

ESTUDIO AERODINÁMICO Y DETERMINACIÓN DE CARGAS DE VIENTO EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

AERODYNAMIC STUDY AND DETERMINATION OF WIND LOADS ON SOLAR ENERGY SYSTEMS

Marcelo F. Valdez^{a,b,c}, Sergio Preidikman^{a,d} y Silvana E. Flores Larsen^{a,b}

^a*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

^b*Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, <http://www.inenco.unsa.edu.ar>*

^c*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, mfvaldez82@gmail.com*

^d*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina*

Palabras clave: Aerodinámica, Método de Red de Vórtices Inestacionario, Concentradores Solares, Fresnel Lineal.

Resumen. En este artículo se presenta un estudio paramétrico de las cargas aerodinámicas producidas por el viento sobre el campo de espejos de un concentrador tipo Fresnel Lineal prototípico. Se estudia la influencia del espaciamiento entre los espejos y de la altura del plano de los espejos respecto del suelo para distintos ángulos de incidencia de la radiación solar. El estudio de los efectos estacionarios y dinámicos del viento sobre los espejos es fundamental para el diseño estructural y del sistema de seguimiento solar. Se emplea el método de Red de Vórtices Inestacionario en dos dimensiones para la determinación del flujo de aire entre los espejos y la estimación de las cargas aerodinámicas. Este trabajo constituye un primer paso para el estudio completo del fenómeno de interacción fluido-estructura para estos sistemas.

Keywords: Aerodynamics, Unsteady Vortex Lattice Method, Solar Concentrators, Linear Fresnel.

Abstract. In this article, a parametric study of the aerodynamic loads produced by the wind over the mirror field of a prototypic Linear Fresnel solar concentrator is presented. The influence of the spacing between the mirrors and of the height of the mirrors with respect to the ground at different angles of incidence of the solar radiation are studied. The study of the steady-state and transient effects of the wind over the mirrors is of fundamental importance for the design of the structure and of the solar tracking system. The two-dimensional Unsteady Vortex Lattice Method is employed to determine the flowfield around the mirrors and to estimate the aerodynamic loads. This effort is a first step towards the complete study of the fluid-structure interaction problem for this kind of systems.

1. INTRODUCCIÓN

Existen actualmente dos tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar: fotovoltaica y de concentración solar. La tecnología de concentradores solares se basa en la utilización de la radiación solar concentrada por un campo de espejos para generar altas temperaturas en un receptor por el que circula un fluido de trabajo, el cual alimenta un ciclo convencional de vapor para generar electricidad. Se espera que para el 2020, la tecnología de concentración solar sea económicamente competitiva con la energía eólica [Jamel et al. \(2013\)](#).

Entre las tecnologías de concentración térmica solar, el Fresnel Lineal se destaca por su bajo costo y simplicidad constructiva (Fig. 1). Un sistema Fresnel lineal consta de un reflector primario formado por filas de espejos semi-planos. Este reflector primario realiza el seguimiento solar para reflejar radiación solar directa sobre un receptor lineal fijo (absorbedor) ubicado sobre el nivel de los espejos y calentar el fluido de trabajo para convertirlo total o parcialmente en vapor. El vapor obtenido puede utilizarse en aplicaciones térmicas o para producir electricidad.



Figura 1: Izquierda: Prototipo de Fresnel Lineal del INENCO en la localidad de San Carlos, Salta ([Dellicompagni et al., 2016](#)). Derecha: Planta Concentradora Fresnel Lineal en Liddell, Australia¹.

Las cargas de viento sobre los espejos pueden producir deformaciones que afectan la eficiencia del concentrador ya que los rayos solares reflejados se desvían respecto de sus direcciones óptimas. Además, el viento puede afectar significativamente el sistema electrónico de seguimiento solar.

A pesar de que existen estudios de los efectos dinámicos del viento sobre en sistemas concentradores solares ([Peterka y Derickson, 1992](#)), aun persisten algunos interrogantes tales como las características del viento alrededor del campo de espejos, los efectos de la turbulencia, los efectos de la relación de aspecto y del espaciamiento entre los espejos sobre la cargas de viento ([Sun et al., 2014](#)). Además, la mayor parte de los estudios corresponden a colectores parabólicos ([Paetzold et al., 2015](#)), y muy pocos a sistemas Fresnel lineal. En un estudio reciente, [Lancereau et al. \(2015\)](#) cuantificaron la interacción entre el campo de espejos y el absorbedor. Estos autores concluyeron que el estudio de los aspectos estructurales y de las cargas de viento sobre el campo de espejos es fundamental para la reducción del costo total del sistema.

En este trabajo se presenta un estudio de las cargas aerodinámicas que experimentan los espejos de un concentrador Fresnel Lineal prototípico bajo la influencia de un viento uniforme. Se estudia la influencia del espaciamiento entre los espejos y de la altura del plano de los espejos respecto del suelo para distintos ángulos de incidencia de la radiación solar. Las conclusiones de este estudio también pueden aplicarse a campos de paneles fotovoltaicos. Para el estudio se emplea el método de red de Vórtices Inestacionario.

