



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES AERODINÁMICOS SOBRE
UNA PLACA INCLINADA**

**Dña. LÓPEZ RODRÍGUEZ, Nerea
TUTOR: D. GONZÁLEZ PÉREZ, Jose
COTUTOR: D. SUÁREZ SIERRA, José Luis**

FECHA: Julio de 2019

ÍNDICE

1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. RESUMEN DE VALORES SEGÚN EL EUROCÓDIGO 1	6
2.2. RESUMEN DE VALORES SEGÚN EL CÓDIGO ASCE 7	8
2.3. APLICACIÓN DE NORMATIVAS	9
2.4. CONCLUSIONES	9
3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	10
3.1. CONCLUSIONES	18
4. BANCOS DE ENSAYO AERODINÁMICO UTILIZADOS	19
4.1. TÚNEL DE VIENTO A)	19
4.2. TÚNEL DE VIENTO B)	24
4.3. CONCLUSIONES	28
5. ELECCIÓN DEL MODELO A ENSAYAR	29
5.1. PRIMER MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES.....	30
5.2. SEGUNDO MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES.....	31
5.3. TERCER MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES.....	33
5.4. CONCLUSIONES	35
6. ENSAYOS INICIALES. DIFICULTADES OBSERVADAS.....	36
6.1. TÚNEL A): ÁREA DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN	36
6.1.1. Resultados obtenidos. Modelo 1).....	36
6.2. TÚNEL B): ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS.....	40
6.2.1. Resultados obtenidos. Modelo 2).....	41
6.2.2. Resultados obtenidos. Modelo 3).....	54
6.3. CONCLUSIONES	63
7. ENSAYOS FINALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
7.1. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA AL SUELO	66
7.2. INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA PLACA.....	70
7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
7.4. CONCLUSIONES	75
8. CONCLUSIONES.....	76
8.1. TRABAJOS FUTUROS.....	79
9. BIBLIOGRAFÍA	80
LISTADO DE SÍMBOLOS	83
LISTADO DE FIGURAS	86
LISTADO DE TABLAS	90

1. OBJETIVOS

En este Trabajo Fin de Máster (TFM), se plantea el estudio experimental de las fuerzas del viento sobre una placa inclinada. Una superficie de este tipo y la estructura asociada constituyen la geometría básica de los paneles fotovoltaicos (PV). El interés del tema radica en la gran importancia que tienen dichas fuerzas sobre los paneles solares, puesto que el viento tiene dos tipos de impacto diferentes sobre los mismos. Por un lado, tiene un efecto positivo, ya que incrementa la refrigeración del panel, ayudando a reducir su temperatura. Por el contrario, cuenta con un efecto negativo importante, puesto que la fuerza ejercida sobre el panel puede derivar en un importante daño estructural.

De este modo, la necesidad de competir en un mercado globalizado, lleva a las empresas del sector a tratar de conseguir estructuras soporte lo más baratas posibles, pero que soporten correctamente las cargas aerodinámicas del viento. El abaratamiento de las mismas se conseguiría por medio de la estandarización y el diseño sencillo e industrializable. En este sentido, en la actualidad, existe una escasez de disposiciones sobre la carga de viento en las normas y códigos de construcción para diseñar estas estructuras, así como, discrepancias entre los valores de unas y otras normativas. En estas normativas, tales como, el Eurocódigo, el American Society of Civil Engineers (ASCE)-7, u otras, sólo se recogen los coeficientes aerodinámicos en marquesinas a una o dos aguas, operando del lado de la seguridad, y requiriendo una interpretación y adaptación para su uso en el ámbito de las estructuras fotovoltaicas.

En relación con las posibles normas a aplicar y con el fin de caracterizar una placa genérica, se plantea como objetivo principal de este trabajo la obtención de los coeficientes aerodinámicos en instalaciones de paneles fotovoltaicos. Además, se plantean una serie de objetivos parciales a fin de conseguir la mencionada obtención de los coeficientes aerodinámicos en instalaciones fotovoltaicas. Dichos objetivos parciales, se enumeran a continuación:

- Puesta a punto de los bancos de ensayos:
Como se verá en posteriores capítulos, se estudia la conveniencia y adaptación de las características de dos bancos de ensayos diferentes al objetivo principal del trabajo. Por un lado, se estudia un túnel de viento en circuito cerrado, situado en el edificio de Servicios Científico-Técnicos del Campus Universitario de Viesques (Gijón) (Túnel A)). Por otro lado, se estudia también otro túnel de viento en circuito abierto, situado en el edificio Departamental Este (Edificio de Energía) del Campus Universitario de Viesques (Gijón) (Túnel B)).
- Realización de campañas de medidas:
Se plantean distintas campañas de medidas experimentales con diferentes objetivos. En primer lugar, en julio de 2018, se estudia la conveniencia del túnel A) empleando el denominado en capítulos posteriores como primer modelo a ensayar, estudiándose también para el túnel B) en el mes de octubre de 2018, ya con el denominado segundo modelo a ensayar. Por otro lado, y con el objetivo de determinar un modelo óptimo de ensayo, se plantea una campaña adicional de medidas experimentales en diciembre de 2018, con el denominado tercer modelo. Por último, en febrero de 2019, se plantea la campaña de ensayos finales en el banco de ensayos elegido, así como, con el modelo óptimo.

- Obtención de los coeficientes aerodinámicos, es decir, coeficiente de arrastre (C_D) y coeficiente de sustentación (C_L), para cada uno de los ensayos realizados:
Además de la obtención de dichos coeficientes aerodinámicos como objetivo principal del trabajo, se plantea también su obtención para cada uno de los ensayos realizados como objetivos parciales. De este modo, por cada campaña de medida expuesta anteriormente, se estudian estos coeficientes, facilitando así, tanto la elección del banco de ensayos a utilizar en la campaña final, como el modelo óptimo del trabajo.

- Obtención de conclusiones relevantes:
Otro de los objetivos parciales del trabajo, ligado especialmente al objetivo principal, se trata de la obtención de conclusiones relevantes. En este sentido, tras la obtención de los coeficientes aerodinámicos para el modelo ensayado, se busca la obtención de conclusiones aplicadas a dichos coeficientes en instalaciones de paneles fotovoltaicos reales.

- Redacción de informes:
Puesto que, como se explicará en posteriores capítulos, este trabajo surge como propuesta para la convocatoria de ayudas para la iniciación a la investigación, en el Instituto Universitario de Tecnología Industria (IUTA), se plantea como objetivos parciales la redacción de informes tanto para este trabajo presentado al IUTA, como para su presentación como Trabajo Fin de Máster (TFM).

2. INTRODUCCIÓN

La importancia de este aspecto se refleja en distintos ejemplos de desastres reales como, en marzo de 2018, en Valladolid, donde siete paneles solares de 30 metros cuadrados de superficie, fueron destrozados por la fuerza del viento, quedando como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Paneles solares doblados por la fuerza del viento en la finca de La Mudarra, Valladolid-2018 [1]

Por otro lado, en agosto de 2018, 700 paneles fueron dañados por un fuerte viento en un parque solar construido en Argentina, tal y como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Paneles solares volados por la fuerza del viento en un parque solar en Argentina, 2018 [2]

Además de estos desastres ocurridos recientemente, el efecto de fuertes vientos sobre los paneles solares, constituye un problema desde el inicio del empleo de esta fuente de energía. Existen numerosos precedentes de los efectos negativos de la fuerza del viento sobre estas estructuras, como, por ejemplo, la destrucción de una cubierta solar por un tornado en Alemania en mayo de 2015 (Figura 3), una planta solar en Japón en junio de ese mismo año (Figura 4) o, un parque solar en India en mayo de 2017 (Figura 5).



Figura 3. Cubierta solar destruida por un tornado en Alemania, 2015 [3]



Figura 4. Planta solar destruida en Japón, 2015 [4]



Figura 5. Parque solar destruido en India, 2017 [5]

Este trabajo surge como propuesta para la convocatoria de ayudas para la iniciación a la investigación, en el Instituto Universitario de Tecnología Industrial, financiadas por el Ayuntamiento de Gijón. Para ello, resulta interesante la obtención experimental de los coeficientes aerodinámicos (C_D y C_L) para instalaciones de paneles fotovoltaicos, tanto sobre suelo, como en cubiertas de edificios existentes. En el primero de los casos, los paneles se sitúan inclinados según criterios de eficiencia energética. Normalmente, la latitud, θ , donde se instalan, determina su ángulo de inclinación, $\alpha = \theta \pm 15^\circ$, para permitir al panel captar la máxima luz solar posible. Por otro lado, en el caso de los paneles situados en cubiertas de edificios, suelen

colocarse horizontalmente, debido a otras restricciones distintas de la generación de energía. Finalmente, en el presente trabajo, se planteará únicamente el estudio de las estructuras fotovoltaicas dispuestas sobre el suelo.

De este modo, la naturaleza de la fuerza inducida por el viento en la estructura, depende de su velocidad, dirección y condiciones de exposición del mismo, así como, de la forma de la estructura, induciendo una presión desigual en ambas superficies del panel. Dichas superficies, experimentan una fuerza de arrastre en la dirección del flujo del viento (F_D), así como, una fuerza de elevación, en la dirección perpendicular a dicho flujo (F_L). Estas fuerzas, se definen a partir de las siguientes expresiones:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (2)$$

Donde,

F_D y F_L son las fuerzas de arrastre y elevación, o sustentación, respectivamente, sobre la estructura soporte.

ρ es la densidad del aire, en distintas condiciones, dependiente de la temperatura.

V es la velocidad del viento.

A es el área total del modelo de panel.

C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y sustentación, respectivamente.

Por otro lado, puesto que, para conseguir la semejanza dinámica se requiere la igualdad del número de Reynolds tanto del modelo como del prototipo y, habitualmente, es imposible igualar éstos, ya que el túnel de viento alcanza velocidades máximas de alrededor de 20 m/s y se quiere escalar a velocidades mucho mayores, se podría correr el túnel de viento a diversas velocidades cercanas a la velocidad máxima, y luego extrapolar los resultados al número de Reynolds a tamaño real. Esta necesidad, se comprueba igualando los números de Reynolds tanto del modelo como del prototipo (3), suponiendo un prototipo de un tamaño hipotéticamente real de 1650 mm x 1000 mm, típico de los paneles solares. A continuación, se realiza esta comprobación, para el caso más favorable, de los modelos que se estudiarán en el presente trabajo.

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p} \quad (3)$$

Donde,

Re_m y Re_p son los números de Reynolds correspondientes al modelo y al prototipo, respectivamente.

ρ_m y ρ_p son las densidades correspondientes a los flujos en cada una de las situaciones de modelo y prototipo.

μ_m y μ_p son las viscosidades dinámicas de los fluidos en cada caso.

V_m y V_p son las velocidades del viento en cada situación.

L_m y L_p son las longitudes características tanto del modelo, como del prototipo, consideradas éstas como el ancho del panel, definido en capítulos posteriores.

Suponiendo que se quiera simular un flujo de $V_p=120$ km/h, es decir, 33,33 m/s, aproximadamente, sería necesaria una velocidad del viento para las pruebas de modelo, V_m :

$$V_m = V_p \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{L_p}{L_m} \right) = (33,33 \text{ m/s})(1)(1) \left(\frac{1650}{965} \right) = 56,99 \text{ m/s} \approx 57 \text{ m/s}$$

Se observa, por tanto, que sería necesario accionar el túnel de viento a una velocidad de 57 m/s, lo cual no sería posible con las disponibilidades actuales dado que las velocidades máximas de los túneles en los que se han ensayado los modelos, alcanzan velocidades de 20 m/s y 40 m/s respectivamente.

De esta forma, extrapolando resultados, aunque el coeficiente de arrastre, C_D , es una fuerte función del número de Reynolds a valores bajos de éste, los C_D con frecuencia se estabilizan para números de Reynolds mayores de cierto valor. De este modo, los coeficientes se vuelven independientes del número de Reynolds sobre algún valor umbral del mismo, usualmente cuando la capa límite y la estela son ambas totalmente turbulentas [6].

2.1. RESUMEN DE VALORES SEGÚN EL EUROCÓDIGO 1

Existen algunas normativas a través de las cuales se puede obtener una aproximación del efecto del viento sobre los paneles solares. En este caso, en este capítulo, se expone brevemente la metodología recogida en el Eurocódigo 1, en su parte 4: Acciones generales. Acciones del viento [7].

Esta normativa es de aplicación a casos de obras de edificación e ingeniería civil con alturas inferiores a los 200 m. En este sentido, para el caso de los paneles fotovoltaicos se contempla el caso de marquesinas a un agua como mejor aproximación, como se verá a continuación.

Según dicho Eurocódigo 1, Parte 1-4, la presión ejercida por el viento sobre las superficies estudiadas, w_e (N/m²), se obtiene a partir de la siguiente expresión (4):

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} \tag{4}$$

Donde,

$q_p(z_e)$ es la presión correspondiente a la velocidad de pico.

z_e es la altura de referencia para la presión anterior.

c_{pe} es el coeficiente de presión para dicha presión.

De esta forma, la presión correspondiente a la velocidad pico $q_p(z_e)$, se define, a su vez, según la expresión (5):

$$q_p(z_e) = q_b c_e(z) \tag{5}$$

Donde,

$c_e(z)$ es el factor de exposición.

q_b es la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento.

Esta presión básica del viento, se define a partir de la siguiente expresión (6):

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (6)$$

Donde,

ρ es la densidad del aire (1,225 kg/m³).

V_b es la velocidad básica del viento, dependiente de la localización según zonas.

Por otro lado, el coeficiente o factor de exposición se determina según gráfica incluida en el Eurocódigo, a partir de la altura de la estructura sobre el terreno y la categoría del mismo, tabulada en función de sus características y ubicación.

Por último, el cálculo del coeficiente de presión, introduce la aproximación de los paneles fotovoltaicos a marquesinas a un agua, definidas éstas como cubiertas de estructuras que no tienen muros permanentes, tales como estaciones de servicio o aparcamientos (Figura 6).

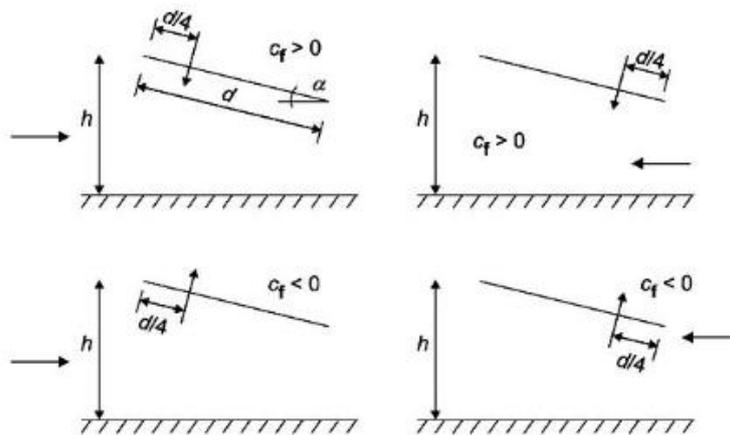


Figura 6. Definición de marquesina a un agua [7]

De este modo, los valores correspondientes al coeficiente de presión, se encuentran tabulados en función del ángulo de la cubierta, en este caso, la inclinación de la placa, así como, el coeficiente de bloqueo ϕ . Este coeficiente de bloqueo será 0 para marquesinas vacías, mientras que, su valor será 1, para el caso de marquesinas completamente bloqueadas.

Conocida esta presión de acción del viento sobre la estructura, la fuerza del viento, F_w en N, que actúa sobre dicha estructura, es decir, la carga de diseño de la misma, se obtiene a partir de la siguiente expresión (7):

$$F_w = c_s c_d \sum_{sup} w_e A_{ref} \quad (7)$$

Donde,

$c_s c_d$ es el factor estructural.

A_{ref} es el área de referencia para la estructura o elemento estructural.

2.2. RESUMEN DE VALORES SEGÚN EL CÓDIGO ASCE 7

Por otro lado, en este capítulo, se expone la metodología de cálculo de la presión del viento, al igual que en el caso del Eurocódigo, para el caso de la norma americana. Dicha norma, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [8], es emitida por la American Society of Civil Engineers.

Ésta es de aplicación a los edificios u otras estructuras con forma regular, es decir, aquellos que no cuentan con ningún tipo de irregularidad geométrica inusual, como podría ser, el caso de las estructuras soporte de paneles fotovoltaicos.

En cuanto al procedimiento de diseño de estas estructuras contemplado en la norma, éste pasa por el cálculo de la presión ejercida por la velocidad del viento que actúa sobre la estructura. Dicha presión, q_z (N/m²), evaluada a una altura z , se obtiene a partir de la siguiente expresión (8):

$$q_z = \frac{1}{2} \rho K_z K_{zt} K_d V_b^2 I \quad (8)$$

Donde,

K_z es el coeficiente de exposición de presión.

K_{zt} es el factor topográfico.

K_d es el factor de direccionalidad del viento.

I es el factor de importancia.

De esta forma, la velocidad básica del viento se obtiene, de nuevo, en función de la localización de la estructura a partir de un mapa de valores. Por otro lado, el factor de direccionalidad, K_d , se encuentra tabulado en función del tipo de estructura considerada. Además, éste debe ser considerado solo en aquellas situaciones en las que se tengan combinaciones de cargas (cargas muertas, cargas de nieve o hielo, cargas de terremoto, cargas de inundación, entre otras).

El factor de importancia, I , se encuentra también tabulado, en este caso, en función de la categoría del edificio o estructura, definidas éstas en un listado proporcionado en la norma. Del mismo modo, el factor de exposición, K_z , se encuentra tabulado en función de la altura de la estructura, así como, de la categoría de exposición, la cual depende de la rugosidad del terreno.

El factor topográfico, K_{zt} , se obtiene, por otro lado, a partir de la siguiente expresión (9):

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (9)$$

Siendo los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 , obtenidos de determinadas fórmulas expuestas en una tabla en función de la exposición de la estructura.

De esta forma, conocida la presión ejercida sobre la estructura por la acción del viento a una determinada velocidad dada por la ubicación de ésta, se determina la carga de diseño para el caso de edificios abiertos u otras estructuras, F en N, según la siguiente expresión (10):

$$F = q_z G C_f A_f \quad (10)$$

Donde,

G es el factor de efecto ráfaga.

C_f es el coeficiente de fuerza neta.

A_f es el área de la estructura, proyectada en la dirección de acción del viento.

2.3. APLICACIÓN DE NORMATIVAS

Tal y como se ha expuesto en los capítulos anteriores, 2.1 y 2.2 referentes a las distintas normativas vigentes en cuanto a las cargas de viento sobre estructuras, ambas proponen metodologías completamente diferentes.

Si, por ejemplo, se tiene una estructura soporte fotovoltaica en campo en Cádiz ($V_b=29$ m/s), con un ángulo de inclinación de 20° y una altura media de 2 m, por un lado, tanto el Eurocódigo como la normativa ASCE7, calculan la presión ejercida por la velocidad básica del viento, obteniendo 515 N/m².

Sin embargo, el Eurocódigo, añade a esta presión los coeficientes de exposición (1,4 para una estructura de 2 m y un terreno de categoría II), y de presión (1,7 para un ángulo de inclinación de 20°), elevando el valor de la presión de diseño a 1226 N/m². Por otro lado, la normativa ASCE7, a la presión inicial ejercida por el viento, incluye un coeficiente de exposición de 0,85 para una estructura de 2 m y tipo de exposición C, un factor topográfico de 1, un factor de direccionalidad de 0,85 para estructuras soporte de la principal carga de viento, así como, un factor de importancia de 1 para un terreno de categoría II, disminuyendo, al contrario que en el caso del Eurocódigo, la presión de diseño a 372 N/m².

2.4. CONCLUSIONES

En este capítulo y tras lo expuesto anteriormente, se concluye la gran importancia de las acciones del viento a la hora de diseñar estructuras fotovoltaicas al no estar perfectamente definidas sus cargas en las normativas vigentes.

Como se ha comentado, existen grandes discrepancias entre unas normativas y otras al estar pensadas para casos de construcción y edificación, en los que se opera del lado de la seguridad de las personas.

3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En el presente capítulo, se ha realizado un análisis bibliográfico sobre el valor de la fuerza ejercida por el viento sobre una placa inclinada, por el que, despejando de (1) y (2), se obtienen las ecuaciones (11) y (12) que se muestran a continuación.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{11}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{12}$$

De este modo, para el área A , se suele adoptar el valor del área total de la placa, que normalmente es rectangular y, por tanto, se adopta: $A = ab$, con a siendo el ancho de la placa o longitud en dirección perpendicular al flujo principal y b , el largo o longitud en la dirección del flujo principal, según la inclinación de la placa. El otro parámetro geométrico de relevancia en el problema es la altura h respecto a la horizontal del punto más bajo de la placa. A continuación, en la Figura 7, se muestra también el ángulo de inclinación de la placa (α).

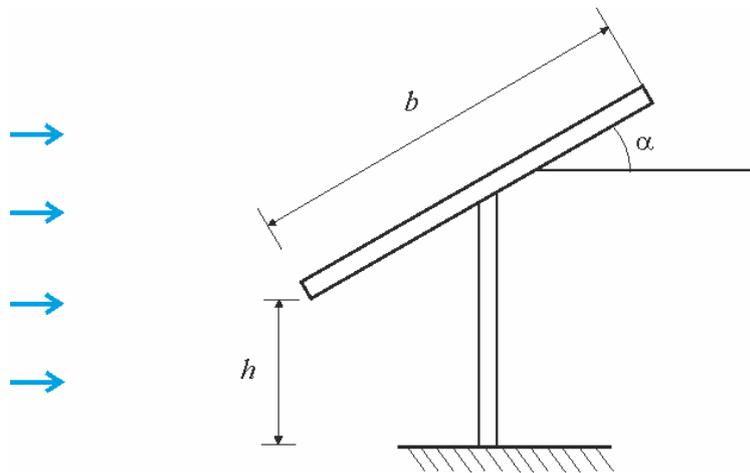


Figura 7. Geometría básica del flujo alrededor de una placa plana inclinada

Por otro lado, los valores que suelen adoptarse para F_D y F_L , son los correspondientes a los ejes “x” e “y” definidos en la Figura 8.

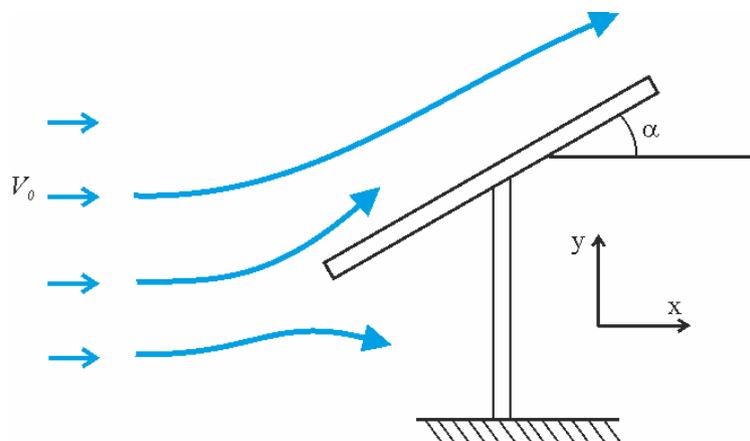


Figura 8. Ejes de referencia y velocidad de entrada para el problema de la placa plana

En estas condiciones, estudiada la forma general del flujo detrás de una placa infinita con un ángulo de inclinación elevado, según Fage et al. (1927) [9], en los laterales, se forman bandas de vorticidad que separan el flujo de la zona muerta en la parte trasera de la placa. A cierta distancia de la misma, dichas bandas, debido a su falta de estabilidad, se enrollan y forman las denominadas “calles de vórtices”.

Fage et al. estimaron, experimentalmente, las fuerzas para varios ángulos a partir de las medidas tomadas en la sección media, obteniendo valores para el coeficiente normal de fuerza, k_N , a partir de las áreas de los diagramas obtenidos al representar los coeficientes de presión ($\frac{p-p_0}{\rho V^2}$, donde p es la presión en cualquier punto, y p_0 en el aire sin perturbar) en función del largo de la placa.

Por otro lado, Kirchoff (1869) y Rayleigh (1876) obtuvieron la fórmula siguiente (13) para la resistencia por unidad de longitud de la placa.

$$\frac{F}{a} = \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} (\rho V^2 b) \tag{13}$$

Donde se incluye el coeficiente normal de fuerza como $\frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}$, de manera que, tanto este coeficiente obtenido de forma experimental por Fage et al., como su deducción analítica por parte de Kirchoff y Rayleigh, puede observarse a continuación en la Figura 9, en función del ángulo de inclinación de la placa.

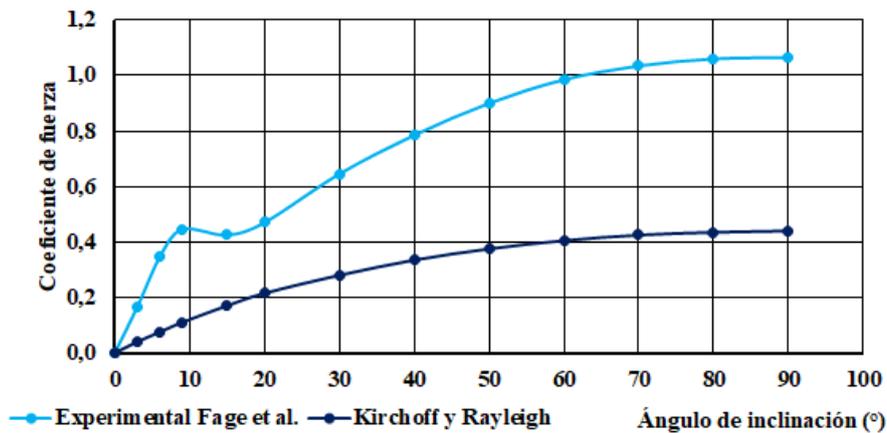


Figura 9. Coeficiente de fuerza en función del ángulo de inclinación. Comparativa experimental Fage et al. - analítica Kirchoff Y Rayleigh

En dicha figura se observa que la teoría subestima considerablemente el valor de k_N en todo el rango de incidencia. Esto es debido al hecho de que la velocidad máxima en el límite de la región de aire muerto detrás de la placa, es apreciablemente mayor que la velocidad asumida en la teoría. Además, en consecuencia, la presión media detrás de ésta es mucho más baja que la presión del aire sin perturbar.

Por otra parte, los coeficientes de arrastre y sustentación, C_D y C_L , pueden obtenerse directamente del coeficiente normal de fuerza k_N , resolviéndose en las direcciones longitudinal y normal de la dirección del viento no perturbado respectivamente. Las fuerzas tangenciales que actúan a lo largo de las superficies de la placa solo modificarían ligeramente los valores del coeficiente de arrastre en ángulos de incidencia muy bajos.

Para este coeficiente de arrastre, Kármán, ha dado una fórmula para definir la resistencia de una placa plana normal a la corriente, en términos de las dimensiones del sistema de vórtices detrás de la placa (14).

$$C_D = 0,281 \frac{a}{b} \left(2,83 \left(1 - \frac{V_3}{V_0} \right) - 1,12 \left(1 - \frac{V_3}{V_0} \right)^2 \right) \quad (14)$$

O la aproximación que se muestra a continuación (15):

$$C_D = 0,795 \frac{a}{b} \left(1 - \frac{V_3}{V_0} \right) \quad (15)$$

Donde V_3 es la velocidad de los vórtices aguas abajo y V_0 la velocidad del viento sin perturbar.

De esta forma, se proporciona una comparación entre los valores de arrastre medidos por Fage et al. y los obtenidos con las fórmulas de Kármán (Figura 10). Aunque la teoría se refiere a una placa vertical, se exponen cálculos adicionales para ángulos de inclinación menores de 90° , ya que el patrón de flujo a cierta distancia detrás de la placa inclinada, se asemeja al de una placa de longitud $b \sin \alpha$, en posición normal al viento.

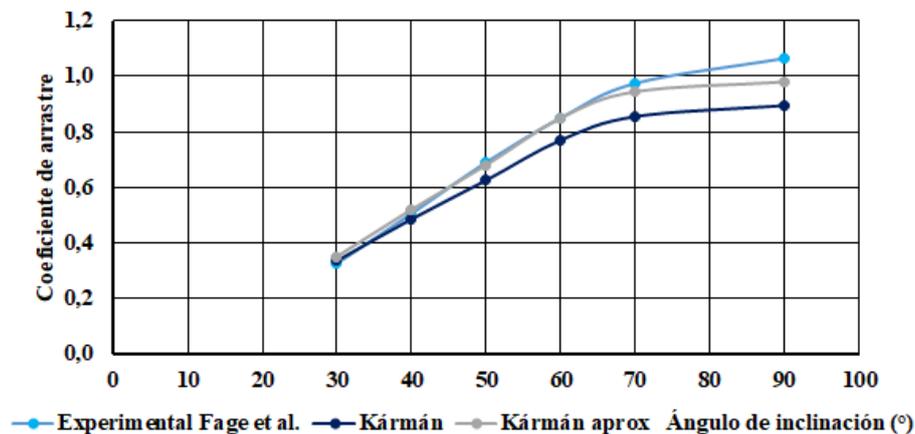


Figura 10. Coeficiente de arrastre en función del ángulo de inclinación. Comparativa experimental Fage et al. - analítica Kármán

Más recientemente, Blevins (1984) [10], sugiere la siguiente ecuación para el coeficiente de fuerza (16):

$$\begin{aligned}
 C_N &= 2\pi \sin \alpha && \text{para } 0^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ \\
 C_N &= 0,8 && \text{para } 8^\circ < \alpha < 12^\circ \\
 C_N &= \frac{1}{0,222 + 0,283 / \sin \alpha} && \text{para } \alpha \geq 12^\circ
 \end{aligned} \quad (16)$$

Donde, la fuerza se mide normal a la superficie, por lo que, las fuerzas o coeficientes de fuerzas en los ejes "x" e "y", es decir, coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente, serán (17):

$$\begin{aligned}
 C_D &= C_x = C_N \sin \alpha \\
 C_L &= C_y = C_N \cos \alpha
 \end{aligned} \quad (17)$$

Por otro lado, Blevins también desarrolla una tabla en la que expone los distintos valores del coeficiente de fuerza para distintos ángulos de inclinación de una placa plana delgada, así como, su relación de aspecto ($AR=a/b$).

