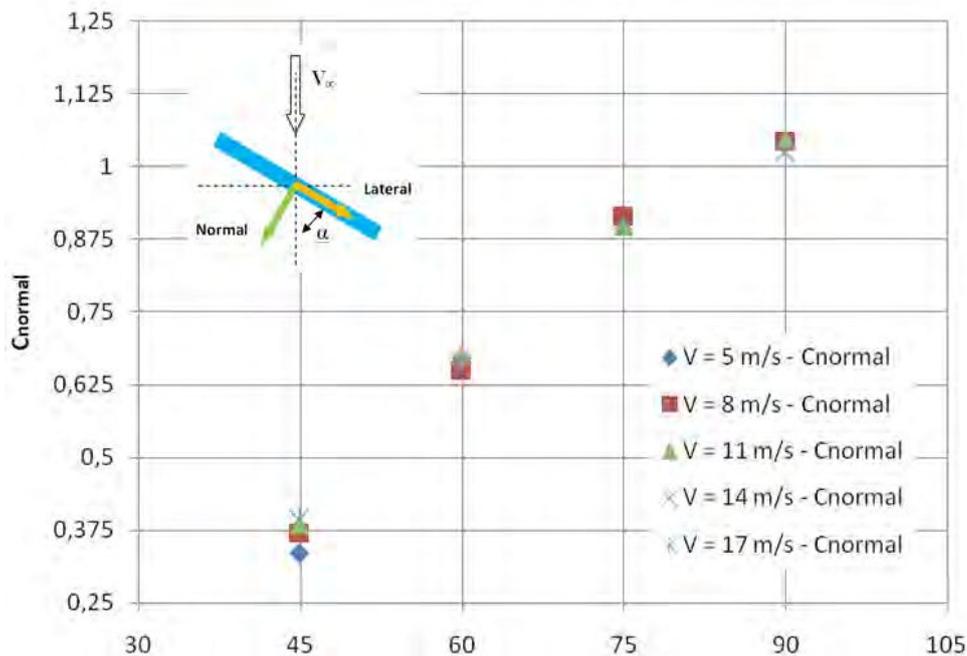


Figura 14. Coeficientes de fuerzas normales.

#### 4 ANALISIS Y CONCLUSIONES

Se llevó a cabo en este trabajo un estudio experimental sobre las cargas existentes en una antena tipo radar. En trabajos anteriores se estudiaron las cargas en dos dimensiones de los elementos radiantes influenciados por los elementos cercanos a él. Se analizaron los desprendimientos tanto en forma experimental como numérica y se verificó su influencia sobre la distribución de cargas generales. En este caso se estudiaron las cargas generales adquiridas con balanzas aerodinámicas y la distribución de cargas sobre los elementos en el modelo tridimensional de la antena para diferentes velocidades y ángulos de inclinación de la corriente incidente.

De los ensayos se puede verificar que la distribución de cargas no es constante, por lo que el diseño de la estructura deberá realizarse de acuerdo a un criterio determinado, que podría ser tomar la mayor carga en la peor condición de viento incidente.

Se observa también que los coeficientes de presiones no se mantienen constantes con el cambio de la velocidad para la misma dirección de flujo incidente, observándose desviaciones del orden del 7% en promedio pero con un par de elementos que llegan al 30%.

También se puede corroborar que los coeficientes de presiones y cargas generales varían con el ángulo de incidencia como era de esperarse. En estos casos también existe la misma tendencia en la desviación con respecto al cambio de velocidad.

Si se observa que los valores de  $C_p$  máximos se dan en general en los mismo puntos, independientemente de la dirección del flujo incidente, aunque varían en magnitud.

## REFERENCIAS

- Bacchi F., Scarabino A., García Sainz M., Delnero J. S.: “Fluid-dynamic interaction of rectangular cylinders of different aspect ratio”, *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, Holanda*, 10-15 de Julio de 2011.
- Blackburn, H.M., Henderson, R.D., 1999: A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *J. of Fluid Mechanics* 385, 255–286.
- Catalano P, Amato M., 2003: An evaluation of RANS turbulence modelling for aerodynamic applications. *Aerospace Science and Technology, Vol. 7, Issue 7*, October 2003, 493:509
- Chatterjee D., Biswas G., Amiroudine S., 2010: Numerical simulation of flow past row of square cylinders for various separation ratios. *Computers & Fluids* 39, 1: 49-59
- Fitzpatrick, J.A., Donaldson, I.S., Mcknight, W., 1988: Strouhal numbers for flows in deep tube array models. *Journal of Fluids and Structures* 2, 145–160.
- Freitas, C.J., 1995: Perspective: selected benchmarks for commercial CFD codes. *ASME Journal of Fluids Engineering* 117, 208–218.
- Hoerner, S. F., 1965, Fluid-dynamic drag, Hoerner Fluid Dynamics.
- Lam, K., Li, J.Y., Chan, K.T., So, R.M.C. 2003: Flow pattern and velocity field distribution of cross-flow around four cylinders in a square configuration at a low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures* 17, 665–679.
- Mannini C., Weinman K., Soda A., Schewe G., 2009: Three-dimensional numerical simulation of flow around a 1:5 rectangular cylinder. *Proc. of EACWE 5 Florence, Italy*, 19th – 23rd July 2009
- Okajima, A., 1982: Strouhal numbers of rectangular cylinders. *J. Fluid Mechanics, Cambridge University Press*, 123: 379-398,
- Sachs P. 1978: Wind Forces in Engineering. *Pergamon Press*.
- Scarabino A., Marañón di Leo, J., Delnero J. S., Bacchi, F., 2005: Drag Coefficients and Strouhal Number of a Port Crane Boom Girder Section, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93/6, 451-460.
- Scarabino A., Bacchi F., Delnero J. S., García Sainz M., Alasia G.. “Cargas eólicas sobre una estructura con paneles”, *ENIEF 2011*, Rosario, 1-4 de noviembre de 2011.
- So, R.M.C., Liu, Y., Chan, S.T., Lam, K. 2001: Numerical studies of a freely vibrating cylinder in a cross-flow., *Journal of Fluids and Structures* 15, 845–866.
- Sumner, D., Price, S.J., Paidoussis, M.P. 2000: Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluid Mechanics* 411, 263–303.
- Boldes, U., J. Colman and V. Nadal Mora, “The Boundary Layer Wind Tunnel at the Faculty of Engineering, University of La Plata (Argentina),” *Latin American Applied Research*, 25, 75-85 (1995).