¹<http://www.novatecsolar.com/80-1-Liddell.html>

2. MÉTODO DE RED DE VÓRTICES INESTACIONARIO

En este trabajo se emplea la versión inestacionaria del método de red de vórtices. El fundamento matemático y de los detalles de la aplicación del método para sistemas de múltiples cuerpos inmersos se omiten aquí, pero pueden consultarse en artículos previos de los autores (Valdez et al., 2017, 2018). La idea principal del método es que cuando el número de Reynolds tiende a infinito el espesor de las regiones viscosas (capas límites y las estelas) se vuelve infinitesimal y en consecuencia, pueden modelarse como sábanas vorticosas de espesor infinitesimal (Fig. 2), las cuales producen una discontinuidad en la velocidad tangencial a través de ellas.

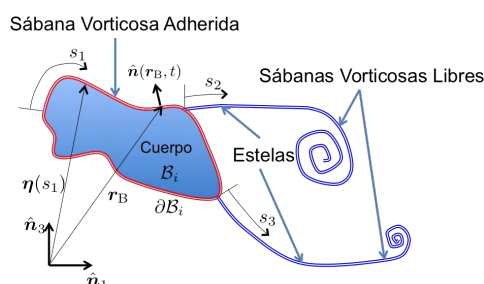


Figura 2: Descripción esquemática de las sábanas vorticosas libres y adheridas.

Posteriormente, las sábanas vorticosas adheridas a los cuerpos sólidos son discretizadas con redes de vórtices cuyas intensidades Γ_i se determinan en cada instante de tiempo mediante la imposición de la condición de no penetración en un número finito de puntos de control situados sobre las superficies sólidas y de la condición de conservación de la circulación de Kelvin. Esto conduce a la resolución de un sistema algebraico de ecuaciones del tipo:

$$[A] \{\Gamma\} = \{\text{RHS}\}, \quad (1)$$

donde: $[A] \in \mathbb{R}^{(M+\mathcal{N}_B) \times N}$, $\{\Gamma_B\} \in \mathbb{R}^N$, $\{\text{RHS}\} \in \mathbb{R}^{M+\mathcal{N}_B}$ con \mathcal{N}_B , el número total de cuerpos inmersos, N , el número total de vórtices adheridos y M , el número total de puntos de control. Una vez conocidas las intensidades de los vórtices adheridos se procede a la generación de las estelas desde los bordes afilados de los cuerpos y a la determinación de las cargas aerodinámicas empleando la versión no-estacionaria de la ecuación de Bernoulli.

3. GEOMETRÍA DE UN CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL

La geometría de un concentrador solar de tipo Fresnel Lineal se muestra en la Fig. 3. Dada la altura del absorbedor h y la semi-longitud del área de concentración ℓ , el ángulo Θ del triángulo formado entre los ejes de los espejos extremos y el centro del absorbedor es tal que $\ell = h \tan(\Theta/2)$. La altura del plano de los espejos con respecto al suelo se denota h_m .

Se considera un número par de espejos n de tal manera que no exista un espejo en el centro del área de concentración. Para parametrizar la geometría del concentrador, los espejos de ancho c se consideran distribuidos sobre el plano horizontal a intervalos angulares uniformes $\Delta\Theta = \Theta/(n-1)$. Los espejos se numeran de izquierda a derecha.

La separación de los espejos está limitada, por un lado, por la separación mínima requerida entre los dos espejos centrales y por el otro, por el requerimiento de la ausencia de sombras entre los espejos (Fig. 3). Se puede mostrar que para satisfacer este último requerimiento la

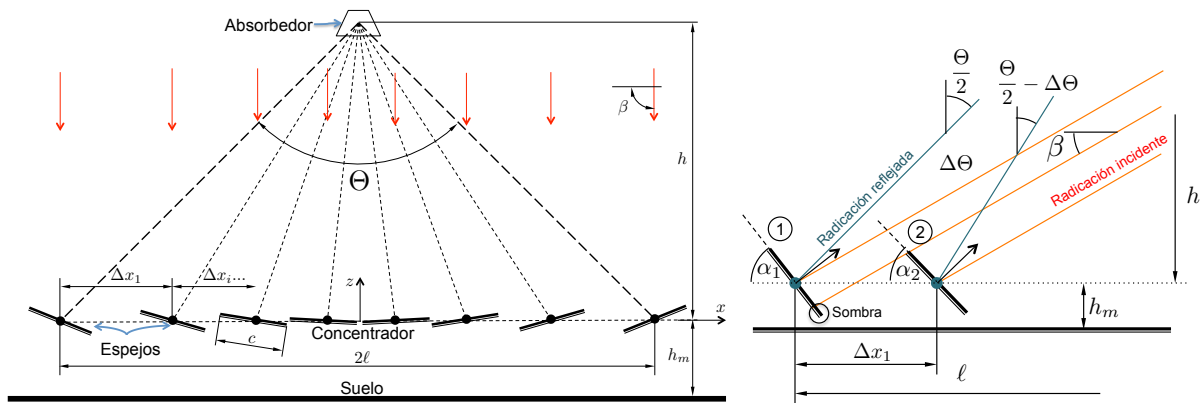


Figura 3: Izquierda: Geometría de un concentrador solar Fresnel Lineal con radiación solar directa incidente a 90°. Derecha: Sombreado del espejo 2 sobre el 1.

altura mínima h_{\min} del absorbedor debe ser:

$$\frac{h_{\min}}{c} = \frac{1}{2 \sin \beta_{\min}} \frac{\sin(\alpha_1 + \beta_{\min}) + \sin(\alpha_1 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \beta_{\min})}{\tan \frac{\Theta}{2} - \tan(\frac{\Theta}{2} - \Delta\Theta)} \quad (2)$$

donde β_{\min} es el menor ángulo de incidencia de la radiación solar y $\alpha_1 = (\pi + \Theta) / 4 - \beta_{\min} / 2$ es el ángulo de inclinación del espejo 1 para esa incidencia.

