

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Aeroespacial  
Intensificación en Aeronaves y Vehículos Aeroespaciales

Medida de las fuerzas aerodinámicas sobre un  
modelo de colector solar

Autor: Jorge Márquez Acedo

Tutores: 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, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Medida de las fuerzas aerodinámicas sobre un modelo de colector solar**

Autor:

Jorge Márquez Acedo

Tutor:

José Manuel Gordillo Arias de Saavedra

Guillaume Riboux Acher

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Medida de las fuerzas aerodinámicas sobre un modelo de colector solar

Autor: Jorge Márquez Acedo

Tutores: 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, 2015

El Secretario del Tribunal



*A mi familia y amigos*





Este trabajo se basa en el estudio de las fuerzas aerodinámicas que el viento ejerce sobre un modelo de colector solar cilindro parabólico. El objetivo del estudio es conocer las fuerzas que debe resistir el colector solar, teniendo en cuenta las distintas direcciones con las que puede incidir el viento y la rotación de la placa parabólica en su movimiento siguiendo el Sol a lo largo del día.

Se inicia con el diseño de un modelo del colector a escala que se asemeje a uno real, realizando todos los planos para su posterior fabricación. Para realizar el estudio, se ensaya el colector en el túnel de viento donde se simularán las condiciones de uno real.

El colector está unido a una balanza que permite recoger los valores de las fuerzas y momentos a los que está sometido. Finalmente, se realiza un estudio y análisis posterior de los resultados obtenidos para distintas orientaciones del flujo incidente sobre el colector y orientación del mismo con respecto al Sol.



<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Diseño y fabricación</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Colector solar</i>	4
2.2. <i>Placa parabólica</i>	6
2.3. <i>Rigidizador</i>	8
2.4. <i>Placa de unión</i>	10
2.5. <i>Bridas y eje transversal</i>	11
2.6. <i>Barra soporte del colector</i>	14
2.7. <i>Balanza Gamma SI-130-10</i>	15
2.8. <i>Galleta de unión</i>	16
2.9. <i>Bridas de amarre</i>	17
2.10. <i>Placa de unión con túnel</i>	19
<b>3 Realización de la prueba experimental</b>	<b>21</b>
3.1. <i>Balanza Gamma SI-130-10</i>	21
3.2. <i>Montaje y adaptación al túnel de viento</i>	25
3.3. <i>Ensayo experimental</i>	27
3.4. <i>Calibración con el peso del colector</i>	31
<b>4 Análisis de los resultados</b>	<b>37</b>
4.1. <i>Coeficiente de sustentación y coeficiente de resistencia</i>	37
4.1.1. <i>Cálculo del <math>C_D</math> y <math>C_L</math></i>	37
4.1.1.1. <i>Cálculo del área frontal</i>	39
4.1.2. <i>Resultados experimentales</i>	46
4.2. <i>Eficiencia aerodinámica</i>	50
4.3. <i>Momentos con respecto a los tres ejes</i>	51
<b>5 Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>6 Ensayos futuros</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>
<b>Anexo A. Códigos de Matlab</b>	<b>63</b>
<b>Anexo B. Gráficas <math>C_L</math> y <math>C_D</math> para distintas posiciones de la placa parabólica</b>	<b>73</b>
<b>Anexo C. Gráficas de momentos para distintas posiciones de la placa parabólica</b>	<b>83</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1. Tipos de colectores cilindro parabólicos



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1.1. Planta solar de Andasol
- Figura 2.1. Colector solar SENERtrough
- Figura 2.2. Dimensiones reales de la placa del colector SENERtrough
- Figura 2.3. Parte trasera del modelo de colector
- Figura 2.4. Parte delantera del modelo de colector
- Figura 2.5. Perfil derecho del modelo de colector
- Figura 2.6. Dimensionamiento de la placa parabólica
- Figura 2.7. Molde hembra y macho de la placa parabólica
- Figura 2.8. Placa parabólica del modelo
- Figura 2.9. Placa parabólica con rigidizadores curvos
- Figura 2.10. Dimensionamiento del rigidizador
- Figura 2.11. Rigidizador del modelo
- Figura 2.12. Dimensionamiento de la placa de unión
- Figura 2.13. Placa de unión del modelo
- Figura 2.14. Dimensionamiento del eje transversal
- Figura 2.15. Eje transversal del modelo
- Figura 2.16. Dimensionamiento de las bridas
- Figura 2.17. Visión lateral de las bridas del modelo
- Figura 2.18. Visión delantera de las bridas del modelo
- Figura 2.19. Dimensionamiento de la barra soporte
- Figura 2.20. Barra soporte del modelo
- Figura 2.21. Unión entre la barra soporte y el eje transversal
- Figura 2.22. Dimensionamiento de la balanza
- Figura 2.23. Dimensionamiento de la galleta de unión
- Figura 2.24. Galleta de unión del modelo
- Figura 2.25. Dimensionamiento de la brida de amarre de menor longitud
- Figura 2.26. Brida de amarre de menor tamaño del modelo

Figura 2.27. Dimensionamiento de la brida de amarre de mayor longitud

Figura 2.28. Brida de amarre de mayor tamaño del modelo

Figura 2.29. Dimensionamiento de la placa de unión con túnel

Figura 2.30. Placa de unión con túnel del modelo

Figura 3.1. Balanza Gamma SI-130-10

Figura 3.2. Transductor

Figura 3.3. Caja de fuente de alimentación

Figura 3.4. Sistema de adquisición de datos

Figura 3.5. Conexión entre los elementos de la balanza (1/2)

Figura 3.6. Conexión entre los elementos de la balanza (2/2)

Figura 3.7. Programa *LabVIEW*

Figura 3.8. Dirección y sentido de las cargas y momentos medidos por el sensor

Figura 3.9. Unión del colector con la balanza

Figura 3.10. Unión del colector y la balanza con el túnel de viento

Figura 3.11. Posición inicial del colector solar

Figura 3.12. Dirección del flujo con respecto al colector

Figura 3.13. Direcciones de incidencia del viento y sentido de rotación del colector

Figura 3.14. Placa parabólica situada a  $\beta = 0^\circ$

Figura 3.15. Placa parabólica situada a  $\beta = 30^\circ$

Figura 3.16. Placa parabólica situada a  $\beta = 60^\circ$

Figura 3.17. Placa parabólica situada a  $\beta = 90^\circ$

Figura 3.18. Carga según el eje X debida al peso del colector

Figura 3.19. Carga según el eje Y debida al peso del colector

Figura 3.20. Carga según el eje Z debida al peso del colector

Figura 3.21. Momento según el eje X debido al peso del colector

Figura 3.22. Momento según el eje Y debido al peso del colector

Figura 3.23. Momento según el eje Z debido al peso del colector

Figura 4.1. Posición de los ejes y sentido de giro del sensor

Figura 4.2. Velocidad del viento en función de la posición de la placa

Figura 4.3. Posiciones del colector para cada intervalo del área frontal  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$



Figura 4.4. Posiciones del colector para cada intervalo del área frontal  $\theta \in [180^\circ, 360^\circ]$

Figura 4.5. Área frontal en función de la dirección de incidencia del viento

Figura 4.6. Vista de la placa para  $\beta=45^\circ$

Figura 4.7. Coeficiente de sustentación y de resistencia

Figura 4.8. Coeficiente de sustentación en función de “ $\beta$ ”

Figura 4.9. Coeficiente de resistencia en función de “ $\beta$ ”

Figura 4.10. Comparación del coeficiente de sustentación

Figura 4.11. Comparación del coeficiente de resistencia

Figura 4.12. Eficiencia aerodinámica en función de “ $\beta$ ”

Figura 4.13. Eficiencia aerodinámica en función de “ $\theta$ ”

Figura 4.14. Momentos en función de “ $\theta$ ”

Figura 4.15. Comparación del momento con respecto al eje X

Figura 4.16. Comparación del momento con respecto al eje Y

Figura 4.17. Comparación del momento con respecto al eje Z

Figura 5.1. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para una posición de la placa a  $\beta = 45^\circ$

Figura 5.2. Vistas de la dirección del viento incidente óptima

Figura 6.1. Boceto de la posición de varios modelos de colectores solares

Figura B.1. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $0^\circ$

Figura B.2. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $5^\circ$

Figura B.3. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $10^\circ$

Figura B.4. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $15^\circ$

Figura B.5. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $20^\circ$

Figura B.6. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $25^\circ$

Figura B.7. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $30^\circ$

Figura B.8. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $35^\circ$

Figura B.9. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $40^\circ$

Figura B.10. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $45^\circ$

Figura B.11. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $50^\circ$

Figura B.12. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $55^\circ$

Figura B.13. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $60^\circ$

Figura B.14. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $65^\circ$

Figura B.15. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $70^\circ$

Figura B.16. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $75^\circ$

Figura B.17. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $80^\circ$

Figura B.18. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $85^\circ$

Figura B.19. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $90^\circ$

Figura C.1. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $0^\circ$

Figura C.2. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $5^\circ$

Figura C.3. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $10^\circ$

Figura C.4. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $15^\circ$

Figura C.5. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $20^\circ$

Figura C.6. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $25^\circ$

Figura C.7. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $30^\circ$

Figura C.8. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $35^\circ$

Figura C.9. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $40^\circ$

Figura C.10. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $45^\circ$

Figura C.11. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $50^\circ$

Figura C.12. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $55^\circ$

Figura C.13. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $60^\circ$

Figura C.14. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $65^\circ$

Figura C.15. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $70^\circ$

Figura C.16. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $75^\circ$

Figura C.17. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $80^\circ$

Figura C.18. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $85^\circ$

Figura C.19. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $90^\circ$





# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de este trabajo es la realización de un modelo simplificado de colector solar cilindro parabólico con el fin de realizar ensayos experimentales 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 es conocer las fuerzas aerodinámicas que ejerce el viento sobre la estructura de un colector solar. Es interesante conocer el valor de estas fuerzas ya que se han producido grandes pérdidas económicas en plantas solares que se encuentran instaladas en el desierto, debido a las tormentas de arena o fuertes ráfagas de viento. Estos fenómenos meteorológicos han destrozado numerosos colectores por no haber estado preparados para soportar vientos de tanta fuerza.



Figura 1.1. Planta solar de Andasol

Por lo que se busca un tipo de colector solar cilindro parabólico que no tenga una estructura trasera muy compleja para poder realizar un modelo a escala del mismo, posicionarlo en el túnel de viento y así tomar las distintas medidas haciéndolo rotar.

Una vez encontrado dicho tipo de colector y sus medidas, se realiza un diseño muy simplificado de manera que simule bien a uno real, en cuanto al estudio de las fuerzas aerodinámicas se refiere, y que, además, se pueda fabricar en el periodo de tiempo disponible y en los laboratorios de la escuela.

Por lo que, realizados los planos de diseño, se fabrica el modelo de colector solar y se adapta al túnel de viento para obtener las distintas medidas de las fuerzas aerodinámicas cambiando la incidencia del viento, así como la posición de la placa con respecto al Sol.

## 2 DISEÑO Y FABRICACIÓN

En este apartado, lo que se pretende es, a partir de un tipo de colector solar cilindro parabólico utilizado en la realidad, realizar un modelo bastante simplificado a escala, de manera que se pueda ensayar en el túnel de viento. Se busca que tenga una relación de semejanza con uno real en las partes de la estructura que más influirán en el estudio de las fuerzas aerodinámicas, como, por ejemplo, la placa parabólica o la estructura que soporta dicha placa.

La fabricación será el proceso más crítico ya que, durante los ensayos, el modelo debe de resistir a la fuerza del viento, por lo que hay que fabricarlo con cuidado e invirtiendo más tiempo que en el resto de partes del proyecto. Cualquier fallo puede provocar resultados erróneos o incluso que se tenga que volver a fabricar, debido a que no ha conseguido aguantar durante los ensayos.

Para el diseño del modelo, se ha realizado una búsqueda de los distintos tipos de colectores cilindro parabólicos, encontrando cuatro con las siguientes características:

Tabla 2.1. Tipos de colectores cilindro parabólicos

Tipos	SKAL-ET150	SENERtrough	IST	Solargenix
Apertura (m)	5.77	5.76	4.4	5.77
Distancia focal (m)	1.71	1.7	1.7	-
Longitud (m)	12.37	12.5	12	12

Entre los cuales, se ha elegido el colector solar SENERtrough, debido a que tiene una estructura soporte de la placa más sencilla y la relación de semejanza con el real será mayor. Dicho colector se representa en la Figura 2.1:



Figura 2.1. Colector solar SENERtrough

Para la elaboración del diseño, de la tabla anterior se tienen las medidas exactas de la placa parabólica del colector, que corresponden con las siguientes:

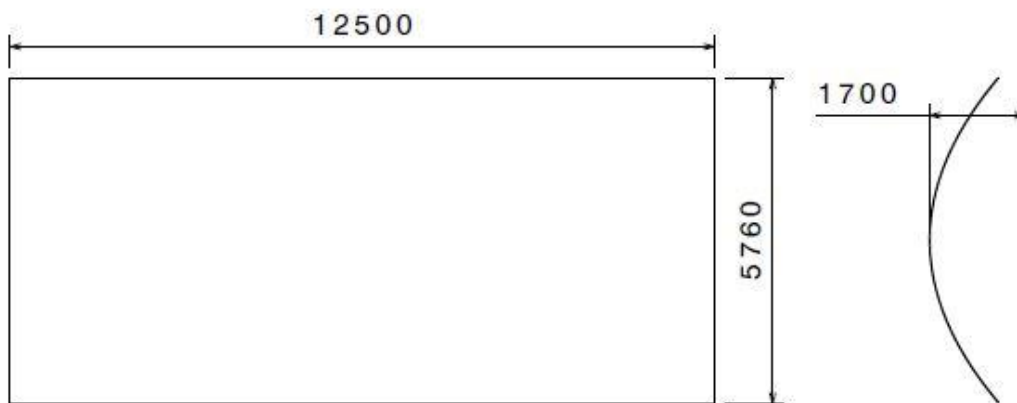


Figura 2.2. Dimensiones reales de la placa del colector SENERtrough

Para las medidas reales de la estructura soporte trasera, se ha estimado la altura del colector de manera que la placa parabólica quede relativamente cerca de la base del conjunto como sucede en la realidad, véase la Figura 2.1. Además, también se ha tenido en cuenta que, como se verá más detalladamente, se ha dejado una cierta distancia aceptable entre la placa y la base, donde va a estar situado el sensor de medida de las fuerzas (la balanza), para que no se distorsionen dichas medidas al pasar el flujo entre ambos elementos.

Para el resto de dimensiones del soporte trasero del colector, al ser un modelo simplificado, se ha optado por la búsqueda de la optimización de su peso en equilibrio con la resistencia del mismo para asegurar la correcta realización de los ensayos en el túnel de viento.

El soporte trasero también se ha diseñado con la finalidad de permitir girar la placa parabólica simulando los colectores reales que para captar una mayor energía solar mueven la orientación de sus placas siguiendo el movimiento del sol durante el día.

La escala aplicada a la placa para la elaboración del modelo ha sido 1:20, es decir, 1 mm en el modelo equivale a 20 mm en la realidad. Hay que tener en cuenta, que a la hora de fabricarlo, hay algunas piezas que para obtener un correcto funcionamiento o por márgenes de error de las herramientas utilizadas, han podido variar alguna de sus dimensiones muy ligeramente, en pocos milímetros, con respecto al diseño.

## 2.1 Colector solar

Primero se presenta el ensamblaje final del modelo a ensayar del colector solar cilindro parabólico, para poder tener una idea clara de cómo va a ser y de las piezas que lo forman. Seguidamente se detallan dichas piezas y el lugar en el que se encuentran para poder comprender el funcionamiento del conjunto.

El diseño del ensamblaje final del colector es el siguiente:



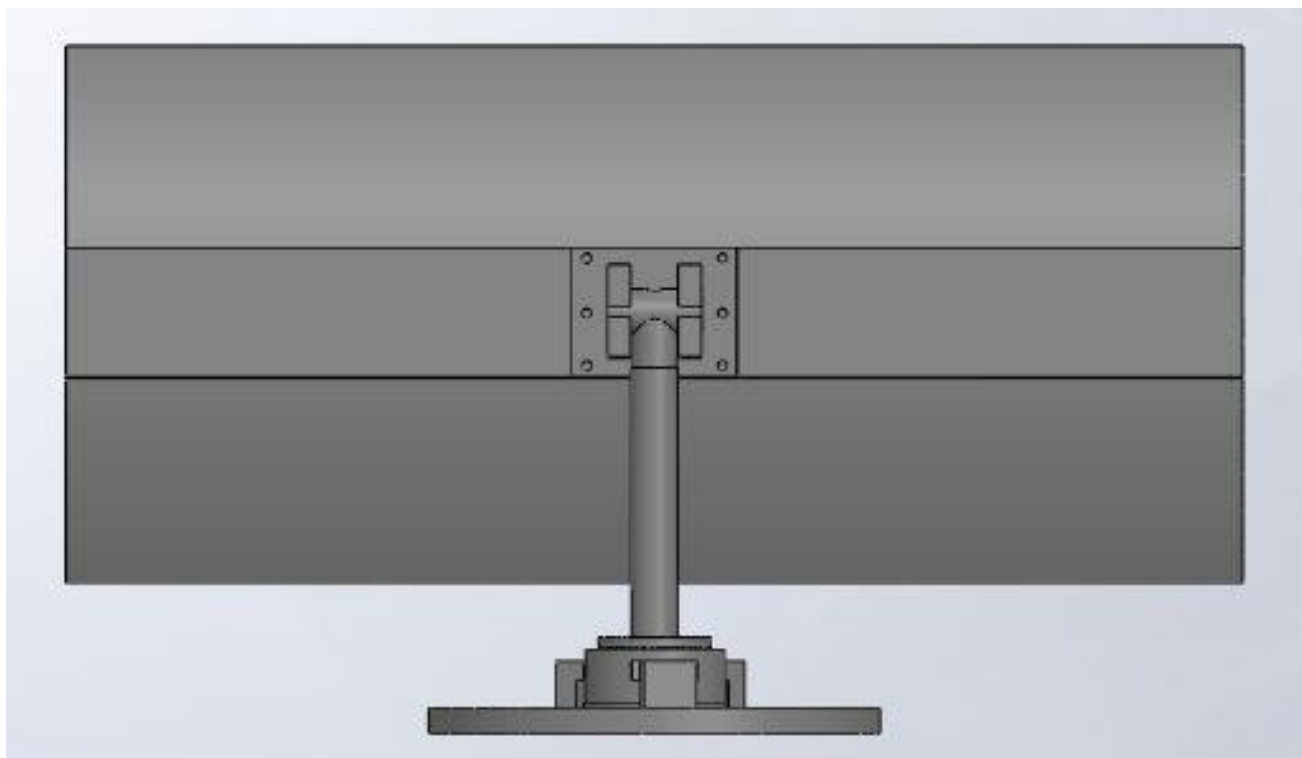


Figura 2.3. Parte trasera del modelo de colector

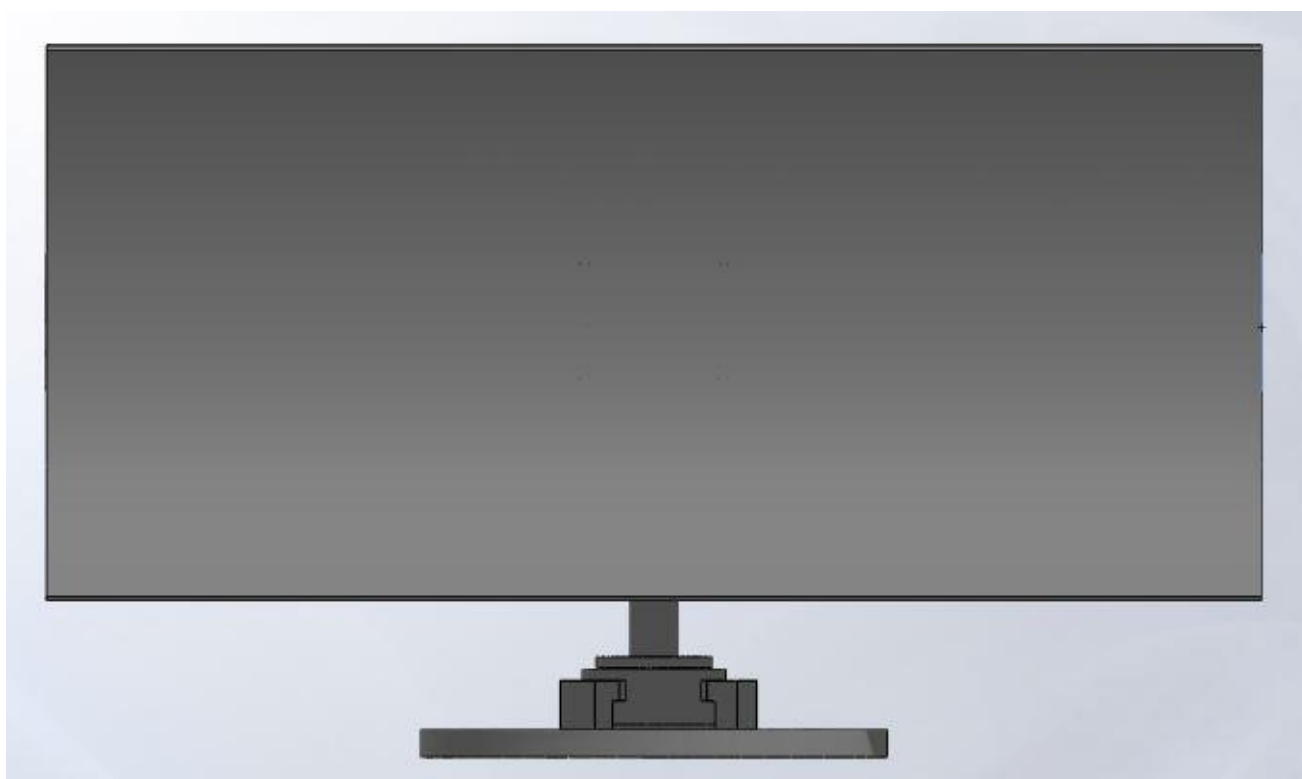


Figura 2.4. Parte delantera del modelo de colector



Figura 2.5. Perfil derecho del modelo de colector

Se puede observar que la placa parabólica se encuentra apoyada en un único rigidizador, para resistir mejor las cargas aerodinámicas, debido a que así se facilitaba su fabricación, además, el modelo tiene un mecanismo de giro de la placa más simple que el real.

## 2.2 Placa parabólica

Se trata de la placa encargada de recibir la energía solar, y como su nombre indica, tiene forma de parábola. La placa presenta las siguientes dimensiones en nuestro modelo:

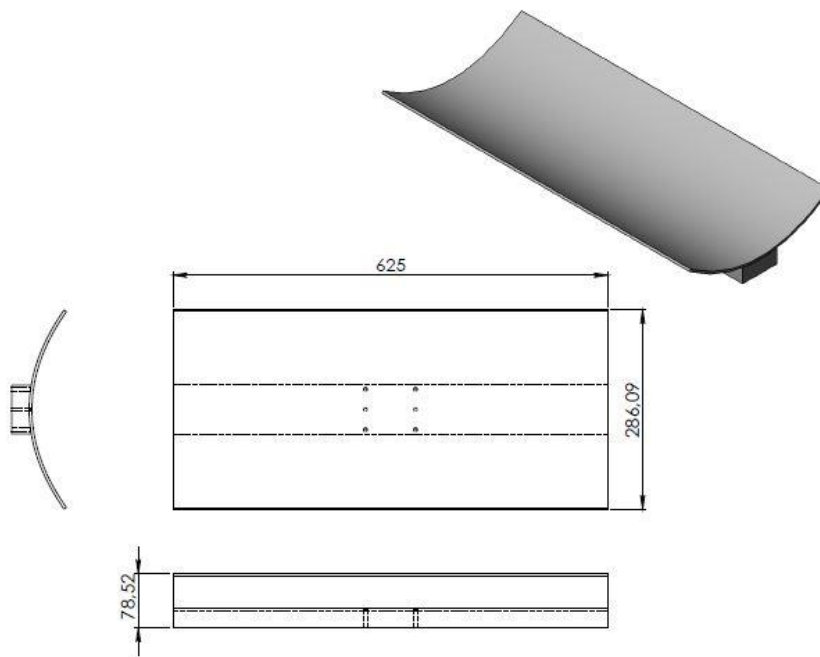


Figura 2.6. Dimensionamiento de la placa parabólica

Se puede apreciar que se respeta la escala 1:20 impuesta, con respecto a los valores del colector solar real “*SENERtrough*”, en los cuales se ha basado el cálculo de sus dimensiones.

Hay que destacar que la medida tomada en planta tiene en cuenta el rigidizador trasero.

Para su realización, ha sido necesaria la elaboración de dos moldes (uno macho y otro hembra), como se pueden ver en la Figura 2.7, para el posterior conformado de la placa.

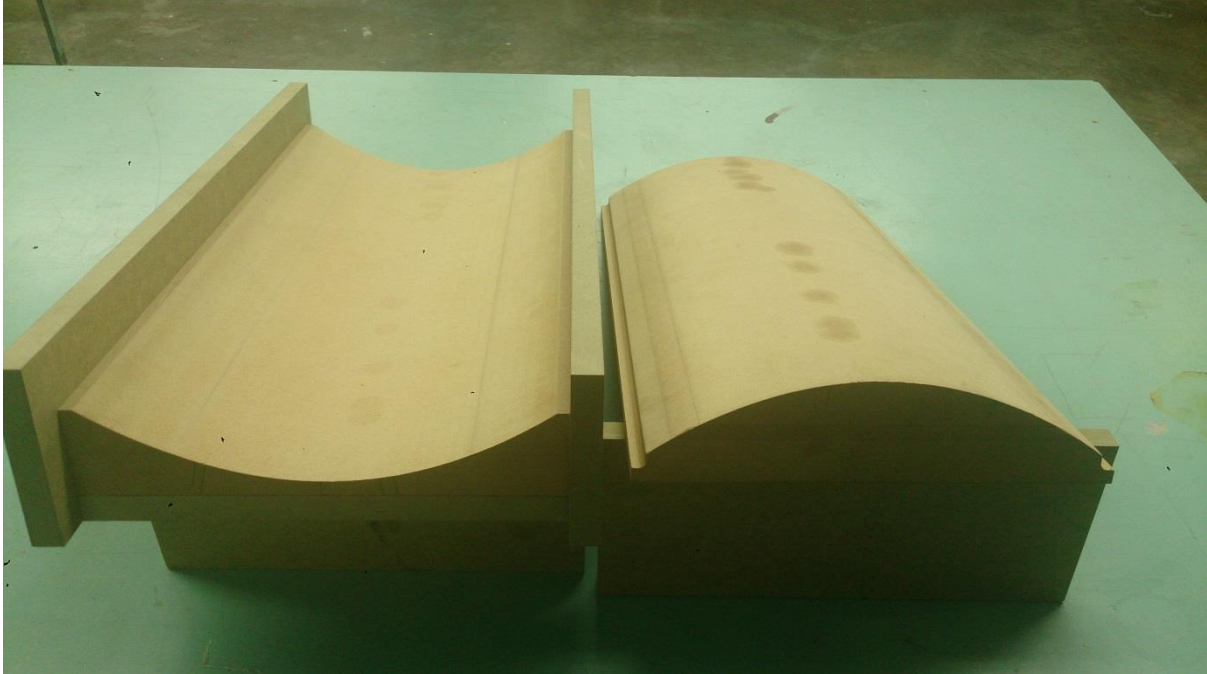


Figura 2.7. Molde hembra y macho de la placa parabólica

La fabricación de dichos moldes se ha realizado con una máquina de control numérico, CNC, a partir de un material llamado DM, que es un aglomerado elaborado con fibras de madera, las cuales se han desfibrado con anterioridad, eliminando así la lignina que poseían, que es un tipo de polímero no deseado, y aglutinando dichas fibras con resinas sintéticas hasta alcanzar una densidad media.

La fabricación de la placa se ha realizado en PVC, el cuál es el derivado del plástico más versátil. Se utiliza este material debido a su ductilidad, importante para que se pueda adaptar a los moldes, y a su tenacidad, que lo hace muy resistente, además de su baja densidad, ayudando así a que la estructura soporte de la placa, pueda aguantar mejor las cargas sobre ésta. Es importante destacar también, que es muy resistente a la corrosión, esto es de gran utilidad puesto que la placa va a estar sometida a constantes ensayos en el túnel de viento.

Se toma una placa de PVC con unas dimensiones algo superiores a las impuestas en el diseño, ya que ha de curvarse para adaptarse a los moldes, y así al terminar, quedarse con las medidas exactas. Para que la placa adopte la forma deseada de los moldes se introduce en un horno a 85°C, alrededor de 10-15 minutos, situándolo sobre el molde hembra, presionándolo con el molde macho, ayudado por unas sargentas para fijarlos.

Se deja hasta que la placa coja la curvatura. Una vez alcanzada ésta, se extrae, dejándola enfriar, terminando así de fabricar la placa parabólica del colector.



Figura 2.8. Placa parabólica del modelo

### 2.3 Rigidizador

Situado en la parte trasera de la placa, de manera longitudinal, con el objetivo de ayudar a ésta a tener una mayor resistencia y cohesión con el soporte trasero, ya que las dimensiones de la placa son muy grandes con respecto al resto de la estructura.

La primera opción fue la de realizar los rigidizadores traseros de la placa parabólica como los del tipo de colector solar en el que se basa el modelo:

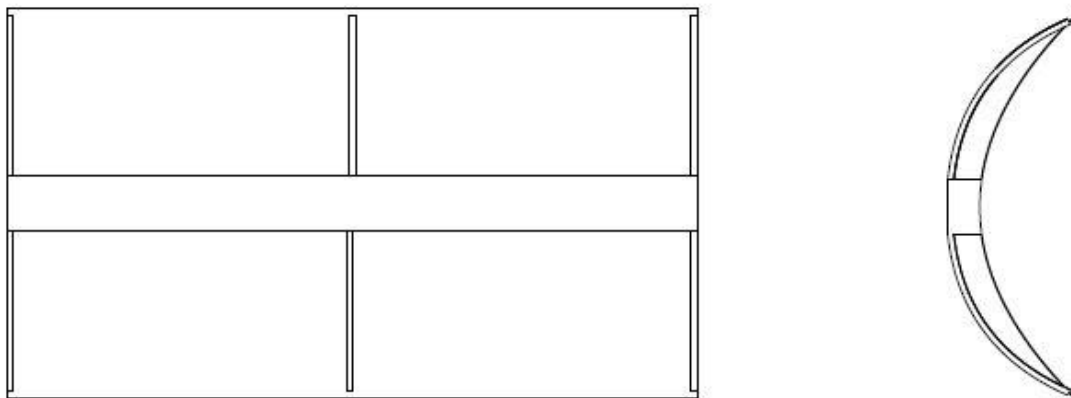


Figura 2.9. Placa parabólica con rigidizadores curvos

Como se puede apreciar, ya no se incluían los rigidizadores inclinados a lo largo del arco puesto que se vio que no iban a ser necesarios debido a que el peso de la placa no iba a ser elevado.

Posteriormente, también se observó que tampoco serían necesarios los rigidizadores curvos ya que se podía asegurar la resistencia de la placa sin ellos y como se buscaba un modelo bastante simplificado, también se decidió retirarlos, quedando únicamente el longitudinal con respecto al lado de mayor dimensión de la placa.

El rigidizador presenta las siguientes dimensiones:

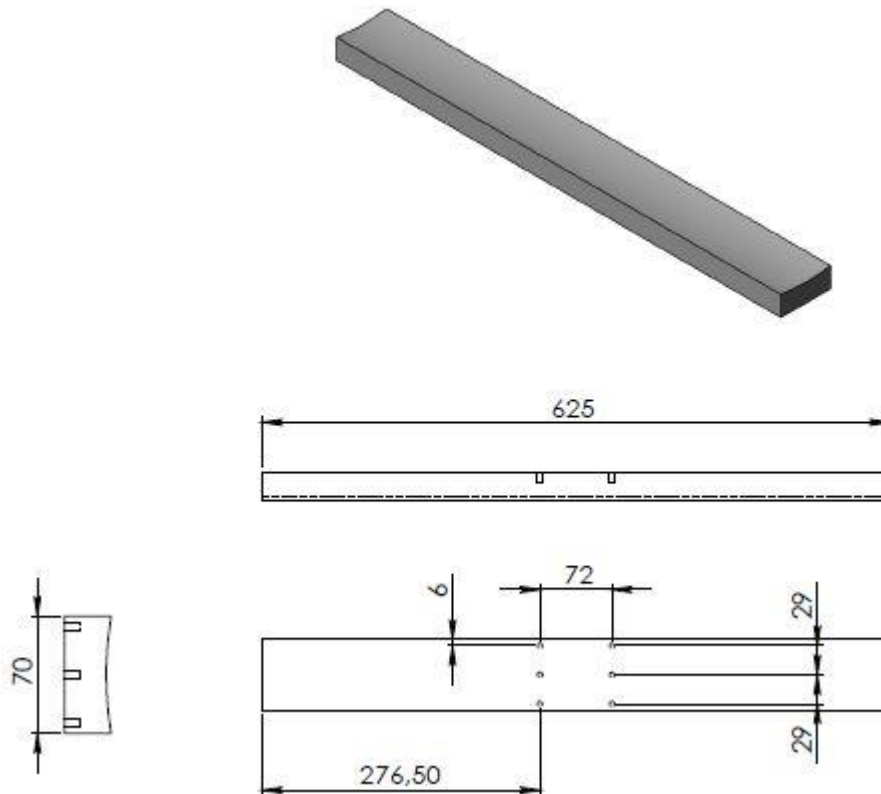


Figura 2.10. Dimensionamiento del rigidizador

Los seis agujeros son para la posterior unión del rigidizador con el resto del soporte trasero de la placa.

El material del rigidizador es el mismo que el de la placa, PVC, para asegurar que la unión entre ambos es más resistente puesto que van a ir pegados.

Al ir el rigidizador unido de manera longitudinal, a lo largo de su espesor debe de tener la misma curvatura que la placa, para que la unión entre ambos sea posible.



Figura 2.11. Rigidizador del modelo

La realización de dicha curvatura se realiza con una máquina de control numérico, CNC, como la de la placa parabólica, para así asegurar que sea idéntica a la del colector solar y que la unión entre ambos sea perfecta.

## 2.4 Placa de unión

Se trata de una placa plana que une el rigidizador, junto con la placa parabólica, con la estructura soporte trasera.

La placa de unión presenta las siguientes dimensiones:

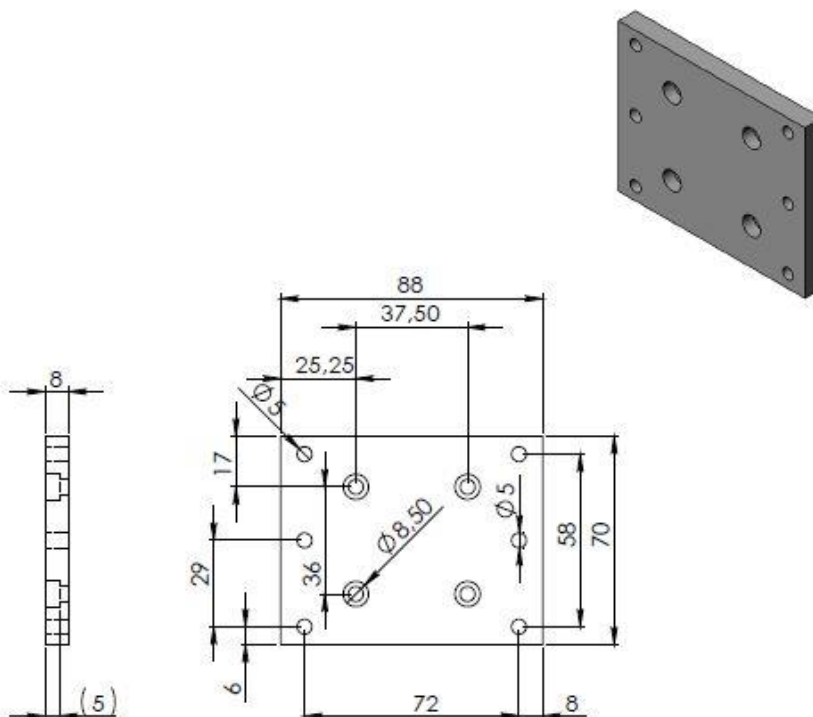


Figura 2.12. Dimensionamiento de la placa de unión

Los seis agujeros exteriores son los de unión con el rigidizador, y los cuatro agujeros interiores son los de unión con la brida.

El motivo de la utilización de esta placa es el de ahorro de material con respecto a haber realizado todo el soporte trasero de solo una pieza. Además, por motivos de construcción habría que realizar un rigidizador más ancho para poder meter los tornillos de unión con las bridas.

Se encuentra fabricada de Aluminio 7075 debido a su menor densidad con respecto al acero, pero con una gran resistencia. Mecanizada y taladrada mediante una fresadora universal para la realización de los agujeros necesarios para su unión con las bridas y el rigidizador. Se mecaniza hasta alcanzar la forma necesaria para la posterior unión con el soporte trasero que soporta la placa, de manera que tenga la medida exacta para que no existan interferencias con el resto de elementos.



Figura 2.13. Placa de unión del modelo

## 2.5 Bridas y eje transversal

Seguida de la placa de unión se tienen las bridas que permiten el giro de la placa parabólica alrededor de un eje transversal a la barra que soporta el colector.

