

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Medida experimental del coeficiente de sustentación y de los coeficientes de momentos de un modelo de colector solar.

Autor: Guillermo Traveset Galindo

Tutor: José Manuel Gordillo Arias de Saavedra, Guillaume Riboux Acher

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeronáutica

Medida experimental del coeficiente de sustentación y de los coeficientes de momentos de un modelo de colector solar.

Autor:

Guillermo Traveset Galindo

Tutor:

José Manuel Gordillo Arias de Saavedra

Guillaume Riboux Acher

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Medida experimental del coeficiente de sustentación y de los coeficientes de momentos de un modelo de colector solar.

Autor: Guillermo Traveset Galindo

Tutor: José Manuel Gordillo Arias de Saavedra, Guillaume Riboux Acher

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*A mi familia, a mi novia y a mis
amigos*

Este trabajo se basa en el estudio de las fuerzas aerodinámicas que el viento ejerce sobre un modelo de colector solar. El objetivo que persigue el trabajo consiste en obtener las fuerzas que ejerce el viento para cada una de las direcciones de la corriente y para las diferentes orientaciones que puede tomar el colector en su movimiento siguiendo al Sol a lo largo del día.

Para comenzar, se realiza una breve descripción de los elementos necesarios para la realización de las medidas. A continuación, se explica con detalle cómo se ensayó el colector en túnel de viento. Para ello, se comenta el funcionamiento de la balanza capaz de medir las fuerzas y se detallan los pasos para la realización de las pruebas.

Por último, se analizan los resultados para las diferentes direcciones de la corriente y orientaciones del colector con respecto al Sol.

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
2 Descripción de elementos empleados	3
3 Realización de la prueba experimental	5
3.1 Interconexiones de la balanza	5
3.2 Lab VIEW	8
3.3 Ensayo experimental	14
3.4 Calibración del peso	15
4. Análisis de los resultados	21
4.1 Cálculo de los coeficientes aerodinámicos	21
4.2 Representación de los resultados	22
4.2.1. Fuerzas medidas por el sensor.	23
4.2.2. Coeficientes de Sustentación y Resistencia en función de θ	24
4.2.3. Coeficientes de sustentación y Resistencia en función de β	34
4.2.4. Dirección óptima para la corriente	39
5. Conclusiones	46
6. Ensayos futuros	51
Referencias	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Direcciones óptimas para diferentes orientaciones
r! Marcador no definido. ¡Erro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planta termosolar de Orellana la Vieja.

Figura 2.1. Dimensiones de la placa parabólica.

Figura 2.2. Esquema de la balanza.

Figura 2.3. Esquema dimensionado de la galleta unión.

Figura 2.4. Ensamblaje final del colector en el túnel aerodinámico.

Figura 3.1. Transductor de la balanza.

Figura 3.2. Caja de la fuente de alimentación.

Figura 3.3. Sistema de adquisición de datos.

Figura 3.4. Conexiones de la balanza (1/2).

Figura 3.5. Conexiones de la balanza (2/2).

Figura 3.6. Interfaz del programa LAbVIEW.

Figura 3.7. Dirección y sentido de las cargas y momentos.

Figura 3.8. Sentido de giro de θ y las diferentes direcciones de la corriente.

Figura 3.9. Variación de θ entre 0° , 60° y 90° .

Figura 3.10. Variación de θ entre 120° , 180° y 240° .

Figura 3.11. Variación de θ entre 270° y 300° .

Figura 3.12. Unión entre la barra soporte y el eje transversal.

Figura 3.13. Placa parabólica para $\beta = 0^\circ$.

Figura 3.14. Placa parabólica para $\beta = 30^\circ$.

Figura 3.15. Placa parabólica para $\beta = 60^\circ$.

Figura 3.16. Placa parabólica para $\beta = 90^\circ$.

Figura 3.17. Fuerzas en el eje X y en el eje Y debida al peso del colector.

Figura 3.18. Fuerza en el eje Z debida al peso del colector.

Figura 3.19. Momentos en el eje X y en el eje Y debido al peso del colector.

Figura 3.20. Momento en el eje Y debido al peso del colector.

Figura 3.21. Momento en el eje Z debido al peso del colector.

Figura 4.1. Posición relativa de los ejes con respecto a la dirección de la corriente.

Figura 4.2. Resistencia aerodinámica para distintos ángulos de β .

Figura 4.3. Sustentación para distintos ángulos de β .

Figura 4.4. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 0^\circ$.

Figura 4.5. Colector solar rotado hacia la derecha para $\beta = 0^\circ$.

Figura 4.6. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 30^\circ$.

Figura 4.7. Colector rotado hacia la derecha para $\beta = 30^\circ$.

Figura 4.8. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 45^\circ$.

Figura 4.9. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 60^\circ$.

Figura 4.10. Colector girado hacia la derecha para $\beta = 60^\circ$.

Figura 4.11. Pico de succión en un perfil aerodinámico.

Figura 4.12. Alerón delantero de un coche de Fórmula 1.

Figura 4.13. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 90^\circ$.

Figura 4.14. Colector girado hacia la derecha para $\beta = 90^\circ$.

Figura 4.15. Coeficientes de sustentación para distintos ángulos de β .

Figura 4.16. Coeficientes de resistencia para distintos ángulos de β .

Figura 4.17. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 0^\circ$.

Figura 4.18. Colector para $\theta = 80^\circ$ rotado hacia la derecha.

Figura 4.19. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 80^\circ$.

Figura 4.20. Colector para $\theta = 140^\circ$ rotado hacia la derecha.

Figura 4.21. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 140^\circ$.

Figura 4.22. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 180^\circ$.

Figura 4.23. Colector para $\theta = 240^\circ$ rotado hacia la derecha.

Figura 4.24. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 240^\circ$.

Figura 4.25. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para $\beta = 0^\circ$.

Figura 4.26. Colector rotado hacia la derecha para $\theta = 90^\circ$.

Figura 4.27. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para $\beta = 30^\circ$.

Figura 4.28. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para $\beta = 60^\circ$.

Figura 4.29. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para $\beta = 90^\circ$.

Figura 4.30. Coeficientes adimensionales de fuerzas para distintos ángulos de β .

Figura 4.31. Evolución del valor mínimo del coeficiente de fuerzas con respecto a β .

Figura 4.32. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 240^\circ$.

Figura 4.33. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 80^\circ$.

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se tratará de realizar un análisis acerca de las fuerzas aerodinámicas que experimentan los colectores solares debido a la acción del viento. Para calcular estas fuerzas se ha ensayado un modelo de colector solar a escala en el túnel de viento del laboratorio de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

La finalidad del estudio será conocer cuales son las orientaciones en las que el colector es capaz de soportar fuerzas mayores. De esta manera, se intentará evitar que durante tormentas o fuertes ráfagas de viento los colectores solares de una planta solar sean arrancados.



Figura 1.1. Planta termosolar de Orellana la Vieja. '

El colector solar empleado será cilíndrico parabólico, así como con una estructura trasera no muy compleja para que pueda ser adaptado al túnel aerodinámico de la escuela con facilidad. Una vez colocado, el panel experimentará dos movimientos de rotación. Uno de ellos, simulará las diferentes orientaciones con las que el viento podrá incidir sobre la placa, mientras que el otro permitirá representar el movimiento que realiza el Sol a lo largo del día.

2 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS EMPLEADOS

Durante el siguiente apartado se va a realizar una breve descripción acerca de los elementos que han sido necesarios para la realización de las pruebas y el posterior análisis de los resultados.

En esta descripción no se entrará en detalle en ninguno de los elementos, tan sólo serán mencionados e ilustrados para que sea posible ilustrar de una manera más gráfica como se ha llevado a cabo el proceso experimental.

El elemento más importante para llevar a cabo las distintas pruebas es el panel solar. Se trata de un colector cilindro parabólico en cuya parte trasera se tiene un elemento rigidizador. En la Figura 1.1 se muestran las dimensiones del mismo en sus tres vistas, además de una perspectiva para apreciar mejor la forma real del colector.

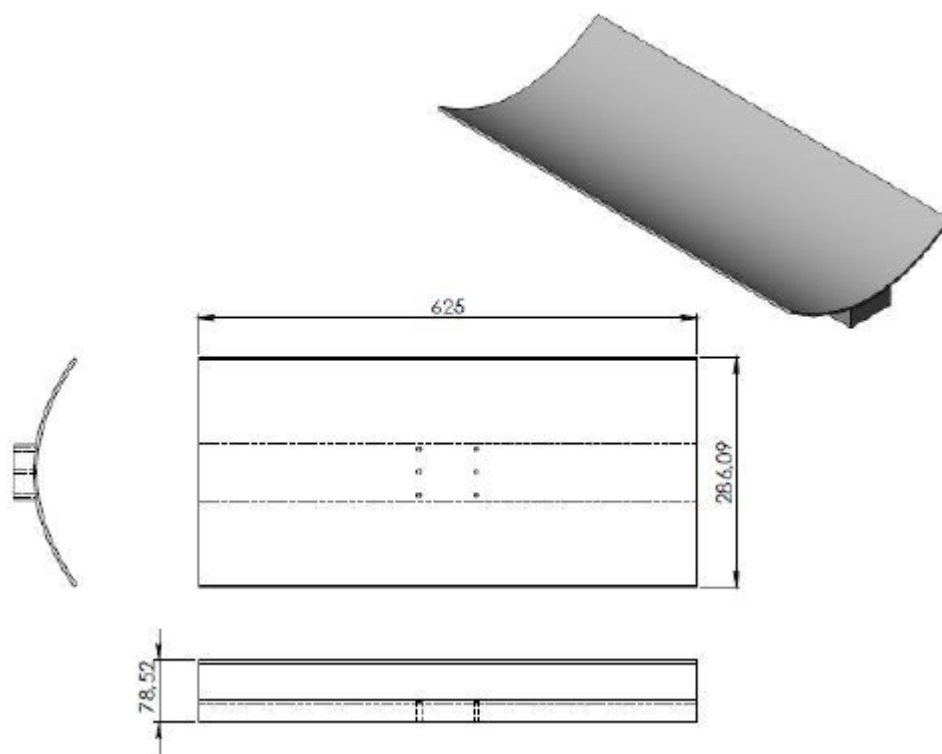


Figura 2.1. Dimensiones de la placa parabólica.

Las dimensiones del colector serán de vital importancia para calcular su área frontal. Este área será necesaria para adimensionalizar las variables que se calcularán en los siguientes apartados.

Otro elemento fundamental para llevar a cabo las diferentes pruebas ha sido la balanza Gamma SI-130-10. Este elemento se trata de un sensor capaz de medir las fuerzas que ejercía el viento sobre el colector (Figura 2.2). Estaba situado detrás de una barra que soportaba la placa para que influyese lo mínimo posible sobre la corriente incidente.

Más tarde, se muestra un esquema de la balanza en el que pueden observarse cuales serían las direcciones y los sentidos en los que se miden las fuerzas aerodinámicas.



Figura 2.2. Esquema de la balanza.

Anteriormente, se ha mencionado que durante las pruebas el colector solar giraba alrededor de dos ejes. Uno de estos giros consistía en que el colector rotaría con respecto a su barra de soporte (con respecto al eje Z) 360°. Así, es posible simular que la dirección con la que el viento incide sobre el colector va cambiando. Para llevar a cabo este cambio de orientación con respecto a la corriente, ha sido necesario otro elemento conocido como la galleta de unión, la cual puede apreciarse en la Figura 3.3.

A través de los orificios que posee la galleta, se conecta el colector con un motor. Mediante este motor se produce el giro de la galleta junto con la placa. El control de este motor será explicado cuando se describa la realización de la prueba. Para concluir con la galleta, cabe mencionar que ésta va unida a una placa soporte que permite fijar el conjunto galleta-balanza-colector al túnel aerodinámico.

Para concluir con los elementos empleados, además de los ya mencionados, han sido necesarias bridas de sujeción y amarre, barras soporte, placas de unión y un pequeño eje transversal. Este último será empleado para colocar el panel en una orientación determinada con respecto al Sol.

En la siguiente fotografía, tomada en el túnel aerodinámico, se muestran las vistas frontal y posterior del ensamblaje final del colector en el túnel.

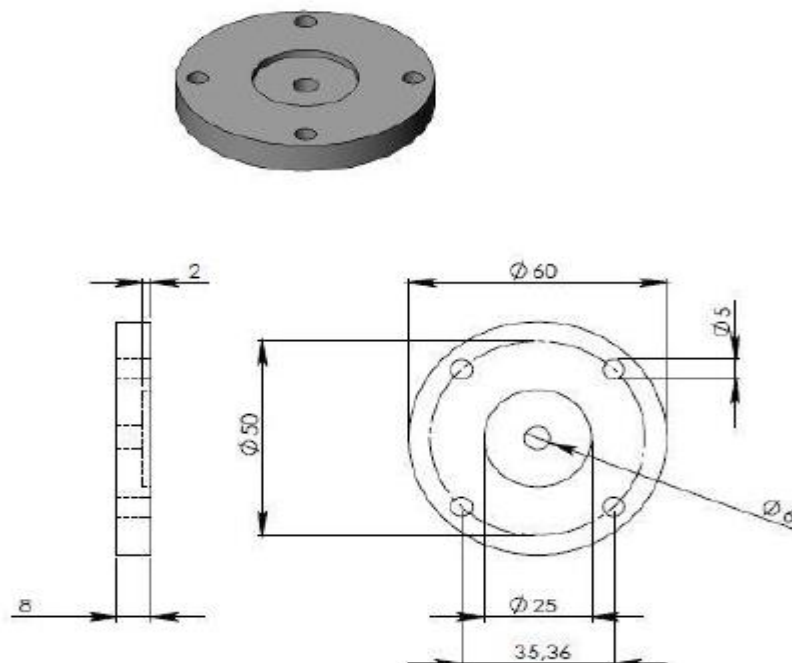


Figura 2.3. Esquema dimensionado de galleta de unión.

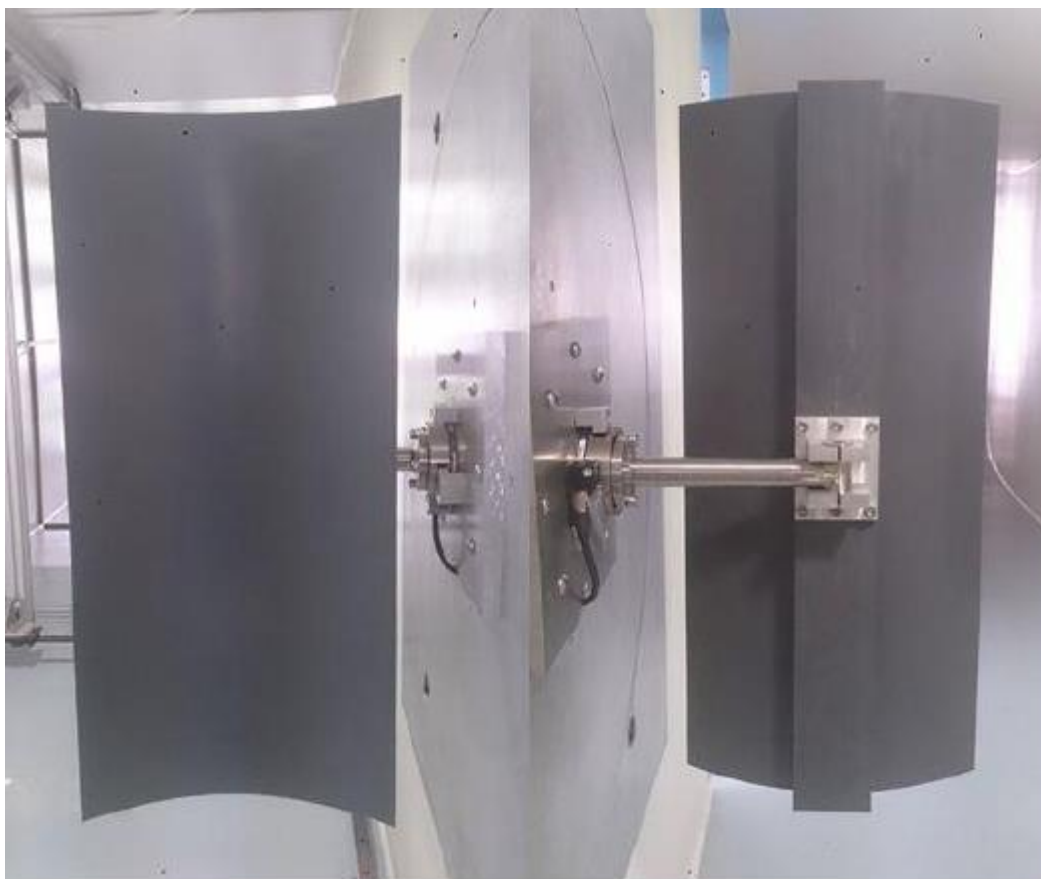


Figura 2.4. Ensamblaje final del colector en el túnel aerodinámico.

3 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL

Una vez mencionados los elementos que fueron necesarios para la realización de la prueba experimental, se va a explicar como se llevó la misma a cabo. Para ello, van a analizarse las diferentes partes de las que está compuesta la balanza y como es posible adquirir los datos. Se explicará el funcionamiento del programa de adquisición de datos del sensor, “*LabVIEW*”.

Por último, se aclararán con ilustraciones como rotaba el colector, para conseguir todas las configuraciones posibles de incidencia del viento y de orientación con respecto al Sol.

3.1 Interconexiones de la balanza

La balanza Gamma SI-130-10 está compuesta por diferentes elementos. La función que realiza cada uno de estos elementos se describirán a continuación. Así, se mostrará como se ha pasado de señales analógicas medidas por el sensor hasta datos registrados en el ordenador.

- ✓ Transductor: se trata de la estructura cilíndrica (Figura 3.1) que ya se mencionó en el apartado anterior. Gracias a él, es posible medir las cargas y momentos que la corriente produce sobre el colector. Para que el sensor opere correctamente, es necesario dejar una holgura entre los agarres y el transductor, ya que será el movimiento que se produzca en esa holgura el que determinará la magnitud de las fuerzas que se están soportando.
- ✓ Cable transductor: conecta el transductor con la caja de fuente de alimentación.



Figura 3.1. Transductor de la balanza.



Figura 3.2. Caja de la fuente de alimentación.

- ✓ Caja de fuente de alimentación: permite dotar al transductor de la energía eléctrica que necesita para realizar su función, además acondiciona las señales analógicas hasta el sistema de adquisición de datos. Dependiendo del tamaño del transductor, puede que sea necesario la presencia de esta caja de fuente de alimentación. En otros casos, se utiliza una Interfaz de fuente de alimentación. La caja de alimentación puede observarse en la Figura 3.2.
- ✓ Cable de suministro de energía: es el encargado de conectar la caja de la fuente de alimentación con el sistema de adquisición de datos.
- ✓ Sistema de adquisición de datos: se encarga de convertir las señales analógicas medidas en el transductor en datos que el ordenador puede procesar o leer. Para ello, precisa de software que convierta estas señales en las fuerzas o los momentos deseados. El sistema de adquisición de datos se muestra en la Figura 3.3.
- ✓ Software F/T: software que permite al ordenador convertir los datos que le llegan en los valores de las fuerzas y los momentos.



Figura 3.3. Sistema de adquisición de datos.

Con esto, se han enumerado los elementos necesarios para que los datos tomados desde el túnel de viento lleguen al ordenador. El transductor se conecta mediante el cable transductor a la caja de fuente de alimentación y ésta, a su vez, se conecta con el sistema de adquisición de datos, por último se conecta este sistema a la torre del ordenador, en la que gracias al software pueden obtenerse los valores de las cargas y los momentos. Todas las conexiones entre los diferentes elementos se muestran en la Figuras 3.4 y 3.5.

Por último, antes de comenzar los ensayos, ha sido necesaria la calibración de la balanza. Para ello, se ha colocado una pesa de masa conocida sobre la balanza, obteniéndose así una fuerza que será igual a la masa de la balanza multiplicada por la gravedad. Comparándose la fuerza obtenida con el valor real que debería obtenerse, se ha encontrado un factor de calibración de 2,26, es decir, la fuerza que se obtiene del sensor, es necesaria multiplicarla por este factor para obtener su valor real.



Figura 3.4. Conexiones de la balanza (1/2).