La posición x_i de los espejos en el plano horizontal y sus ángulos de inclinación α_i (con respecto a la dirección $-x$) están dados por:

$$x_i = -h \tan\left(\frac{\Theta}{2} - (i - 1) \Delta\Theta\right) \quad \alpha_i = \frac{1}{4}(\pi + \Theta) - \frac{\beta}{2} - (i - 1) \frac{\Delta\Theta}{2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

4. VERIFICACIÓN DEL MODELO UVLM

El correcto funcionamiento del modelo computacional se verifica reproduciendo soluciones analíticas conocidas. Se analizan los coeficientes estacionarios de sustentación $C_{l_{SS}}$ y de momento alrededor del borde de ataque $C_{m_{oSS}}$ de una placa plana a diferentes ángulos de ataque (Katz y Plotkin, 2001, §6.5), y la evolución de la sustentación para un arranque impulsivo (Wagner, 1925; Garrick, 1938). La comparación entre las predicciones del UVLM y los resultados teóricos se presentan en las Fig. 4 donde se observa la correcta respuesta del UVLM.

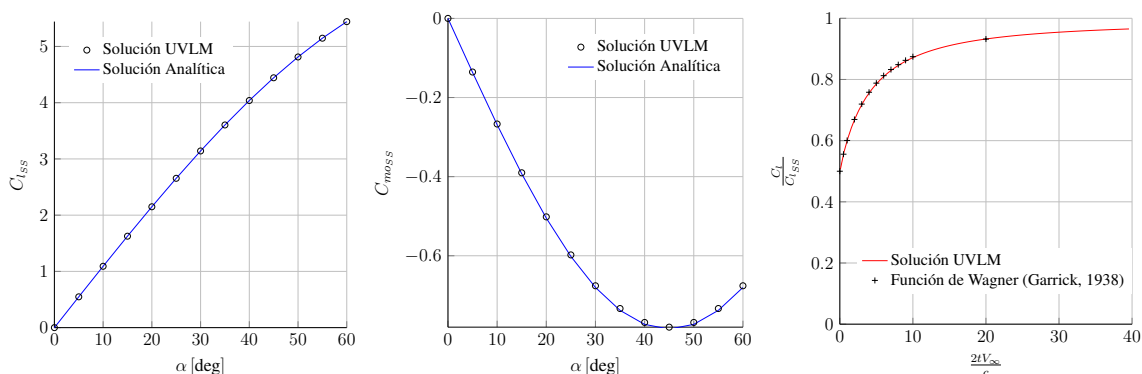


Figura 4: Comparación entre las predicciones del UVLM y las soluciones analíticas para una placa plana.

5. ESTUDIO AERODINÁMICO DE UN CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL

A los fines del estudio aerodinámico se elige un concentrador Fresnel lineal prototípico de $n = 8$ espejos y $\Theta = 90^\circ$. Para este concentrador, la altura mínima del absorbedor (Ec. (2)) es $h = 5,28c$. El suelo se modela como un cuerpo adicional sin espesor y de longitud $\ell_g = 50c$, cuya vorticidad adherida es también es discretizada con una red de vórtices. Cada espejo se modela como una placa plana cuya sábana vorticosa adherida se discretiza con $N_m = 2^6 + 1$ vórtices. La vorticidad adherida al suelo se discretiza con $N_g = 2^{10} + 1$ vórtices.

En este esfuerzo, se estudia la influencia de la altura de los espejos respecto del suelo h_m y de la separación Δx entre los mismos sobre la fuerza aerodinámica vertical y sobre el momento aerodinámico alrededor del eje de rotación de los espejos. Se analizan para este fin las cargas aerodinámicas estacionarias. La separación entre los espejos se hará variar cambiando la altura del absorbedor h mientras se mantiene constante el ángulo Θ . De esta manera, los ángulos de inclinación de los espejos para los distintos ángulos de incidencia de la radiación solar β se mantienen. La separación entre los espejos Δx_i para distintas alturas del absorbedor h , así como los ángulos de inclinación de los espejos para distintos ángulos de incidencia de la radiación solar se resumen en la Tabla 1. Se consideran ángulos de incidencia de la radiación solar de $30^\circ \leq \beta \leq 150^\circ$. La correspondencia de estos ángulos y las horas del día depende de la ubicación geográfica del generador.

i	$h = 5,28c$	$h = 6,0c$	$h = 7,0c$	$h = 8,0c$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 60^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 120^\circ$	$\beta = 150^\circ$
	$\Delta x_i/c$	$\Delta x_i/c$	$\Delta x_i/c$	$\Delta x_i/c$	$\alpha_i [^\circ]$	$\alpha_i [^\circ]$	$\alpha_i [^\circ]$	$\alpha_i [^\circ]$	$\alpha_i [^\circ]$
1					52,5	37,5	22,50	7,50	-7,50
2	1,96	2,23	2,60	2,97	46,07	31,07	16,07	1,07	-13,93
3	1,47	1,67	1,95	2,23	39,64	24,64	9,64	-5,36	-20,36
4	1,25	1,42	1,66	1,90	33,21	18,21	3,21	-11,79	-26,79
5	1,19	1,35	1,57	1,80	26,79	11,79	-3,21	-18,21	-33,21
6	1,25	1,42	1,67	1,90	20,36	5,36	-9,64	-24,64	-39,64
7	1,47	1,67	1,95	2,23	13,93	-1,07	-16,07	-31,07	-46,07
8	1,96	2,23	2,60	2,97	7,50	-7,50	-22,50	-37,50	-52,50

Tabla 1: Separación entre los espejos para distintas alturas del absorbedor h y ángulos de inclinación de los espejos de un concentrador Fresnel Lineal de 8 espejos, para distintos ángulos de incidencia de la radiación solar directa.