Primero se detalla el eje transversal, cuyas dimensiones son las siguientes:

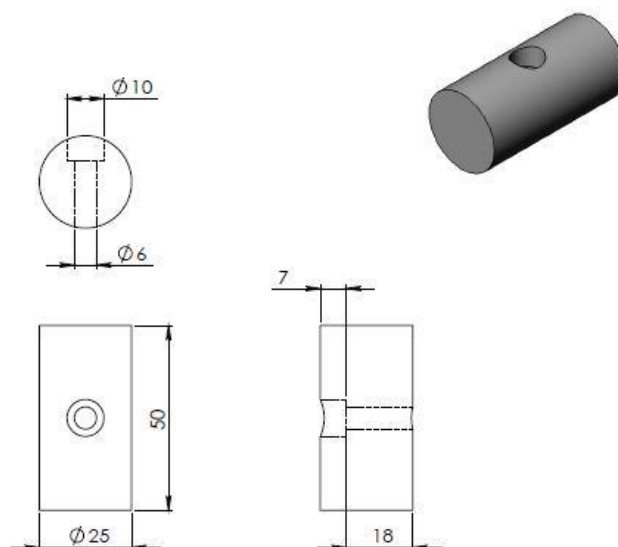


Figura 2.14. Dimensionamiento del eje transversal

Se puede apreciar un agujero pasante en el centro del eje, el cual sirve para fijarlo a la otra barra para soldarlas sin que exista movimiento entre ambas que lo dificulte.

Realizado de acero inoxidable 304, ya que al ser sus dimensiones pequeñas, no influye tanto su gran densidad para el peso, y tiene que resistir las fuerzas de presión a las que se va a someter cada vez que se aprietan las bridas sobre ella. Pero, sobre todo, se ha elegido este material porque al ir unida a la barra soporte, que tiene que ser de un material muy resistente, se puede asegurar una unión perfecta mediante soldadura siendo del mismo material, ya que de otra manera la soldadura no sería tan efectiva.

Dicha barra se encuentra cilindrada de las cabezas mediante un torno universal, de manera que no existan interferencias ni sobresalga de la brida para que no estorbe el movimiento de la placa.

Se realizan dos taladros en la parte central de la barra transversal, uno para que la cabeza del tornillo entre, y otro para el tornillo. Las medidas de dichos taladros serán de 10 mm de diámetro y 7 mm de longitud para la cabeza del tornillo y de 6 mm de diámetro y 25 mm de longitud para el resto del tornillo. La misión del tornillo es sujetar el eje transversal con la otra barra y mantenerlas fijas en esa posición para posteriormente poder soldarlas y darle más rigidez al montaje, es más un utillaje que un mecanizado necesario.



Figura 2.15. Eje transversal del modelo

Alrededor de este eje se encuentran las bridas que ayudan a fijar la posición de la placa parabólica. Las dimensiones y forma se presentan en la Figura 2.16:

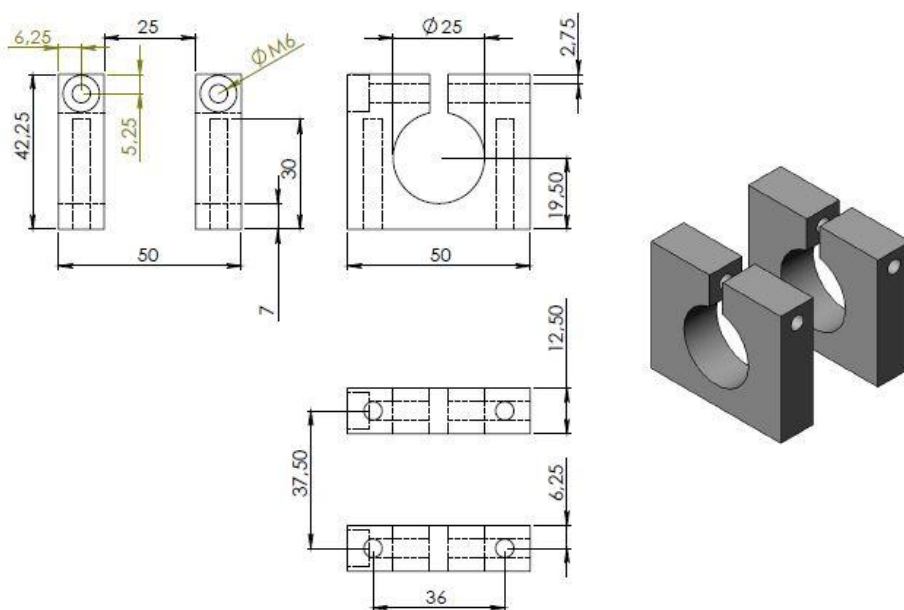


Figura 2.16. Dimensionamiento de las bridas



Se pueden apreciar cuatro largos orificios de 30 mm cada uno, que son los que van a unir las bridas a la placa de unión, detallada anteriormente.

Las bridas se encuentran rodeando el eje transversal y tienen dos agujeros pasantes en los que se colocan los dos tornillos encargados de fijar la placa parabólica en una posición. Dichos tornillos se aprietan o se aflojan a interés para poder mover la placa alrededor del eje o dejarla fija, debido a la presión que se ejerce sobre éste por parte de ambas bridas.

Realizadas con Aluminio 7075, como la placa de unión, debido a su baja densidad y gran resistencia. Se parte de dos placas de mayores dimensiones a las impuestas por el diseño y de un mismo espesor. Se utilizan dos fijas, de 3mm cada una, situadas en la diagonal en ambas placas, con el fin de que durante el mecanizado no varíe la posición entre ellas y se muevan como un todo.

Con el torno se cilindra el agujero central de 25 mm. Seguidamente se realiza la ranura de las placas de aproximadamente 5 mm aunque podría haber sido incluso menor, ya que para apretar las bridas al eje o aflojar, no es necesario un hueco grande.

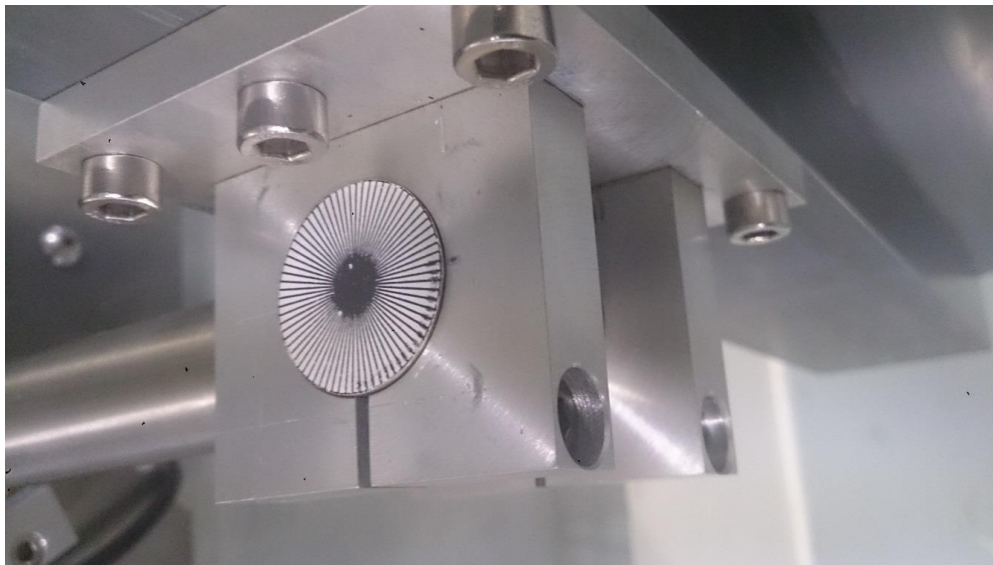


Figura 2.17. Visión lateral de las bridas del modelo

Una vez realizado esto, se procede a mecanizar todo el exterior de la placa hasta dejarla con las medidas reales impuestas por el diseño. Por último, se taladran los agujeros donde irán los prisioneros que son los encargados de realizar el apriete en la brida, le siguen los cuatro taladros de cogida a la placa de unión.



Figura 2.18. Visión delantera de las bridas del modelo

## 2.6 Barra soporte del colector

Se trata de la barra que soporta el colector y le da la altura adecuada a la placa parabólica evitando así que pueda impactar contra el suelo debido a su giro alrededor del eje transversal.

Dicha barra presenta las siguientes dimensiones:

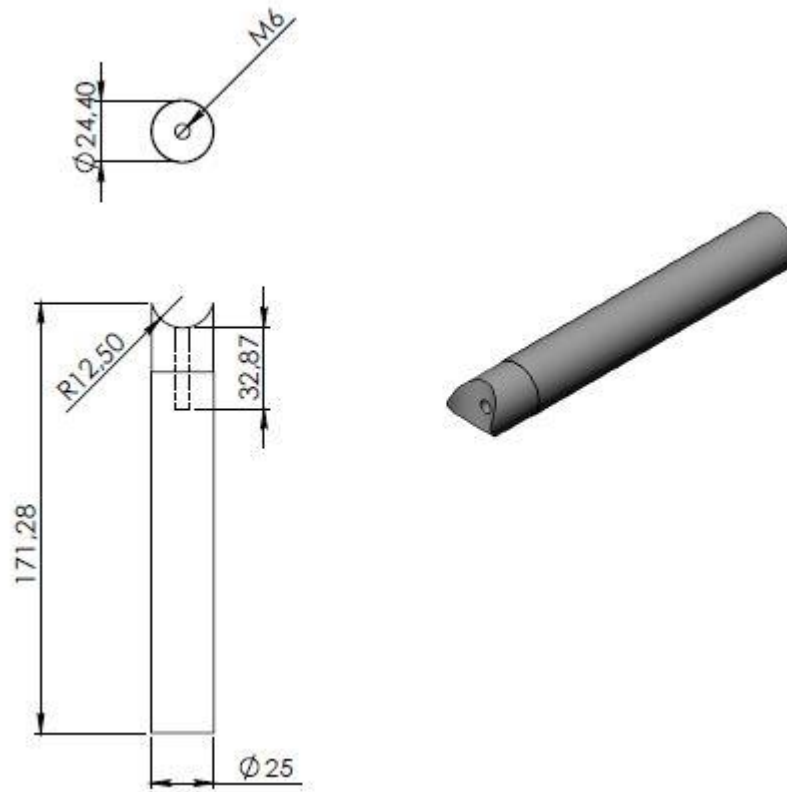


Figura 2.19. Dimensionamiento de la barra soporte

Se puede apreciar la zona curva en uno de los extremos, debido a que ésta será la parte que va unida al eje transversal. También se puede observar como en dicho extremo también hay un agujero pasante que será el encargado de fijar el eje con la barra para evitar movimientos entre ambos a la hora de soldarlos en la fabricación.

La barra se encuentra hecha del mismo material que el eje transversal, acero inoxidable 304, para que la unión entre ellas se realice de la manera más eficiente.

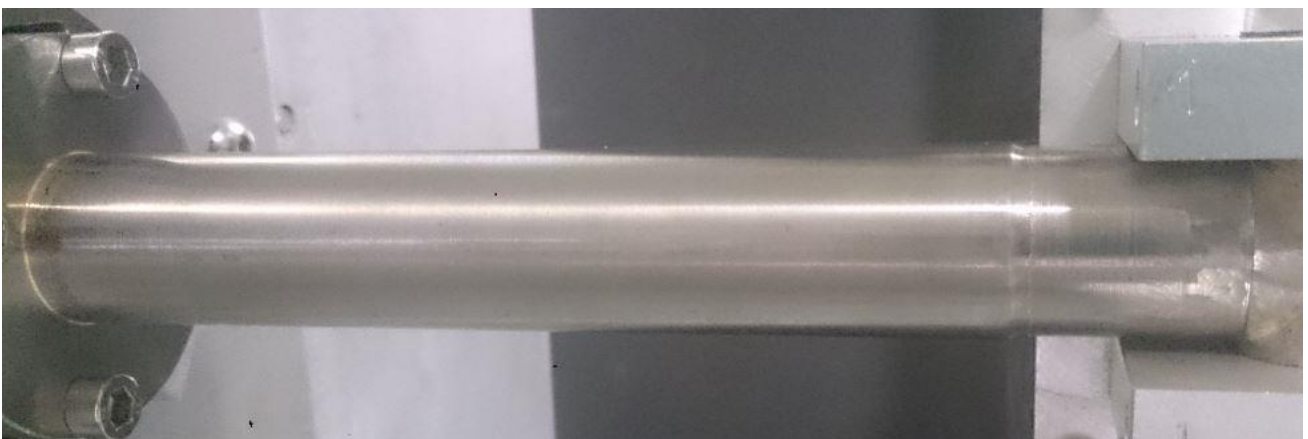


Figura 2.20. Barra soporte del modelo

En primer lugar se refrenta la cabeza de uno de los extremos del cilindro, para dejarla limpia de interferencias. A continuación, en esa misma cabeza de la barra, se realiza un fresado con una fresa de 25 mm de diámetro, del mismo diámetro que el eje transversal, hasta una profundidad de 12,5 mm, que es el radio, para la posterior adaptación al eje transversal. Después se realiza un taladrado M6 de unos 33 mm de profundidad para colocar el tornillo fijador entre ambas barras.



Figura 2.21. Unión entre la barra soporte y el eje transversal

La unión entre ambas barras, transversal y la longitudinal, se realizará, primero mediante el tornillo fijador, comprobando después que estén perfectamente a escuadra. La finalidad de esta fijación es la posterior soldadura entre ambas mediante una varilla de plata, con el fin de asegurar su unión.

## 2.7 Balanza Gamma SI-130-10

Se trata del sensor que medirá las fuerzas que el viento realiza sobre el modelo de colector solar y va situado en la base de éste, por debajo de la barra soporte, ya que es el sitio más propicio donde se puede colocar y además medirá de manera bastante correcta las fuerzas sobre el colector.

Las dimensiones de la balanza son las siguientes:

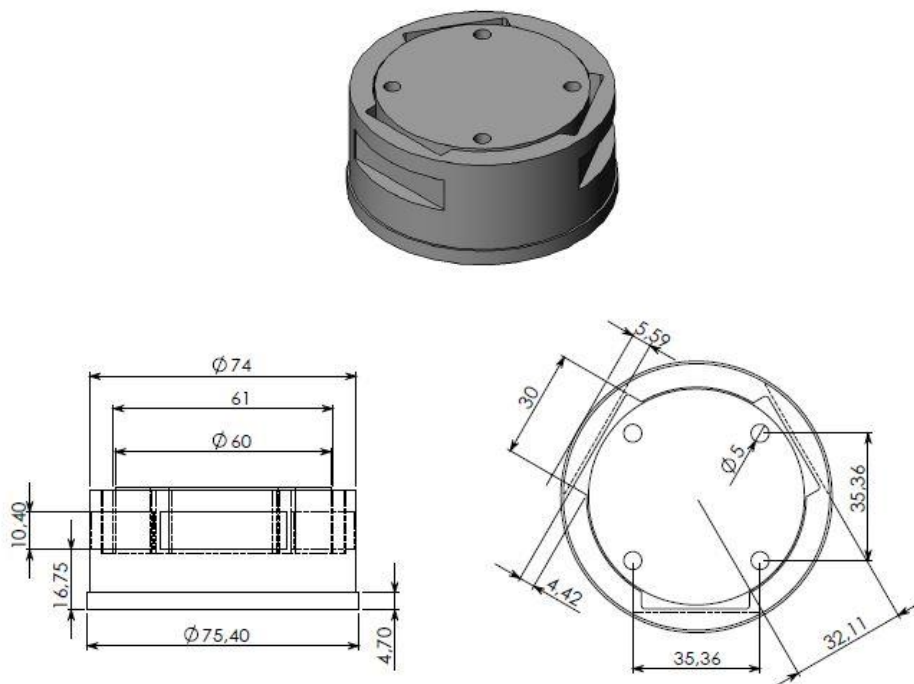


Figura 2.22. Dimensionamiento de la balanza

En la parte superior donde se aprecian los cuatro orificios, se sitúa la base de la barra soporte unida mediante una placa circular de las mismas dimensiones que la parte interna del sensor. Mientras que en la parte inferior, se une a una placa cuadrangular utilizando unas bridas de agarre colocadas en los laterales de la balanza, conectando la placa al lateral del túnel, el cual realizará el giro alrededor del eje de la barra soporte simulando la incidencia del viento desde todas las direcciones.

## 2.8 Galleta de unión

Esta galleta es la que une la barra soporte con la balanza. Dicha galleta presenta las siguientes dimensiones:

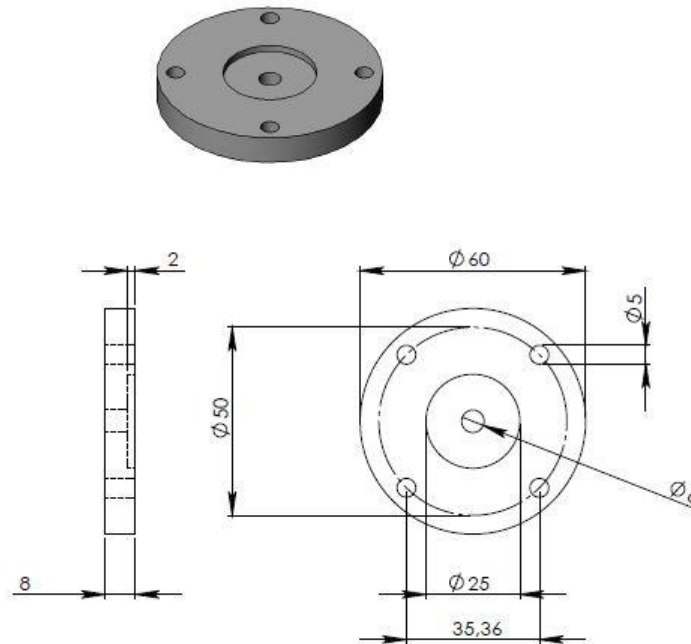


Figura 2.23. Dimensionamiento de la galleta de unión

Se puede ver que el orificio central es donde se fija la barra para poder soldar después sin riesgo de movimiento entre ambos, mientras que los cuatro de alrededor son los que fijan el colector con la balanza.

Se encuentra realizada del mismo material que la barra soporte, acero inoxidable 304, debido a que prácticamente tiene que soportar todo el peso del colector al ir colgado de ella, y, además, porque también se encuentra soldada a la barra por lo que dicha soldadura será mucho más efectiva si se realiza entre dos elementos de un mismo material.

Para su fabricación, se parte de una barra de algo más de 60 mm de diámetro, que son las dimensiones de diseño final de la galleta, y se cilindra hasta dejar en su medida adecuada.

Primero se realiza el agujero central de 6 mm, que se utiliza para fijar la barra con la galleta para poder soldar sin riesgo de movimiento entre ambas, y después se realiza un vaciado de  $25 \times 2 \text{ mm}^2$ , que es el hueco en el que se coloca el extremo de la barra. A continuación, se tronza la barra de inicio a un espesor de 8 mm, obteniendo así ya la galleta, quedando únicamente realizar los 4 taladros de 5 mm y después roscarlos a M6.

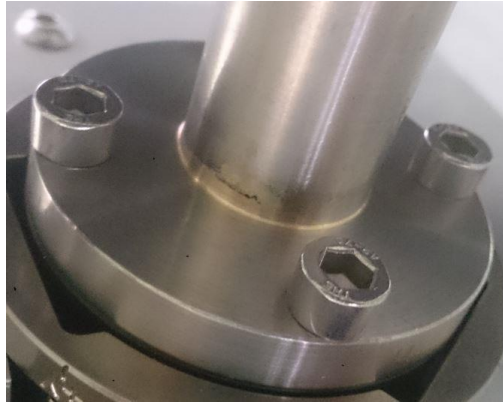


Figura 2.24. Galleta de unión del modelo

## 2.9 Bridas de amarre

Al no haber agujeros en la parte inferior de la balanza y no poder hacérselos debido al complejo cableado interno que la compone, se ha decidido ponerles unas bridas de amarre en sus huecos laterales, atornilladas a la placa de unión entre la balanza y el lateral del túnel.

Se han realizado dos tipos de bridas, debido a que uno de los huecos laterales de la balanza se encuentra cerca del cable saliente que la conecta con el resto de dispositivos de los que se compone.

El primer tipo de brida presenta las siguientes dimensiones:

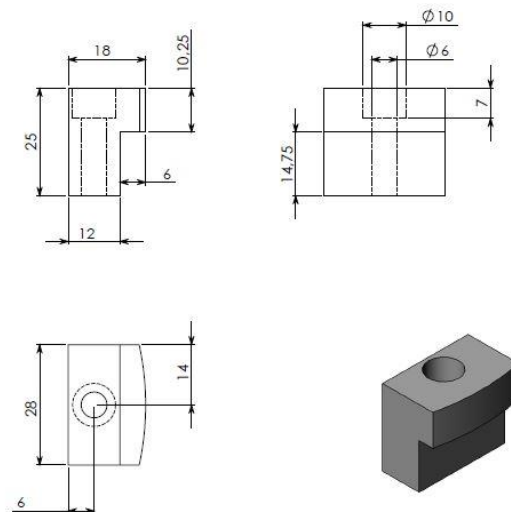


Figura 2.25. Dimensionamiento de la brida de amarre de menor longitud

Esta brida se coloca en los otros dos huecos del lateral de la balanza, por lo que se tienen dos bridas de este tipo para el amarre del sensor.

Los agujeros que se aprecian en dichas bridas son los que fijan el colector y la balanza a la placa de unión con el túnel.

Para fabricarlo se parte de un macizo de Aluminio 7075 de  $95 \times 25 \times 20 \text{ mm}^3$ , de dimensiones mayores a las deseadas en el diseño. Se realiza una ranura de 6 mm de profundidad por 14,75 mm de altura, mediante una fresa. Una vez realizado, se corta en piezas de 28 mm y se repasa el canto, en caso de que fuera necesario, hasta dejarlo a medida.



Figura 2.26. Brida de amarre de menor tamaño del modelo

El segundo tipo de brida presenta las siguientes dimensiones:

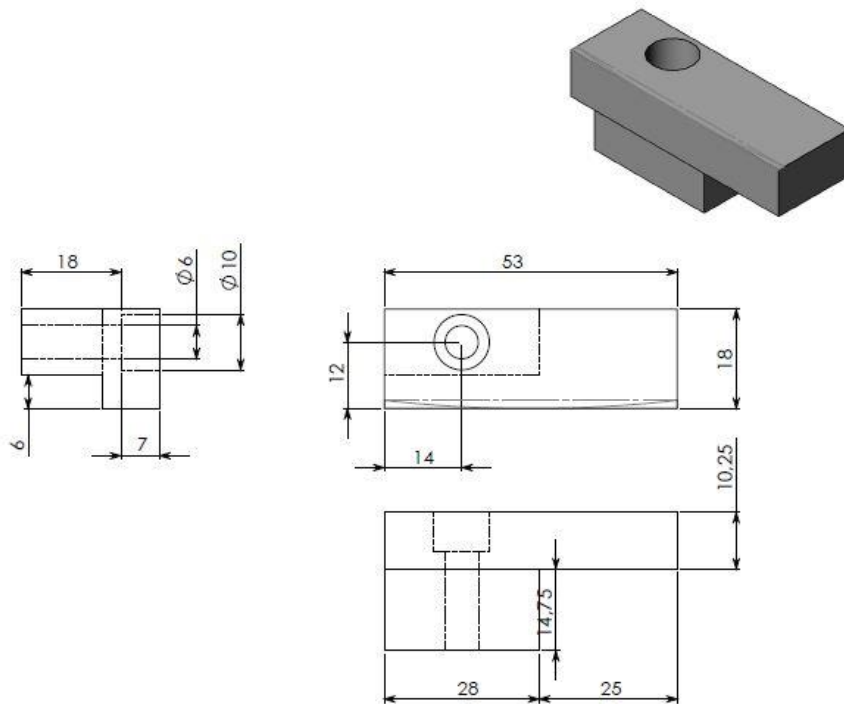


Figura 2.27. Dimensionamiento de la brida de amarre de mayor longitud

Ésta es la brida que se sitúa en la zona del cable, cuya parte superior es más larga que el de las otras bridas debido a que tiene que pasar por encima del cable que sale de la balanza y además para poder atornillarse a la placa de unión con el túnel. Sólo se va a fabricar uno de este tipo.

Esta brida tiene el mismo proceso de mecanizado que el de las bridas del primer tipo, a excepción de que es más larga por cuestiones de cogida, 53 mm de larga. En este caso, habrá que realizar un vaciado de  $25 \times 18 \times 14,75 \text{ mm}^3$ .



Figura 2.28. Brida de amarre de mayor tamaño del modelo

Una vez mecanizadas las tres bridas, se realizan los taladros necesarios, uno en cada brida, para poder atornillarlas a la placa de unión con el túnel de viento.

## 2.10 Placa de unión con túnel

Se trata de una placa plana que se utiliza para unir todo el montaje del colector solar junto con la balanza con el túnel de viento. Se une en el lateral del túnel ya que es la zona en la que se tienen los mecanismos adecuados para poder rotar el colector alrededor de su eje soporte y así poder simular las distintas direcciones por las que puede incidir el viento sobre el colector.

Los tres agujeros del centro de la placa son para unirla a la balanza y los del exterior son para unirla a la pared del túnel.

Las dimensiones de la placa son las siguientes:

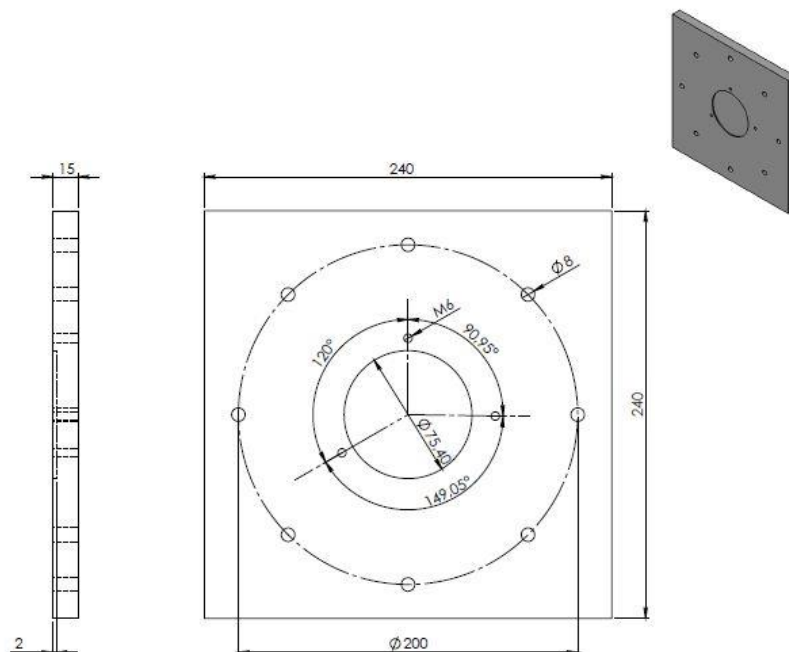


Figura 2.29. Dimensionamiento de la placa de unión con túnel

Se realiza con Aluminio 7075 al igual que la placa de unión entre la brida y el rigidizador. La placa se compra a medida, impuesta por el diseño. Se localiza el punto central y se impone el radio al que se encuentran los agujeros, tanto los exteriores que se unen al túnel como los interiores que la unen a las bridas. Se realiza un

rebaje de 2 mm en el centro de la placa para alojar y centrar el sensor.

Los taladros en círculo se hacen mediante un plato divisor para garantizar la exactitud de los ángulos donde se sitúan. Hay que recalcar que la diferencia de ángulos entre los taladros que sujetan las bridas es por motivos de construcción debido a la conexión eléctrica que tiene el sensor.

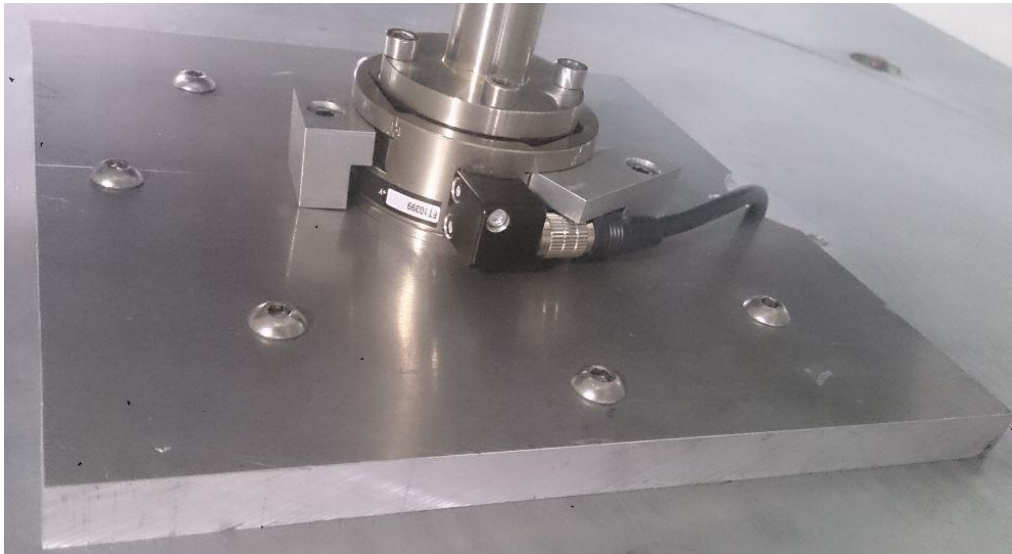


Figura 2.30. Placa de unión con túnel del modelo



# 3 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL

---

Una vez realizado todo el diseño y montaje del colector solar, se procede a la realización de las pruebas experimentales en el túnel de viento. Para ello, se empieza estudiando el funcionamiento de la balanza Gamma SI-130-10, su montaje al colector y adaptación al ordenador, además del funcionamiento del programa de adquisición de datos de dicho sensor, que en este caso será “*LabVIEW*”.

Una vez conocido el funcionamiento de la balanza, se realiza el montaje del modelo en el túnel de viento, nivelando su posición con respecto a la del mecanismo utilizado para hacerlo rotar alrededor de su eje soporte, para que así no exista desfase entre ambos.

Una vez realizado el montaje, se calibra el peso del colector sin viento, para que a la hora de obtener las fuerzas del viento sobre éste no aparezcan las ya existentes debido a que el colector se encuentra sobre el sensor colgando lateralmente en el túnel.

## 3.1 Balanza Gamma SI-130-10

La balanza Gamma SI-130-10 es la que va a medir tanto las cargas como los momentos que va a soportar el colector debido a la incidencia del viento. Dicha balanza la forman distintos componentes, los cuales se pasa a explicar a continuación:

- **Transductor:** se trata de una estructura compacta y robusta que convierte las cargas y los momentos que sufre el colector en una serie de señales analógicas de medidores de esfuerzos. En este caso el transductor utilizado es Gamma SI-130-10.

En la Figura 3.1. se puede apreciar que la zona que va unida a la base del colector es la del cilindro interior del sensor, el cual se encuentra ligeramente separado del resto de la estructura, lo cual permite pequeños movimientos que son los que determinan los valores de las cargas y de los momentos a los que se ve sometido.



Figura 3.1. Balanza Gamma SI-130-10

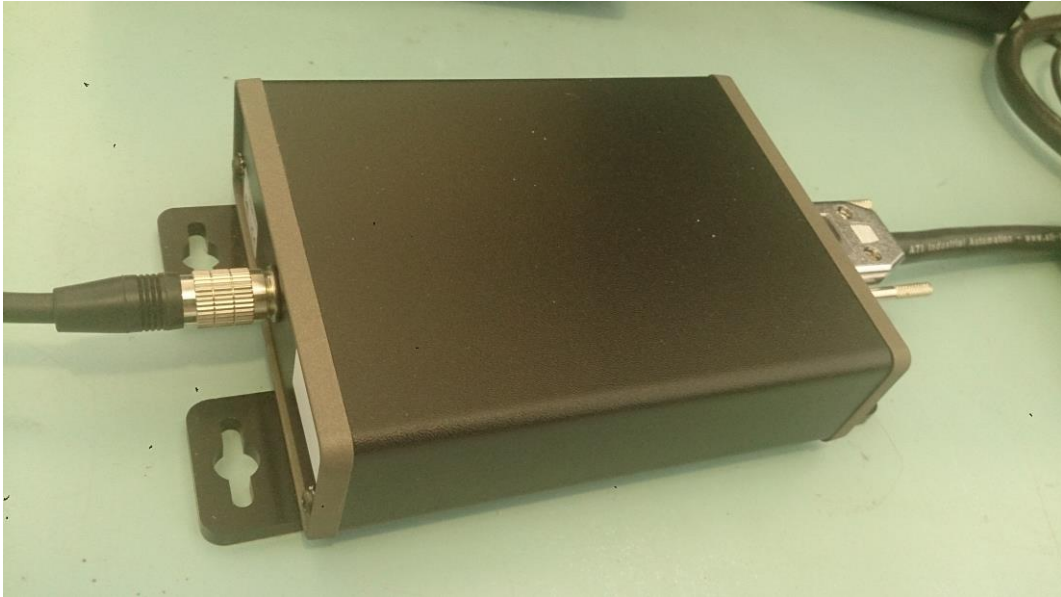


Figura 3.2. Transductor

- Cable transductor: se trata de un cable de alta flexibilidad y duración encargado de la protección de la transmisión desde el transductor hasta las cajas de Fuente de Alimentación o Interfaz de Fuente de Alimentación.
- Cajas de Fuente de Alimentación o Interfaz de Fuente de Alimentación: la caja de la Interfaz de Fuente de Alimentación es típicamente usada con pequeños transductores como los Nano o Mini; suministra la energía al transductor y a los componentes electrónicos, así como el acondicionamiento de las señales del transductor hasta el sistema de adquisición de datos; aquí se enchufa el cable de 12 pines desde el transductor. La caja de Fuente de alimentación se utiliza para mayores transductores, como es el de este caso, transductores Gamma, los cuales contienen ya la electrónica de interfaz; aquí se enchufa el cable de 20 pines del transductor.



Figura 3.3. Caja de fuente de alimentación

- Cable de suministro de energía: se encarga de conectar la Caja de Fuente de Alimentación o Interfaz de Fuente de alimentación con el sistema de adquisición de datos. Normalmente en su extremo final tiene un conector de adquisición de datos pero también puede no llevarlo.
- Sistema de adquisición de datos: se encarga de transformar las señales analógicas de los medidores de esfuerzos del transductor en datos que el ordenador pueda leer y procesar. Estos datos necesitan ser procesados por un software de ATI para convertirlos en los valores de las fuerzas y momentos que se buscan.



Figura 3.4. Sistema de adquisición de datos

- CD Software F/T: el CD del software F/T (Force/Torque) contiene el software y los datos de calibración que el ordenador utiliza para convertir las lecturas del transductor en fuerzas y momentos.
- Adaptador de montaje: los transductores más grandes vienen acompañados de un adaptador de montaje estándar para conectarlo mecánicamente con el aparato al que se le aplican las fuerzas. El adaptador de montaje consta de una placa de adaptador de montaje y tornillos de montaje.

El transductor va conectado a la caja de fuente de alimentación mediante el cable transductor, luego mediante el cable de suministro de energía se conecta la caja de fuente de alimentación con el sistema de adquisición de datos, el cual se conecta por último a la torre del ordenador donde llegan la lecturas del transductor y mediante el software F/T se obtiene en pantalla los valores de las fuerzas y los momentos.



Figura 3.5. Conexión entre los elementos de la balanza (1/2)



Figura 3.6. Conexión entre los elementos de la balanza (2/2)

El programa utilizado para obtener los valores de las fuerzas y momentos por ordenador es “LabVIEW“, en el cual, se introduce la matriz de calibración correspondiente a la balanza Gamma SI-130-10 y el bloc de notas al que se quiere exportar la matriz de los resultados de las cargas y momentos que mide el sensor.

Una vez realizado esto, se ejecuta el programa para poder medir.

