



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA
AREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO AEROELÁSTICO DE ESTRUCTURAS
PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA
FOTOVOLTAICA**

AUTOR: OLAYA GÓMEZ CARRIL

TUTOR: ANTONIO NAVARRO MANSO

JULIO, 2022

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN y OBJETIVO	5
2	ENERGÍA RENOVABLE.....	6
2.1	ENERGÍA SOLAR.....	8
2.2	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	9
3	ESTADO DEL ARTE	13
4	METODOLOGÍA.....	18
4.1	TÚNEL AERODINÁMICO.....	18
4.1.1	Introducción.....	18
4.1.2	Descripción general.....	19
4.1.3	Ventiladores.....	22
4.1.4	Transición 1 y Enderezador 1.....	23
4.1.5	Tubo de impulsión y Curva.....	23
4.1.6	Difusor 1 y Enderezador 2.....	24
4.1.7	Cámara de remanso.....	25
4.1.8	Tobera.....	26
4.1.9	Cámara de ensayo.....	27
4.1.10	Difusor 2 y Enderezador 3.....	27
4.1.11	Tubo de retorno y Transición 2.....	28
4.1.12	Calibración inicial.....	29
4.1.13	Modificaciones posteriores.....	32
4.1.14	Conclusiones.....	35
4.2	CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA	35
4.3	MODELOS DE SEGUIDORES SOLARES.....	39
4.4	INSTRUMENTACIÓN	40
4.4.1	MONTAJE Y CALIBRACIÓN.....	42

4.4.2	CALIBRACIÓN MOMENTO	43
5	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	44
5.1	DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DEL TRACKER FRENTE A GALOPE	44
5.2	RESULTADOS DE LOS MODELOS A ESCALA ENSAYADOS.....	48
5.2.1	INFLUENCIA DEL AMORTIGUAMIENTO	49
5.2.2	INFLUENCIA DE LA INERCIA Y RELACIÓN DE ASPECTO	51
5.2.3	RESULTADOS DEL DIAGRAMA DE ESTABILIDAD Y BANDA DE CONFIANZA	56
6	CONCLUSIONES	59
7	LÍNEAS FUTURAS	61
8	REFERENCIAS.....	62

Índice de Figuras

Figura 1.	Campo de seguidores solares y efectos de la acción dinámica del viento.....	5
Figura 2.	Parque Eólico, ejemplo de energías renovables.	6
Figura 3.	Planta fotovoltaica, ejemplo de energía Solar.	8
Figura 4.	Funcionamiento de una Planta Fotovoltaica.....	10
Figura 5.	Hileras de seguidores Solares.....	12
Figura 6.	Planta de Seguidores Solares.	14
Figura 7.	Esquema estructural de un tracker solar.	15
Figura 8.	Ejemplo de análisis mediante el método de elementos finitos, del primer modo de vibración natural.	15
Figura 9.	Concepto del Diagrama de Estabilidad de un Tracker de un solo eje.	17
Figura 10.	Diseños preliminares del túnel.....	18
Figura 11.	Renderizado del túnel aerodinámico.	19
Figura 12.	Vista del túnel aerodinámico desde el techo de la curva.	20
Figura 13.	Planta del túnel aerodinámico.	21
Figura 14.	Alzados y planta del túnel aerodinámico.	21
Figura 15.	Ventiladores, 180 kW de potencia.	22
Figura 16.	Curva característica de los ventiladores, y punto de funcionamiento teórico al máximo caudal.....	22