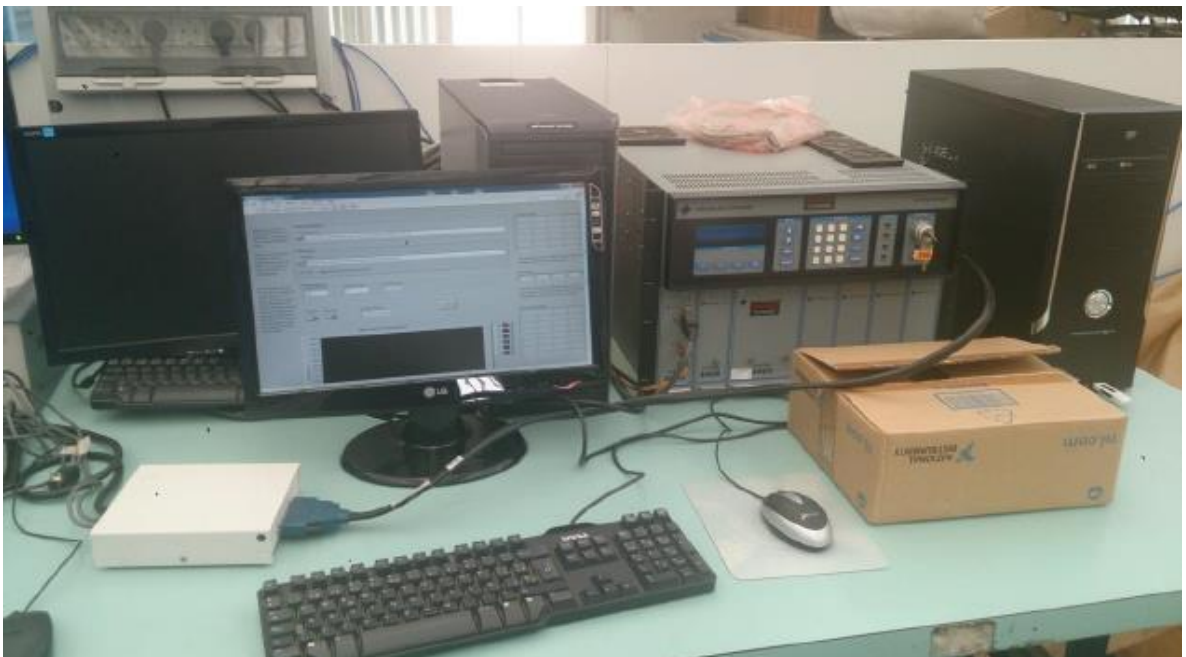
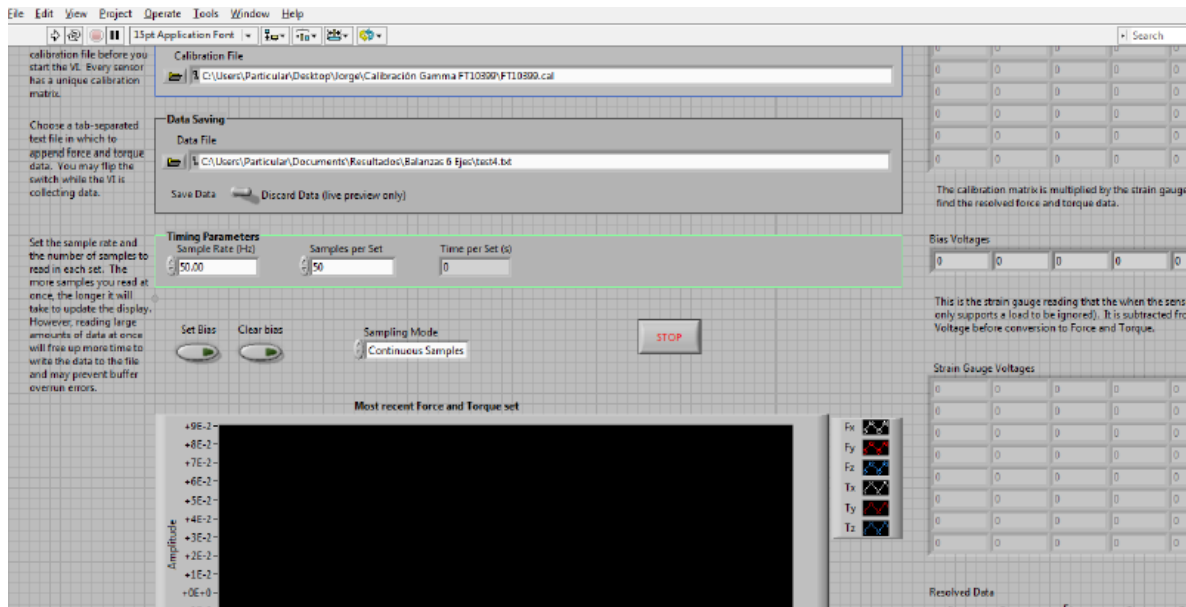


Figura 3.5. Conexiones de la balanza (2/2).

Figura 3.6. Interfaz del programa *LabVIEW*

3.2 Lab VIEW

Este programa permite recoger todos los datos que se están midiendo en la balanza y exportarlos a un *bloc de notas* en blanco. Sin embargo, para que realizase su función, cada vez que el ordenador era encendido y se abría el programa, era necesario realizar una serie de pasos previos.

Para llevar a cabo estos pasos, en el ordenador del laboratorio se tienen dos imágenes en las que se muestra el proceso a realizar a la hora de empezar a trabajar con el programa. Los dos pasos más importantes consisten en la elección de la frecuencia de muestro y, por otro lado, en la selección del *bloc de notas* en el que se va a registrar la información.

En cuanto a la selección del *bloc de notas*, es necesario introducirle al programa la ubicación del mismo y además, comprobar que dicho archivo siempre esté en blanco, eliminando todos los datos registrados durante la prueba anterior.

Por otro lado, la elección de la frecuencia de muestreo de los datos es de gran importancia. La causa principal es que afecta en gran medida a la hora de representar los resultados finales, ya que una frecuencia demasiado alta provoca que los resultados no puedan apreciarse por el exceso de puntos, mientras que una frecuencia demasiado baja provocaría la falta de datos a la hora de analizar los resultados. Una vez que se iniciaron las pruebas, se comprobó que con una frecuencia de 50 Hz, se pueden conseguir unos resultados que facilitan la visualización de las gráficas y eliminan el ruido en las mismas.

Una vez que se ha iniciado el programa y se han seguido las instrucciones dictadas por las imágenes mencionadas, se comprueba el funcionamiento del programa. Para ello, observando las gráficas que aparecen en la interfaz del programa, si el programa está encendido, al colocar la mano sobre el colector aparecerán perturbaciones en las fuerzas medidas por la balanza. En la figura 3.6, aparece una imagen de la interfaz del programa.

Por último, una vez que se desee comenzar a guardar resultados en el *bloc de notas*, se utiliza una palanca existente en la interfaz del programa; esta palanca tiene dos posiciones, en una de ellas graba la información medida por la balanza y, en la otra, no almacena nada. Cuando comienza la prueba, se pincha con el ratón en la palanca para comenzar a grabar y, justo al finalizar, se vuelve a pinchar para dejar de hacerlo.

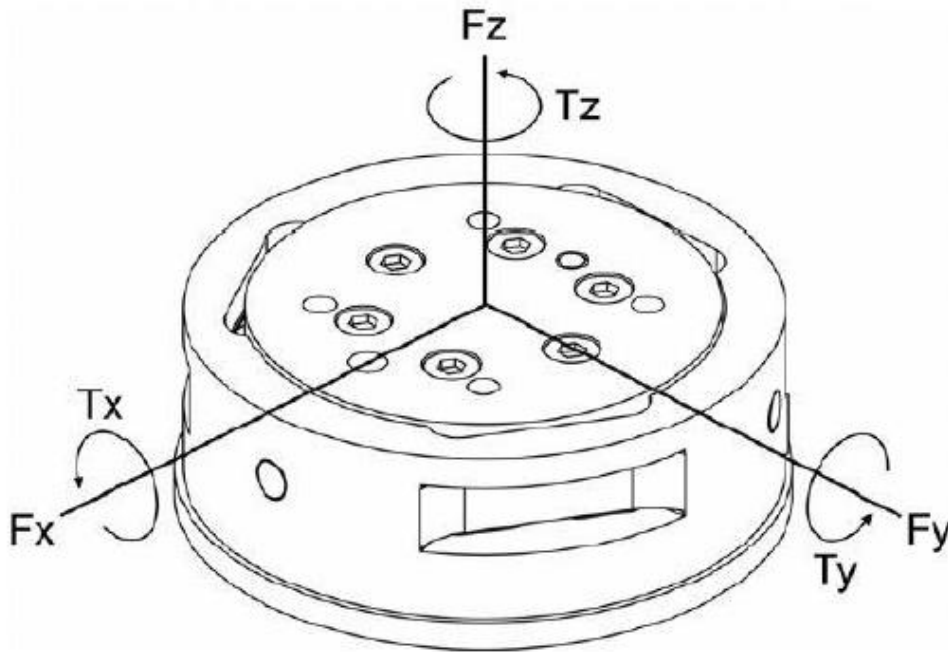


Figura 3.7. Dirección y sentido de las cargas y los momentos medidos.

3.3 Ensayo experimental

Para entender las pruebas que se han realizado, es necesario antes explicar las diferentes orientaciones que tendrá el colector. En la figura 3.7, se muestra una imagen en la que pueden apreciarse los diferentes ejes en los que el sensor calcula las cargas y los momentos.

Como ya se ha explicado, el sensor está colocado de tal manera que los ejes F_x y F_y están situados sobre el plano vertical de la pared del túnel. El eje F_z , por su parte, será perpendicular a la pared del túnel, es decir, seguirá la dirección de la barra que soporta el colector.

Una vez conocido hacia dónde señala cada dirección, se está en disposición de explicar los diferentes giros que realiza el panel. Por un lado, la galleta de unión gira al estar conectada a un motor. Mediante este motor, controlado a partir de uno de los ordenadores del laboratorio, es posible hacer rotar la galleta el ángulo que se desee, y, además, controlar la velocidad de giro de la misma. De esta forma, haciendo rotar el conjunto colector-galleta 360° será posible barrer todas las posibles incidencias de la corriente.

En definitiva, el colector rotará alrededor del eje F_z 360° a la velocidad que interese. A este ángulo de giro se le denominará de aquí en adelante ángulo θ . Analizar como varían las fuerzas aerodinámicas en función de este ángulo será uno de las cuestiones más importantes que se abordarán a lo largo del trabajo. La principal finalidad será encontrar para qué ángulos, el colector sufrirá menores valores de fuerza. Para ilustrar de una manera más gráfica se añade la siguiente imagen, en la que se observa el sentido de giro del ángulo θ .

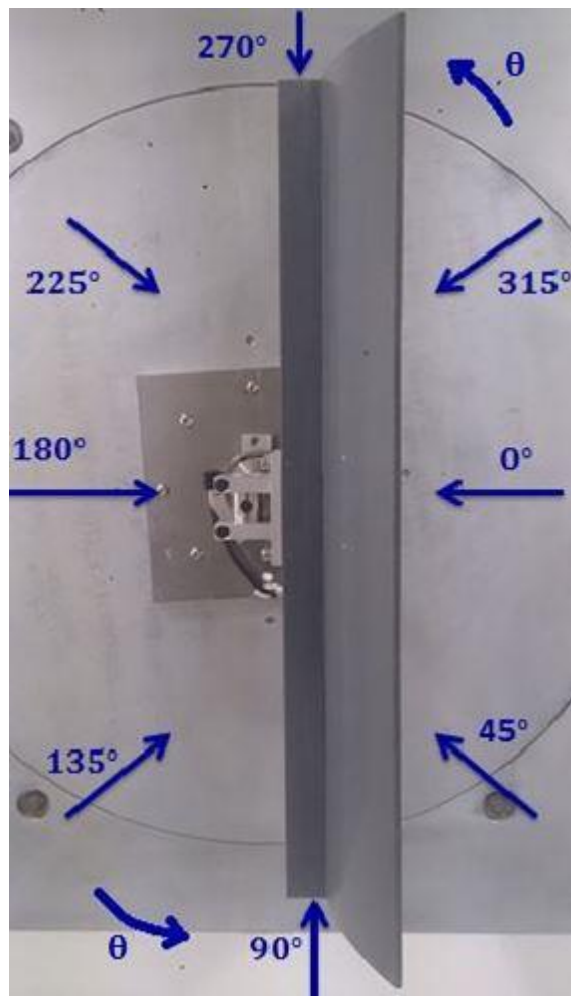


Figura 3.8. Sentido de giro de θ y las diferentes direcciones de la corriente.

Como se aprecia en la Figura 3.8, el sentido de rotación del colector será antihorario. Las flechas en azul indican la dirección del viento con respecto a la posición del colector, es decir, como en el túnel la dirección de la corriente siempre será la misma, al girar el colector, la corriente incidirá de otra manera sobre el colector. En definitiva, las flechas azules señalan en qué parte del panel actuará el viento para un ángulo determinado, por ejemplo, para el ángulo $\theta = 180^\circ$ la corriente se encontrará con la parte trasera del panel.

Para terminar de aclarar como se lleva a cabo este movimiento, se van a mostrar una serie de imágenes (Figura 3.9, 3.10 y 3.11) en las que se observan diferentes posiciones del ángulo θ .



Figura 3.9. Variación de θ entre 0° , 60° y 90° .

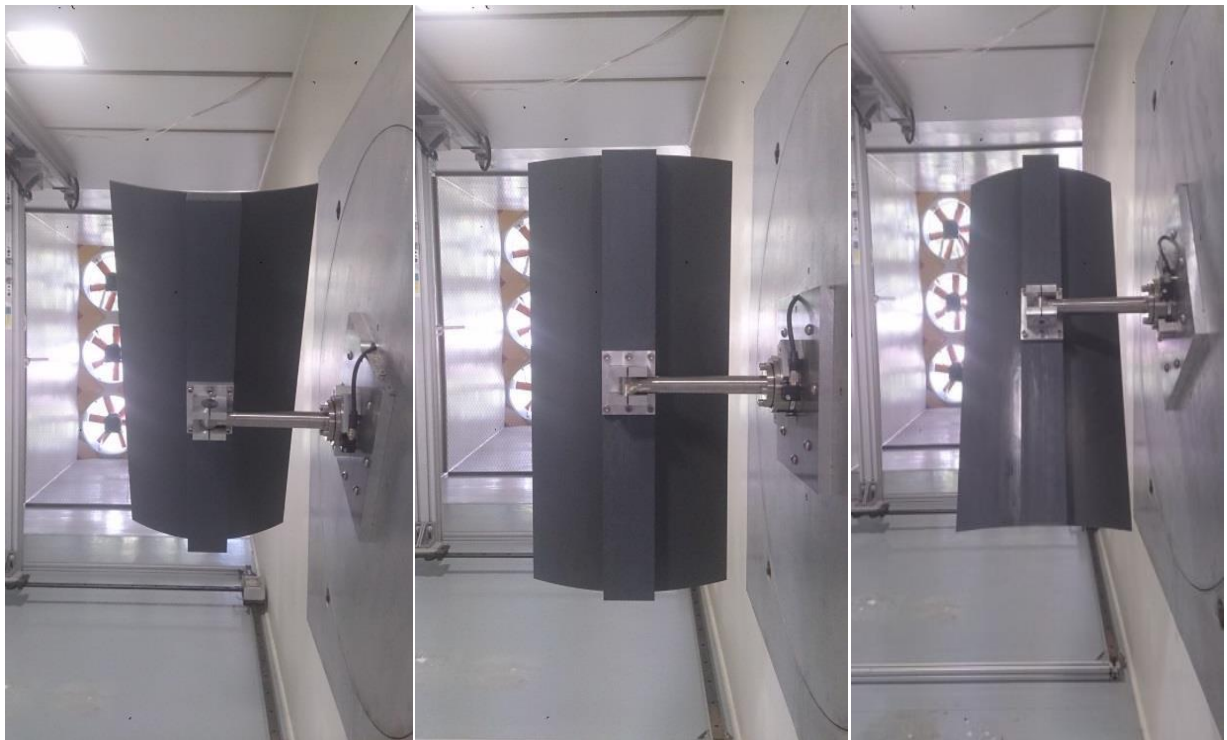


Figura 3.10. Variación de θ entre 120° , 180° y 240° .

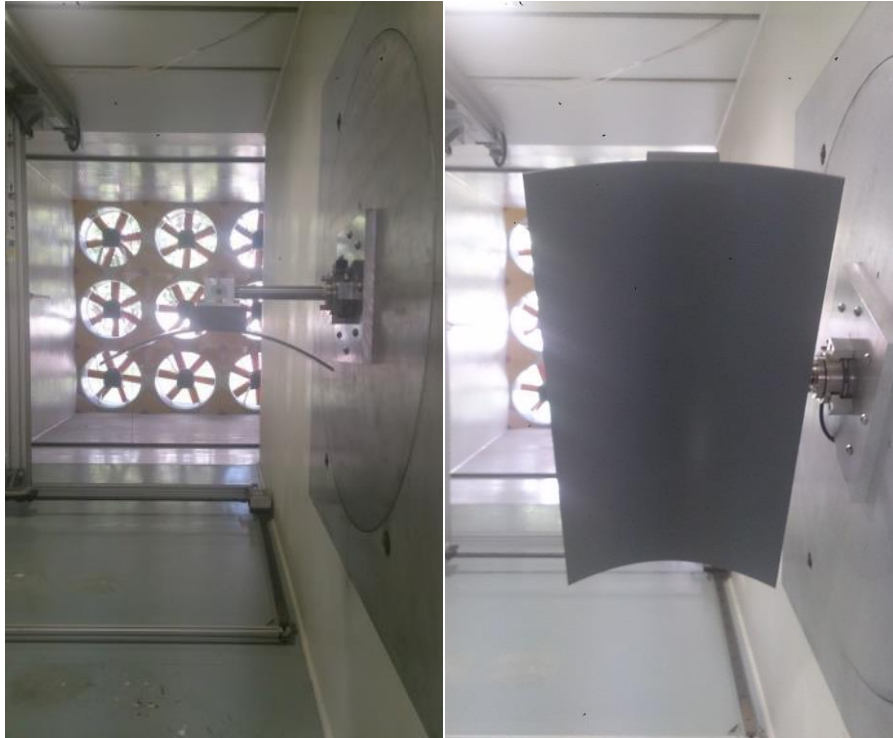


Figura 3.11. Variación de θ entre 270° y 300° .

Por otro lado, se va a definir el ángulo β como el ángulo que simula el movimiento del Sol a lo largo del día. Un ángulo β de 0° se corresponde con que el panel está orientado para que los rayos de Sol incidan, de manera más directa, sobre él al amanecer. Para poder realizar este movimiento de rotación, se unió un eje transversal a la barra soporte, permitiendo girar al colector alrededor de un eje perpendicular al eje FZ.

El ángulo β irá variando en cada ensayo de cinco en cinco grados, comenzando en 0° y acabando en 90° . No es necesario realizar pruebas desde 90° hasta 180° , puesto que al estar girando el colector 360° las fuerzas que se producirían serían simétricas.

Con una variación del ángulo β de cinco en cinco grados, se deben realizar 19 pruebas, en las que en cada una de ellas el ángulo θ girará 360° . Se optó por realizarlo de esta manera ya que el estudio de cada una de las direcciones con las que puede incidir la corriente para cada ángulo β supondría un número de ensayos muy elevado. Además, gracias a la opción elegida pueden barrerse todos los ángulos con los que el viento puede encontrarse con el colector.



Figura 3.12. Unión entre la barra soporte y el eje transversal.

A continuación, se mostrarán algunas imágenes del colector con diferentes valores del ángulo β para $\theta = 0^\circ$.

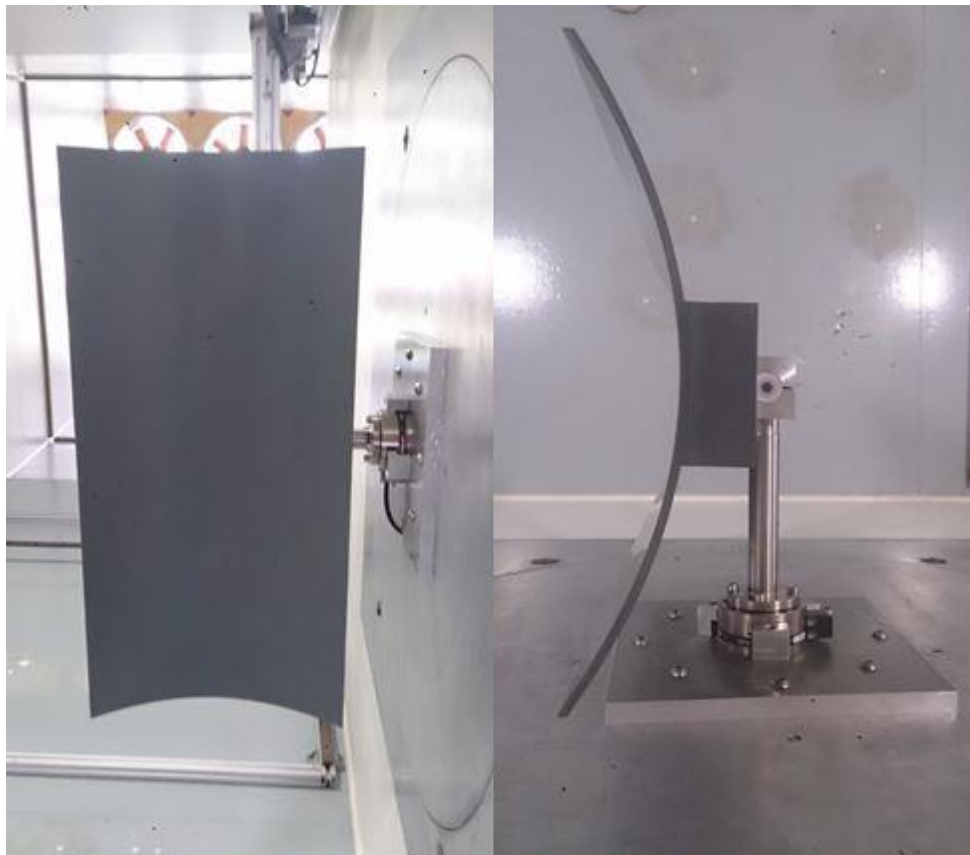


Figura 3.13. Placa parabólica para $\beta = 0^\circ$.