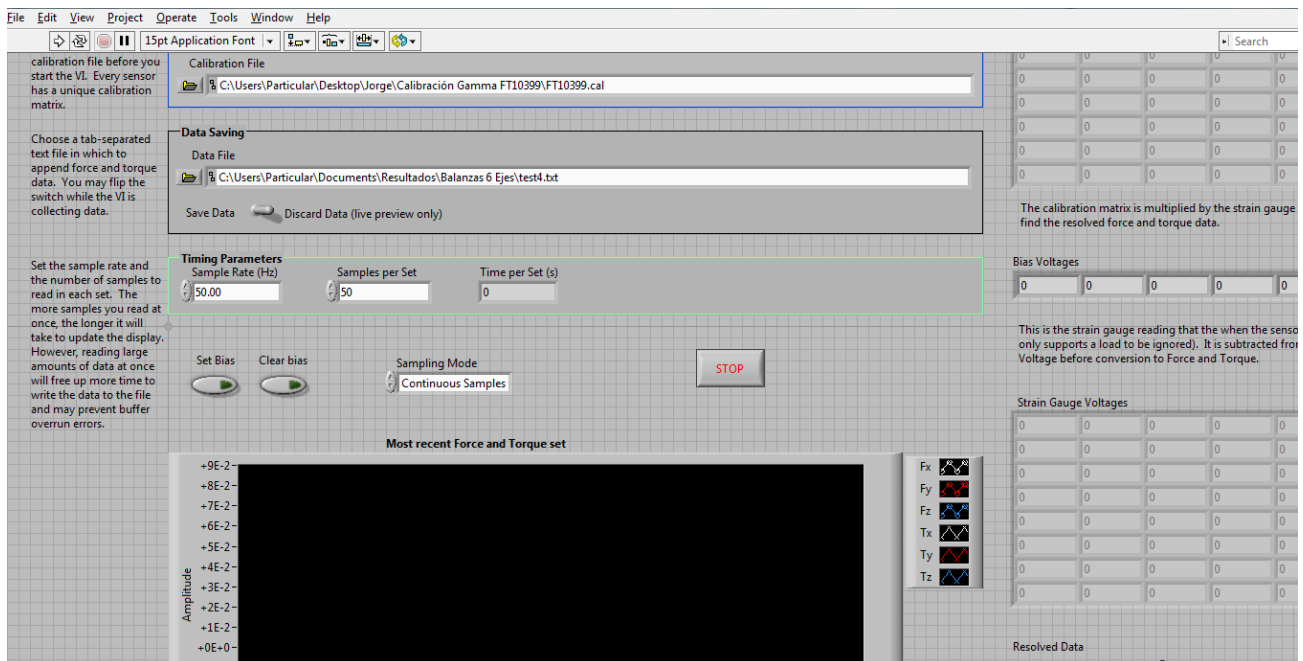


Figura 3.7. Programa LabVIEW

Conectados todos los componentes de la balanza correctamente y visto que gracias al programa “LabVIEW“ se empiezan a obtener resultados, se procede a la comprobación de que el sensor se encuentre bien calibrado y mide lo que tiene que medir. Se toma una pesa de masa conocida y se sitúa sobre el sensor (colocado éste sobre una mesa horizontal), por lo que los resultados percibidos en la pantalla del ordenador deben incrementarse, en este caso en la carga  $F_z$  negativa, un valor igual al de la masa de la pesa por la gravedad. Si esto se cumple, se tiene comprobado que el sensor mide lo que tiene que medir y ya se encuentra listo para conectarlo al colector en el túnel de viento y realizar los ensayos.

Hay que destacar a la hora de interpretar los resultados de la balanza, la dirección y el sentido de los ejes del sensor según los cuáles se miden las cargas y los momentos del colector:

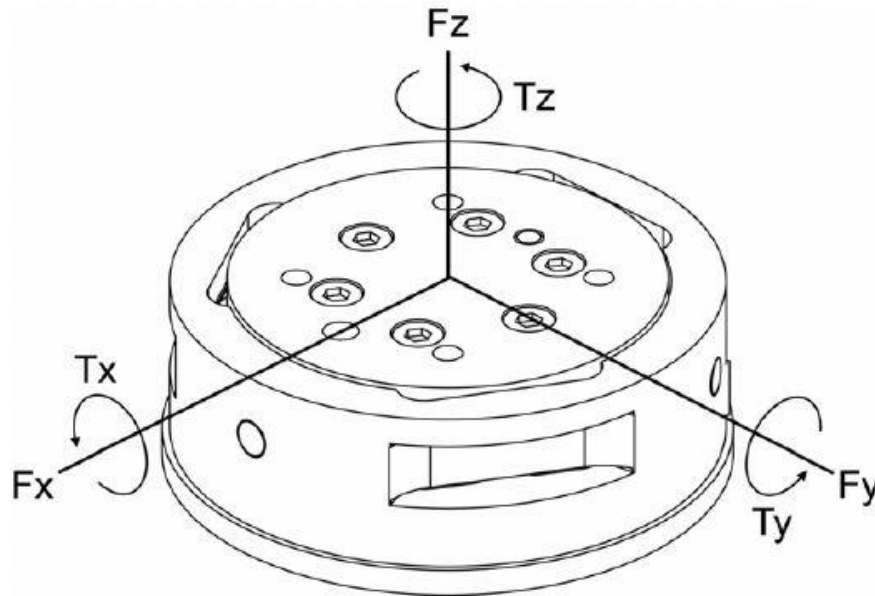


Figura 3.8. Dirección y sentido de las cargas y momentos medidos por el sensor

### 3.2 Montaje y adaptación al túnel de viento

Una vez fijada y soldada la barra soporte del colector a la galleta, se une el colector solar, por medio de la galleta de unión, al sensor mediante los cuatro tornillos que permite la balanza ya que venía con este número de orificios por defecto para poder unir objetos a ella y así poder realizar las oportunas mediciones.

Esta unión se puede observar en la siguiente figura:

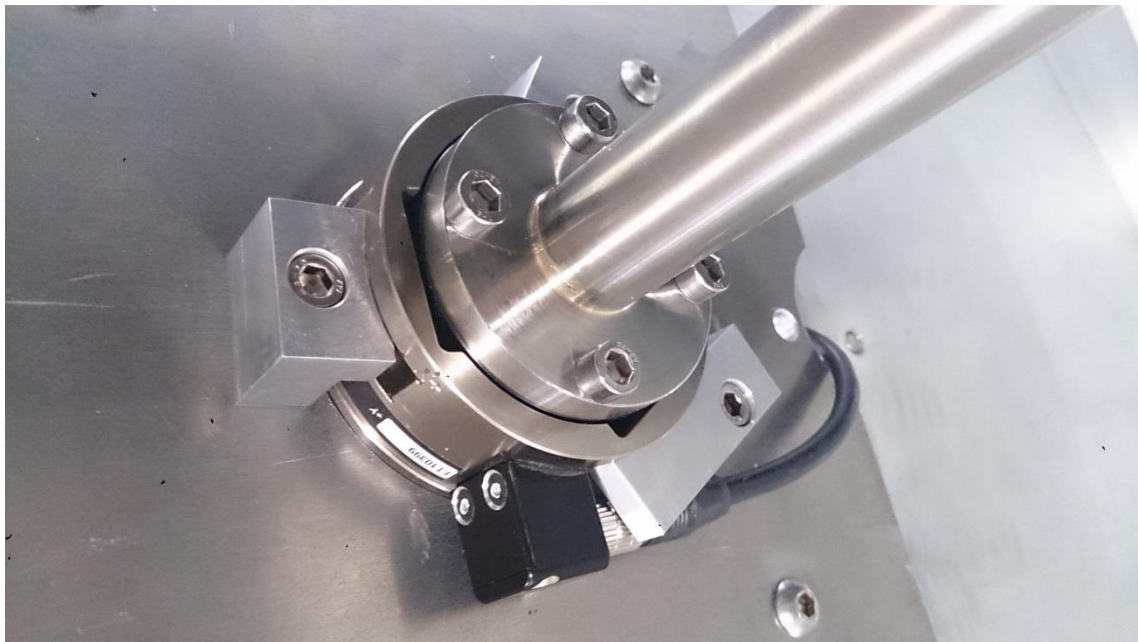


Figura 3.9. Unión del colector con la balanza

En esta imagen también se puede apreciar el acoplamiento entre la balanza y la placa que une todo el conjunto con el túnel, por medio de las tres bridas que sujetan la balanza mediante la presión que éstas ejercen debido a

su colocación en los huecos laterales del sensor y estar atornilladas a la placa.

La unión de la balanza a la placa se realiza una vez atornillada la placa a la pared lateral del túnel de viento, para facilitar su montaje. Si se acoplara a la placa antes, luego habría que atornillar los ocho agujeros que unen la placa al túnel sujetando todo el peso del colector a la vez que se posiciona correctamente el conjunto mientras se aprietan los tornillos, tarea que es mucho más compleja de realizar y de mayor duración al ser mayor el número de tornillos.

Por lo que la unión balanza, placa y túnel queda de la siguiente manera:

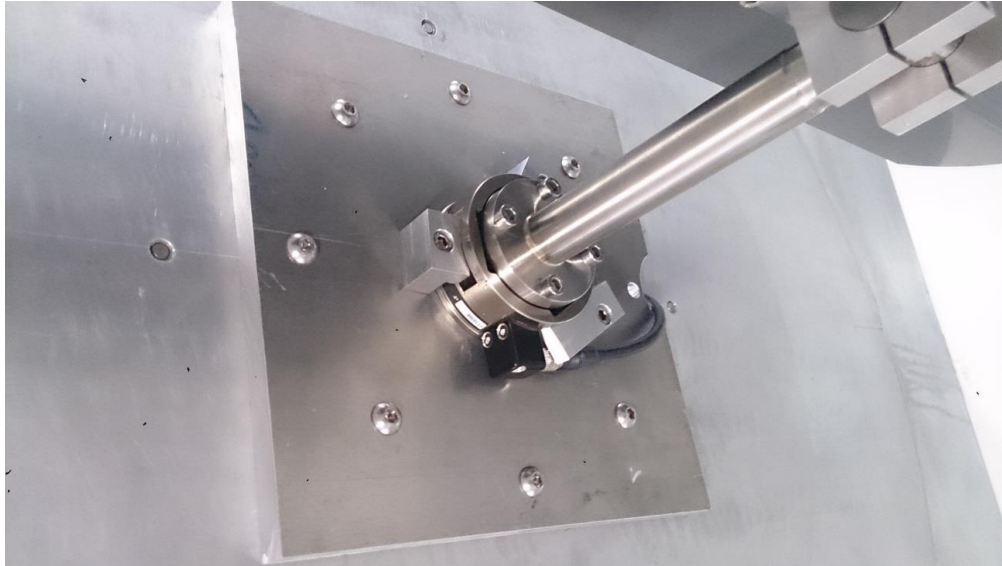


Figura 3.10. Unión del colector y la balanza con el túnel de viento

Quedando el ensamblaje total del colector, en su posición inicial en el túnel de viento, de la siguiente forma:

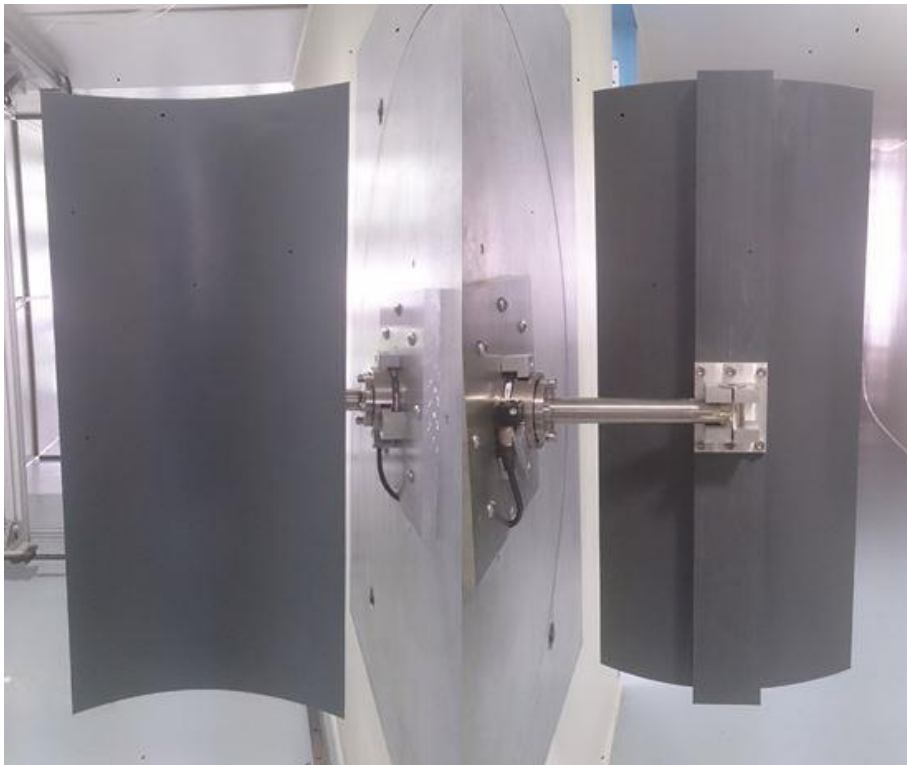


Figura 3.11. Posición inicial del colector solar

En la Figura 3.11. se puede comprobar que la zona del túnel a la que está unido el colector presenta un mecanismo que permite al colector girar 360° alrededor de su eje soporte, al estar esa región circular ligeramente diferenciada del resto del túnel.

Una vez montado el colector en el túnel se procede a nivelar la placa, tanto vertical como horizontalmente para poder situar correctamente la posición de 0° con el mecanismo rotatorio al que se une.

### 3.3 Ensayo experimental

La finalidad o el objetivo de los ensayos experimentales es la de estudiar las fuerzas que resiste el colector solar teniendo en cuenta que el viento le puede incidir en cualquier dirección y, también, que la placa gira alrededor del eje transversal simulando que sigue al Sol.

Por lo que se decidió realizar los ensayos para distintas posiciones de la placa parabólica, y haciendo que el colector rote alrededor de su eje soporte, mediante el mecanismo de la pared lateral del túnel de viento, simulando todas las posibles direcciones de incidencia del viento. Para cada posición de la placa que se quiera estudiar, se rota 360° el colector solar con el túnel de viento encendido.

La dirección del flujo incidente sobre la placa será la siguiente:

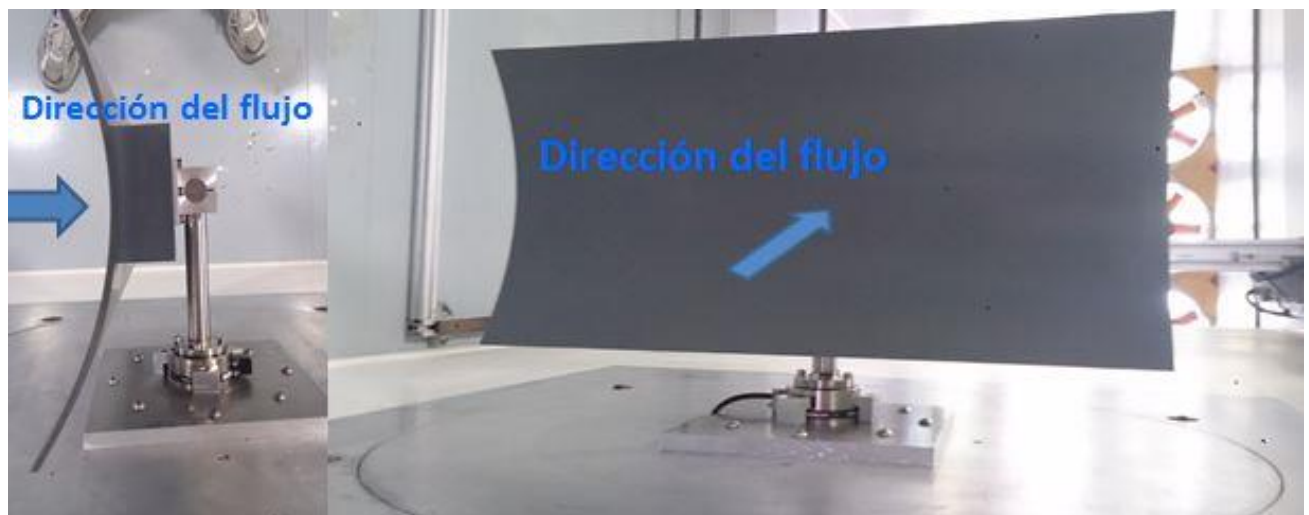


Figura 3.12. Dirección del flujo con respecto al colector

La dirección del flujo será constante mientras el colector solar rota alrededor de su eje soporte. En la siguiente figura se indica la dirección de la incidencia del viento sobre el colector dependiendo del ángulo “ $\theta$ ” del colector y, también, el sentido de giro de éste:

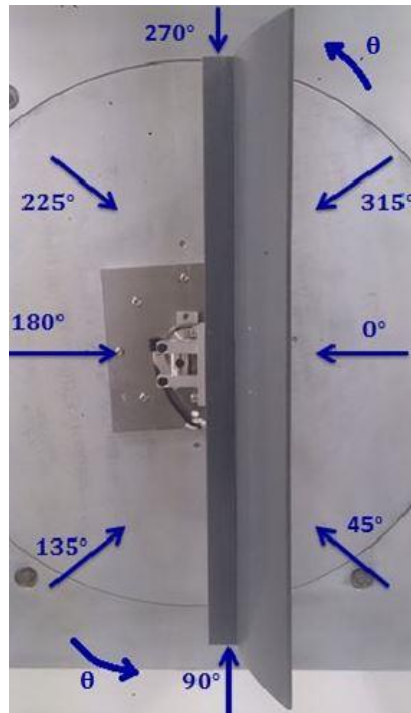


Figura 3.13. Direcciones de incidencia del viento y sentido de rotación del colector

Se define el ángulo " $\theta$ " como la dirección incidente del viento con respecto a la posición inicial. También se define el ángulo " $\beta$ " como la posición de la placa parabólica con respecto a la misma en su posición inicial.

Todo el conjunto colector y balanza junto con la placa de unión con el túnel gira como un todo cuando se simulan las distintas direcciones del viento incidente, ya que lo que rota es la pared del túnel provocando el mismo movimiento en todo el conjunto.

Las posiciones que se van a estudiar de la placa son desde los  $0^\circ$  (que corresponde a la posición de la Figura 4.11.), hasta los  $90^\circ$  de cinco en cinco grados, ya que a partir de los  $90^\circ$ , las fuerzas sobre el colector van a ser simétricas al realizarse el estudio rotándolo los  $360^\circ$ .

La placa parabólica rotará de la siguiente manera hasta los  $90^\circ$ :

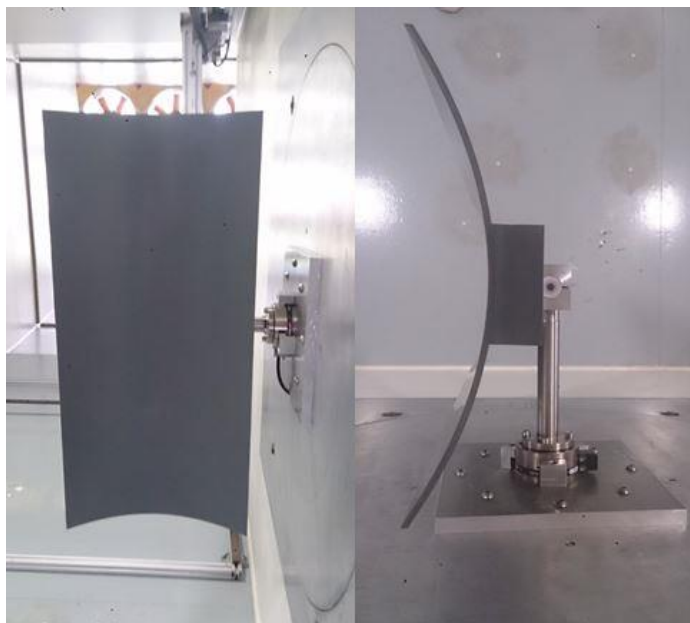


Figura 3.14. Placa parabólica situada a  $\beta = 0^\circ$



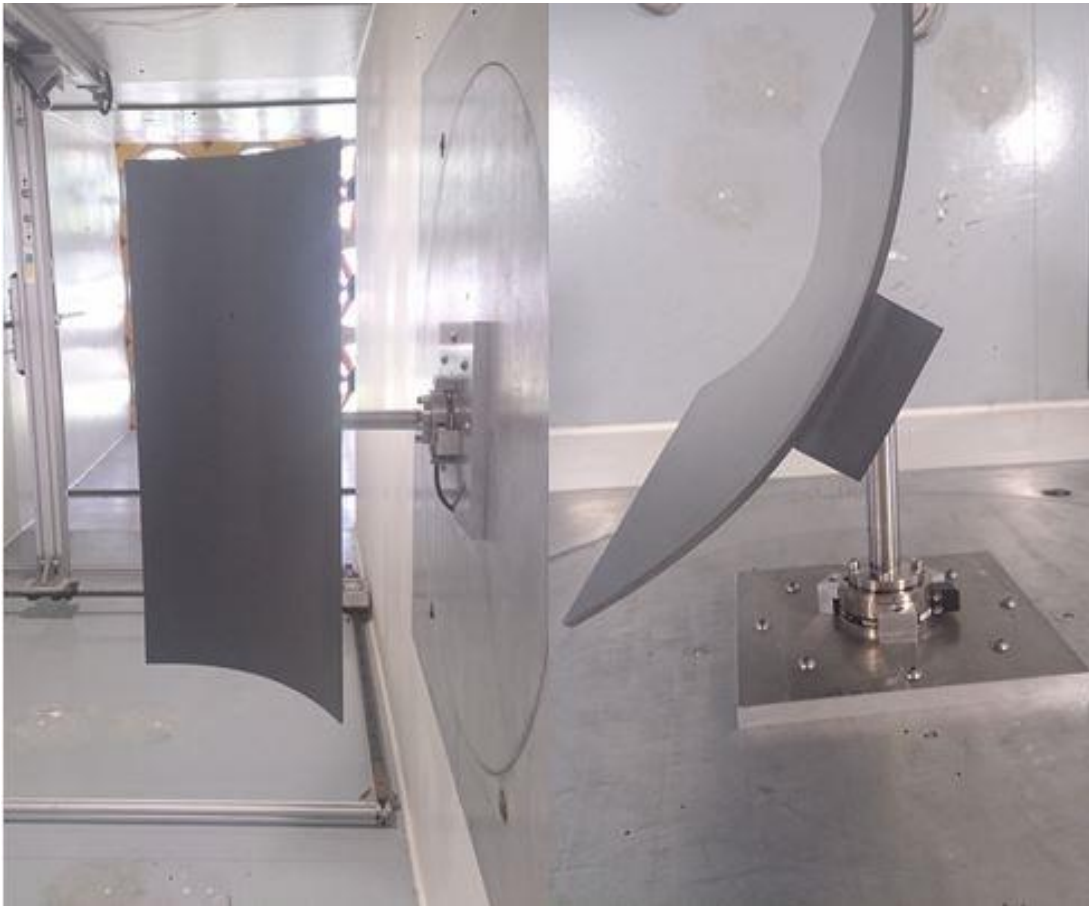


Figura 3.15. Placa parabólica situada a  $\beta = 30^\circ$



Figura 3.16. Placa parabólica situada a  $\beta = 60^\circ$



Figura 3.17. Placa parabólica situada a  $\beta = 90^\circ$

Representa el movimiento de la placa parabólica alrededor del eje transversal simulando al real que sigue al Sol a lo largo del día. En las anteriores figuras no se encuentran todas las posiciones que se estudian durante los ensayos ya que al variar de  $5^\circ$  en  $5^\circ$ , apenas se iba a notar la diferencia entre una y otra, por lo que se han mostrado de  $30^\circ$  en  $30^\circ$  para que se pueda ver la diferencia y entender bien su movimiento.

Se optó por realizar los ensayos de esta manera porque se ahorra mucho más tiempo que realizando un estudio para cada una de las direcciones con las que puede incidir el viento sobre el colector y, además, para cada una de esas direcciones, variar el ángulo de la placa como se ha explicado anteriormente.

La diferencia del número de medidas de un método a otro, son las siguientes:

- Para el método utilizado, se realizarían 19 medidas en total que corresponden a las distintas posiciones que tomaría la placa desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$  (ya que desde  $90^\circ$  a  $180^\circ$ , los resultados que se obtienen serán simétricos a los correspondientes primeros  $90^\circ$ ).
- Con el otro método, serían esas 19 medidas por cada una de las direcciones del viento a estudiar, que para tener un abanico completo lo justo sería que fuera de  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  cada  $5^\circ$  o  $10^\circ$ , obteniendo el siguiente número de ensayos:

$$\begin{aligned} n^\circ \text{ de ensayos} &= 19 \text{ posiciones placa} \times 73 \text{ direcciones del viento} = 1387 \rightarrow \text{Cada } 5^\circ \\ n^\circ \text{ de ensayos} &= 19 \text{ posiciones placa} \times 37 \text{ direcciones del viento} = 703 \rightarrow \text{Cada } 10^\circ \end{aligned} \quad (3.1)$$

Son un número de ensayos muy elevados.

La otra razón por la que se optó por el método utilizado es porque así se podría tener en cuenta absolutamente todas las direcciones con las que el viento podría incidir sobre el colector, sabiendo que la dirección del viento es constante y horizontal. Ajustando la frecuencia de adquisición de datos del programa y la velocidad de

rotación del colector, se puede tomar un número más que suficiente de datos por cada dirección posible del viento, es decir, para cada grado de “ $\theta$ ”.

Se probaron varias frecuencias de adquisición, pero, definitivamente se optó por 50 Hz, ya que para frecuencias más altas toma un gran número de datos por segundo e introduce un mayor ruido al tratarse de un ensayo experimental. Con las frecuencias altas se tienen mucho en cuenta todas las pequeñas variaciones que se producen, mientras que con la frecuencia elegida se conseguía una solución de compromiso entre un número razonable de datos adquiridos y un menor ruido introducido en ellos.

Para tomar el suficiente número de muestras para cada grado de giro del ángulo “ $\theta$ ”, es decir, para cada dirección del viento incidente en el colector, se optó por una duración de tres segundos por grado, es decir, la velocidad de rotación del mecanismo sería de 20°/min, lo que da lugar a:

$$\left. \begin{array}{l} 50 \text{ Hz} \\ \frac{20^\circ}{\text{min}} \rightarrow 3 \frac{\text{s}}{\circ} \end{array} \right\} \rightarrow 150 \frac{\text{medidas}}{\circ} \quad (3.2)$$

Por lo que cada uno de los ensayos experimentales durará:

$$t = \frac{360^\circ}{\frac{20^\circ}{\text{min}}} = 18 \text{ minutos} \quad (3.3)$$

Tomando un total de:

$$n^\circ \text{ de datos} = 150 \frac{\text{medidas}}{\circ} \times 360^\circ = 54000 \text{ medidas} \quad (3.4)$$

### 3.4 Calibración con el peso del colector

Una vez comprobado el funcionamiento del sensor y calibrado, además, montado el colector en el túnel de viento y explicada detalladamente la metodología de los ensayos, se procede a la calibración del peso. Lo que se pretende con esta calibración es que a la hora de realizar los ensayos, los resultados obtenidos por el sensor de las fuerzas aerodinámicas sufridas por el colector debido a la incidencia del viento no tengan en cuenta el peso del mismo.

Para realizar dicha calibración, se procederá a tomar medidas de las fuerzas que mide el sensor únicamente con el propio peso del colector solar, sin tener el túnel de viento encendido, realizando el correspondiente movimiento de rotación de 360° para cada posición de la placa parabólica.

Primero se comprueba que las fuerzas recogidas por el sensor varían con el movimiento de la placa o se mantienen más o menos constantes, para ver si realizar solo un ensayo de calibración con un solo ángulo “ $\beta$ ” o habría que realizar un ensayo para cada posición de la placa debido a que los valores recogidos varían significativamente.

Para ello, se ha realizado un pequeño seguimiento de los resultados de las cargas recogidas para algunas posiciones de la placa parabólica, obteniendo:

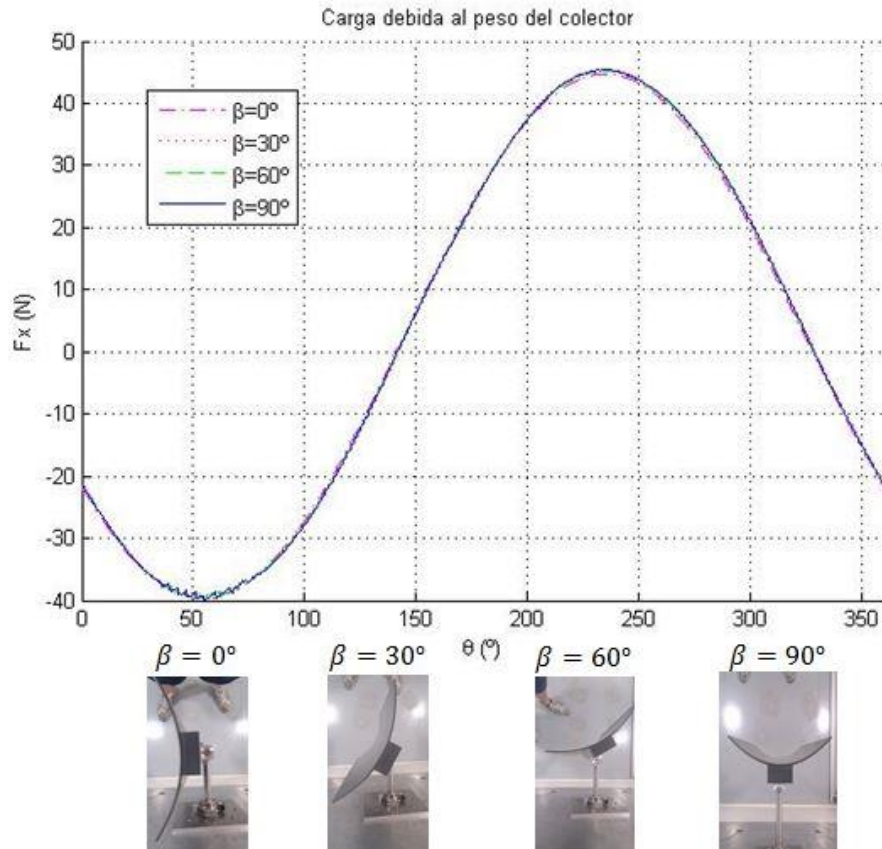


Figura 3.18. Carga según el eje X debida al peso del colector

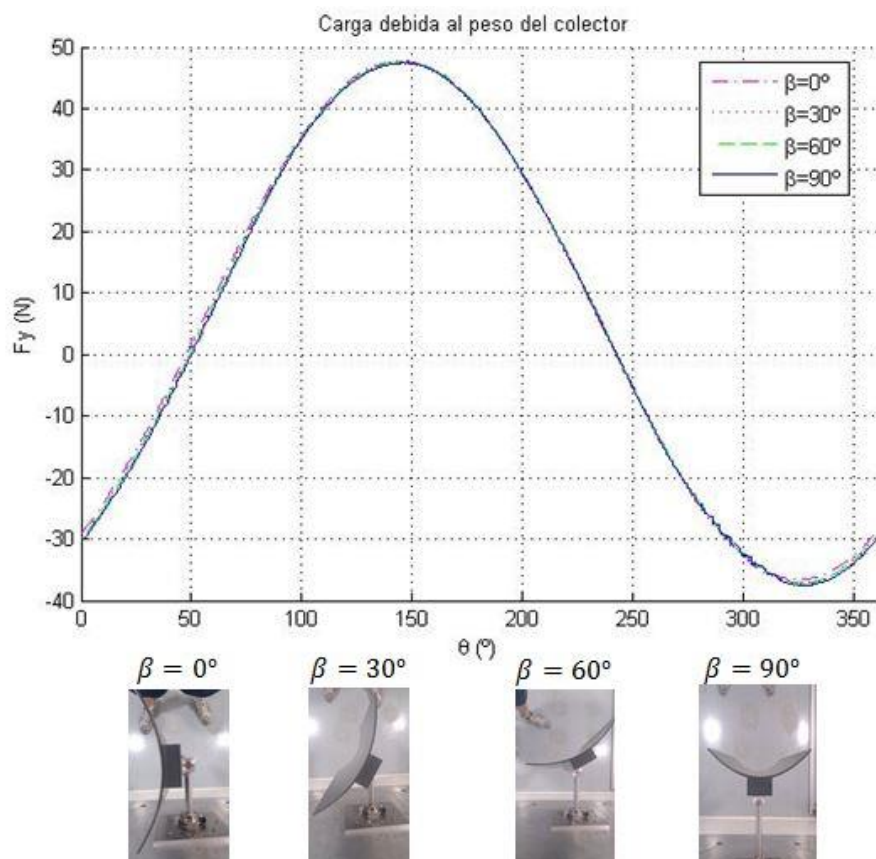


Figura 3.19. Carga según el eje Y debida al peso del colector

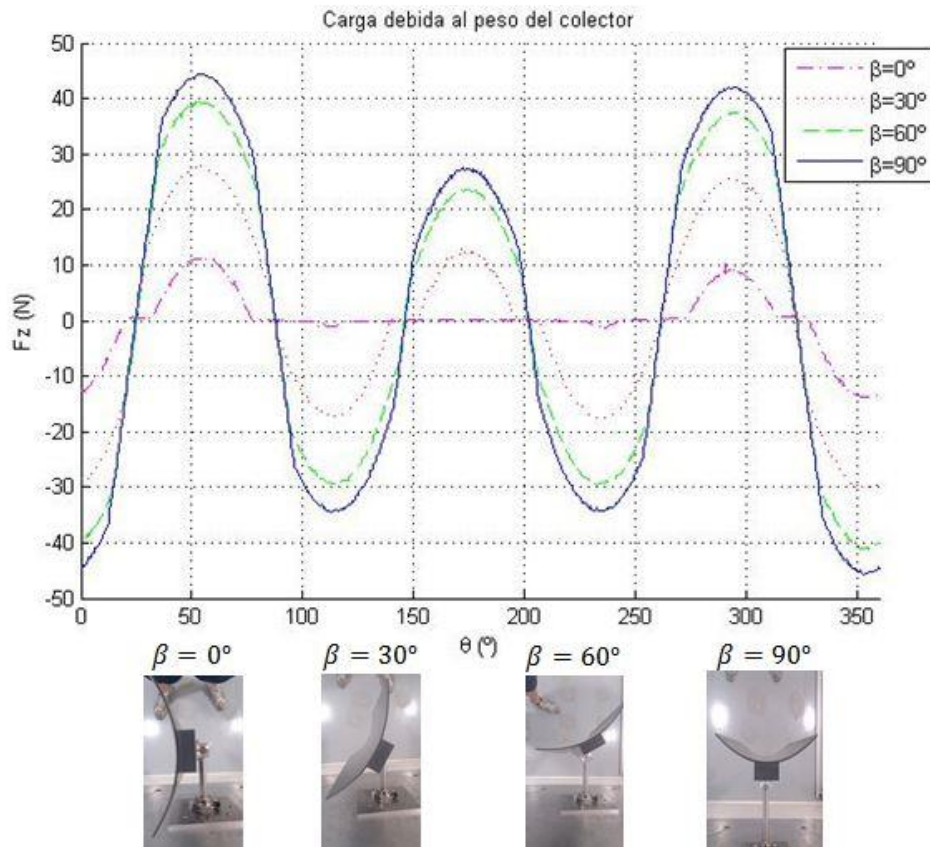


Figura 3.20. Carga según el eje Z debida al peso del colector

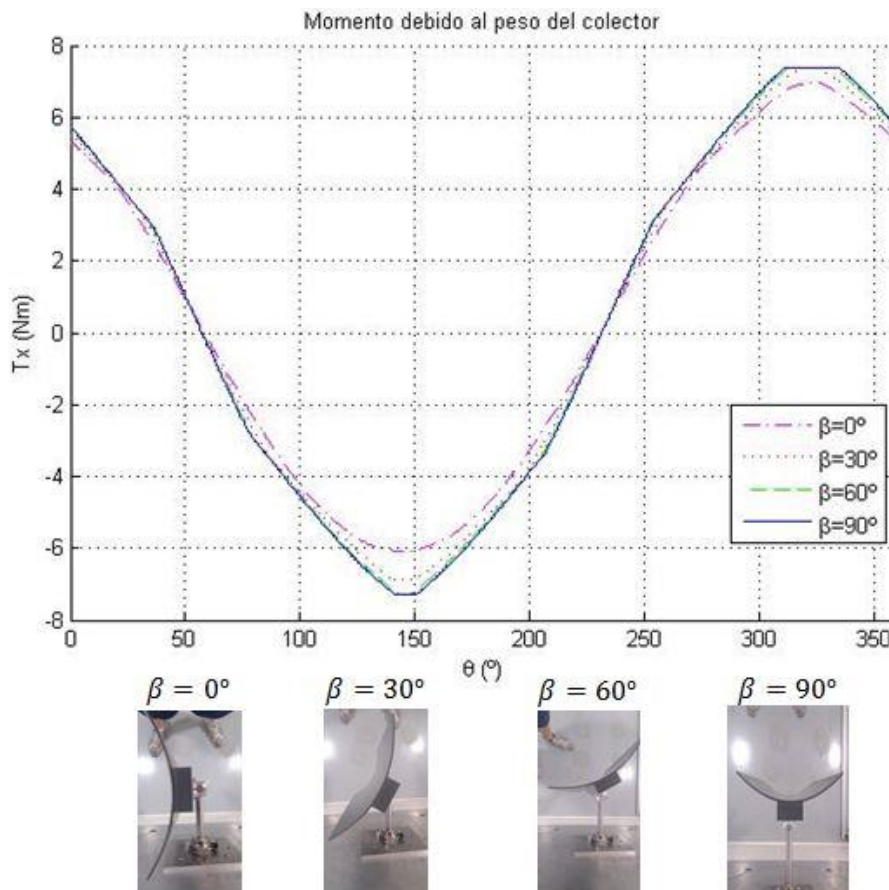


Figura 3.21. Momento según el eje X debido al peso del colector

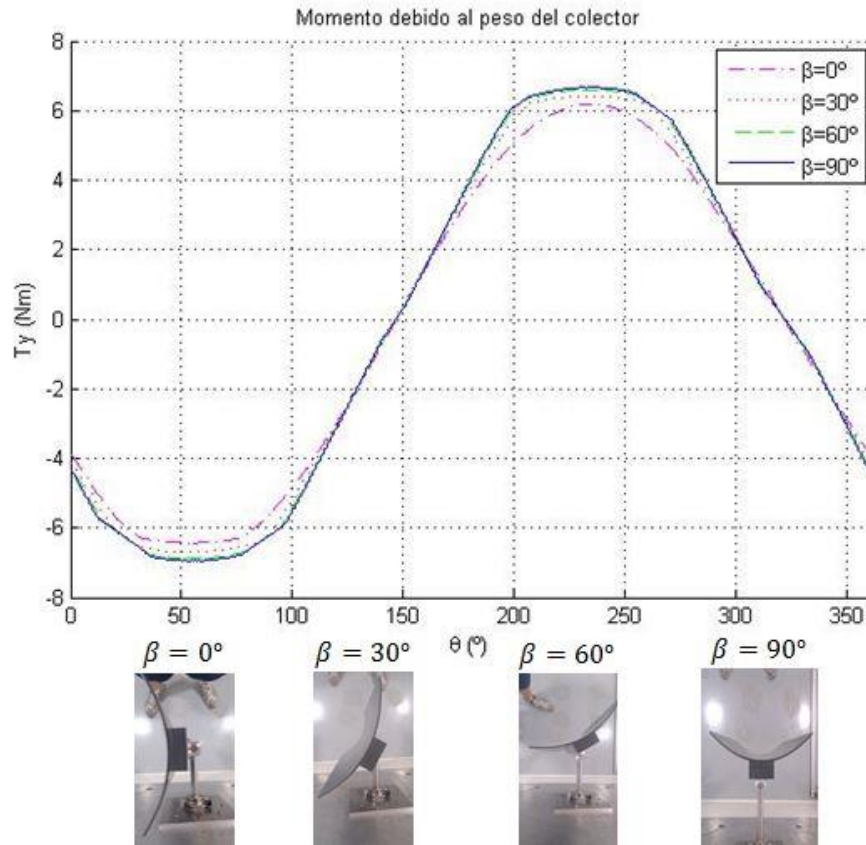


Figura 3.22. Momento según el eje Y debido al peso del colector

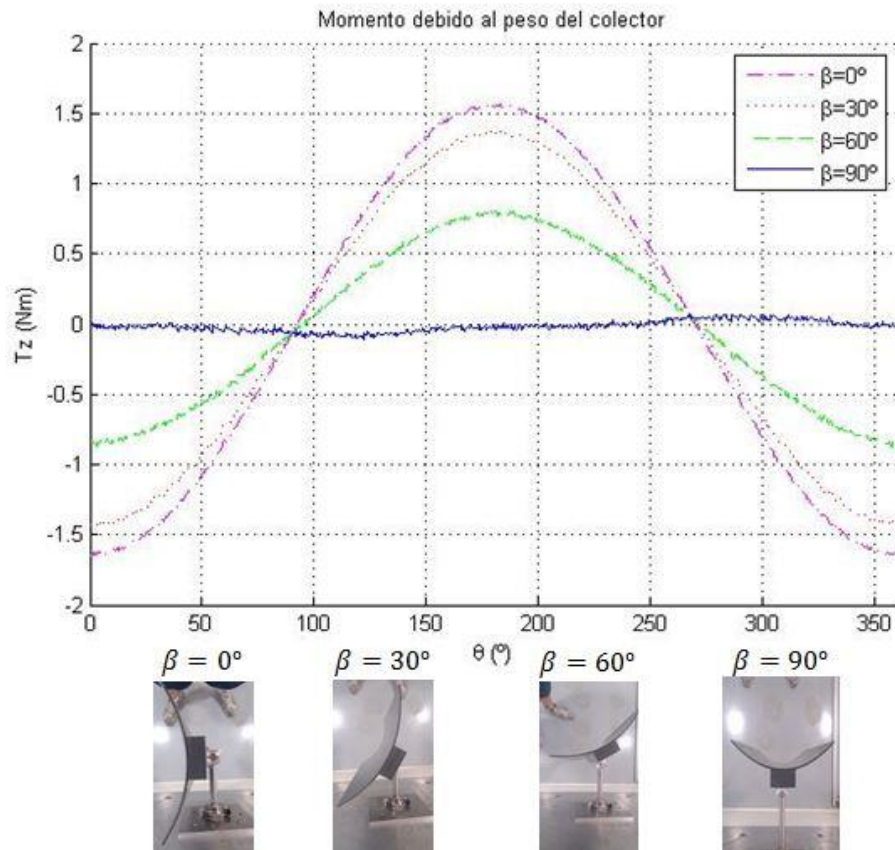


Figura 3.23. Momento según el eje Z debido al peso del colector

Se puede apreciar que tanto las cargas " $F_x$ " y " $F_y$ " como los momentos " $T_x$ " y " $T_y$ " se mantienen prácticamente constantes a lo largo del movimiento de la placa parabólica, lo que destaca es que los que varían significativamente son la carga " $F_z$ " y el momento " $T_z$ ".