Figura 17. Enderezador 1 a la salida de los ventiladores.	23
Figura 18. Tubo de impulsión y curva.	23
Figura 19. Guías en la curva a la entrada del difusor 1.	24
Figura 20. Enderezador 2 en el difusor 1.	24
Figura 21. Cámara de remanso y “honeycomb”.	25
Figura 22. Tobera.	26
Figura 23. Cámara de ensayo (principal).	27
Figura 24. Difusor 2 en curva, con la guía central.	28
Figura 25. Tubo de retorno.	28
Figura 26. Simulaciones CFD, velocidades (arriba) e intensidad de turbulencia (abajo) por el plano medio horizontal a la altura de la cámara de ensayo.	29
Figura 27. Porcentaje de pérdida de presión estática en cada elemento.	31
Figura 28. Líneas de energía y de presión medidas.	32
Figura 29. Estátor diseñado para cada ventilador.	33
Figura 30. Deflectores y modificaciones en guías y enderezadores (difusor 1, izqda. y difusor 2, dcha.)	34
Figura 31. Simulaciones CFD de detalle de la curva, difusor 1 y cámara de remanso. Velocidades, izqda. y presión estática, dcha.	34
Figura 32. Vista panorámica del túnel.	35
Figura 33. Detalles constructivos de los modelos.	37
Figura 34. Ensayo de un “tracker” en el túnel aerodinámico.	38
Figura 35. Deformación torsional en el modelo.	38
Figura 36. Impresora 3D en la que se imprimieron los modelos.	40
Figura 37. Instrumentación situada en el túnel aerodinámico.	41
Figura 38. Balanza y células de Carga.	41
Figura 39. Modelo preparado en la cámara de ensayo.	42
Figura 40. Fijación de la balanza y el modelo a ensayar.	43
Figura 41. Modelo a 20° y 9,2 m/s.	44
Figura 42. Modelo con un ángulo de 0°.	45
Figura 43. Cascada de espectros para modelo a 25°.	45
Figura 44. Velocidad crítica de galope.	46
Figura 45. Diagramas de estabilidad de los modelos.	46
Figura 46. Modelos FEM y CFD.	47
Figura 47. Modelos a escala diseñados.	48

Figura 48. Diagrama de estabilidad del tracker. 58
 Figura 49. Regiones y puntos de inestabilidad..... 61

Índice de Tablas

Tabla 1. Pérdidas de carga, comparación entre los distintos métodos. 30
 Tabla 2. Características de los modelos. 37
 Tabla 3. Resultados del ensayo del modelo ID 2..... 49
 Tabla 4. Resultados del ensayo del modelo ID 2* 50
 Tabla 5. Resultados del ensayo del modelo ID 1..... 51
 Tabla 6. Resultados del ensayo del modelo ID 2..... 52
 Tabla 7. Resultados del ensayo del modelo ID 3..... 53
 Tabla 8. Resultados del ensayo del modelo ID 4..... 54
 Tabla 9. Resultados del ensayo del modelo ID 5..... 55
 Tabla 10. Valores de velocidad reducida de los 7 modelos ensayados. 56
 Tabla 11. Valores de la media y desviaciones típicas..... 57

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

En el presente Trabajo de Fin de Máster se estudiará el método denominado “Diagrama de Estabilidad del Tracker”, con el que es posible predecir el umbral de velocidad de viento a partir del cual se produce el “galloping” del mismo, mostrando especial atención al poder destructivo de este fenómeno sobre elementos tan sensibles a la acción del viento como son los actuales seguidores solares de un solo eje para captación de energía fotovoltaica.

Para este ensayo se imprimieron unas maquetas de dichos edificios en 3D y se utilizaron los túneles de viento del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo ubicados en la Escuela Politécnica de Mieres y en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.

En la Figura 1 se muestra una instalación y el efecto totalmente devastador del fenómeno del “galloping”.



Figura 1. Campo de seguidores solares y efectos de la acción dinámica del viento.

2 ENERGÍA RENOVABLE

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes de energía inagotables y limpias. Las principales diferencias con las fuentes no renovables son su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del mundo, pero el factor más importante es que las energías renovables no producen gases de efecto invernadero, es decir, no contaminan.

Estas energías se encuentran en pleno auge y se espera que su crecimiento siga aumentando, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se espera que la participación de las renovables en el suministro eléctrico global sea aproximadamente del 44% en 2040.

Además de los efectos positivos que tienen estas energías para el planeta también tienen efectos positivos en la economía global, ya que el aumento de las inversiones en las renovables conlleva a un incremento de la creación de empleo en este ámbito.



Figura 2. Parque Eólico, ejemplo de energías renovables.

Hay varios tipos de energías renovables, a continuación, se van a enumerar algunas de los tipos más conocidos:

- Energía eólica: la fuente de este tipo de energía es el viento, la tecnología utilizada son las turbinas eólicas y su principal aplicación es la electricidad.

- Energía solar: la fuente es el sol. Las principales tecnologías son la fotovoltaica que aprovecha la luz del sol y la termosolar que aprovecha el calor del sol. Sus aplicaciones son electricidad, calefacción y refrigeración.
- Energía hidroeléctrica: la fuente de este tipo es el agua, la tecnología principal son las centrales hidroeléctricas y su aplicación es la electricidad.
- Biomasa y biogás: este tipo de energía se extrae de la materia orgánica
- Energía geotérmica: la fuente de energía es la tierra, las tecnologías son los sistemas geotérmicos superficiales y las bombas de calor. Sus aplicaciones son la electricidad, calefacción y refrigeración.
- Energía mareomotriz: este tipo de energía se obtiene de las mareas.
- Energía undimotriz: se obtiene de las olas.
- Bioenergía: se obtiene de la biomasa, las tecnologías son la combustión de biomasa, plantas de biogás y biocarburantes. Sus principales aplicaciones son la electricidad, calefacción y refrigeración.