5.1. Influencia de la altura del plano de los espejos h_m

La influencia de la altura de los espejos sobre los coeficientes estacionarios de fuerza vertical C_z y de momento C_m alrededor del eje de rotación de cada espejo se resumen en la Fig. 5. Se observa que para ángulos de incidencia de la radiación solar $\beta < 90^\circ$ es el espejo 1, el cual enfrenta directamente al viento, el que experimenta la mayor fuerza vertical positiva (hacia arriba) y el mayor momento positivo (borde de ataque arriba) alrededor del eje de rotación (para $\beta = 75^\circ$). Para ángulos $\beta > 90^\circ$, son los espejos situados a la derecha del absorbedor los que experimentan las mayores fuerzas verticales negativas (hacia abajo) y momentos negativos (borde de ataque abajo) alrededor del eje de rotación.

Se observa que, salvo para los espejos 1 y 2, el aumento de la altura del plano de los espejos produce una disminución en magnitud de las cargas aerodinámicas. Este efecto es pronunciado para ángulos de incidencia de la radiación solar β mayores a 90° y débil para β menores a 90° .

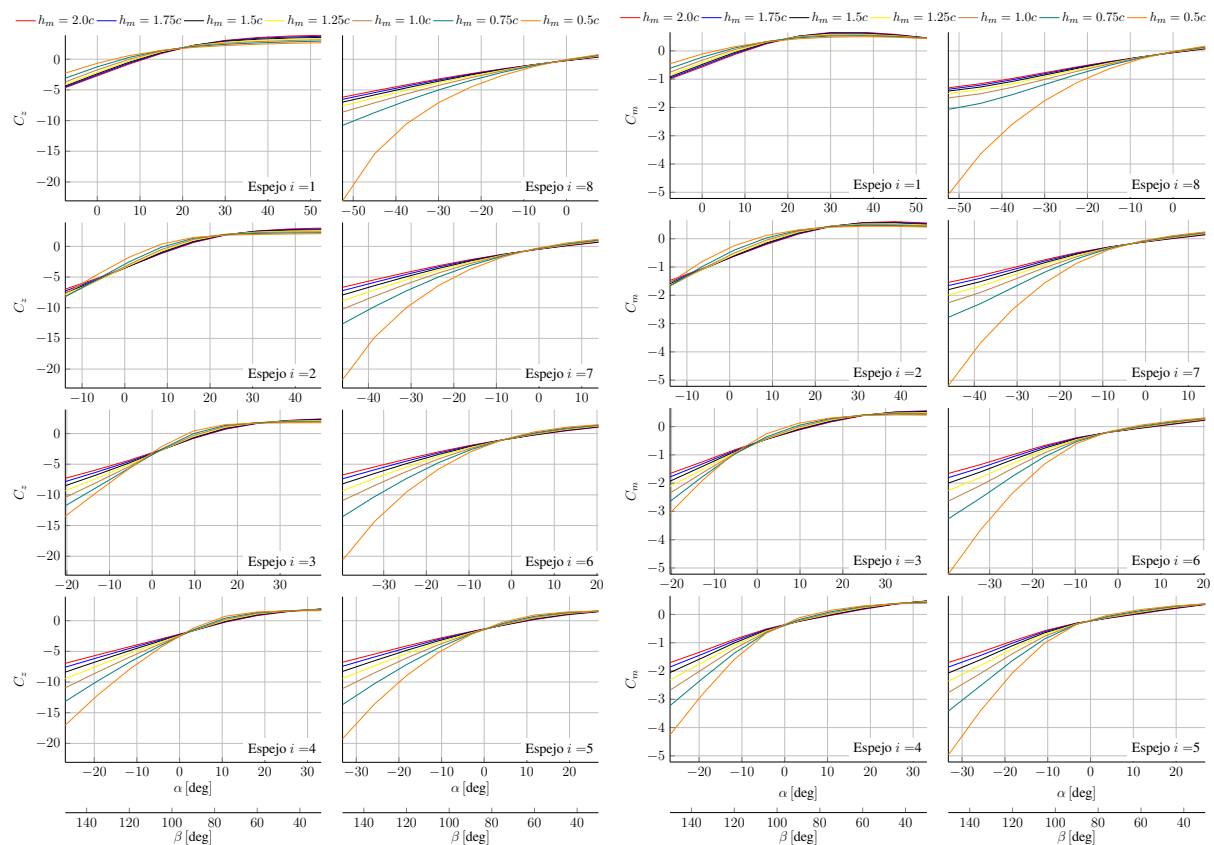


Figura 5: Coeficientes estacionarios de fuerza aerodinámica vertical C_z y de momento C_m alrededor del eje de rotación ($c/2$) para distintos ángulos de incidencia β de la radiación solar y distintas alturas h_m de los espejos.