La variación existente en la carga " $F_z$ " con respecto a la posición de la placa parabólica es debida a que el peso de la placa se va alejando cada vez más del punto donde se encuentra el sensor, al aumentar el ángulo " $\beta$ ", lo que va incrementando la fuerza que éste mide al variar el punto de aplicación de ésta. Mientras que la variación del momento " $T_z$ " no se produce en un rango tan amplio pero si significativo, y es debido a que conforme se va alineando la placa con el eje soporte del colector (que coincide con el eje Z del sensor), es decir, cuando se va incrementando el ángulo " $\beta$ ", este momento respecto al eje Z se va haciendo menor, al no encontrarse ya la placa a un lado del eje soporte, sino que se va alineando con éste, disminuyendo así su torsión.

Por lo que habrá que realizar las medidas de las cargas y los momentos con el túnel de viento apagado para cada una de las posiciones de la placa parabólica ya que hay componentes que varían significativamente.

Una vez se obtengan dichos resultados y se hallan realizado los respectivos ensayos experimentales con el túnel de viento encendido, se restarán las fuerzas obtenidas con el túnel apagado para obtener los resultados reales que mide el sensor de las fuerzas aerodinámicas que ejerce el viento sobre el modelo de colector solar, ya que la única diferencia entre ambos tipos de ensayos es que en uno el túnel está apagado y en el otro está encendido, por lo que se ve únicamente afectado por la acción del viento.





## 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras la realización de los ensayos en el túnel de viento, se han obtenido las distintas fuerzas y momentos medidos con respecto a cada uno de los ejes. Se busca estudiar las fuerzas aerodinámicas sobre el colector por lo que se van a calcular los coeficientes de resistencia y de sustentación sobre el modelo para poder extrapolar estos resultados a los colectores reales. Además, también se analizan los momentos obtenidos.

### 4.1 Coeficiente de sustentación y coeficiente de resistencia

#### 4.1.1 Cálculo del $C_D$ y $C_L$

Las fórmulas utilizadas para calcular ambos coeficientes son las siguientes:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 A_{frontal}} \quad (4.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 A_{frontal}} \quad (4.2)$$

Para poder hallar los valores de la resistencia “ $D$ ” y de la sustentación “ $L$ ”, primero hay que conocer la posición de los ejes del sensor con respecto a la dirección de incidencia del viento sobre el colector, dicha posición es la siguiente:

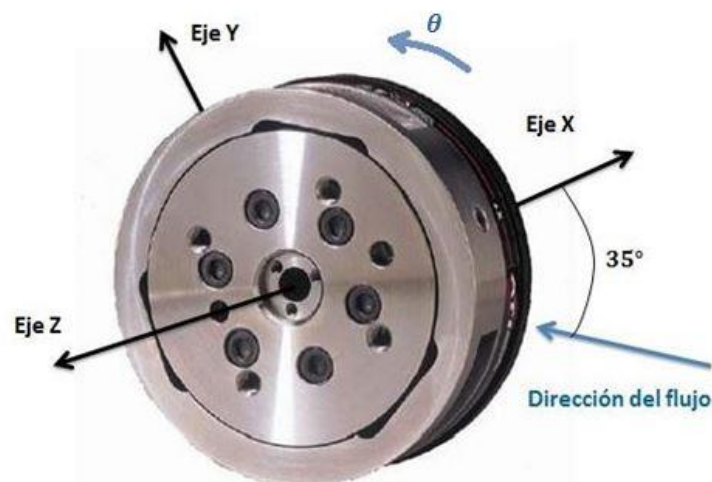


Figura 4.1. Posición de los ejes y sentido de giro del sensor

En la anterior figura se puede apreciar el sentido de giro del colector cuando se simulan las distintas direcciones del flujo incidente sobre éste.

La resistencia tiene la dirección y el sentido del flujo y la sustentación tiene la dirección y el sentido del “eje Z” al encontrarse el colector colocado horizontalmente sobre el sensor.

Por lo que para poder obtener la resistencia que ejerce el viento sobre el colector es necesario utilizar la siguiente fórmula:

$$D = -[F_x \cos(35^\circ + \theta) + F_y \cos(90^\circ + 35^\circ + \theta)] \quad (4.3)$$

El signo negativo se utiliza debido a que la resistencia se toma como positiva cuando tiene la dirección y sentido del viento incidente y la parte de la fórmula anterior entre corchetes toma como positivo el sentido contrario.

Para obtener la sustentación, al coincidir la componente vertical de la fuerza medida por el sensor con la barra soporte del colector, entonces se halla directamente:

$$L = F_z \quad (4.4)$$

Para hallar los coeficientes adimensionales también es necesario conocer la densidad atmosférica en Sevilla, lugar de realización de los ensayos experimentales, teniendo también en cuenta los días del año en los cuales se realizaron los ensayos. Su valor es de:

$$\rho_\infty = 1.1424 \text{ kg/m}^3 \quad (4.5)$$

También para adimensionalizar las fuerzas aerodinámicas es necesario conocer las velocidades del viento incidente para cada uno de los ensayos realizados, medidas en el interior del túnel:

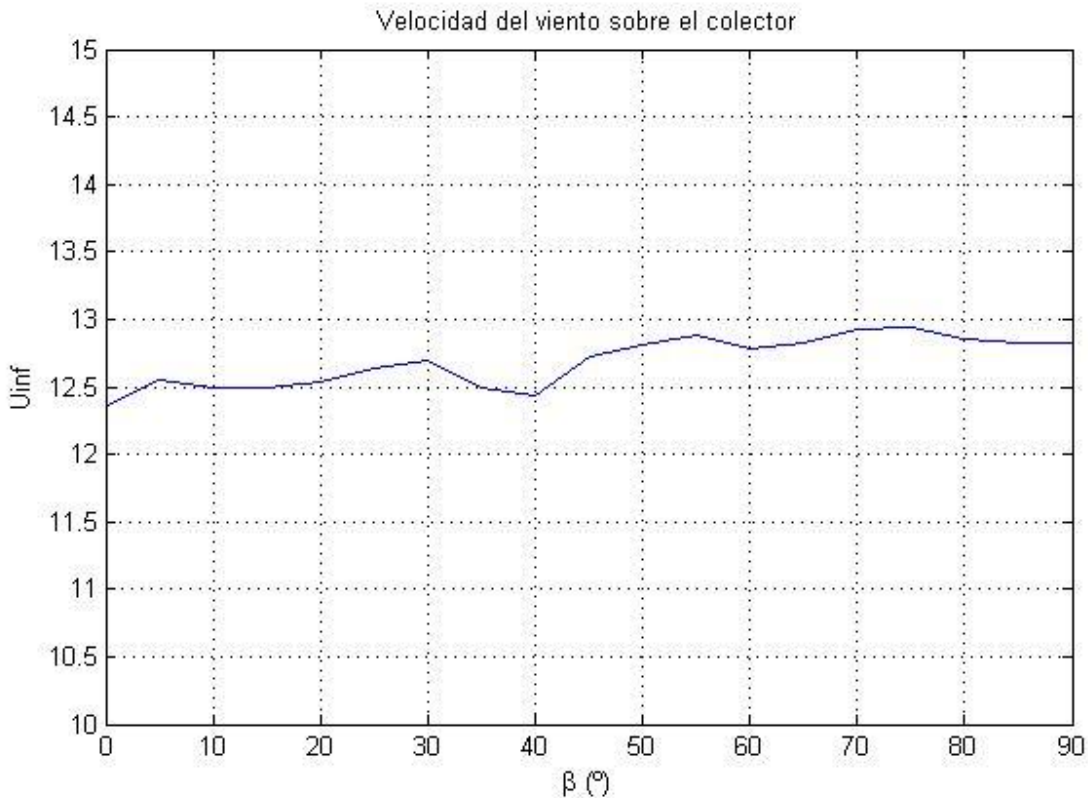


Figura 4.2. Velocidad del viento en función de la posición de la placa

Se puede comprobar que el número de Reynolds en el túnel es elevado como ocurre con los colectores reales:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} L}{\mu} \quad (4.6)$$

Tomando como  $U_{\infty} = 12.6908 \text{ m/s}$  la media de las anteriores velocidades recogidas. Como longitud característica se toma la longitud de la placa, que es el elemento de mayor dimensión,  $L = 0.625 \text{ m}$  y como viscosidad dinámica  $\mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

Por lo que se obtiene un número de Reynolds:

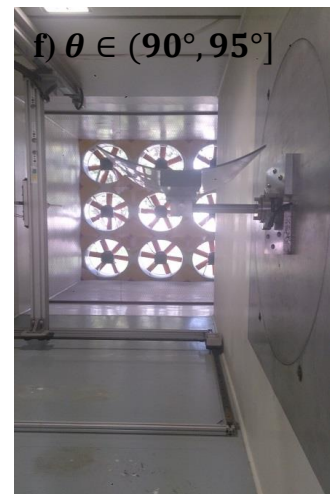
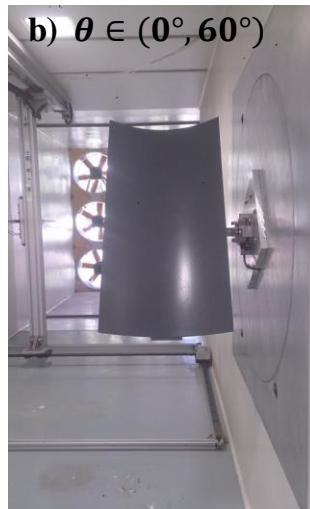
$$Re = 4.872 \times 10^5 \quad (4.7)$$

#### 4.1.1.1 Cálculo del área frontal

Para poder adimensionalizar las fuerzas aerodinámicas queda calcular el área frontal del colector que ve el viento incidente para cada ángulo " $\theta$ " y también para cada valor del ángulo de la placa parabólica " $\beta$ ". Para ello se ha de diferenciar entre distintos intervalos debido a que para diferentes direcciones y posición de la placa, el viento ve distinto área del colector.

- **Área frontal de la placa en función de " $\theta$ ", orientación del viento**

Se calcula el área frontal que ve para cada ángulo " $\theta$ " el viento para la posición inicial de la placa parabólica a  $\beta=0^\circ$ , con el fin de hallar después una relación con la que a partir de ésta, se pueda obtener el área frontal del colector para cualquier posición de la placa parabólica y dirección del viento incidente. El área frontal que se ve de la placa se va a aproximar a un rectángulo.



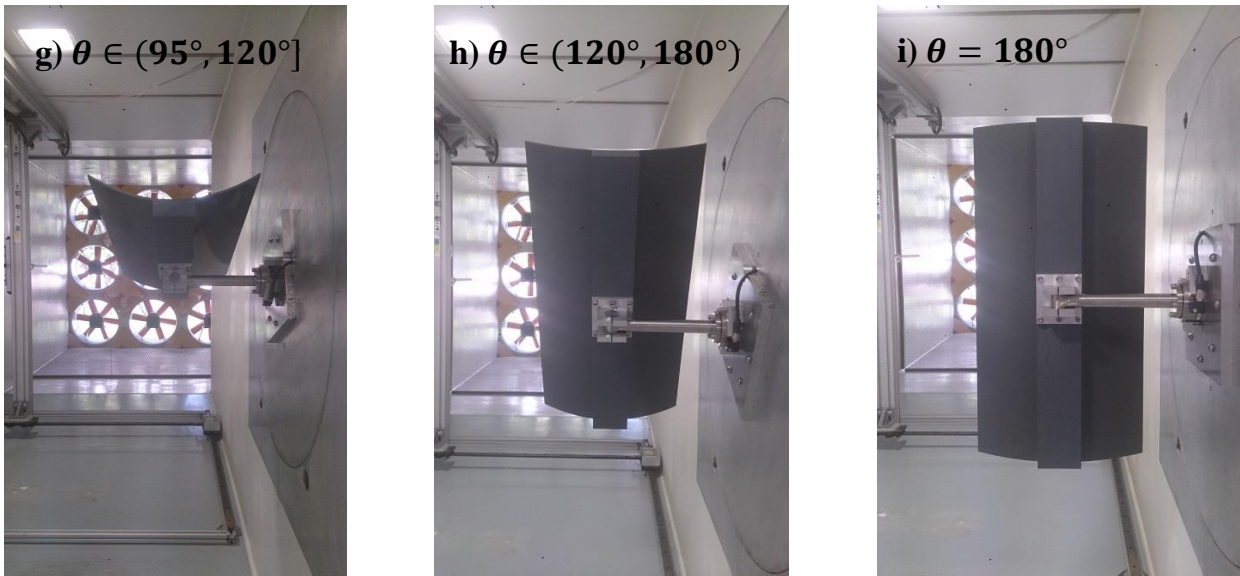


Figura 4.3. Posiciones del colector para cada intervalo del área frontal  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$

Se comienza con el cálculo del área frontal para la posición inicial de la placa:

➤  $\theta = 0^\circ$

Se tiene en cuenta el área de la placa frontal, que será la de mayor dimensión, teniendo también en cuenta que se ve un trozo de la barra soporte del colector y la parte lateral de la galleta de sujeción de éste sobre el sensor. Estas dos últimas partes se verán siempre a lo largo del giro del colector, por lo que hay que tenerla en cuenta en todos los intervalos. Esto se puede apreciar en la Figura 5.3a).

Obteniéndose un área frontal igual a:

$$A_f = 180617.125 \text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

➤  $\theta \in (0^\circ, 60^\circ)$

En este intervalo, al empezar a girar el colector el área frontal de la placa que se ve, va disminuyendo, y, a la vez, se empieza a observar el rigidizador trasero por detrás de la placa junto con el espesor de la placa. Se puede ver en la Figura 5.3b).

El valor del área frontal obtenida será:

$$A_f = 180617.125 - 1948.44\theta \quad (4.9)$$

➤  $\theta \in [60^\circ, 85^\circ)$

En este intervalo, aparte de lo que se ha tenido en cuenta en el anterior, hay que añadirle que debido a la curvatura de la placa parabólica, conforme aumenta el ángulo " $\theta$ " se comienza a ver el resto de la barra soporte del colector, obteniéndose el siguiente valor del área frontal:

$$A_f = 174123.475 - 1840.21\theta \quad (4.10)$$

Como se puede observar en la Figura 5.3c).

➤  $\theta \in [85^\circ, 90^\circ)$

Ya en este intervalo se tiene en cuenta lo del anterior, salvo que ya se ve la barra completa y comienza a verse la brida y el eje transversal situados en la parte trasera de la placa. El área frontal obtenida es:

$$A_f = 138782.813 - 1424.44\theta \quad (4.11)$$

Se aprecia en la Figura 5.3d).

$$\triangleright \theta = 90^\circ$$

Aquí se calcula a partir del espesor de la placa a lo largo de su curvatura, el área frontal del rigidizador y todo el conjunto de la brida, eje transversal, barra soporte y la galleta de unión con el sensor. Con todo esto, el área frontal obtenida es:

$$A_f = 10583.013 \text{ mm}^2 \quad (4.12)$$

Se ve en la Figura 5.3e).

$$\triangleright \theta \in (90^\circ, 95^\circ]$$

Al superar los  $90^\circ$ , el área frontal de la placa comienza a crecer y se sigue viendo lo mismo que en el intervalo  $[85^\circ, 90^\circ)$ , salvo que en este intervalo la brida y el eje transversal comienzan a coincidir con el del rigidizador. El área frontal que se ve es la siguiente:

$$A_f = 1424.44\theta - 117616.787 \quad (4.13)$$

Se observa en la Figura 5.3f).

$$\triangleright \theta \in (95^\circ, 120^\circ]$$

En este intervalo ya se ha dejado de ver la brida y el soporte trasero del colector, y comienza a ocultarse la barra soporte del colector. El área frontal que se obtiene es:

$$A_f = 1840.215\theta - 157115.875 \quad (4.14)$$

Se aprecia en la Figura 5.3g).

$$\triangleright \theta \in (120^\circ, 180^\circ)$$

En este intervalo únicamente se tiene la parte de la barra y galleta que siempre se ve, mientras que el área frontal que se ve del espesor de la placa y del rigidizador cada vez es menor, obteniendo así:

$$A_f = 1948.44\theta - 170102.475 \quad (4.15)$$

Se puede ver en la Figura 5.3h).

$$\triangleright \theta = 180^\circ$$

Para este ángulo se aprecia el mismo área frontal que para  $\theta = 0^\circ$ , aunque ahora se ve todo el soporte trasero del colector pero el área frontal de la placa es mayor. Por lo que el área frontal será:

$$A_f = 180617.125 \text{ mm}^2 \quad (4.16)$$

Se puede observar en la Figura 5.3i).

En los siguientes intervalos se ve el mismo área frontal que en los intervalos correspondientes a los explicados anteriormente restando  $180^\circ$  a los próximos, por lo que se procede a poner únicamente la fórmula utilizada para hallarlo que no será la misma puesto que depende del ángulo " $\theta$ " y en estos intervalos es mayor.

$$\triangleright \theta \in (180^\circ, 240^\circ)$$

$$A_f = 531337.225 - 1948.44\theta \quad (4.17)$$

Se puede ver en la Figura 5.4a).

$$\triangleright \theta \in [240^\circ, 265^\circ)$$

$$A_f = 505362.197 - 1840.215\theta \quad (4.18)$$

Se puede apreciar en la Figura 5.4b).

$$\triangleright \theta \in [265^\circ, 270^\circ)$$

$$A_f = 395182.413 - 1424.44\theta \quad (4.19)$$

Se puede observar en la Figura 5.4c).

$$\triangleright \theta = 270^\circ$$

$$A_f = 10583.013 \text{ mm}^2 \quad (4.20)$$

Se puede ver en la Figura 5.4d).

$$\triangleright \theta \in (270^\circ, 275^\circ]$$

$$A_f = 1424.44\theta - 374016.395 \quad (4.21)$$

Se puede apreciar en la Figura 5.4e).

$$\triangleright \theta \in (275^\circ, 300^\circ]$$

$$A_f = 1840.21\theta - 488353.819 \quad (4.22)$$

Se observa en la Figura 5.4f).

$$\triangleright \theta \in (300^\circ, 360^\circ)$$

$$A_f = 1948.44\theta - 520822.075 \quad (4.23)$$

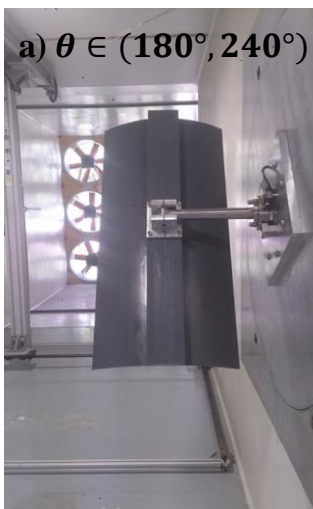
Se puede ver en la Figura 5.4g).

$$\triangleright \theta = 360^\circ$$

En esta posición coincidirá con la de  $\theta = 0^\circ$ .

$$A_f = 180617.125 \text{ mm}^2 \quad (4.24)$$

Se aprecia en la Figura 5.3a).



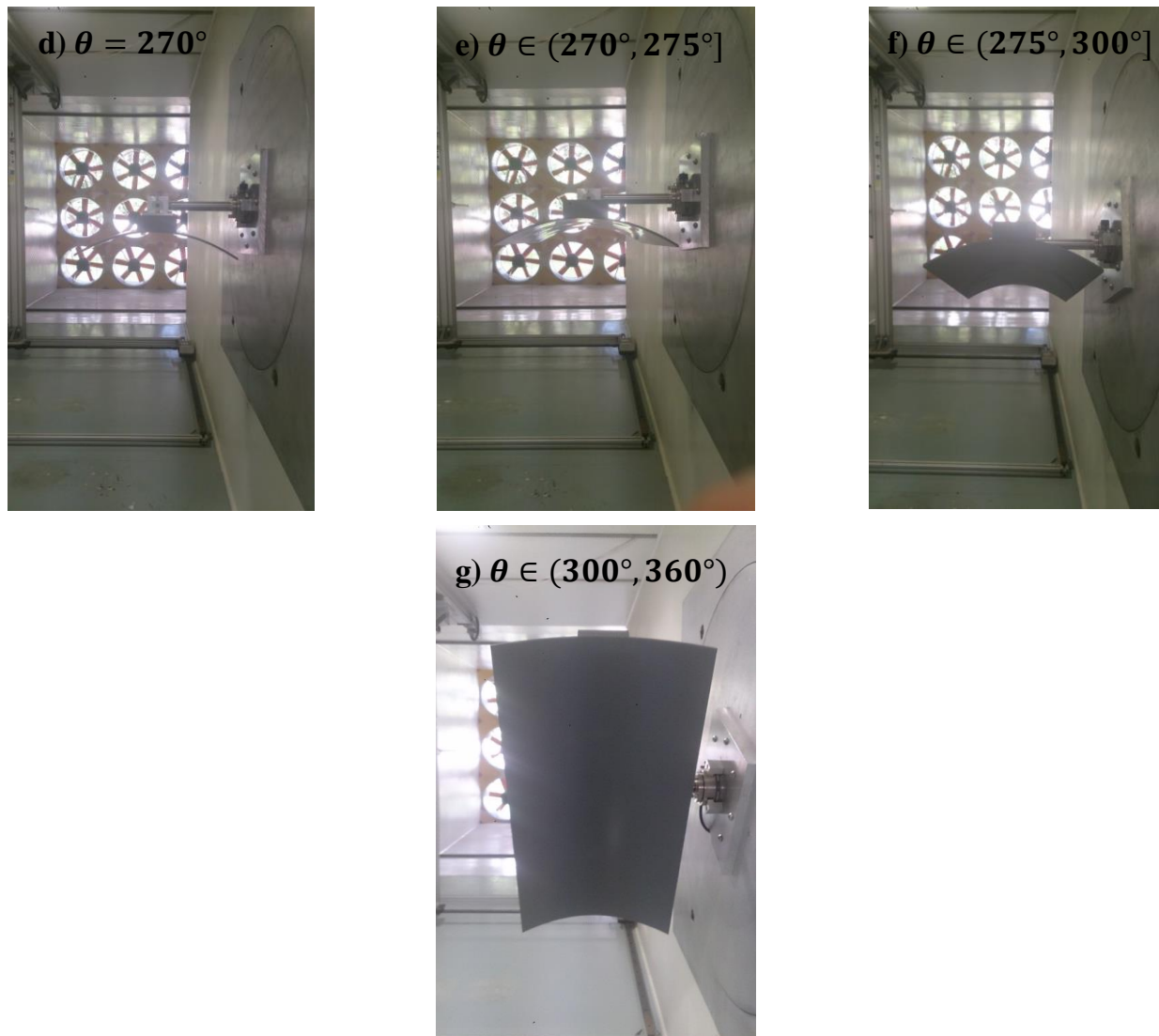


Figura 4.4. Posiciones del colector para cada intervalo del área frontal  $\theta \in [180^\circ, 360^\circ]$

Representando el área frontal que se consigue con las fórmulas anteriores respecto al ángulo “ $\theta$ ”, se obtiene:

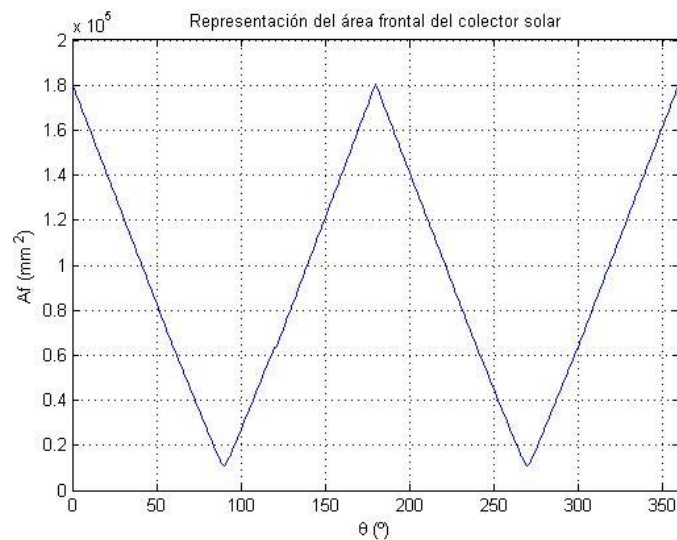


Figura 4.5. Área frontal en función de la dirección de incidencia del viento

Se tiene una tendencia bastante lineal en cada uno de los cuadrantes, pero no totalmente, por lo que se ha aproximado cada intervalo a una parábola, comprobando que los resultados son más exactos que los que se obtendrían comparándolo a una recta.

Por lo que tomando tres puntos, los dos de los extremos y el del medio para cada cuadrante, se obtienen las siguientes ecuaciones de las correspondientes parábolas:

$$\triangleright \theta \in [0^\circ, 90^\circ]$$

$$A_f = 1.3151\theta^2 - 2007.627\theta + 180617.125 \quad (4.25)$$

$$\triangleright \theta \in [90^\circ, 180^\circ]$$

$$A_f = -1.085\theta^2 + 2182.19\theta - 177026.363 \quad (4.26)$$

$$\triangleright \theta \in [180^\circ, 270^\circ]$$

$$A_f = 1.3151\theta^2 - 2481.063\theta + 584599.225 \quad (4.27)$$

$$\triangleright \theta \in [270^\circ, 360^\circ]$$

$$A_f = 1.3161\theta^2 + 1060.135\theta - 371595.91 \quad (4.28)$$

Una vez conocido el comportamiento de la curva del área frontal para la placa parabólica en su posición original a  $0^\circ$ , se halla una relación con respecto a las demás posiciones de la placa teniendo en cuenta que todas realizan el mismo movimiento rotatorio alrededor del eje soporte del colector, pero con la diferencia de que al variar la posición de la placa parabólica, el área frontal que se va viendo es menor, ya que lo que aporta un mayor área frontal es la placa al ser el elemento de mayor dimensión.

- **Área frontal en función del ángulo “ $\beta$ ”, posición de la placa parabólica**

Se estima el resto de áreas frontales que se ven para cada posición de la placa parabólica, para ello se debe de tener en cuenta distintos intervalos de la posición de la placa, la cual se define mediante el ángulo “ $\beta$ ”. Todas las áreas frontales se hallan para la posición  $\theta = 0^\circ$ , para después compararlas con el valor del área frontal en  $\beta = 0^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$  y así obtener la relación entre ambas posiciones para determinar la proporción con respecto a las curvas parabólicas halladas anteriormente del área frontal para las distintas posiciones de la placa parabólica:

$$\triangleright \beta \in (0^\circ, 45^\circ]$$

Se tiene en cuenta la disminución del área frontal de la placa que ve la corriente incidente y también que conforme aumenta el ángulo “ $\beta$ ” se va viendo más de la barra soporte del colector hasta llegar a los  $45^\circ$  donde se ve entera.

Se puede ver un ejemplo de la placa dentro de este intervalo en la Figura 3.15.

Por lo que la ecuación que da el valor del área frontal será:

$$A_f = 178806.125 - 1571.331\beta \quad (4.29)$$

$$\triangleright \beta \in (45^\circ, 50^\circ]$$

En este intervalo se sigue teniendo en cuenta que se va reduciendo el área frontal que se ve de la placa, ya se ve completamente la barra soporte del colector y comienza a observarse también el soporte trasero de la placa donde se encuentran la brida y el eje transversal.

Se tiene un ejemplo de la placa dentro de este intervalo en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Vista de la placa para  $\beta=45^\circ$ 

La ecuación del área frontal en este intervalo será:

$$A_f = 178891.813 - 1573.235\beta \quad (4.30)$$

➤  $\beta \in (50^\circ, 90^\circ]$

En este intervalo también se sigue reduciendo el área frontal que se ve de la placa, apareciendo así completamente tanto la barra soporte como la brida, pero al estar inclinadas respecto a la corriente incidente, su área frontal sigue aumentando. Ahora también es importante tener en cuenta, que se empieza a ver el rigidizador trasero de la placa aunque también inclinado respecto a la dirección de la corriente incidente hasta llegar a  $\beta = 90^\circ$ , donde se ve todo. Se tiene un ejemplo de la placa dentro de este intervalo en Figura 3.16.

El área frontal que se ve en este intervalo es:

$$A_f = 157516 - 1145.737\beta \quad (4.31)$$

- **Área frontal en función de “ $\beta$ ” y “ $\theta$ ”**

Una vez definido el área frontal que se tendrá en la posición inicial para cada ángulo de la placa parabólica, se hallará la relación con respecto a la placa cuando  $\beta = 0^\circ$ , que es la posición para la que se conoce la evolución del área frontal respecto al ángulo “ $\theta$ ”.

Hay que tener en cuenta que dicha relación no se puede aplicar directamente debido a que para los ángulos  $\theta = 90^\circ$  y  $\theta = 270^\circ$ , el valor del área frontal es siempre el mismo, sea cual sea la posición de la placa parabólica. Entonces, habrá que ajustar la curva del área frontal para que al llegar a los dichos ángulos, no se produzca la proporción aplicada debido a la disminución del área frontal de la placa por la variación de “ $\beta$ ”, pero para el resto de ángulos sí. Dicho ajuste es el siguiente:

$$Relación = \frac{A_f(\beta, \theta = 0)}{A_f(\beta = 0, \theta = 0)} \quad (4.32)$$

Obteniéndose las siguientes áreas frontales dependiendo del intervalo:

➤  $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$

$$A_f' = 1.3151\theta^2 - 2007.627\theta + 180617.125 \quad (4.33)$$

$$A_f = Relación * A_f' + (1 - Relación) * A_f' * \frac{\theta}{90}$$

➤  $\theta \in [90^\circ, 180^\circ]$

$$A_f' = -1.085\theta^2 + 2182.19\theta - 177026.363$$

$$A_f = A_f' + (Relación - 1) * A_f' * \frac{\theta - 90}{90} \quad (4.34)$$

➤  $\theta \in [180^\circ, 270^\circ]$

$$A_f' = 1.3151\theta^2 - 2481.063\theta + 584599.225$$

$$A_f = Relación * A_f' + (1 - Relación) * A_f' * \frac{\theta - 180}{90} \quad (4.35)$$

➤  $\theta \in [270^\circ, 360^\circ]$

$$A_f' = 1.3161\theta^2 + 1060.135\theta - 371595.91$$

$$A_f = A_f' + (Relación - 1) * A_f' * \frac{\theta - 270}{90} \quad (4.36)$$

Con el área frontal ya calculada se tienen todos los elementos para poder adimensionalizar la resistencia y la sustentación sufrida por el colector debido a la incidencia del viento.

#### 4.1.2 Resultados experimentales

Los valores obtenidos del coeficiente de sustentación y resistencia para las dos posiciones más dispares de la placa parabólica en función de la dirección del viento son los siguientes:

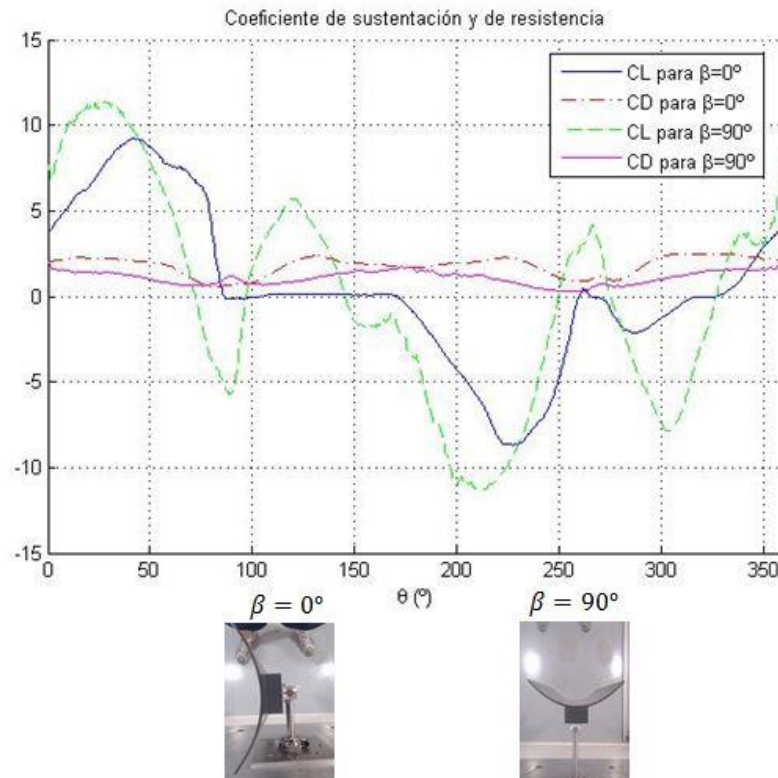


Figura 4.7. Coeficiente de sustentación y de resistencia

En el “Anexo B” se pueden ver el resto de las gráficas en las cuales se representan ambos coeficientes en función de “ $\theta$ ” para cada una de las posiciones de las placas ensayadas en el túnel.