Algunas ventajas de las energías renovables son:

Son **beneficiosas para el medio ambiente**, este tipo de energías no emiten gases de efecto invernadero para generar energía, estos aspectos hacen que las energías renovables sean la clave para cuidar nuestro entorno y hacerlo más sostenible.

Son **recursos naturales inagotables**, ya que depende del agua, viento o sol con los que producir energía limpia. Por el contrario, la energía generada a partir de fuentes como el carbón, petróleo o gas dependen de unos recursos limitados.

Reducen la dependencia energética, la naturaleza y que se encuentren al alcance de todas las fuentes limpias implica una ventaja diferencial para las economías locales y para la independencia energética. La necesidad de importar combustibles fósiles dependencia económica y política del país proveedor. Mientras que en cualquier parte del mundo hay algún tipo de recurso renovable para ser aprovechado con el objetivo de producir energía de forma sostenible. Por ejemplo, el caso de España, no es un país que tenga abundancia de combustibles fósiles, pero sí en recursos naturales necesarios para generar energía limpia.

Energía renovable competitiva, las principales tecnologías renovables como pueden ser la eólica y la solar fotovoltaica, están bajando sus costes, lo que significa que compiten directamente con las fuentes de energía convencionales. Las energías renovables se están

posicionando como la solución más sostenible, no sólo ambiental sino también económicamente y que además se encuentra al alcance del todo el mundo.

2.1 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una energía renovable que se obtiene gracias a la radiación electromagnética del sol. La energía solar se puede aprovechar de dos formas distintas:

- A. **Energía solar fotovoltaica.** Transformación de la radiación que transmite el Sol en energía eléctrica.
- B. **Energía solar térmica.** Transformación de la radiación que transmite el Sol en energía térmica.

En este caso el siguiente apartado se va a centrar en explicar la energía solar fotovoltaica ya que es la que da argumento a los seguidores solares o también llamados trackers, elemento de estudio del Presente Trabajo de fin de máster.



Figura 3. Planta fotovoltaica, ejemplo de energía Solar.

2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable y limpia que utiliza la radiación solar para producir electricidad, la tecnología que se emplea para ello se basa en el efecto fotoeléctrico, dicho efecto trata de la capacidad de algunos materiales de absorber fotones y liberar electrones, generando una corriente eléctrica.

Puede producirse en instalaciones de pequeños generadores para autoconsumo o en grandes plantas fotovoltaicas.

Para el funcionamiento de la energía fotovoltaica se emplea un dispositivo semiconductor al que llaman celda o célula fotovoltaica, que puede ser de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, o también de otros materiales semiconductores de capa fina. Las de silicio monocristalino alcanzan la máxima eficiencia, entre un 18 % y un 20 % de media. Las de silicio policristalino poseen una eficiencia media de entre el 16 % y el 17,5 %. Por último, las de silicio amorfo presentan una eficiencia media de entre un 8 % y un 9 %. A la vez que disminuye su eficiencia disminuye su precio.

Existen dos tipos de plantas fotovoltaicas, se diferencian en que unas están conectadas a la red y otras no. Dentro de las primeras se diferencian otras dos clases:

- A. **Central fotovoltaica:** toda la energía producida por los paneles se vierte a la red eléctrica.
- B. **Generador con autoconsumo:** parte de la electricidad generada es consumida por el propio productor (en una vivienda, por ejemplo) y el resto se vierte a la red. Al mismo tiempo, el productor toma de la red la energía necesaria para cubrir su demanda cuando la unidad no le suministra la suficiente.

Las instalaciones fotovoltaicas con conexión a la red tienen tres elementos básicos:

- **Paneles fotovoltaicos:** se trata de grupos de celdas fotovoltaicas montadas entre capas de silicio que captan la radiación solar y la convierten en energía eléctrica (en corriente continua).
- **Inversores:** son los encargados de adaptar la corriente para que esta sea apta para el consumo, es decir, convierten la corriente continua producida por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna.
- **Transformadores:** la corriente alterna que sale de los inversores va en baja tensión, por lo que se utiliza un transformador para elevarla a media tensión.