5.2. Influencia de la separación de los espejos (variación de h)

Para estos casos se fija la altura del plano de los espejos en $h_m/c = 1,0$ y se hace variar la altura del absorbedor h . Los coeficientes estacionarios de fuerza vertical C_z y de momento C_m alrededor del eje de rotación de cada espejo se presentan en la Fig. 6.

Se observa que el mayor espaciamiento de los espejos (mayor h) corresponde a una marcada disminución de la magnitud de la carga vertical y del momento para ángulos de incidencia de la radiación solar mayores a 90° y a un débil aumento de la magnitud de los mismos para ángulos de incidencia de la radiación solar menores a 90° .

Como en el estudio anterior, se observa que el espejo 1 es el que mayor fuerza vertical positiva experimenta para $\beta < 90$, mientras que los espejos 4 y 5 son los que experimentan las mayores fuerzas verticales negativas para $\beta > 90$.

5.3. Aerodinámica No-Estacionaria

Para estas simulaciones se emplean discretizaciones de $N_m = 2^6 + 1$ vórtices en cada espejo y $N_g = 2^{10} + 1$ vórtices para el suelo. Se emplea un paso de cálculo de $\Delta t V_\infty / c = 2^{-6}$ y el tiempo total de simulación es $t_f V_\infty / c = 12$.

La evolución en el tiempo de los coeficientes de fuerza vertical C_z y de momento C_m alrededor del centro de rotación de cada espejo para distintos ángulos de incidencia β de la radiación solar se presentan en la Fig. 7. Se observa que la separación del plano de los espejos del suelo, h_m no tiene una influencia marcada en las cargas aerodinámicas, siendo esta más notoria cuan-

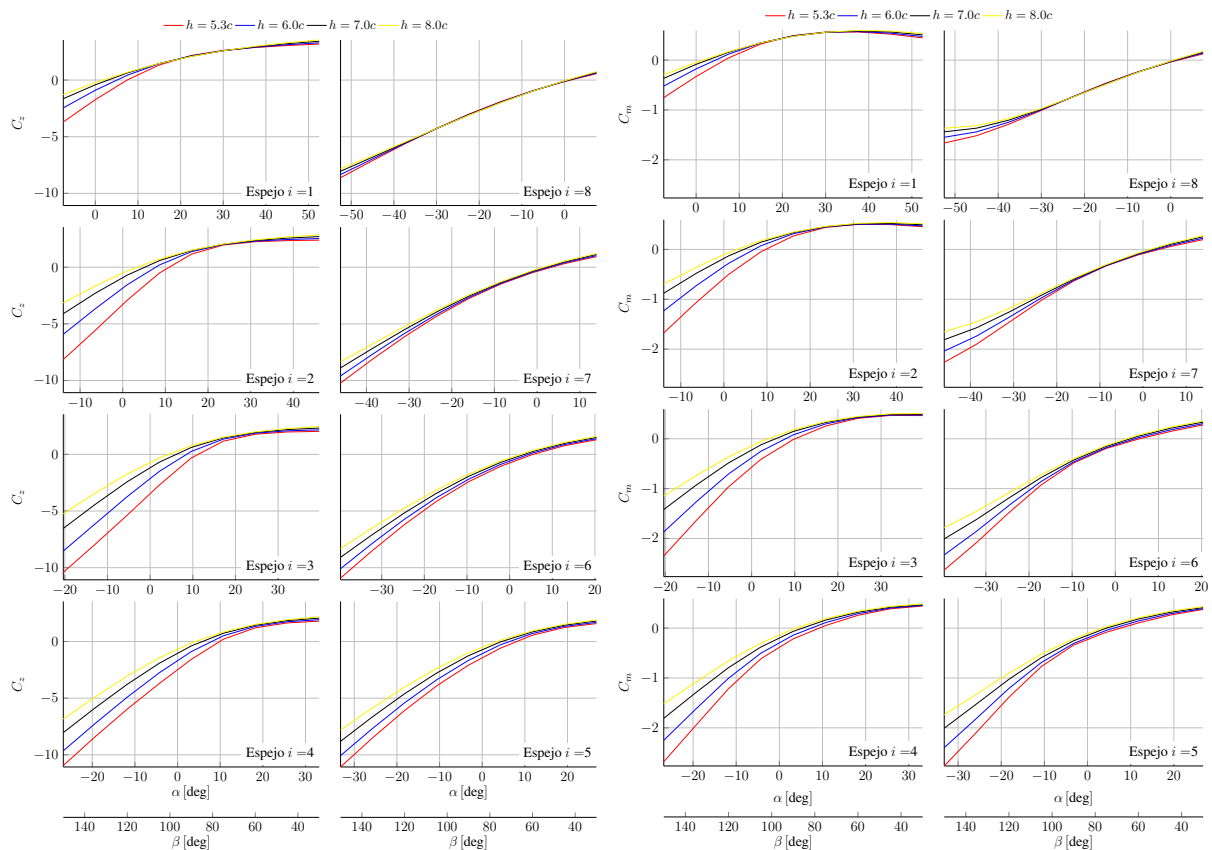


Figura 6: Coeficiente de fuerza aerodinámica vertical estacionaria C_z para distintos ángulos de incidencia β de la radiación solar y distintas alturas h del absorbedor.

do el ángulo de incidencia de la radiación solar es de 150° . Esto es consistente con lo concluido de los resultados estacionarios.