A continuación, se representa, en las Figuras 4.8. y 4.9, la variación del coeficiente de sustentación y de resistencia en función de la posición de la placa para tres valores del ángulo “ $\theta$ ”, los cuales no han sido elegidos arbitrariamente, aunque sí lo suficientemente distintos como para entender mejor la diferencia entre ellos. Esto se entiende mejor en el capítulo de “Conclusiones”. Las figuras obtenidas son las siguientes:

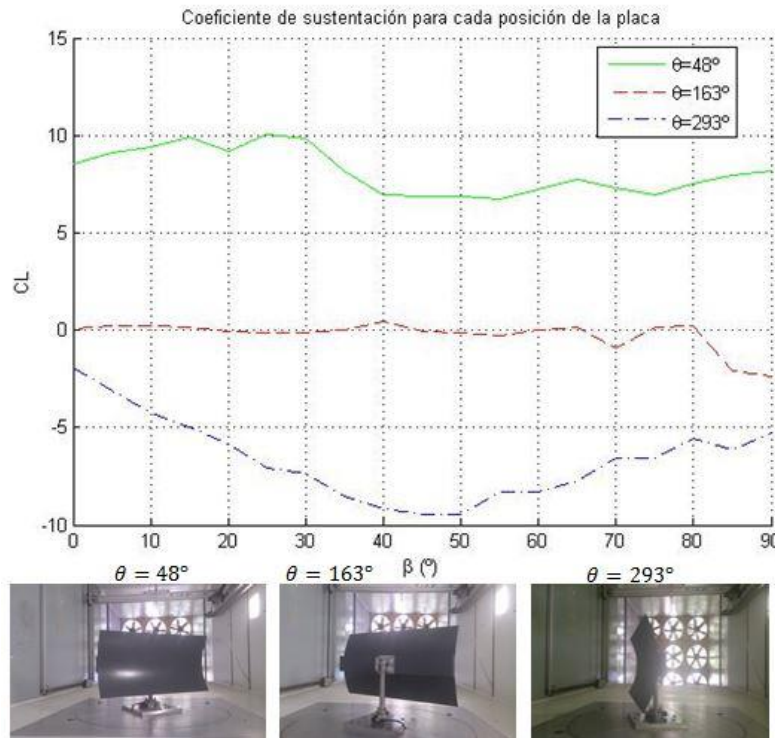


Figura 4.8. Coeficiente de sustentación en función de “ $\beta$ ”

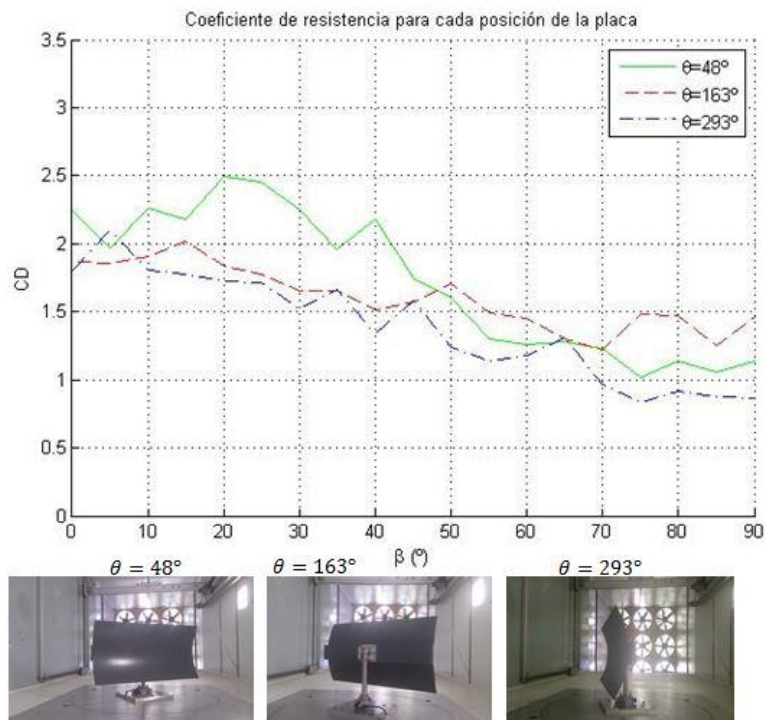


Figura 4.9. Coeficiente de resistencia en función de “ $\beta$ ”

Ahora se introduce una comparación de los coeficientes de sustentación y de resistencia, por separado, para distintas posiciones de la placa parabólica, para así poder explicar mejor las gráficas obtenidas en función de la posición de la placa y de la dirección de incidencia del viento:

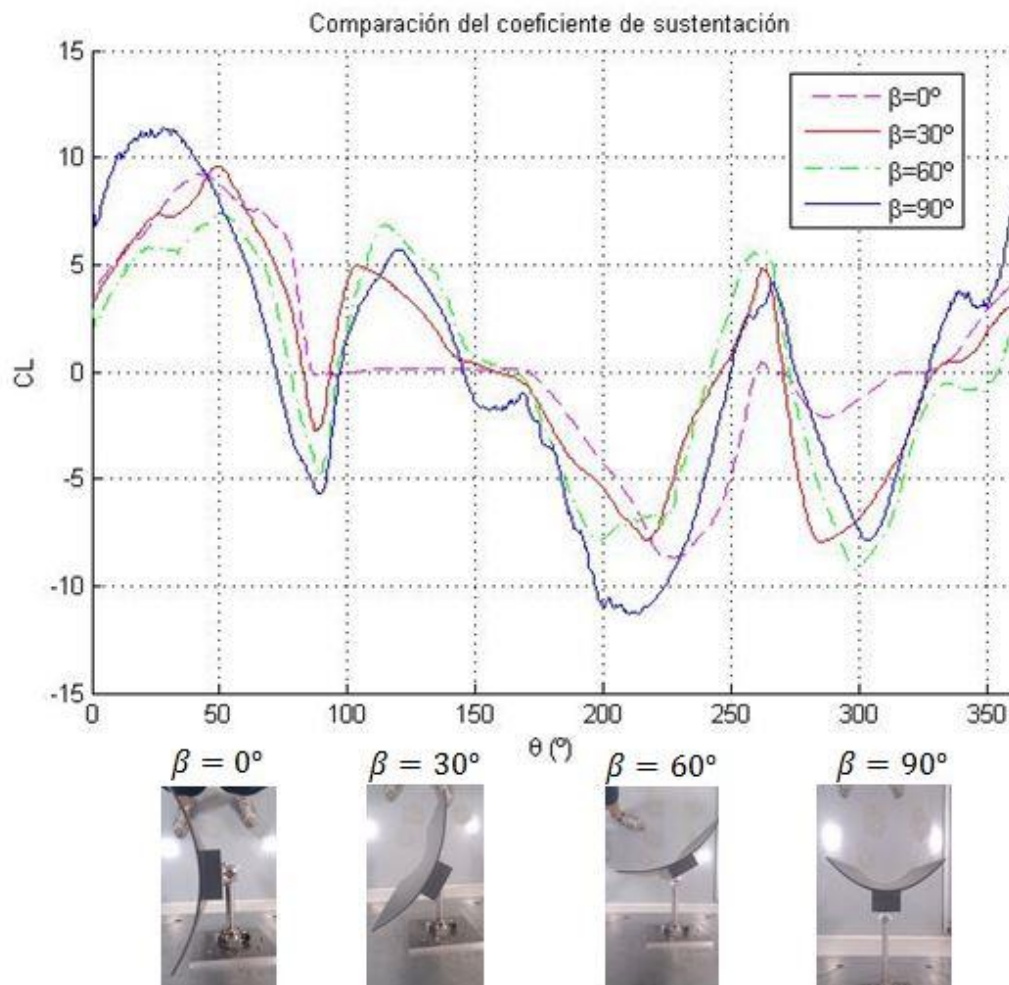


Figura 4.10. Comparación del coeficiente de sustentación

En la Figura 4.10. se aprecia que el coeficiente de sustentación varía mucho en función de la dirección de incidencia del viento, en un rango de aproximadamente desde -12 a 12, especialmente cuando la placa parabólica se encuentra en  $\beta=90^\circ$ , para el resto de ángulos varía desde -10 a 10.

El máximo se encuentra en  $\theta \in (25^\circ, 50^\circ)$ , es decir, cuando visto el colector de frente, el viento le entra de manera inclinada por la izquierda. El máximo se produce para  $\beta=90^\circ$ , debido a que conforme mayor es el ángulo " $\beta$ ", mayor es el ángulo de ataque de la placa dando lugar a un menor valor de la resultante contenida en el plano XY y mayor componente en el eje Z de la carga, es decir, mayor sustentación. La sustentación se mantiene elevada sea cual sea la posición de la placa por lo que recibir rachas de vientos en esta dirección no es algo favorable.

Seguidamente se pueden ver que se producen otros picos máximos para las direcciones del viento correspondientes a  $\theta \in (105^\circ, 120^\circ)$  y  $\theta \cong 270^\circ$ . Para las direcciones contenidas en el intervalo, el viento incide, visto el colector desde atrás, inclinado por la derecha. Hay que destacar que para la placa en la posición de  $\beta=0^\circ$ , la sustentación es prácticamente nula para vientos incidentes en las direcciones de  $\theta \in (90^\circ, 180^\circ)$  que se corresponden a todas las direcciones del viento incidente por la derecha visto desde atrás el colector. Esta situación es bastante favorable porque para frecuentes rachas de viento incidentes en dichas direcciones el colector apenas sufre. Conforme el ángulo de la placa parabólica va aumentando, también lo hace la sustentación en dicho intervalo. Aquí también se mantiene elevada la sustentación.

Para el tercer máximo, que sucede prácticamente cuando el viento incide sobre el colector por el lado derecho, lateralmente, visto desde el frente, se puede ver que también para la posición  $\beta=0^\circ$ , el valor es mucho menor que para el resto de posiciones de la placa.

En la anterior figura también hay tres mínimos del valor del coeficiente de sustentación, para las direcciones del viento correspondientes a  $\theta \cong 90^\circ$ ,  $\theta \in (200^\circ, 225^\circ)$  y  $\theta \in (280^\circ, 305^\circ)$ , aproximadamente todas con el mismo valor, excepto en el primer intervalo que para  $\beta=90^\circ$ , que su valor es mayor. Es importante darse cuenta de que las direcciones del viento correspondientes a los mínimos se encuentran, respectivamente,  $180^\circ$  desfasadas a las correspondientes a los máximos y, además, tienen el mismo valor absoluto. Que sean iguales en valor absoluto pero con distinto sentido se debe a la curvatura de la placa mientras que el desfase de  $180^\circ$  se debe a la simetría del colector con respecto al eje de la barra soporte.

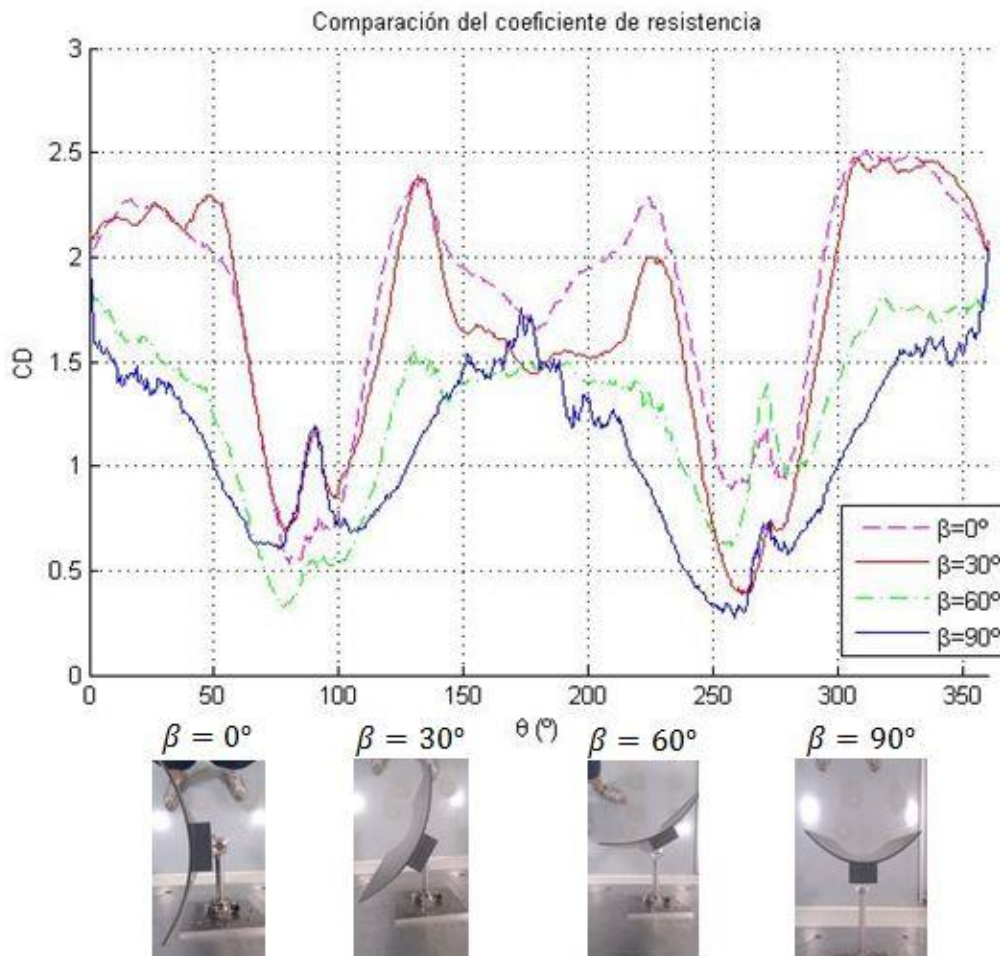


Figura 4.11. Comparación del coeficiente de resistencia

En la Figura 4.11, se ve que existe simetría con respecto a " $\theta=180^\circ$ ", es decir, la resistencia que ejerce el colector sobre el viento es muy similar venga el viento desde cualquier dirección contenida en los  $180^\circ$  de la derecha, visto de frente, que de la izquierda. Por ejemplo, el valor de la resistencia es aproximadamente el mismo incida el viento por el lateral derecho del colector,  $270^\circ$ , o por el lateral izquierdo,  $90^\circ$ .

El rango del coeficiente de resistencia varía entre  $0,3$  y  $2,5$ , por lo que para distintas direcciones incidentes del viento se puede incrementar incluso un orden de magnitud, lo que significa que es un aumento importante.

Se tiene que los mayores valores de resistencia se obtienen para los primeros  $45^\circ$  de la placa parabólica y pueden llegar a tener un valor de más del doble que para los ángulos de la placa cercanos a  $\beta=90^\circ$ . Se debe a que a menores ángulos de la placa, mayor es el área frontal que se encuentra el viento al incidir sobre el colector por lo que la resistencia que se produce es mayor. Esto ocurre para casi todas las direcciones del viento, excepto para las rachas que inciden a  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=180^\circ$  y  $\theta=270^\circ$ .

Se tienen unos mínimos en la resistencia para los ángulos  $\theta=90^\circ$  y  $\theta=270^\circ$ , ya que son las direcciones en las que el viento se encuentra el menor área frontal del colector. Para estas rachas se tiene que el área frontal que

se encuentra el viento incidente es la misma sea cual sea la posición de la placa por lo que se tienen resistencias muy parecidas aunque no iguales, al tratarse de un ensayo experimental y poder verse influido por variables externas. Las rachas que inciden justamente por detrás del colector,  $\theta=180^\circ$ , también tiene el mismo carácter aunque para la placa a  $\beta=90^\circ$  los valores varían mucho llegando a tener algunos picos, pero se respeta que el punto medio se encuentra aproximadamente con el mismo valor que para el resto de posiciones de la placa.

Se tienen grandes valores de la resistencia en los intervalos  $\theta \in (0^\circ, 50^\circ)$ ,  $\theta \in (125^\circ, 140^\circ)$ ,  $\theta \in (220^\circ, 230^\circ)$  y  $\theta \in (300^\circ, 360^\circ)$ , aunque debido a la simetría bastaría con explicar únicamente los dos primeros intervalos. Para el primer y el último intervalo, esta gran resistencia se debe a que son las zonas en las que mayor es el área frontal que ve el viento cuando llega al colector por lo que se genera una mayor resistencia. Hay que tener en cuenta que en estas zonas, la curva de la placa está abierta en el sentido contrario al del viento, por lo que éste se encuentra contra algo con lo que choca y a lo que no se puede adaptar. Aunque para los dos intervalos restantes, ocurre que también el área frontal que se encuentra el viento es elevada, pero son intervalos de menor tamaño debido a que también influye que la placa se encuentra abierta en el sentido del flujo por lo que se adapta a la curvatura de ésta minimizando la resistencia que ejerce. Por ese motivo los intervalos de las direcciones del viento que dan un valor elevado de la resistencia son menores ya que es una zona en la que se ve afectada tanto por el gran área frontal como por la buena adaptación del flujo a la curvatura.

### 4.2 Eficiencia aerodinámica

Conocida la evolución de los coeficientes de sustentación y de resistencia en función de los ángulos “ $\theta$ ” y “ $\beta$ ”, se puede definir la eficiencia aerodinámica a partir de la ecuación:

$$E = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} \tag{4.37}$$

En las Figuras 4.12. y 4.13. se representan los resultados obtenidos a partir de la anterior ecuación:

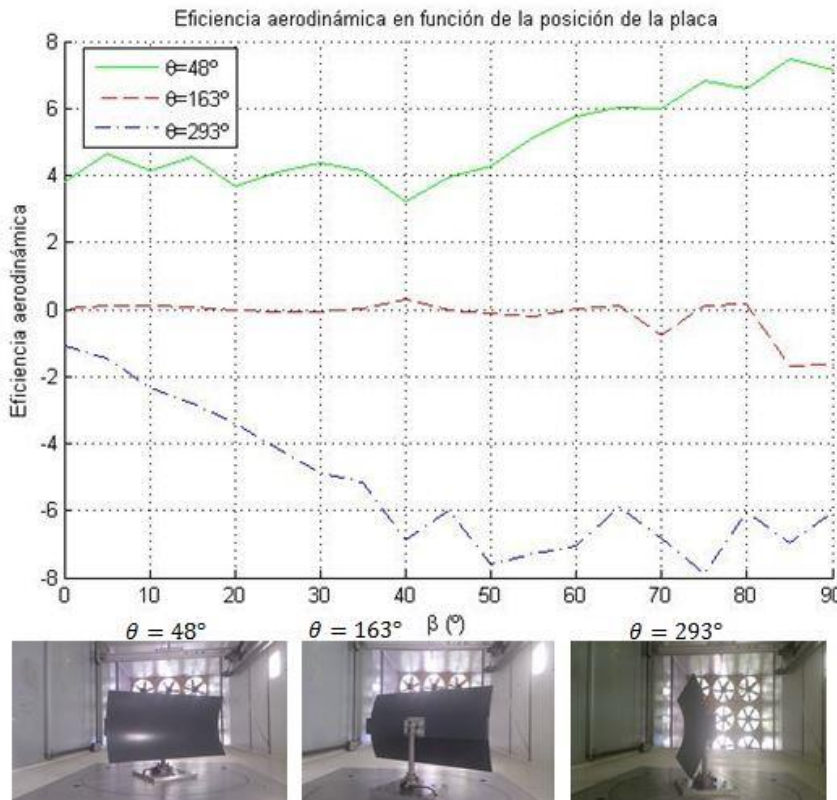


Figura 4.12. Eficiencia aerodinámica en función de “ $\beta$ ”

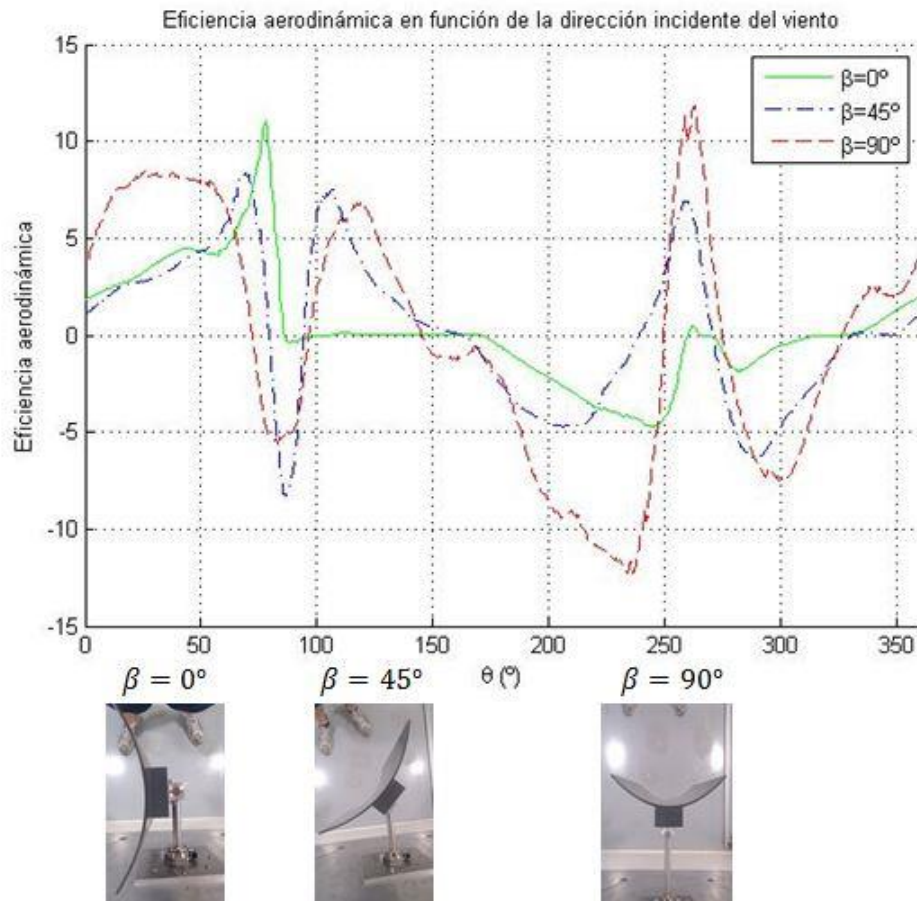


Figura 4.13. Eficiencia aerodinámica en función de “ $\theta$ ”

Con el estudio de la eficiencia se puede averiguar para qué direcciones del viento incidente o posiciones de la placa parabólica, existe mayor disparidad de valores entre la sustentación y la resistencia.

Se tienen que los valores de la sustentación y la resistencia son semejantes al aproximarse la eficiencia a la unidad. Esto puede verse en direcciones ligeramente superiores e inferiores a  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=270^\circ$  y  $\theta=360^\circ$ , aunque para las posiciones de la placa más alejadas de  $\beta=45^\circ$ , el ángulo “ $\theta$ ” que hace que la eficiencia sea la unidad, se aleja cada vez más de los anteriores. Para  $\theta \cong 140^\circ$  también se alcanza el mismo valor de la eficiencia.

Esto conlleva que para la mayoría de las direcciones incidentes del viento el valor de la sustentación es demasiado dispar al de la resistencia, siendo normalmente muy superior.

En la gráfica se aprecia que conforme mayor es el ángulo “ $\beta$ ”, mayor es el rango de variación de la eficiencia, lo que quiere decir que mayor es la diferencia que hay entre los valores de la sustentación y de la resistencia.

### 4.3 Momentos con respecto a los tres ejes

Una vez analizadas las fuerzas aerodinámicas sobre el colector se pasa a analizar los momentos que la incidencia del viento genera sobre éste con respecto a los tres ejes. En la Figura 4.14. se representan dichos momentos en función de la dirección de incidencia del viento para las posiciones de la placa más diferentes:

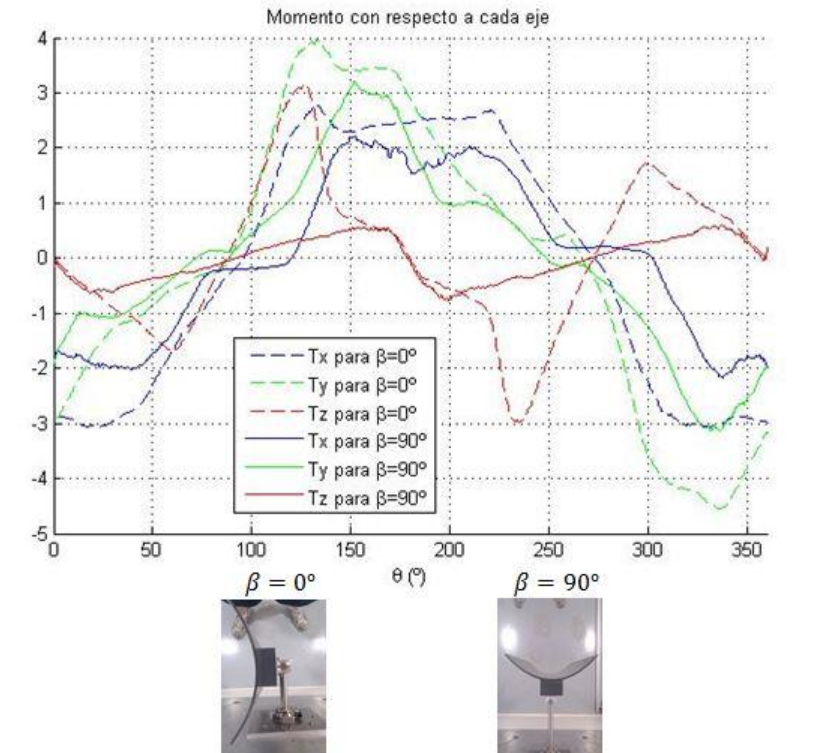


Figura 4.14. Momentos en función de “ $\theta$ ”

En el Anexo C se pueden encontrar las gráficas que muestran todos los resultados de los momentos con respecto a los tres ejes para las distintas posiciones de la placa en función de la dirección del viento incidente.

Ahora se introduce una comparación de los momentos con respecto a cada uno de los ejes, por separado, para distintas posiciones de la placa parabólica, en función de la dirección de incidencia del viento, para así poder explicar mejor las gráficas obtenidas:

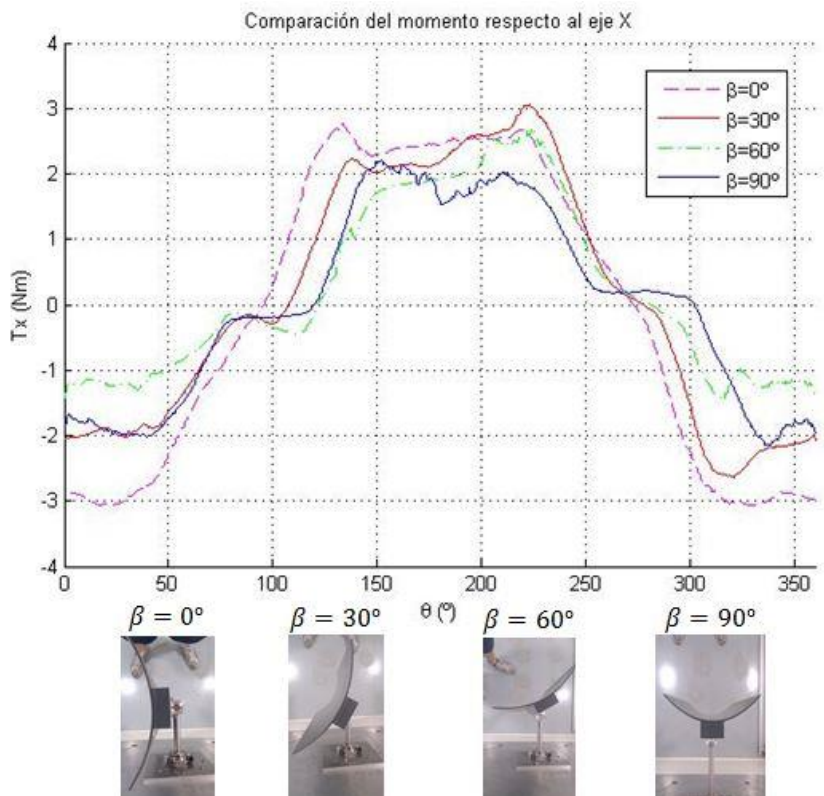


Figura 4.15. Comparación del momento con respecto al eje X



Se aprecia que la Figura 4.15. presenta un carácter prácticamente simétrico con respecto a los  $180^\circ$ , por lo que bastará con analizar uno de los dos intervalos de  $180^\circ$  con los que puede incidir el viento sobre el colector. El rango en el que varía el momento respecto al eje X será entre  $-3 \text{ N}\cdot\text{m}$  y  $3 \text{ N}\cdot\text{m}$  aproximadamente.

Es importante recordar que el eje X se encuentra a  $35^\circ$  de la dirección del flujo en la posición inicial del colector y que el sensor gira solidariamente con el colector.

En el intervalo  $\theta \in (0^\circ, 50^\circ)$  se produce el mínimo valor del momento respecto al eje X, donde se puede ver que para valores pequeños del ángulo " $\beta$ " es negativamente mayor que para valores grandes. Esto se debe a la curvatura de la placa hace que el viento provoque un momento sobre la placa que la tire hacia atrás, hacia el lado del soporte, por ese motivo son valores mayores para pequeños ángulos de " $\beta$ " y que conforme estos aumentan, la curvatura que ve el viento va siendo menor. Al aumentar el ángulo de incidencia del viento sobre el colector menos negativo se va haciendo este momento debido a que el viento comienza a fluir también por la parte trasera de la placa compensándolo hasta que la dirección es de  $\theta=90^\circ$  que se encuentra compensado casi por completo por ese motivo el momento es prácticamente nulo.

A partir de  $\theta=90^\circ$ , el momento comienza a aumentar hasta alcanzar su máximo que permanece más o menos constante en el intervalo  $\theta \in (140^\circ, 180^\circ)$ , donde se puede apreciar que para ángulos pequeños de " $\beta$ " es ligeramente mayor que para valores mayores; esto se debe a que ahora el viento incide por la parte trasera de la placa, lo que origina por la curvatura de ésta que el momento con respecto al eje X sea contrario a cuando incidía en su parte delantera, es decir, tira de la placa parabólica hacia adelante, siendo estos valores máximos cuanto más próxima está la incidencia del viento a dejar de ser inclinada respecto al colector y a ser completamente trasera.

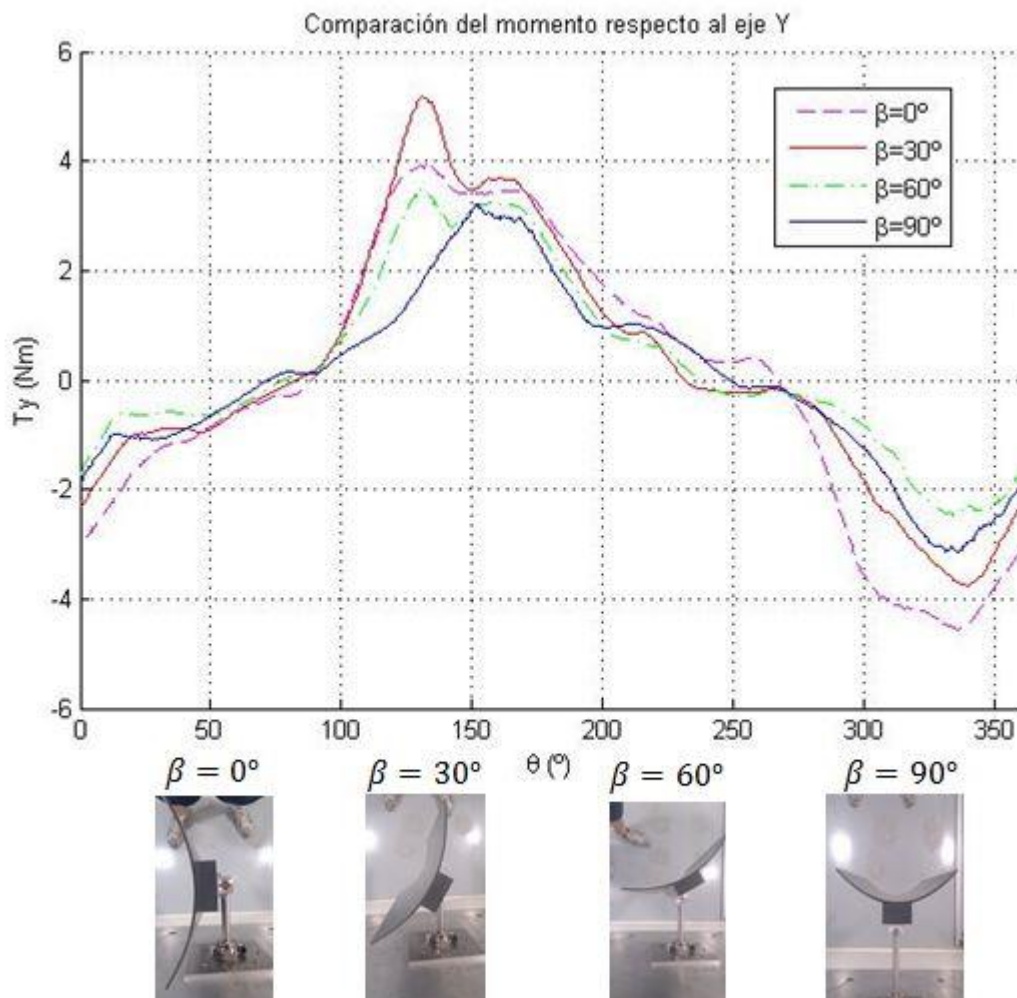


Figura 4.16. Comparación del momento con respecto al eje Y

El rango en el que se mueve el momento respecto al eje Y es desde  $-5 \text{ N}\cdot\text{m}$  hasta  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Se puede ver en la Figura 4.16. que tiene un carácter similar al momento respecto al eje X ya que ambos son momentos que se encuentran en el mismo plano definido a lo largo de la rotación del colector y que, además, el colector realiza una rotación de  $360^\circ$ , por lo que se tienen resultados parecidos. En ambas gráficas el lugar de comienzo de los intervalos de los momentos máximos y mínimos es el mismo pero con la diferencia de que la longitud de éstos en las zonas en las que permanecen aproximadamente constantes se reduce prácticamente a la mitad, debido a que el eje Y se encuentra  $90^\circ$  desplazado respecto al eje X. Dichos máximos y mínimos, reducen sus valores positivos y negativos respectivamente, conforme mayor es el ángulo " $\beta$ " debido a que el área que ve el viento al incidir sobre la placa va siendo menor por lo que el momento que genera se reduce respecto al resto.

También recalcar que los valores máximos y mínimos son del orden del momento con respecto al eje X salvo en los casos de pequeños valores de " $\beta$ " que es ligeramente mayor.

También hay que tener en cuenta que se respeta, como sucedía para el momento respecto al eje X, que en las direcciones del viento cercanas a  $\theta=90^\circ$  y a  $\theta=270^\circ$  el momento con respecto al eje Y es prácticamente nulo, debido a que el fluido se adapta a la posición de la placa contrarrestándose las presiones que originaban este momento.

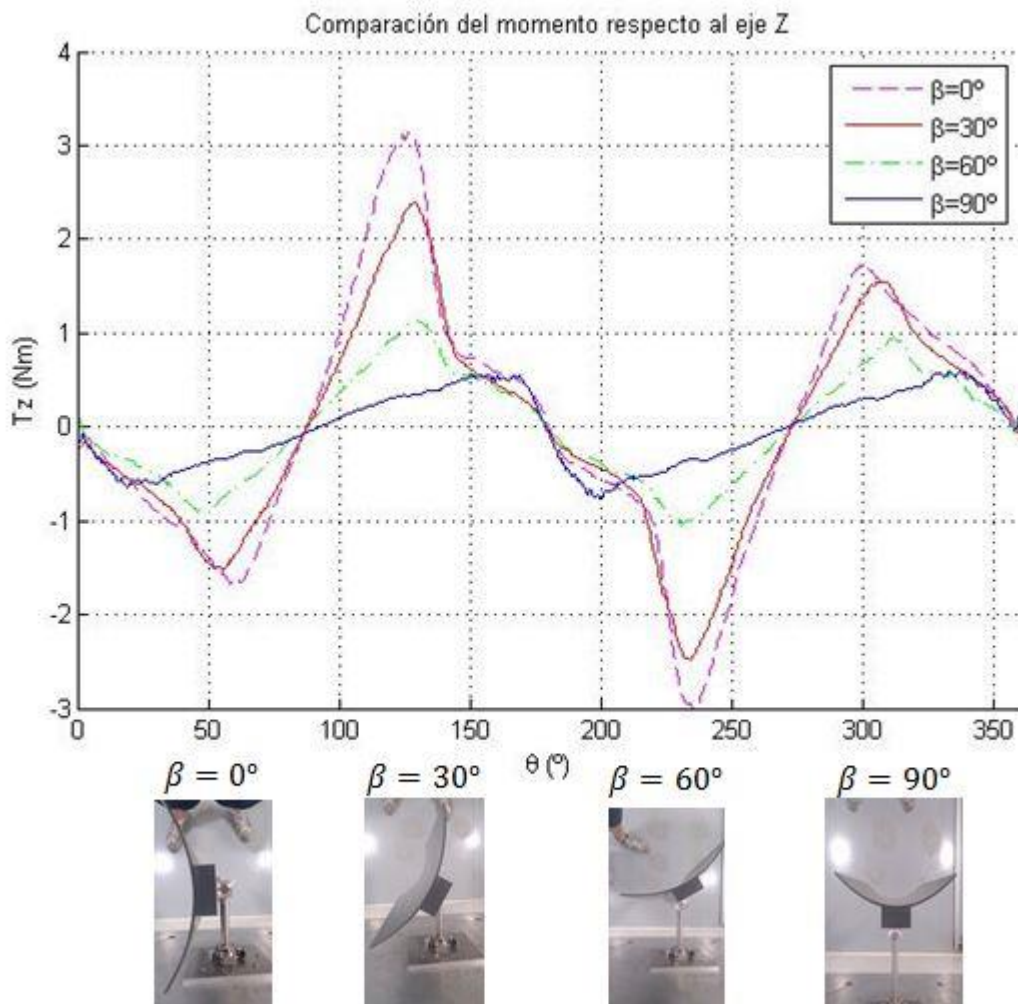


Figura 4.17. Comparación del momento con respecto al eje Z

Se observa que la Figura 4.17. presenta un carácter antisimétrico con respecto a  $\theta=180^\circ$ , es decir, la primera mitad de la gráfica es exactamente igual a la segunda. El rango en el que se mueven los valores del momento respecto al eje Z van desde  $-3 \text{ N}\cdot\text{m}$  hasta  $3 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

Se cumple que para todas las direcciones del viento, el valor del momento es menor conforme aumenta el ángulo de la placa parabólica, para los ángulos más altos de ésta, cercanos a  $\beta=90^\circ$ , el momento es

aproximadamente nulo. Esto se debe a que conforme aumenta el valor de " $\beta$ ", la placa se va alineando con la barra soporte del colector que coincide con la dirección del eje Z, por lo que el momento que va a generar con respecto a ese eje con la incidencia del viento va siendo menor.