Las instalaciones que no se encuentran conectadas a la red suelen estar en lugares remotos y explotaciones agrícolas para abastecer de luz a la población, suministrar a las telecomunicaciones y a los sistemas de riego. Estas plantas aisladas necesitan, además de lo anteriormente mencionado, dos elementos más para funcionar:

- Baterías: necesarias para almacenar la energía producida por los paneles y no demandada en ese instante, de esta forma esa energía es almacenada para cuando sea necesaria.
- Reguladores: su función es la de proteger la batería de sobrecargas.

A continuación, en la Figura 4 se muestra un esquema de funcionamiento de una planta fotovoltaica:



Figura 4. Funcionamiento de una Planta Fotovoltaica.

Las plantas fotovoltaicas tienen innumerables ventajas, a continuación, se exponen algunas de ellas:

- Es un tipo de energía 100 % renovable, inagotable y no contamina. No consume combustibles ni genera residuos, por lo que colabora directamente con el desarrollo sostenible.
- Es modular, por ello se construyen enormes plantas fotovoltaicas, pero también es posible construir pequeños paneles para tejados.
- Es posible instalar baterías para acumular la electricidad sobrante y usarla posteriormente.
- Son muy recomendables para zonas rurales o zonas que se encuentren aisladas, donde el tendido eléctrico no llega o es dificultosa o costosa su instalación, o también para zonas geográficas cuya climatología permite muchas horas de sol al año.
- Se crean empleos verdes e impulsa la economía local.

Un seguidor solar es una estructura móvil que une la placa solar con el suelo, para lograr la máxima producción posible de electricidad de la instalación. El seguidor solar lo que hace es modificar el ángulo con el que los paneles reciben la radiación solar, de tal forma que la radiación siempre sea la mayor posible. Se suelen usar para grandes instalaciones solares sobre el terreno, también para instalaciones solares autónomas en menor medida.

El ángulo con el que los rayos llegan a la superficie de la placa solar es directamente proporcional a la cantidad de energía que se genera, este ángulo es el denominado ángulo de incidencia, es de suma importancia y determina la eficiencia de la placa solar para convertir la radiación en electricidad, cuanto más perpendicular sea el ángulo, más energía se produce.

Hay dos tipos de sistemas, los seguidores solares en un eje y en dos ejes.

Los seguidores solares tienen una amplia lista de ventajas, una de ellas es la rentabilidad, una instalación puede durar hasta 30 años y la amortización será en un rango de cinco o diez años, son eficientes, esto quiere decir que es una producción sostenible de electricidad y además tienen un gran rendimiento.

Algunas de las desventajas que tienen son el alto coste de instalación y mantenimiento, un seguidor solar tiene mayor precio que un sistema solar fijo, lleva una parte tecnológica más compleja y además móvil. Los seguidores solares conllevan un gran peso para instalarlos en un tejado, por ello lo recomendable es su instalación sobre un terreno.

A continuación, se muestran en la Figura 5 varias hileras de seguidores solares:



Figura 5. Hileras de seguidores Solares.

3 ESTADO DEL ARTE

La experimentación con túneles aerodinámicos aplicados a ingeniería civil comenzó a extenderse tras el desastre del puente de Tacoma (1940); los seguidores solares se comenzaron a usar a partir del 2010 y los primeros problemas aeroelásticos reportados datan del 2014 aproximadamente. Este estado del arte se ha redactado siguiendo a [1].

En 2019, el mercado de seguidores solares creció un 62% alcanzando un número de capacidad instalada de 23 GWh. Con base a estos datos, las mejoras tecnológicas y pronósticos de demanda de energía, se espera que en esta fuente renovable crezca en un 11% por año hasta 2024 [2].

En la actualidad, las instalaciones solares a gran escala (ver Figura 6) tienen uno de los costes nivelados más bajos de producción de electricidad (LCOE - valor del coste total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil) en el sector energético de las renovables [3]. Se espera que pronto se convierta en la energía fuente con el LCOE más bajo de todos los sistemas utilizados en el mercado [4].

Esto se debe a la mejora de los paneles fotovoltaicos y seguidores solares. En el primer caso, como resultado de un mayor rendimiento y una reducción del coste por optimización de los sistemas productivos; en el segundo caso, a través de la reducción de costes lograda por el ajuste de la estructura diseño [5,6].

En este particular, destacan los seguidores solares fotovoltaicos de un solo eje con un aumento de la eficiencia entre un 10% y un 30% con respecto a los paneles fijos, dependiendo de las condiciones geográficas y climáticas [7-9].



Figura 6. Planta de Seguidores Solares.