También se observa que para algunos espejos las cargas aerodinámicas alcanzan valores próximos a los estacionarios al final de la simulación ($t_f V_\infty / c = 12$) para los ángulos de incidencia de la radiación solar β de 30° y 90° , mientras que en general no lo hacen aun para $\beta = 150^\circ$. Además, salvo fluctuaciones locales, la magnitud de las cargas aerodinámicas instantáneas se mantiene por debajo de las cargas aerodinámicas estacionarias.

También se observan que las cargas aerodinámicas instantáneas presentan fluctuaciones, las cuales son más pronunciadas cuando el plano de los espejos está más cercano al suelo $h_m = 0,5c$ y cuando la radiación solar incide con el menor ángulo, $\beta = 30^\circ$. Estas fluctuaciones pueden atribuirse a la interacción de los espejos con las estelas, las cuales son a su vez afectadas por la cercanía del suelo.

Finalmente, se observa que el espejo 1, el cual enfrenta directamente al viento es el que mayores cargas aerodinámicas experimenta para $\beta = 30^\circ$ mientras que los espejos interiores 4 y 5 experimentan las mayores cargas aerodinámicas para $\beta = 150^\circ$.

La evolución de las estelas de los espejos para los ángulos de incidencia de la radiación solar $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 90^\circ$ se muestran en las Figs. 8, 9, respectivamente.

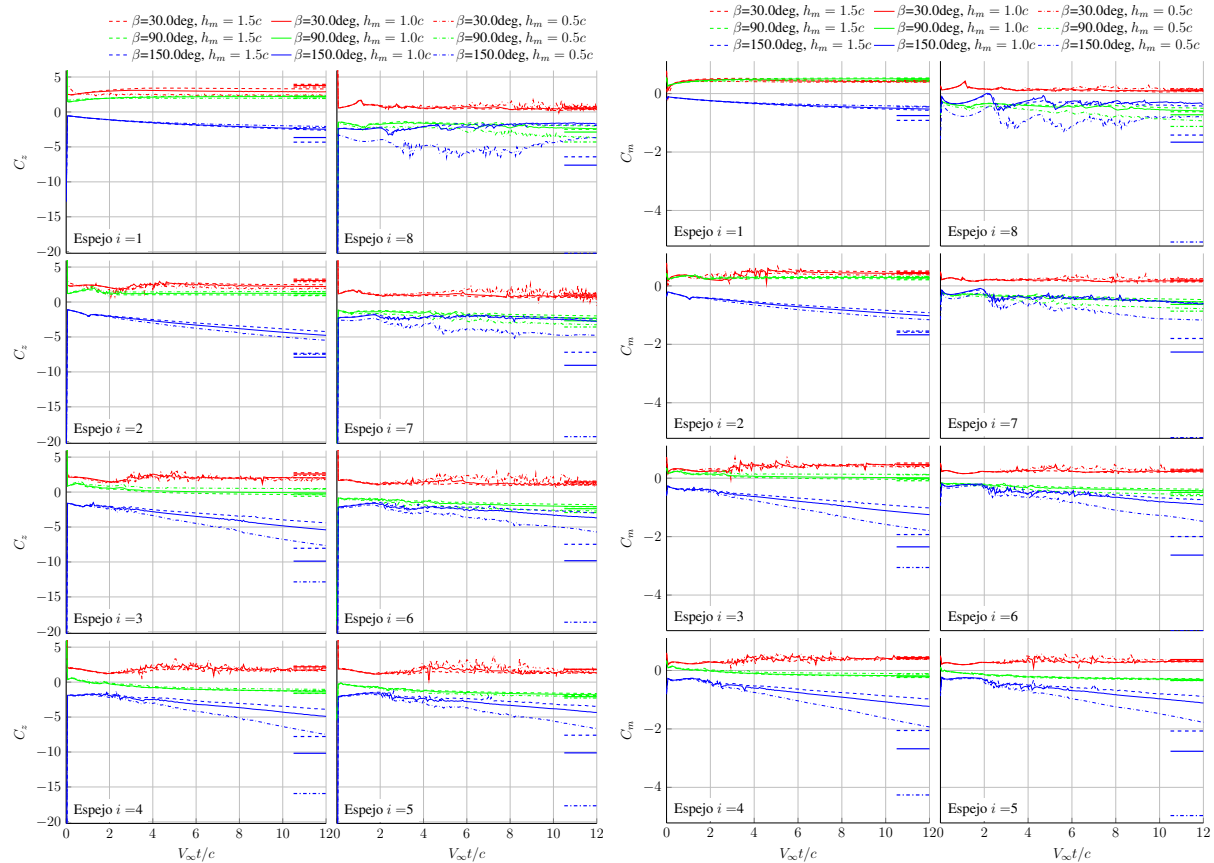


Figura 7: Evolución temporal de los coeficientes aerodinámicos de fuerza vertical C_z y de momento C_m alrededor del eje de rotación ($c/2$) para distintos ángulos de incidencia β de la radiación solar y distintas alturas del plano de los espejos. Las líneas horizontales a la derecha de cada figura corresponden a los valores estacionarios.

6. CONCLUSIONES

En el presente esfuerzo se realizó un estudio aerodinámico de un concentrador solar Fresnel Lineal prototípico sometido a un viento uniforme. Se estudió el efecto sobre las cargas aerodinámicas de la altura respecto al suelo del plano de los espejos y de la separación entre los mismos para distintos ángulos de incidencia de la radiación solar.

Se empleó para estos estudios, el método de red de vórtices inestacionario, el cual permite obtener valores aproximados de las cargas aerodinámicas sobre cada uno de los espejos y determinar el flujo alrededor de los mismos con un costo computacional reducido. Se verificó el correcto funcionamiento de la implementación computacional del método mediante el estudio de casos sencillos con solución analítica conocida.