De este modo, en las figuras Figura 11, Figura 12 y Figura 13, se muestra la comparativa entre los resultados obtenidos tanto a partir de la fórmula de Blevins, como de su tabla, en función de las distintas relaciones de aspecto, tanto para el coeficiente de fuerza, como para los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente.

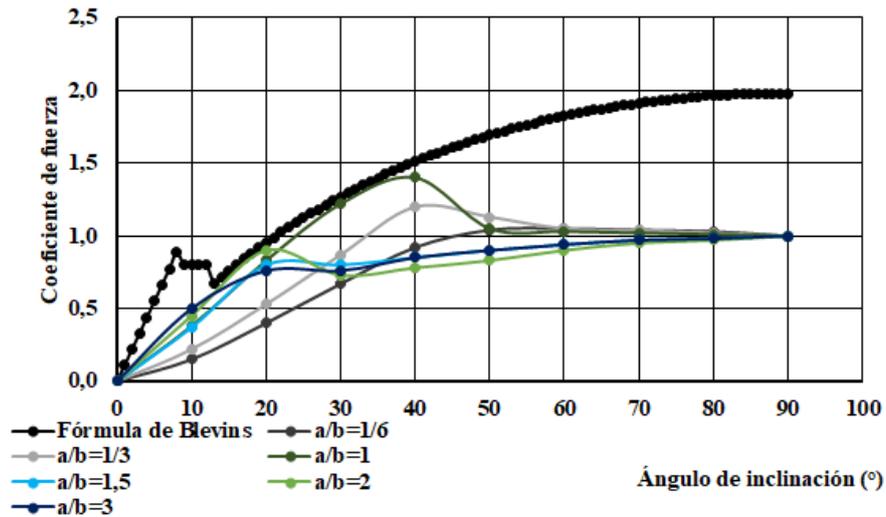


Figura 11. Coeficiente de fuerza en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins

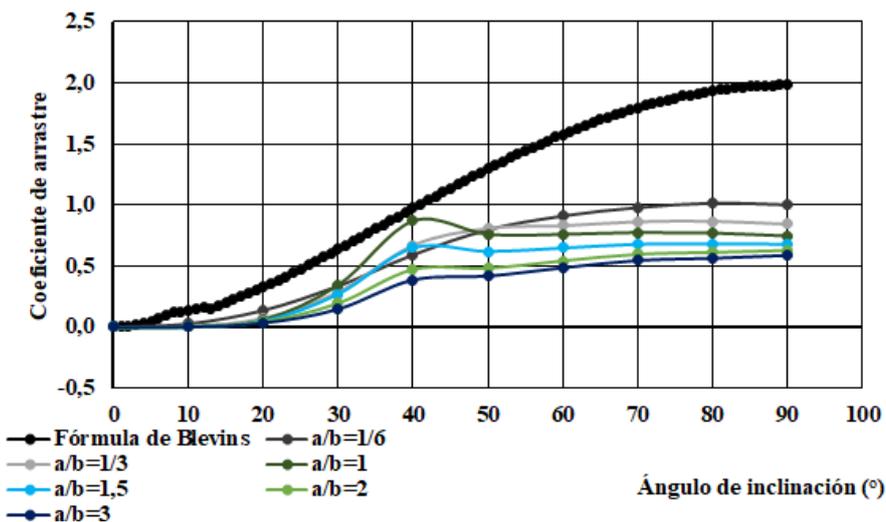


Figura 12. Coeficiente de arrastre en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins

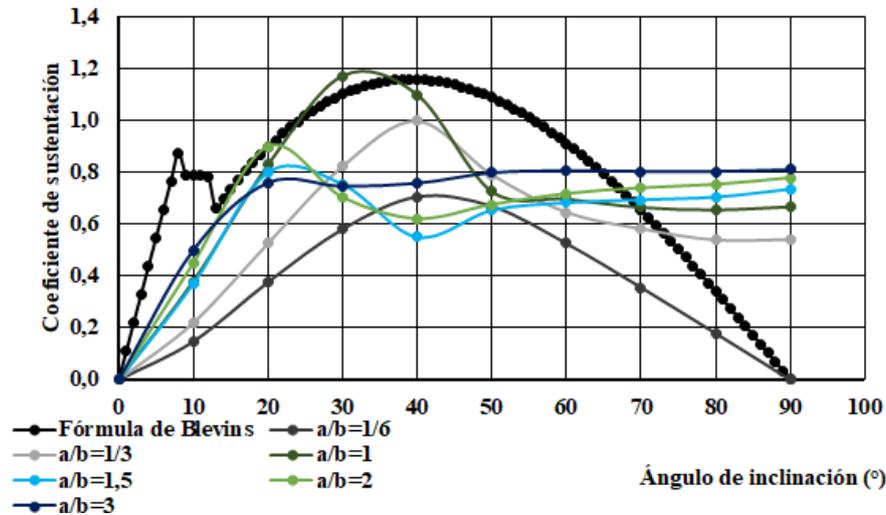


Figura 13. Coeficiente de sustentación en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins

En este sentido, Ortiz et al. (2015) [11], realizaron una serie de pruebas en el túnel de viento, para mejorar el conocimiento de las cargas de viento en estructuras fotovoltaicas montadas en techos planos. Se montaron placas planas finas de relaciones de aspecto entre 0,4 y 9,0, en un sensor de momento y fuerza sensible de tres componentes instantáneos, al igual que se realizará en este trabajo, variando, los números de Reynolds de $6 \cdot 10^4$ a $2 \cdot 10^5$ y, realizando las mediciones para ángulos de ataque entre 0° y 90° .

En este estudio, Ortiz et al., comparan el coeficiente de arrastre con la ecuación dada por la organización de asesoría ingeniera con sede en el Reino Unido, ESDU 70015 [12] (18).

$$C_D = 1,11 + 0,02 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \tag{18}$$

Esta ecuación expresa el hecho de que, en ausencia de efectos de Reynolds, el arrastre en una placa normal de relación de aspecto (AR) a/b , es el mismo que en una placa complementaria de $AR=b/a$. Para Ortiz et al, el C_D medido experimentalmente, concuerda razonablemente con el resultado de dicha ecuación.

Torres y Muller (2004) [13], miden directamente las fuerzas que actúan en placas planas rectangulares de relaciones de aspecto entre 0,5 y 2,0 y ángulos de inclinación menores de 50° . En su estudio se obtienen las siguientes ecuaciones para el coeficiente de arrastre (19) y el coeficiente de sustentación (20).

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2 \tag{19}$$

$$C_L = \sin \alpha \cos \alpha (K_p \cos \alpha + \pi \sin \alpha) \tag{20}$$

Donde,

C_{D0} es el arrastre para un ángulo cero, debido a la viscosidad.

K y K_p son constantes dadas por Torres y Muller, así como, α_m , es decir, el mayor ángulo para el cual las ecuaciones anteriores son válidas.

A medida que el ángulo de inclinación α aumenta, la presión se vuelve dominante de modo que se tiene la siguiente ecuación (21), dejando de ser válidas (19) y (20).

$$\frac{C_D}{C_L} = \tan \alpha \quad (21)$$

Para Torres y Muller el ángulo α_m va desde 35° a 13° para relaciones de aspecto de entre 0,5 y 2,0. Mientras que, en este sentido, el clásico estudio de Fage et al. [9], ofrece un ángulo crítico de 9° para una relación de aspecto infinita, siendo éste el que proporciona el valor máximo del coeficiente de fuerza normal para una placa plana bidimensional.

A continuación, en la Figura 14, se muestra la comparativa, correspondiente tanto al coeficiente de arrastre, como al de sustentación, entre los valores obtenidos por Ortiz et al. y Torres y Muller, para una relación de aspecto de $AR=1,66$.

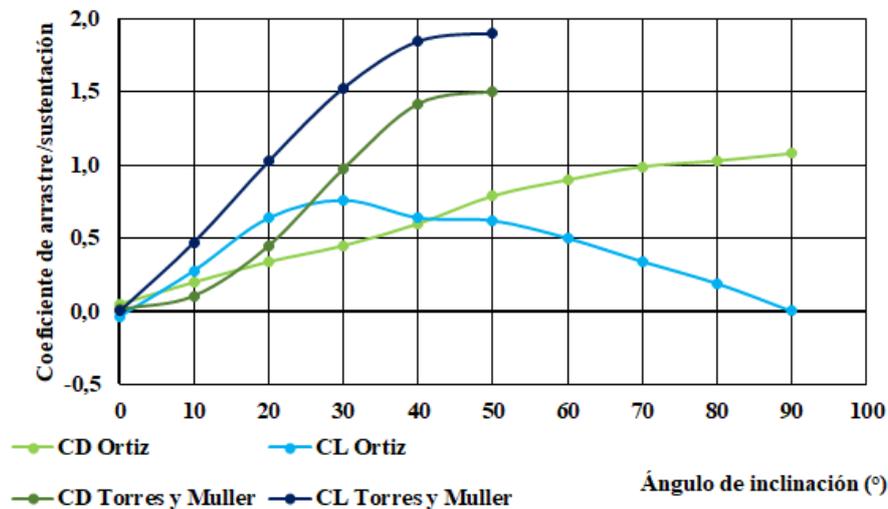


Figura 14. Coeficiente de sustentación en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa Ortiz/Torres y Muller

Ortiz et al., también presentan estos coeficientes para una zona más próxima al suelo del túnel, concluyendo que para el arrastre, éste se ve reducido en todos los casos, mientras que, para el caso de las sustentación, su comportamiento es más complejo.

Como conclusión destacable, Ortiz et al., obtuvieron que la relación de arrastre y elevación sigue de cerca la tangente del ángulo de incidencia para prácticamente todas las mediciones. Esto implica que las fuerzas de interés se deben en gran parte a la distribución instantánea de la presión alrededor de la placa, y no están significativamente influenciadas por las tensiones de corte.

Por otro lado, Fail et al. (1959) [14], y Winner (1936) [15], investigaron relaciones de aspecto de entre 0,5 y 33. Sin embargo, limitaron la mayoría de sus mediciones a ángulos de inclinación de las placas menores de 60° . Holmes et al. (2006) [16], determinaron las correlaciones para la fuerza normal y el centro de presión de placas planas cuadradas ($AR=1,0$) en un amplio rango de ángulos de inclinación. Gould (1970) [17], utilizó también placas normales con $AR=1$, de diferentes tamaños para investigar las correcciones de bloqueo. Su corrección de bloqueo da el coeficiente de arrastre corregido como se muestra en la expresión (22).

$$\frac{C_D}{C_{Dc}} = 1,00 + 2,81C_D B + 0,96(C_D B)^2 \quad (22)$$

En cuanto a los estudios para el caso de paneles montados sobre cubiertas de edificios, éstos se centran en paneles aislados o filas de paneles, pero no en matrices de éstos, como ocurre con varios estudios para determinar las cargas de viento en matrices de paneles montados sobre el suelo. Mientras que, como se ha visto, Ortiz et al. realizaron una serie de pruebas en el túnel de viento, para mejorar el conocimiento de las cargas de viento en estructuras fotovoltaicas sobre cubiertas, Kopp et al. (2012) [18], diseñaron un modelo de 12 filas de paneles, con 12 módulos en cada fila, siendo la longitud de cada fila de 12 paneles de 20 metros a escala 1:30, colocando los paneles sin espacio entre ellos. Esta geometría varía en inclinación y separación entre filas con el fin de poder optimizar el uso de la cubierta y minimizar las zonas de sombra. En este estudio, utilizaron dos modelos, con ángulos de inclinación de 2° y 20°. De este modo, puesto que uno de los objetivos de Kopp et al. consistieron en la determinación de los efectos del edificio sobre las matrices de paneles, el modelo lo ensayaron también en el suelo.

El terreno fue simulado de acuerdo al NIST Aerodynamic Database for Low-Rise Buildings, una base de datos aerodinámicos de pruebas en túneles de viento para facilitar la investigación del diseño estructural resistente al viento.

En este sentido, Kopp et al., hallaron diferencias en los coeficientes de presión medios en función de la relación de aspecto para paneles en cubiertas y sobre el suelo, para un ángulo de inclinación ensayado de 20°, como se muestra en la Figura 15, donde se observan unos coeficientes superiores para el caso de las estructuras montadas sobre el terreno.

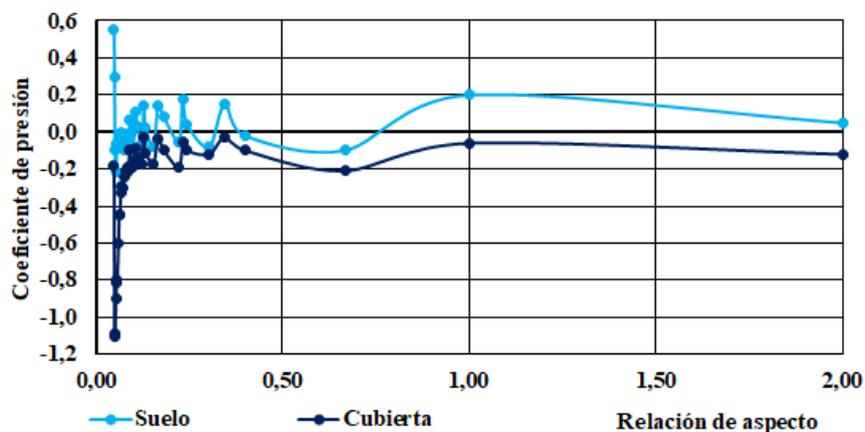


Figura 15. Coeficiente de presión para paneles fotovoltaicos montados sobre suelo y sobre cubierta, en función de la relación de aspecto, para un ángulo de inclinación de 40°

De este modo, para el caso del estudio de paneles fotovoltaicos montados sobre el suelo, la reproducción de estos modelos implica la obtención de escalas muy reducidas, lo que conlleva al menos dos inconvenientes técnicos. Por un lado, la resolución de los datos de presión en estos modelos tan pequeños se vuelve demasiado baja. Por otro lado, el modelo se encontrará situado en una parte de la capa límite que puede no ser representativa de la realidad.

Tielman et al. (1997) [19], compararon las mediciones de presión del túnel de viento con datos experimentales a gran escala para un edificio de poca altura. Los resultados mostraron que los coeficientes de presión en un edificio experimental a gran escala se representan mejor mediante una simulación de túnel de viento que reproduce intensidades de turbulencia y contenido de turbulencia a pequeña escala en el flujo incidente. Sin embargo, el escalamiento exacto de la escala de longitud integral de turbulencia en un experimento de túnel de viento no parece ser esencial para la predicción de cargas de viento en edificios de baja altura.

De esta forma, es probable que la implicación para edificios de gran altura sea más significativa que para edificios de baja altura (Hoxey et al., 1998 [20]). Cheung et al. (1997) [21], realizaron mediciones de presión en el túnel de viento en un modelo a escala 1:10 del edificio Texas Tech, mostrando los resultados que los valores medios y cuadrados de la raíz de los coeficientes de presión están en excelente acuerdo con los valores a escala completa correspondientes, pudiendo atribuirse esto al aumento del número de Reynolds.

Por otro lado, Mousaad et al. (2013) [22], investigaron la sensibilidad de los datos de presión aerodinámica respecto a los efectos de escala, ensayando paneles solares aislados y montados en el suelo. De este modo, concluyeron que la presión de la superficie media no se ve afectada significativamente por la intensidad de la turbulencia. Sin embargo, los paneles solares de tamaño muy pequeño pueden tener diferentes cargas medias, ya que están ubicados muy cerca del suelo (“efecto suelo” e incertidumbre en la velocidad del viento) y, por lo tanto, la incertidumbre en los datos aerodinámicos es relativamente alta. Al mismo tiempo, advierten, los modelos muy grandes deben usarse con precaución para evitar problemas de bloqueo significativos. Sin embargo, a diferencia de los coeficientes de carga media, la desviación estándar, así como, los coeficientes de carga máxima, varían según el tamaño del modelo. Para el rango de escala considerado por Mousaad et al., los modelos grandes (1:5 y 1:10) no cumplieron la ley de semejanza totalmente. Los resultados para las escalas moderadas fueron consistentes y no mostraron variaciones significativas. Por último, la escala 1:50 sufrió los problemas del modelo a pequeña escala cerca del suelo.

En este sentido, una de las consideraciones más importantes para las mediciones de carga en un túnel de viento es la sensibilidad de los coeficientes de carga con el número de Reynolds. El desajuste entre el número de Reynolds simulado en el túnel de viento y el real, es de particular interés para las estructuras de forma aerodinámica, así como, curvadas, porque los coeficientes de carga pueden ser altamente dependientes del mencionado número de Reynolds.

Hosoya et al.(2008) [23], realizaron una serie de pruebas en colectores solares parabólicos para probar la sensibilidad de los coeficientes de carga de viento a los números de Reynolds. A continuación, se muestran, en la Figura 16, los coeficientes de carga media obtenidos con un ángulo de inclinación de 60° con diferentes números de Reynolds.

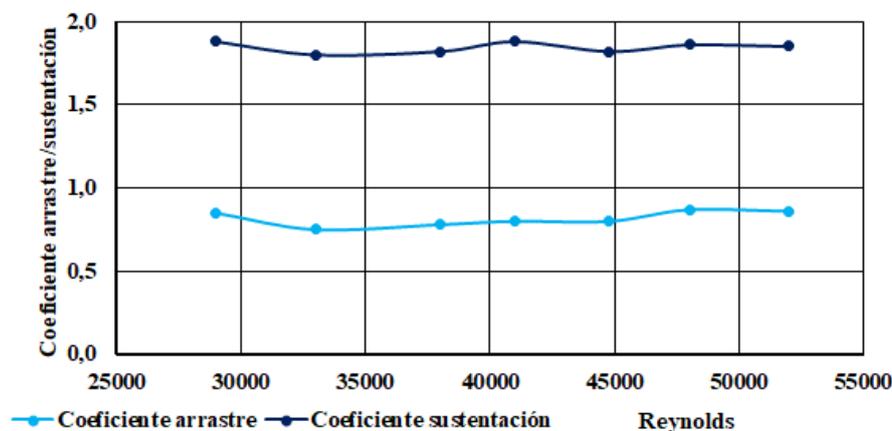


Figura 16. Coeficientes de arrastre y sustentación en función del número de Reynolds para colectores solares parabólicos

Como se muestra en la figura anterior (Figura 16), los coeficientes de carga son casi invariantes respecto del número de Reynolds, para el rango ensayado por Hosoya et al.

3.1. CONCLUSIONES

En este capítulo se concluye la gran cantidad de autores y artículos de investigación existentes en lo referente al tema que se trata en este trabajo, las cargas de viento sobre una placa inclinada en general, así como, una placa fotovoltaica en particular.

Muchos de ellos, estudiaron la influencia del ángulo de inclinación de la placa sobre los coeficientes de fuerza, arrastre o sustentación, tanto numérica como experimentalmente. Sin embargo, otros muchos, investigaron también otra serie de factores de influencia como la relación de aspecto, la situación de la placa (sobre suelo o sobre cubierta) o el número de Reynolds, sobre estos mismos coeficientes.

En este sentido, y a pesar de la gran cantidad de estudios existentes en torno a esta temática, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, sigue sin existir una normativa estandarizada que resuelva estas cargas de diseño.

4. BANCOS DE ENSAYO AERODINÁMICO UTILIZADOS

En este capítulo se tratan los distintos bancos de ensayo aerodinámico utilizados, conocidos como túneles de viento, los cuales se tratan de una herramienta empleada en investigación para el estudio de fenómenos fluidodinámicos bajo condiciones conocidas y controladas. De este modo, contribuyen al estudio de los efectos del aire alrededor de objetos sólidos, simulando las condiciones que experimentarán en situaciones reales. Así, el funcionamiento de estos bancos consiste en la generación de un flujo de aire continuo y regulable.

A fin de estudiar el comportamiento de un determinado modelo de estructura soporte de un panel fotovoltaico frente a diferentes cargas de viento, se realizaron ensayos en dos túneles de viento diferentes.

En primer lugar, se realizaron los primeros ensayos en el túnel de viento en circuito cerrado, del Área de Construcción e Ingeniería de Fabricación, situado en el edificio de Servicios Científico-Técnicos del Campus de Viesques (Gijón), el cual pasará a denominarse en adelante, como túnel A).

Por otro lado, se realizaron otros ensayos con otros modelos diferentes en un túnel de viento longitudinal, situado en el edificio Departamental Este (Edificio de Energía) del Campus Universitario de Viesques (Gijón), pasando éste a denominarse como túnel B) en adelante.

4.1. TÚNEL DE VIENTO A)

Este banco se trata de un túnel de viento de impulsión, en circuito cerrado, con sección de prueba de dimensiones $1 \times 1 \text{ m}^2$. La velocidad en este túnel, puede variarse entre 0 y 20 m/s, es decir, cuenta con una velocidad máxima de 70 km/h aproximadamente.

A continuación, se puede observar, en la Figura 17, un esquema del túnel de viento, donde se destaca la sección de prueba y sus dimensiones de $1 \times 1 \text{ m}^2$.

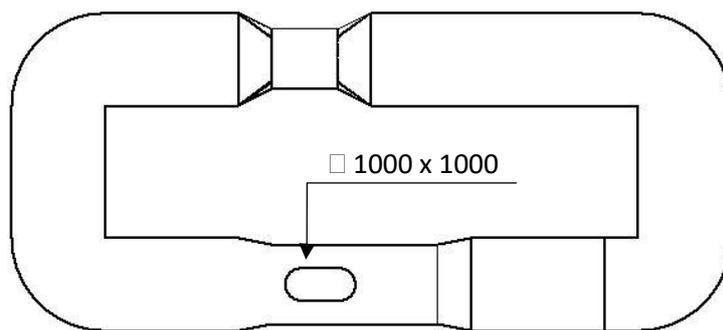


Figura 17. Esquema túnel cerrado, dimensiones en mm

A continuación, se muestran fotografías del túnel en la Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21. En estas figuras se muestra la sección de prueba del banco de ensayos (Figura 18 y Figura 21), así como, el circuito cerrado que lo compone (Figura 19 y Figura 20).



Figura 18. Vista frontal izquierda (túnel A)



Figura 19. Vista frontal derecha (túnel A)



Figura 20. Vista posterior (túnel A)



Figura 21. Vista detalle sección de prueba (túnel A)

Por otro lado, en cuanto al equipo de medida utilizado, se emplean tanto un variador de velocidad para el accionamiento del túnel, como un manómetro y anemómetro y un sensor de fuerza y par con su correspondiente módulo de adquisición de datos, para el registro tanto de la velocidad, como de las fuerzas que actúan sobre el modelo, respectivamente. A continuación, en la Figura 22, se muestra un diagrama representativo de la cadena de medida con cada uno de los equipos utilizados, de donde se obtiene un archivo de formato d7d con las fuerzas y pares medidos por el sensor, que se procesan en un Excel. De esta forma, como se observa en dicha figura, el proceso de obtención de datos comienza con el accionamiento del variador de velocidad que pone en funcionamiento el banco de ensayos. Una vez accionado, el anemómetro registra la velocidad real del viento existente en la sección de prueba. Por otro lado, el sensor de fuerza y par multiaxial conectado al modelo de placa inclinada registra tanto las fuerzas como los pares ejercidos por el viento sobre la placa en sus tres componentes simultáneamente. Este sensor, conectado al módulo de adquisición de datos por USB, transmite los datos medidos a un PC en el que se registran y analizan éstos, a través del software de adquisición DEWESOFT. Dicho software genera los, mencionados anteriormente, archivos d7d, de los cuales es posible exportar los datos recogidos en un formato más manejable como es un archivo Microsoft Excel. Además, se detallan algunas características correspondientes a cada uno de estos equipos, los cuales, se resumen a continuación en la Tabla 1.

Instrumento
Variador de velocidad
Manómetro y anemómetro
Sensor de fuerza y par
Módulo de adquisición de datos

Tabla 1. Resumen de instrumentos utilizados en el túnel A)

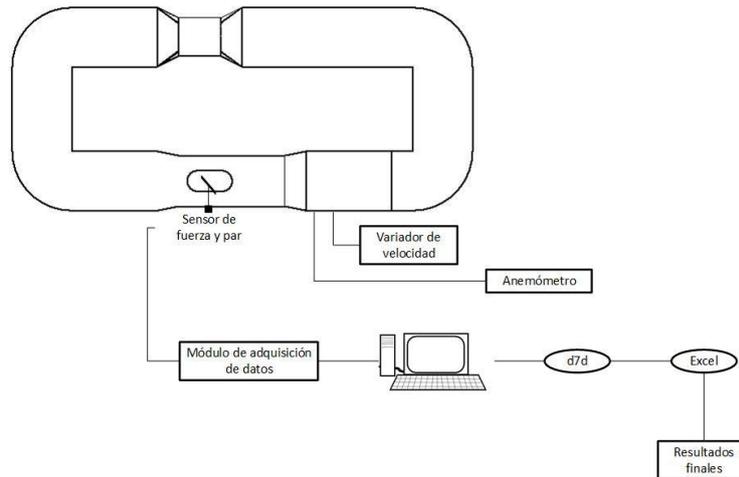


Figura 22. Cadena de medida en el túnel A)

Sensor de fuerza y par multiaxial [24]



Figura 23. Sensor de fuerza y par multiaxial

Este tipo de sensores permiten la medida de fuerza y par en sus tres componentes simultáneamente.

El modelo MC3A-100, se trata de un transductor compacto de seis ejes con inserciones roscadas en sus superficies superior e inferior. El cuerpo de la celda de carga está fabricado de una aleación de aluminio de alta resistencia con un acabado anodizado para proteger el exterior de la corrosión.

Este modelo cuenta con seis canales de salidas analógicas, pudiendo trabajar en un rango de temperaturas comprendidas entre -18°C y 52°C aproximadamente. Su capacidad máxima de medida son 222 N en las direcciones x e y, así como 445 N en la dirección z. En cuanto a los momentos, ésta se trata de 11 Nm en las direcciones x e y, y 5,6 Nm en la z. Por otro lado, cuenta con una histéresis en F_x , F_y , y F_z , con salida de escala completa de + 0,2 %, al igual que para la no linealidad, de estas mismas variables.

En este caso, en el túnel A), la orientación del sensor, así como, la dirección de toma de datos de cada uno de los ejes sobre los que actúan las fuerzas del viento, se muestran a continuación, en la Figura 24, donde se representa además, la dirección del viento en el banco.

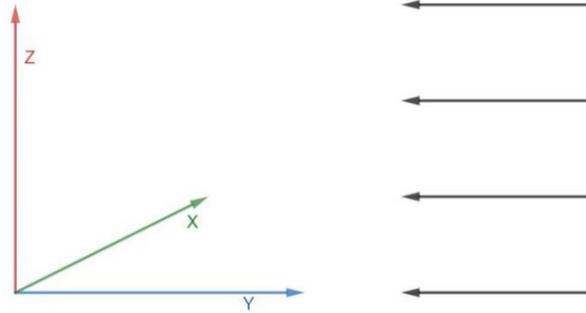


Figura 24. Dirección de los ejes en el túnel A)

Módulo de adquisición de datos por USB DEWE-43A [25]



Figura 25. Módulo de adquisición de datos

Este equipo de medida consta de ocho canales con conexión directa para todo tipo de sensores, además de ocho supercounters y otros dos CANBUS. Se trata, por tanto, de un equipo de 24 bits con una velocidad de hasta 200.000 muestras por segundo por canal de forma simultánea. El equipo se conecta mediante USB a un PC en el que se registran y analizan los datos, a través del software de adquisición DEWESOFT. Cuenta además, con las siguientes características principales:

- Entradas analógicas universales, aceptando señales de voltaje y puente completo, así como, señales IEPE, carga, termopares, medio puente, puente parcial, RTD, corriente, resistencia y LVDT con el uso de adaptadores DSI.
- Fuente de alimentación del sensor, proporcionando, cada canal, energía para la excitación del sensor.
- Contador, encoder y entradas digitales con capacidad, cada canal, para entradas digitales 3x, contador de eventos 1x, codificados, período, ancho de pulso, ciclo de trabajo.
- Totalmente sincronizado, con microsegundos de precisión en cada canal, ya sean analógicos, digitales o CAN.
- Fuente de alimentación aislada internamente, de forma que, se elimina la posibilidad de que se produzcan bucles a tierra.

A continuación, en la Figura 26, se muestra un esquema de conexión de cada uno de los puertos para la obtención de las variables de interés para este trabajo.



Figura 26. Conexiones módulo de adquisición de datos

4.2. TÚNEL DE VIENTO B)

Por otro lado, este segundo banco de ensayos aerodinámicos, se trata de un túnel de viento de impulsión, en circuito abierto, con sección de test en la descarga del chorro, de dimensiones 750 x 750 mm². La potencia máxima del túnel es de 30 kW, pudiendo variarse la velocidad de ensayo entre 0 y 40 m/s (hasta unos 150 km/h), gracias al accionamiento a velocidad variable del ventilador, controlado mediante su frecuencia.