Estas estructuras están compuestas por un eje de torsión orientado de norte a al sur, sobre el que se montan los paneles solares. La rotación progresiva de este eje (ángulo de inclinación) permite que los paneles estén siempre orientados hacia la dirección del sol.

La estructura es simétrica respecto al eje central, que constituye un punto fijo para la torsión. El eje está soportado por varios apoyos intermedios que impiden el movimiento horizontal y vertical, pero permitir la rotación libre. La Figura 7 muestra un esquema estructural y detalles de un seguidor solar común.

Esta estructura se comporta como una viga empotrada a torsión, cuya torsión constante está definida por el eje de torsión; este eje normalmente tiene forma circular, secciones transversales rectangulares o hexagonales, con diámetros relativamente grandes y pequeños espesores para aumentar la rigidez. La inercia, sin embargo, es definida por los propios paneles más el marco que los une [10]. La altura del eje sobre el suelo es aproximadamente la mitad del ancho total del panel del seguidor.

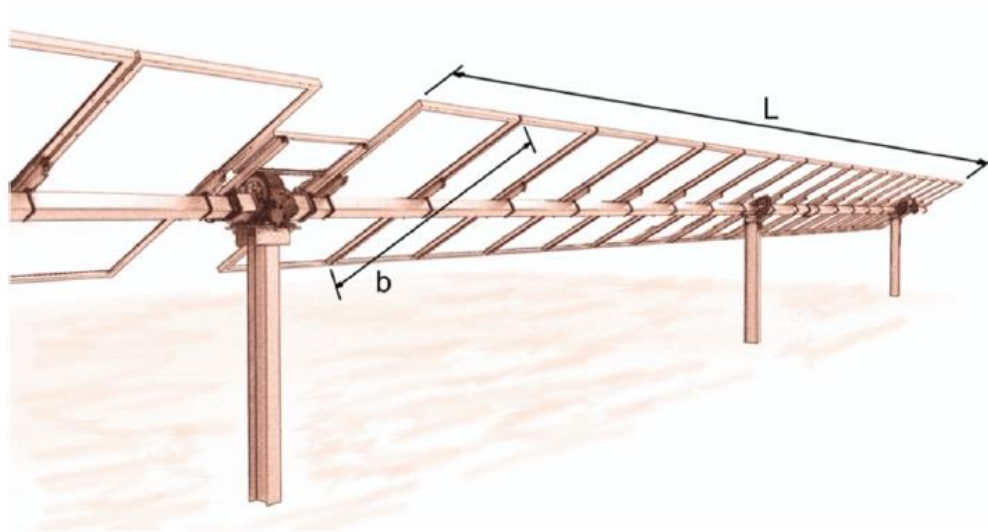


Figura 7. Esquema estructural de un tracker solar.

La Figura 8 muestra una imagen de una simulación de un seguidor mediante el método de elementos finitos (FEM), deformación, los modos naturales de vibración, etc.

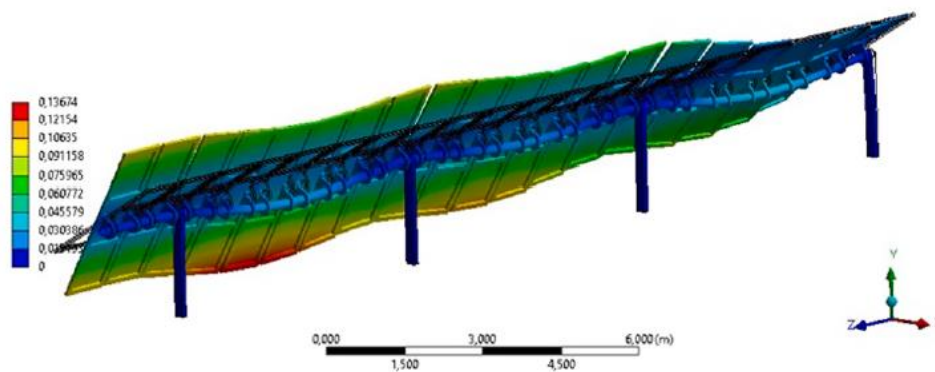


Figura 8. Ejemplo de análisis mediante el método de elementos finitos, del primer modo de vibración natural.

La acción meteorológica y los eventos climáticos suponen el 49,8% de las causas de rotura estructural o colapso de estas estructuras [11]. Entre ellos, uno de los principales problemas que soportan son las cargas de viento. Debido al hecho de que los seguidores han evolucionado para convertirse en estructuras bastante delgadas por razones económicas, ahora son propensos a sufrir efectos aeroelásticos. Este implica que los criterios habituales de diseño estático no son válidos cuando la estructura comienza a sufrir oscilaciones, incluso si se considera un factor

dinámico de amplificación (DAF) [12-15]. Además, las normas internacionales no incluyen aun específicamente este tipo de estructura ni los fenómenos aeroelásticos que pueden afectarles.