Hay que destacar que cuando la dirección del viento es  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=180^\circ$  ó  $\theta=270^\circ$ , el momento con respecto al eje Z es nulo. Esto ocurre ya que el flujo para  $\theta=0^\circ$  y  $\theta=180^\circ$  impacta sobre la placa por igual a un lado y a otro de la barra soporte al incidir completamente de frente o por detrás, mientras que para los ángulos  $\theta=90^\circ$  y  $\theta=270^\circ$ , el flujo ejerce la misma presión por delante y por detrás de la placa al incidirle justamente por los laterales.

Los valores máximos del momento alrededor de los ángulos  $\theta \cong 120^\circ$  y  $\theta \cong 300^\circ$  y los mínimos aproximadamente en los ángulos  $\theta \cong 60^\circ$  y  $\theta \cong 240^\circ$ , debido a que la placa se encuentra inclinada respecto a la dirección del viento por lo que éste incide antes por un lado de la placa que por el otro generando un mayor momento. Por esto, dependiendo de la dirección de incidencia y del lateral de la placa en el que impacte antes, es positivo o negativo.

Hay que destacar que los máximos entre sí y los mínimos también entre sí, llevan un desfase de aproximadamente  $180^\circ$ , es decir, la dirección es la misma pero el sentido de incidencia en la placa es contrario.

El máximo de mayor valor se encuentra en  $\theta \cong 120^\circ$  y el mínimo más negativo en  $\theta \cong 240^\circ$ , ya que para ambos casos la incidencia del viento se produce desde la parte trasera de la placa, lo que debido a la curvatura, existe una mayor diferencia en el impacto del aire en el lateral de la placa con el que choca antes, mayor presión, que con el resto al que ya el flujo llega más adaptado al incidir después. Por lo que la diferencia de presión entre un lado y el otro de la placa, respecto al eje soporte del colector, es mayor generando un mayor momento que cuando el viento incide por la parte delantera de ésta. Para las otras dos direcciones, del máximo y mínimo, al entrar por delante de la placa, el flujo no se adapta y se produce un momento menor que en el anterior caso, al existir menor diferencia de presiones entre ambos lados.



## 5 CONCLUSIONES

Una vez realizados los ensayos experimentales para conocer las cargas y momentos que soporta un colector solar debido a la incidencia del viento, se enfoca dicho estudio para conseguir que el colector soporte las menores cargas y momentos.

Ahora se obtienen las direcciones más óptimas de incidencia del viento para que la estructura del colector solar cilindro parabólico sufra lo mínimo posible.

Para las cargas se tiene:

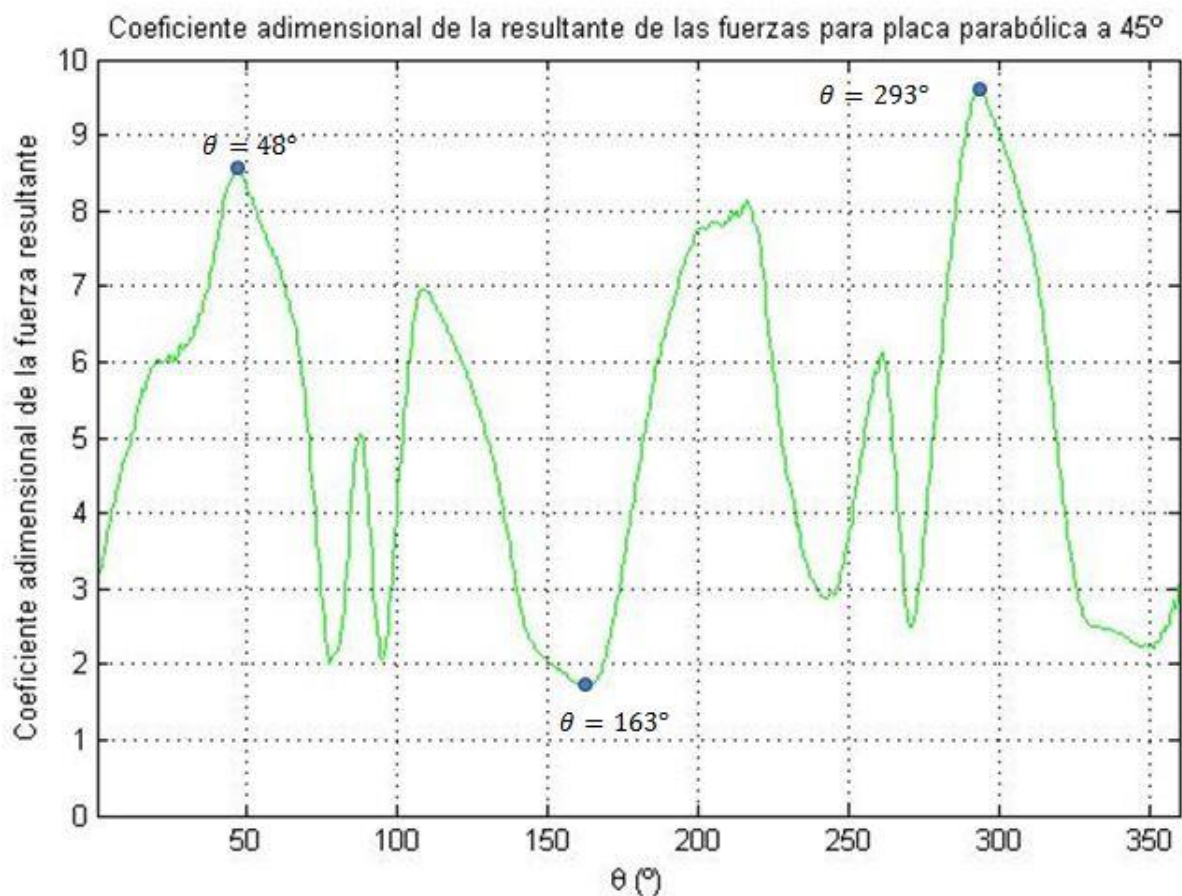


Figura 5.1. Coeficiente adimensional de la fuerza resultante para una posición de la placa a  $\beta = 45^\circ$

La Figura 5.1. se obtiene a partir de la fórmula:

$$\text{Coeficiente adimensional de la fuerza resultante} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 A_{\text{frontal}}} \quad (5.1)$$

Las direcciones del viento que hacen que tanto las fuerzas de sustentación como de resistencia sean las menores posibles son  $\theta \cong 80^\circ$ ,  $\theta \cong 95^\circ$ ,  $\theta \cong 163^\circ$ ,  $\theta \cong 240^\circ$ ,  $\theta \cong 270^\circ$  y  $\theta \cong 350^\circ$ , cuyos valores se encuentran entre 1 y 3 mientras que los máximos llegan hasta valores de casi 10 que es más del triple, por lo que la diferencia es muy grande.

Hay que destacar que este estudio para hallar el óptimo se realiza para una posición de la placa parabólica de  $\beta=45^\circ$  ya que para mayores o menores ángulos de la placa son, sobretodo, cuando se producen los máximos y mínimos, y con este ángulo se logra un punto intermedio.

En la Figura 5.1 se pueden ver las tres direcciones elegidas en las gráficas de los coeficientes de resistencia y de sustentación en función de la posición de la placa ( $\beta$ ) del capítulo anterior. Dichas direcciones se corresponden a las dos más desfavorables del viento incidente, es decir, las que originan mayores cargas sobre el colector ( $\theta = 48^\circ$  y  $\theta = 293^\circ$ ), y la dirección más favorable, que hace que el colector sufra menos ( $\theta = 163^\circ$ ).

Una vez obtenidas las direcciones del viento incidente más óptimas para las que el colector aguante las menores cargas, al extrapolarse a los colectores solares cilindro parabólicos de la realidad, se buscará realizar un estudio de las direcciones más frecuentes de las rachas de viento de la zona. El objetivo es colocar el colector de manera que éstas le incidan por las que dan valores mínimos del coeficiente adimensional de la fuerza resultante correspondiente a la Figura 5.1.

Son más aconsejables las direcciones  $\theta \cong 163^\circ$  y  $\theta \cong 350^\circ$ , ya que para el resto, el valor de la fuerza resultante aumenta bruscamente en cuanto varía muy ligeramente de la óptima.

En la Figura 5.2. se puede observar cuáles son las direcciones menos desfavorables:

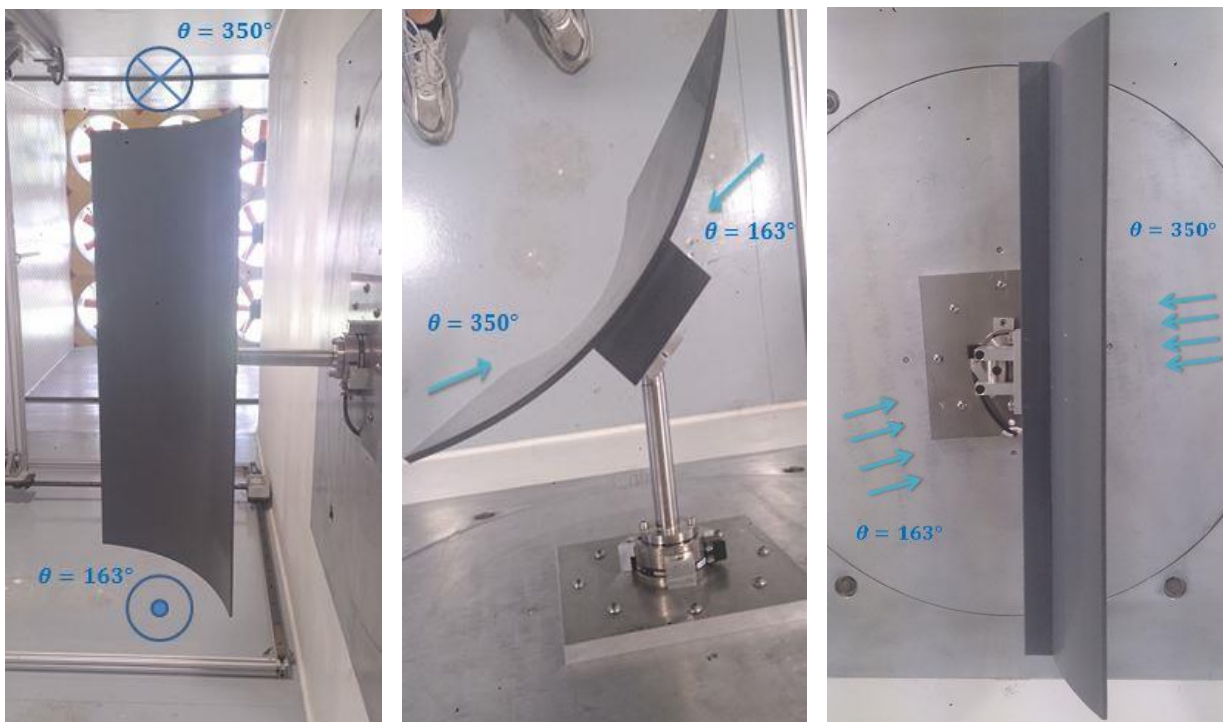


Figura 5.2. Vistas de la dirección del viento incidente óptima

Se puede ver que hay un desfase de aproximadamente  $180^\circ$  entre ambas direcciones. Esto se cumple debido a la simetría existente con respecto a la barra soporte del colector por lo que la resultante de las fuerzas para ambos valores del ángulo " $\theta$ " son muy parecidas en valor absoluto.

## 6 ENSAYOS FUTUROS

Para posibles ensayos futuros se deja la posibilidad de asemejar más a la realidad los ensayos experimentales realizados, fabricando más modelos de colector solar cilindro parabólico, como el realizado, con el objetivo de ensayarlos todos a la vez en el túnel de viento. Esto se debe a que las plantas solares no están compuestas de un único colector solar, sino que hay un gran número de ellos dispuestos uno seguido de otro formando varias filas, al buscarse recoger la mayor energía solar posible.

Por lo que un boceto de lo que podría ser dicho ensayo sería:

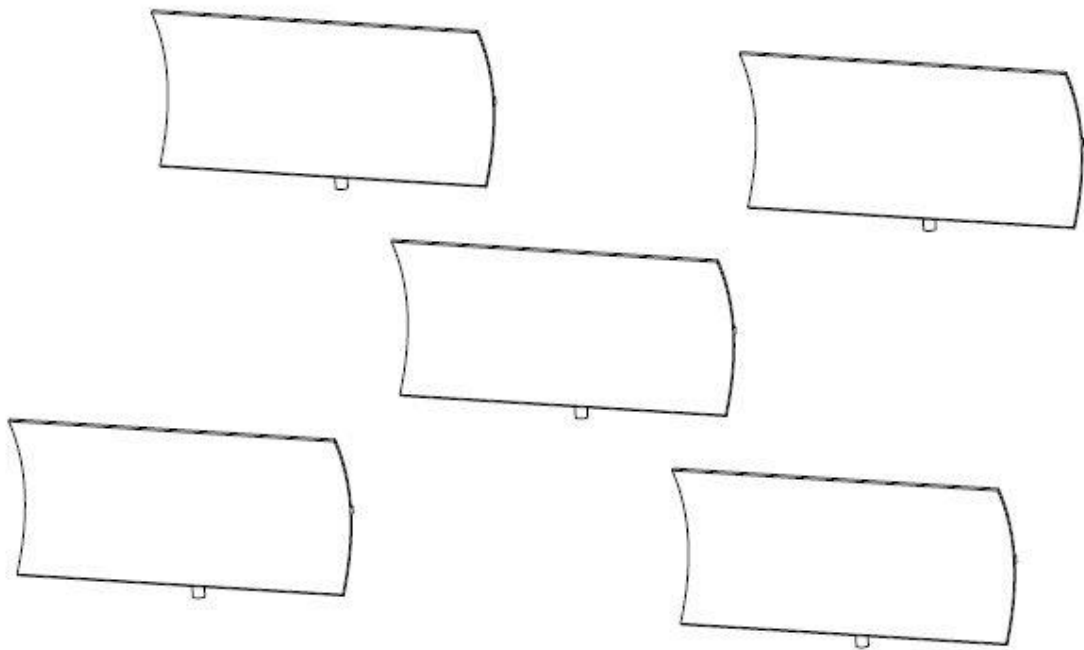


Figura 6.1. Boceto de la posición de varios modelos de colectores solares

Con esto se podría estudiar las fuerzas aerodinámicas del viento sobre uno de los colectores teniendo en cuenta la influencia que realizan el resto de colectores al encontrarse junto a éste, ya que modificará la incidencia del viento sobre éste.

En este caso el colector principal a estudiar sería el situado en el centro de la Figura 6.1, ya que se ve influido por el resto de colectores tanto por delante como por detrás y además no se encuentran alineados a éste, por lo que la incidencia del viento variará significativamente cuando llegue al colector central.

Para ello habría que buscar una solución para poder introducir dicho número de colectores en el túnel ya que la altura de éste se encuentra limitada a 1'8m, por lo que una posible solución podría ser aumentar la escala del modelo de colector solar para así reducir su tamaño y que puedan entrar todos.

En caso de que se tenga que aumentar demasiado la escala para que puedan entrar y queden modelos excesivamente pequeños como para poder realizar un estudio adecuado, una solución sería la de ensayarlos en un túnel de viento de mayores dimensiones adecuado para este tipo de estudios.





## BIBLIOGRAFÍA

---

Romero Alonso, Jesús. "Descripción de los colectores cilindro parabólicos" en Romero Alonso, Jesús *Análisis de prestaciones de las sales fundidas como fluido de transferencia de calor en una central termosolar de colectores cilindro parabólicos*. Proyecto Final de Carrera. P. 41-44

Serrano García, Daniel (2012). "Instalaciones de concentradores cilíndrico-parabólicos" en Serrano García, Daniel *Cálculo, diseño y análisis de una central termosolar de colectores cilíndrico-parabólicos operando con sales fundidas*. Proyecto Final de Carrera. P. 38-41

Paredes Velasco, Carmen (2012). "Documento 3: Anexos" en Paredes Velasco, Carmen *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicacione rurales en Paraguay*. Proyecto Final de Carrera. Anexo A.7

Pastoriza Redondo, Javier (2011). "Bases teóricas sobre tecnología termosolar para la evolución del proyecto" en Pastoriza Redondo, Javier *Planta de deshidratación termosolar de lixiviados mediante tecnología de colector cilindro-parabólico e implementación de programa de cálculo*. Proyecto Final de Carrera. P. 34-35

Industrial Automation, ATI (2010). *Six-Axis Force/Torque Sensor System*



## ANEXO A. CÓDIGOS DE MATLAB

Este programa es para la obtención de las gráficas del capítulo 4 y 5, para cada posición de la placa parabólica:

```
%Inicio.
clear all;
close all;

%Representación de datos túnel de viento.

%Lo primero que realizamos es la media de los valores iniciales para después restarlos a los obtenidos.
%Modificar para cada ángulo.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load pesocolectortunelapagadocuarentaycincoREVES.txt
%T=pesocolectortunelapagadoceroprime;
T=flipud(pesocolectortunelapagadocuarentaycincoREVES);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m=[0:0.5:360];%Puntos de la interpolación.
Nm=length(m);

s=54000;
tprima=[1:s]/50;
Vprima=20/60;
thetaprime=Vprima*tprima;
Fxprima=interp1(thetaprime,T(1:s,1),m);
Fyprima=interp1(thetaprime,T(1:s,2),m);
Fzprima=interp1(thetaprime,T(1:s,3),m);
Txprima=interp1(thetaprime,T(1:s,4),m);
Typrima=interp1(thetaprime,T(1:s,5),m);
Tzprima=interp1(thetaprime,T(1:s,6),m);
clear T;

%Modificar para cada nueva medición.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load cuarentaycinco.txt
P=cuarentaycinco;
%P=flipud(noventaREVES);%Se utiliza cuando uno de los documentos se encuentra con los valores al revés.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Nx=54000;%Valores de cargas y momentos hasta llegar hasta los 360°.
V=20/60;
t=[1:Nx]/50;
theta=V*t;
fx=interp1(theta,P(1:Nx,1),m);
fy=interp1(theta,P(1:Nx,2),m);
fz=interp1(theta,P(1:Nx,3),m);
tx=interp1(theta,P(1:Nx,4),m);
ty=interp1(theta,P(1:Nx,5),m);
tz=interp1(theta,P(1:Nx,6),m);
```

```

Fx=fx-Fxprima;
Fy=fy-Fyprima;
Fz=fz-Fzprima;
Tx=tx-Txprima;
Ty=ty-Typrima;
Tz=tz-Tzprima;

```

%Cálculo del coeficiente de resistencia y de sustentación.

```

densidad=1.1424;%kg/m3
Uinf=[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];%m/s

```

% Valor de la proporción del área frontal del colector entre  
% los distintos valores de beta y el obtenido para theta=0 y beta=0.

X=180617.125;% Área frontal para theta=0 y beta=0.

```

beta=45;
if beta==0
    x=180617.125;
end
if beta>0 && beta<=45
    x=180617.125-1571.331*beta;
end
if beta>45 && beta<=50
    x=180702.813-1573.235*beta;
end
if beta>50 && beta<=90
    x=159327-1145.737*beta;
end

```

x\_X=x/X;% Proporción.

% Bucle para cada valor de theta.

```

for j=1:Nm
    D(j)=-((Fx(j)*cos((35+m(j))*pi/180)+Fy(j)*cos((125+m(j))*pi/180));% Resistencia.
    L(j)=Fz(j);% Sustentación.
    %Cálculo del área frontal para distintos intervalos (mm2).
    if m(j)==0
        Af=180617.125*x_X;
    end
    if m(j)>0 && m(j)<90
        Afprima=1.3151*m(j)^2-2007.627*m(j)+180617.125;
        Af=x_X*Afprima+(1-x_X)*Afprima*m(j)/90;
    end
    if m(j)==90
        Af=10583.013;
    end
    if m(j)>90 && m(j)<180
        Afprima=-1.085*m(j)^2+2182.19*m(j)-177026.363;
        Af=Afprima+(x_X-1)*Afprima*(m(j)-90)/90;
    end
    if m(j)==180
        Af=180617.125*x_X;
    end
end

```

```

end
if m(j)>180 && m(j)<270
    Afprima=1.3151*m(j)^2-2481.036*m(j)+584599.225;
    Af=x_X*Afprima+(1-x_X)*Afprima*(m(j)-180)/90;
end
if m(j)==270
    Af=10583.013;
end
if m(j)>270 && m(j)<360
    Afprima=1.3161*m(j)^2+1060.135*m(j)-371595.91;
    Af=Afprima+(x_X-1)*Afprima*(m(j)-270)/90;
end
if m(j)==360
    Af=180617.125*x_X;
end
CD(j)=D(j)/(0.5*densidad*Uinf(10)^2*Af*10^-6);%Por 10^-6 para pasar a m2.
CL(j)=L(j)/(0.5*densidad*Uinf(10)^2*Af*10^-6);%Por 10^-6 para pasar a m2.
suma_resul(j)=sqrt(Fx(j)^2+Fy(j)^2+Fz(j)^2)/(0.5*densidad*Uinf(10)^2*Af*10^-6);%El absolutlo en
el CL se utiliza para obtener el positivo ya que se busca la total sea negativa o positiva.
end

param=15;

ind=find(suma_resul==suma_resul);
thetat=m(ind);
y=suma_resul(ind);
suma_resuli=smooth(thetat,y,param);

%Representación completa en una misma gráfica.

figure(1)
hold on
plot(m,CL)
plot(m,CD,'r')
hold off
grid on
legend('CL','CD')
title('Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 90°)
xlabel('\theta (°)')
axis tight

figure(2)
hold on
plot(m,Tx,'y')
plot(m,Ty,'r')
plot(m,Tz)
hold off
grid on
legend('Tx','Ty','Tz')
title('Momento en los tres ejes para placa parabólica a 5°)
xlabel('\theta (°)')
ylabel('Fuerza (Nm)')
axis tight

%Esta gráfica se utiliza para poder ver cuál es la dirección del viento óptima.

```

```

figure(3)
plot(thetat,suma_resuli,'g')
grid on
title('Coeficiente adimensional de la resultante de las fuerzas para placa parabólica a 45°')
xlabel('\theta (°)')
ylabel('Coeficiente adimensional de la fuerza resultante')
axis tight

```

El siguiente programa realiza lo mismo que el anterior, pero permite representar las curvas que comparan los distintos valores obtenidos para cada posición de la placa en una misma gráfica, además de calcular la eficiencia:

```

%Inicio.
clear all;
clc;

%Representación de datos túnel de viento.

%Lo primero que realizamos es la media de los valores iniciales para después restarlos a los obtenidos.
%Modificar para cada ángulo.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load pesocolectortunelapagadonoventa.txt
T=pesocolectortunelapagadonoventa;
%T=flipud(pesocolectortunelapagadocuarentaycincoREVES);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m=[0:0.5:360];%Puntos de la interpolación.
Nm=length(m);

s=54000;
tprima=[1:s]/50;
Vprima=20/60;
thetaprima=Vprima*tprima;
Fxprima=interp1(thetaprima,T(1:s,1),m);
Fyprima=interp1(thetaprima,T(1:s,2),m);
Fzprima=interp1(thetaprima,T(1:s,3),m);
Txprima=interp1(thetaprima,T(1:s,4),m);
Typrima=interp1(thetaprima,T(1:s,5),m);
Tzprima=interp1(thetaprima,T(1:s,6),m);
clear T;

%Modificar para cada nueva medición.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load noventaREVES.txt
%P=cuarentaycinco;
P=flipud(noventaREVES);%Se utiliza cuando uno de los documentos se encuentra con los valores al revés.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Nx=54000;%Valores de cargas y momentos hasta llegar hasta los 360°.
V=20/60;
t=[1:Nx]/50;
theta=V*t;

```

```

fx=interp1(theta,P(1:Nx,1),m);
fy=interp1(theta,P(1:Nx,2),m);
fz=interp1(theta,P(1:Nx,3),m);
tx=interp1(theta,P(1:Nx,4),m);
ty=interp1(theta,P(1:Nx,5),m);
tz=interp1(theta,P(1:Nx,6),m);

```

```

Fx=fx-Fxprima;
Fy=fy-Fyprima;
Fz=fz-Fzprima;
Tx=tx-Txprima;
Ty=ty-Typrima;
Tz=tz-Tzprima;

```

**%Cálculo del coeficiente de resistencia y de sustentación.**

```

densidad=1.1424;%kg/m3

```

```

Uinf=[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];%m/s

```

**% Valor de la proporción del área frontal del colector entre  
% los distintos valores de beta y el obtenido para theta=0 y beta=0.**

```

X=180617.125;%Área frontal para theta=0 y beta=0.

```

```

beta=90;

```

```

if beta==0

```

```

    x=180617.125;

```

```

end

```

```

if beta>0 && beta<=45

```

```

    x=180617.125-1571.331*beta;

```

```

end

```

```

if beta>45 && beta<=50

```

```

    x=180702.813-1573.235*beta;

```

```

end

```

```

if beta>50 && beta<=90

```

```

    x=159327-1145.737*beta;

```

```

end

```

```

x_X=x/X;%Proporción.

```

**%Bucle para cada valor de theta.**

```

for j=1:Nm

```

```

    D(j)=-((Fx(j)*cos((35+m(j))*pi/180)+Fy(j)*cos((125+m(j))*pi/180));%Resistencia.

```

```

    L(j)=Fz(j);%Sustentación.

```

**%Cálculo del área frontal para distintos intervalos (mm2).**

```

    if m(j)==0

```

```

        Af=180617.125*x_X;

```

```

    end

```

```

    if m(j)>0 && m(j)<90

```

```

        Afprima=1.3151*m(j)^2-2007.627*m(j)+180617.125;

```

```

        Af=x_X*Afprima+(1-x_X)*Afprima*m(j)/90;

```

```

    end

```

```

    if m(j)==90

```

```

        Af=10583.013;

```

```

    end

```

```

    if m(j)>90 && m(j)<180

```

```

    Afprima=-1.085*m(j)^2+2182.19*m(j)-177026.363;
    Af=Afprima+(x_X-1)*Afprima*(m(j)-90)/90;
end
if m(j)==180
    Af=180617.125*x_X;
end
if m(j)>180 && m(j)<270
    Afprima=1.3151*m(j)^2-2481.036*m(j)+584599.225;
    Af=x_X*Afprima+(1-x_X)*Afprima*(m(j)-180)/90;
end
if m(j)==270
    Af=10583.013;
end
if m(j)>270 && m(j)<360
    Afprima=1.3161*m(j)^2+1060.135*m(j)-371595.91;
    Af=Afprima+(x_X-1)*Afprima*(m(j)-270)/90;
end
if m(j)==360
    Af=180617.125*x_X;
end
CD(j)=D(j)/(0.5*densidad*Uinf(19)^2*Af*10^-6);%Por 10^-6 para pasar a m2.
CL(j)=L(j)/(0.5*densidad*Uinf(19)^2*Af*10^-6);%Por 10^-6 para pasar a m2.
end

for i=1:Nm
    eficiencia(i)=CL(i)/CD(i);
end

%Representación completa en una misma gráfica.

param=15;

ind=find(CL==CL);
thetat=m(ind);
y=CL(ind);
CLi=smooth(thetat,y,param);

ind=find(CD==CD);
thetar=m(ind);
y=CD(ind);
CDi=smooth(thetar,y,param);

ind=find(Tx==Tx);
thetal=m(ind);
y=Tx(ind);
Txi=smooth(thetal,y,param);

ind=find(Ty==Ty);
thetad=m(ind);
y=Ty(ind);
Tyi=smooth(thetad,y,param);

ind=find(Tz==Tz);
thetan=m(ind);
y=Tz(ind);

```



```

Tzi=smooth(thetan,y,param);

ind=find(eficiencia==eficiencia);
thetat=m(ind);
y=eficiencia(ind);
eficienciai=smooth(thetat,y,param);

figure(1)
hold on
plot(thetat,CLi,'b')

figure(2)
hold on
plot(thetat,CDi,'b')

figure(3)
hold on
plot(thetat,Txi,'b')

figure(4)
hold on
plot(thetat,Tyi,'b')

figure(5)
hold on
plot(thetan,Tzi,'b')

figure (6)
hold on
plot(thetat,eficienciai,'r')

```

Programa para calcular la eficiencia aerodinámica en función de “ $\beta$ ”:

```

%Representación de los coeficientes de sustentación y resistencia en
%función de beta.
beta=[0:5:90];
Nb=length(beta);
% Valores obtenidos del anterior programa.
CL_48=[8.5143 9.1452 9.4166 9.9239 9.1667 10.0181 9.8103 8.1405 6.9762 6.8963 6.8641 6.7156
7.2179 7.7054 7.3325 6.954 7.5266 7.9271 8.1378];
CL_163=[0.0613 0.2089 0.2252 0.16 -0.0676 -0.1553 -0.136 0.024 0.4743 -0.0323 -0.158 -0.2794 0.0122
0.1713 -0.907 0.1797 0.2141 -2.096 -2.3756];
CL_293=[-1.9486 -3.0663 -4.2312 -5.0057 -5.8367 -7.0854 -7.3761 -8.5421 -9.1845 -9.4719 -9.4592 -
8.2898 -8.3269 -7.7202 -6.596 -6.5655 -5.5357 -6.1048 -5.2516];
CD_48=[2.2441 1.9673 2.2639 2.1773 2.4895 2.4564 2.2533 1.9624 2.1839 1.7418 1.6071 1.3 1.2583
1.2797 1.2245 1.0201 1.1406 1.0598 1.1371];
CD_163=[1.8615 1.8574 1.9081 2.0134 1.8347 1.7803 1.6572 1.6545 1.5154 1.5745 1.7004 1.4924
1.4499 1.2952 1.2224 1.4806 1.4707 1.2523 1.4577];
CD_293=[1.796 2.1019 1.8033 1.7787 1.7246 1.7123 1.5189 1.6625 1.339 1.5793 1.2401 1.1416 1.1807
1.3083 0.9678 0.8324 0.9197 0.8754 0.8685];

for i=1:Nb
    eficiencia_48(i)=CL_48(i)/CD_48(i);
    eficiencia_163(i)=CL_163(i)/CD_163(i);
    eficiencia_293(i)=CL_293(i)/CD_293(i);

```

```
end
```

```
figure(1)
hold on
plot(beta,CL_48,'m')
plot(beta,CL_163,'r')
plot(beta,CL_293,'b')
```

```
figure(2)
hold on
plot(beta,CD_48,'m')
plot(beta,CD_163,'r')
plot(beta,CD_293,'b')
```

```
figure(3)
hold on
plot(beta,eficiencia_48,'g')
plot(beta,eficiencia_163,'r')
plot(beta,eficiencia_293,'b')
```

Y, este ultimo programa, permite la representación del área frontal en función de la dirección del viento para la posición de la placa  $\beta=0^\circ$ . Además, también representa la velocidad del viento sobre el colector en función de la posición de la placa:

```
%Inicio.
```

```
theta=[0:1:360];
Nm=length(theta);
for j=1:Nm
    %Cálculo del área frontal para distintos intervalos (mm2).
    if theta(j)>=0 && theta(j)<60
        Af(j)=180617.125-1948.44*theta(j);
    end
    if theta(j)>=60 && theta(j)<85
        Af(j)=174123.475-1840.21*theta(j);
    end
    if theta(j)>=85 && theta(j)<90
        Af(j)=138782.813-1424.44*theta(j);
    end
    if theta(j)==90
        Af(j)=10583.013;
    end
    if theta(j)>90 && theta(j)<=95
        Af(j)=1424.44*theta(j)-117616.787;
    end
    if theta(j)>95 && theta(j)<=120
        Af(j)=1840.215*theta(j)-157115.173;
    end
    if theta(j)>120 && theta(j)<180
        Af(j)=1984.44*theta(j)-170102.475;
    end
    if theta(j)==180
        Af(j)=180617.125;
```

```
end
if theta(j)>180 && theta(j)<240
    Af(j)=531337.225-1948.44*theta(j);
end
if theta(j)>=240 && theta(j)<265
    Af(j)=505362.197-1840.215*theta(j);
end
if theta(j)>=265 && theta(j)<270
    Af(j)=395182.413-1424.44*theta(j);
end
if theta(j)==270
    Af(j)=10583.013;
end
if theta(j)>270 && theta(j)<=275
    Af(j)=1424.44*theta(j)-374016.387;
end
if theta(j)>275 && theta(j)<=300
    Af(j)=1840.21*theta(j)-488353.819;
end
if theta(j)>300 && theta(j)<360
    Af(j)=1948.44*theta(j)-520822.075;
end
if theta(j)==360
    Af(j)=180617.125;
end
end
figure(1)
plot(theta,Af)
```

%Representación de la velocidad en el túnel con respecto a la posición de  
%la placa.

```
beta=[0:5:90];%Posición de la placa parabólica. (°)
Uinf=[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];%m/s
```

```
figure(2)
plot(beta,Uinf)
```



## ANEXO B. GRÁFICAS $C_L$ Y $C_D$ PARA DISTINTAS POSICIONES DE LA PLACA PARABÓLICA

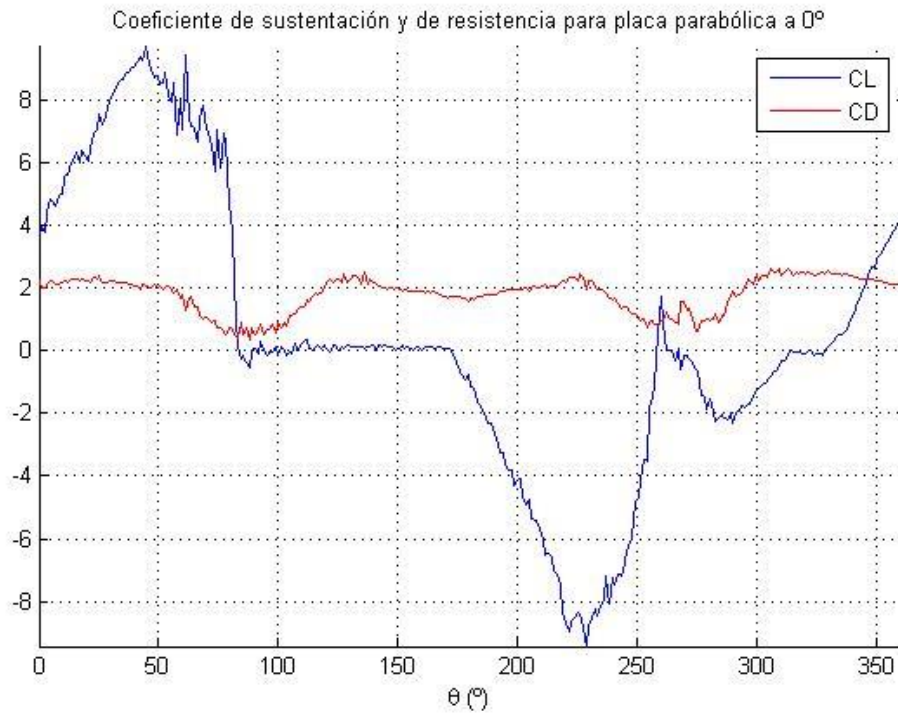


Figura B.1. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $0^\circ$

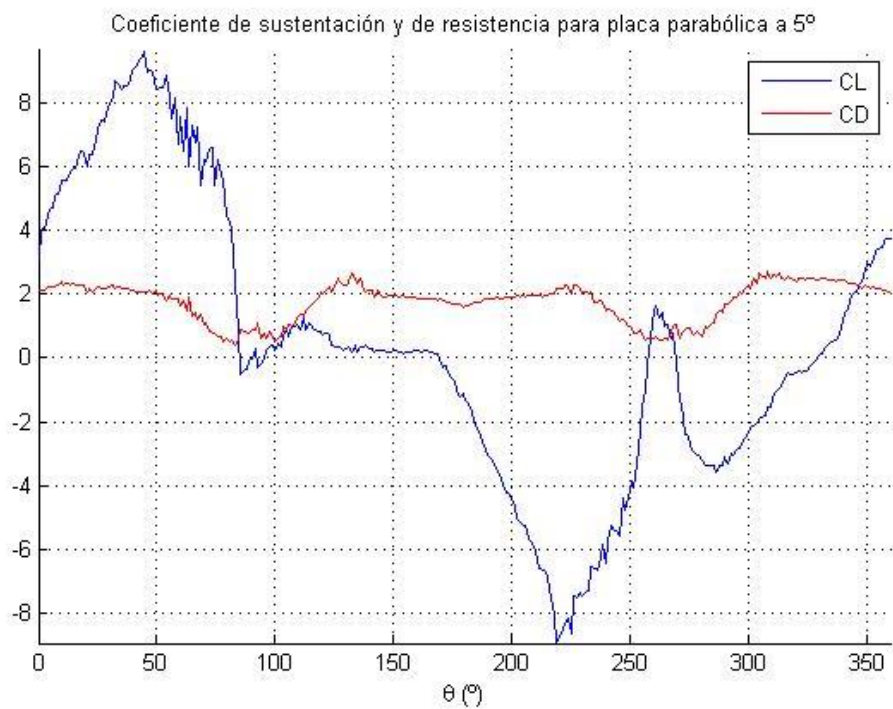
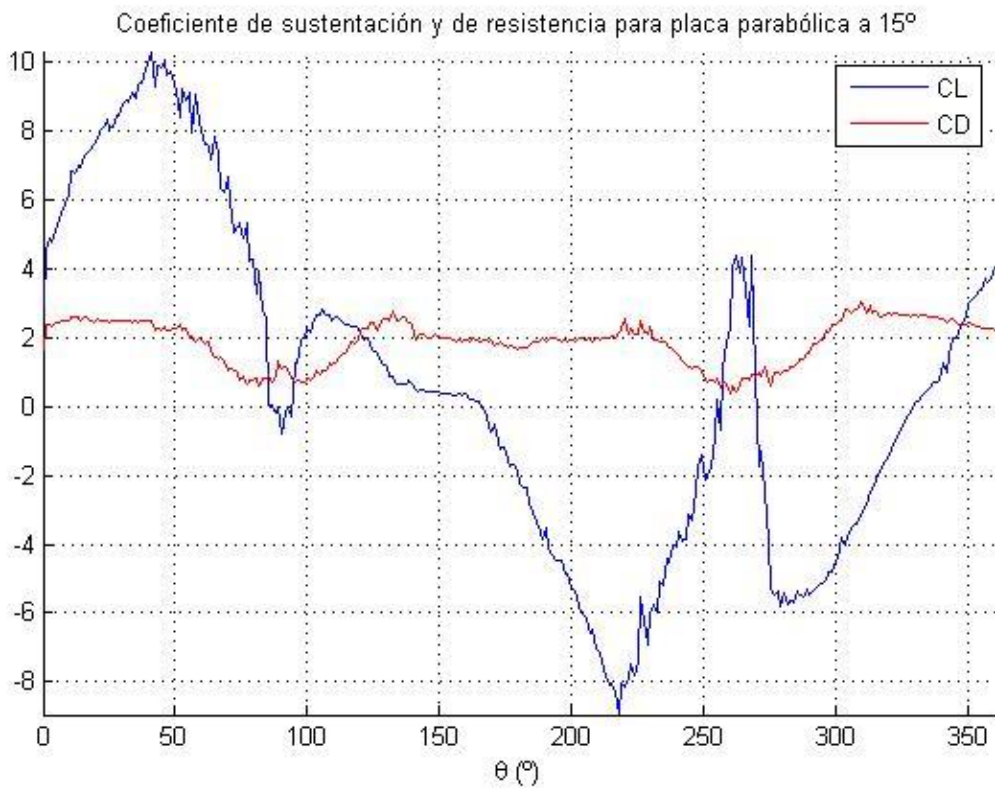