A continuación, se muestra un esquema del túnel correspondiente en la Figura 27, dónde se puede observar la sección de prueba (6). Esta sección de prueba resulta menor que la correspondiente al túnel de viento A), a pesar de contar éste con mayores prestaciones en lo que a velocidades de ensayo se refiere.

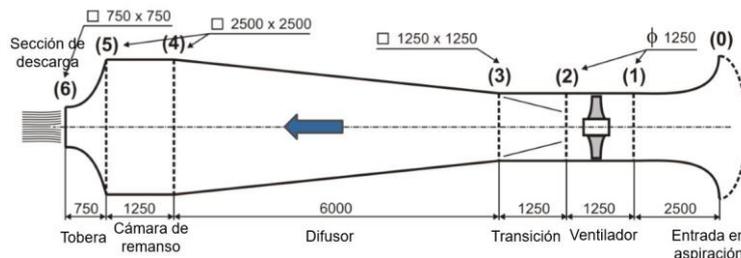


Figura 27. Esquema túnel longitudinal [26] (dimensiones en mm)

A continuación, se muestran fotografías del túnel en la Figura 28, Figura 29, Figura 30 y Figura 31. En estas figuras se muestra, tanto el montaje experimental que se explica más adelante con la correspondiente cadena de medida (Figura 28), como el circuito abierto que conforma el banco de ensayos (Figura 29 y Figura 30) y el ventilador que lo acciona (Figura 31).



Figura 28. Vista frontal medidas experimentales (túnel B)



Figura 29. Vista lateral-frontend (túnel B)



Figura 30. Vista lateral-posterior (túnel B)



Figura 31. Vista posterior ventilador (túnel B)

En cuanto al equipo de medida utilizado, al igual que para el túnel A), se emplean tanto un variador de frecuencia para el accionamiento del túnel, como un manómetro y anemómetro y un sensor de fuerza y par con su correspondiente módulo de adquisición de datos, para el registro tanto de la velocidad, como de las fuerzas que actúan sobre el modelo, respectivamente. A continuación, al igual que para el caso del banco de ensayos anterior, en la Figura 32, se muestra un diagrama representativo de la cadena de medida con cada uno de los equipos utilizados, los cuales, se resumen a continuación en la Tabla 2. Del mismo modo, se detallan algunas características correspondientes a algunos equipos utilizados que difieren de los empleados para casos anteriores. En este caso, el banco de ensayos se pone en funcionamiento a través del variador de frecuencia que controla la velocidad de acción del viento, medida en la sección de prueba, al igual que para el caso del túnel A), por un anemómetro. Registrados los datos de interés por el sensor de fuerza y par multiaxial, el proceso de obtención de los mismos es análogo al dispuesto para el túnel A), a través del módulo de adquisición de datos por USB y el software correspondiente (DEWESOFT). Así mismo, se tendrá en cuenta que, en este caso, en el segundo túnel, la orientación del sensor, así como, la dirección de toma de datos de cada uno de los ejes sobre los que actúan las fuerzas del viento varían en cada uno de los ensayos, dependiendo del montaje realizado. Esto es debido a que en este túnel se realizan numerosos ensayos de naturalezas muy variadas que impiden que el montaje permanezca en el túnel hasta la finalización del presente trabajo.

Instrumento
Variador de frecuencia
Manómetro y anemómetro
Sensor de fuerza y par
Módulo de adquisición de datos

Tabla 2. Resumen de instrumentos utilizados en el túnel B)

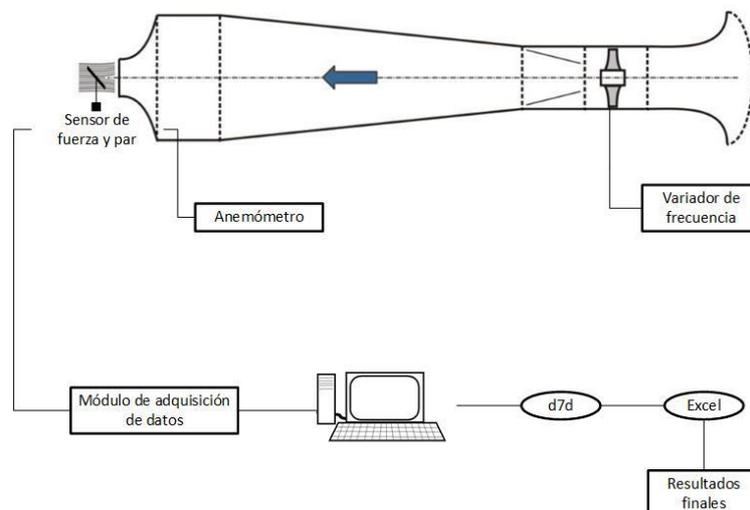


Figura 32. Cadena de medida en el túnel B)

Variador de frecuencia OMRON [27]



Figura 33. Variador de frecuencia OMRON

El variador de frecuencia empleado para modificar la frecuencia de accionamiento del túnel de viento y, así, la velocidad de ensayo, se trata de un variador trifásico de 400 V, el cual cuenta con un rango de frecuencia de salida de 0,10 Hz a 400 Hz.

En cuanto a la precisión de frecuencia del equipo, ésta será + 0,01 % de la frecuencia máxima, para los valores digitales seleccionados, así como, + 0,2 % de la frecuencia máxima, para los valores analógicos. Del mismo modo, en cuanto a la resolución, ésta es + 0,01 Hz, tanto para los valores de frecuencia seleccionados, como para la frecuencia de salida.

Manómetro y anemómetro portátil con sensor de presión integrado KIMO [28]



Figura 34. Manómetro y anemómetro KIMO

El modelo MP-120, utilizado para la medida de la velocidad del aire con tubo pitot a la entrada de la sección de descarga, mide en un rango de 0 m/s a 40 m/s de velocidad y de -1000 Pa a 1000 Pa en cuanto a presión.

En cuanto a las especificaciones de presión, cuenta con una resolución de 1 Pa y una precisión de + 0,5 % de la lectura + 2 Pa. Por otro lado, en cuanto a la medida de la velocidad, cuenta con una resolución de 0,1 m/s y unas precisiones de + 0,7 m/s para velocidades de entre 2 y 5 m/s, y de + 0,5 % de la lectura + 0,3 m/s para velocidades de 5 a 40 m/s.

4.3. CONCLUSIONES

En este capítulo, y en relación a las características expuestas, tanto sobre los bancos de ensayos A) y B), como de sus equipos de medidas correspondientes, se concluye una mayor conveniencia en el uso del túnel B) para la realización de este trabajo. Esto es debido a su mayor velocidad máxima ya expuesta, del doble que la del túnel A), sirviendo esto como criterio a la hora de elegir en qué túnel se realizarán los ensayos finales.

Además, por otro lado, el túnel B), a pesar de contar con una sección de prueba más pequeña que la del túnel A), es suficiente para el ensayo tanto del modelo que se ha elegido finalmente como óptimo, como de cualquier otro con los que se han realizado pruebas.

5. ELECCIÓN DEL MODELO A ENSAYAR

En este capítulo, se detallan los distintos ensayos realizados, con diferentes modelos de estructuras soporte, y en distintos túneles de viento, a fin de determinar el modelo óptimo de panel solar a ensayar. En la Tabla 3, se muestran las principales diferencias entre cada uno de los ensayos realizados con este fin.

Fecha de ensayo	Túnel	Velocidad ensayada (m/s)	Dimensiones modelo (mm)	Ángulos inclinación modelo (°)
Julio 2018	Túnel A)	4-16	965 x 173	20
Octubre 2018	Túnel B)	2-22	665 x 201	50
Diciembre 2018	Túnel B)	2-22	300 x 88	30-40-90

Tabla 3. Principales diferencias entre ensayos

De este modo, de acuerdo con la norma americana ASCE 7 [8], los ensayos en túneles de viento, cuyo objetivo se trate de la determinación de las cargas de viento de diseño, para cualquier edificio u otra estructura, deben realizarse bajo ciertas condiciones, las cuales se exponen a continuación.

- “Ha de tenerse en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura”. (ASCE 7-05, 2006, p.34)
En este caso, para este túnel, dado que las dimensiones geométricas son bastante pequeñas (véase las dimensiones de las placas expuestas en la Tabla 3), esta variable no afecta a los resultados.
- “Las dimensiones relevantes de la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica deben modelarse aproximadamente a la misma escala que la de la estructura del modelo”. (ASCE 7-05, 2006, p.34)
En cuanto a este aspecto, puesto que el ensayo se hace en una nave cerrada, no se puede considerar esta variable. Es decir, no se puede tener una distribución de turbulencia similar a la que aparece en la norma.
- “La estructura modelada y las estructuras circundantes son geoméricamente similares a sus correspondientes a gran escala”. (ASCE 7-05, 2006, p.34)
En este sentido, se buscará un modelo con una relación de aspecto ($AR=a/b$) cercana a $AR=1,66$ puesto que se trata de la correspondiente a un único panel fotovoltaico en posición horizontal. De este mismo modo, una relación de aspecto de valor 0,6 correspondería a un único panel en posición vertical, así como, por ejemplo, un $AR=3,6$ representaría una matriz de seis de estos paneles verticales.
- “El área de la estructura proyectada debe ser menor del 8% de la sección transversal de la zona de prueba, a menos que se corrija el bloqueo.” (ASCE 7-05, 2006, p.34)
De acuerdo a las dimensiones de cada túnel, mostradas anteriormente en sendos capítulos 4.1 y 4.2, y las dimensiones de cada uno de los modelos utilizados, expuestas en la Tabla 3, se comprobará el cumplimiento de esta condición para cada uno de ellos.
- “Los efectos numéricos de Reynolds sobre las presiones y fuerzas, deben minimizarse.” (ASCE 7-05, 2006, p.34)
Esta condición tratará de comprobarse en cada uno de los ensayos.
- “Las características de la instrumentación son consistentes con las medidas requeridas” (ASCE 7-05, 2006, p.34)
Este aspecto se tratará más adelante en el capítulo 7, en el que se aborda el estudio de la adecuación del equipo de medida empleado.

5.1. PRIMER MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES

En este caso, el modelo se ensayó en el túnel A) del Área de Construcción e Ingeniería de Fabricación para el posterior estudio de su adecuación a las necesidades del presente trabajo. El modelo utilizado tiene una orientación de 20° , y unas dimensiones que se resumen en la Tabla 4, además de simular un efecto 2D al ir de lado a lado de las paredes de la sección de prueba del túnel.

Dimensión	Longitud (m)
Largo	0,965
Ancho	0,173
Espesor	0,010
Distancia suelo (z)	0,042

Tabla 4. Dimensiones principales del modelo 1

A continuación, se muestra el modelo, en la Figura 35, donde además, se detalla la dimensión que se toma como referencia para determinar la distancia del modelo al suelo (z).



Figura 35. Modelo 1

Por otro lado, en la Figura 36, se muestran además, algunos esquemas del modelo con sus medidas correspondientes, ya expuestas anteriormente en la Tabla 4. De este modo, se observa que el primer modelo a ensayar cuenta con un ancho de 965 mm, un largo de 173 mm, un ángulo de inclinación de 20° , como ya se ha expuesto anteriormente, así como un espesor de 10 mm y una distancia al suelo, fija, de 42 mm.

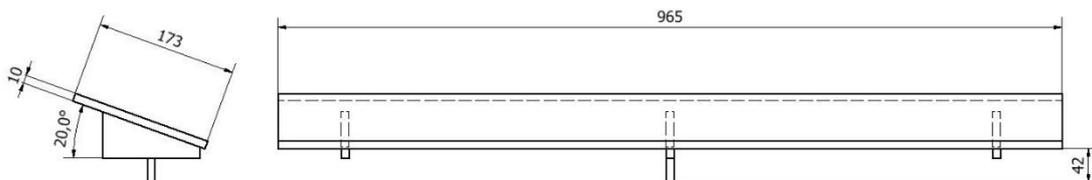


Figura 36. Vistas lateral y frontal del modelo 1 (dimensiones en mm)

Así, para este modelo se calculó su relación de aspecto (24), a partir de sus dimensiones (Tabla 4), a fin de comprobar el cumplimiento de la condición expuesta anteriormente referente a la semejanza geométrica del mismo. En este sentido, se compara el resultado obtenido con la relación de aspecto de un panel solar estándar horizontal de dimensiones 1650 mm x 1000 mm (23), el cual se corresponde con la relación de aspecto ya expuesta anteriormente en este capítulo.

$$AR_{real} = \frac{a_{estandar}}{b_{estandar}} = \frac{1650 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} = 1,65 \quad (23)$$

$$AR = \frac{a}{b} = \frac{965 \text{ mm}}{173 \text{ mm}} = 5,6 \quad (24)$$

En este sentido, se comprueba el incumplimiento de esta condición al obtener una relación de aspecto tres veces superior a la estándar.

Por otro lado, se comprueba el cumplimiento de la condición de bloqueo, el cual no debe ser superior al 8%. De nuevo, a partir de las dimensiones del modelo (Tabla 4), así como, de las dimensiones de la sección de prueba del túnel, expuestas en el capítulo 4.1, se comprueba dicha condición (25).

$$B = \frac{ab \sin \alpha}{S_{prueba}} = \frac{0,965 \text{ m } 0,173 \text{ m } \sin 20^\circ}{1 \text{ m } 1 \text{ m}} 100 = 5,7 \% < 8 \% \quad (25)$$

En este sentido, se comprueba el cumplimiento de esta última condición, un bloqueo inferior al 8%. Sin embargo, este primer modelo se ha descartado por diversos motivos, además del incumplimiento de la condición anterior referente a la relación de aspecto. En primer lugar, el ángulo de inclinación del modelo es invariante por su construcción. Este aspecto no interesa a la hora de la realización del presente trabajo ya que se pretenden estudiar los efectos de las distintas cargas del viento para distintos ángulos de inclinación. Además, éste también cuenta con dos patas laterales, una a cada lado del mismo, que a partir de una velocidad moderadamente elevada, comienzan a ejercer un contacto con el suelo de la sección de prueba del túnel que altera los resultados de las mediciones.

5.2. SEGUNDO MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES

En este caso, a pesar de solventar la limitación que presentaba el primer modelo respecto a la invariabilidad de su ángulo de inclinación, este segundo modelo utilizado se ha ensayado con una orientación de 50°, y unas dimensiones que se resumen en la Tabla 5, así como, en el túnel B) del Área de Mecánica de Fluidos.

Dimensión	Longitud (m)
Largo	0,665
Ancho	0,201
Espesor	0,004
Distancia suelo	0,145

Tabla 5. Dimensiones principales del modelo 2

A continuación, se muestran fotografías del modelo y el montaje experimental, en la Figura 37 y la Figura 38.



Figura 37. Modelo 2 montado en la sección de prueba del túnel B)



Figura 38. Modelo 2 anclado a la mesa de medición

Por otro lado, en la Figura 39, se muestran además, algunos esquemas del modelo con sus medidas correspondientes, ya expuestas anteriormente en la Tabla 5.

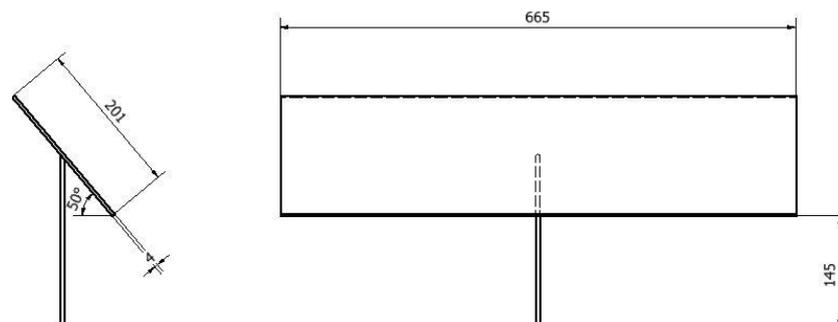


Figura 39. Vistas lateral y frontal del modelo 2 (dimensiones en mm)

De este modo, se observa que este segundo modelo a ensayado, cuenta con un ancho de 665 mm, un largo de 201 mm, un ángulo de inclinación de variable, como ya se ha expuesto anteriormente, colocado en 50° en este caso, así como un espesor de 4 mm y una distancia al suelo, fija, de 145 mm, también variable de acuerdo al ángulo de inclinación.

En este modelo, como ya se ha mencionado, se han corregido algunos de los inconvenientes del modelo anterior. Éste, mantiene el efecto 2D al estar en contacto el modelo con las paredes de la sección de prueba del túnel. Sin embargo, se ha añadido la posibilidad de variar su ángulo de inclinación, así como, eliminado los soportes laterales que introducían algunas alteraciones de los resultados.

En cuanto a la relación de aspecto del nuevo modelo, ésta se calcula a continuación (26), a partir de sus dimensiones expuestas en la Tabla 5.

$$AR = \frac{a}{b} = \frac{665 \text{ mm}}{201 \text{ mm}} = 3,3 \tag{26}$$

A pesar de que la relación de aspecto del modelo se ha reducido a tan solo el doble de la relación estándar, en este sentido el modelo no cumpliría dicha condición, a no ser que se considerase la posible representación de dos paneles horizontales consecutivos en la dirección perpendicular a la de acción del viento.

Por otro lado, se comprueba el cumplimiento de la condición de bloqueo. De nuevo, a partir de las dimensiones del modelo (Tabla 5), así como, de las dimensiones de la sección de prueba del túnel, expuestas en el capítulo 4.2, se comprueba dicha condición (27). Cabe destacar que, en este caso que el ángulo de inclinación del modelo es variable, el bloqueo se calcula para su caso más desfavorable, es decir, como una placa completamente vertical, lo que corresponde a un ángulo de inclinación de 90°.

$$B = \frac{ab \sin \alpha}{S_{prueba}} = \frac{0,665 \text{ m } 0,201 \text{ m } \sin 90^\circ}{0,75 \text{ m } 0,75 \text{ m}} 100 = 23,8 \% > 8 \% \tag{27}$$

En este caso, a pesar de que el modelo reúne las condiciones que se han querido mejorar respecto del modelo anterior, no cumple ni con la relación de aspecto, ni con la condición de bloqueo, el cual es muy superior al máximo del 8%. Por esto, se ha rechazado también este segundo modelo. Además, debido a la debilidad de las paredes de la sección de prueba del túnel B), a partir de una velocidad de aproximadamente 10 m/s, se comprueba que su vibración introduce demasiado ruido en las mediciones, lo cual se establece como el principal aspecto a mejorar de cara al siguiente modelo.

5.3. TERCER MODELO ENSAYADO Y DIFICULTADES

Debido a las pequeñas interferencias observadas en los ensayos con el modelo 2, entre los extremos de éste, y las paredes de la sección de prueba, se planteó este nuevo modelo, ensayado también en el túnel B) y con las dimensiones que se muestran en la Tabla 6.

Dimensión	Longitud (m)
Largo	0,300
Ancho	0,088
Espesor	0,004
Distancia suelo	0,240

Tabla 6. Dimensiones principales del modelo 3

Éste fue diseñado de modo que cumpla con la condición de bloqueo que no se respetaba en el caso anterior, además de disminuir su longitud para evitar el contacto con las paredes. Por otro lado, al disminuir dicha longitud, y perder el apoyo sobre los laterales del modelo, se pierde el efecto 2D que se trata de conseguir. Para ello, se opta por colocar un disco ligero a cada lado del modelo, de modo que haga las funciones de pared auxiliar sin perder el efecto 2D deseado.

A continuación, se muestran fotografías de dicho modelo, así como del montaje experimental, en la Figura 40 y la Figura 41.



Figura 40. Modelo 3 montado en la sección de prueba del túnel B)



Figura 41. Modelo 3 anclado a la mesa de medición

Por otro lado, en la Figura 42, se muestran además, algunos esquemas del modelo con sus medidas correspondientes, las cuales se habían expuesto también, anteriormente, en la Tabla 6.

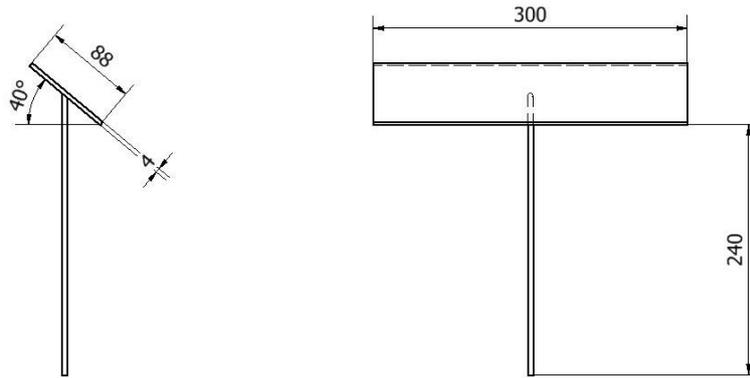


Figura 42. Vistas lateral y frontal del modelo 3 (dimensiones en mm)

De este modo, se observa que el tercer, y último, modelo a ensayar cuenta con un ancho de 300 mm, un largo de 88 mm, un ángulo de inclinación de nuevo variable, como ya se ha expuesto anteriormente, fijado en este caso en 40° , así como un espesor de 4 mm y una distancia al suelo, fija, de 240 mm, variable a su vez, como en casos anteriores, con la inclinación del modelo.

En cuanto a la relación de aspecto del modelo, se mantiene la condición del caso anterior de representar dos paneles horizontales consecutivos en la dirección perpendicular a la acción del viento (28).

$$AR = \frac{a}{b} = \frac{300 \text{ mm}}{88 \text{ mm}} = 3,4 \quad (28)$$

Por otro lado, en cuanto a la condición de bloqueo, éste se cumple en este caso puesto que el modelo se ha diseñado de tal manera (29). Al igual que para el caso anterior, en el que el ángulo de inclinación del modelo era variable, esta condición se comprueba para el caso más desfavorable, un ángulo de 90° .

$$B = \frac{ab \sin \alpha}{S_{prueba}} = \frac{0,300 \text{ m} \cdot 0,088 \text{ m} \cdot \sin 90^\circ}{0,75 \text{ m} \cdot 0,75 \text{ m}} 100 = 4,7 \% < 8 \% \quad (29)$$

En este sentido, se observa que se ha obtenido un modelo óptimo para la realización de los ensayos, según los criterios necesarios para este trabajo.

5.4. CONCLUSIONES

En resumen, en este capítulo, se ha definido el modelo óptimo para los ensayos correspondientes a este trabajo. En primer lugar, como se ha expuesto, se ha comprobado la inconveniencia del primer modelo, primero por su incapacidad para ser modificado su ángulo de inclinación y segundo, por el incumplimiento de la relación de aspecto estándar, así como, interferencias introducidas por sus soportes.

En segundo lugar, y tratando de solventar los inconvenientes encontrados en el primer modelo, se estudió un segundo modelo con variabilidad del ángulo de inclinación que, en esta ocasión, introducía interferencias en las mediciones por sus caras laterales al intentar simular un efecto 2D, además de no cumplir con la condición de disponer de un bloqueo menor del 8%.

Por último, se concluyó que el modelo óptimo para la realización de los ensayos de este trabajo sería el tercer modelo, el cual solventaba las interferencias introducidas por el modelo anterior a través de la introducción de unas placas laterales auxiliares.

6. ENSAYOS INICIALES. DIFICULTADES OBSERVADAS

A continuación, en este capítulo, se muestran algunos de los ensayos, y sus correspondientes resultados, realizados a la hora de tratar de determinar cuál sería el modelo óptimo a utilizar durante la realización del presente trabajo.

El procedimiento a seguir para la realización de dichos ensayos, así como, el que se seguirá más adelante en los ensayos con el modelo definitivo, es similar en todos los casos. Para ello, se establece una velocidad de viento, o frecuencia de accionamiento del túnel, al comienzo del ensayo, la cual, se mantiene durante un determinado intervalo de tiempo. Esta velocidad, se aumenta transcurrido dicho tiempo, de modo que, para un mismo ensayo, se tendrán resultados referentes a distintas velocidades de viento.

6.1. TÚNEL A): ÁREA DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

En este primer túnel, únicamente se realizó un primer ensayo con el modelo inicial 1), en el que se corrió éste a distintas velocidades comprendidas entre 4,90 m/s y 15,90 m/s, en distintos intervalos de tiempo, para medir las respectivas fuerzas que actúan sobre la maqueta de panel solar.

6.1.1. Resultados obtenidos. Modelo 1)

6.1.1.1. Coeficiente de arrastre

Extraídos los resultados registrados respecto a la fuerza de arrastre sobre la maqueta (acción horizontal del viento en el túnel), se representaron éstos en función del tiempo como se muestra a continuación en la Figura 43, dónde cada escalón corresponde a una velocidad determinada, comprendidas en el intervalo anteriormente mencionado.

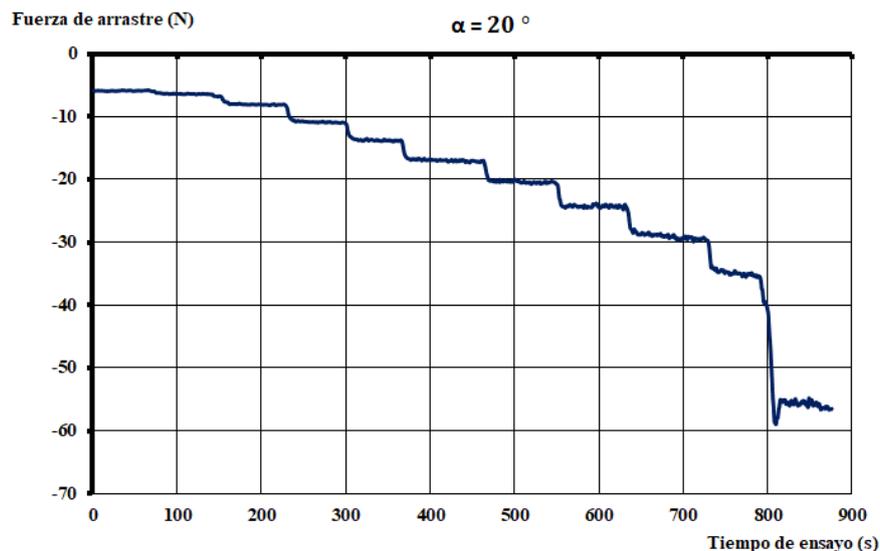


Figura 43. Resultados fuerza de arrastre, túnel A), modelo 1

De este modo, en esta figura, y posteriores de las mismas características, se representa en el eje vertical la fuerza de arrastre, en N, medida por el sensor de fuerza y par multiaxial y obtenida a

través del módulo de adquisición de datos descrito anteriormente. En el eje horizontal, se representa el tiempo de duración del ensayo, en s. De este modo, para este caso concreto, como se observa en la mencionada Figura 43, el ángulo de inclinación de la placa correspondiente se trata de un ángulo de 20°, puesto que como se explica en el capítulo 5.1, este primer modelo cuenta con un ángulo de inclinación invariable, tratándose esto de uno de sus mayores inconvenientes, como se ha explicado. Además, como ya se ha mencionado, en esta Figura 43, se observan varios escalones con distintas fuerzas de arrastre medidas en diferentes intervalos de tiempo, debido a las variaciones de velocidad de ensayo efectuadas. De este modo, esto representa una velocidad de ensayo diferente para cada uno de los escalones, siendo, por ejemplo, en este caso las velocidades expuestas a continuación en la Tabla 7, para cada uno de los intervalos de tiempo que se observan.

Velocidad (m/s)	Intervalo de tiempo (s)
4,90	0-100
5,50	100-180
6,15	180-270
7,10	270-350
7,90	350-450
8,85	450-540
9,70	540-600
10,75	600-710
11,80	710-780
13,00	780-810
15,90	810-865

Tabla 7. Descripción de escalones de velocidad en distintos intervalos de tiempo

De este modo, para cada velocidad se ha obtenido su fuerza de arrastre correspondiente, tratando 20 valores comprendidos en el intervalo de tiempo asociado a dicha velocidad. De esta forma, y tratando de disminuir el ruido de las mediciones tanto como sea posible, se ha calculado dicha fuerza como la media de los promedios de los valores máximos y los valores mínimos registrados. Los resultados de las fuerzas de arrastre obtenidas para cada velocidad se muestran en la Tabla 8.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
4,90	-5,89
5,50	-6,39
6,15	-8,05
7,10	-10,87
7,90	-13,82
8,85	-17,14
9,70	-20,49
10,75	-24,25
11,80	-29,38
13,00	-35,23
15,90	-56,20

Tabla 8. Resultados fuerza de arrastre, túnel A), modelo 1

A continuación, a partir de las siguientes expresiones de cálculo del coeficiente de arrastre (30) (obtenida a partir de (1)), así como, del número de Reynolds (31), se han obtenido éstos para cada una de las velocidades ensayadas.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{30}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{31}$$

Donde L es la longitud característica del modelo, en este caso, el ancho del panel.

Siendo la densidad del aire a 25°C 1,184 kg/m³ y su viscosidad 1,849·10⁻⁵ kg/ms [29], así como, el área de la maqueta de 0,965 m x 0,173 m, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 9.

Coeficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
2,48	3,03E+05
2,14	3,40E+05
2,15	3,80E+05
2,18	4,39E+05
2,24	4,88E+05
2,21	5,47E+05
2,20	5,99E+05
2,12	6,64E+05
2,13	7,29E+05
2,11	8,03E+05
2,25	9,83E+05

Tabla 9. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel A), modelo 1

Por último, se han graficado los resultados mostrados en la tabla anterior, a fin de comprobar si se ha alcanzado la independencia del número de Reynolds, minimizando los efectos de éste, de acuerdo a la quinta de las condiciones expuestas en el capítulo 5, como se muestra a continuación en la Figura 44.

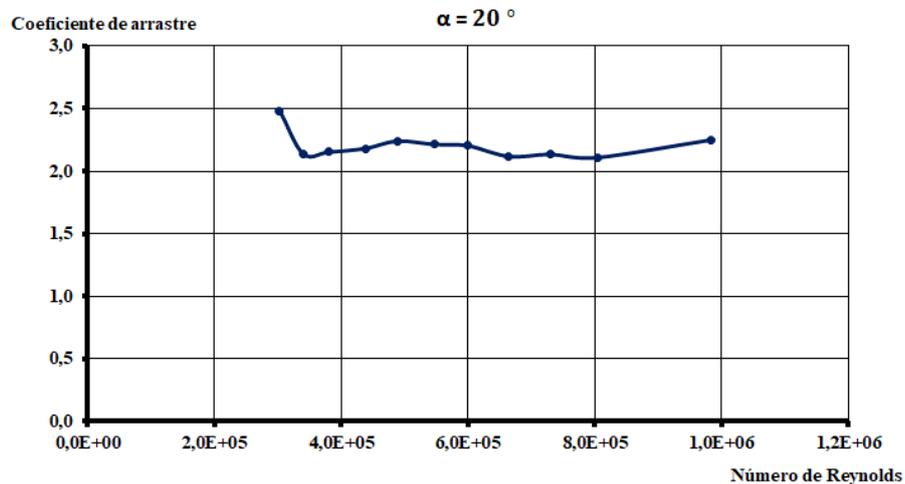


Figura 44. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel A), modelo 1

6.1.1.2. Coeficiente de sustentación

En este mismo primer ensayo, se obtuvieron además, valores de la fuerza de sustentación, es decir, la acción perpendicular a la dirección del viento sobre el panel. A continuación, en la Figura 45, se muestran los resultados obtenidos de dicha fuerza, en los intervalos de tiempo y velocidad anteriores.

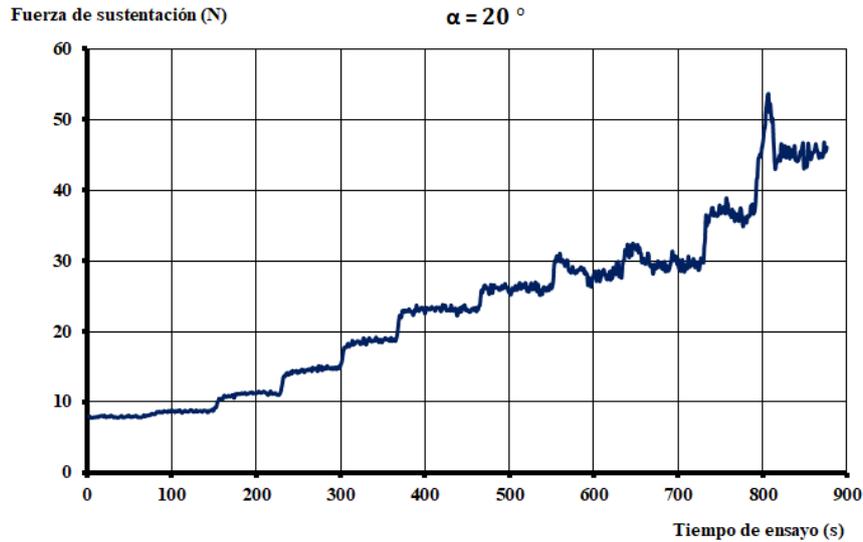


Figura 45. Resultados fuerza de sustentación, túnel A), modelo 1

Estos valores de la fuerza en el eje vertical del panel, como se ha expuesto con anterioridad, han podido ser distorsionados por un leve contacto del modelo con el suelo del túnel. Como se observa en la figura anterior, Figura 45, a partir de cierta velocidad, 10 m/s aproximadamente, hacia los 500 segundos de ensayo, los valores obtenidos comienzan a verse alterados por una fuerte influencia del ruido en las mediciones. Por tanto, a la hora de estudiar el coeficiente de sustentación, C_L , solo se tendrán en cuenta los valores de la fuerza correspondiente obtenidos para velocidades por debajo de los 10 m/s. A continuación, en la Tabla 10, se muestran los resultados de dichas fuerzas obtenidos para cada una de las velocidades consideradas, empleando el mismo método que para el caso anterior.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
4,90	7,90
5,50	8,73
6,15	11,10
7,10	14,69
7,90	18,82
8,85	23,15
9,70	26,01

Tabla 10. Resultados fuerza de sustentación, túnel A), modelo 1

De forma análoga al caso del coeficiente de arrastre, y a partir de (2), se obtiene el coeficiente de sustentación para cada velocidad, mostrados éstos en la Tabla 11.

Coficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
3,33	3,03E+05
2,92	3,40E+05
2,97	3,80E+05
2,95	4,39E+05
3,05	4,88E+05
2,99	5,47E+05
2,80	5,99E+05

Tabla 11. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel A), modelo 1

Por último, al igual que para el coeficiente de arrastre, se han graficado los resultados mostrados en la tabla anterior, en la Figura 46, a fin de comprobar si se ha alcanzado la independencia del número de Reynolds.

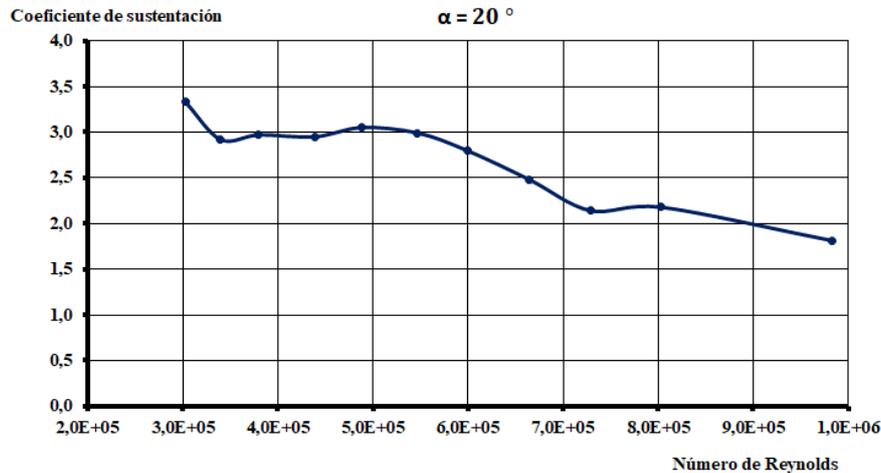


Figura 46. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel A), modelo 1

De este modo, y como se observa en la mencionada Figura 46, en la cual se han representado todos los valores obtenidos, incluidos aquellos correspondientes a velocidades superiores a 10 m/s, es decir, números de Reynolds por encima de $6 \cdot 10^5$, esta independencia podría atribuirse a aquellos números de Reynolds menores de este valor, en los cuales la interferencia introducida por los soportes del modelo no se considera aún apreciable.

6.2. TÚNEL B): ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

En este caso, en el túnel B), se probaron tanto el modelo 2), como el modelo final 3). Estos ensayos se realizan variando la frecuencia de accionamiento del túnel, medida en Hz y, como consecuencia, la velocidad de acción del viento en el ensayo.

Por otro lado, al disponer de un aparato de medida de presión y velocidad a la entrada de la sección de prueba, se comprueba la velocidad obtenida a partir de la expresión que la relaciona con la frecuencia, detallado este aspecto en el capítulo 7.

En primer lugar, con el modelo 2) se realizó un ensayo variando la frecuencia de accionamiento del túnel de 1 Hz en 1 Hz. A continuación, se realizó otro ensayo, variando dicha frecuencia de 3 Hz en 3 Hz. Y, por último, se realizaron dos ensayos variando de 5 Hz en 5 Hz, a fin de contrastar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos. Estos ensayos, comprenden velocidades de entre 2 m/s y 22 m/s, aproximadamente.

En este caso, en el segundo túnel, la orientación del sensor, así como, la dirección de toma de datos de cada uno de los ejes sobre los que actúan las fuerzas del viento, se muestran a continuación, en la Figura 47.

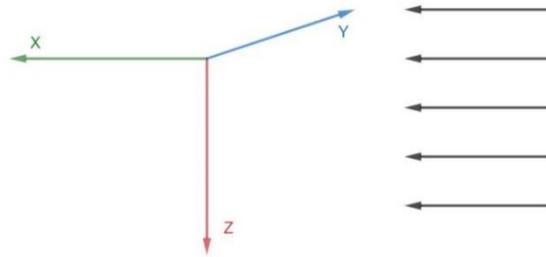


Figura 47. Dirección de los ejes del túnel B) (ensayos modelo 2)

Por otro lado, para los ensayos realizados con el modelo 3), el sensor cuenta con una orientación diferente debido a la variación en su colocación durante el montaje experimental. A continuación, se muestran en la Figura 48, la dirección de toma de datos de cada uno de los ejes sobre los que actúan las fuerzas del viento en este caso.

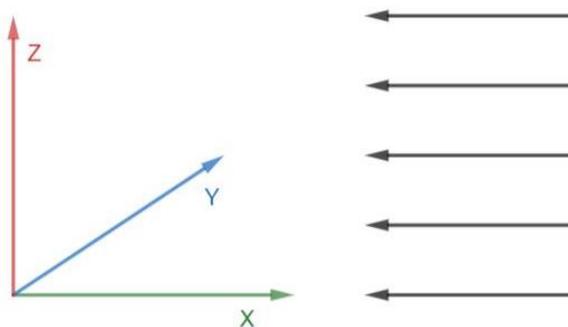


Figura 48. Dirección de los ejes en el túnel B) (ensayos modelo 3)

Además, en cuanto a los ensayos realizados con el modelo final, en este caso se varió el ángulo de inclinación de la placa modelo. En primer lugar, se realizó un ensayo con ésta vertical (90°), para posteriormente, comparar los resultados con la bibliografía disponible. Además, se realizaron otros dos ensayos correspondientes a grados de inclinación del modelo de 30° y 40° . En este caso, todos los ensayos fueron realizados en intervalos de 5 Hz de la frecuencia de accionamiento del túnel de viento.

6.2.1. Resultados obtenidos. Modelo 2)

6.2.1.1. Coeficiente de arrastre

Primer ensayo

Extraídos los resultados registrados respecto a la fuerza de arrastre sobre la maqueta, de acuerdo al montaje experimental expuesto anteriormente en la Figura 32, en el capítulo 4.2, se representaron éstos en función del tiempo como se muestra a continuación en la Figura 49, dónde cada escalón corresponde a una velocidad determinada, comprendidas en el intervalo anteriormente mencionado.

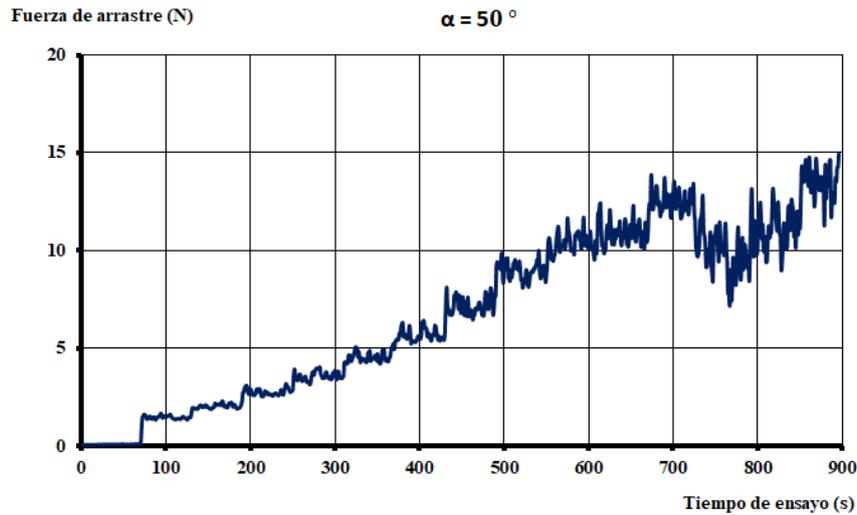


Figura 49. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 1

Como se observa en la figura anterior, debido al pequeño aumento de la frecuencia en cada medición (1 Hz), apenas se aprecian los distintos escalones correspondientes a cada una de las velocidades ensayadas. Al igual que para tratar los datos obtenidos en los ensayos correspondientes al primer modelo, para cada velocidad se ha obtenido su fuerza de arrastre correspondiente, tratando 20 valores comprendidos en el intervalo de tiempo asociado a dicha velocidad. De esta forma, y tratando de disminuir el ruido de las mediciones tanto como sea posible, se ha calculado dicha fuerza como la media de los promedios de los valores máximos y los valores mínimos registrados. Los resultados de las fuerzas de arrastre obtenidas para cada velocidad se muestran en la Tabla 12. Por otro lado, para la velocidad, se toma la media entre la velocidad medida experimentalmente y, la obtenida a través de la expresión que la relaciona con la frecuencia (capítulo 7), a fin de disminuir posibles errores.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,43	1,52
4,17	2,06
4,97	2,67
5,61	3,68
6,36	4,50
7,06	5,69
7,80	6,99
8,45	8,81
9,19	10,56
9,99	10,79
10,64	12,58
11,38	9,68
12,03	11,05
12,77	13,34

Tabla 12. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 1

A continuación, del mismo modo que para el ensayo realizado en el primer túnel y, a partir de las expresiones de cálculo del coeficiente de arrastre (obtenida a partir de (1)) (30), así como, del número de Reynolds (31), se han obtenido éstos para cada una de las velocidades ensayadas.

Siendo, en este caso la densidad del aire a 18°C 1,213 kg/m³ y su viscosidad 1,815·10⁻⁵ kg/ms [29], así como, el área de la maqueta de 0,665 m x 0,201 m, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 13.

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
1,59	1,52E+05
1,46	1,85E+05
1,33	2,21E+05
1,44	2,50E+05
1,37	2,83E+05
1,41	3,14E+05
1,42	3,47E+05
1,52	3,75E+05
1,54	4,09E+05
1,33	4,44E+05
1,37	4,73E+05
0,92	5,06E+05
0,94	5,35E+05
1,01	5,68E+05

Tabla 13. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1

Representando los datos obtenidos que se observan en la tabla anterior, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 50.

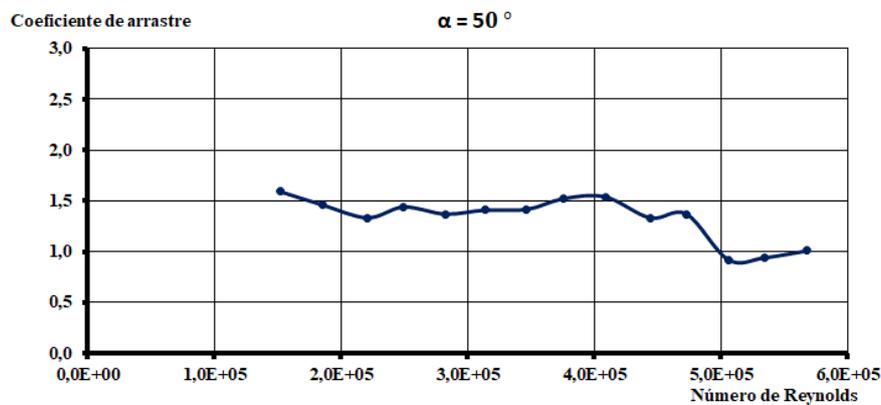


Figura 50. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1

Segundo ensayo

En este segundo ensayo, la frecuencia de accionamiento del túnel, como ya se había mencionado, se varió de 3 Hz en 3 Hz. De este modo, los resultados obtenidos para la fuerza de arrastre se muestran en la Figura 51, donde, en este caso, resultan apreciables los mencionados escalones correspondientes a las distintas velocidades de ensayo, observándose, además, una gran influencia del ruido en las mediciones para la gran mayoría de estas velocidades.

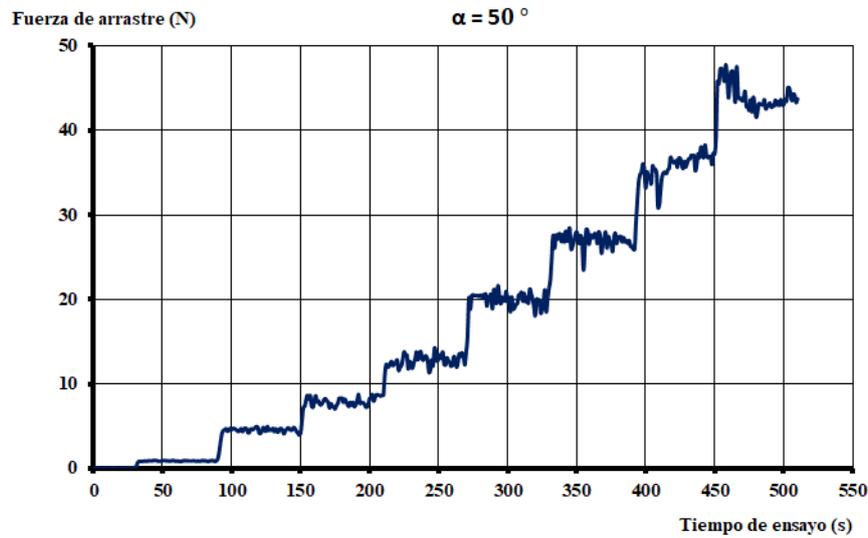


Figura 51. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 2

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior, a continuación, se muestran en la Tabla 14, los resultados de la fuerza de arrastre obtenida para cada una de las velocidades ensayadas.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
2,75	0,88
6,31	4,58
8,55	7,66
10,69	12,86
12,77	20,02
14,96	27,04
17,15	35,51
19,29	43,04

Tabla 14. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 2

A continuación, de nuevo se calculan tanto el coeficiente de arrastre como el número de Reynolds, mostrando los resultados obtenidos en la Tabla 15 y graficados en la Figura 52.

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
1,43	1,22E+05
1,42	2,80E+05
1,29	3,80E+05
1,39	4,75E+05
1,51	5,68E+05
1,49	6,65E+05
1,49	7,62E+05
1,43	8,57E+05

Tabla 15. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 2

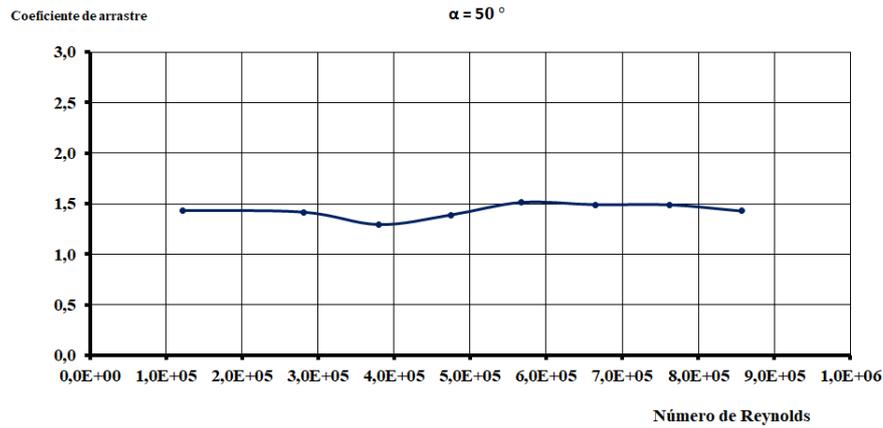


Figura 52. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 2

Tercer y cuarto ensayo

Los siguientes ensayos se realizaron siguiendo el mismo procedimiento y, variando la frecuencia de 5 Hz en 5 Hz. En el primero de ellos, se observó una rápida y fuerte interferencia entre las paredes del túnel y el modelo. Por tanto, se repitió éste tratando de solucionar el problema. Los resultados obtenidos en cuanto a la fuerza de arrastre en función de la velocidad (tiempo de ensayo), se muestran a continuación en la Figura 53 y la Tabla 16 para el tercer ensayo, así como, en la Figura 54 y la Tabla 17 para el cuarto.

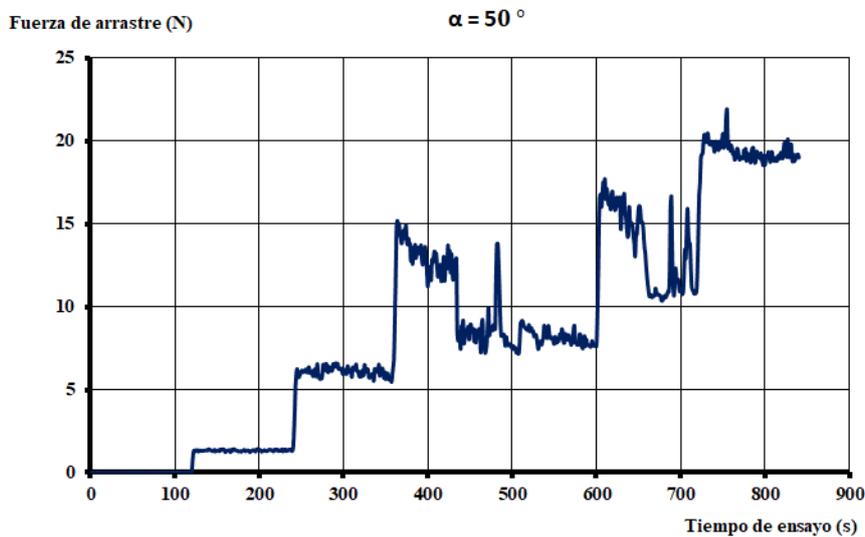


Figura 53. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 3

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,48	1,32
7,06	6,21
10,69	12,46
14,26	8,09
18,04	12,73
21,67	19,11

Tabla 16. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 3

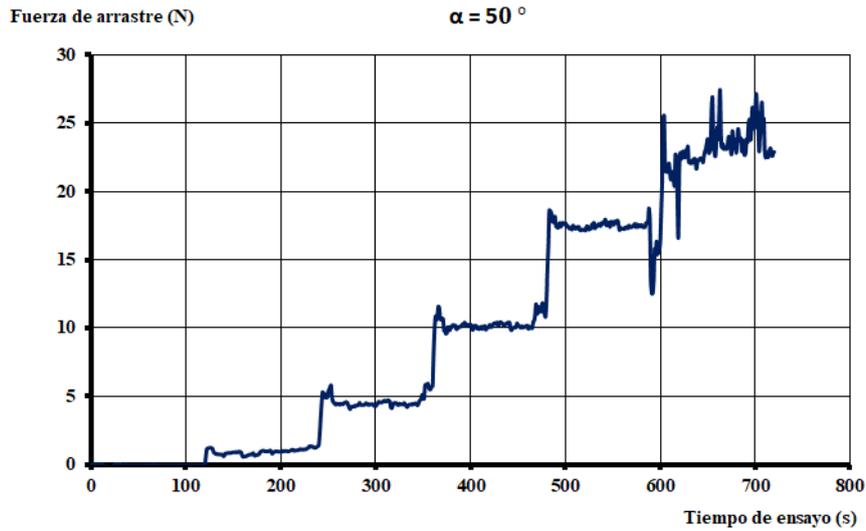


Figura 54. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 4

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,43	0,88
7,11	4,47
10,74	10,15
14,36	17,63
17,99	23,96

Tabla 17. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 4

Tras calcular, como en casos anteriores, tanto el coeficiente de arrastre como el número de Reynolds, estos resultados pueden verse a continuación en sendas tablas, Tabla 18 y Tabla 19, así como, su representación gráfica en la Figura 55 y la Figura 56.

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
1,35	1,55E+05
1,54	3,14E+05
1,35	4,75E+05
0,49	6,34E+05
0,48	8,02E+05
0,50	9,63E+05

Tabla 18. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B) modelo 2, ensayo 3

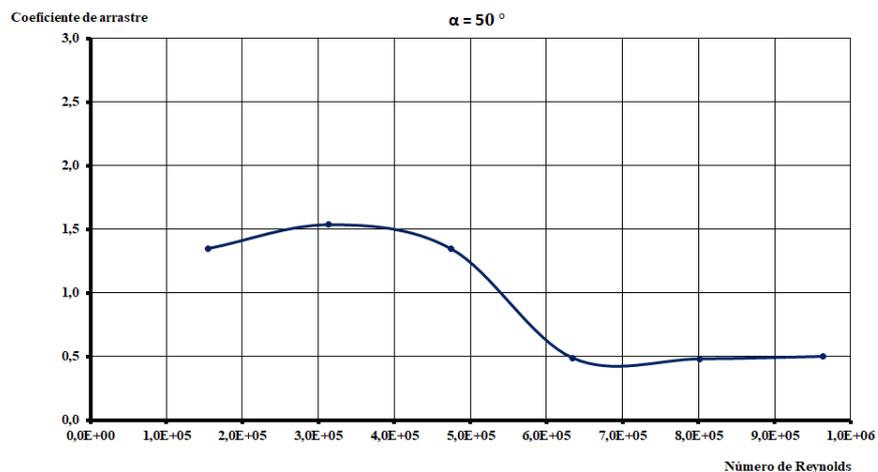


Figura 55. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
0,93	1,52E+05
1,09	3,16E+05
1,09	4,77E+05
1,05	6,38E+05
0,91	8,00E+05

Tabla 19. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4

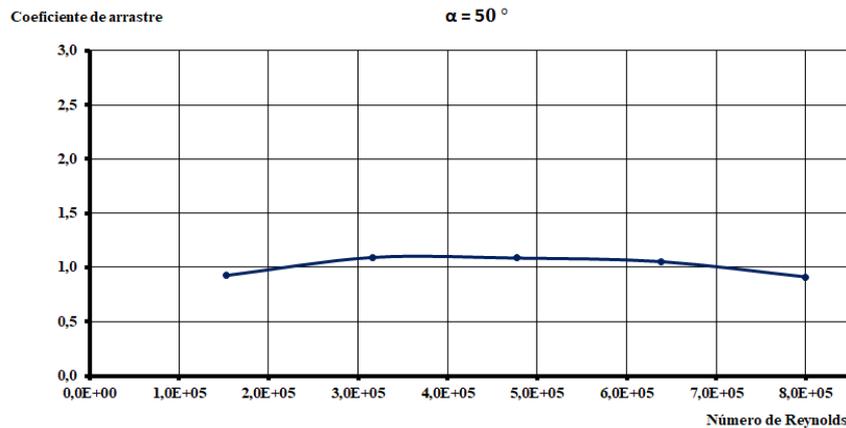


Figura 56. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4

6.2.1.2. Coeficiente de sustentación

Primer ensayo

Extraídos los resultados registrados respecto a la fuerza de sustentación sobre la maqueta (acción vertical del viento del túnel), se representaron éstos en función del tiempo como se muestra a continuación en la Figura 57, dónde cada escalón corresponde, una vez más, a una velocidad determinada, comprendidas en el mismo intervalo correspondiente a cada uno de los ensayos referentes al coeficiente de arrastre del capítulo 6.2.1.1.

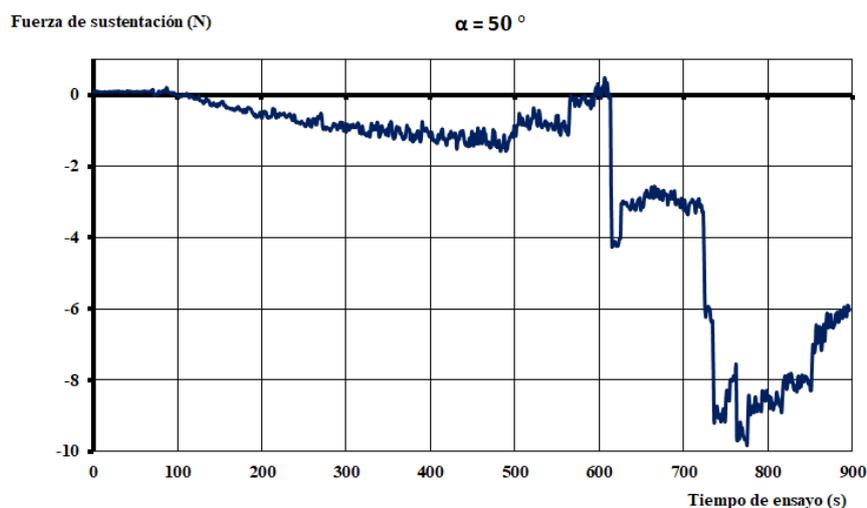


Figura 57. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 1

Del mismo modo que para el caso del coeficiente de arrastre y, siguiendo el mismo procedimiento empleado en los ensayos realizados en el primer túnel, se obtiene la fuerza de sustentación, para cada una de las velocidades ensayadas, como se muestra en la Tabla 20.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,43	0,01
4,17	-0,32
4,97	-0,55
5,61	-0,88
6,36	-0,97
7,06	-1,11
7,80	-1,23
8,45	-0,70
9,19	-0,18
9,99	-3,08
10,64	-3,07
11,38	-8,65
12,03	-8,24
12,77	-6,28

Tabla 20. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 1

A continuación, se han obtenido tanto el coeficiente de sustentación (obtenido a partir de la expresión (2)), como el número de Reynolds, en las mismas condiciones que el coeficiente de arrastre en los casos anteriores. Estos resultados se muestran en la Tabla 21.

Coefficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
-0,01	1,52E+05
0,23	1,85E+05
0,27	2,21E+05
0,34	2,50E+05
0,30	2,83E+05
0,28	3,14E+05
0,25	3,47E+05
0,12	3,75E+05
0,03	4,09E+05
0,38	4,44E+05
0,33	4,73E+05
0,82	5,06E+05
0,70	5,35E+05
0,47	5,68E+05

Tabla 21. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1

A continuación, al igual que en el resto de ensayos realizados, representando gráficamente estos resultados para el coeficiente de sustentación, se obtiene la situación gráfica expuesta en la Figura 58.

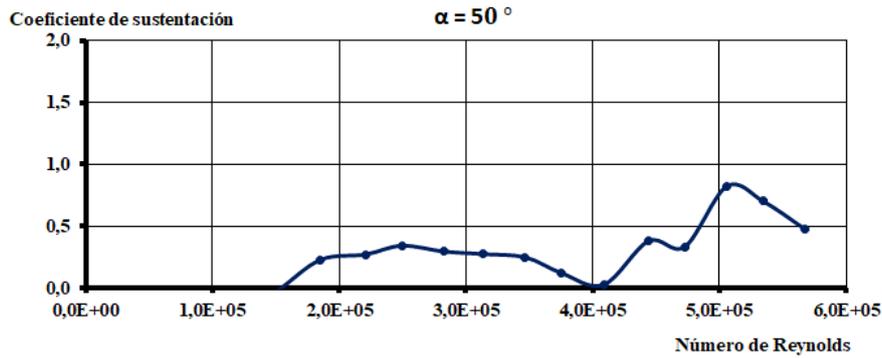


Figura 58. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1

Segundo ensayo

Los resultados referentes a la fuerza de sustentación en este segundo ensayo se muestran a continuación, en la Figura 59.

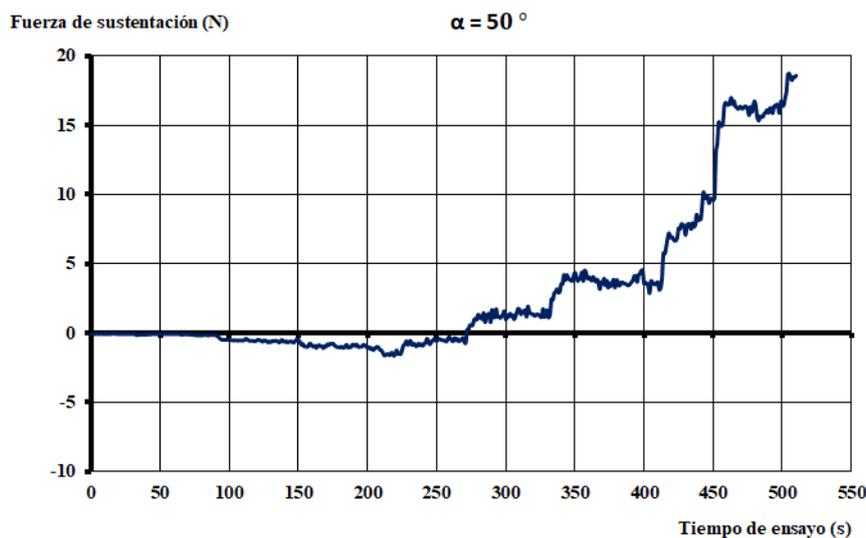


Figura 59. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 2

En este caso se observa que no ocurre lo mismo que en el primer ensayo, siendo en este segundo, la mayor parte de las fuerzas registradas positivas, mientras que, tanto en el primer ensayo como, en el tercer y cuarto, que se mostrarán a continuación, éstas se registran negativas. Por este motivo, se ha decidido no tener en cuenta los resultados obtenidos en cuanto a la sustentación en este segundo ensayo.

Tercer y cuarto ensayo

Puesto que, como se mencionó anteriormente en el capítulo 6.2.1.1, el procedimiento de ensayo ha sido el mismo en estos dos casos, se muestran a continuación ambos resultados referentes a la fuerza de sustentación, en la Figura 60 y la Figura 61, así como, en la Tabla 22 y la Tabla 23

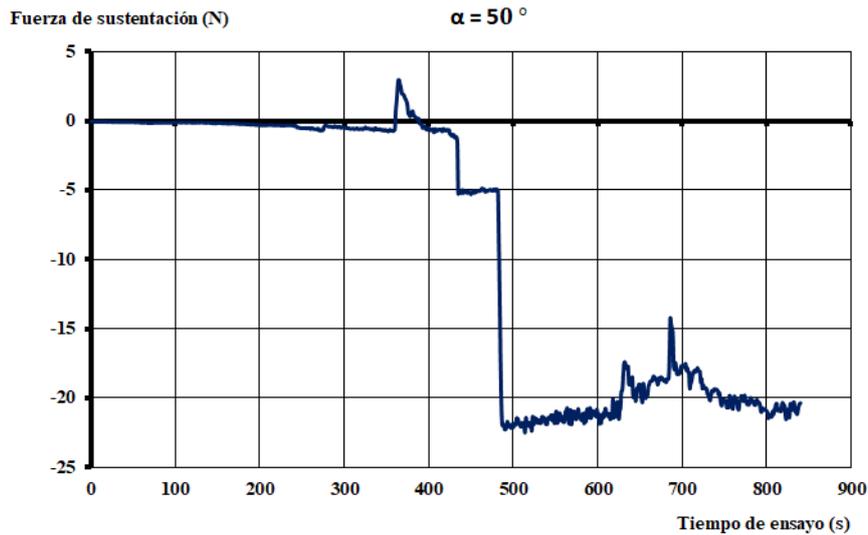


Figura 60. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 3

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,48	-0,22
7,06	-0,49
10,69	-0,76
14,26	-21,56
18,04	-19,22
21,67	-20,20

Tabla 22. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 3

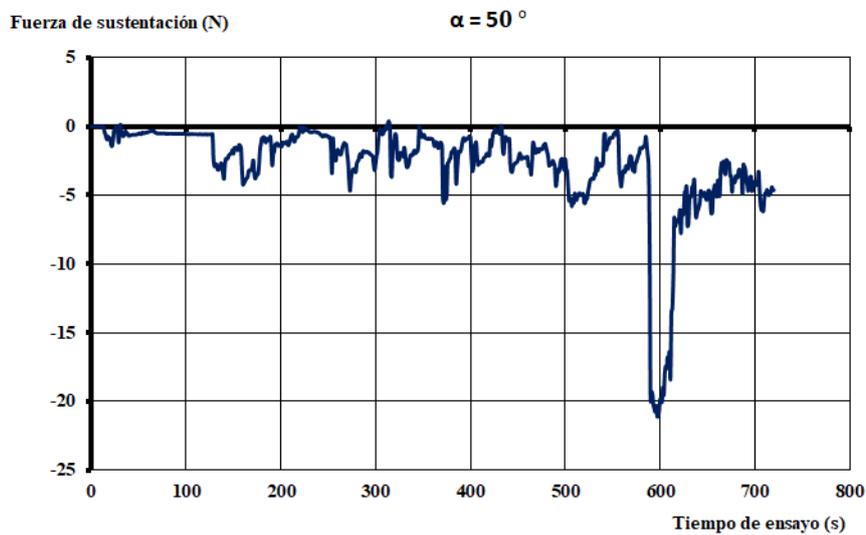


Figura 61. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 4

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,43	-1,92
7,11	-1,49
10,74	-1,47
14,36	-2,03
17,99	-4,27

Tabla 23. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 4

Tras calcular, como en casos anteriores, tanto el coeficiente de sustentación como, el número de Reynolds, estos resultados pueden verse a continuación en sendas tablas, Tabla 24 y Tabla 25, así como, su representación gráfica en la Figura 62 y la Figura 63.

Coefficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
0,23	1,55E+05
0,12	3,14E+05
0,08	4,75E+05
1,31	6,34E+05
0,73	8,02E+05
0,53	9,63E+05

Tabla 24. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3

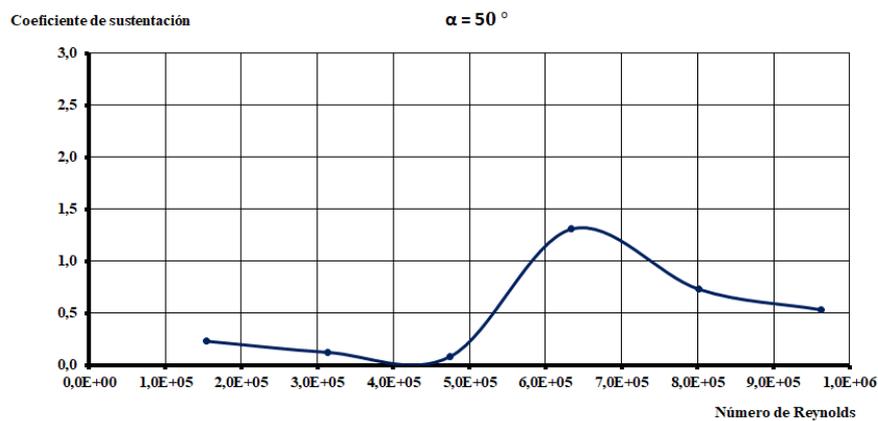


Figura 62. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3

Coefficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
2,01	1,52E+05
0,36	3,16E+05
0,16	4,77E+05
0,12	6,38E+05
0,16	8,00E+05

Tabla 25. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4

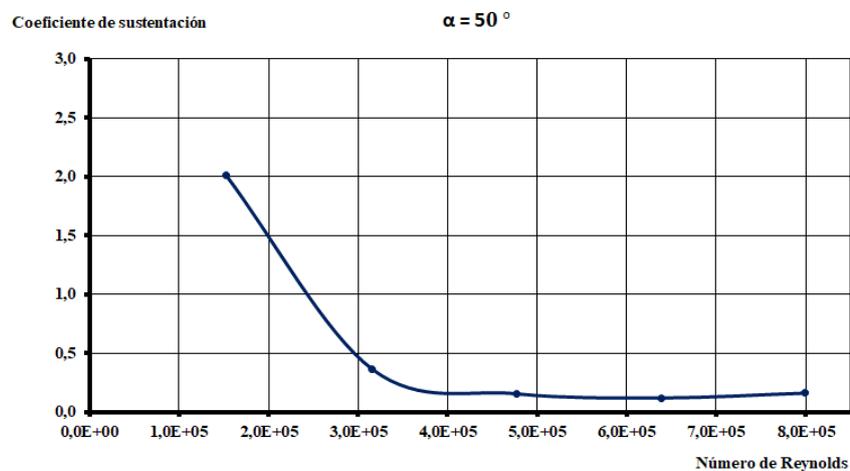


Figura 63. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4

En conclusión, como se ha expuesto anteriormente en el capítulo 5.2, el principal inconveniente de este modelo se observa que es el fuerte ruido introducido por la interacción de las paredes de la sección de prueba con el modelo, lo cual se solucionará para los ensayos realizados con el modelo 3).

6.2.1.3. Análisis estadístico

Se ha realizado un análisis estadístico correspondiente a una velocidad cualquiera de ensayo, de modo que se han estudiado tanto la media de fuerza medida correspondiente, así como, la desviación típica. Para ello, se ha tomado como modelo el cuarto de los ensayos, y una velocidad intermedia, 10,74 m/s. A continuación, se muestra, en la Figura 64, los datos registrados en cuanto a la fuerza de arrastre para esta velocidad, comprendidos en el intervalo de 20 segundos empleado para los cálculos posteriores.

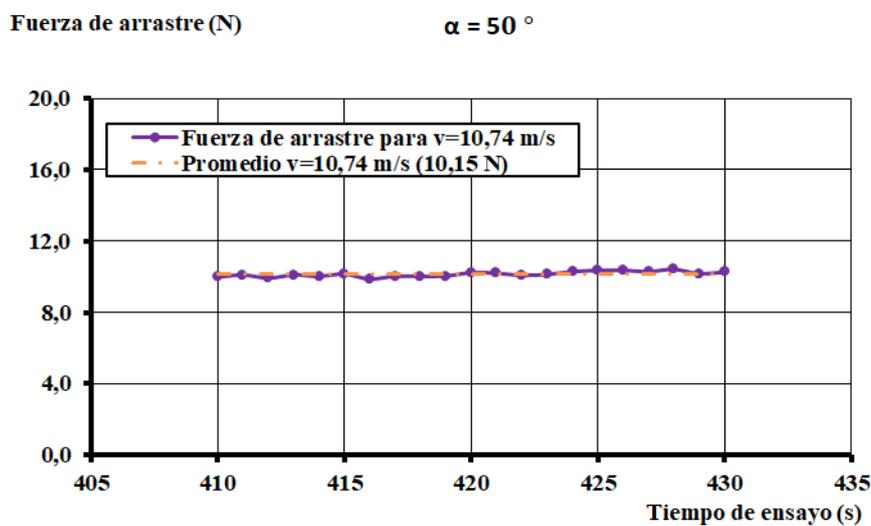


Figura 64. Análisis estadístico para fuerza de arrastre en el modelo 2) y una velocidad de 10,74 m/s

Además, se ha realizado el mismo procedimiento para los resultados obtenidos correspondientes a la fuerza de sustentación. Estos se muestran a continuación, en la Figura 65.

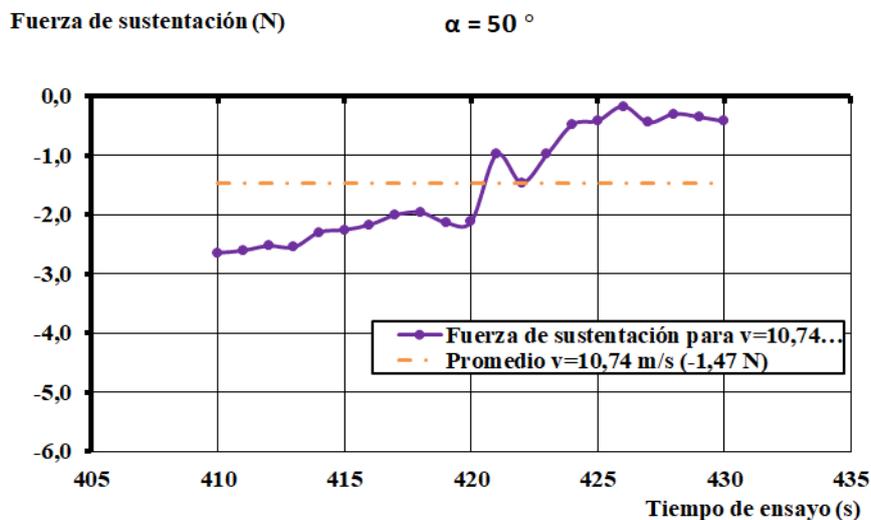


Figura 65. Análisis estadístico para fuerza de sustentación en el modelo 2) y una velocidad de 10,74 m/s

En este sentido, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 26, en cuanto a los parámetros estadísticos estudiados, como son la media y la desviación típica.

	Valor medio (N)	Desviación típica (N)
Fuerza de arrastre	10,15	0,15
Fuerza de sustentación	-1,49	0,93

Tabla 26. Parámetros estadísticos del modelo 2) para una velocidad de 10,74 m/s

Respecto a estos resultados, se concluye que las medidas obtenidas referentes a la fuerza de arrastre son mucho más precisas que aquellas correspondientes a la fuerza de sustentación ya que, la desviación es significativamente menor para las primeras de éstas. Debido a esto, los datos obtenidos para la fuerza de arrastre se encuentran agrupados en torno al valor medio, mientras que, los referentes a la sustentación se extienden lejos de la media, como se observa en la anterior Figura 65.

6.2.1.4. Análisis de la incertidumbre

Por otro lado, se trata además, de determinar un valor para la incertidumbre de medida que refleje la precisión de los resultados, tras llevarse a cabo la cadena de medida completa. Para ello, se han tenido en cuenta las precisiones correspondientes a cada uno de los equipos de medida utilizados, detalladas en los capítulos 4.1 y 4.2. Del mismo modo que para el análisis estadístico, se ha tomado como referencia de este estudio el cuarto de los ensayos, mostrando dichas incertidumbres obtenidas para cada una de las medidas, en la Tabla 27 y en la Tabla 28, en lo referente a la fuerza de arrastre medida y su coeficiente correspondiente obtenido.

f (Hz)	V_M (m/s)	V_t (m/s)	V (m/s)
5,00 ± 0,01	3,6 ± 0,7	3,254 ± 0,007	3,43 ± 0,35
10,00 ± 0,01	7,5 ± 0,3	6,713 ± 0,007	7,11 ± 0,17
15,00 ± 0,01	11,3 ± 0,4	10,171 ± 0,007	10,74 ± 0,18
20,00 ± 0,01	15,1 ± 0,4	13,630 ± 0,007	14,36 ± 0,19
25,00 ± 0,01	18,9 ± 0,4	17,088 ± 0,007	17,99 ± 0,20

Tabla 27. Incertidumbre de cada medida, arrastre (1)

F_{max} (N)	F_{min} (N)	F_D (N)	C_D
0,996 ± 0,002	0,767 ± 0,002	0,881 ± 0,002	0,93 ± 0,02
4,576 ± 0,009	4,369 ± 0,009	4,472 ± 0,009	1,09 ± 0,06
10,276 ± 0,021	10,021 ± 0,020	10,148 ± 0,020	1,09 ± 0,08
17,764 ± 0,036	17,495 ± 0,035	17,630 ± 0,035	1,05 ± 0,10
24,899 ± 0,050	23,027 ± 0,046	23,963 ± 0,048	0,91 ± 0,11

Tabla 28. Incertidumbre de cada medida, arrastre (2)

De este modo, en cuanto al mencionado coeficiente de arrastre, se observa que en la mayoría de los casos se obtiene una incertidumbre menor del 10%, lo que se considera aceptable, siendo la máxima del 12%.

Por otro lado, se muestran en la Tabla 29 y la Tabla 30, las incertidumbres obtenidas para el caso de la sustentación. De donde se concluye que, para ésta la incertidumbre relativa obtenida es mayor que para el caso del arrastre.

f (Hz)	V_M (m/s)	V_t (m/s)	V (m/s)
$5,00 \pm 0,01$	$3,6 \pm 0,7$	$3,254 \pm 0,007$	$3,43 \pm 0,35$
$10,00 \pm 0,01$	$7,5 \pm 0,3$	$6,713 \pm 0,007$	$7,11 \pm 0,17$
$15,00 \pm 0,01$	$11,3 \pm 0,4$	$10,171 \pm 0,007$	$10,74 \pm 0,18$
$20,00 \pm 0,01$	$15,1 \pm 0,4$	$13,630 \pm 0,007$	$14,36 \pm 0,19$
$25,00 \pm 0,01$	$18,9 \pm 0,4$	$17,088 \pm 0,007$	$17,99 \pm 0,20$

Tabla 29. Incertidumbre en cada medida, sustentación (1)

F_{max} (N)	F_{min} (N)	F_L (N)	C_L
$0,912 \pm 0,002$	$2,024 \pm 0,006$	$1,918 \pm 0,004$	$2,01 \pm 0,02$
$0,700 \pm 0,001$	$2,287 \pm 0,005$	$1,494 \pm 0,003$	$0,36 \pm 0,06$
$0,600 \pm 0,001$	$2,332 \pm 0,005$	$1,466 \pm 0,003$	$0,16 \pm 0,08$
$1,004 \pm 0,002$	$3,054 \pm 0,006$	$2,029 \pm 0,004$	$0,12 \pm 0,10$
$3,320 \pm 0,007$	$5,215 \pm 0,010$	$4,268 \pm 0,009$	$0,16 \pm 0,11$

Tabla 30. Incertidumbre en cada medida, sustentación (2)

6.2.2. Resultados obtenidos. Modelo 3)

6.2.2.1. Coeficiente de arrastre

Placa vertical

Como ya se ha mencionado, en el caso de este tercer modelo, en primer lugar, se realizó un ensayo con la placa vertical, es decir, con un ángulo de inclinación de 90° , a fin de contrastar los resultados obtenidos con la bibliografía disponible.

Extraídos los resultados registrados respecto a la fuerza de arrastre sobre la maqueta, se representaron éstos en función del tiempo como se muestra a continuación en la Figura 66, dónde cada escalón corresponde, de nuevo, a una velocidad determinada, comprendidas en el intervalo expuesto en la Tabla 3.

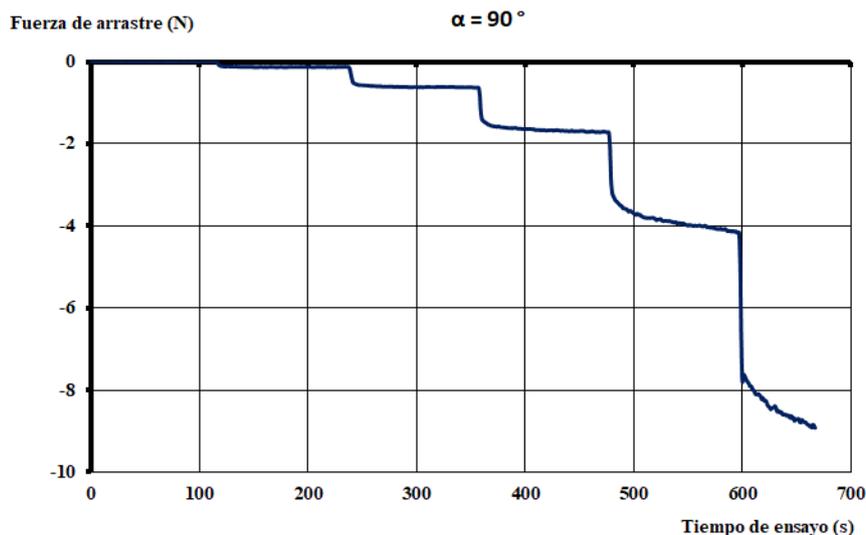


Figura 66. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, placa vertical

Siguiendo el mismo procedimiento de procesamiento de datos que en casos anteriores, se obtiene la fuerza de arrastre correspondiente a cada velocidad, tratando 20 valores comprendidos en el intervalo correspondiente a dicha velocidad. Los resultados de las fuerzas

de arrastre obtenidas para cada velocidad se muestran en la Tabla 31. Además, estas velocidades se obtienen como el valor medio entre la velocidad medida experimentalmente y, la obtenida a través de la expresión que la relaciona con la frecuencia de accionamiento del túnel (capítulo 7), como ya se ha comentado anteriormente.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,48	-0,13
7,06	-0,62
10,69	-1,67
14,26	-3,93
18,04	-8,82

Tabla 31. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, placa vertical

A continuación, a partir de las expresiones de cálculo del coeficiente de arrastre (obtenida a partir de (1)) (30), así como, del número de Reynolds (31), una vez más, se han obtenido éstos para cada una de las velocidades ensayadas. Siendo, en este caso la densidad del aire a 18°C 1,213 kg/m³ y su viscosidad 1,815·10⁻⁵ kg/ms [29], así como, el área de la maqueta de 0,300 m x 0,088 m, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 32.

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
0,67	6,97E+04
0,78	1,41E+05
0,91	2,14E+05
1,20	2,86E+05
1,69	3,62E+05

Tabla 32. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical

Representando los datos obtenidos que se observan en la tabla anterior, Tabla 32, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 67.

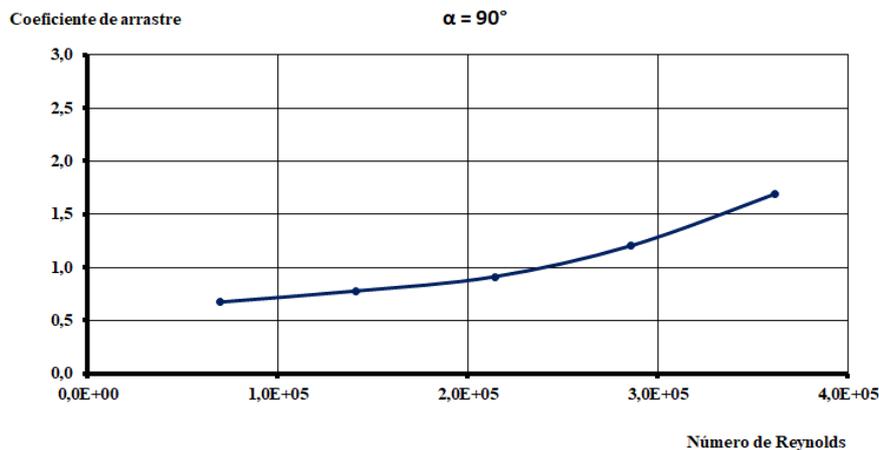


Figura 67. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical

Ángulo de inclinación de 40°

Los resultados obtenidos para la fuerza de arrastre en este caso, para un ángulo de inclinación de la placa modelo de 40°, se muestran a continuación en la Figura 68.

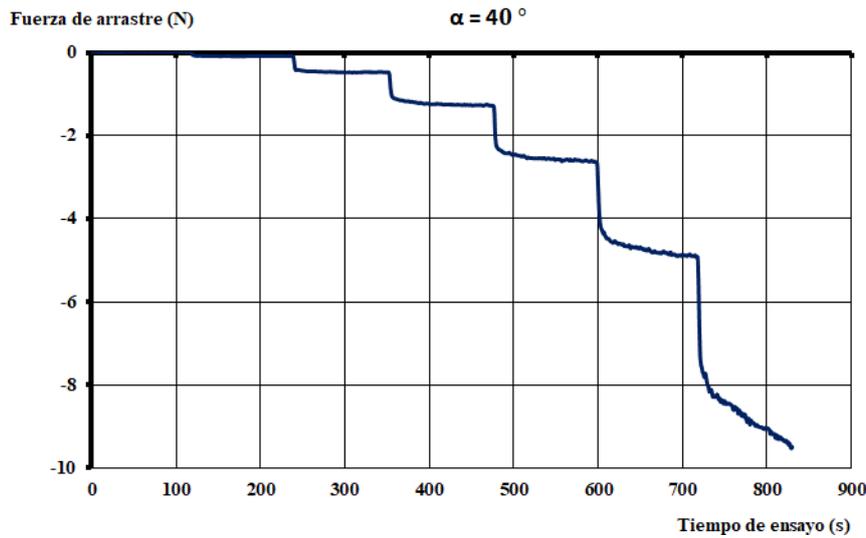


Figura 68. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior, se muestran en la Tabla 33, los resultados de la fuerza de arrastre obtenida para cada una de las velocidades ensayadas, así como, el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds en la Tabla 34 y graficados en la Figura 69.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,48	0,09
7,06	0,48
10,69	1,25
14,26	2,56
18,04	4,76
21,67	8,86

Tabla 33. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
0,47	6,97E+04
0,60	1,41E+05
0,68	2,14E+05
0,78	2,86E+05
0,91	3,62E+05
1,18	4,35E+05

Tabla 34. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

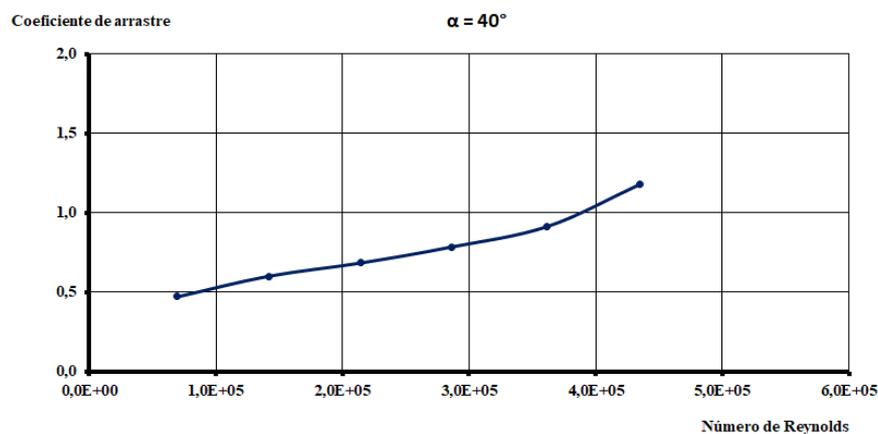


Figura 69. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

Ángulo de inclinación de 30°

Los resultados para la fuerza de arrastre con un ángulo de 30°, se muestran en la Figura 70.