Se han realizado numerosos estudios sobre las fuerzas aerodinámicas en estructuras como paneles solares con una relación de aspecto limitada como en [16,17], y también, sobre las fuerzas aerodinámicas en los paneles solares, incluidos los DAF, como por ejemplo en [18-20].

En particular, uno de los fenómenos más destructivos, que afecta muchas estructuras de seguimiento solar de un solo eje, ha sido identificado como el aleteo de un grado de libertad (1DOF), comúnmente llamado galope torsional en este sector [21-23]. Este fenómeno consiste en que, cuando la velocidad del viento supera un cierto valor crítico, el seguidor comienza a vibrar en el primer modo torsional de la estructura, la amplitud crece rápidamente con la velocidad del viento, hasta que la estructura se derrumba debido a la rotura de uno de sus elementos.

Sin embargo, hasta la fecha, las publicaciones sobre el fenómeno de galope torsional en seguidores solares de un solo eje son muy escasas. Algunos autores [12] describen el fenómeno y explican con cierto detalle el caso de ángulo de inclinación inicial cercano a 0° . También muestran algunos resultados preliminares de un modelo numérico validado con un modelo seccional experimental.

Más recientemente [24], un estudio sobre las fuerzas dinámicas en estas estructuras se ha llevado a cabo, mediante un nuevo método que combina mediciones aeroelásticas en un modelo seccional con cálculos numéricos. Aunque este estudio no se centró realmente en la inestabilidad sino en el análisis de vibraciones para varias filas de seguidores, determinaron la aeroelástica derivada a integrar en su método de cálculo. Finalmente, se ha encontrado que la velocidad crítica del viento a la que comienza la inestabilidad es función del ángulo de inclinación del seguidor solar [25].

En el diagrama de estabilidad de la Figura 9 que representa las velocidades del viento que causan inestabilidad aeroelástica para cada posición inicial, los valores más bajos se encuentran para ángulos positivos cercanos a 20° y un rango más amplio de ángulos negativos, ángulos, desde -15° hasta -40° . Para ángulos cercanos a 0° la velocidad crítica alcanza un valor algo mayor, y para ángulos superiores a 40° o inferiores de -50° , la velocidad crítica aumenta rápidamente y el fenómeno incluso desaparece.

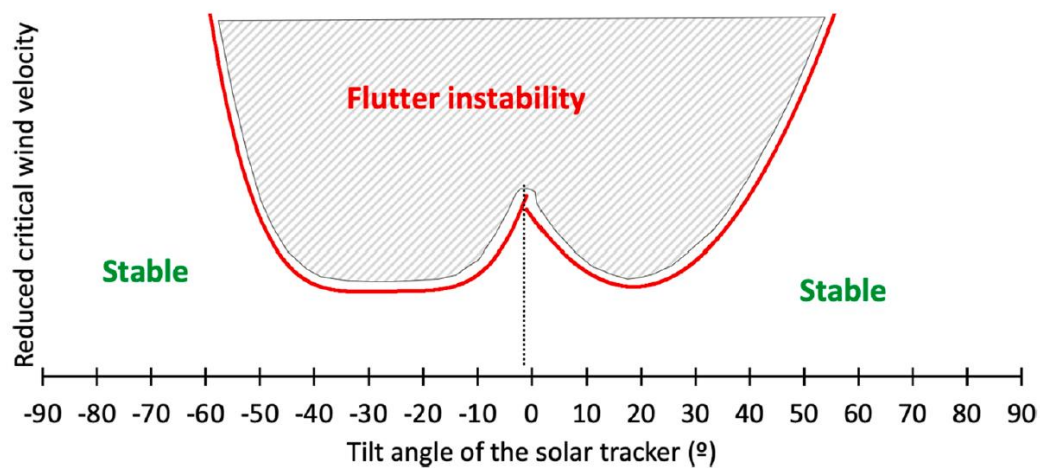


Figura 9. Concepto del Diagrama de Estabilidad de un Tracker de un solo eje.

Sin embargo, este conjunto de resultados aún no se ha convertido en parte de los estándares, y no hay datos suficientes para un diseño fiable de estas estructuras contra los efectos aeroelásticos. Como contribución para llenar ese vacío, se realiza este estudio sobre la velocidad crítica a la que se produce la inestabilidad sobre el rango de las diferentes posiciones angulares.