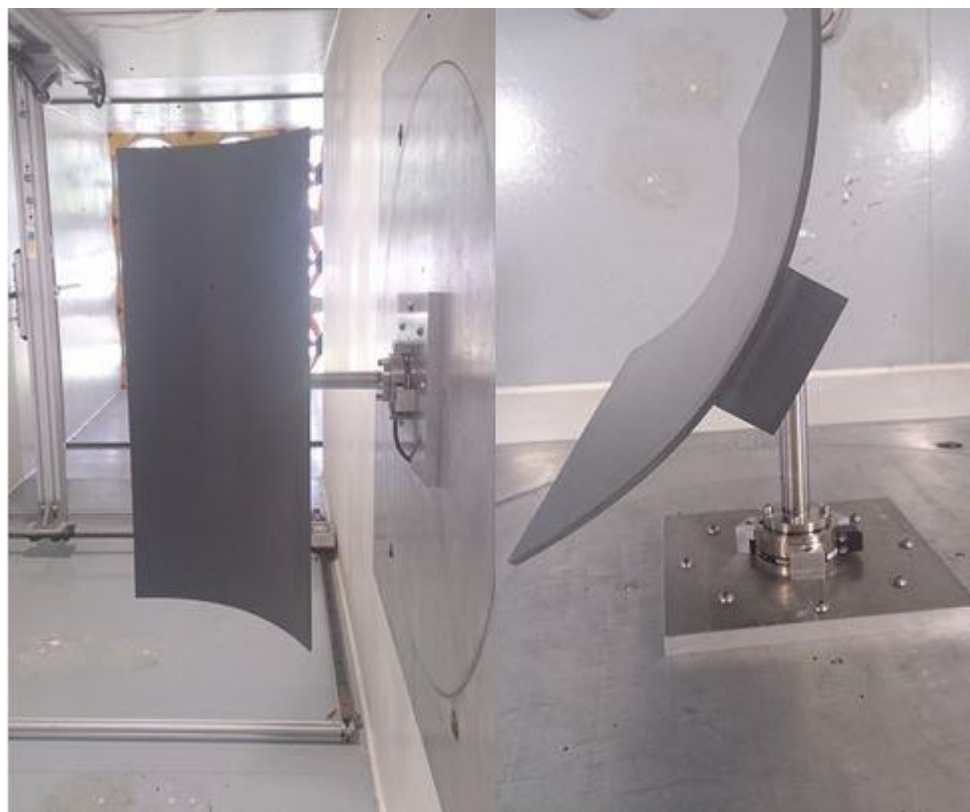


Figura 3.14. Placa parabólica para $\beta = 30^\circ$.



Figura 3.15. Placa parabólica para $\beta = 60^\circ$.



Figura 3.16. Placa parabólica para $\beta = 90^\circ$.

Una vez definidas las diferentes orientaciones que puede adoptar el panel, será necesario escoger una velocidad de rotación de la galleta. Para la elección de la velocidad será muy importante la frecuencia de adquisición de datos por segundo escogida. Como ya se mencionó anteriormente, para eliminar gran parte del

ruido se ha optado por una frecuencia de 50 Hz. Para tomar un número suficiente de muestras para cada ángulo θ se ha escogido una velocidad de $60 \frac{^\circ}{\text{min}}$. A esta velocidad se cambia de ángulo θ cada segundo, tomándose así para cada ángulo 50 datos. El tiempo empleado en realizar cada uno de los ensayos será el siguiente:

$$\text{tiempo} = \frac{360^\circ}{60^\circ/\text{min}} = 6 \text{ min}$$

Tomándose un número de medidas por ensayo de:

$$\frac{\text{n}^\circ \text{ de medidas}}{\text{ensayo}} = 50 \frac{\text{medidas}}{^\circ} \times 360^\circ = 18000 \text{ medidas.}$$

Esta velocidad de rotación de la galleta y el número de grados que se desea girar el colector, se seleccionan en el motor mediante otro ordenador diferente al que está conectado la balanza. De esta manera, durante la realización de los ensayos será necesario el uso de ambos ordenadores simultáneamente. Mientras que en uno se acciona el motor que mueve el conjunto panel-balanza-galleta, en el otro se registran las fuerzas que experimenta el colector.

Por último, antes de comenzar a explicar la calibración del peso, es importante mencionar que la potencia del túnel durante los ensayos ha sido del 50%. También, para cada uno de los ensayos, se ha medido la velocidad en el túnel mediante un tubo de pitot, esta velocidad será necesaria para el cálculo de los coeficientes adimensionales de sustentación y resistencia.

3.4 Calibración del peso

Uno de los aspectos más importantes antes de comenzar la realización de los ensayos se trata de la calibración del peso. Dicha calibración consistirá en restarle a la fuerza obtenida en el ensayo, la fuerza que provoca el propio peso del colector. Para ello, se realizan una serie de pruebas con el túnel apagado en las que el colector girará los 360°.

Será necesario comprobar si la variación del ángulo β provoca variaciones significativas en las fuerzas obtenidas. Para ello, se realizan ensayos para cada uno de los diferentes ángulos β . A continuación, se muestran los resultados de los ensayos para diferentes orientaciones de β .

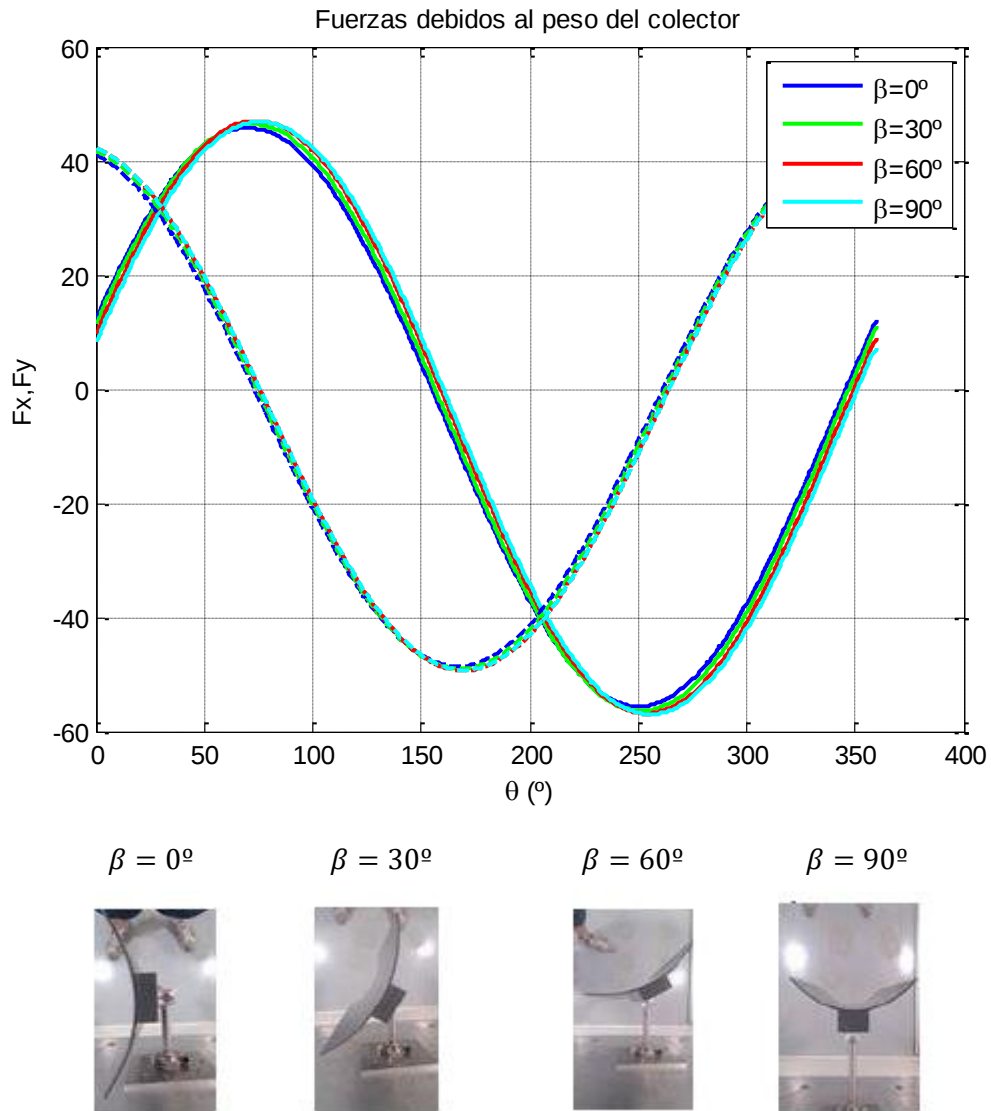


Figura 3.17. Fuerza en el eje X y en el eje Y debido al peso del colector para distintos ángulos de β .

En trazo continuo se muestran las fuerzas que se ejercen sobre el eje X, mientras que en trazo discontinuo las ejercidas sobre el eje Y.

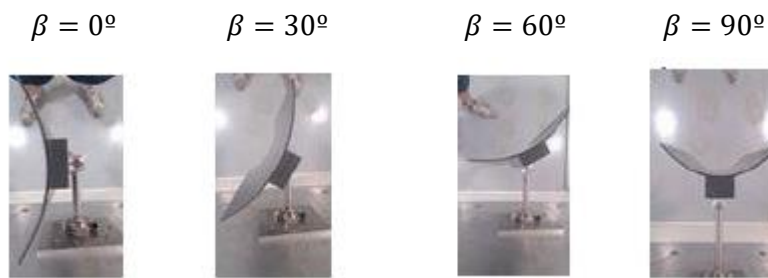
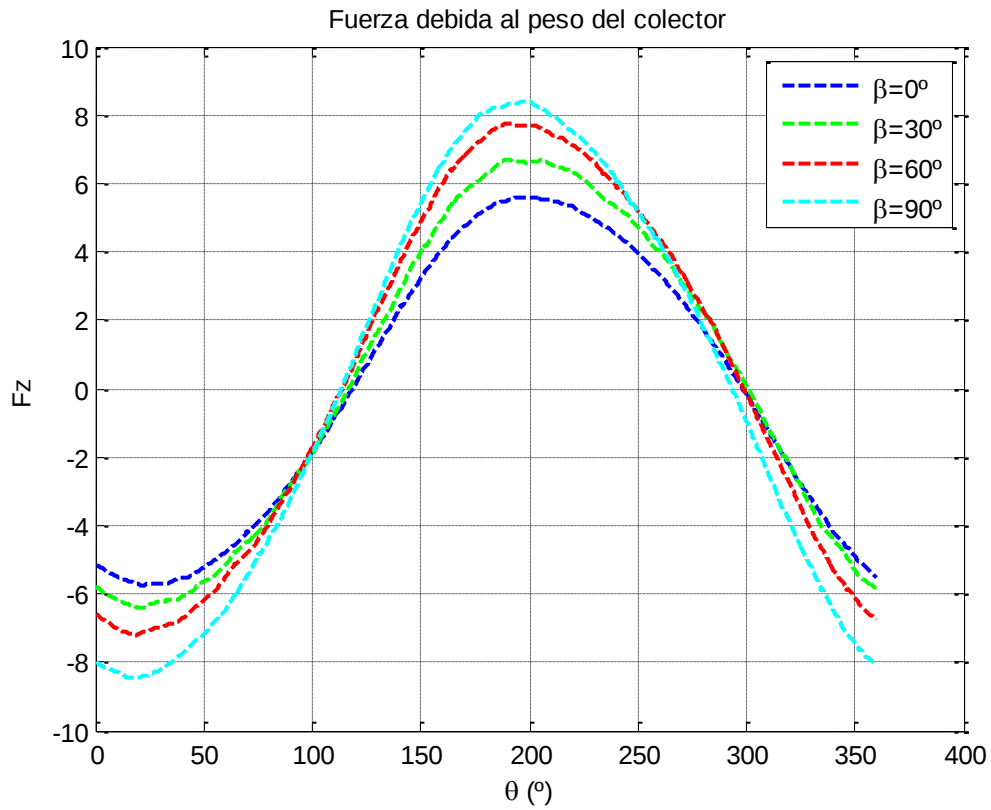


Figura 3.18. Fuerzas en el eje Z debidas al peso del colector para distintos ángulos de β .

Como puede observarse tanto en el eje X como en el eje Y, no existe una variación muy significativa de las fuerzas con el ángulo β . Sin embargo, en el eje Z se tienen unas diferencias bastantes apreciables. Esto se debe a que al aumentar el ángulo β , el peso de la placa se va a alejando cada vez más del punto en el que se encuentra el sensor. En las Figuras 3.19 y 3.20 se mostrarán estos resultados pero para el caso de los momentos.

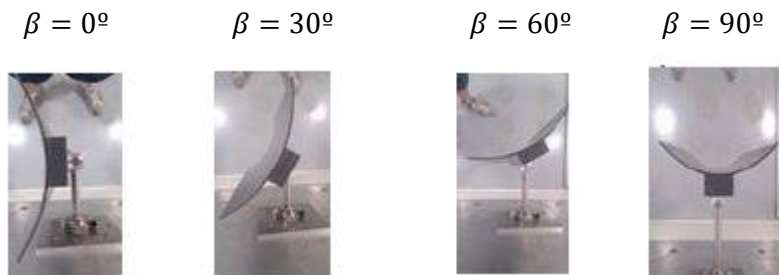
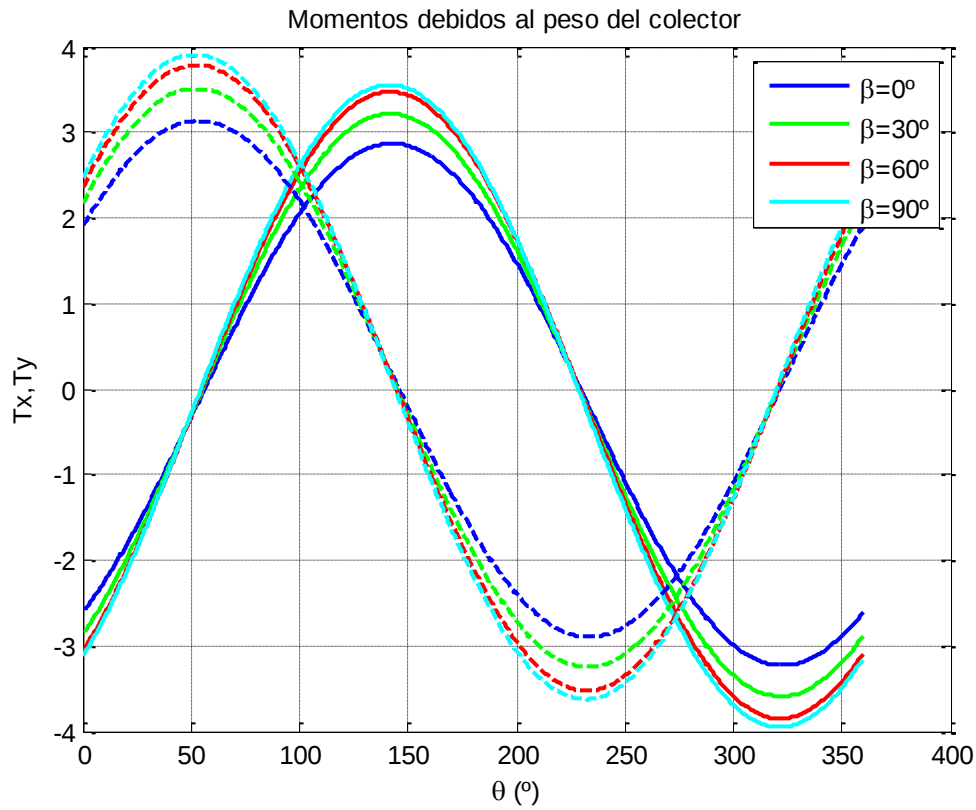


Figura 3.19. Momentos en el eje X y en el eje Y debidos al peso del colector para distintos ángulos de β .

De nuevo, se tienen en línea continua los momentos sufridos por el eje X, mientras que en línea discontinua los momentos que se ejercen sobre el eje Y. Las leyendas de colores que se observan en las Figuras 3.17 y 3.19, sirven tanto para el caso de trazo continuo como para el de caso discontinuo.

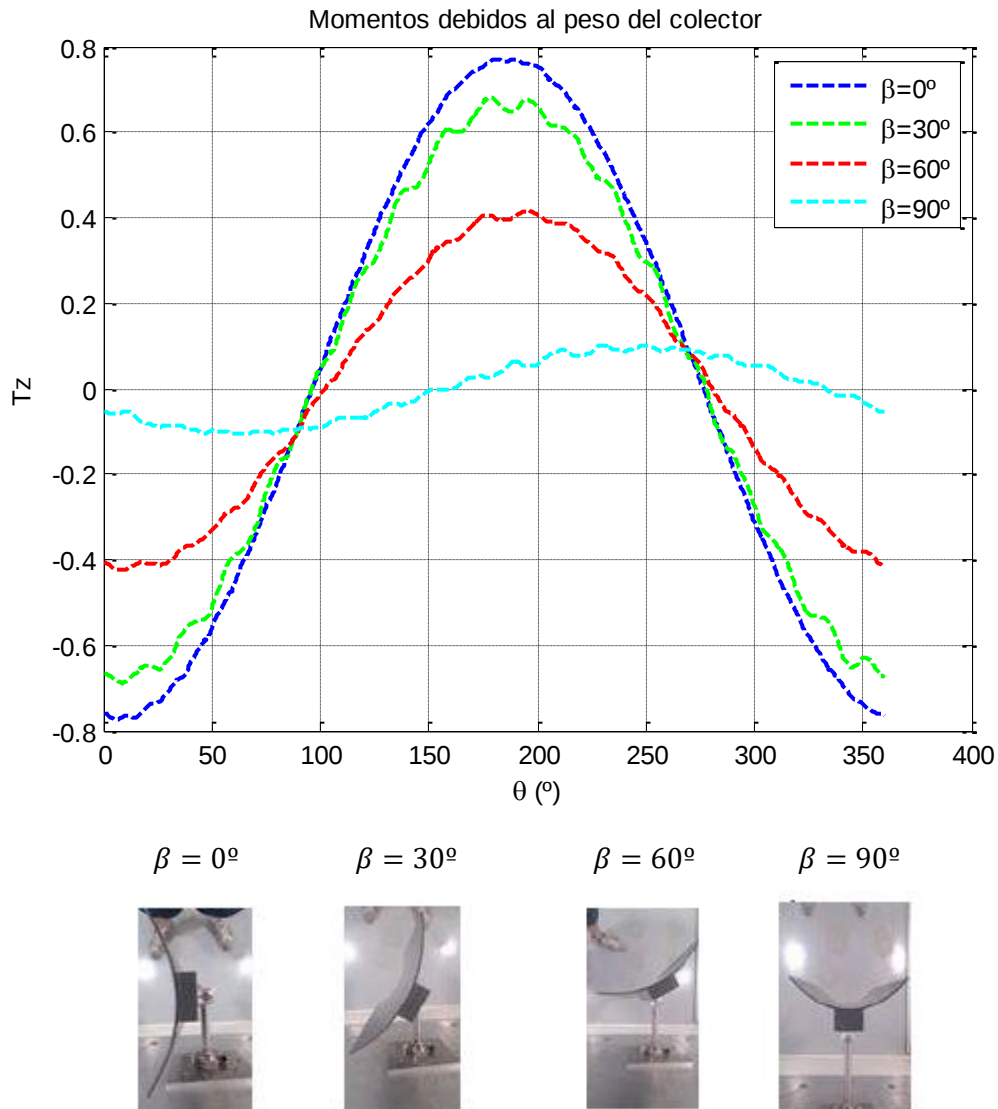


Figura 3.22. Momentos en el eje Z debidos al peso del colector para distintos ángulos de β

Para el caso de los momentos, pueden apreciarse diferencias tanto en los momentos con respecto a los ejes X e Y como para los momentos con respecto en el eje Z. En este último caso, las diferencias son muy notables debido a que al aumentar el ángulo β , el colector se alinea con el eje Z, haciendo que las fuerzas sobre este eje no originen momento. Para los casos del eje X e Y, los momentos aumentan ya que el peso del colector se aleja con respecto a estos ejes, aumentando el brazo del momento.

En conclusión, como existen diferencias entre los valores de las fuerzas en el eje Z y para todos los momentos, es necesario realizar ensayos con el túnel apagado variando el ángulo β de cinco en cinco grados. Una vez estos ensayos se hayan realizado, se le restarán los valores de las fuerzas y momentos obtenidos a las fuerzas y momentos que se obtendrán en las pruebas con el túnel de viento encendido. De esta forma, se eliminarán las fuerzas y momentos originados por el peso, y sólo se tendrán en cuenta las fuerzas aerodinámicas.

4 . ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas las distintas pruebas, se obtienen las fuerzas y momentos medidos por el sensor.

Ahora bien, para analizar los resultados será conveniente calcular los coeficientes de las fuerzas aerodinámicas. Estos coeficientes se compararán entre las diversas configuraciones del colector, tanto en función del ángulo θ como en función de β .