Los resultados obtenidos para un concentrador solar Fresnel Lineal prototípico sugieren lo siguiente: *i*) con excepción de los dos primeros espejos (que enfrentan al viento) la disminución de la altura de los espejos produce un aumento de la magnitud de la carga aerodinámica vertical negativa (hacia abajo) y del momento alrededor del eje de rotación para ángulos de incidencia de la radiación solar mayores a 90° , los cuales corresponden a ángulos negativos de inclinación de los espejos con respecto al viento. La variación de la altura de los espejos tiene una influencia débil sobre las cargas aerodinámicas para ángulos de incidencia de la radiación solar menores a 90° , los cuales corresponden a ángulos positivos de inclinación de los espejos. *ii*) El aumento de la separación entre los espejos produce una disminución en la magnitud cargas aerodinámicas

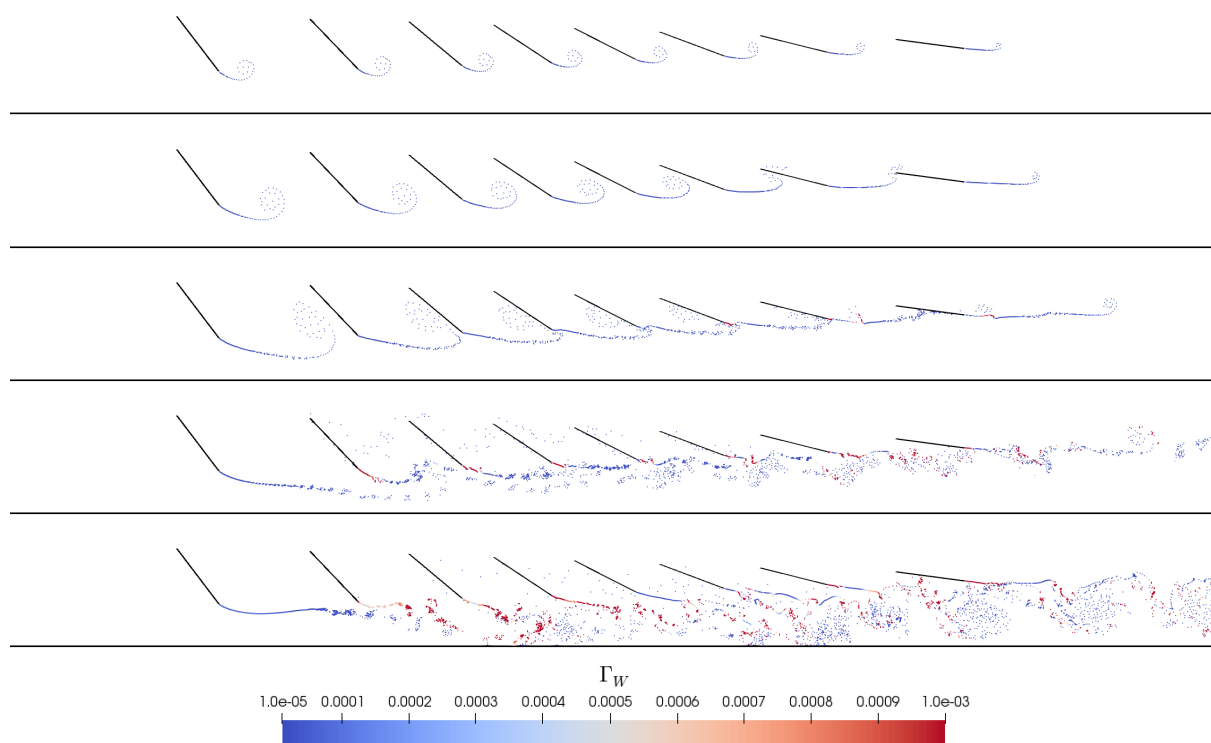


Figura 8: Evolución de las estelas generadas por los $n = 8$ espejos de un concentrador Fresnel Lineal con radiación solar incidente a $\beta = 30^\circ$. La dirección del viento es de izquierda a derecha. De arriba hacia abajo, los instantes de tiempo mostrados son $tV_\infty/c = 0,55, 1,09, 2,19, 4,39$, y $8,75$.

sobre los espejos para ángulos de incidencia de la radiación solar mayores a 90° y una disminución de la misma para ángulos de incidencia de la radiación solar menores a 90° . Sin embargo, para los ángulos de incidencia de la radiación menores a 90° , la influencia del espaciamiento entre los espejos es débil comparada con su influencia a ángulos de incidencia mayores a 90° .

Con respecto a las cargas aerodinámicas transitorias, se observó que a excepción de fluctuaciones locales, éstas son menores que los valores estacionarios. Ésto sugiere que para el diseño y dimensionamiento estático de los soportes de los espejos y del sistema de seguimiento resulta suficiente el empleo de las cargas aerodinámicas estacionarias. Sin embargo, la presencia de fluctuaciones en las cargas aerodinámicas producidas tanto por la interacción de los espejos con las estelas, como por fluctuaciones presentes en la corriente libre (efecto no estudiado en este trabajo) tienen importancia en el diseño dinámico del sistema. Para el estudio dinámico se requieren modelos de interacción fluido estructura, los cuales se implementarán en trabajos futuros. Desde ese punto de vista, este trabajo constituye un primer paso en el estudio del fenómeno de interacción fluido-estructura para estos sistemas de generación de energía solar.