Figura B.2. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $5^\circ$

Figura B.3. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $10^\circ$ Figura B.4. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $15^\circ$

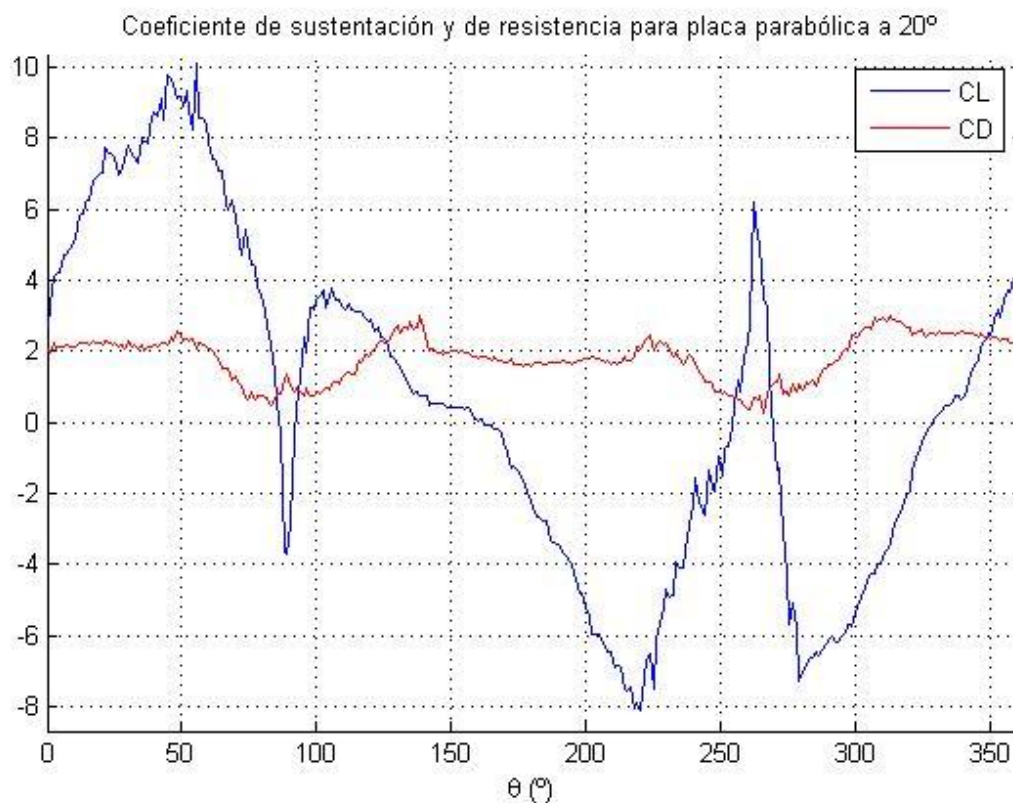


Figura B.5. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 20°

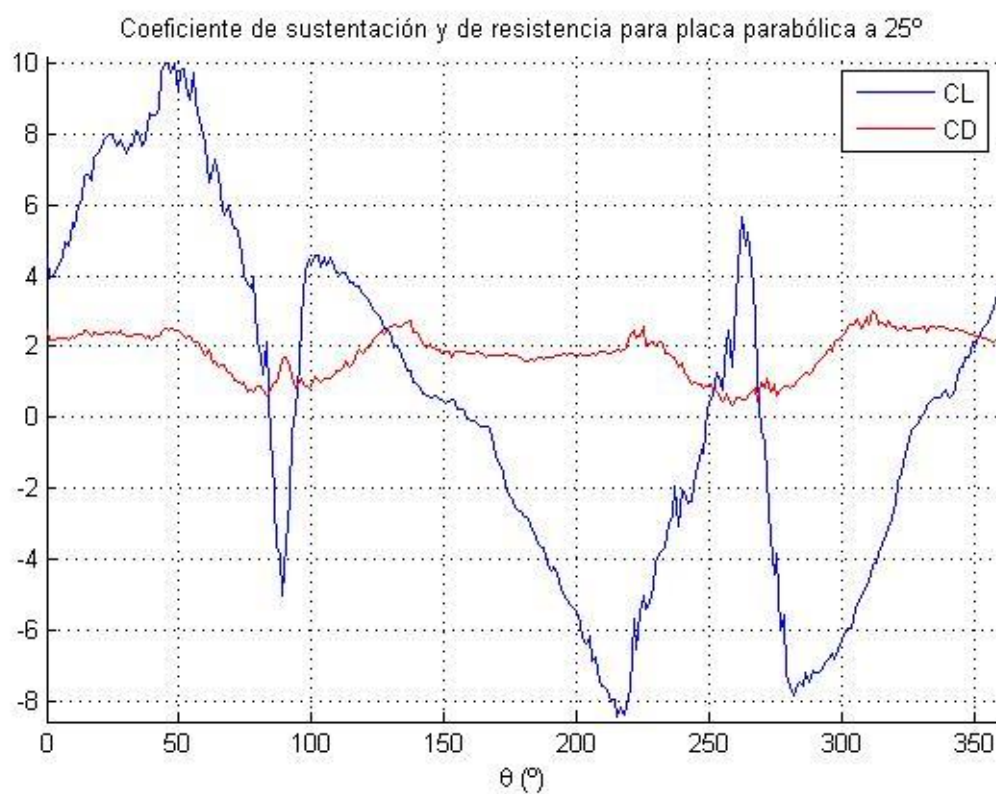
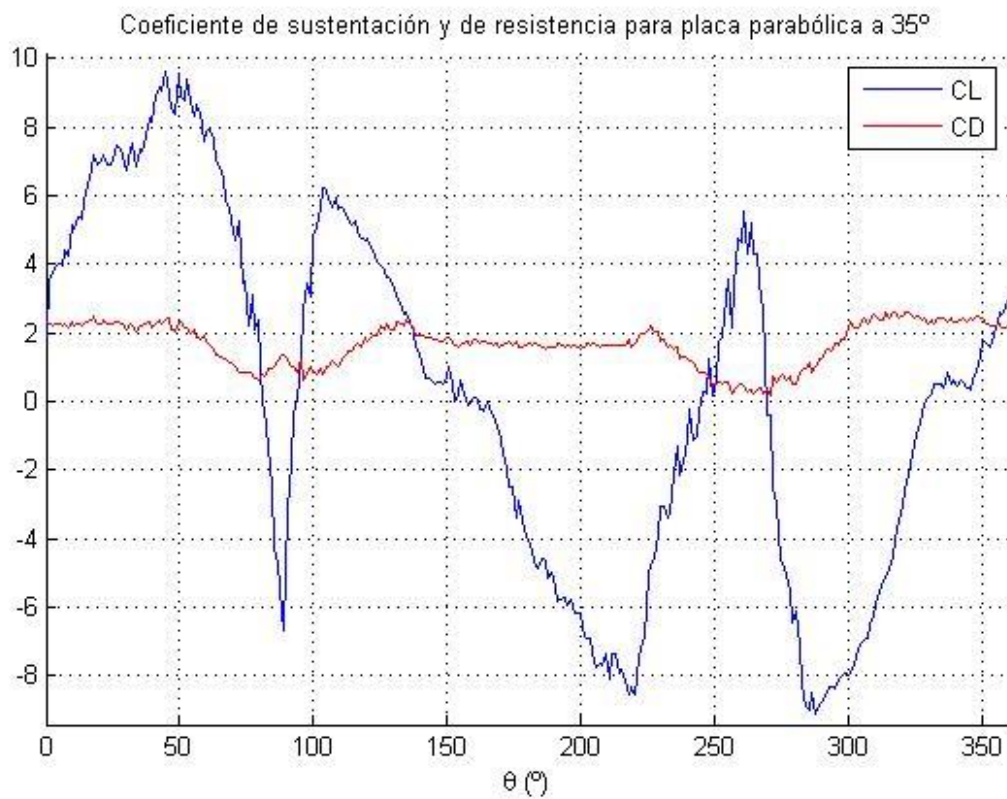


Figura B.6. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 25°

Figura B.7. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $30^\circ$ Figura B.8. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $35^\circ$



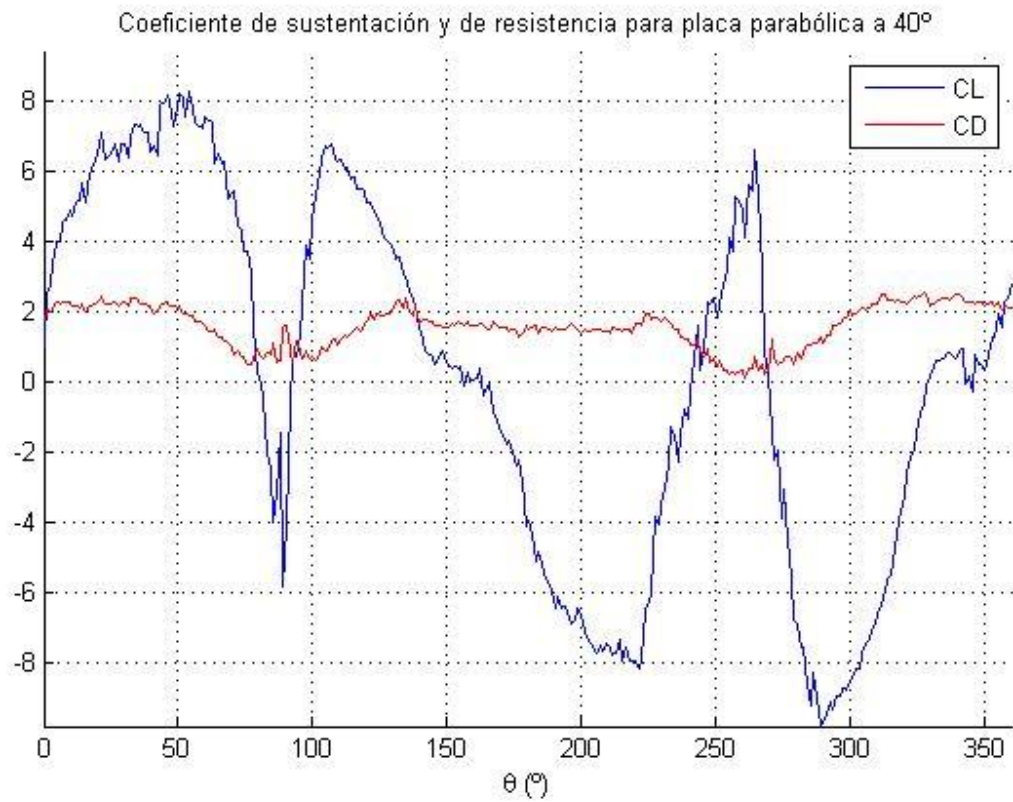


Figura B.9. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 40°

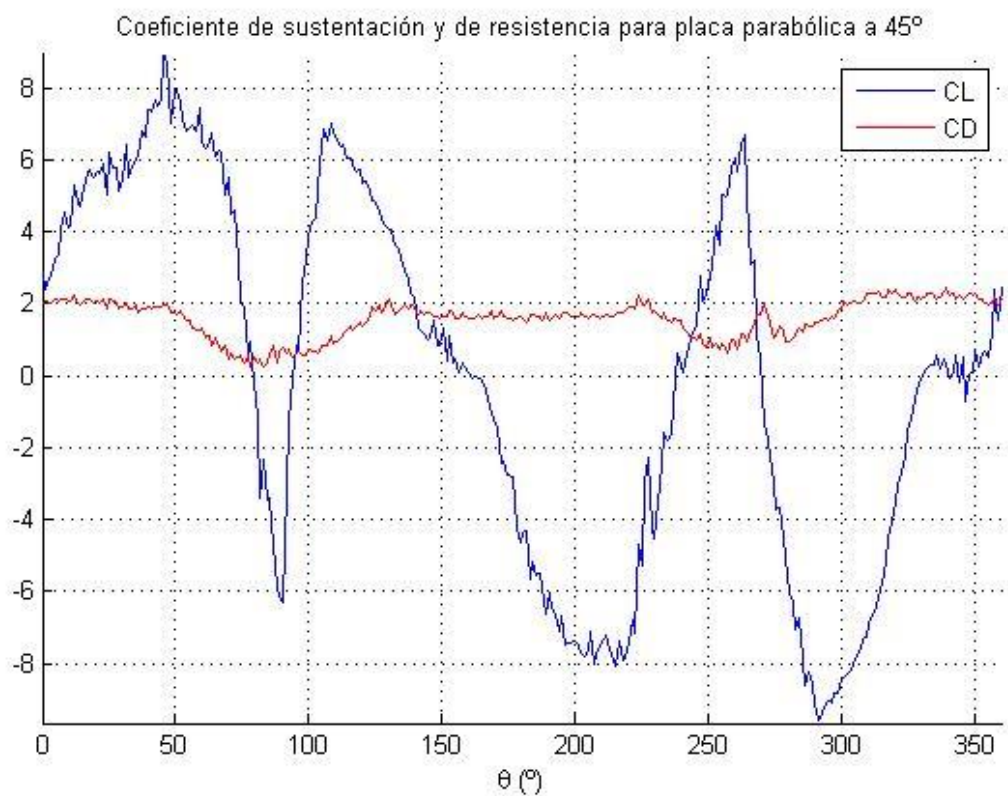
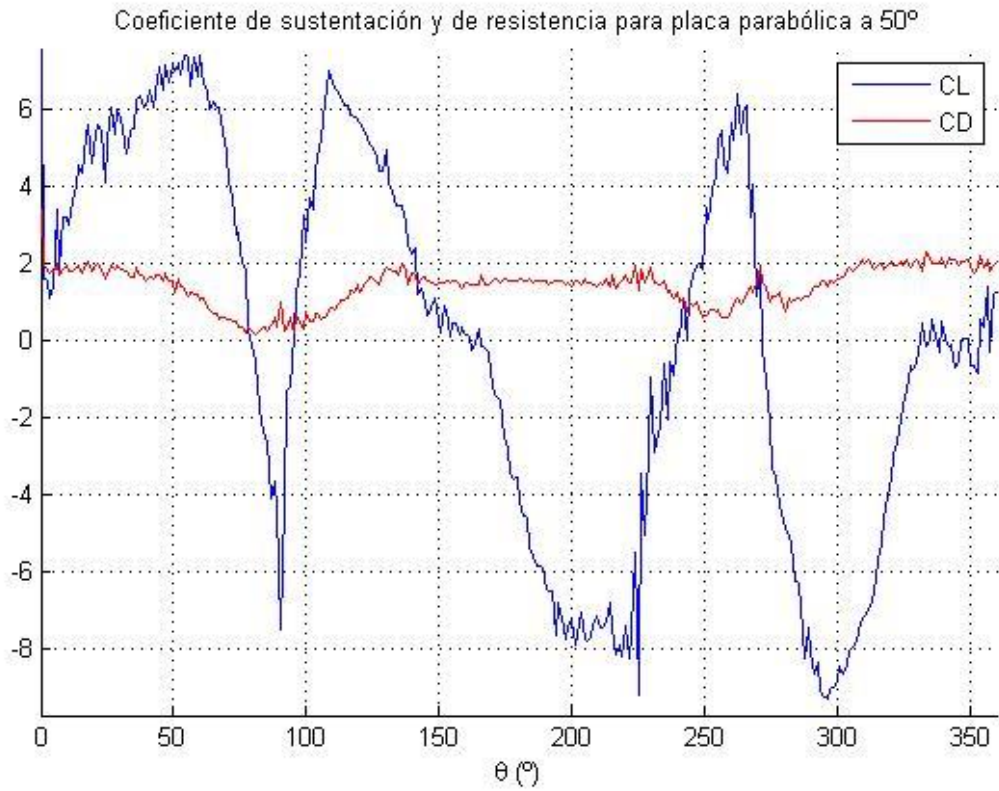
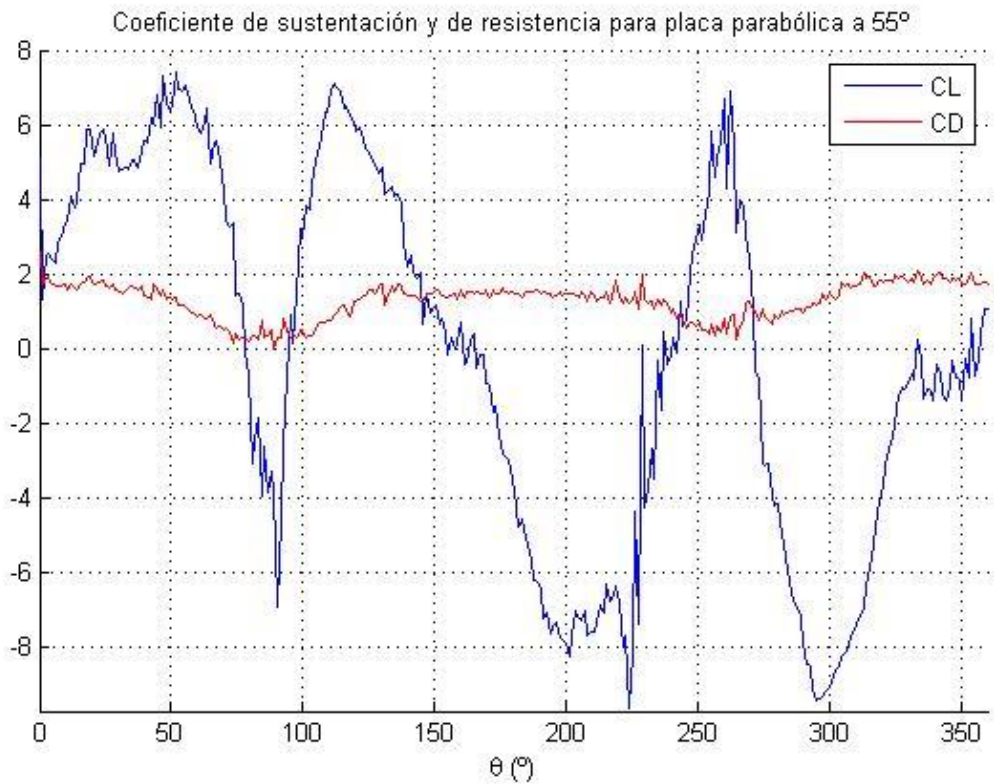
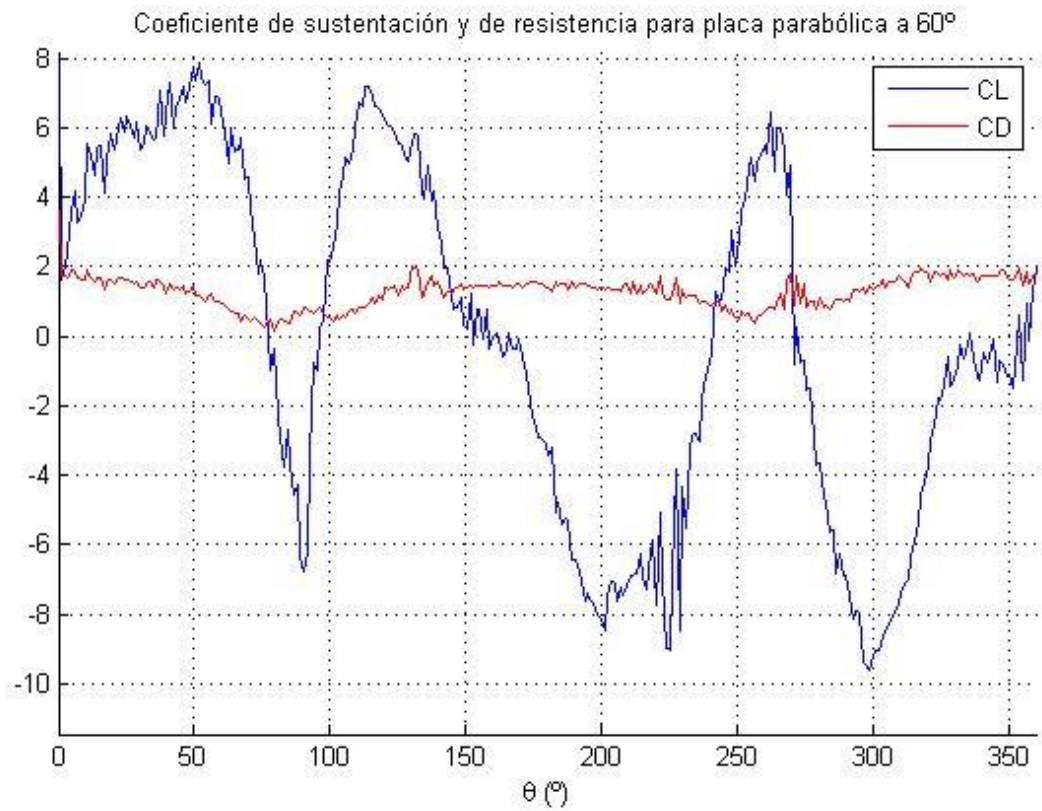
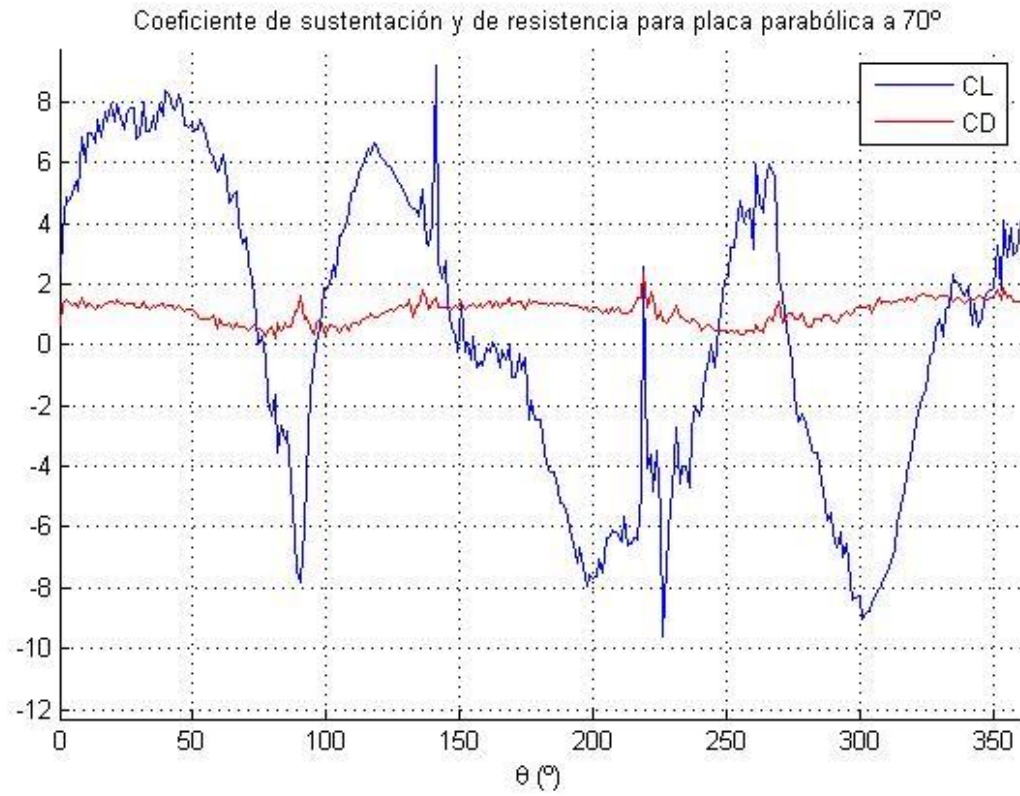
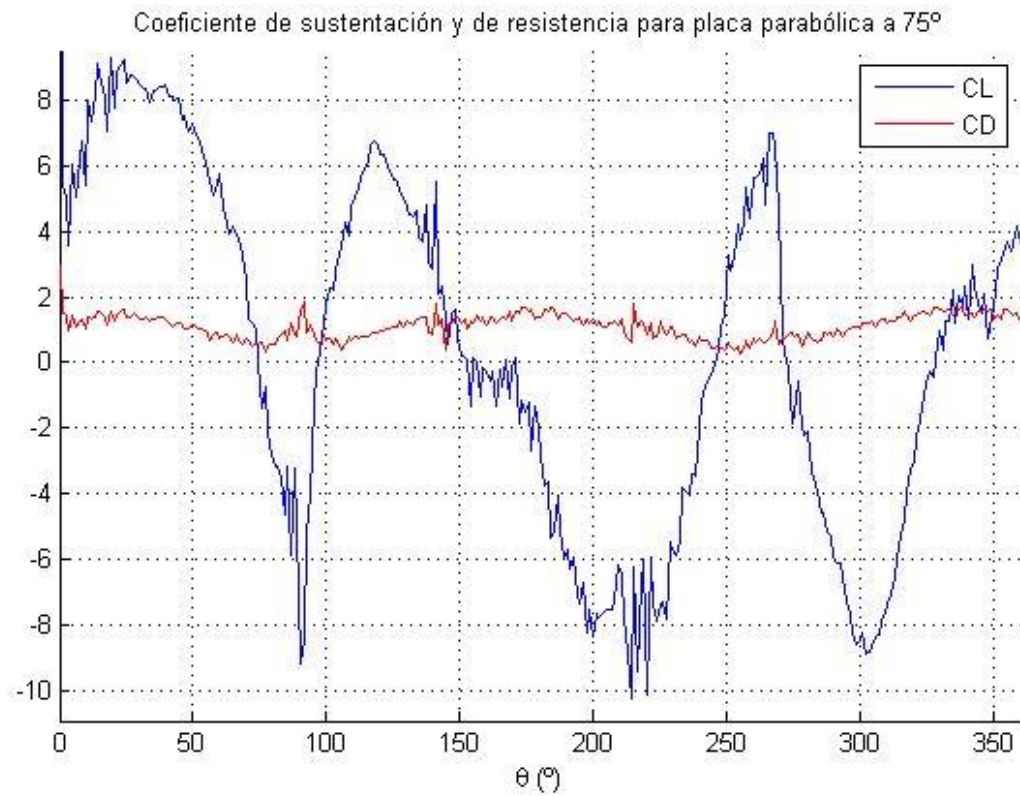


Figura B.10. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 45°

Figura B.11. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $50^\circ$ Figura B.12. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $55^\circ$

Figura B.13. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $60^\circ$ Figura B.14. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $65^\circ$

Figura B.15. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $70^\circ$ Figura B.16. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $75^\circ$

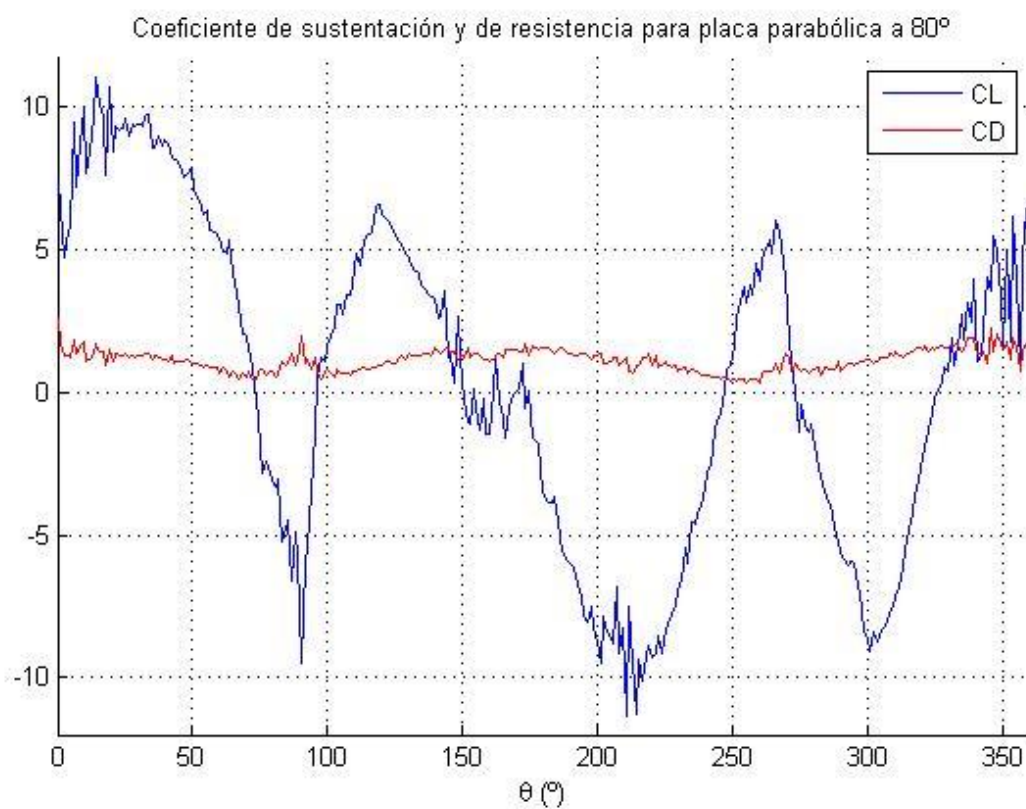


Figura B.17. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 80°

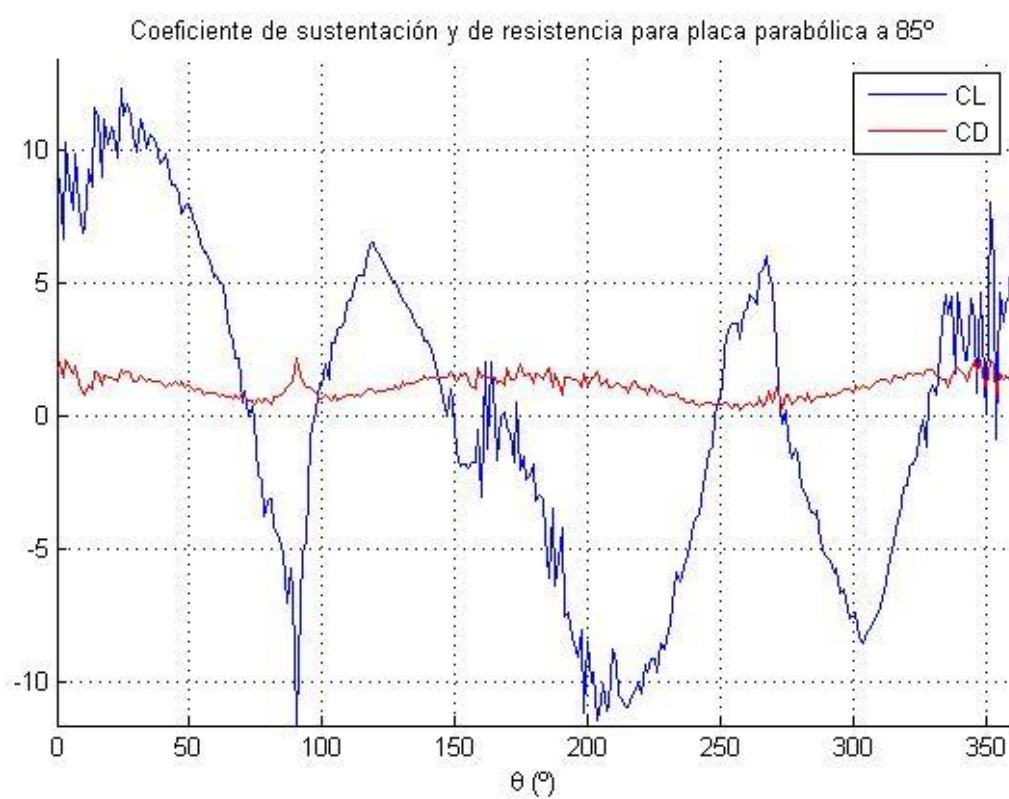
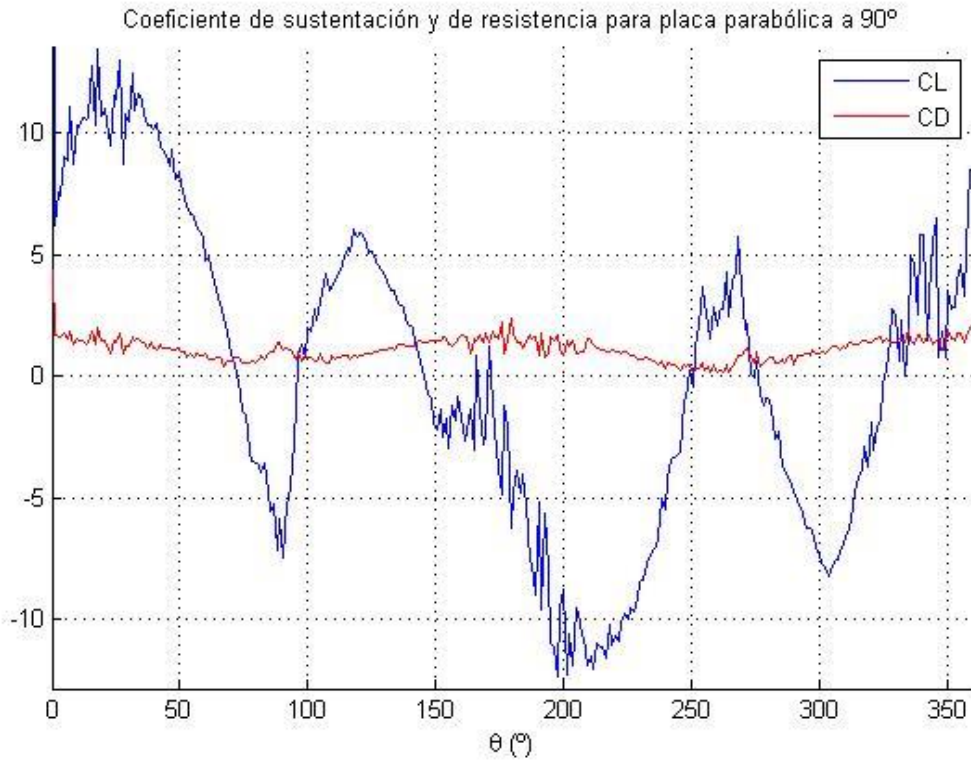


Figura B.18. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a 85°

Figura B.19. Coeficiente de sustentación y de resistencia para placa parabólica a  $90^\circ$