Por último, se analizarán para qué ángulos se consigue que el colector tenga que soportar fuerzas menores, así como para qué ángulos el colector soportará las mayores fuerzas. En definitiva, se perseguirán minimizar los daños que el viento pueda provocar sobre un panel solar y se buscarán las orientaciones más favorables para conseguirlo.

4.1 Cálculo de los coeficientes aerodinámicos

Se denominan fuerzas aerodinámicas a las fuerzas que experimentan los cuerpos por moverse en el seno de un campo fluido. A la componente vertical con respecto a la corriente, se le denomina sustentación, mientras que a la componente horizontal con respecto a la corriente, resistencia aerodinámica. En nuestro caso, el colector no se está moviendo, pero sobre él incide una corriente que generará este tipo de fuerzas. Tras obtener dichas componentes, para analizar los resultados de una manera más simple, se van a adimensionalizar estas fuerzas utilizando las siguientes expresiones:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 A_{frontal}}$$
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 A_{frontal}}$$

Sin embargo, antes de llegar a estos coeficientes deben calcularse las fuerzas de sustentación y resistencia. Para ello, es necesario conocer la posición de los ejes del sensor con respecto a la corriente. Con este objetivo, se representa el siguiente esquema en el que se muestra la dirección de la corriente y la posición de los diferentes ejes. El ángulo que forma la corriente con el eje X, como aparece en el dibujo, es de 30°. Por su parte, el eje Y forma con el X un ángulo recto, luego el eje Y estará a 60° de la dirección opuesta a la corriente.



Figura 4.1. Posición relativa de los ejes con respecto a la dirección de la corriente.

La sustentación seguirá la dirección del eje Z, la resistencia, por su parte, la misma dirección que la corriente. Utilizando las fuerzas que mide el sensor, la sustentación y la resistencia se expresarían de la siguiente forma:

$$L = F_z$$

$$D = [F_x \cos(30 + \theta) + F_y \cos(120 + \theta)]$$

Para poder calcular los coeficientes, será necesario también utilizar las velocidades medidas durante cada ensayo. Dichas velocidades se muestran a continuación en el siguiente vector:

$$U_{\infty} = [12.36 \ 12.556 \ 12.5 \ 12.5 \ 12.53 \ 12.64 \ 12.69 \ 12.5 \ 12.44 \ 12.72 \\ 12.81 \ 12.89 \ 12.78 \ 12.83 \ 12.92 \ 12.94 \ 12.86 \ 12.83 \ 12.83]$$

Cada una de las componentes del vector representa la velocidad en cada uno de los ensayos. Para el cálculo de los coeficientes de cada una de las pruebas, será necesario elegir la velocidad que se obtuvo para dicho ensayo.

Además de las velocidades, se ha medido la densidad atmosférica en Sevilla en la época del año en la que se realizaron los ensayos:

$$\rho_{\infty} = 1.1424 \frac{kg}{m^3}$$

Por último, puede comprobarse que el número de Reynolds en el colector durante los ensayos era elevado, como en el caso de los colectores reales empleados en la práctica:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} L_c}{\mu}$$

Utilizando como longitud característica $L_c = 0.625 \text{ m}$ el ancho del colector, como velocidad la media de todas las velocidades anteriores y como viscosidad $\mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

4.2 Representación de los resultados

Durante este apartado, se mostrarán las fuerzas y los coeficientes aerodinámicos para las diferentes orientaciones del colector. Además, se analizará cuál es la dirección óptima para que la corriente origine la menor fuerza posible en la placa.

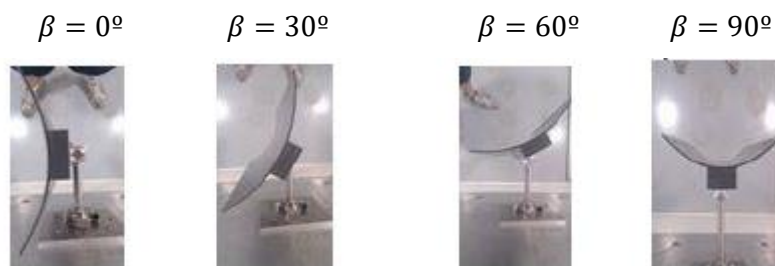
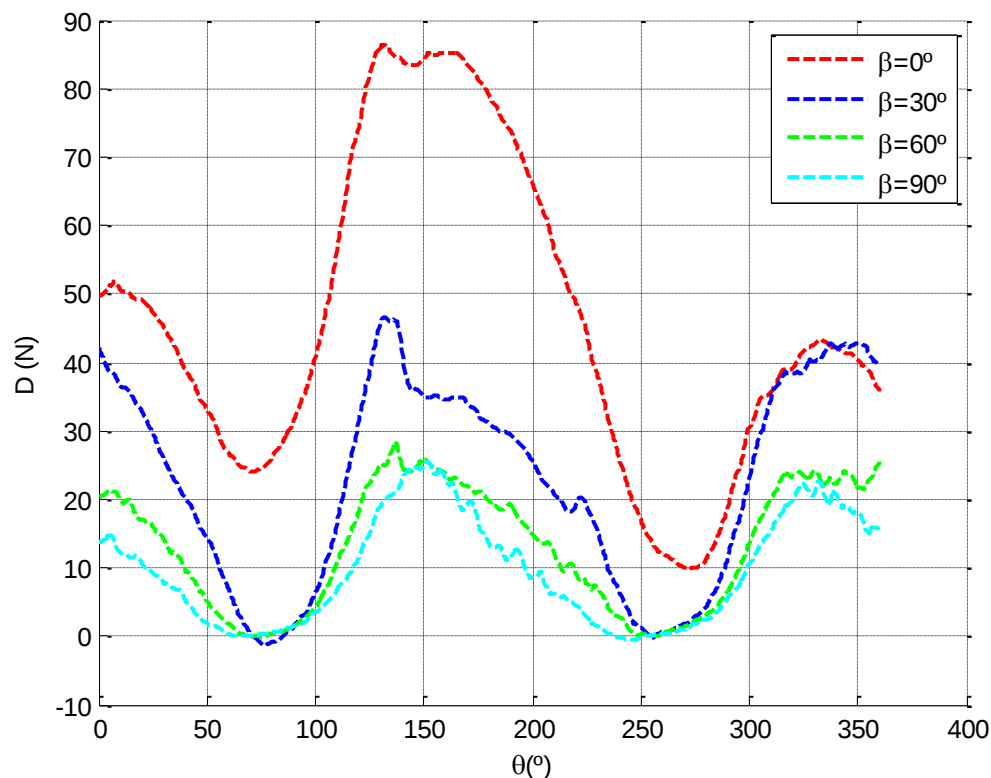


Figura 4.2. Resistencia aerodinámica para distintos ángulos de β .

4.2.1. Fuerzas aerodinámicas.

Tras realizar los ensayos, se han obtenido las fuerzas sobre cada uno de los ejes. A partir de ellas, se han conseguido la sustentación y la resistencia aerodinámica. Dichas fuerzas, se han representado en función del ángulo θ , y a la vez, para diferentes ángulos de β . Ver Figura 4.2.

Como se aprecia en dicha figura, la resistencia va disminuyendo conforme aumenta el ángulo β . Esto se debe a que al incrementar β se produce una disminución de la superficie frontal sobre la que la corriente choca. Al encontrarse con una superficie menor, la corriente no sufre la misma oposición, por lo que las fuerzas que se ejercen son menores. Además, puede observarse que en los puntos en los que la resistencia se hace nula coinciden aproximadamente para los distintos ángulos de β . El primero de estos puntos, se encuentra aproximadamente en $\theta = 90^\circ$ y es el mismo para las distintas curvas. Esto se explica, otra vez, con el mismo razonamiento que se dijo anteriormente, cuando $\theta = 90^\circ$, la corriente no va a encontrar apenas oposición, por lo que la fuerza tenderá a ser menor.

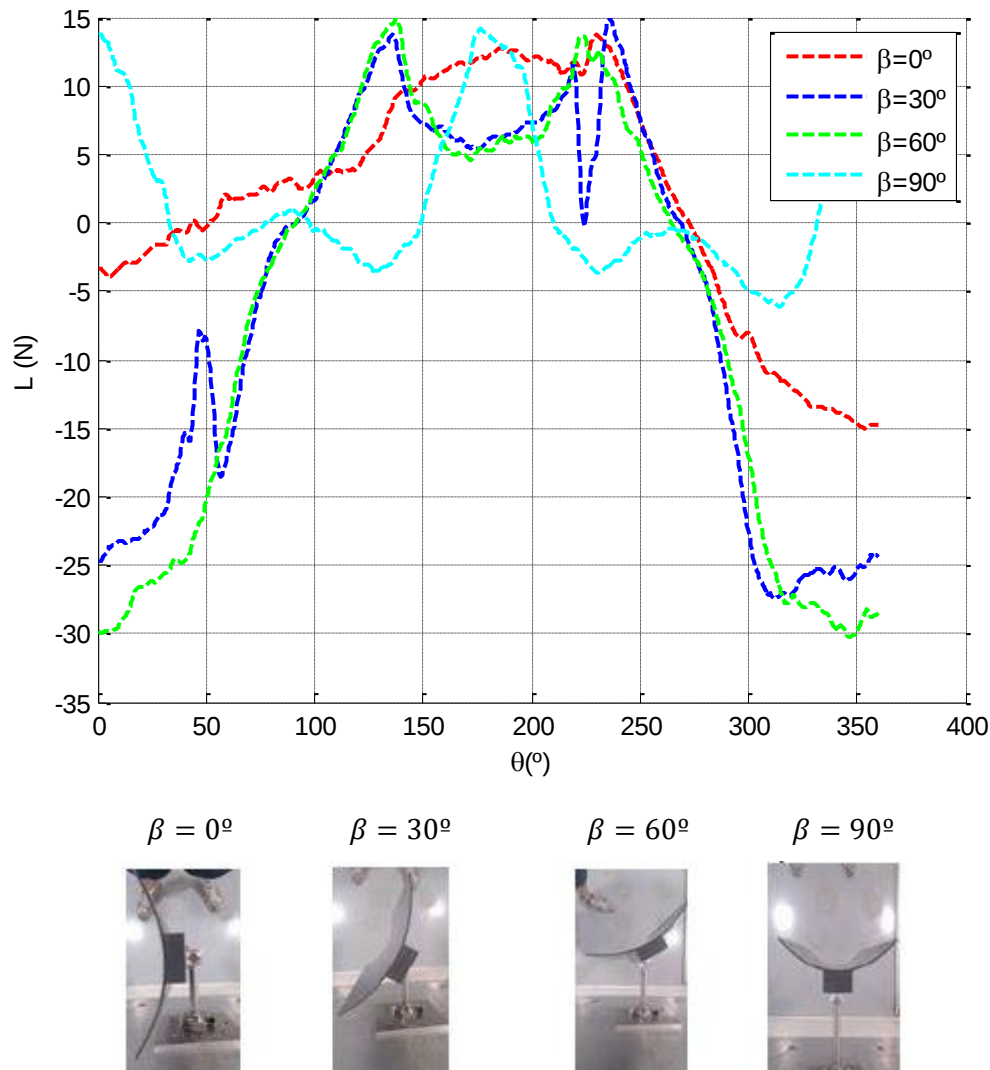
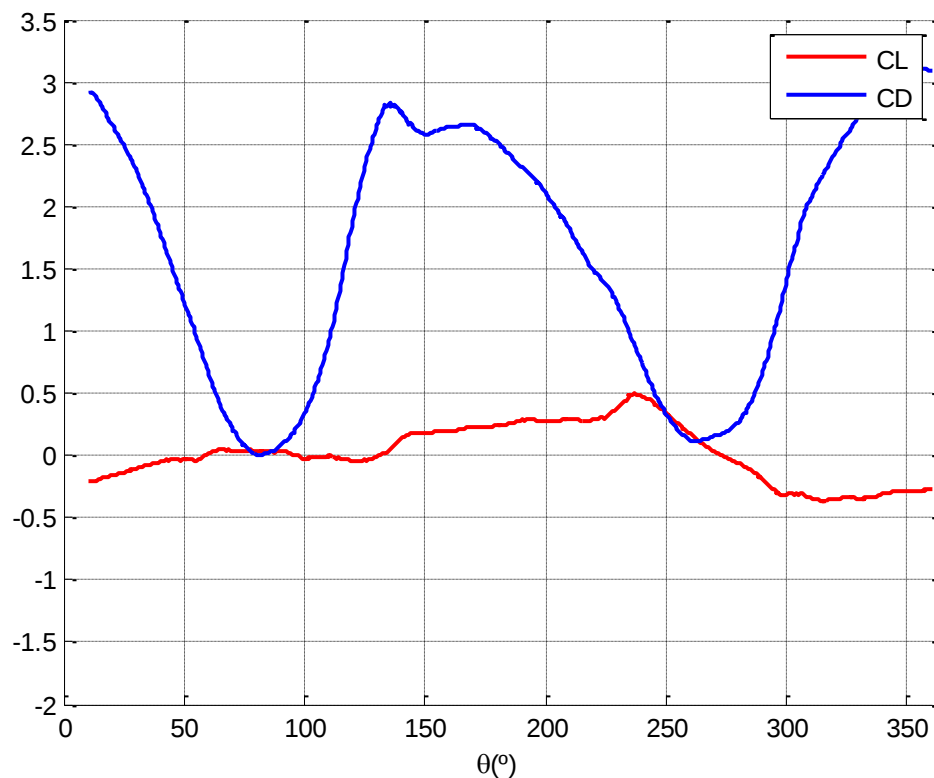


Figura 4.3. Sustentación para distintos ángulos de β .

En la Figura 4.3 puede observarse que para $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$, las fuerzas tienen prácticamente la misma forma. Sin embargo, para los casos de $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$, la forma de las gráficas difiere bastante de las anteriores. La explicación de estas diferencias se realizará una vez que se muestren los coeficientes adimensionales.

Si se comparan los valores de las fuerzas sobre cada uno de los ejes, se aprecia que las fuerzas que originan la resistencia aerodinámica son más grandes que las que originan la sustentación. Mientras que las primeras llegan a valores del orden de 90 N, las últimas alcanzan su valor máximo en valor absoluto de unos 30 N. Según esto, para poder minimizar las fuerzas totales sufridas por el colector será prioritario minimizar las fuerzas que originan la resistencia frente a las que originan la sustentación.



$\theta = 80^{\circ}$

$\theta = 180^{\circ}$

$\theta = 260^{\circ}$



Figura 4.4. Coeficiente de sustentación y resistencia para $\beta = 0^{\circ}$.

4.2.2. Coeficientes de Sustentación y Resistencia en función de θ

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos a partir de las expresiones anteriores de los coeficientes de sustentación y resistencia. En primer lugar, se empezará con los diferentes coeficientes de sustentación y resistencia en función del ángulo θ . Sólo se mostrarán algunos casos del ángulo β , los que se han considerado más representativos.

En la Figura 4.4, se muestran el coeficiente de sustentación y de resistencia para el caso de $\beta = 0^{\circ}$. Comenzando con el coeficiente de resistencia, por un lado, posee dos mínimos cuando el colector se encuentre en valores próximos a 90° y a 270° . La forma parabólica del colector provoca que estos puntos de mínima resistencia no coincidan exactamente con 90° y 270° respectivamente, estando en cambio un poco más adelantados. Se encuentran, siendo más precisos, en 80° y 260° (en la Figura 4.4 aparecen estas orientaciones del colector). Por otro lado, puede apreciarse que la resistencia será máxima tanto al principio del ensayo como al final, es decir, cuando el ángulo θ esté en 0° , o bien, en 360° . Para estos casos, el área frontal sobre el que la corriente incide es la mayor área posible, es decir, a la vista de los giros que realiza el colector, en esta configuración será cuando la corriente deberá sortear la superficie más grande. Por este motivo, la resistencia para estas dos posiciones alcanza esos valores tan elevados. Para finalizar con la resistencia, añadir que en el



Figura 4.5. Colector rotado hacia la derecha para $\beta = 0^\circ$.

centro de la gráfica, es decir, para $\theta = 180^\circ$, debería producirse otro pico en la resistencia. Sin embargo, debido a la forma del colector, la corriente rebordeará con mayor facilidad el panel cuando se encuentre en esta orientación. Por ello, el aumento de la resistencia se produce antes de llegar a 180° y de una manera menos acusada que en los casos anteriores.

Para comprender mejor la forma de las gráficas de la sustentación, sería conveniente imaginar el colector girado de tal forma que el eje Z apuntase hacia arriba, quedando tanto el eje X como el Y contenidos en el plano horizontal. En esta posición sería como estaría colocado el panel solar en una planta solar.

Como ya se ha mencionado, el panel girará alrededor del eje Z, pero debido a la orientación de la placa con respecto a la corriente se generará escasa sustentación en comparación con la resistencia. Puede compararse el colector con una placa plana colocada en contra de la corriente.

En la posición inicial y final del ensayo, la sustentación será prácticamente nula, esto se debe a que en estas posiciones como, ya se ha mencionado anteriormente, la corriente no puede rodear al panel por la parte inferior ni superior, haciendo casi imposible una diferencia de presiones. Sin embargo, debido a la forma parabólica del colector se producirá un efecto que hará aumentar la sustentación durante estos instantes, este efecto podría denominarse como algo parecido al “efecto suelo” empleado en la automoción. Al girar el colector y superar los 180° , se producirá el efecto contrario (debido a la forma parabólica de la placa, la corriente tendrá una mayor facilidad para evitar el colector, creándose diferencias de presiones entre la parte inferior y superior del panel), por lo que la sustentación alrededor del ángulo $\theta = 240^\circ$, alcanzará su máximo.

Con esto, se finaliza el estudio de los coeficientes de sustentación y resistencia para el caso de $\beta = 0^\circ$. En las siguientes figuras, se mostrarán los casos en los que β alcanza los valores de 30° , 45° , 60° y 90° .

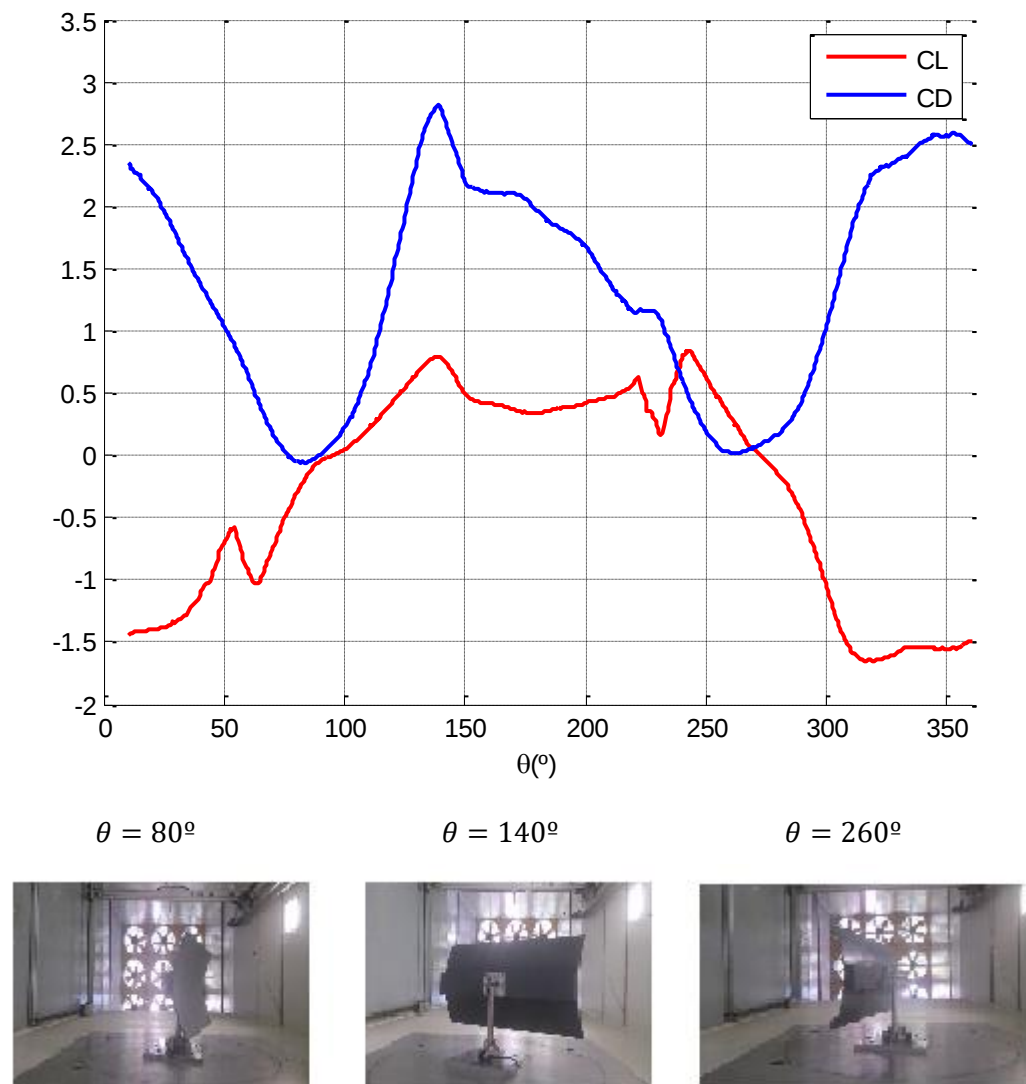


Figura 4.6. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 30^\circ$.