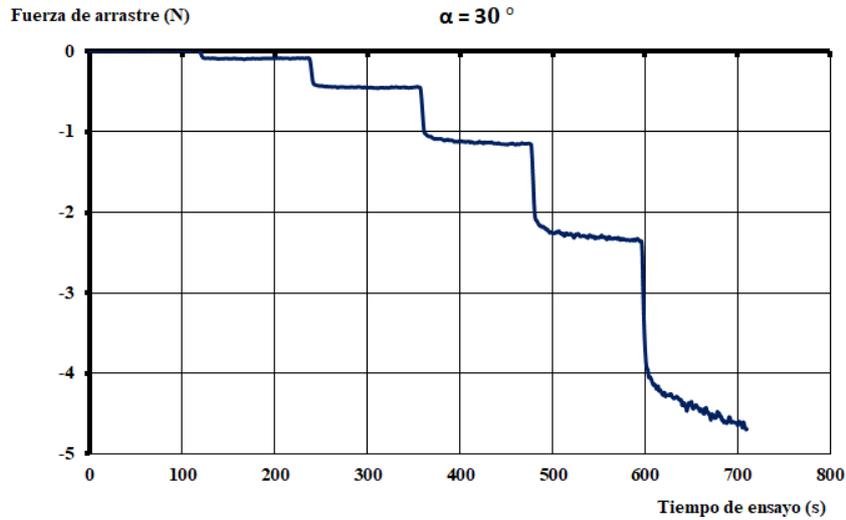


Figura 70. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior, a continuación, se muestran en la Tabla 35, los resultados de la fuerza de arrastre obtenida para cada una de las velocidades ensayadas, así como, el coeficiente de arrastre y número de Reynolds en la Tabla 36 y la Figura 71.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)
3,48	0,09
7,06	0,45
10,69	1,13
14,26	2,30
18,04	4,45

Tabla 35. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

Coefficiente de arrastre, C_D	Número de Reynolds, Re
0,47	6,97E+04
0,56	1,41E+05
0,62	2,14E+05
0,71	2,86E+05
0,85	3,62E+05

Tabla 36. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

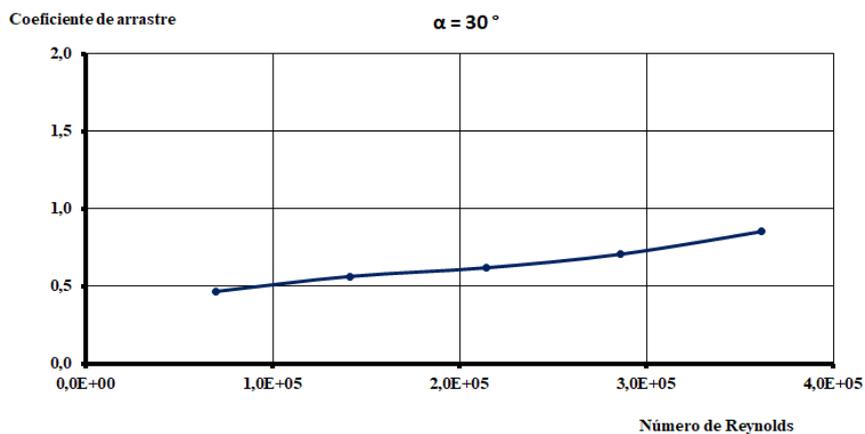


Figura 71. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

6.2.2.2. Coeficiente de sustentación

Placa vertical

Por otro lado, extraídos los resultados registrados respecto a la fuerza de sustentación sobre la maqueta, se representaron éstos, del mismo modo que para el caso de la fuerza de arrastre, en función del tiempo, como se muestra a continuación en la Figura 72, dónde cada escalón corresponde a una velocidad determinada, al igual que en casos anteriores. Dichas velocidades se encuentran comprendidas en el mismo intervalo correspondiente a cada uno de los ensayos referentes al coeficiente de arrastre del capítulo 6.2.2.1.

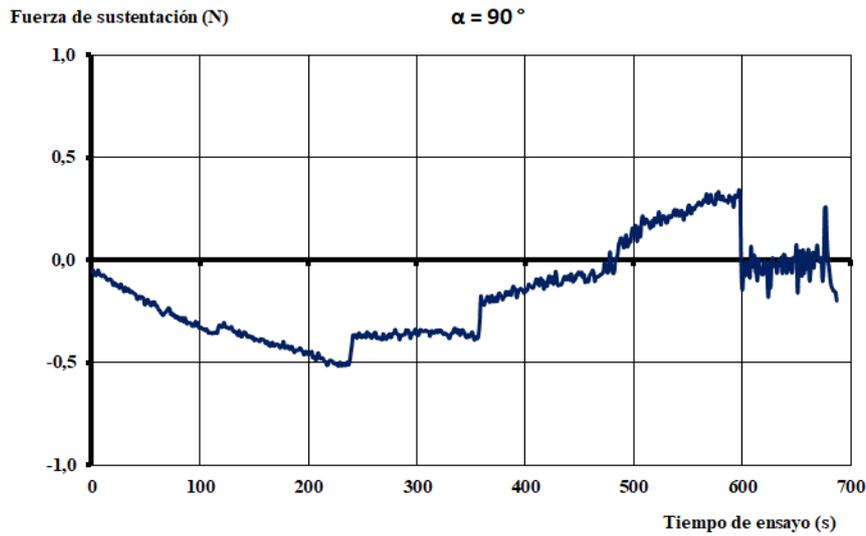


Figura 72. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, placa vertical

Del mismo modo que para el caso del coeficiente de arrastre y, siguiendo el mismo procedimiento empleado en cada uno de los ensayos anteriores, se obtiene la fuerza de sustentación, para cada una de las velocidades ensayadas, como se muestra en la Tabla 37.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,48	-0,42
7,06	-0,35
10,69	-0,10
14,26	0,22
18,04	-0,01

Tabla 37. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, placa vertical

A continuación, se han obtenido tanto el coeficiente de sustentación, como el número de Reynolds, en las mismas condiciones que el coeficiente de arrastre en los casos anteriores. Estos resultados se muestran en la Tabla 38.

Coeficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
2,19	6,97E+04
0,44	1,41E+05
0,06	2,14E+05
-0,07	2,86E+05
0,00	3,62E+05

Tabla 38. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical

Representando gráficamente estos resultados para el coeficiente de sustentación, se obtiene la Figura 73, correspondiente al caso de placa vertical.

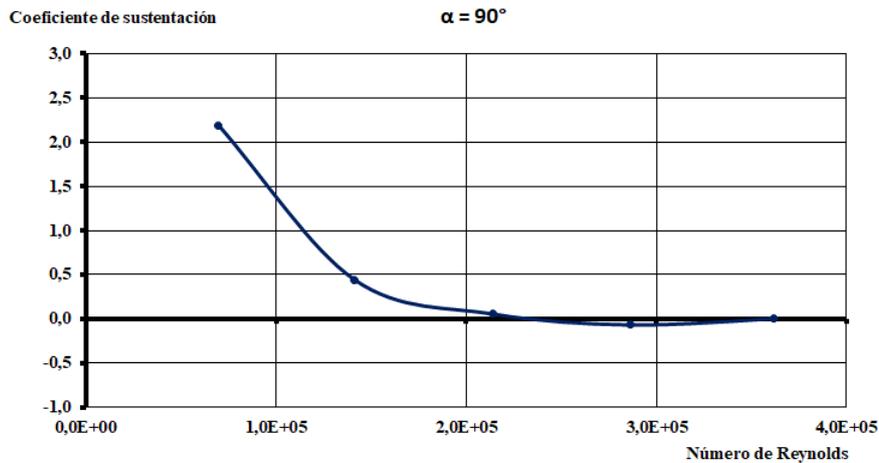


Figura 73. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical

Ángulo de inclinación de 40°

Los resultados obtenidos para la fuerza de sustentación en este caso, para un ángulo de inclinación de la placa modelo de 40°, se muestran a continuación en la Figura 74.

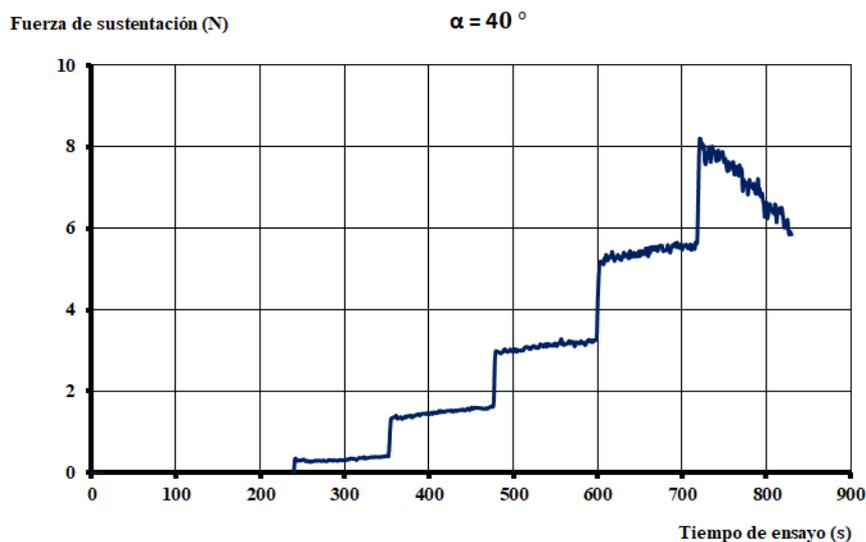


Figura 74. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior, a continuación, se muestran en la Tabla 39, los resultados de la fuerza de sustentación obtenida para cada una de las velocidades ensayadas.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,48	-0,20
7,06	0,32
10,69	1,51
14,26	3,13
18,04	5,45
21,67	7,07

Tabla 39. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

A continuación, de nuevo se calculan tanto el coeficiente de sustentación como el número de Reynolds, mostrando los resultados obtenidos en la Tabla 40 y graficados en la Figura 75.

Coeficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
-1,03	6,97E+04
0,40	1,41E+05
0,83	2,14E+05
0,96	2,86E+05
1,05	3,62E+05
0,94	4,35E+05

Tabla 40. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

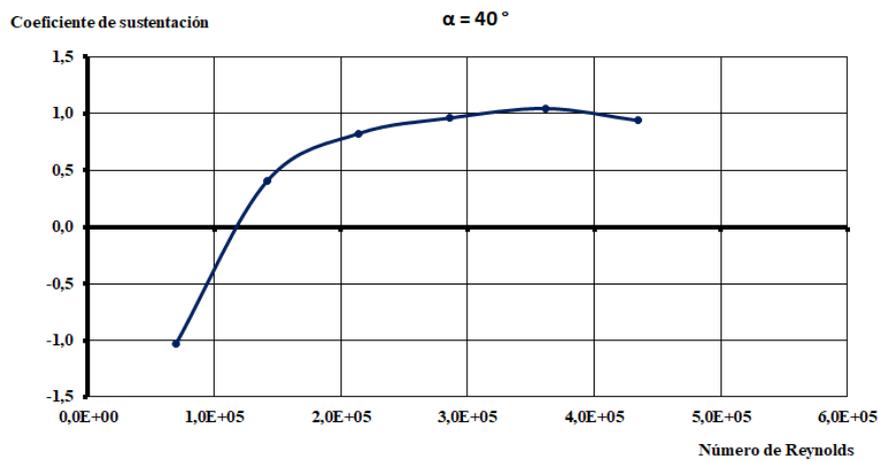


Figura 75. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°

Ángulo de inclinación de 30°

Los resultados obtenidos para la fuerza de sustentación en este caso, para un ángulo de inclinación de la placa modelo de 30°, se muestran a continuación en la Figura 76.

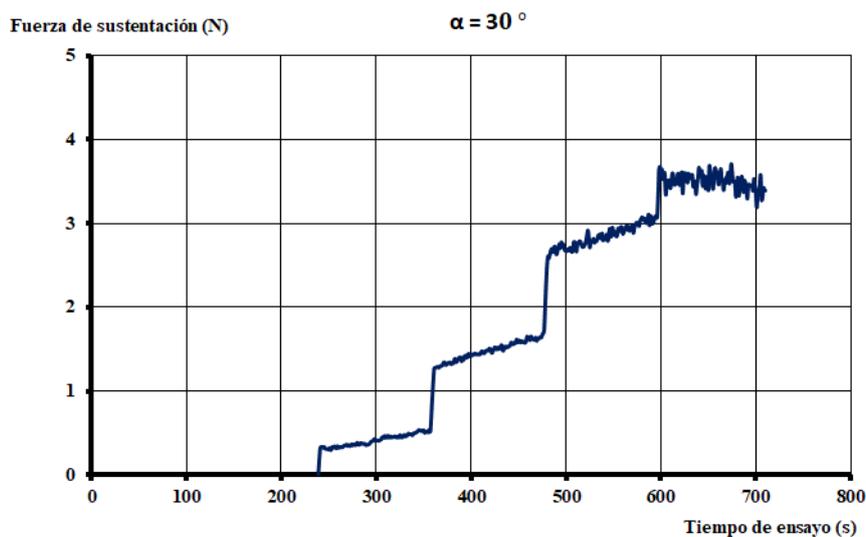


Figura 76. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior, a continuación, se muestran en la Tabla 41, los resultados de la fuerza de sustentación obtenida para cada una de las velocidades ensayadas.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)
3,48	-0,17
7,06	0,41
10,69	1,49
14,26	2,84
18,04	3,54

Tabla 41. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

A continuación, de nuevo se calculan tanto el coeficiente de sustentación como el número de Reynolds, mostrando los resultados obtenidos en la Tabla 42 y graficados en la Figura 77.

Coeficiente de sustentación, C_L	Número de Reynolds, Re
-0,87	6,97E+04
0,52	1,41E+05
0,81	2,14E+05
0,87	2,86E+05
0,68	3,62E+05

Tabla 42. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

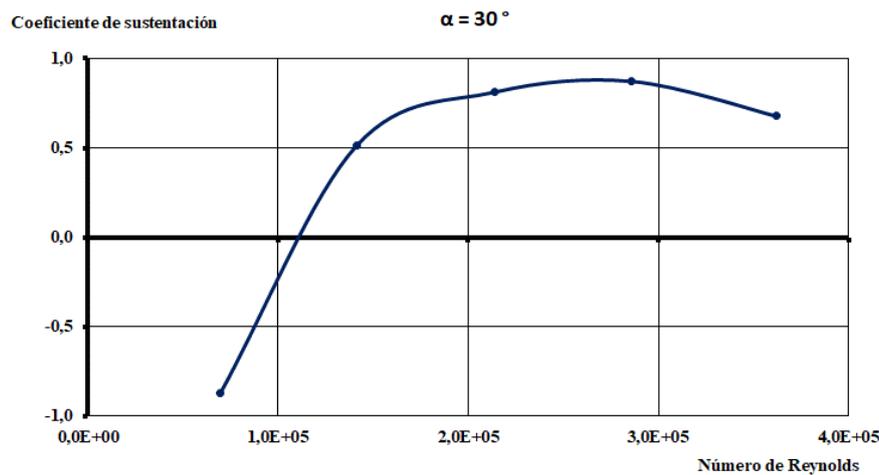


Figura 77. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°

Se comprueba, en conclusión, a partir de la representación gráfica de las fuerzas medidas respecto del tiempo de ensayo, la considerable disminución del ruido en las mediciones. Como ya se ha comentado en el capítulo 5, esto junto con el cumplimiento del resto de requisitos impuestos por la norma ASCE 7, hacen del modelo 3) el modelo óptimo para la realización del presente trabajo.

6.2.2.3. Análisis estadístico

Se ha realizado, también para el modelo 3), un análisis estadístico correspondiente a una velocidad cualquiera de ensayo, de modo que se han estudiado tanto la media de fuerza medida correspondiente, así como, la desviación típica. Para ello, se ha tomado como modelo el ensayo correspondiente al ángulo de inclinación de 40° , por ser, entre los que se dispone, el más similar al ensayado con el modelo 2). Además, se escoge una velocidad intermedia, 10,69 m/s en este caso, de nuevo la más similar a la estudiada en el análisis estadístico del modelo 2). A

continuación, se muestra, en la Figura 78, los datos registrados en cuanto a la fuerza de arrastre para esta velocidad, comprendidos en el intervalo de 20 segundos empleado para los cálculos posteriores.

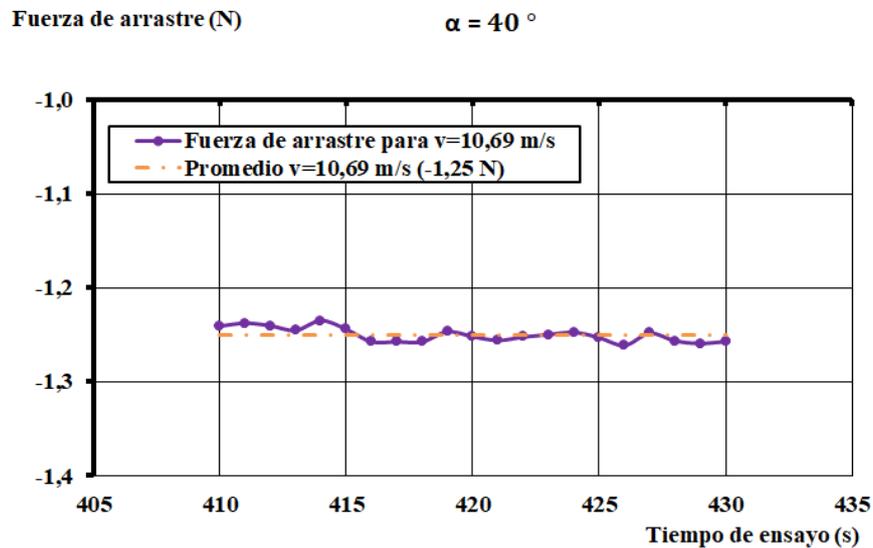


Figura 78. Análisis estadístico para la fuerza de arrastre en el modelo 3) y una velocidad de 10,69 m/s

Además, se ha realizado el mismo procedimiento para los resultados obtenidos correspondientes a la fuerza de sustentación. Estos se muestran a continuación, en la Figura 79.

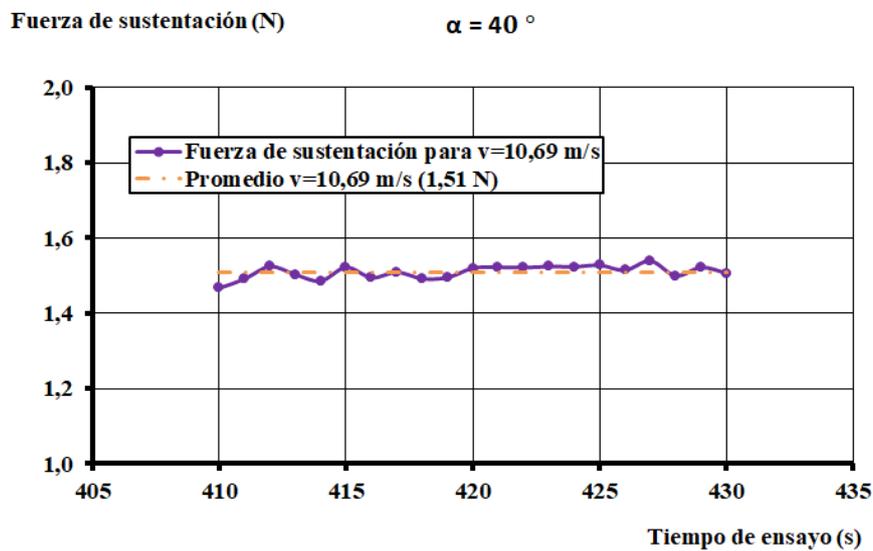


Figura 79. Análisis estadístico para la fuerza de sustentación en el modelo 3) y una velocidad de 10,74 m/s

En este sentido, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 43, en cuanto a los parámetros estadísticos estudiados, como son la media y la desviación típica.

	Valor medio (N)	Desviación típica (N)
Fuerza de arrastre	-1,25	0,01
Fuerza de sustentación	1,51	0,02

Tabla 43. Parámetros estadísticos del modelo 3) para una velocidad de 10,69 m/s

Respecto a estos resultados, se concluye que las medidas obtenidas para este último modelo son mucho más precisas que aquellas correspondientes al modelo 2). La desviación se observa significativamente menor para ambos casos, tanto de arrastre como de sustentación. Sin embargo, la diferencia es mucho más notable para el caso de la sustentación donde la desviación disminuye notoriamente manteniéndose el valor medio cercano al obtenido en el modelo 2). En cuanto al arrastre, la desviación también disminuye, haciéndolo a su vez el valor medio obtenido, lo que hace que el coeficiente de variación sea similar al obtenido con el modelo 2).

Dicho coeficiente de variación expresa el grado de variabilidad de la desviación y no debe ser superior al 2% siendo, cuánto más bajo éste, más homogéneos los valores registrados de la variable. En este sentido, en la Tabla 44, se muestra una comparativa de este parámetro para cada uno de los modelos 2) y 3).

	Modelo 2)	Modelo 3)
Fuerza de arrastre (%)	1,48	0,80
Fuerza de sustentación (%)	62,4	1,32

Tabla 44. Coeficiente de variación para cada modelo 2) y 3)

De esta forma, los resultados obtenidos en los análisis estadísticos referentes a los modelos 2) y 3), apoyan también el empleo del modelo 3) como modelo óptimo para el desarrollo del presente trabajo.

6.3. CONCLUSIONES

Tras varias pruebas en distintos bancos de ensayos y utilizando distintos modelos en busca de aquél que resultaría óptimo para la realización de este trabajo, en este capítulo se concluye que las medidas obtenidas para el tercer modelo resultan mucho más precisas que para el resto de los modelos ensayados, cumpliendo además, con los requisitos establecidos en el capítulo 5.

De esta forma, junto con las características de cada uno de los modelos probados, expuestas en capítulos anteriores, se concluye la conveniencia del estudio de este tercer modelo en el túnel B), para la realización del presente trabajo.

7. ENSAYOS FINALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez determinado el modelo óptimo para la realización del presente trabajo (modelo 3), se procede a realizar el montaje experimental, de manera análoga a como se realizó en pruebas previas, para el desarrollo de los ensayos finales.

Por otro lado, como ya se ha expuesto en sendos capítulos 4.1 y 4.2, el túnel B) tiene una velocidad máxima el doble que la del túnel A), sirviendo esto como criterio a la hora de elegir en qué túnel se realizarán los ensayos finales. Además, este túnel a pesar de contar con una sección de prueba más pequeña que la del túnel A), es suficiente para el modelo elegido (modelo 3)).

Además, se comprueba el cumplimiento del séptimo requisito impuesto por la norma ASCE 7 referente a la instrumentación, la cual debe ser consistente con las medidas requeridas. En cuanto al variador de frecuencia, el cual permite modificar la velocidad del viento en el túnel, como se ha expuesto anteriormente en el capítulo 4.2, su rango de frecuencia de salida va desde 0,10 Hz hasta 400 Hz, con una resolución de $\pm 0,01$ Hz. En este sentido, puesto que los ensayos a realizar se plantean con velocidades de entre 0 y 90 km/h, es decir, 0 y 25 m/s, el rango del variador es suficiente para esta finalidad, como se muestra a continuación (33 y 34), a partir de la ecuación que relaciona dicha frecuencia con la velocidad de accionamiento del túnel (32), representada gráficamente en la Figura 80.

$$v(m/s) = 0,6917f(Hz) - 0,2041 \quad (32)$$

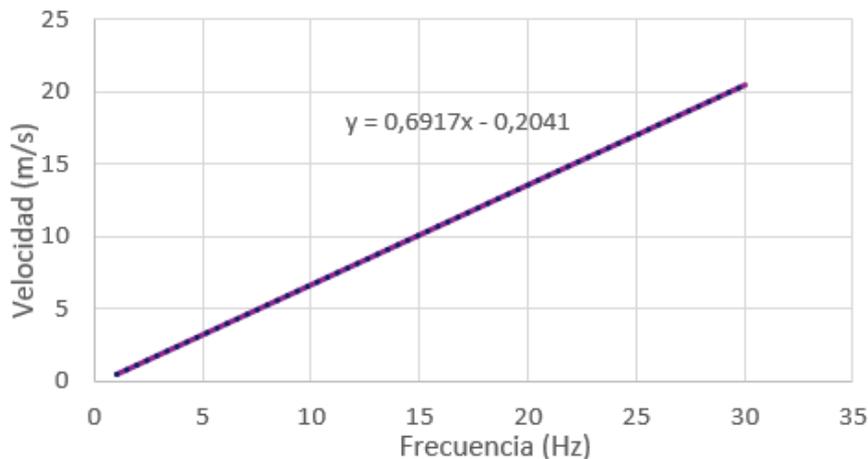


Figura 80. Relación frecuencia-velocidad en el túnel B)

$$v(m/s) = 0,6917f(Hz) - 0,2041 = 0 \quad \rightarrow \quad f = 0,30 \text{ Hz} \quad (33)$$

$$v(m/s) = 0,6917f(Hz) - 0,2041 = 25 \quad \rightarrow \quad f = 36,4 \text{ Hz} \quad (34)$$

En esta misma línea, el manómetro y anemómetro empleados para medir tanto la presión como la velocidad del viento a la entrada de la sección de descarga, es válido para su aplicación ya que cuenta con un rango de medida de la velocidad de entre 0 y 40 m/s. Además, sus resoluciones son suficientes tanto para la velocidad como para la presión, siendo éstas de $\pm 0,1$ m/s y ± 1 Pa, respectivamente.

Por otro lado, en cuanto al sensor de fuerza y par multiaxial, atendiendo a su capacidad de medida máxima expuesta anteriormente en el capítulo 4.1 y ya que, en los ensayos de prueba la fuerza máxima registrada ronda los 60 N y el momento los 5 Nm, este resulta también

adecuado para su aplicación al no superarse los 222 N ni los 5,6 Nm que tiene de capacidad de lectura.

De este modo, el montaje experimental se puede observar en la Figura 81, así como, el modelo en posición vertical en la Figura 82.



Figura 81. Montaje experimental ensayos modelo 3)



Figura 82. Modelo 3) en posición vertical

Así, como ya se mencionó en el capítulo 5.3, se observa cómo se optó por colocar un disco ligero a cada lado del modelo, de modo que haga las funciones de pared auxiliar sin perder el efecto 2D deseado.

De este modo, en primer lugar, se ha estudiado la influencia de la distancia del panel solar al suelo, variando la altura del modelo. Estos ensayos se han realizado con la placa en posición vertical a fin de poder comparar los resultados obtenidos en cada uno de ellos y, tener como referencia la bibliografía disponible en la que se estudian dichas placas en esta posición. A continuación, se han realizado distintos ensayos para distintos ángulos de inclinación de la placa,

comprendidos entre 10° y 80° . Para todos ellos, se han registrado las fuerzas y momentos en cada una de las tres direcciones del espacio y se han calculado tanto el coeficiente de arrastre como el de sustentación.

En este caso, el montaje experimental se ha dispuesto de manera que, las direcciones positivas de cada uno de los ejes quedan definidas como se muestra en la Figura 83.

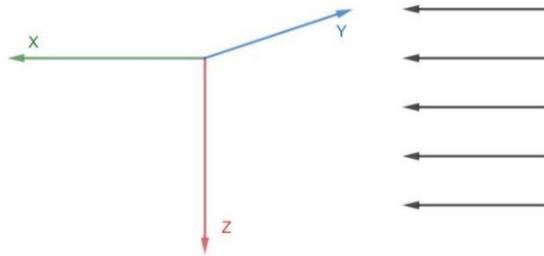


Figura 83. Dirección de los ejes en el túnel B) (modelo 3 - ensayos 2)

7.1. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA AL SUELO

Como ya se ha expuesto, se realizaron varios ensayos con diferentes distancias del modelo de panel solar respecto del suelo. Para ello, se estudió una distancia intermedia de 14,5 cm de altura, una distancia mayor, de 15,5 cm, así como, la mínima distancia posible, correspondiente a 11 cm, limitada por las paredes auxiliares colocadas en los laterales del modelo.

De esta forma, y variando la velocidad del viento cada dos minutos a lo largo del ensayo, las fuerzas, tanto de arrastre como de sustentación, obtenidas para cada una de las tres distancias ensayadas se muestran a continuación en la Figura 84 y la Figura 85, respectivamente.

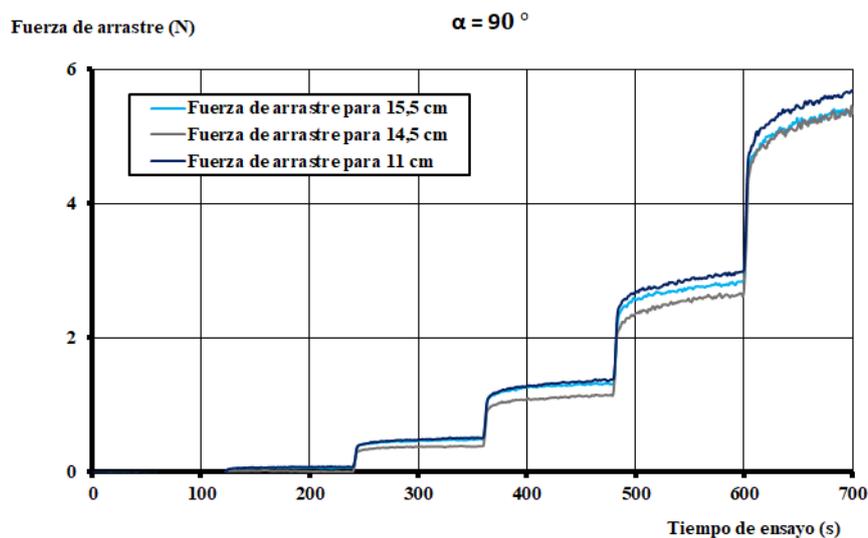


Figura 84. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

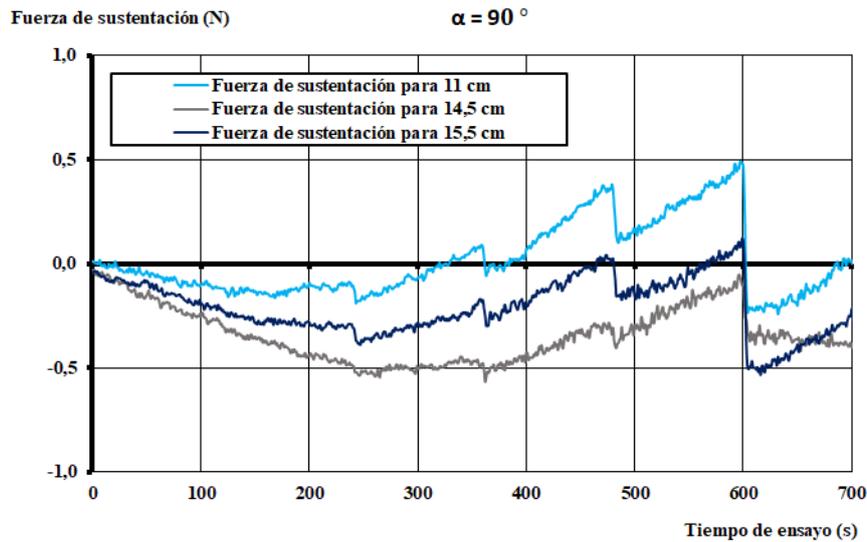


Figura 85. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

De esta forma, se observa que, tanto para la fuerza de arrastre como para la fuerza de sustentación, a mayor distancia respecto del suelo, mayores fuerzas ejercidas, para el caso de 14, 5 y 15,5 cm. Sin embargo, resulta destacable que, para una distancia al suelo de 11 cm en ambos casos las fuerzas son mayores que para las otras dos distancias. Esto es debido a que las paredes auxiliares casi rozan el suelo a pesar de encontrarse el panel a 11 cm de altura.