4 METODOLOGÍA

4.1 TÚNEL AERODINÁMICO

4.1.1 INTRODUCCIÓN.

Para la realización de los ensayos que dan lugar a este trabajo de fin de máster se utilizaron los túneles aerodinámicos que se encuentran en la Escuela Politécnica de Mieres y la escuela Politécnica de Gijón. En este trabajo se explicará con más detalle el túnel aerodinámico de la escuela politécnica de Mieres porque es una infraestructura singular, además la autora del presente trabajo participó en su construcción. Para más detalle sobre el otro túnel aerodinámico utilizado, consultar la referencia [1].

La construcción del nuevo túnel aerodinámico de capa límite terrestre en la Escuela politécnica de Mieres se ha hecho realidad gracias a la colaboración de varios Profesores del Departamento de Energía, del Rectorado de la Universidad de Oviedo y del Servicio de Administración del Campus de Mieres, con financiación del Principado de Asturias.

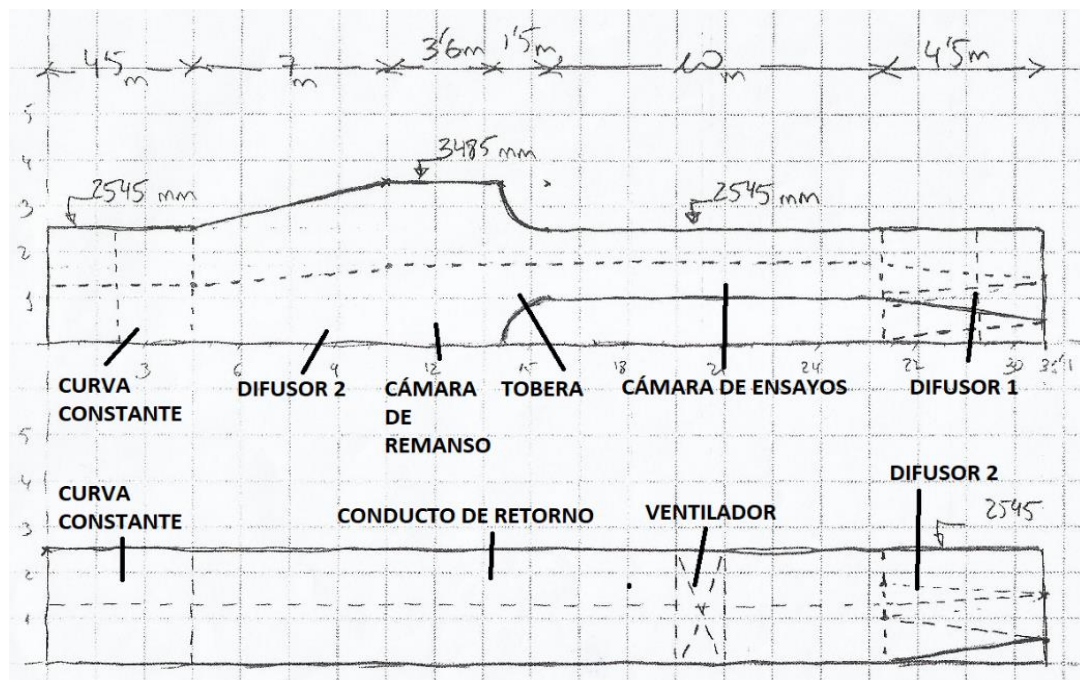


Figura 10. Diseños preliminares del túnel.

En este apartado se van a enumerar los principales componentes del túnel y se van a comparar los resultados obtenidos en la primera campaña de calibración del túnel con aquellos predichos por la teoría o supuestos por los Ingenieros.

4.1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL.

El nuevo EVE50-ablWT (Figuras 11 y 12) es un túnel aerodinámico subsónico, para el estudio de problemas aerodinámicos en Ingeniería Civil y es un circuito cerrado, con cámara de ensayo cerrada y con una longitud suficiente para desarrollar una capa límite de forma controlada [26-27].

En este túnel se pueden ensayar estructuras tales como puentes, edificios, paneles solares, torres, aerogeneradores, coches, bicicletas, etc. La finalidad de todo el diseño y la construcción es garantizar un flujo de aire de muy buena calidad en dicha cámara de ensayo, asegurándose una distribución de velocidades y presiones uniformes para los caudales deseados, con muy baja turbulencia en la salida de la tobera. Adicionalmente, es posible utilizar los tubos de retorno e impulsión como cámaras de ensayo secundarias, de mayor tamaño y menor velocidad de viento.