Para el caso de $\beta = 30^\circ$, la forma de la curva del coeficiente de resistencia es muy similar a la del caso anterior. La diferencia más importante puede apreciarse en que no se alcanzan unos valores de resistencia tan elevados en las posiciones inicial y final como en el caso de $\beta = 0^\circ$. La causa fundamental reside en el cambio de orientación del colector. Al aumentar el ángulo β , el panel se va alineando con la corriente, siendo el área frontal sobre la que la corriente incide cada vez menor. Además, puede observarse que los picos de mínima resistencia se alejan un poco más de las posiciones $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 270^\circ$ respectivamente.

Por otro lado, puede apreciarse que la curva de la sustentación es muy diferente a la mostrada anteriormente. Ver Figura 4.6. En la gráfica anterior, se observó un pequeño efecto al que se le atribuyó ser similar al “efecto suelo” de los automóviles. En este caso, este efecto es más apreciable debido a que el colector está ligeramente más orientado en la misma dirección que la corriente. Así, se producirá un efecto de succión que intentará mantener el colector pegado a la pared del túnel. De esta manera, se provocan esas sustentaciones negativas que se aprecian en la gráfica.

Cuando el colector comienza a girar, se aprecia que la sustentación disminuye hasta llegar a ser nula en torno a $\theta = 90^\circ$. Una vez que supera este ángulo, empieza a aumentar hasta alcanzar su pico máximo en $\theta = 137^\circ$ (esta posición se muestra en la Figura 4.6 pero para el caso de $\beta = 0^\circ$). Este aumento de la sustentación se produce debido al rebordeo que realiza la corriente por la parte superior del colector, originado de nuevo por la forma del colector, y estando agravado esta vez por la nueva orientación del colector con respecto a la corriente. Según estos razonamientos, sería lógico pensar que el punto en el que el coeficiente de sustentación



Figura 4.7. Colector rotado para $\beta = 30^\circ$.

alcanza su máximo debería estar en torno a $\theta = 180^\circ$. Sin embargo, como ya se ha mencionado, esto no es así, puesto que existen dos máximos que se alcanzan en torno a $\theta = 140^\circ$ y $\theta = 240^\circ$. La solución a esta contradicción estará en los bordes laterales del colector. Cuando el colector está en $\theta = 140^\circ$, parte de la corriente pasa a la parte trasera del colector a través del borde lateral. De esta forma, se le está comunicando cantidad de movimiento al fluido que está intentando rebordear el “extradós” del colector, así se consigue que la corriente pueda superar el pico de succión y mantener la diferencia de presiones entre la parte superior e inferior, manteniendo la sustentación. Sin embargo, para el caso de $\theta = 180^\circ$ no existe este flujo de corriente por el borde lateral del colector, siendo más probable que el fluido no sea capaz de superar el borde superior y disminuyendo la sustentación.

Los casos de $\beta = 45^\circ$ y $\beta = 60^\circ$ no difieren apenas de este último ensayo, así que no se entrará en tanto detalle para explicar las gráficas como hasta ahora.

Comenzando por el caso de $\beta = 45^\circ$, de la resistencia cabe destacar que sigue disminuyendo con respecto a los ensayos previos debido a la reducción del área sobre la que incide la corriente. Los puntos de resistencia máxima y mínima se mantienen en las mismas posiciones que en los casos anteriores. Ver Figura 4.8.

Por el contrario, la sustentación ha aumentado en ambos sentidos. El efecto de succión al principio y al final del ensayo ha alcanzado valores mayores que en los ensayos anteriores, y además los picos de sustentación han alcanzado también valores más significativos. La mayor inclinación del colector provoca que se produzca un gradiente menos desfavorable de presiones sobre la parte superior del colector. De esta forma, se consigue que la corriente sea capaz de rebordear el colector con más facilidad, aumentando así la sustentación.

La importancia de este ensayo, reside en que para este caso se alcanzan los mayores valores de sustentación de todos los casos. A la hora, de calcular la dirección en la que se obtienen las menores fuerzas aerodinámicas, el valor de la sustentación provocará que no se consigan fuerzas tan pequeñas como en otros casos. Sin embargo, como se observa en la Figura 4.9, durante el segundo pico en la curva de la sustentación, el valor de la sustentación es mayor que el de la resistencia. Este hecho es de gran importancia ya que para esta dirección de la corriente ($\theta = 240^\circ$), sería más probable que el colector fuese arrancando por efecto de la sustentación que por la fuerza de resistencia. Por ello, a la hora de elegir los materiales para el soporte del colector, se debería tener en cuenta que tengan un buen comportamiento a tracción, puesto que la corriente intentará levantar al colector del suelo. Por ejemplo, si se usa un material como el hormigón, el hecho de que la sustentación sea mayor que la resistencia produciría tensiones de tracción en el soporte y, como el hormigón tiene un mal comportamiento ante la tracción, el colector acabaría siendo arrancado del suelo. Más adelante se analizará para qué direcciones y orientaciones el coeficiente de sustentación es mayor que el de resistencia.

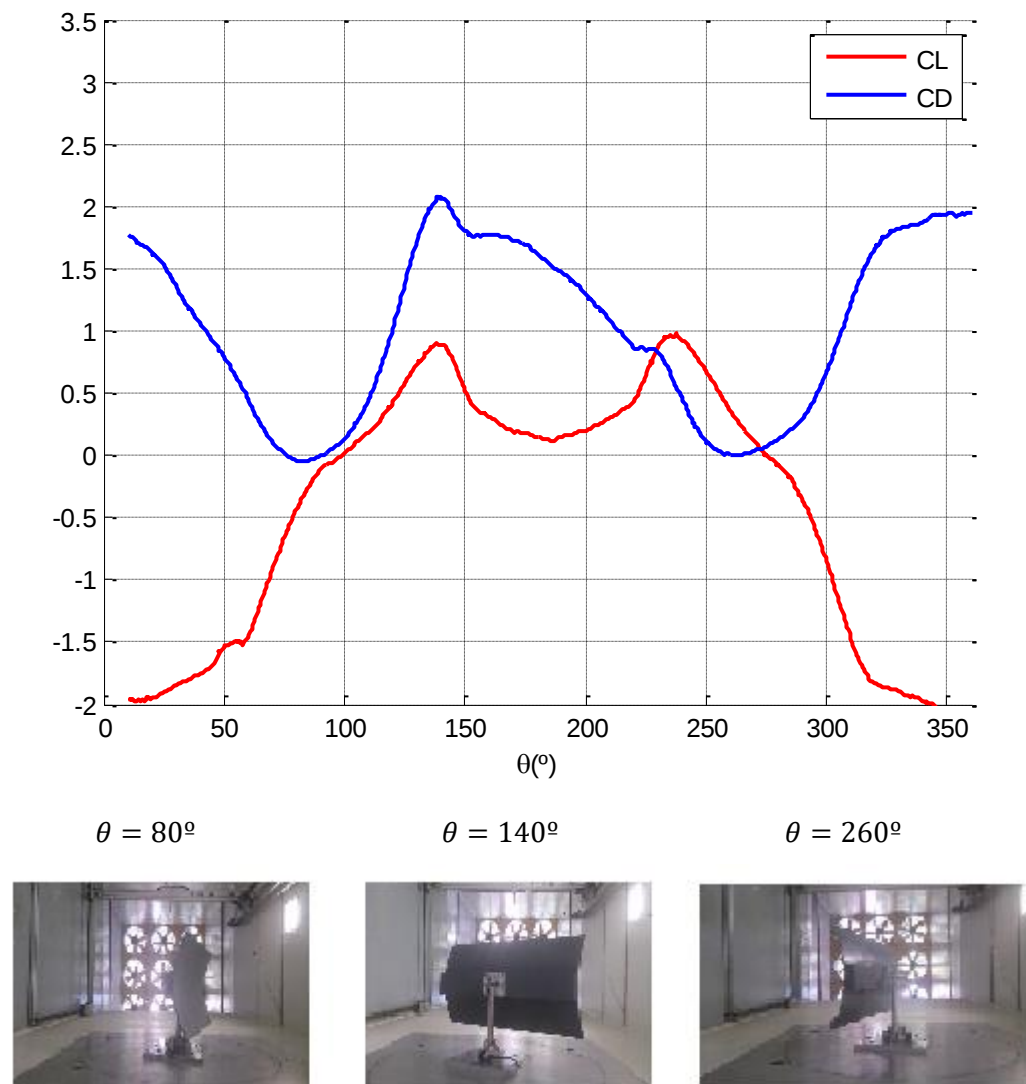


Figura 4.8. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 45^\circ$.

Para el ensayo de $\beta = 60^\circ$, no existen grandes diferencias en cuanto a los anteriores, puede observarse que la forma de las gráficas es muy similar y que los picos tanto de resistencia como de sustentación están aparentemente en las mismas posiciones.

Ahora bien, es importante destacar que la resistencia sigue disminuyendo alcanzando valores de casi la mitad que los valores que se alcanzaban para el primer caso ($\beta = 0^\circ$). Esta disminución sigue avanzando ya que el aumento del ángulo β sigue provocando una disminución del área frontal del colector. En el primer ensayo, se observaba como la resistencia era del orden de 6 veces la sustentación. Sin embargo, puede apreciarse como en este caso, ambas fuerzas están mucho más parejas.

En cuanto a la sustentación, lo más remarcable está en que la sustentación ha comenzado a alcanzar valores más pequeños que en el caso de 45° . Los picos de succión y de sustentación máxima son menos acusados que en el ensayo anterior. La pérdida de succión se debe a que con tal aumento de β , la parte inferior saliente del colector ha dejado de estar en la misma dirección que la corriente. Ver Figura 4.10. De esta manera, no se produce una diferencia de presiones entre la parte trasera del colector y la parte delantera sobre la que incide la corriente.

Por otro lado, la disminución de la sustentación positiva puede compararse con una disminución de una especie de ángulo de ataque. En una placa plana, si la placa está en horizontal sustentará menos que si posee un pequeño ángulo de ataque, debido a que se produce un pico de succión mayor en la parte superior de la

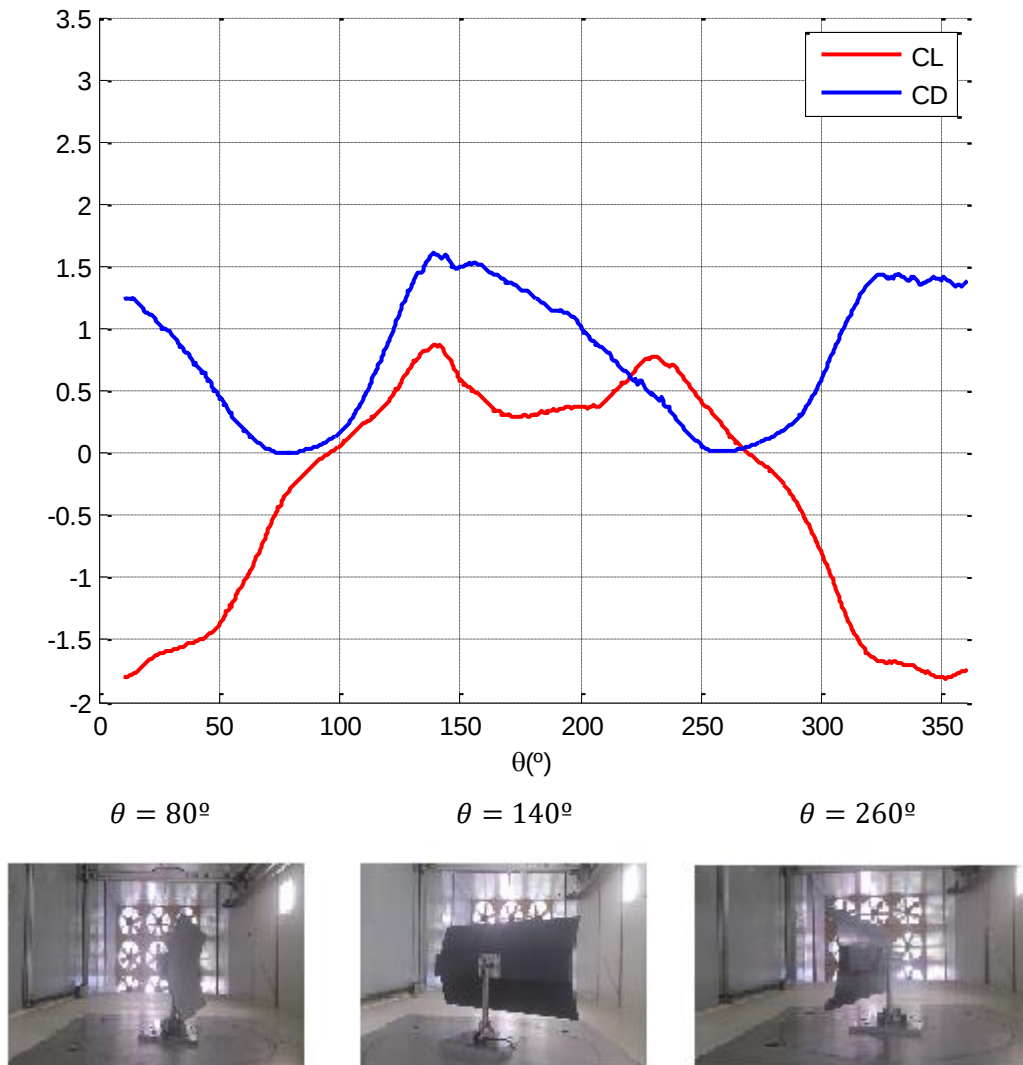


Figura 4.9. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 60^\circ$.

placa. En este caso, se produce algo similar, para el caso de 45° se producía un pico de succión mayor sobre la parte superior del colector que con $\beta = 60^\circ$ no se llega a producir. Las curvas de los coeficientes de sustentación y resistencia para el caso de $\beta = 60^\circ$ aparecen en la Figura 4.10.

Se han mencionado varias veces el efecto de succión. Uno de ellos, se refiere a la succión que experimenta, por ejemplo, un coche de fórmula 1 contra el suelo, debido a la forma de sus alerones delanteros, traseros y del fuselaje. Esto le permite alcanzar grandes velocidades sin despegarse del suelo. Y por otro lado, está el pico de succión que experimenta un perfil aerodinámico en su borde de ataque. En las Figuras 4.11 y 4.12, se muestran estos dos diferentes efectos.



Figura 4.10. Colector girado para $\beta = 60^\circ$.

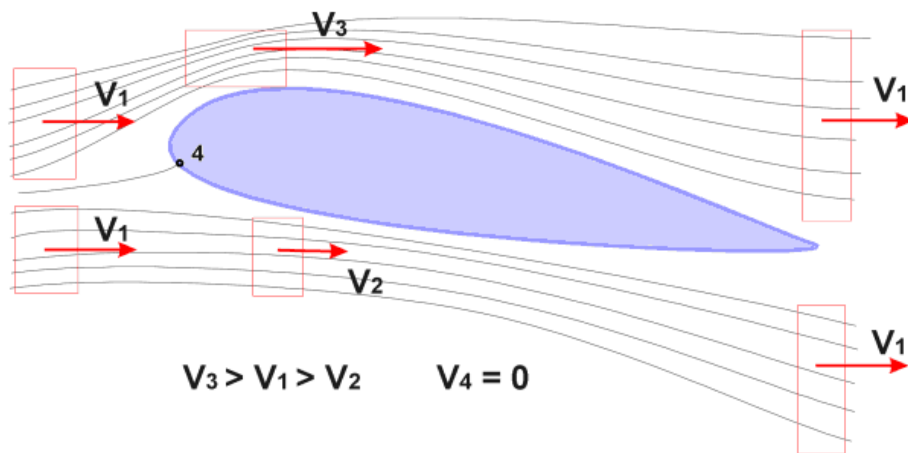


Figura 4.11. Pico de succión en un perfil aerodinámico.

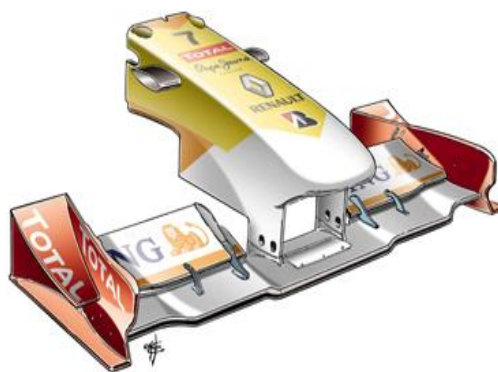


Figura 4.12. Forma del alerón delantero de un coche de Fórmula 1.

Por último, va a mostrarse el caso de $\beta = 90^\circ$. Los resultados de este ensayo difieren bastante de los casos explicados hasta ahora. Este caso, a priori, sería para el que se alcanzan valores de resistencia mínima debida a la orientación del colector. Además, la curva de sustentación no poseerá dos máximos sino uno situado en $\theta = 180^\circ$.

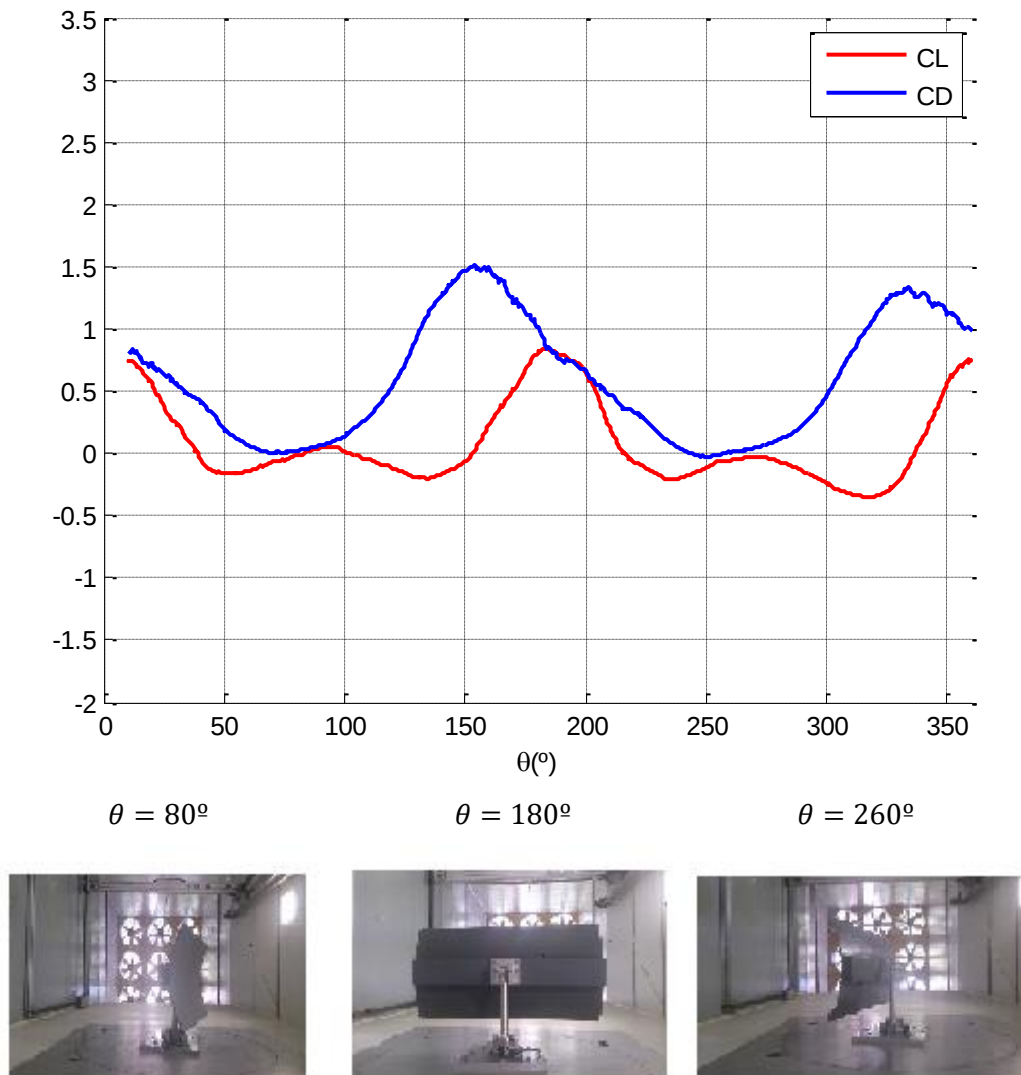


Figura 4.13. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\beta = 90^\circ$.

En la Figura 4.13, se observa que la resistencia ha disminuido aún más con respecto al caso de $\beta = 60^\circ$. Se confirma que para $\beta = 90^\circ$ se producen los valores más bajos de resistencia de todos los ensayos estudiados. Si la resistencia es la fuerza aerodinámica más importante que sufren los colectores, esta orientación deberá ser muy tenida en cuenta a la hora de calcular la dirección y la orientación en la que las fuerzas que experimenta el colector son menores.