REFERENCIAS

- Dellicompagni P., Hongn M., Saravia L., Altamirano M., Placco C., Gea M., Hoyos D., Bárcena H., Suligoy H., Fernández C., y Caso R. Concentrador solar térmico Fresnel lineal de San Carlos, Salta. primeros ensayos de operación y funcionamiento (172 m^2). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20:03.01–03.12, 2016.
- Garrick I.E. On some reciprocal relations in the theory of nonstationary flows. *Technical Report No. 629, N.A.C.A., 1938*, 1938.
- Jamel M., Rahman A.A., y Shamsuddin A. Advances in the integration of solar thermal energy

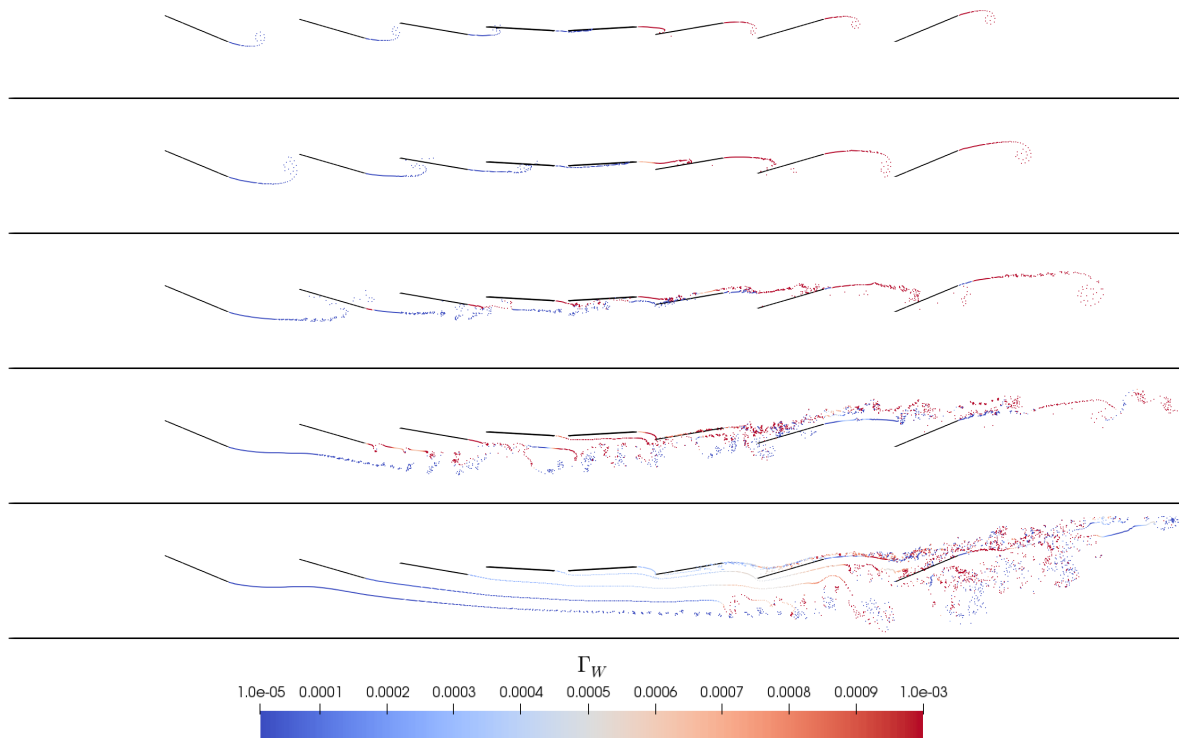


Figura 9: Evolución de las estelas generadas por los $n = 8$ espejos de un concentrador Fresnel Lineal con radiación solar incidente a $\beta = 90^\circ$. La dirección del viento es de izquierda a derecha. De arriba hacia abajo, los instantes de tiempo mostrados son $tV_\infty/c = 0,55, 1,09, 2,19, 4,39, \text{ y } 8,75$.

with conventional and non-conventional power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:71–81, 2013.

Katz J. y Plotkin A. *Low-speed aerodynamics*. Cambridge university press, 2001.

Lancereau Q., Rabut Q., Itskhokine D., y Benmarraze M. Wind loads on linear Fresnel reflectors' technology: a numerical study. *Energy Procedia*, 69:116–125, 2015.

Paetzold J., Cochard S., Fletcher D., y Vassallo A. Wind engineering analysis of parabolic trough collectors to optimise wind loads and heat loss. *Energy Procedia*, 69:168–177, 2015.

Peterka J. y Derickson R. Wind load design methods for ground based heliostats and parabolic dish collectors, sand 92–7009. *Sandia Nat. Lab., Albuquerque, New Mexico*, 1992.

Sun H., Gong B., y Yao Q. A review of wind loads on heliostats and trough collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:206–221, 2014.

Valdez M., Preidikman S., y Flores Larsen S. Análisis aerodinámico de perfiles con múltiples superficies para control y redirección de flujo. *Mecánica Computacional*, XXXV(26):1517–1539, 2017.

Valdez M.F., Preidikman S., y Flores Larsen S.E. Aerodinámica de perfiles con múltiples superficies de control de flujo. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Salta.*, 5(1):31, 2018.

Wagner H. Über die entstehung des dynamischen auftriebes von tragflügeln. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 5(1):17–35, 1925.