# ANEXO C. GRÁFICAS DE MOMENTOS PARA DISTINTAS POSICIONES DE LA PLACA PARABÓLICA

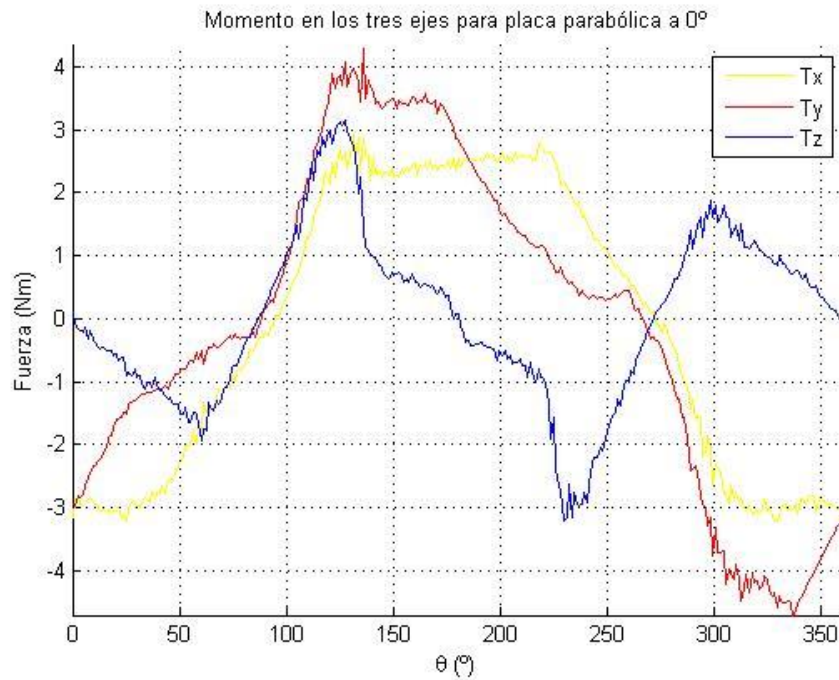


Figura C.1. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 0°

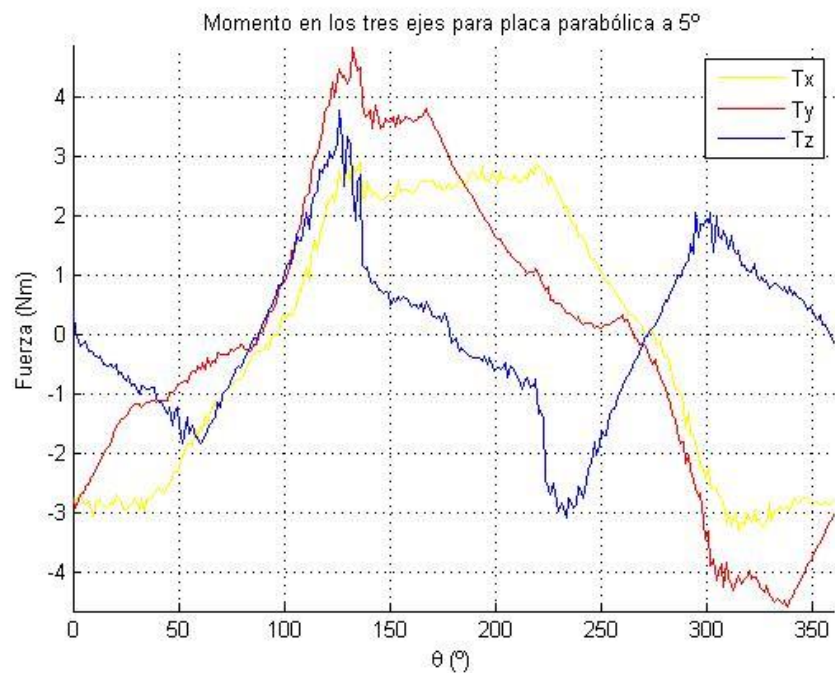


Figura C.2. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 5°

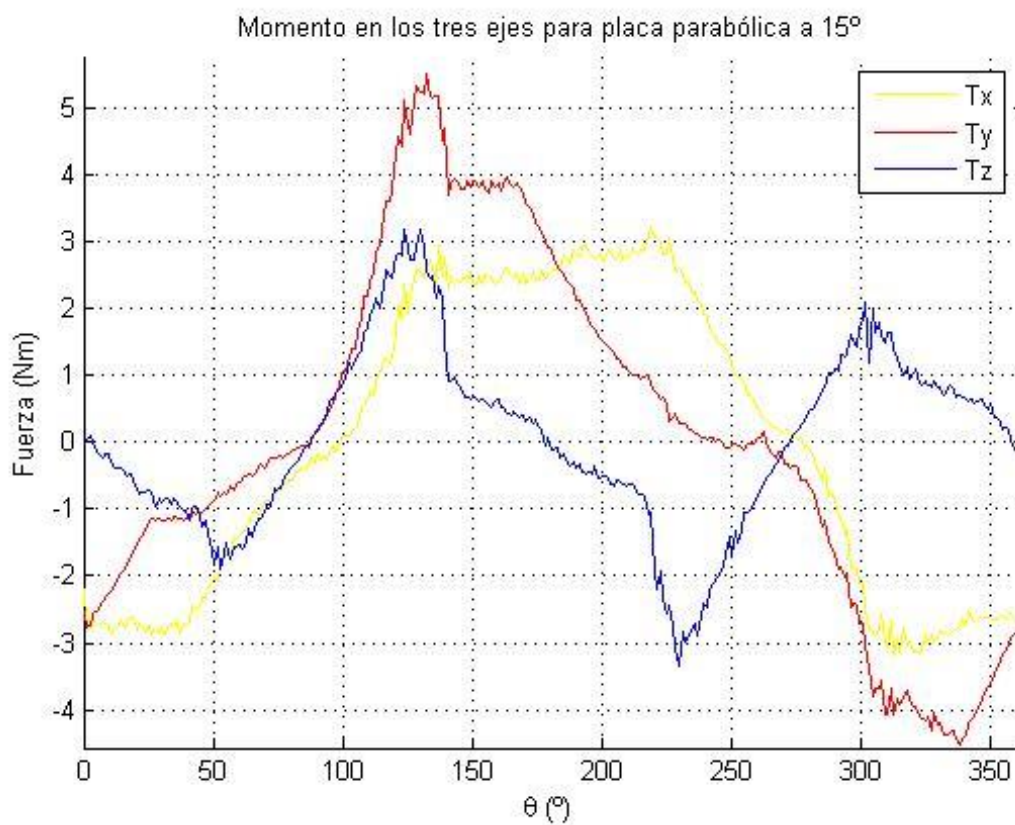
Figura C.3. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $10^\circ$ Figura C.4. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $15^\circ$





Figura C.5. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 20°

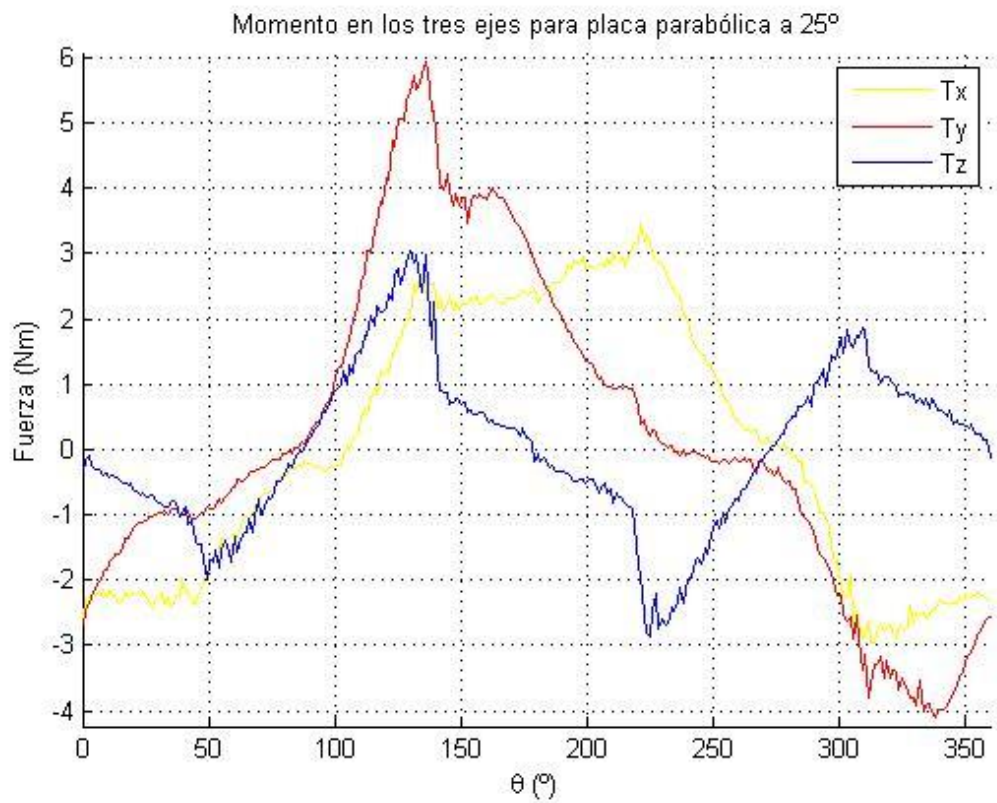


Figura C.6. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 25°

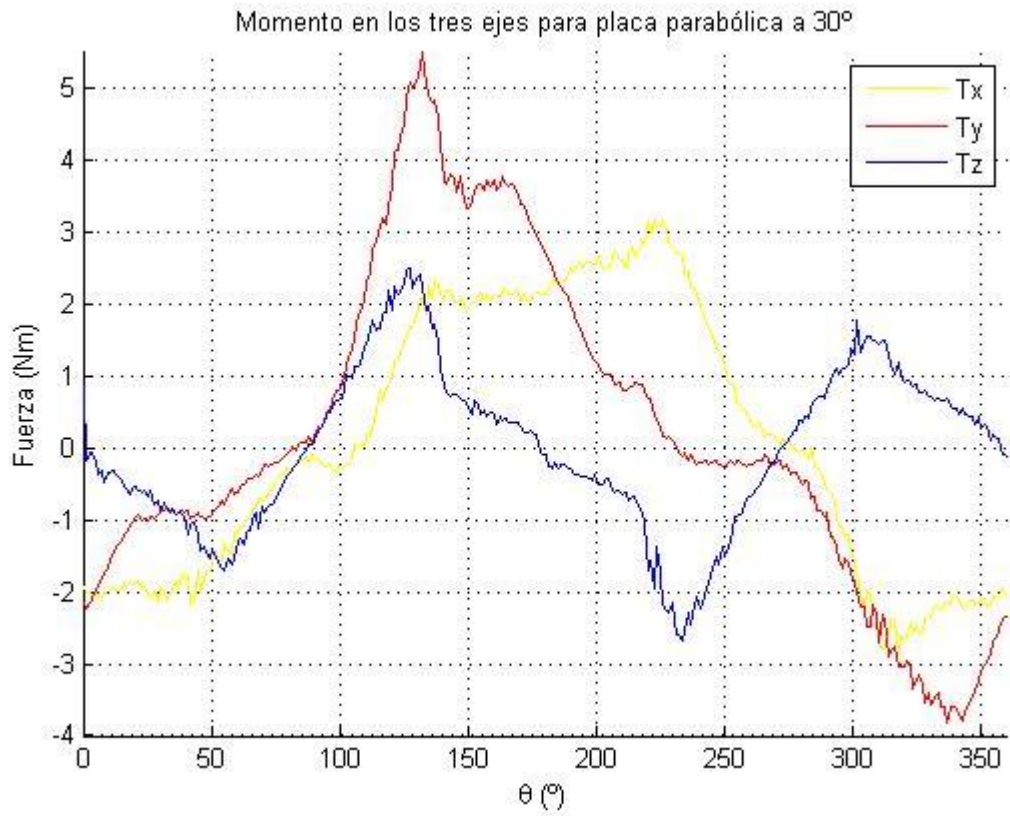


Figura C.7. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 30°

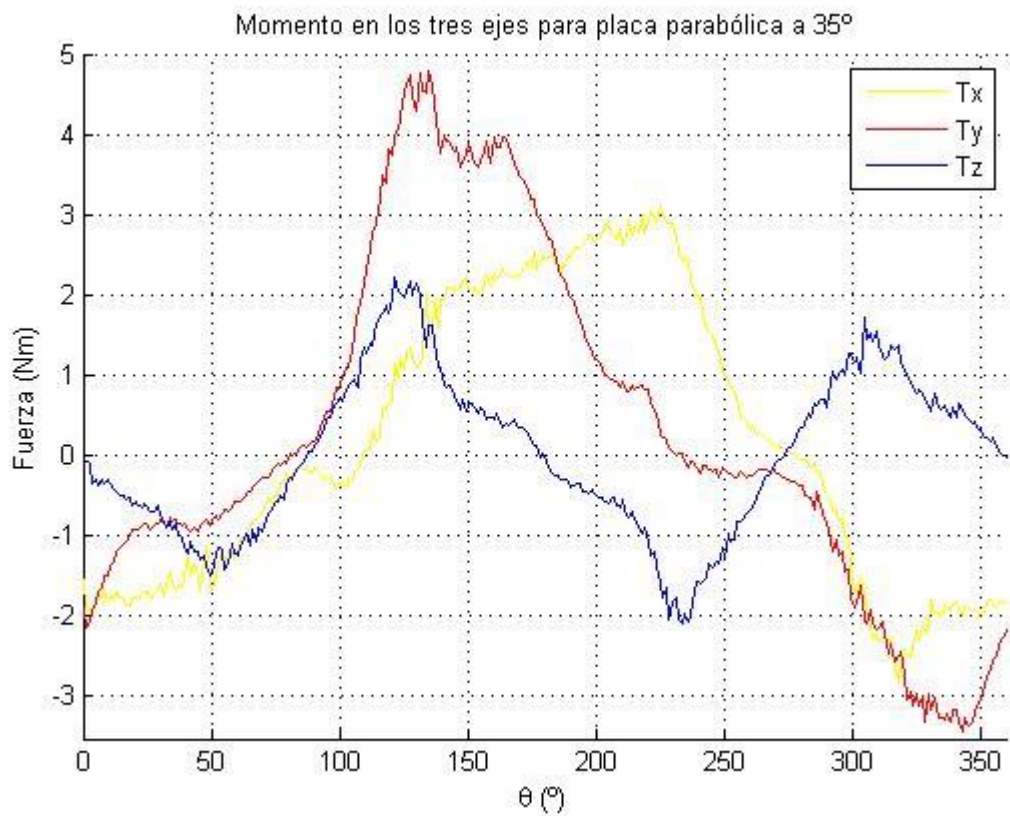


Figura C.8. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 35°

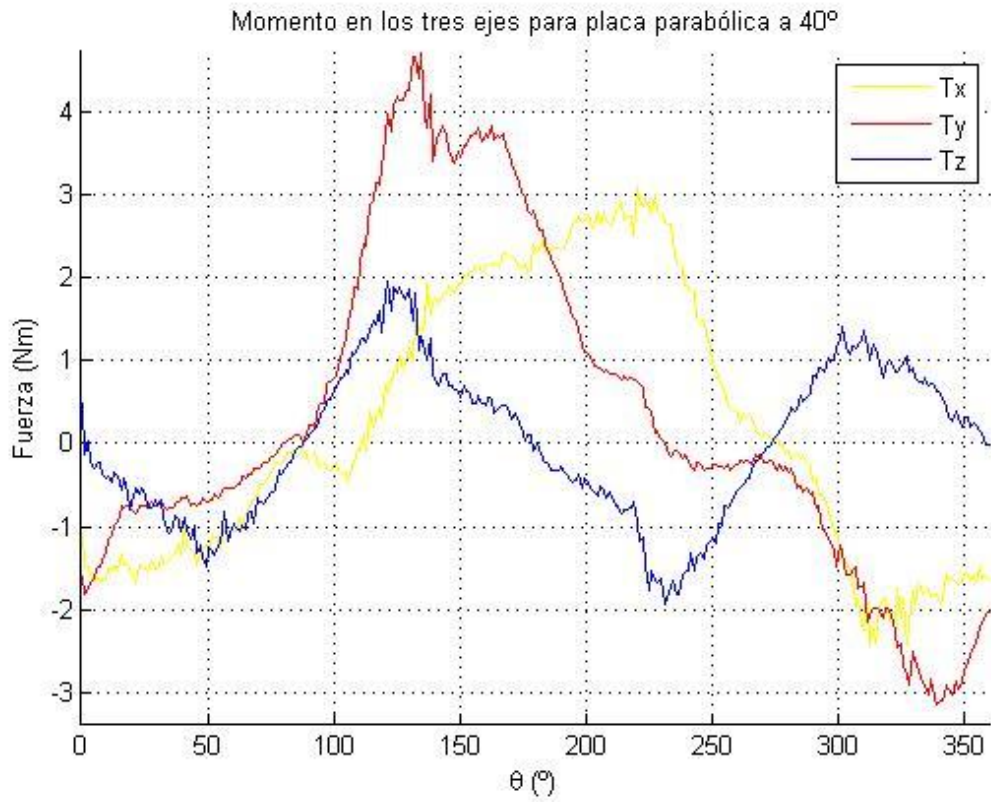


Figura C.9. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 40°



Figura C.10. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 45°

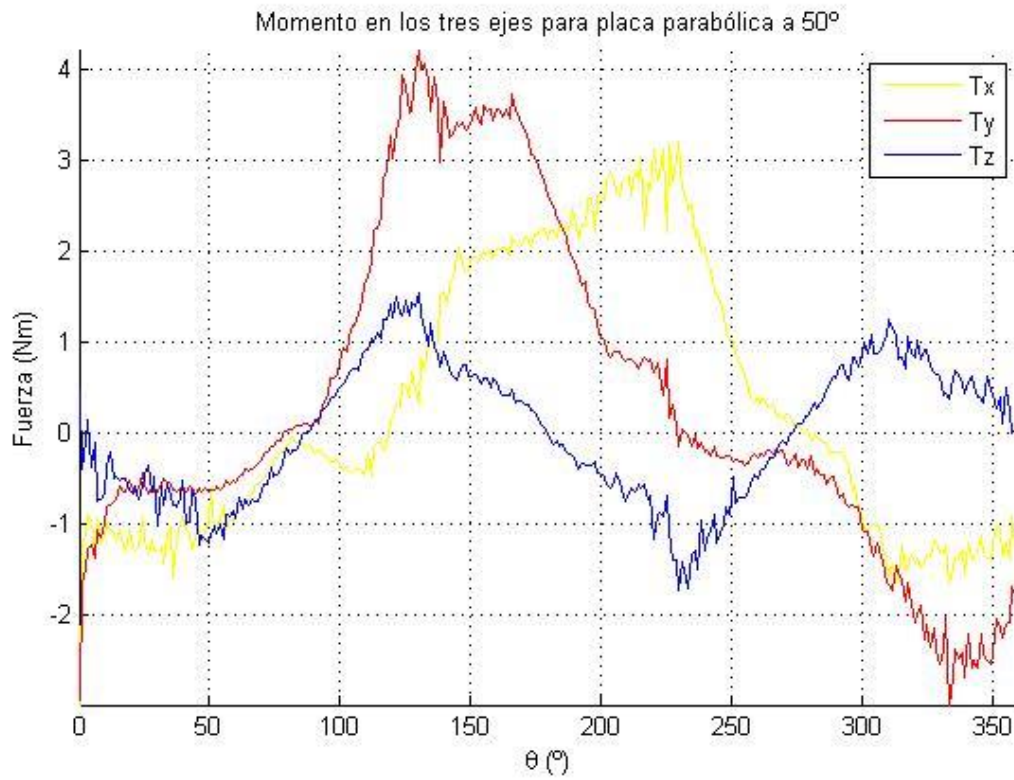


Figura C.11. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 50°

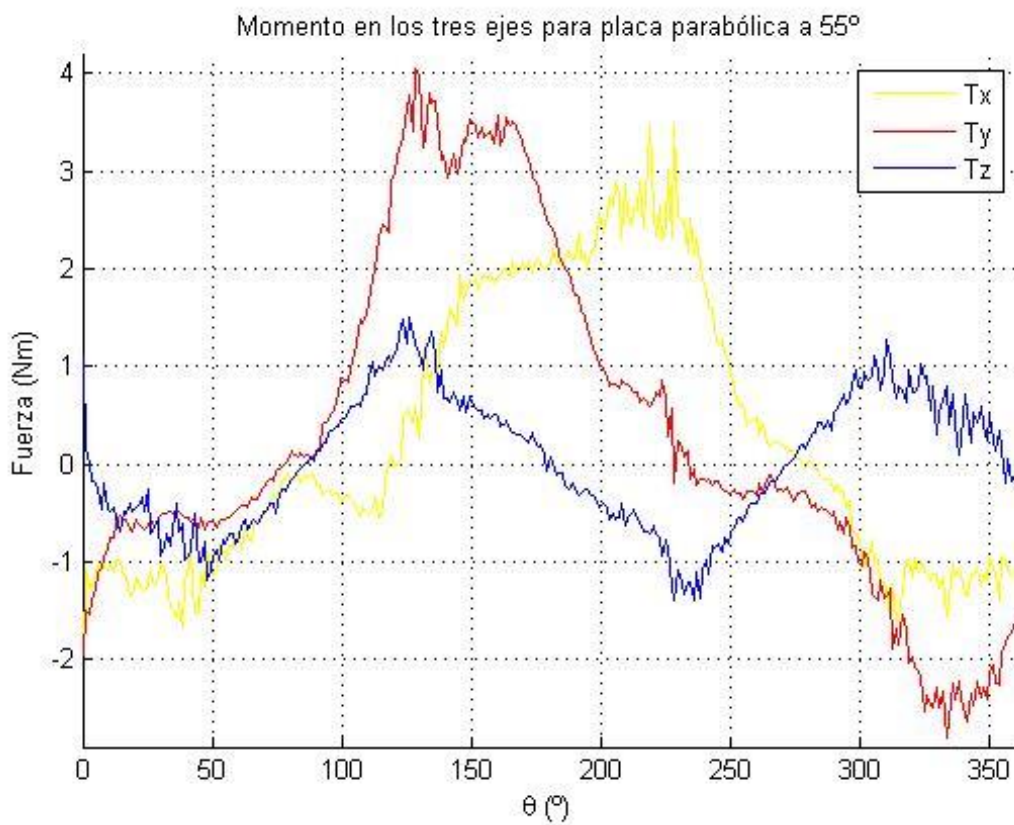


Figura C.12. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 55°

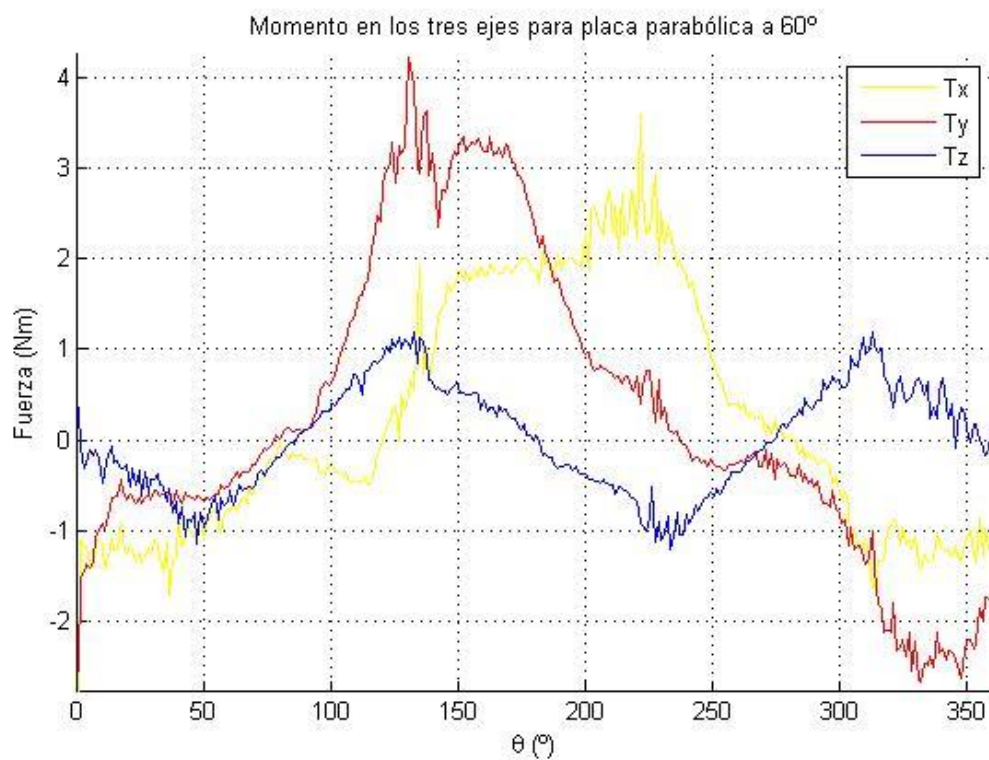


Figura C.13. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 60°

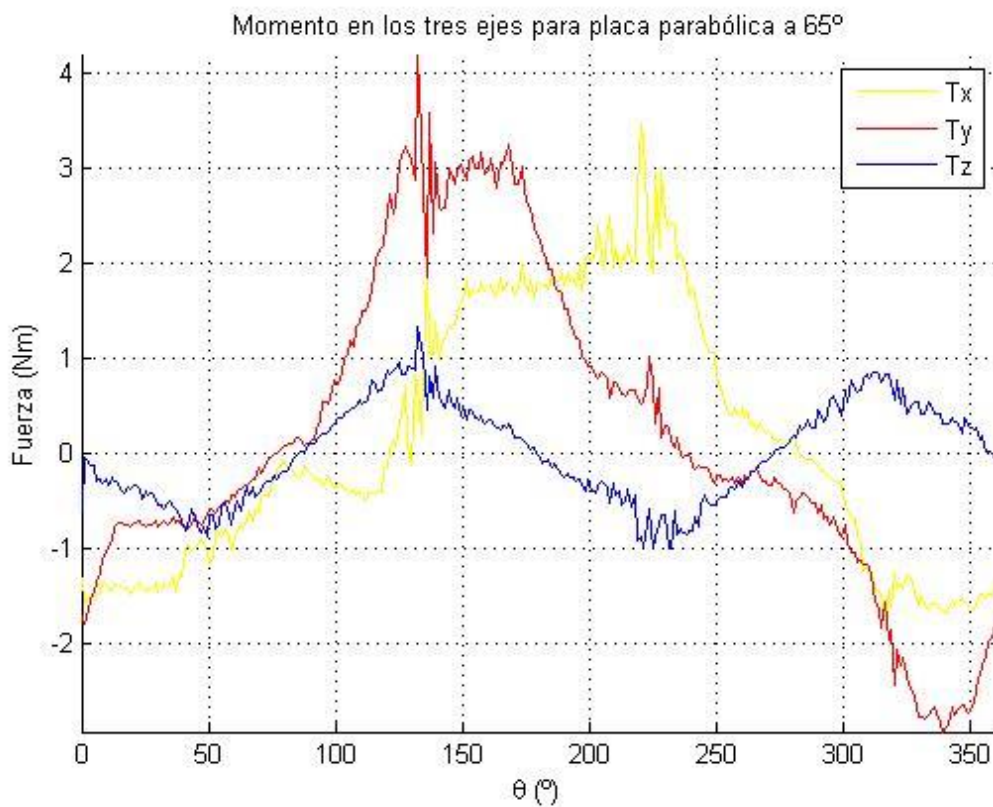


Figura C.14. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 65°

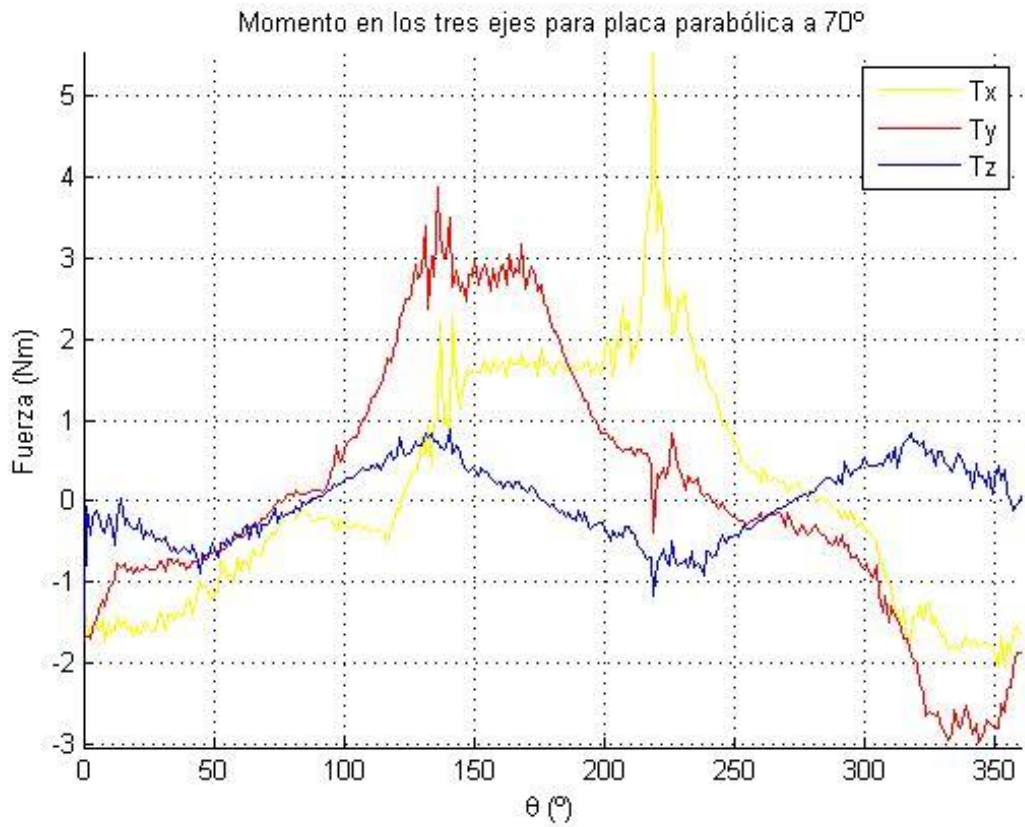
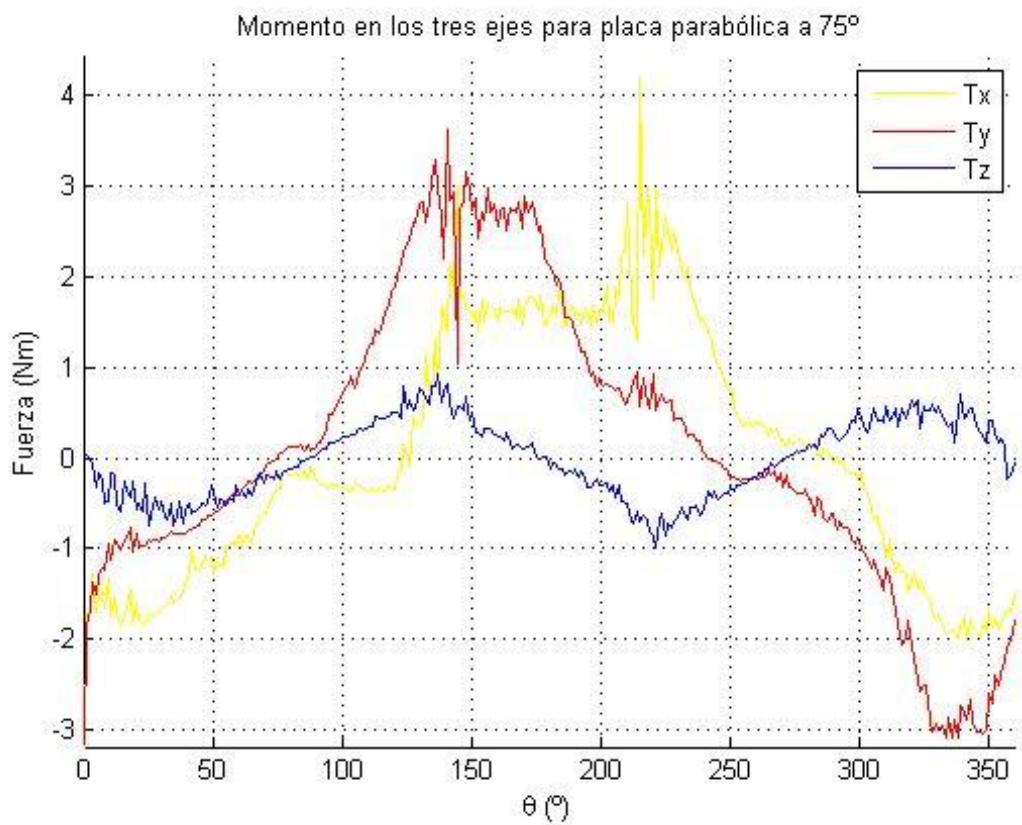
Figura C.15. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $70^\circ$ Figura C.16. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $75^\circ$



Figura C.17. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 80°

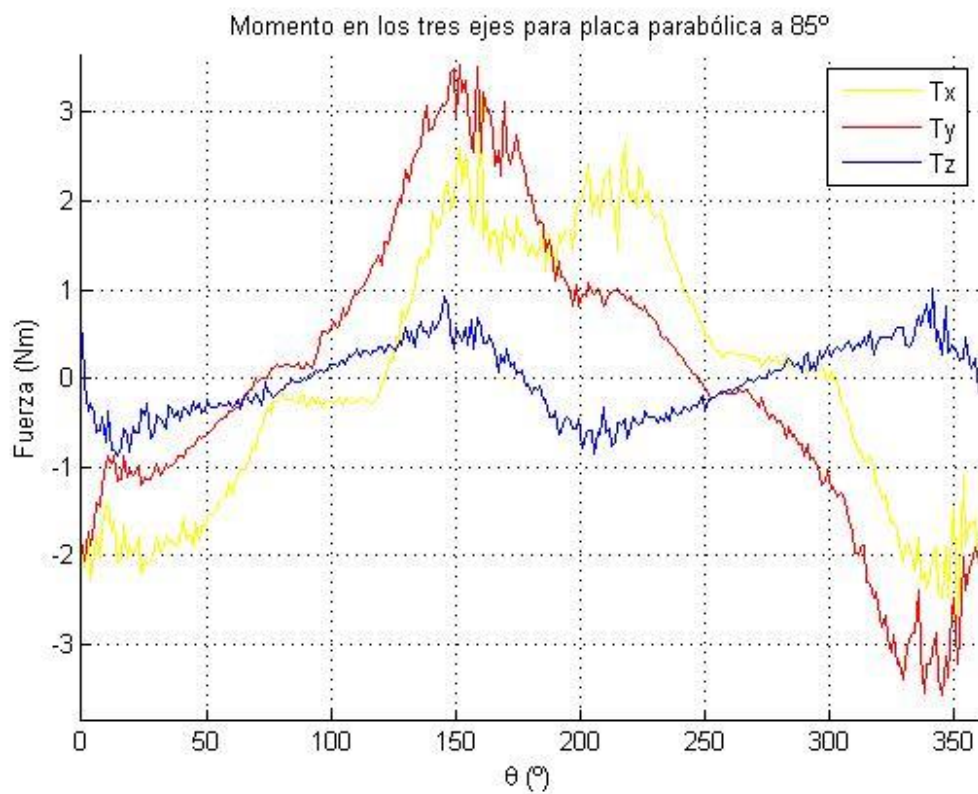
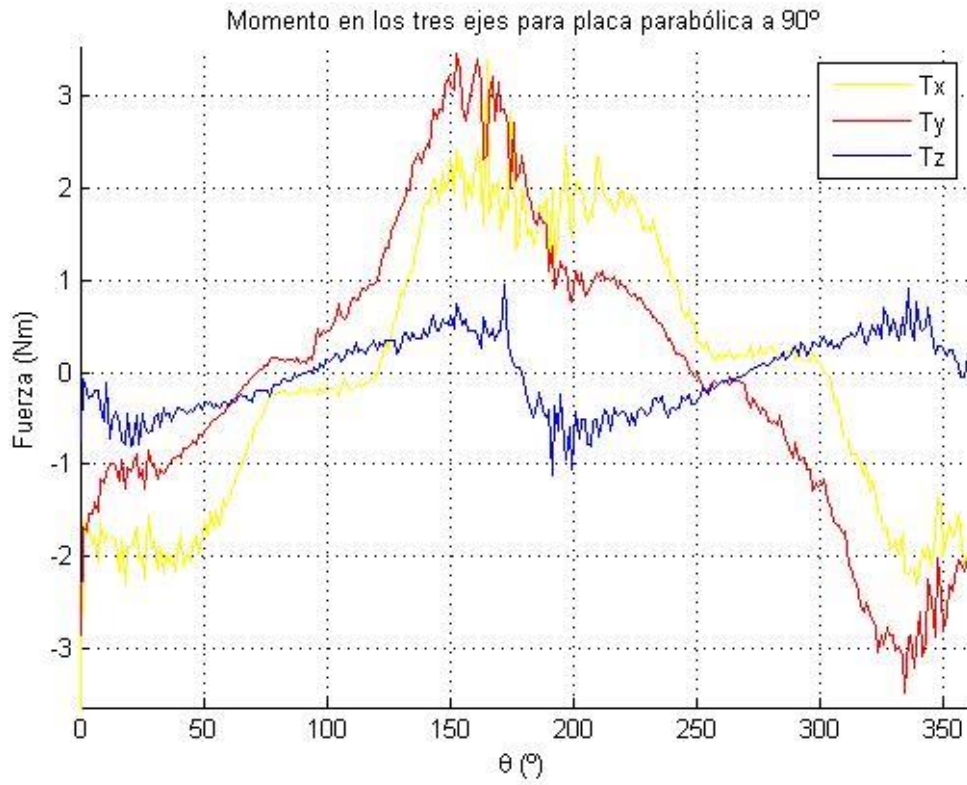


Figura C.18. Momento en los tres ejes para placa parabólica a 85°

Figura C.19. Momento en los tres ejes para placa parabólica a  $90^\circ$