Por otro lado, la sustentación difiere mucho de las gráficas mostradas para los casos de $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$. En este caso, no se produce succión al principio y al final del ensayo. En lugar de esto, se produce directamente rebordeo de la parte superior del colector, originando diferencia de presiones entre la parte inferior y superior y generando sustentación. La causa fundamental de este suceso es la orientación horizontal del colector. En esta configuración, el colector puede compararse con un plano al que se le ha doblado el borde de ataque. De esta forma, el colector equivaldría a una placa plana con ángulo de ataque positivo cuando se está en $\theta = 0^\circ$.

Una vez, que comience a girar el colector la corriente incidirá sobre los bordes laterales de éste. A través de estos bordes, se igualarán las presiones en la parte superior e inferior, destruyendo la sustentación. En torno al ángulo $\theta = 50^\circ$, se llegará a tener sustentación negativa, pero no será interesante. La sustentación será nula aproximadamente en $\theta = 90^\circ$. Una vez superado este ángulo, volverá a ser negativa debido a la incidencia de

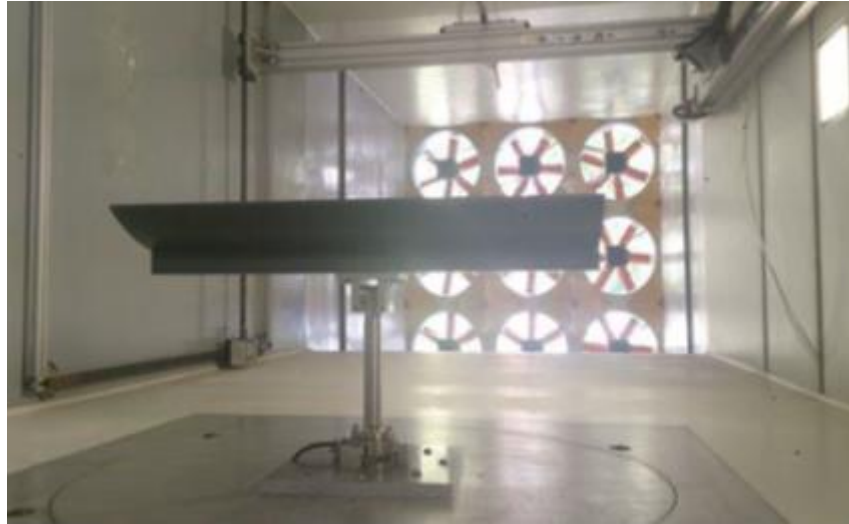


Figura 4.14. Colector girado para $\beta = 90^\circ$.

la corriente sobre los bordes laterales. Conforme el colector se acerca a $\theta = 180^\circ$, la sustentación aumentará hasta alcanzar los valores que se tenían al inicio del ensayo, puesto que no habrá diferencia entre esta posición del colector y la inicial. A partir de 180° , se vuelve a repetir lo ya explicado, pero en sentido inverso, hasta llegar a los 360° .

Por último, para finalizar con los coeficientes de sustentación y resistencia en función del ángulo θ , van a mostrarse en una misma gráfica, por un lado, los coeficientes de sustentación (Figura 4.15) y, por el otro, los coeficientes de resistencia (Figura 4.16).

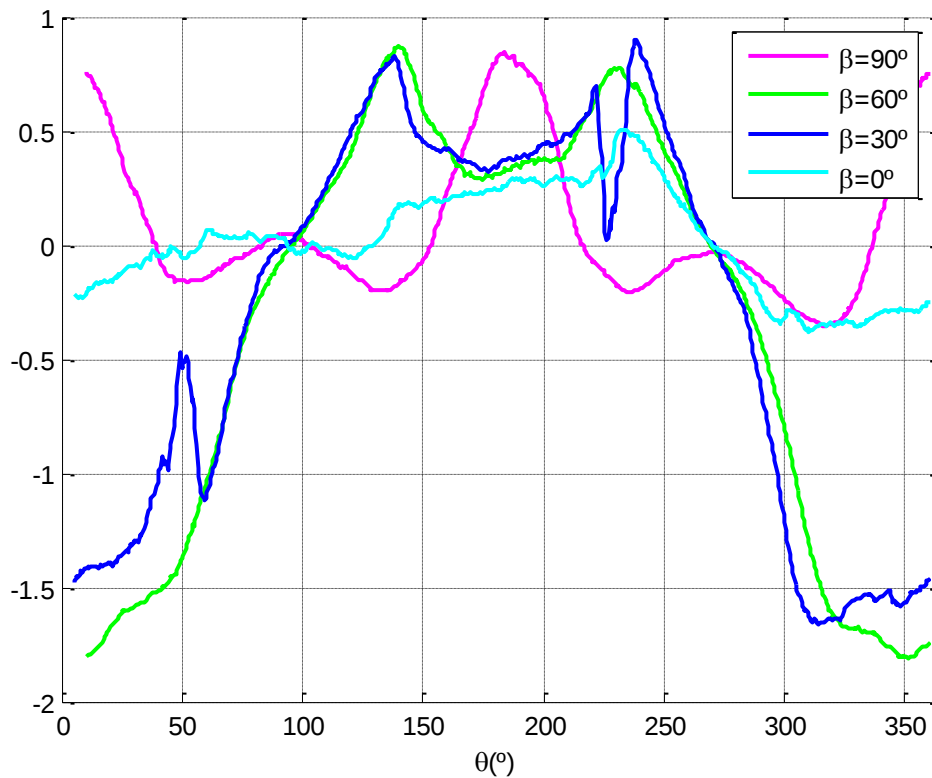


Figura 4.15. Coeficientes de sustentación para distintos ángulos de β .

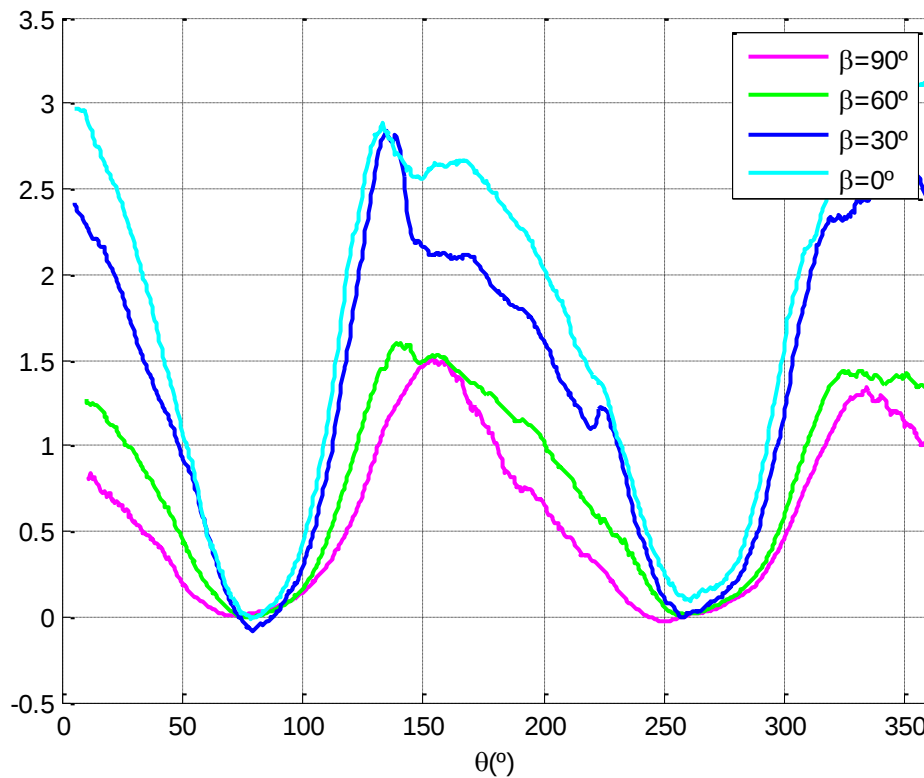


Figura 4.16. Coeficientes de resistencia para distintos ángulos de β .

Como puede observarse en la Figura 4.16, para el caso de $\beta = 0^\circ$, se trata del caso en el que la resistencia es mayor y para el que la sustentación es menor. Los casos de $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$, son muy parecidos en cuanto a la sustentación, pero en cuanto a la resistencia, el primero de ellos tiene mucha más resistencia que el segundo. Por último, para el caso de $\beta = 90^\circ$, se tiene la menor resistencia de todos los casos y una sustentación que alcanza los mismos valores máximos que para los casos de $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$. En estas gráficas, no se ha representado el caso de $\beta = 45^\circ$ para no cargar en exceso las imágenes. Como ya se mencionó anteriormente, este sería el caso en el que la sustentación sería la mayor y en cuanto a la resistencia sería un poco menor que en el caso de $\beta = 30^\circ$, pero con prácticamente la misma forma.

Más adelante, se estudiará la orientación y la posición del colector para que sufra las menores fuerzas posibles. Tras esta comparación, puede observarse como la resistencia, que alcanza valores más grandes que la sustentación, es mínima para $\beta = 90^\circ$, luego este caso deberá ser tomado en cuenta como la orientación con respecto al Sol, con la que el colector hace menores las fuerzas.

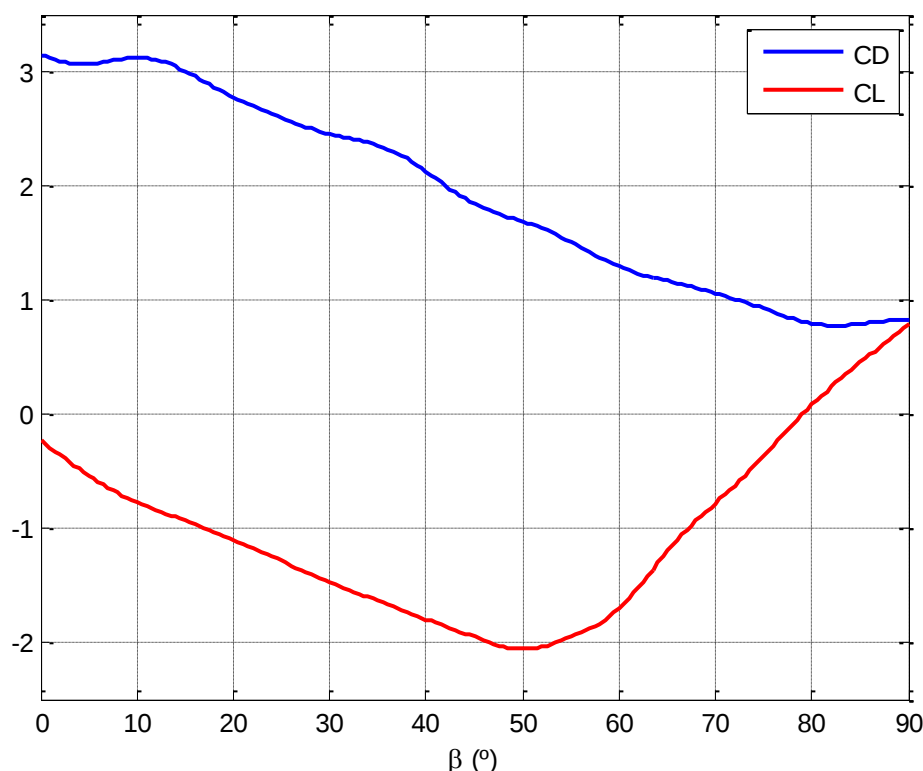


Figura 4.17. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 0^\circ$.

4.2.3. Coeficientes de sustentación y Resistencia en función de β

Como ya se ha podido comprobar en el apartado anterior, dependiendo de la orientación del colector con respecto al Sol, los coeficientes de sustentación y resistencia varían de manera muy significativas. Para confirmar, como varían estos coeficientes con respecto al ángulo β , se representan en función de éste para un ángulo θ fijado.

Para comenzar, se mostrarán los coeficientes para el ángulo $\theta = 0^\circ$, para comprobar así dónde se experimentan los valores mayores de resistencia. Ver Figura 4.17. Como ya se observó viendo las diferentes gráficas del apartado anterior, puede corroborarse que para $\beta = 0^\circ$, se alcanzan los mayores valores de resistencia. Por el contrario, en la figura también se aprecia que los valores más pequeños de resistencia se obtienen entre $\beta = 80^\circ$ y $\beta = 90^\circ$.

A diferencia de la resistencia, la sustentación va decreciendo hasta alcanzar un mínimo y, posteriormente, crece hasta el final. Este suceso ya fue explicado durante el apartado anterior. Al principio, cuando va aumentando el ángulo β , la forma del colector provoca que por la parte inferior del mismo se produzca un efecto de succión hacia la pared del túnel. Este efecto se va haciendo más importante hasta alcanzar un ángulo β en torno a 50° . A partir de este punto, este efecto comienza a disminuir, desapareciendo finalmente en torno a $\beta = 80^\circ$ y dando paso a una sustentación positiva para el caso de $\beta = 90^\circ$. En este último ensayo, la corriente rebordea el borde inferior del colector, mientras que en los anteriores no era capaz de hacerlo.

Sin embargo, para este ángulo θ se obtienen fuerzas mucho mayores que en otros valores del ángulo θ . Por ejemplo, en las gráficas anteriores, las curvas de la resistencia alcanzaban dos mínimos, en los cuales la resistencia tomaba valores prácticamente nulos, y lo más interesante es que siempre se encontraban para unos mismos ángulos de θ . Estos puntos coincidían con $\theta = 80^\circ$ y $\theta = 260^\circ$.

Con el objetivo de observar mejor los valores que alcanza la resistencia en los máximos mencionados, se muestra en la Figura 4.19 la evolución de los coeficientes de sustentación y resistencia en función del ángulo

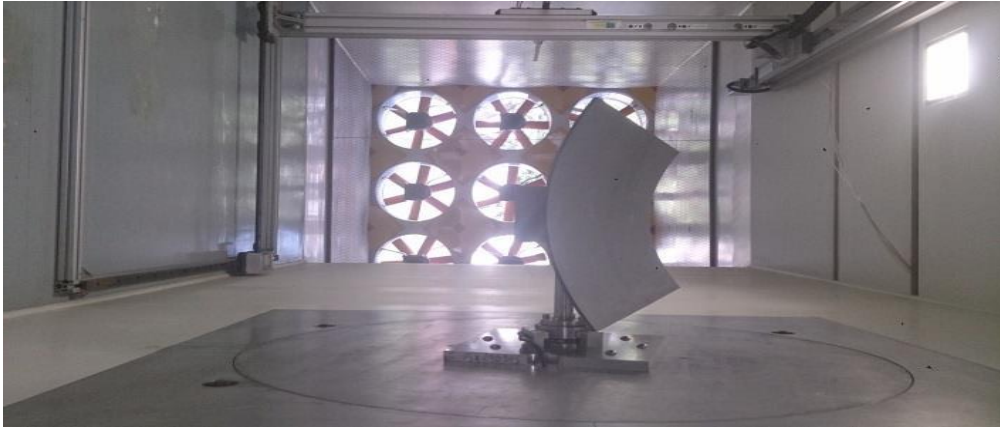


Figura 4.18. Colector para $\theta = 80^\circ$ rotado hacia la derecha.

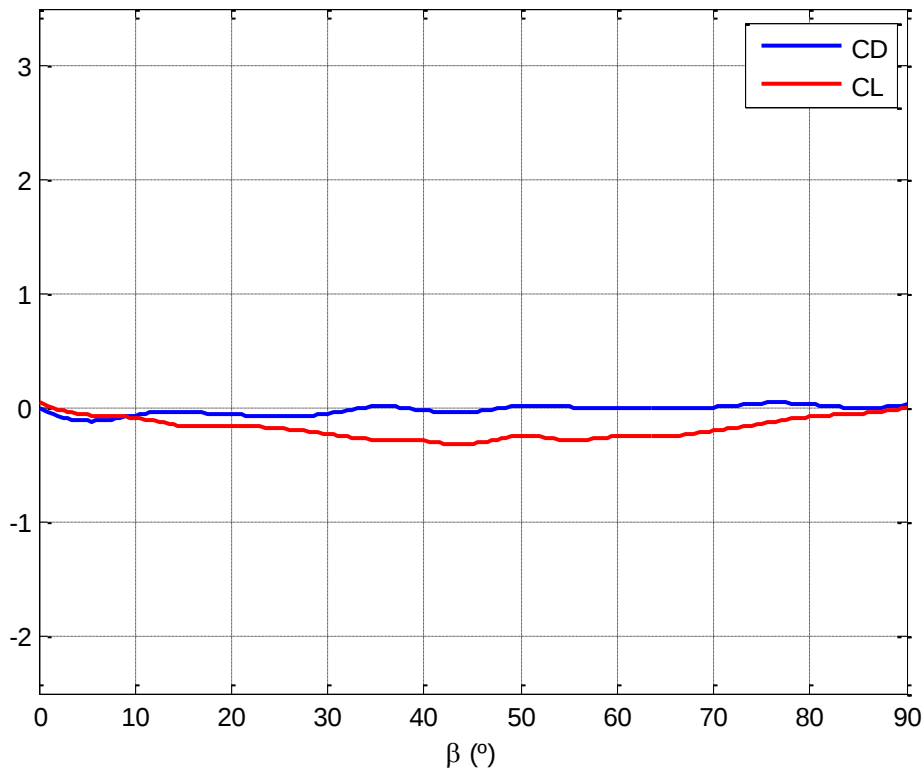


Figura 4.19. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 80^\circ$.

β para uno de estos ángulos. En ésta, puede observarse como los valores que se obtienen de resistencia son muy pequeños para todos los casos de β . La sustentación, por su parte, alcanza valores algo mayores para la mayoría de los ensayos a excepción de los casos de $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$, pero también son bastantes pequeños.

A la vista de estos resultados, puede afirmarse que $\theta = 80^\circ$ y $\theta = 260^\circ$, estarán cerca de las direcciones óptimas en cuanto a minimizar las fuerzas que sufre el colector. En cuanto a la orientación con respecto al Sol, los casos que además de minimizar la resistencia, minimizan la sustentación son $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$. Más adelante, se realizará un estudio para analizar con más detalle cuáles serán las direcciones óptimas según la orientación del colector con respecto al Sol.

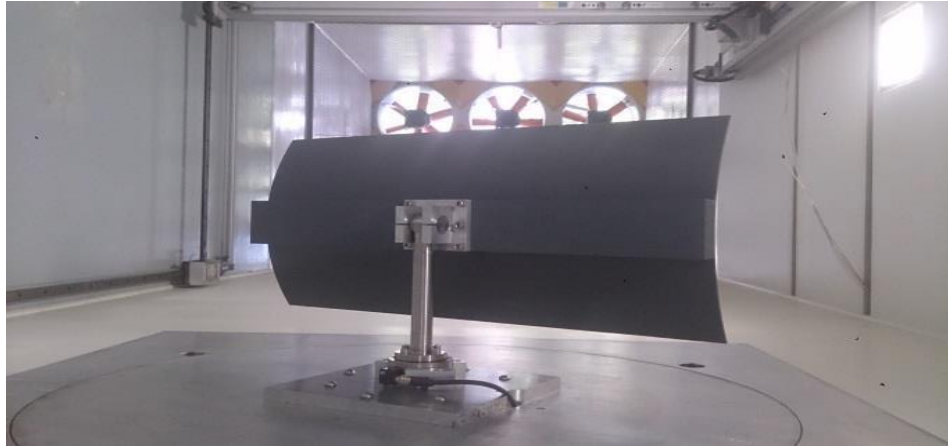


Figura 4.20. Colector para $\theta = 140^\circ$ rotado hacia a derecha ($\beta = 0^\circ$).

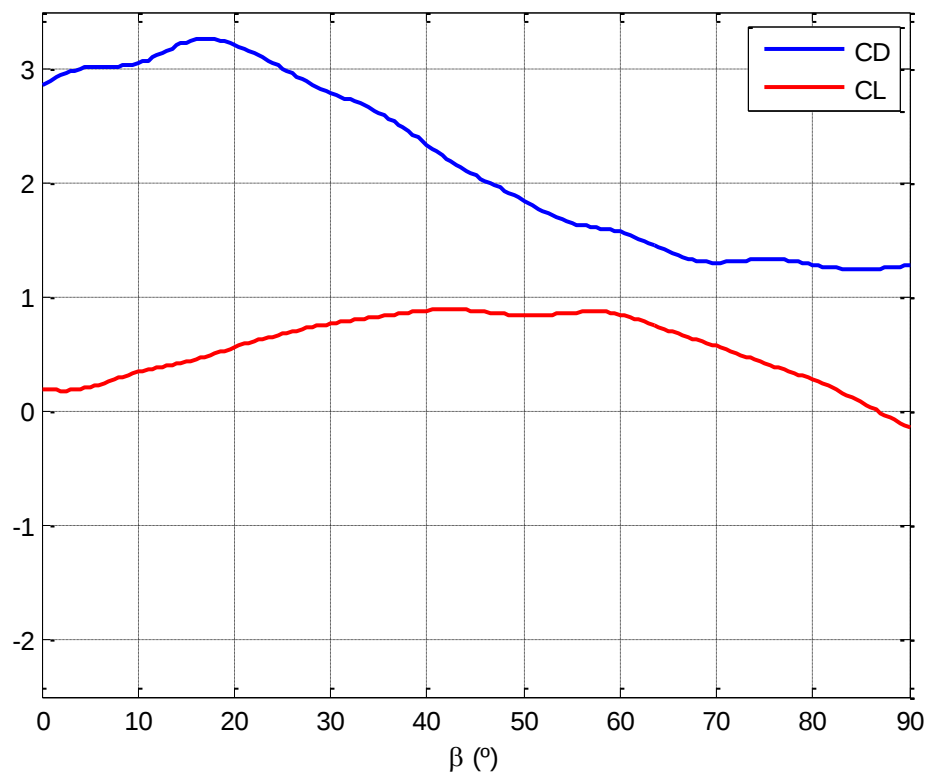


Figura 4.21. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 140^\circ$.