En este mismo sentido, a continuación en la Tabla 45 y la Tabla 46, se muestran los valores medios de las fuerzas de arrastre y sustentación, respectivamente, para cada una de las distintas velocidades ensayadas.

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de arrastre, F_D (N)		
	11 cm	14,5 cm	15,5 cm
3,33	0,08	0,02	0,07
6,91	0,48	0,38	0,47
10,39	1,31	1,10	1,28
13,91	2,84	2,53	2,71
17,44	5,49	5,21	5,24

Tabla 45. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

Velocidad, V (m/s)	Fuerza de sustentación, F_L (N)		
	11 cm	14,5 cm	15,5 cm
3,33	-0,13	-0,41	-0,28
6,91	-0,06	-0,50	-0,30
10,39	0,15	-0,41	-0,12
13,91	0,29	-0,20	-0,08
17,44	-0,13	-0,37	-0,38

Tabla 46. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

A continuación, del mismo modo que para las pruebas previas y, a partir de las expresiones de cálculo del coeficiente de arrastre (obtenida a partir de (1)) y de sustentación (obtenida a partir

de (2)), así como, del número de Reynolds, se han obtenido éstos para cada una de las velocidades ensayadas. Siendo, en este caso la densidad del aire a 18°C 1,213 kg/m³ y su viscosidad 1,815·10⁻⁵ kg/ms [29], así como, el área de la maqueta de 0,300 m x 0,088 m, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 47 y la Tabla 48.

Número de Reynolds	Coeficiente de arrastre, C_D		
	11 cm	14,5 cm	15,5 cm
6,67·10 ⁴	0,43	0,10	0,39
1,38·10 ⁵	0,63	0,49	0,61
2,08·10 ⁵	0,76	0,64	0,74
2,79·10 ⁵	0,91	0,82	0,87
3,50·10 ⁵	1,13	1,07	1,07

Tabla 47. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

Número de Reynolds	Coeficiente de sustentación, C_L		
	11 cm	14,5 cm	15,5 cm
6,67·10 ⁴	-0,75	-2,31	-1,59
1,38·10 ⁵	-0,08	-0,66	-0,39
2,08·10 ⁵	0,09	-0,24	-0,07
2,79·10 ⁵	0,09	-0,07	-0,03
3,50·10 ⁵	-0,03	-0,08	-0,08

Tabla 48. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

De este modo, dichos coeficientes aerodinámicos, tanto de arrastre como de sustentación, se representan a continuación, en la Figura 86 y la Figura 89 respectivamente, frente al número de Reynolds.

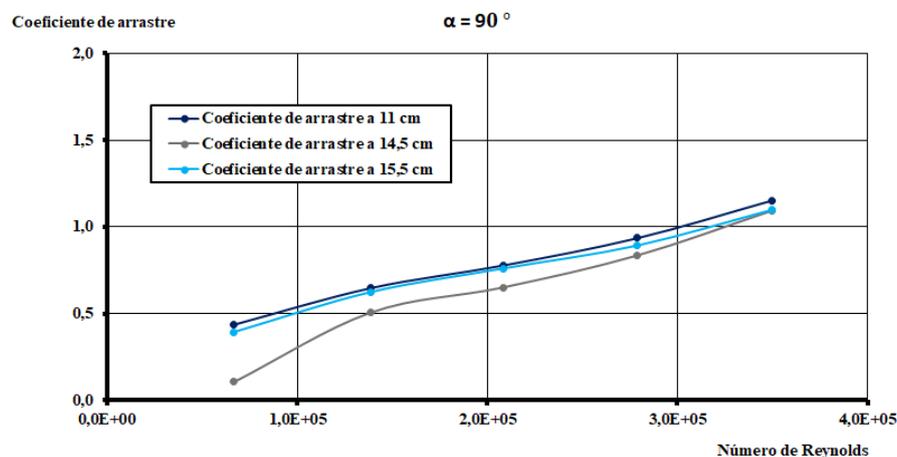


Figura 86. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

De este modo, y de acuerdo con la Figura 87, se observa que no se ha conseguido el efecto bidimensional buscado, ya que, por el contrario, el coeficiente de arrastre se sitúa próximo a 1, como debería ocurrir para el caso de cuerpos tridimensionales (Figura 88).

Forma		Número de Reynolds	C_D
Placa plana paralela		$> 10^5$	Véase Fig. 8.8(b)
Placa plana normal		$> 10^3$	2.0
Cilindro circular		Todos	Véase Fig. 8.10
Barra cuadrada		$> 10^4$	2.0
Barra cuadrada		$> 10^4$	1.50
Barra de triángulo equilátero		$> 10^4$	Extremo afilado hacia delante: 1.40 Cara plana hacia delante: 2.0
Sección C		$> 10^4$	2.30
Sección C		$> 10^4$	1.20
Perfil aerodinámico		Varios	(Véase la referencia [5])

Figura 87. Coeficientes de resistencia para diversos cuerpos bidimensionales [30]

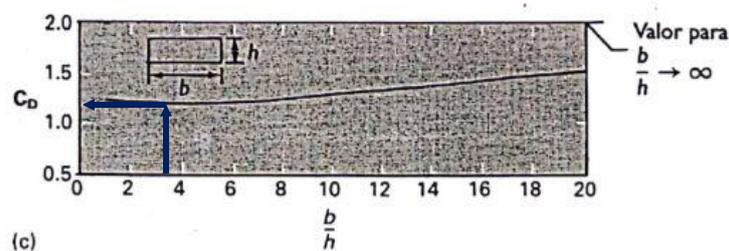


Figura 88. Efecto del ancho sobre el coeficiente de arrastre para una placa tridimensional normal al flujo [30]

Además, en la Figura 88, se representa el caso particular de la relación de aspecto ($b/h=a/b$) de la placa ensayada, es decir, $\frac{300\text{ mm}}{88\text{ mm}} = 3,4$. Por tanto, se concluye que, debido a que se alcanza el valor teórico correspondiente a la relación de aspecto 3,4 para una placa vertical tridimensional, el modelo escogido no representa un efecto bidimensional.

Esto puede ser debido a diversas limitaciones encontradas como la geométrica, la velocidad del viento y, en consecuencia, el valor del número de Reynolds obtenido, así como las vibraciones del montaje. A pesar del intento de simular un efecto 2D con la incorporación de las placas circulares laterales mencionadas anteriormente, no parece que se lograra totalmente obtener un ensayo 2D.

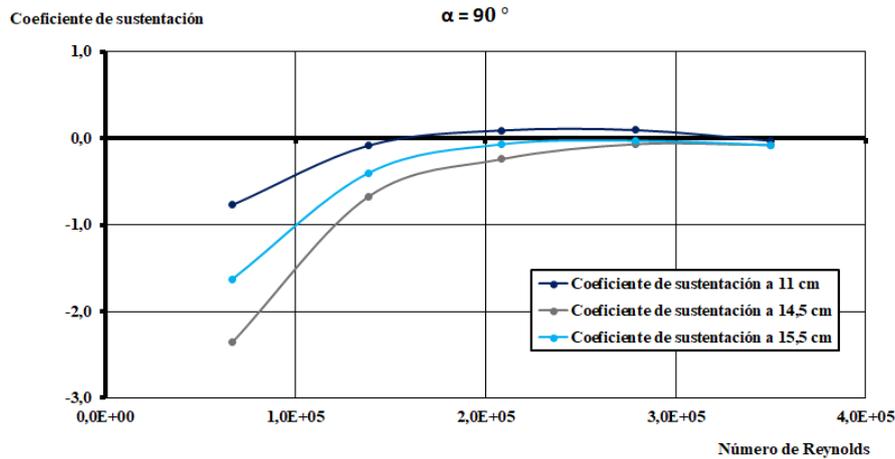


Figura 89. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo

De nuevo se comprueba, al igual que para el caso de las fuerzas, debido a su proporcionalidad, que no existe una tendencia clara debido a la excesiva proximidad de las paredes auxiliares al suelo de la sección de prueba del túnel para el caso de una distancia del modelo de 11 cm.

7.2. INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA PLACA

Como se ha mencionado anteriormente, tras el estudio de la influencia de la distancia al suelo y la calibración de la placa en posición vertical, se ha procedido a realizar diversos ensayos con distintos ángulos de inclinación para estudiar la influencia, en este caso, de este último. Estos ensayos se han realizado con distancias al suelo superiores a 14,5 cm, ya que esta distancia se eligió como la óptima considerando las limitaciones geométricas y los resultados anteriores en los que se varió dicha distancia. Además, para cada uno de los ángulos de inclinación estudiados, se ha realizado cada ensayo por duplicado, para un posterior análisis de repetibilidad de los datos obtenidos. De este modo, los datos a procesar son los valores medios obtenidos de cada par de ensayos referentes a cada uno de los ángulos de inclinación de la placa. En este sentido, se muestran a continuación, sendas representaciones gráficas de los resultados obtenidos para las fuerzas de arrastre y sustentación, en la Figura 90 y la Figura 91, respectivamente.

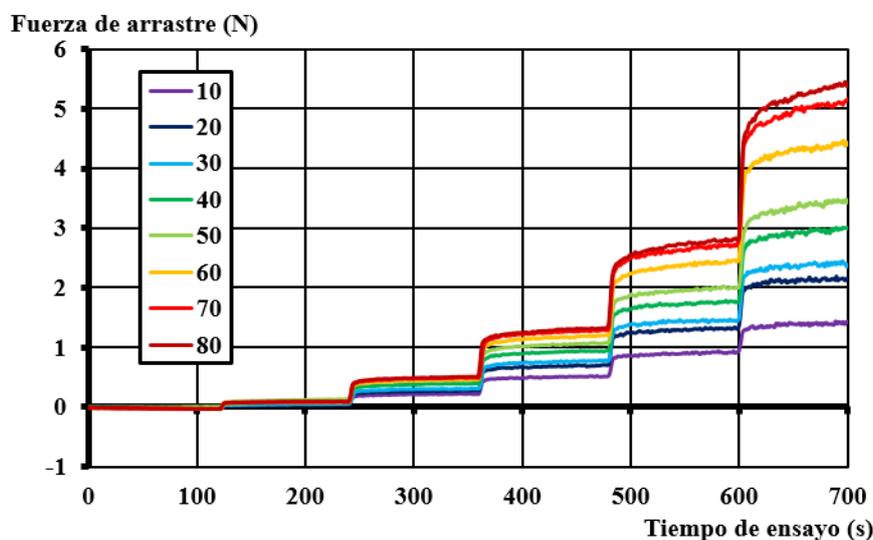


Figura 90. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación

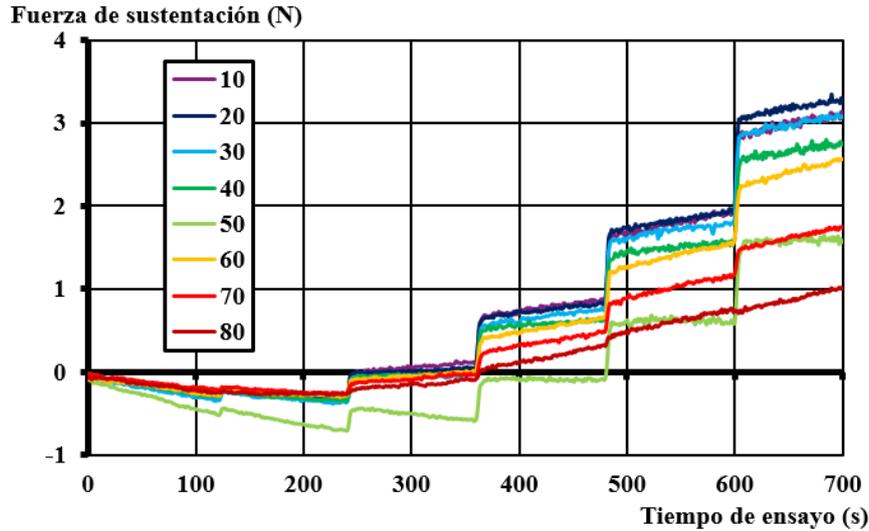


Figura 91. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación

Tras procesar los datos obtenidos respecto a las fuerzas ejercidas por el viento sobre el modelo y, siguiendo procedimientos análogos a los anteriores, los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos para cada uno de los ángulos se muestran en la Tabla 49, Tabla 50, Tabla 51 y la Tabla 52.

Número de Reynolds	Coeficiente de arrastre, C_D			
	10°	20°	30°	40°
6,67·10 ⁴	0,227	0,210	0,275	0,434
1,38·10 ⁵	0,280	0,354	0,405	0,498
2,08·10 ⁵	0,295	0,402	0,446	0,537
2,79·10 ⁵	0,296	0,426	0,474	0,564
3,50·10 ⁵	0,293	0,447	0,500	0,614

Tabla 49. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (1)

Número de Reynolds	Coeficiente de arrastre, C_D			
	50°	60°	70°	80°
6,67·10 ⁴	0,683	0,458	0,525	0,490
1,38·10 ⁵	0,605	0,596	0,648	0,648
2,08·10 ⁵	0,618	0,686	0,741	0,752
2,79·10 ⁵	0,643	0,777	0,864	0,893
3,50·10 ⁵	0,712	0,906	1,053	1,100

Tabla 50. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (2)

Número de Reynolds	Coeficiente de sustentación, C_L			
	10°	20°	30°	40°
6,67·10 ⁴	-1,365	-1,661	-1,843	-1,751
1,38·10 ⁵	0,077	0,003	-0,066	-0,061
2,08·10 ⁵	0,458	0,434	0,389	0,343
2,79·10 ⁵	0,590	0,598	0,565	0,493
3,50·10 ⁵	0,634	0,670	0,631	0,563

Tabla 51. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (1)

Número de Reynolds	Coeficiente de sustentación, C_L			
	50°	60°	70°	80°
$6,67 \cdot 10^4$	-3,417	-1,553	-1,332	-1,469
$1,38 \cdot 10^5$	-0,683	-0,065	-0,123	-0,196
$2,08 \cdot 10^5$	-0,053	0,310	0,212	0,093
$2,79 \cdot 10^5$	0,201	0,461	0,333	0,197
$3,50 \cdot 10^5$	0,334	0,514	0,346	0,185

Tabla 52. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (2)

Estos resultados referentes a los coeficientes tanto de arrastre como de sustentación de la placa, se muestran representados gráficamente a continuación en la Figura 92 y la Figura 93, respectivamente, para cada uno de los ángulos ensayados, previamente mencionados.

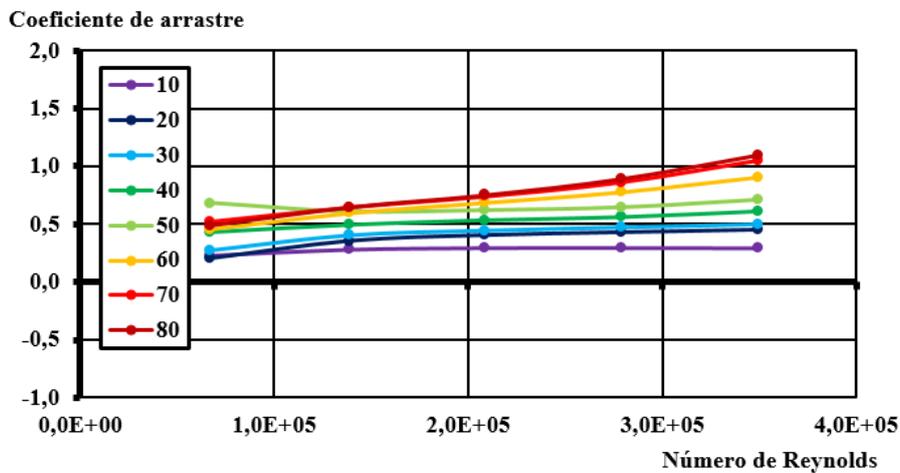


Figura 92. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación

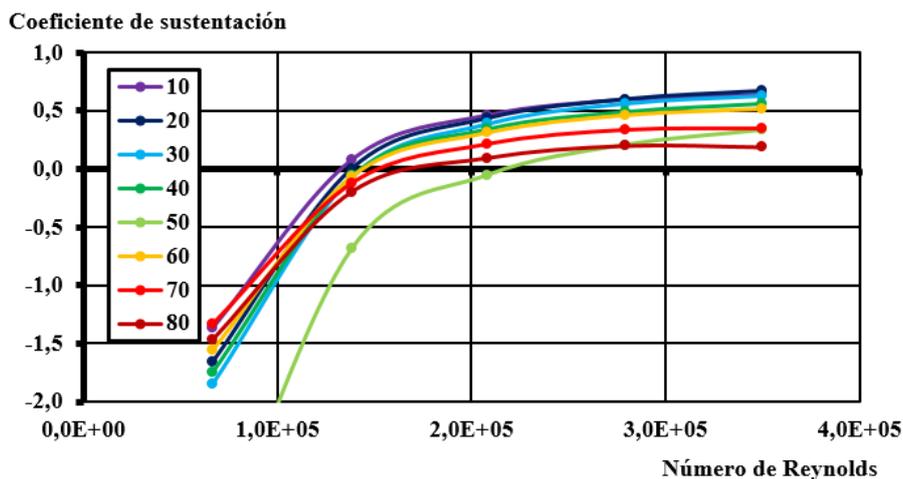


Figura 93. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación

De este modo, se observa, al igual que para el caso de las fuerzas tanto de arrastre como de sustentación, una clara tendencia en los coeficientes aerodinámicos, debido a su proporcionalidad. Esta tendencia, en el caso del arrastre, viene marcada, como cabría esperar,

por el aumento de dicho coeficiente a medida que se aumenta el ángulo de inclinación de la placa. Al contrario de lo que ocurre para el caso de la sustentación, en la que, a medida que se aumenta el ángulo de inclinación, dicho coeficiente aerodinámico disminuye.

Análisis de repetibilidad

La repetibilidad se trata de un concepto cualitativo que expresa la diferencia entre varias medidas sobre un mismo valor, tomadas en tiempos próximos, con el mismo sistema de medida y realizadas por el mismo operador. De este modo, aunque se trata de un concepto cualitativo, puede cuantificarse mediante parámetros como la desviación estándar. En cuanto a este parámetro, se considera una repetibilidad aceptable si se obtiene inferior al 10%, aunque podría considerarse aceptable en algunos casos entre un 10% y un 30%. En este sentido, se muestra en la Tabla 53, las desviaciones estándar obtenidas para cada uno de los ángulos de inclinación de la placa, analizando los datos obtenidos para cada velocidad de ensayo y hallando su valor medio.

	Coeficiente de arrastre, C_D			
Ángulo inclinación	10°	20°	30°	40°
Desviación estándar	3,2%	2,7%	4,3%	4,1%
Ángulo inclinación	50°	60°	70°	80°
Desviación estándar	14,2%	4,2%	1,9%	6,1%
	Coeficiente de sustentación, C_L			
Ángulo inclinación	10°	20°	30°	40°
Desviación estándar	7,0%	4,5%	2,1%	1,5%
Ángulo inclinación	50°	60°	70°	80°
Desviación estándar	10,3%	7,3%	2,4%	6,6%

Tabla 53. Análisis de repetibilidad

En conclusión, en todos los casos se obtienen valores de la desviación estándar inferiores al 10% excepto en el caso del ángulo de inclinación correspondiente a 50° que sobrepasa ligeramente este límite. Esto puede ser debido a cualquier pequeño error o interferencia en la medida ya que además se observa en resultados anteriores que los datos obtenidos para este ángulo se alejan también ligeramente de la tendencia marcada por el resto de casos.

7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la Figura 92 y la Figura 93, expuestas en el capítulo anterior, las cuales muestran los resultados finales para el modelo óptimo elegido, se obtienen tanto los coeficientes de arrastre, como de sustentación, en función del ángulo de inclinación de la placa. Para ello, a partir de las mencionadas figuras, se observa que, a partir de un número de Reynolds lo suficientemente alto, $3 \cdot 10^5$ como se muestra en estas figuras, los valores correspondientes a los coeficientes aerodinámicos se estabilizan en la mayoría de los casos.

En este sentido, se obtiene, como se muestra en la Figura 94, la siguiente evolución de estos coeficientes en función del ángulo de inclinación de la placa. Esta evolución ha sido hallada a partir de los promedios de los dos últimos valores obtenidos (para los dos números de Reynolds más altos ensayados), para disminuir los errores producidos en aquellos casos en los que los coeficientes parecen aún no haberse estabilizado por completo. Cabe destacar que, como se observaba en el análisis de repetibilidad de la Tabla 53, los ensayos correspondientes a un

ángulo de inclinación de la palca de 50°, no son del todo fiables, observándose además, una clara discontinuidad en este sentido para el caso del coeficiente de sustentación a continuación.

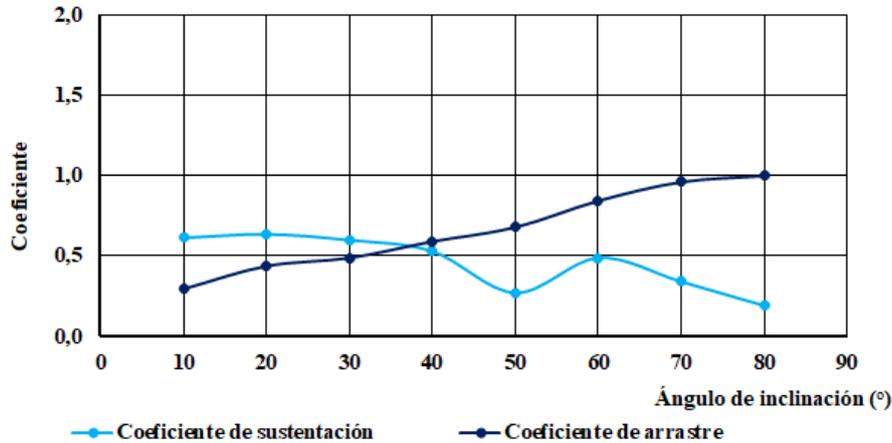


Figura 94. Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos en función del ángulo de inclinación

Por otro lado, se comprueba si se ha alcanzado la similitud dinámica, comprobando si se alcanza el número de Reynolds del prototipo para alguna de las velocidades ensayadas.

Suponiendo como prototipo un módulo fotovoltaico en disposición horizontal en Cádiz, de dimensiones 1650 x 1000 mm², y una velocidad de 29 m/s, como se observó en el capítulo 2.3, el número de Reynolds del mismo se calcula a continuación (35):

$$Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p} = \frac{1,213 \text{ kg/m}^3 \cdot 29 \text{ m/s} \cdot 1,65 \text{ m}}{1,815 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}} = 3,20 \cdot 10^6 \quad (35)$$

Por otro lado, el número de Reynolds del modelo para la mayor de las velocidades ensayadas es (36):

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = \frac{1,213 \text{ kg/m}^3 \cdot 17,44 \text{ m/s} \cdot 0,3 \text{ m}}{1,815 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}} = 3,50 \cdot 10^5 \quad (36)$$

De este modo, como se observa en las dos ecuaciones anteriores, (35) y (36), no se ha alcanzado la similitud dinámica, siendo el número de Reynolds del prototipo 10 veces mayor que el mismo correspondiente a la mayor de las velocidades ensayadas.

Por otra parte, se ha calculado la presión que ejercería el viento sobre el panel fotovoltaico prototipo a fin de comparar los resultados con los obtenidos a través de los cálculos según normativas, expuestos en el capítulo 2.3.

Por un lado, se han calculado, para cada ángulo de inclinación de la placa estudiado, las fuerzas tanto de arrastre como de sustentación, a partir de los coeficientes obtenidos, mostrados en la Figura 94, y las ecuaciones (1) y (2). Siendo el área del modelo 300 x 88 mm² y el del prototipo 1650 x 1000 mm² dichas fuerzas obtenidas se muestran en la Tabla 54.

A continuación, se ha calculado la fuerza resultante ejercida sobre el panel, como la resultante de las dos componentes formadas por la fuerza de arrastre, en la dirección horizontal, y la fuerza de sustentación, en la dirección vertical, según (37):

$$F_R = \sqrt{F_D^2 + F_L^2} \quad (37)$$

De este modo, dividida la fuerza entre el área del prototipo, se obtiene la presión ejercida por el viento en cada prototipo supuesto para cada uno de los ángulos de inclinación ensayados, mostrando los resultados a continuación, en la Tabla 54.

Ángulo (°)	C_D	F_D (N)	C_L	F_L (N)	F_R (N)	P (N/m ²)
10	0,294	247,76	0,612	514,95	571,45	346,34
20	0,436	367,32	0,634	533,72	647,90	392,67
30	0,487	409,86	0,598	503,34	649,10	393,40
40	0,589	495,82	0,528	444,56	665,94	403,60
50	0,677	570,01	0,270	227,64	613,79	371,99
60	0,842	708,31	0,488	410,44	818,63	496,14
70	0,958	806,53	0,340	285,95	855,72	518,62
80	0,997	839,11	0,191	160,84	854,39	517,81

Tabla 54. Resultados de presión ejercida sobre el prototipo supuesto de módulo fotovoltaico

Así, se comprueba que para el caso estudiado en el capítulo 2.3, correspondiente a un ángulo de inclinación de 20°, se obtiene una presión ejercida por el viento de 392,67 N/m², muy similar a la obtenida según la normativa americana ASCE7 (372 N/m²) y muy por debajo de la obtenida a través de la europea, el Eurocódigo 1 (1226 N/m²).

7.4. CONCLUSIONES

En resumen, en este capítulo, se ha expuesto, por un lado, la influencia de la distancia al suelo, de la cual se concluye que las fuerzas tanto de arrastre como de sustentación resultan mayores, cuanto mayor es esta distancia respecto al plano horizontal. Por otro lado, se concluye el aumento tanto de las fuerzas ejercidas por el viento, como de los coeficientes aerodinámicos correspondientes, a medida que aumenta el ángulo de inclinación de la placa para el caso de arrastre, ocurriendo lo contrario para el caso de la sustentación.

8. CONCLUSIONES

En este TFM se ha realizado un estudio debido a la escasez de normativas aplicables al diseño de estructuras soporte de paneles fotovoltaicos, cuyo objetivo trata de la obtención de los coeficientes aerodinámicos en este tipo de instalaciones. Como se vio en el capítulo 2, la gran discrepancia entre los resultados de las cargas de diseño en aplicación de las normativas vigentes, se trata de la principal motivación de este trabajo.

En consecuencia, en este trabajo se ha tratado de obtener, de forma experimental, unos resultados estándar correspondientes a los coeficientes aerodinámicos, que sirvan de aplicación al diseño de estructuras soporte de placas fotovoltaicas. Para ello, se realizaron diversos ensayos en distintos túneles de viento. En primer lugar, estos ensayos se realizaron para determinar el banco de ensayos más adecuado para la realización de este estudio. En segundo lugar, también se realizaron pruebas para determinar el modelo a ensayar más óptimo, fiel y representativo de la realidad.

Una vez determinados tanto el banco de ensayos como el modelo a utilizar en la realización del presente trabajo, se realizaron los denominados ensayos finales, de los cuales se extrajeron los resultados correspondientes tanto a las fuerzas ejercidas por el viento, como a los consecuentes coeficientes aerodinámicos, así como su extrapolación a la presión del viento de aplicación según normativa.

De este modo, se ha expuesto que la resultante de la fuerza aerodinámica sobre una superficie depende, en gran medida, de las características del viento, tales como la dirección, la velocidad o las condiciones de exposición, así como, de la forma de la estructura. En este caso, un panel fotovoltaico se trata de una placa plana inclinada, sobre las que se encuentran diversos estudios aerodinámicos, tanto numéricos como experimentales. Como ya se expuso anteriormente en el capítulo 3, son numerosos los autores que han realizado investigaciones sobre este tipo de placas, incluso desde 1927, analizando la influencia de diversos factores como el ángulo de inclinación, el número de Reynolds y la turbulencia, la distancia al suelo o el factor de escala.

En el presente trabajo se ha analizado la influencia sobre los coeficientes aerodinámicos de los siguientes aspectos:

- Distancia del panel fotovoltaico al suelo.
- Ángulo de inclinación de la placa.
- Número de Reynolds.

Para ello, se han planteado ensayos en dos túneles diferentes, eligiendo, según lo expuesto en el capítulo 4, como óptimo aquél que proporcionaba una velocidad del viento máxima mayor. Además, también se analizaron distintos modelos de panel para conseguir una representación de la realidad lo más fiel posible, tratando de corregir, de un modelo a otro, los inconvenientes que se encontraban en el modelo previo. De este modo, como se mencionó anteriormente en el capítulo 5, el tercer modelo ensayado resultó ser el modelo óptimo para este trabajo, cumpliendo con relaciones de aspecto estándar, limitaciones de bloqueo y variabilidad del ángulo de inclinación, así como, tratando de simular un efecto 2D, y demostrando la conveniencia de estudio de este modelo en el túnel B) en el capítulo 6.

Como se ha expuesto en el capítulo anterior 7, se obtienen diversas conclusiones, tanto positivas como negativas.

Por un lado, en cuando a la influencia de la distancia al suelo, se observó unas mayores fuerzas tanto de arrastre como de sustentación cuanto mayor era la distancia respecto al suelo, concordando además éstos, con los resultados obtenidos por Ortiz et al. (2015), expuestos anteriormente en el capítulo 3. Sin embargo, se observó que la menor de las distancias ensayadas no resultó del todo concluyente quizá debido a su excesiva proximidad al suelo. En este sentido, sería interesante ensayar más distancias diferentes al suelo y mayores que la máxima ensayada en este trabajo. Por otro lado, analizando el coeficiente de arrastre obtenido para la placa en posición vertical y las distintas distancias al suelo ensayadas, se concluyó que el modelo no simulaba el efecto 2D buscado tras contrastar los resultados con la bibliografía disponible en cuando a placas planas bidimensionales normales al flujo. Por el contrario, contrastando estos resultados con la bibliografía disponible en este sentido para placas tridimensionales, se encontró un gran acuerdo entre los resultados obtenidos y ésta para una misma relación de aspecto.

Tanto el no haber conseguido una tendencia clara en cuanto a la influencia de la distancia al suelo para la placa en posición vertical, como no haber conseguido el efecto 2D deseado, puede deberse a una serie de limitaciones encontradas como pueden ser el aspecto geométrico, la velocidad del túnel de viento, así como las numerosas vibraciones del montaje experimental.

Una vez ensayados el resto de ángulos de inclinación de la placa planteados en este trabajo, se observa tanto en los coeficientes aerodinámicos como en las fuerzas obtenidas, debido a su proporcionalidad, una clara tendencia de éstos. Por un lado, en el caso del arrastre, tanto las fuerzas como los coeficientes correspondientes, aumentan a medida que lo hace el ángulo de inclinación de la placa, como cabría esperar al ser cada vez mayor la superficie de actuación del viento. Por el contrario, para el caso de la sustentación, tanto las fuerzas como los coeficientes, disminuyen a medida que se aumenta dicha inclinación.

Por otro lado, no se ha alcanzado la similitud dinámica en los ensayos realizados, debido a la no igualdad expuesta anteriormente, entre los números de Reynolds de modelo y prototipo, teniendo además una discontinuidad apreciable, en los resultados obtenidos para los coeficientes correspondientes a una inclinación de 50°.

Teniendo en cuenta estos aspectos, y los resultados obtenidos en cuanto a la presión de acción del viento (capítulo 7.3), se obtiene un claro acuerdo entre estos y la obtenida a través de la norma americana ASCE7 (capítulo 2.2), no ocurriendo lo mismo para el caso del Eurocódigo 1 (capítulo 2.1).

Por último, a continuación, se muestran en sendas figuras, Figura 95 y Figura 96, los coeficientes tanto de arrastre como de sustentación obtenidos en este trabajo, en comparación con los resultados la bibliografía estudiada en el capítulo 3.

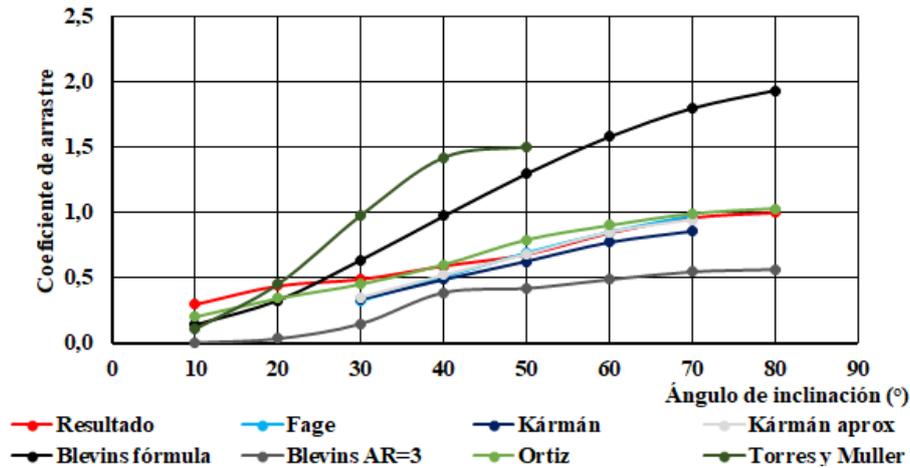


Figura 95. Resultados del coeficiente de arrastre obtenidos en comparación con la bibliografía

En cuanto al coeficiente de arrastre se observa un claro acuerdo con numerosos resultados expuestos en el análisis bibliográfico como son Fage et al. (1927) [9], tanto la fórmula de Kármán, como su aproximación, así como Ortiz et al. (2015) [11]. Para el caso de Blevins (1984) [10], se obtiene un similitud apreciable a pesar de no corresponder exactamente a la relación de aspecto ensayada en este trabajo. Por otro lado, en cuanto a su fórmula (fórmula de Blevins), ésta ya mostraba una cierta disparidad con sus otros resultados en la Figura 12.

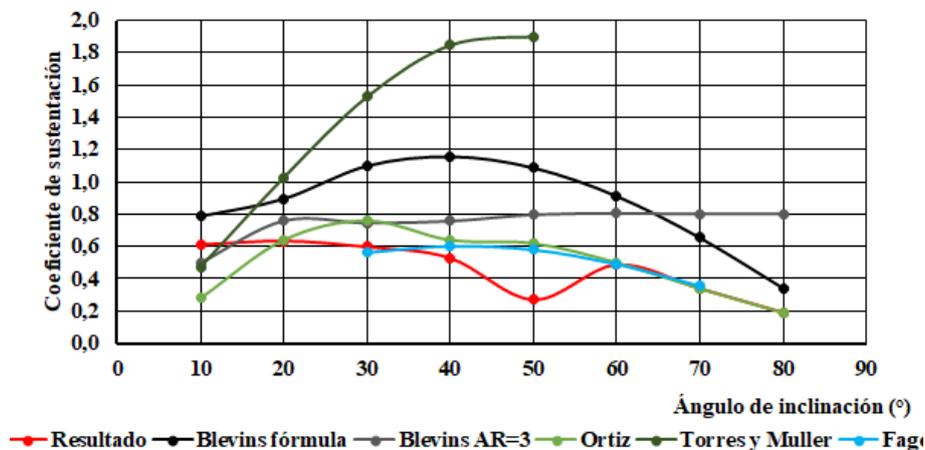


Figura 96. Resultados de coeficiente de sustentación obtenidos en comparación con la bibliografía

En cuanto al coeficiente de sustentación, teniendo en cuenta la discontinuidad obtenida para el caso de una inclinación de 50°, se obtiene de nuevo un considerable acuerdo con Fage et al. (1927) [9], así como con Ortiz et al. (2015) [11]. Además, una vez más, se obtiene, una ligera concordancia con los resultados de Blevins (1984) [10], a pesar de no corresponder a la misma relación de aspecto ensayada, sino a la más próxima disponible, mientras que se encuentra un desacuerdo con su fórmula teórica.

Por otro lado, como también se expuso en el análisis bibliográfico, Ortiz et al. (2015), obtuvieron que la relación de arrastre y elevación sigue de cerca la tangente del ángulo de incidencia para prácticamente todas las mediciones. De este modo, en este trabajo, se ha comprobado también esta relación entre el ratio arrastre-sustentación, y la tangente del ángulo de inclinación de la placa, como se observa a continuación en la Figura 97.

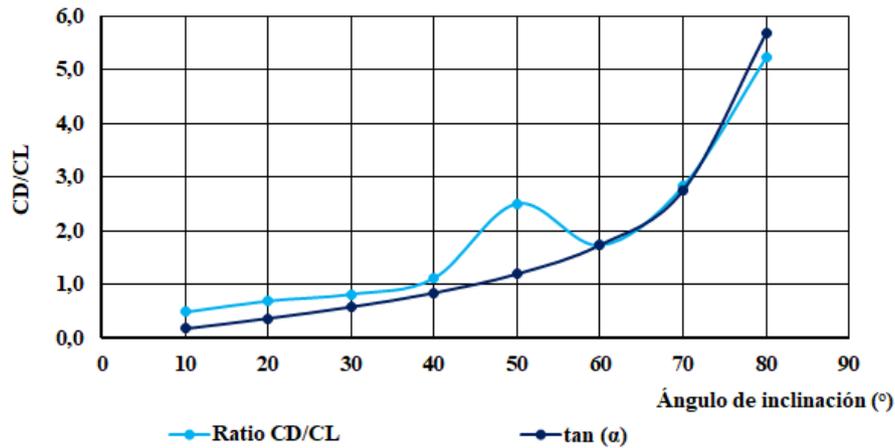


Figura 97. Relación entre ratio arrastre-sustentación y la tangente del ángulo de inclinación

En definitiva, en cuanto a los resultados correspondientes tanto al coeficiente de arrastre como al de sustentación, se concluye un gran acuerdo con los datos disponibles en la bibliografía correspondiente a diversas investigaciones realizadas en el tiempo, así como, una concordancia con los valores de aplicación de una de las normativas expuestas con anterioridad.

8.1. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros como continuación de este trabajo, sería interesante un estudio más amplio de la influencia de la distancia al suelo, con ensayos a distancias superiores a la máxima estudiada en este trabajo.

Por otro lado, sería conveniente resolver la discontinuidad obtenida para el caso de un ángulo de inclinación de 50° y así poder obtener resultados más relevantes.

Del mismo modo, sería interesante estudiar, además, la influencia de la relación de aspecto en el caso de módulos fotovoltaicos, puesto que Blevins (1984) [10], encontraba una clara tendencia a disminuir los coeficientes de arrastre a medida que se aumenta dicha relación, y a aumentar los correspondientes a la sustentación.

Por último, existe la posibilidad de simular numéricamente el flujo en esta geometría y comprobar el grado de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo. Puesto que la idea inicial de este trabajo incluía la comparación de resultados con un trabajo previo que abordaba la simulación numérica de este tipo de placas en 2D y, como no se ha llegado a conseguir dicho efecto, se plantea la posibilidad de comparar los resultados obtenidos con una simulación numérica en 3D.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Castillo, J. (2018, 30 de marzo). El viento destroza 7 paneles solares de La Mudarra con 120.000 euros de pérdida. *Diario de Valladolid*. [Versión electrónica: <http://www.diariodevalladolid.es/noticias/valladolid> Última consulta: 20 de septiembre de 2018].
- [2] Fenés, G. (2018, 23 de agosto). Por el viento se voló importante parque solar que construyó Jinko Solar en San Juan. *Energía Estratégica*. [Versión electrónica: <http://www.energiaestrategica.com> Última consulta: 21 de noviembre de 2018].
- [3] Dunn, J. (2015, 6 de mayo). This industrial building suffered at the hands of the tornado. Solar panels have been left strewn all over the road in scenes of devastation. *Daily Mail*. [Versión electrónica: <https://www.dailymail.co.uk> Última consulta: 21 de noviembre de 2018].
- [4] (2015, 16 de junio). Wild winds cause damage, injury in Gunma. *The Japan Times*. [Versión electrónica: <https://www.japantimes.co.jp> Última consulta: 21 de noviembre de 2018].
- [5] Chronicle, D. (2017, 10 de mayo). Gales damage world's largest solar park. *Deccan Chronicle*. [Versión electrónica: <https://www.deccanchronicle.com> Última consulta: 21 de noviembre de 2018].
- [6] Yunus A. Çengel & John M. Cimbala (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (pp.297-300). McGraw-Hill.
- [7] España, Asociación Española de Normalización (2018). *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*. UNE-EN 1991-1-4.
- [8] Structural Engineering Institute. (2006). *Minimum design loads for buildings and other structures*. (Vol. 7, No. 5). American Society of Civil Engineers (ASCE).
- [9] Fage, A., Johansen, F.C. (1927) *On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span (Containing Papers of a Mathematical and Physical Character)*. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A116, (pp. 170-197).
- [10] Blevins, R.D. (1984) *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold Company, Inc. (pp. 322-335).
- [11] Ortiz, X., Rival, D., Wood, D. (2015) *Forces and Moments on Flat Plates of Small Aspect Ratio with Application to PV Wind Loads and Small Wind Turbine Blades*. Canadá: Academic Open Access Publishing: Energies.
- [12] London, UK, ESDU: Engineering Sciences Data Unit (1970). *Fluid Forces and Moments on Flat Plates*. ESDU 70015.
- [13] Torres, G.E., Muller, T.J. (2004) *Low Aspect Ratio Aerodynamics at Low Reynolds Numbers*. AIAA J. 42, (pp. 865-873).
- [14] Fail, R., Lawford, J.A., Eyre, R.C.W. (1959) *Low-Speed Experiments on the Wake Characteristics of Flat Plates Normal to the Aisream*. ARC R & M 3120. Aeronautic Research Council: London, UK.

- [15] Winner, H. (1936) *Flow Phenomena on Plates and Airfoils of Short Span*. NACA TM 798. National Advisory Committee for Aeronautics: Washington, DC, USA.
- [16] Holmes, J.D., Letchford, C.W., Lin, N. (2006) *Investigations of Plate-type Windborne debris-Part II: Computed Trajectories*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 94 (pp. 21-39).
- [17] Gould, R.W.F. (1970) *Wake Blockage Corrections in a Closed Wind Tunnel for One or Two Wall-Mounted Models Subject to Separated Flow*. ARC R & M 3649. Aeronautical Research Council: London, UK.
- [18] Gregory A. Kopp, Steve Farquhar, Murray J. Morrison. (2012) *Aerodynamic Mechanisms for Wind Loads on Tilted, Roof-mounted, Solar Arrays*. Ontario: Journal Engineering and Industrial Aerodynamics, 111.
- [19] Tielman, H.W., Surry, D., Metha, K.C. (1997) *Full/model Scale Comparison of Surface Pressured on the Texas Tech Experimental Building*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 61. (pp. 1-23).
- [20] Hoxey, R.P, Reynolds, A.M., Richardson, G.M., Robertson, A.P., Short, J.L. (1998) *Observations of Reynolds Number Sensitivity in the Separated Flow Region on a Bluff Body*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73. (pp. 231-249).
- [21] Cheung, J.C., Homes, J.D., Melbourne, W.H., Lakshmanan, N., Bowditch, P. (1997) *Pressures on a 1/10 Scale Model of the Rexas Tech Building*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69. (pp. 529-538).
- [22] Aly Mousaad Aly, Girma Bitsuamlak. (2013) *Aerodynamics of Ground-mounted Solar Panels: Test Model Scale Effects*. Canadá: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 123.
- [23] Hosoya, N., Peterka, J.A., Gee, R.C., & Kearney, D. (2008) *Wind Tunnel Tests of Parabolic Trough Solar Collectors*. NREL/SR-550-32282, May 2008, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- [24] AMTI Force and Motion. *MC3A-100 Specifications*. Última consulta: 19 de noviembre de 2018 de <http://www.amti.biz/AMTIpibrowser.aspx> (consultadas las especificaciones técnicas del sensor de fuerza y par multiaxial)
- [25] DEWE-43. *Technical reference manual*. Última consulta: 19 de noviembre de 2018 de <https://dewesoft.com/products/dag-systems/dewe-43> (consultadas las especificaciones técnicas del módulo de adquisición de datos por USB)
- [26] Varios autores (Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Oviedo), 2018, *Descripción geométrica y funcional del túnel aerodinámico longitudinal*. Universidad de Oviedo.
- [27] OMRON Europe B.V. *LX-series Variable Frequency Drives. Datasheet*. Última consulta: 19 de noviembre de 2018 de <https://industrial.omron.es/es/products/lx#downloads> (consultadas las especificaciones técnicas del variador de frecuencia)
- [28] KIMO Instruments. *Manometer MP 120. Technical Data Sheet*. Última consulta: 19 de noviembre de 2018 de <https://www.onetemp.com.au/kimo-mp120-micromanometer-with-air-velocity-calculation-with-pitot-tube> (consultadas las especificaciones técnicas del manómetro y anemómetro portátil con sensor de presión integrado)

- [29] Yunus A. Çengel & John M. Cimbala (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (pp.912 / Tabla A-9). McGraw-Hill.
- [30] Philip M. Gerhart, Richard J. Gross & John I. Hochstein (1995). *Fundamentos de mecánica de fluidos* (pp. 663/Figura 8.9 c) – pp.681/Tabla 8.4, Tabla 8.5) (2ª edición). Addison-Wesley Iberoamericana.
- [31] Abiola-Ogedengbe, Ayodeji. (2013) *Experimental investigation of wind effect on solar panels*. Ontario: Electronic Thesis and Dissertation Repository, 1177.

LISTADO DE SÍMBOLOS

a Ancho de la placa (m)

A Área del modelo de panel fotovoltaico

A_f Área de la estructura proyectada en la dirección de acción del viento (m^2)

A_{ref} Área de referencia para la estructura (m^2)

AR Relación de aspecto

b Largo de la placa (m)

B Bloqueo

C_D Coeficiente aerodinámico de arrastre

C_{D0} Coeficiente de arrastre para un ángulo de inclinación de 0°

C_{Dc} Coeficiente de arrastre corregido

C_L Coeficiente aerodinámico de sustentación

$C_e(z)$ Factor de exposición a una altura z según Eurocódigo

C_f Coeficiente de fuerza neta según normativa americana ASCE7

C_N Coeficiente de fuerza

C_{pe} Coeficiente de presión w_e

C_x Coeficiente de fuerza en la dirección x

C_y Coeficiente de fuerza en la dirección y

$c_s c_d$ Factor estructural

f Frecuencia de accionamiento del banco de ensayos (Hz)

F Carga de diseño según normativa americana ASCE7 (N)

F_D Fuerza de arrastre (N)

F_L Fuerza de sustentación (N)

F_R Fuerza resultante de la acción del viento (N)

F_{max} Fuerzas de acción del viento máximas (N)

F_{min} Fuerzas de acción del viento mínimas (N)

F_w Fuerza del viento según Eurocódigo (N)

G Factor de efecto ráfaga

h Altura del punto más bajo de la placa respecto a la horizontal (m)

I Factor de importancia

K Constante 1 de Torres y Miller

K_d Factor de direccionalidad del viento

K_p Constante 2 de Torres y Miller

K_z Coeficiente de exposición de presión según normativa americana ASCE7

K_{zt} Factor topográfico

k_N Coeficiente normal de fuerza

$K1$ Coeficiente de exposición topográfica 1

$K2$ Coeficiente de exposición topográfica 2

$K3$ Coeficiente de exposición topográfica 3

L Longitud característica de la placa (m)

L_m Longitud característica del modelo (m)

L_p Longitud característica del prototipo (m)

p Presión en cualquier punto de la placa (N/m^2)

p_0 Presión en el aire sin perturbar (N/m^2)

P Presión teórica ejercida por el viento (N/m^2)

q_b Presión básica del viento (N/m^2)

$q_p(z_e)$ Presión ejercida por el viento a la velocidad pico, a una altura z_e (N/m^2)

q_z Presión ejercida por el viento según normativa americana ASCE7 (N/m^2)

Re Número de Reynolds

Re_m Número de Reynolds del modelo

Re_p Número de Reynolds del prototipo

S_{prueba} Sección de prueba en banco de ensayos (m^2)

V Velocidad del viento (m/s)

V_b Velocidad básica del viento (m/s)

V_m Velocidad del viento para el modelo (m/s)

V_M Velocidad del viento medida (m/s)

V_p Velocidad del viento para el prototipo (m/s)

V_t Velocidad del viento teórica (m/s)

V_0 Velocidad del viento sin perturbar (m/s)

V_3 Velocidad de los vórtices aguas abajo (m/s)

w_e Presión ejercida por el viento según Eurocódigo (N/m^2)

z Altura

z_e Altura de referencia para la presión $q_p(z_e)$ (m)

α Ángulo de inclinación de la placa ($^\circ$)

θ Latitud ($^\circ$)

μ Viscosidad dinámica (kg/ms)

μ_m Viscosidad dinámica del modelo (kg/ms)

μ_p Viscosidad dinámica del prototipo (kg/ms)

ρ Densidad del aire (kg/m^3)

ρ_m Densidad del aire del modelo (kg/m^3)

ρ_p Densidad del aire del prototipo (kg/m^3)

ϕ Coeficiente de bloqueo de una placa

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Paneles solares doblados por la fuerza del viento en la finca de La Mudarra, Valladolid-2018 [1]	3
Figura 2. Paneles solares volados por la fuerza del viento en un parque solar en Argentina, 2018 [2]	3
Figura 3. Cubierta solar destruida por un tornado en Alemania, 2015 [3]	4
Figura 4. Planta solar destruida en Japón, 2015 [4]	4
Figura 5. Parque solar destruido en India, 2017 [5]	4
Figura 6. Definición de marquesina a un agua [7].....	7
Figura 7. Geometría básica del flujo alrededor de una placa plana inclinada	10
Figura 8. Ejes de referencia y velocidad de entrada para el problema de la placa plana	10
Figura 9. Coeficiente de fuerza en función del ángulo de inclinación. Comparativa experimental Fage et al. - analítica Kirchoff Y Rayleigh.....	11
Figura 10. Coeficiente de arrastre en función del ángulo de inclinación. Comparativa experimental Fage et al. - analítica Kármán.....	12
Figura 11. Coeficiente de fuerza en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins	13
Figura 12. Coeficiente de arrastre en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins	13
Figura 13. Coeficiente de sustentación en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa fórmula/tabla de Blevins.....	14
Figura 14. Coeficiente de sustentación en función del ángulo de inclinación y la relación de aspecto. Comparativa Ortiz/Torres y Muller	15
Figura 15. Coeficiente de presión para paneles fotovoltaicos montados sobre suelo y sobre cubierta, en función de la relación de aspecto, para un ángulo de inclinación de 40°	16
Figura 16. Coeficientes de arrastre y sustentación en función del número de Reynolds para colectores solares parabólicos	17
Figura 17. Esquema túnel cerrado, dimensiones en mm.....	19
Figura 18. Vista frontal izquierda (túnel A)	20
Figura 19. Vista frontal derecha (túnel A)	20
Figura 20. Vista posterior (túnel A)	20
Figura 21. Vista detalle sección de prueba (túnel A).....	21
Figura 22. Cadena de medida en el túnel A)	22
Figura 23. Sensor de fuerza y par multiaxial	22
Figura 24. Dirección de los ejes en el túnel A)	23
Figura 25. Módulo de adquisición de datos	23

Figura 26. Conexiones módulo de adquisición de datos.....	24
Figura 27. Esquema túnel longitudinal [26] (dimensiones en mm)	24
Figura 28. Vista frontal medidas experimentales (túnel B).....	24
Figura 29. Vista lateral-frontal (túnel B).....	25
Figura 30. Vista lateral-posterior (túnel B).....	25
Figura 31. Vista posterior ventilador (túnel B).....	25
Figura 32. Cadena de medida en el túnel B)	26
Figura 33. Variador de frecuencia OMRON.....	27
Figura 34. Manómetro y anemómetro KIMO	27
Figura 35. Modelo 1	30
Figura 36. Vistas lateral y frontal del modelo 1 (dimensiones en mm)	30
Figura 37. Modelo 2 montado en la sección de prueba del túnel B)	32
Figura 38. Modelo 2 anclado a la mesa de medición.....	32
Figura 39. Vistas lateral y frontal del modelo 2 (dimensiones en mm)	32
Figura 40. Modelo 3 montado en la sección de prueba del túnel B)	34
Figura 41. Modelo 3 anclado a la mesa de medición.....	34
Figura 42. Vistas lateral y frontal del modelo 3 (dimensiones en mm)	35
Figura 43. Resultados fuerza de arrastre, túnel A), modelo 1	36
Figura 44. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel A), modelo 1.....	38
Figura 45. Resultados fuerza de sustentación, túnel A), modelo 1.....	39
Figura 46. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel A), modelo 1	40
Figura 47. Dirección de los ejes del túnel B) (ensayos modelo 2).....	41
Figura 48. Dirección de los ejes en el túnel B) (ensayos modelo 3).....	41
Figura 49. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 1	42
Figura 50. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1.....	43
Figura 51. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 2	44
Figura 52. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 2.....	45
Figura 53. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 3	45
Figura 54. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 4	46
Figura 55. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3.....	46
Figura 56. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4.....	47

Figura 57. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 1	47
Figura 58. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1	49
Figura 59. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 2	49
Figura 60. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 3	50
Figura 61. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 4	50
Figura 62. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3	51
Figura 63. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4	51
Figura 64. Análisis estadístico para fuerza de arrastre en el modelo 2) y una velocidad de 10,74 m/s	52
Figura 65. Análisis estadístico para fuerza de sustentación en el modelo 2) y una velocidad de 10,74 m/s	52
Figura 66. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, placa vertical	54
Figura 67. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical.....	55
Figura 68. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	56
Figura 69. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	56
Figura 70. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	57
Figura 71. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	57
Figura 72. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, placa vertical	58
Figura 73. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical	59
Figura 74. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	59
Figura 75. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B),	60
Figura 76. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	60
Figura 77. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B),	61
Figura 78. Análisis estadístico para la fuerza de arrastre en el modelo 3) y una velocidad de 10,69 m/s	62
Figura 79. Análisis estadístico para la fuerza de sustentación en el modelo 3).....	62
Figura 80. Relación frecuencia-velocidad en el túnel B)	64
Figura 81. Montaje experimental ensayos modelo 3)	65
Figura 82. Modelo 3) en posición vertical	65

Figura 83. Dirección de los ejes en el túnel B) (modelo 3 - ensayos 2)..... 66

Figura 84. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo 66

Figura 85. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo 67

Figura 86. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo..... 68

Figura 87. Coeficientes de resistencia para diversos cuerpos bidimensionales [30]..... 69

Figura 88. Efecto del ancho sobre el coeficiente de arrastre para una placa tridimensional normal al flujo [30] 69

Figura 89. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo..... 70

Figura 90. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación 70

Figura 91. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación 71

Figura 92. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación 72

Figura 93. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación 72

Figura 94. Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos en función del ángulo de inclinación 74

Figura 95. Resultados del coeficiente de arrastre obtenidos en comparación con la bibliografía 78

Figura 96. Resultados de coeficiente de sustentación obtenidos en comparación con la bibliografía 78

Figura 97. Relación entre ratio arrastre-sustentación y la tangente del ángulo de inclinación . 79

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de instrumentos utilizados en el túnel A).....	21
Tabla 2. Resumen de instrumentos utilizados en el túnel B).....	26
Tabla 3. Principales diferencias entre ensayos	29
Tabla 4. Dimensiones principales del modelo 1.....	30
Tabla 5. Dimensiones principales del modelo 2.....	31
Tabla 6. Dimensiones principales del modelo 3.....	33
Tabla 7. Descripción de escalones de velocidad en distintos intervalos de tiempo	37
Tabla 8. Resultados fuerza de arrastre, túnel A), modelo 1.....	37
Tabla 9. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel A), modelo 1.....	38
Tabla 10. Resultados fuerza de sustentación, túnel A), modelo 1.....	39
Tabla 11. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel A), modelo 1.....	39
Tabla 12. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 1.....	42
Tabla 13. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1.....	43
Tabla 14. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 2.....	44
Tabla 15. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 2.....	44
Tabla 16. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 3.....	45
Tabla 17. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 2, ensayo 4.....	46
Tabla 18. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B) modelo 2, ensayo 3	46
Tabla 19. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4.....	47
Tabla 20. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 1.....	48
Tabla 21. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 1	48
Tabla 22. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 3.....	50
Tabla 23. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 2, ensayo 4.....	50
Tabla 24. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 3	51
Tabla 25. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 2, ensayo 4	51
Tabla 26. Parámetros estadísticos del modelo 2) para una velocidad de 10,74 m/s	53
Tabla 27. Incertidumbre de cada medida, arrastre (1)	53

Tabla 28. Incertidumbre de cada medida, arrastre (2)	53
Tabla 29. Incertidumbre en cada medida, sustentación (1)	54
Tabla 30. Incertidumbre en cada medida, sustentación (2)	54
Tabla 31. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, placa vertical.....	55
Tabla 32. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical.....	55
Tabla 33. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	56
Tabla 34. Resultados coeficiente de arrastre, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	56
Tabla 35. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	57
Tabla 36. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	57
Tabla 37. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, placa vertical.....	58
Tabla 38. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, placa vertical	58
Tabla 39. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	59
Tabla 40. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B), modelo 3, inclinación 40°	60
Tabla 41. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, inclinación 30°	61
Tabla 42. Resultados coeficiente de sustentación, número de Reynolds, túnel B),	61
Tabla 43. Parámetros estadísticos del modelo 3) para una velocidad de 10,69 m/s	62
Tabla 44. Coeficiente de variación para cada modelo 2) y 3)	63
Tabla 45. Resultados fuerza de arrastre, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo67	
Tabla 46. Resultados fuerza de sustentación, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo	67
Tabla 47. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo.....	68
Tabla 48. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia de la distancia al suelo.....	68
Tabla 49. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (1).....	71
Tabla 50. Resultados coeficiente de arrastre y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (2).....	71
Tabla 51. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (1).....	71
Tabla 52. Resultados coeficiente de sustentación y número de Reynolds, túnel B), modelo 3, influencia del ángulo de inclinación (2).....	72

Tabla 53. Análisis de repetibilidad	73
Tabla 54. Resultados de presión ejercida sobre el prototipo supuesto de módulo fotovoltaico	75