En la Figura 4.22, se ha fijado el ángulo θ en 140° . En este ángulo, se alcanza para la mayoría de los ensayos un máximo en la sustentación, puede observarse en las figuras del apartado anterior para los casos de β igual a 30° y 60° . Este caso no es útil para minimiar las fuerzas, pero sí para conocer cuál sería el caso en el que se alcanza una mayor fuerza de sustentación. Este máximo se repite para $\theta = 240^\circ$, en el que se produce un comportamiento parecido al que se va a explicar para el caso de $\theta = 140^\circ$. En el apartado anterior, ya se explicó el porqué de estos máximos en estos puntos y no en 180° . La causa es que para estos ángulos la corriente es capaz de superar el borde superior del colector gracias a la cantidad de movimiento que se le inyecta al flujo por el borde lateral del colector, sobre el que también incide directamente la corriente.

Por otro lado, también se mencionó, cuando se observó el comportamiento del coeficiente de sustentación para $\beta = 45^\circ$, que la sustentación máxima se alcanza cuando la orientación del colector con respecto al Sol es de 45° . Esto es debido a que para esta orientación se genera un pico de succión acusado en el extradós, el cual la

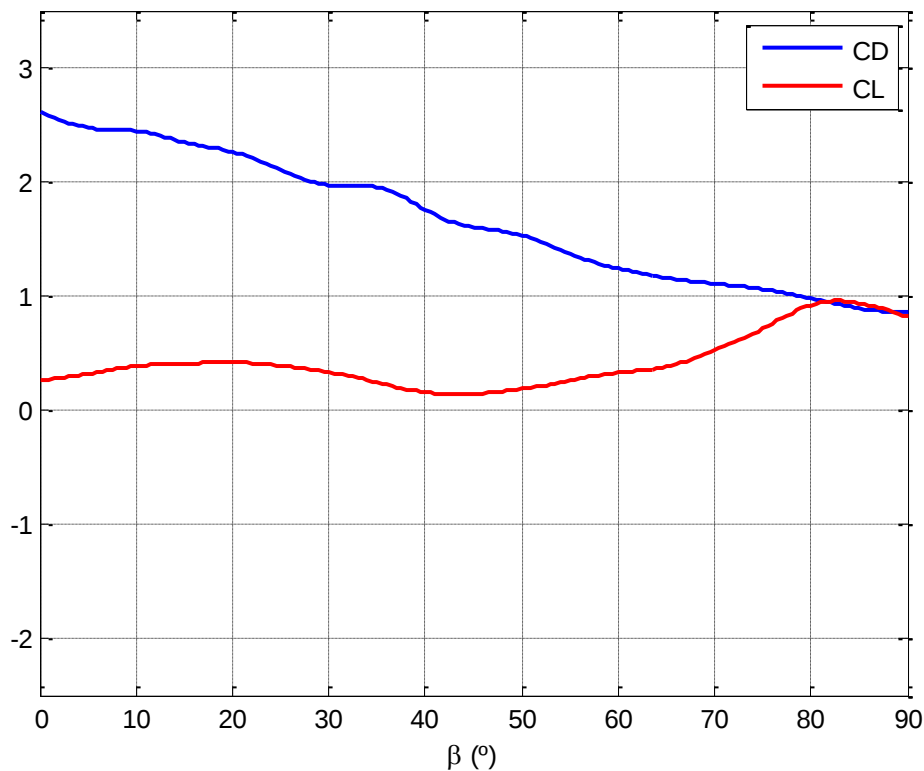


Figura 4.22. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 180^\circ$.

corriente es capaz de superar. Para otros casos, como por ejemplo 60° , no se genera esta diferencia de presiones y para otros, como por ejemplo 30° , la corriente no es capaz de rebordar de esta manera el extradós del colector.

Por otro lado, la resistencia es alta para los primeros ángulos de β y va disminuyendo a medida que aumenta éste. Para este ángulo la resistencia alcanza estos valores ya que el ángulo de rotación está cerca de $\theta = 180^\circ$, donde se tiene una gran área frontal, y por tanto, una gran resistencia.

Otro ángulo en que se ha fijado θ ha sido en 180° . Para este punto, la resistencia alcanza unos valores cercanos a los que se alcanzan en el caso de $\theta = 0^\circ$. Además, la sustentación va aumentando hasta alcanzar $\beta = 90^\circ$.

Comparando la Figura 4.22 con la Figura 4.17, puede comprobarse como la forma de la curva es muy parecida, lo cual es razonable puesto que para ambos casos la corriente se encuentra con el mismo área frontal. Sin embargo, como puede apreciarse si se observan ambas gráficas a la vez, los valores de la resistencia que se alcanzan en este caso son menores que los del anterior. Como ya se razonó en el apartado anterior, el área frontal es la misma, pero la forma del colector una vez que éste gira 180° es muy distinta; en el caso anterior la corriente se topaba con la parte delantera de la parábola y en este con la trasera.

En cuanto a la sustentación, puede comprobarse en la Figura 4.22 que se mantiene prácticamente constante al aumentar β a excepción del caso de $\beta = 90^\circ$. Este punto se encuentra entre los dos máximos que alcanza la sustentación para la mayoría de los casos. En $\beta = 0^\circ$ la sustentación no alcanza ningún máximo y para $\beta = 90^\circ$ el máximo se centra y se encuentra justamente en $\theta = 180^\circ$, de ahí que en gráfica se aprecia una subida en la parte final.

Por último, para concluir con este apartado, en la Figura 4.24, se muestran las curvas para un ángulo $\theta = 240^\circ$. Para este valor del ángulo θ , se obtienen valores del coeficiente de sustentación mayores que los del coeficiente de resistencia para varias orientaciones de β . Como ya se mencionó en el apartado anterior, esto será de gran importancia ya que el colector tenderá a ser arracando más fácilmente por la sustentación que por la resistencia, lo que implica que los materiales que actúen de soporte deban tener un buen comportamiento a

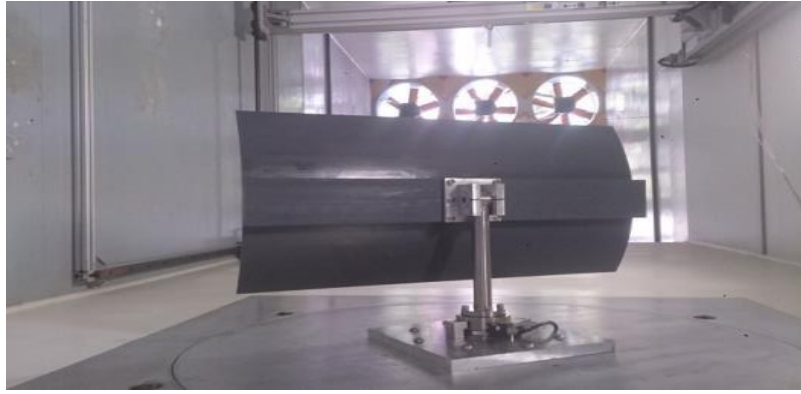


Figura 4.23. Colector rotado para $\theta = 240^\circ$.

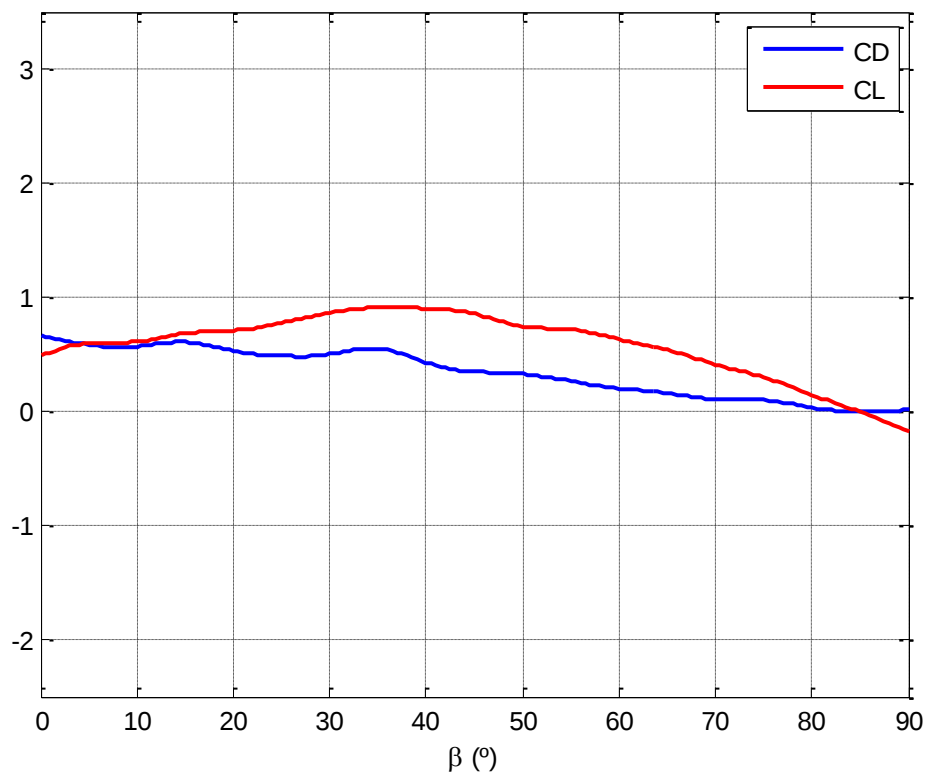


Figura 4.24. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 240^\circ$.

tracción. Como se aprecia en la Figura 4.24, para la mayoría de los ensayos a excepción de los casos de 0° y 90° , la sustentación es más importante que la resistencia. Además, al igual que se mencionó cuando se mostró el caso de $\theta = 140^\circ$, la sustentación máxima se alcanza alrededor de $\beta = 45^\circ$.

4.2.4. Dirección óptima para la corriente

Para este apartado, se va a buscar cuál es la dirección de la corriente para la que el colector soporta fuerzas menores. Para ello, va a calcularse el módulo de la fuerza medida por el sensor, es decir, se calcula la raíz de la suma de las tres componentes de la fuerza al cuadrado. Una vez calculado el módulo, dicha fuerza se adimensionaliza, tal y como se hizo con la sustentación y la resistencia. Por último, este coeficiente de fuerza total se representa en función del ángulo θ y para algunos valores de β , comprobándose así en que dirección la

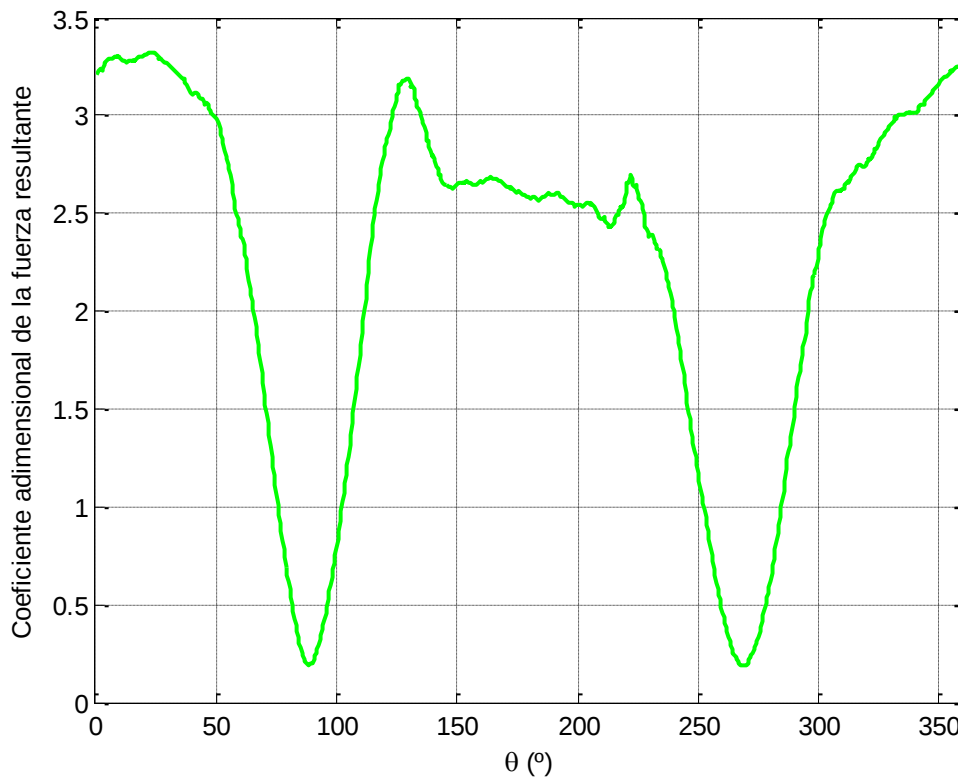


Figura 4.25. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante en función de θ para $\beta = 0^\circ$.

corriente ejerce fuerzas menores para cada orientación.

En la Figura 4.25, se aprecia que los ángulos para los que las fuerzas son mínimas son $\theta = 88^\circ$ y $\theta = 268^\circ$. Durante el apartado anterior, se comprobó que para minimizar la resistencia θ debía ser un valor bastante cercano a 80° . Para minimizar la suma de la resistencia con la sustentación se llega a un ángulo de 88° , es decir, prácticamente $\theta \approx 90^\circ$ y $\theta \approx 270^\circ$.

Si se amplía la gráfica, puede observarse que el valor mínimo que alcanza el coeficiente adimensional de fuerzas es de 0.19. Este valor se comparará con el que se alcanza en estas direcciones pero con una orientación distinta con respecto al Sol. De esta manera, se determinará si las direcciones que minimizan las fuerzas se mantienen constantes y si son capaces de alcanzar los mismos valores para diferentes orientaciones.

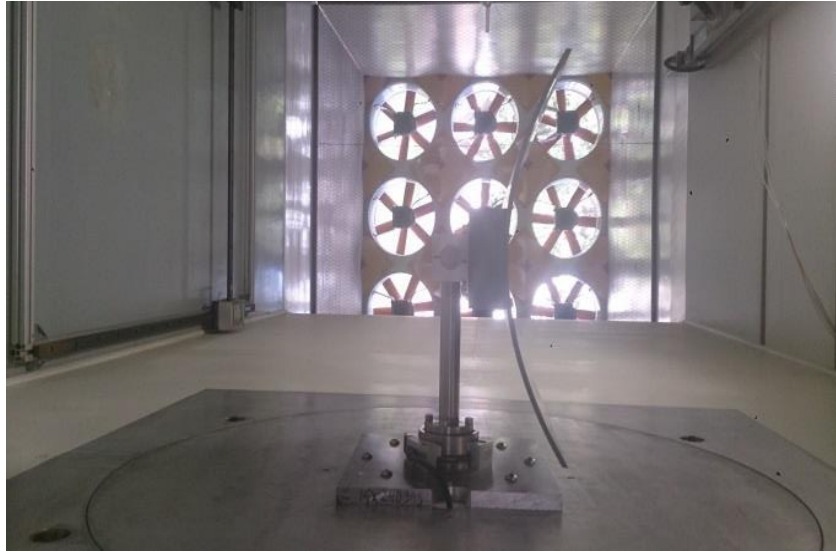


Figura 4.26. Colector rotado hacia la derecha para $\theta = 90^\circ$ y $\beta = 0^\circ$.

A continuación, se mostrarán otros ensayos con diferentes orientaciones, posteriormente se englobarán a todos en una tabla con los valores de la fuerza para cada una de las orientaciones.

Para el caso de $\beta = 30^\circ$, la forma de la curva es muy similar a la del caso anterior. Ver Figura 4.27. Sin embargo, si la gráfica se amplía, puede observarse que el mínimo que alcanza la fuerza es de 0.13, un poco menos que en el caso anterior. La posición de los mínimos es prácticamente la misma que en el caso anterior. En la Figura 4.28, se muestra el caso de $\beta = 60^\circ$.

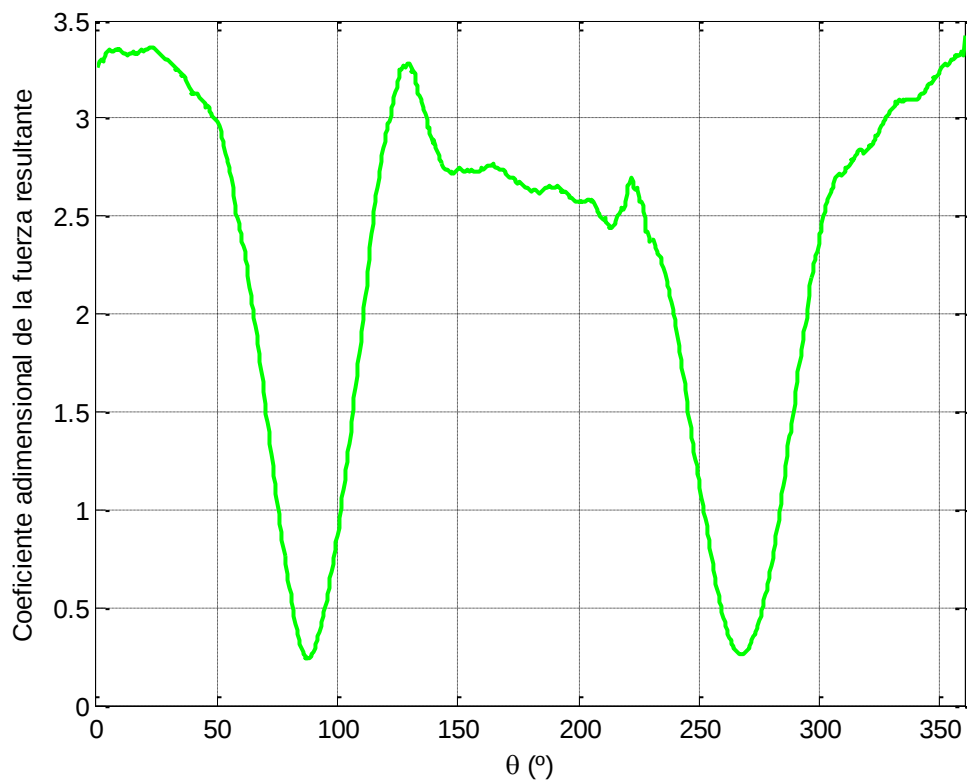


Figura 4.27. Coeficiente adimensional de fuerza para $\beta = 30^\circ$.

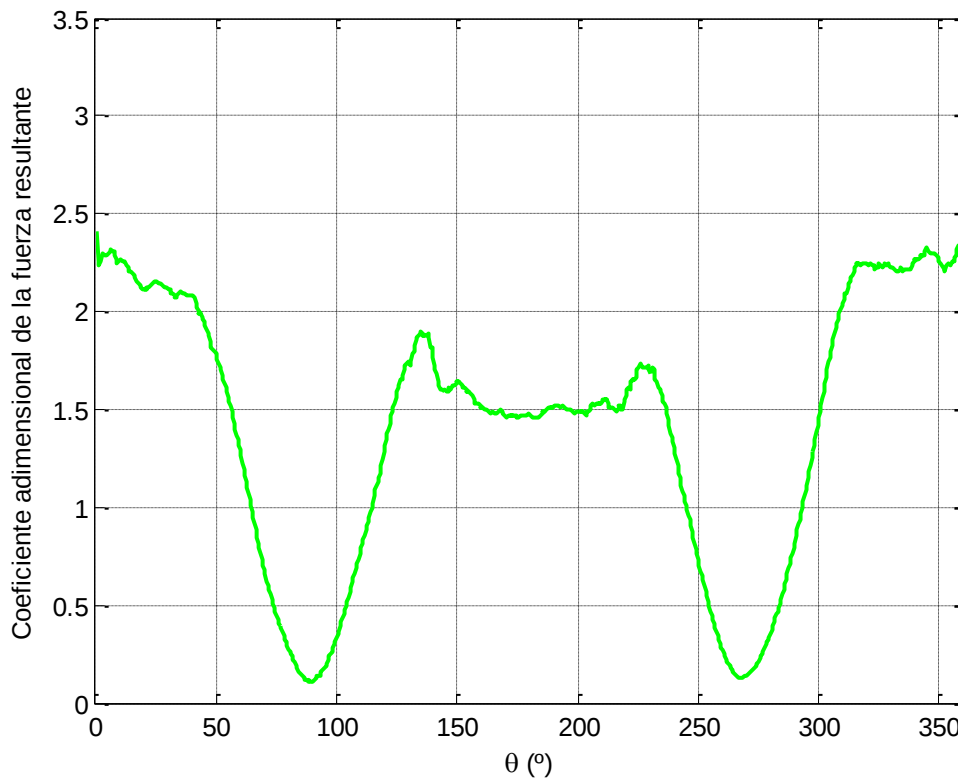


Figura 4.28. Coeficiente adimensional de fuerza para $\beta = 60^\circ$.

Para este caso, los puntos donde se alcanzan los mínimos se han desplazado levemente hacia la derecha, concretamente para este ensayo se tienen en $\theta = 89^\circ$ y $\theta = 269^\circ$. La gráfica es similar a la de los casos anteriores, pero no se alcanzan valores de fuerzas tan elevados. Además otra diferencia importante es que la fuerza mínima ha bajado hasta 0.11, lo que hace que esta orientación tenga, hasta ahora, los puntos en los que se alcanzan menores valores de fuerza.

Por último, en la Figura 4.29 se muestra el caso de $\beta = 90^\circ$, de esta forma se tendrá una visión global de la mayoría de los casos, como se hizo en apartados anteriores. Como se aprecia en la Figura 4.29, la forma de la gráfica es parecida, pero esta vez la dirección de fuerza mínima varía más que en los casos anteriores. Los puntos en los que se alcanzan los mínimos para este ensayo se encuentran en $\theta = 86^\circ$ y $\theta = 266^\circ$. Esto se debe a que para este caso, la sustentación tendía a cero un poco antes que en los casos anteriores. El valor de la fuerza que se obtiene para este ensayo es 0.12. Además, las fuerzas máximas que se alcanzan en este ensayo son mucho menores que en los anteriores, ya que para este caso la resistencia alcanzaba los valores más pequeños.

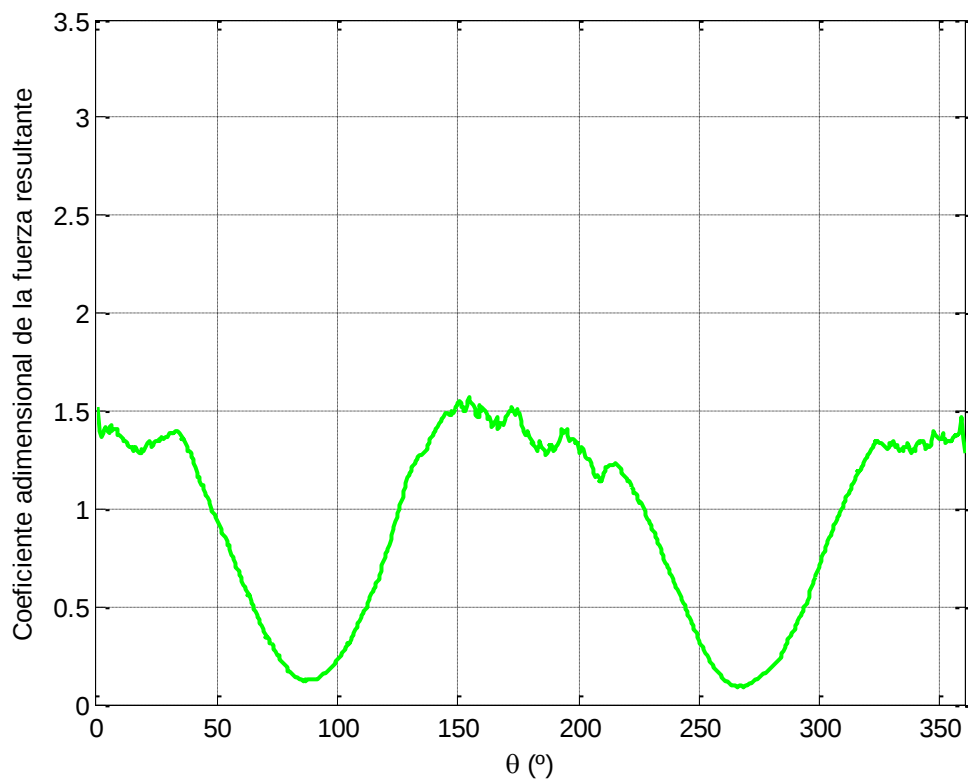


Figura 4.29. Coeficiente adimensional de fuerzas para $\beta = 90^\circ$.

Antes de buscar la orientación para la que se encuentran las menores fuerzas, se representa en la Figura 4.30, las diferentes gráficas anteriores para poder compararlas entre sí con más facilidad.

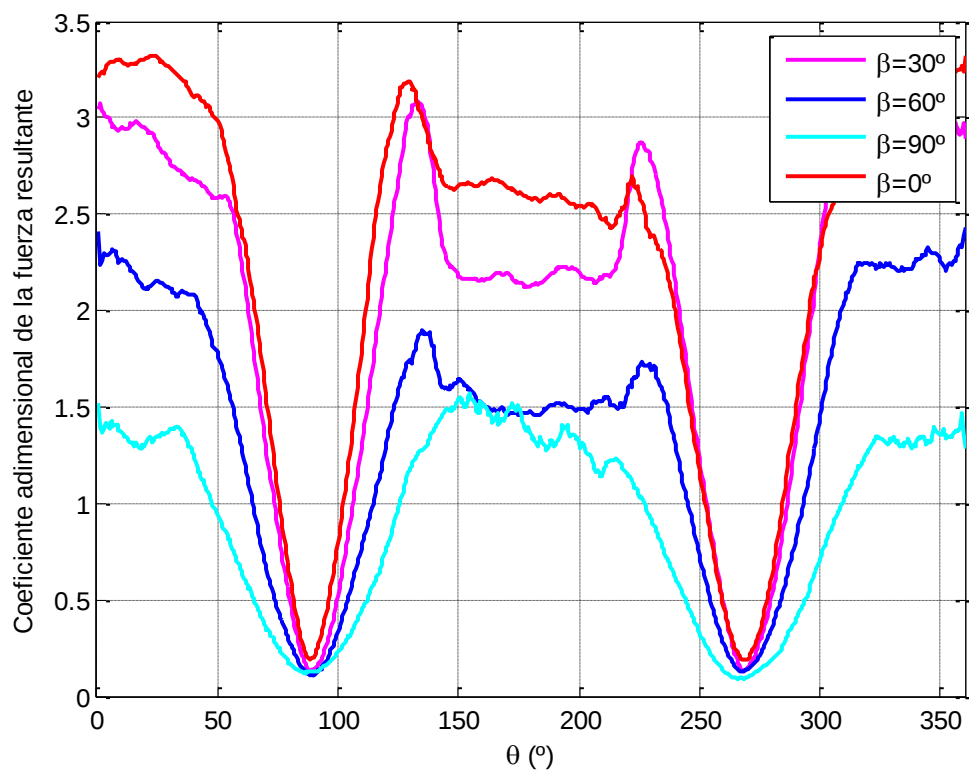


Figura 4.30. Coeficientes adimensionales de fuerzas para distintas orientaciones de β .

Para concluir con este apartado, se reunirán en una tabla algunos de los valores de las direcciones de fuerza mínima junto a los valores de fuerza que alcanzan.

β	θ_1	θ_2	C_F
0°	88°	268°	0.19
15°	90°	270°	0.15
30°	88.5°	268.5°	0.13
45°	91°	271°	0.215
60°	89°	269°	0.11
75°	87°	267°	0.06
90°	86°	266°	0.12

Tabla 4.1. Direcciones de fuerza mínima para diferentes orientaciones de β .

Como conclusión, los valores de resistencia mínima se encuentran para $\theta = 80^\circ$ y $\theta = 260^\circ$, pero los valores de sustentación para esos ángulos son más altos provocando que las direcciones en las que el colector experimente fuerzas menores estén en torno a $\theta \approx 90^\circ$ y $\theta \approx 270^\circ$.

La orientación que hace mínima el coeficiente de fuerzas es $\beta = 75^\circ$. Para este caso, la fuerza mínima se alcanza en $\theta = 87^\circ$ y $\theta = 267^\circ$ con un valor de 0.06. Por tanto, la dirección óptima para minimizar las fuerzas sería $\theta = 90^\circ$ con una orientación de $\beta = 75^\circ$.

5 . CONCLUSIONES

Para concluir con el trabajo van a recopilarse algunas de las ideas que se han extraído de los resultados a los que se han alcanzado. En primer lugar, en cuanto a las fuerzas aerodinámicas se ha comprobado que para el caso de un colector solar como el del modelo la resistencia alcanzará unos valores bastante mayores que la sustentación.

Por un lado, se ha comprobado que la resistencia que genera el colector dependerá directamente del área frontal de éste, disminuyendo cuando el área frontal cae. En las gráficas obtenidas del coeficiente de resistencia se observó que al aumentar β y disminuir el área frontal, el coeficiente disminuía considerablemente, llegando a pasar de valores de 3.5 en sus puntos máximos, a valores de 1.

Por otro lado, se observó que la resistencia siempre se hacía mínima para los mismos ángulos en todas las orientaciones del colector ($\theta = 80^\circ$ y $\theta = 260^\circ$) y, además, que los valores máximos se encontraban al principio y al final del ensayo, cuando el colector estaba colocado en oposición a la corriente.

En cuanto a la sustentación, se han llegado a bastantes resultados de interés. Para empezar, en la parte inicial del ensayo y sobre la parte inferior del colector se provocaba una diferencia de presiones entre la parte trasera del colector (baja) y la parte delantera (alta). Esto sumado a la forma del colector, producía una sustentación negativa que se acentuaba hasta aproximadamente $\beta = 45^\circ$, donde la orientación con respecto al Sol era idónea para generar la suficiente diferencia de presiones. Esta fuerza de sustentación negativa o de succión contra la pared del túnel, podría ser interesante si a la hora de calcular las direcciones de fuerza mínima, esta fuerza se considera que ejerce una acción contraria al resto de fuerzas, ayudando a que el panel solar no sea arrancado por el viento. A continuación, se analizarán las direcciones en los que se tiene un valor bajo de la resistencia, y un valor lo más elevado posible en valor absoluto de sustentación negativa.

Una vez que el colector rotaba la succión desaparecía y se alcanzaban valores máximos de la sustentación. Estos valores se situaban en torno a $\theta = 140^\circ$ y $\theta = 220^\circ$. Estos máximos se localizaban en estos puntos porque a partir de ahí la corriente era capaz de rebordear la parte superior del colector, ayudada por la corriente que superaba al colector por el borde lateral. Cuando el ángulo β se acercaba a 90° , estos máximos se unían en uno sólo situado en $\theta = 180^\circ$. La explicación residía en que para estas orientaciones, la corriente era capaz de rebordear el borde superior del colector sin problemas debido a la orientación casi paralela del colector con respecto a la corriente.

Se realizó un análisis del conjunto de las fuerzas para buscar dónde se encontraba la dirección en la que las fuerzas eran menores. Compensando donde se hacía pequeña la resistencia con donde se hacía pequeña la sustentación, se obtuvieron que las direcciones óptimas se encontraban en torno $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 270^\circ$, mientras que la orientación para la que las fuerzas eran menores era $\beta = 75^\circ$.

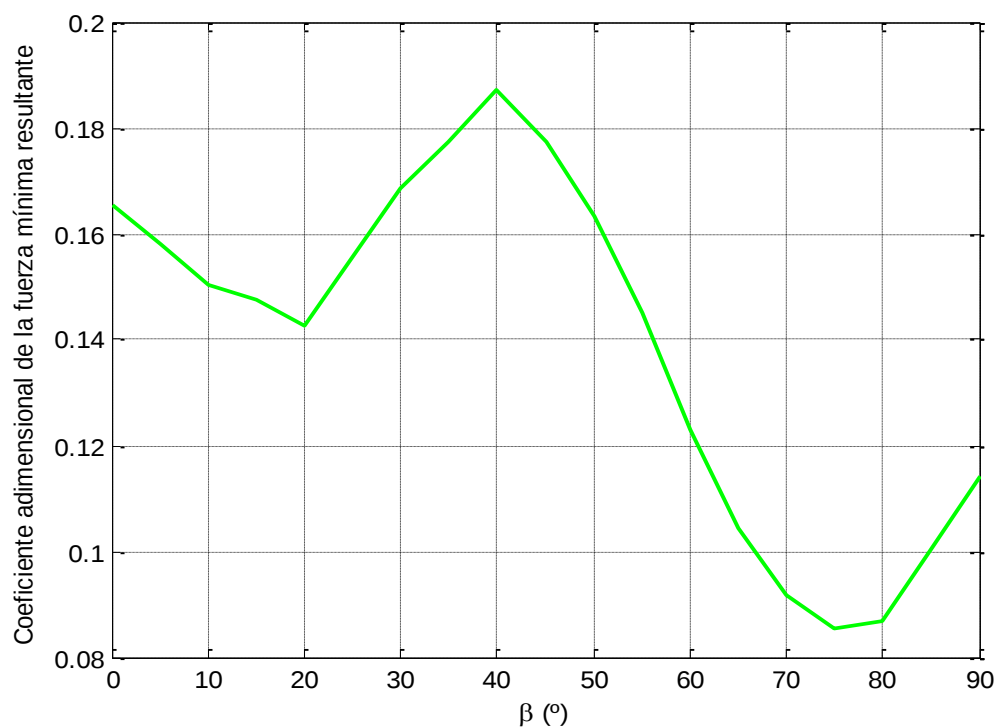


Figura 4.31. Coeficiente de fuerzas mínimo en función de β .

En la Figura 4.31, se muestra la evolución del valor del coeficiente de fuerzas mínimo en función del ángulo β . Los valores que aparecían en la tabla anterior no se corresponden del todo con los de la gráfica, ya que para la representación de la curva se han suavizado los picos que aparecían en ella. Como se observa, alrededor de la orientación $\beta = 45^\circ$, se obtienen valores más grandes del valor mínimo de las fuerzas. Esto se debe a que para estas orientaciones se obtienen valores más elevados de la sustentación, lo que provoca que no se pueda minimizar la fuerza como en el resto de ensayos.

Por otro lado, otro aspecto destacable ha sido que para determinadas direcciones se han obtenido valores del coeficiente de sustentación en valor absoluto mayores que los del coeficiente de resistencia. Este hecho implica que fuese más probable que el colector fuese arrancado por la corriente en esos casos debido a la sustentación antes que debido a la resistencia. La principal consecuencia de este hecho está en que a la hora de la elección de los materiales para el soporte del colector será necesario tener más en cuenta que tengan un buen comportamiento a tracción antes que un buen comportamiento a flexión. Durante el análisis de los resultados, se observó que para direcciones como $\theta = 240^\circ$ o $\theta = 80^\circ$, la sustentación era mayor que la resistencia para la mayoría de los casos de β . En las Figuras 4.32 y 4.33, se recogen los casos de mayor importancia.

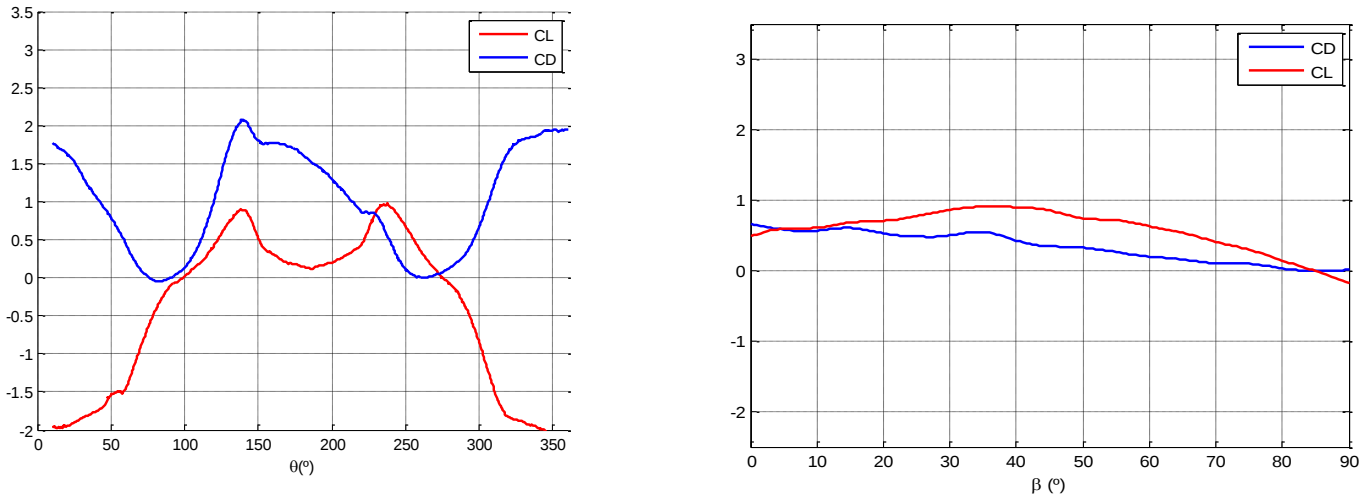


Figura 4.32. Coeficiente de sustentación y resistencia para $\theta = 240^\circ$.

Como se aprecia en la Figura 4.32, para la dirección $\theta = 240^\circ$, se ha obtenido una sustentación mayor que la resistencia para todos los ensayos, exceptuando los casos de $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$. En la gráfica de la izquierda de la figura, ya se observaba como para las direcciones desde $\theta = 240^\circ$ hasta $\theta = 270^\circ$ se obtenían sustentaciones mayores que la resistencia (esta gráfica estaba orientada en $\beta = 45^\circ$). En la derecha, se comprobó que esto sucedía para la mayoría de las orientaciones que se han ensayado. Al caso de $\theta = 240^\circ$, se le ha otorgado más importancia antes que al resto ya que para este ángulo se obtienen valores mayores de sustentación. Sin embargo, es importante mencionar que desde $\theta = 230^\circ$ hasta $\theta = 270^\circ$, la sustentación supera a la resistencia, debiéndose de tener en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente.

Otro valor del ángulo θ en el que el coeficiente de sustentación supera al de resistencia en valor absoluto es en torno a $\theta = 80^\circ$. La diferencia con el resto de direcciones mencionadas, es que en estas direcciones la sustentación es negativa, con lo cual para estos casos, el material de sujeción del colector solar deberá tener un buen comportamiento a compresión. El hecho de que la sustentación sea negativa y la resistencia muy pequeña podría ser beneficioso para que el colector no fuese arrancado por las fuerzas del viento. Por ello, este caso podría ser de interés en cuanto a una nueva dirección óptima del colector con respecto a la corriente. Además, en torno a esta dirección y para $\beta = 45^\circ$, se tiene un valor de resistencia lo más pequeño posible y un valor del coeficiente de sustentación negativo lo mayor posible.

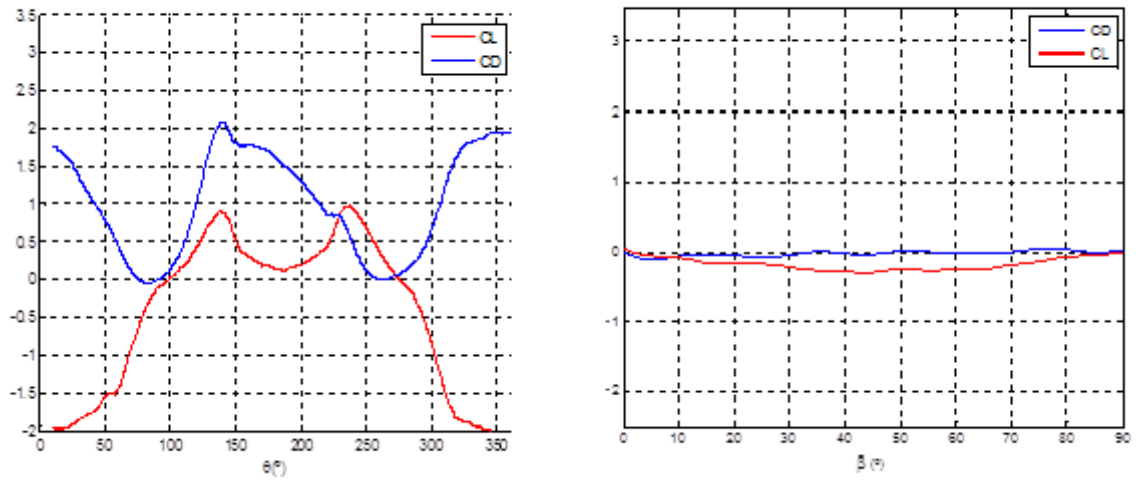


Figura 4.33. Coeficientes de sustentación y resistencia para $\theta = 80^\circ$.

En definitiva, se ha obtenido una dirección óptima en la que se minimizan las fuerzas la cual era $\theta = 90^\circ$ y $\beta = 75^\circ$, otras direcciones en las que el coeficiente de sustentación superaba al de resistencia (desde $\theta = 240^\circ$ hasta $\theta = 270^\circ$) teniendo implicaciones sobre los materiales a usar en el soporte del colector, y por último, una dirección en la que la resistencia era lo más pequeña posible y en la a la vez se tenía una componente de sustentación negativa que pegaba el colector sobre la pared del túnel ($\theta = 80^\circ$ y $\beta = 45^\circ$).

6 . ENSAYOS FUTUROS

Para posibles ensayos futuros se deja la posibilidad de ensayar al mismo tiempo varios modelos de colector solar. La presencia de otros colectores provocaría que la incidencia para un colector concreto no fuera la misma que si ese colector estuviese siendo ensayado de manera aislada. La ventaja de simular varios colectores al mismo tiempo, sería que se representaría más fielmente la realidad puesto que no existen plantas solares de un único panel solar.

REFERENCIAS

Márquez Acedo, Jorge. “Medida de las fuerzas aerodinámicas sobre un modelo de colector solar” en Márquez Acedo, Jorge *Diseño y fabricación de un modelo de colector solar*. Trabajo de Fin de Grado. P.4-19.

Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel y Riboux Acher, Guillaume. “Introducción a la aerodinámica potencial”.