Las dimensiones principales son 31.52 m de largo, 10.84 m de ancho, y altura variable desde 2.54 m en la sección tipo hasta 3.48 m en la cámara de remanso. El desarrollo de la longitud de su eje es de más de 65 m.

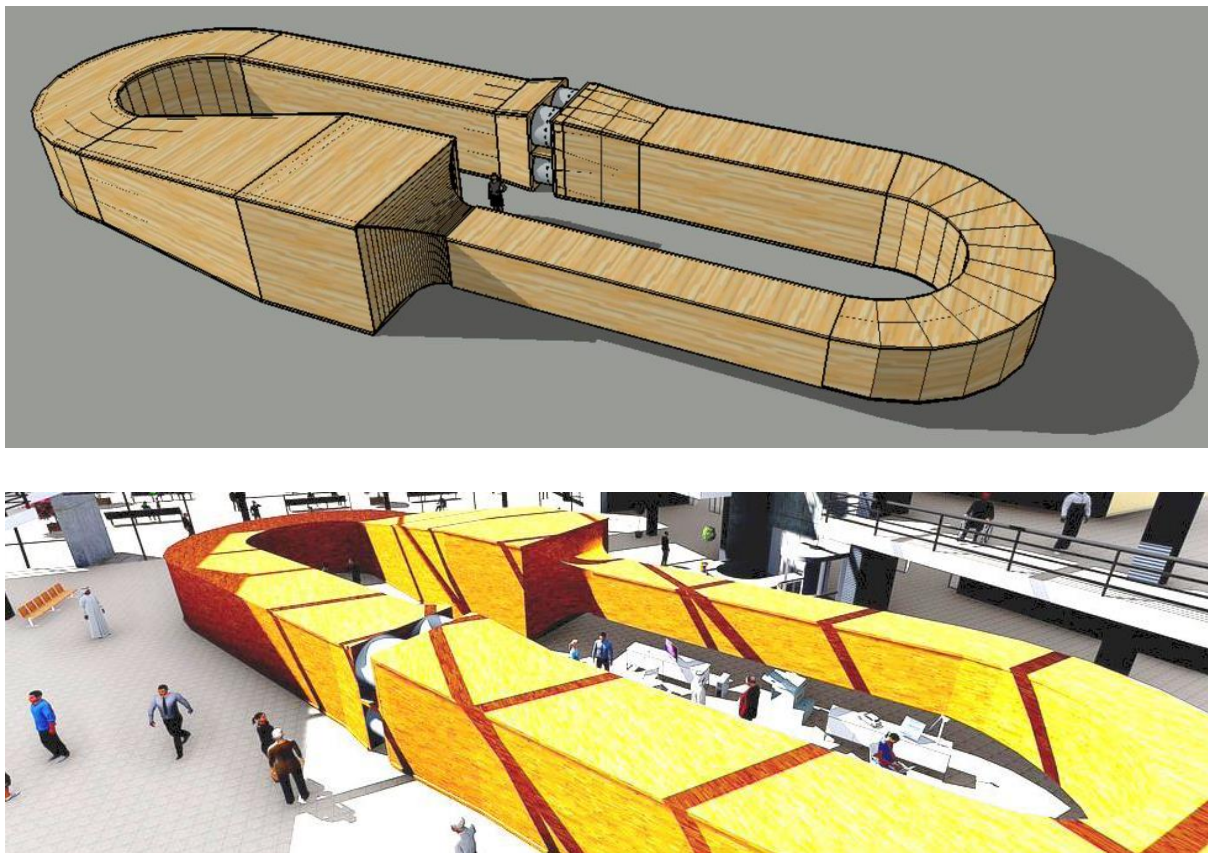


Figura 11. Renderizado del túnel aerodinámico.



Figura 12. Vista del túnel aerodinámico desde el techo de la curva.

Para conseguir el objetivo anteriormente expuesto, son necesarios una serie de elementos o partes en los que se puede dividir el túnel, estos elementos deben tener un correcto funcionamiento en cuanto a velocidades y presiones. Cada elemento tiene una finalidad específica. En la Figura 13 se recoge una planta de la instalación.

Los datos de pérdidas de carga, velocidades y presiones han sido medidos en sus valores medios. Así mismo, la simulación numérica 3D por medio de CFD se ha realizado con una malla no demasiado refinada (1.000.000 de elementos), y modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ RNG, con la intención de obtener resultados medios de estados permanentes de forma rápida.

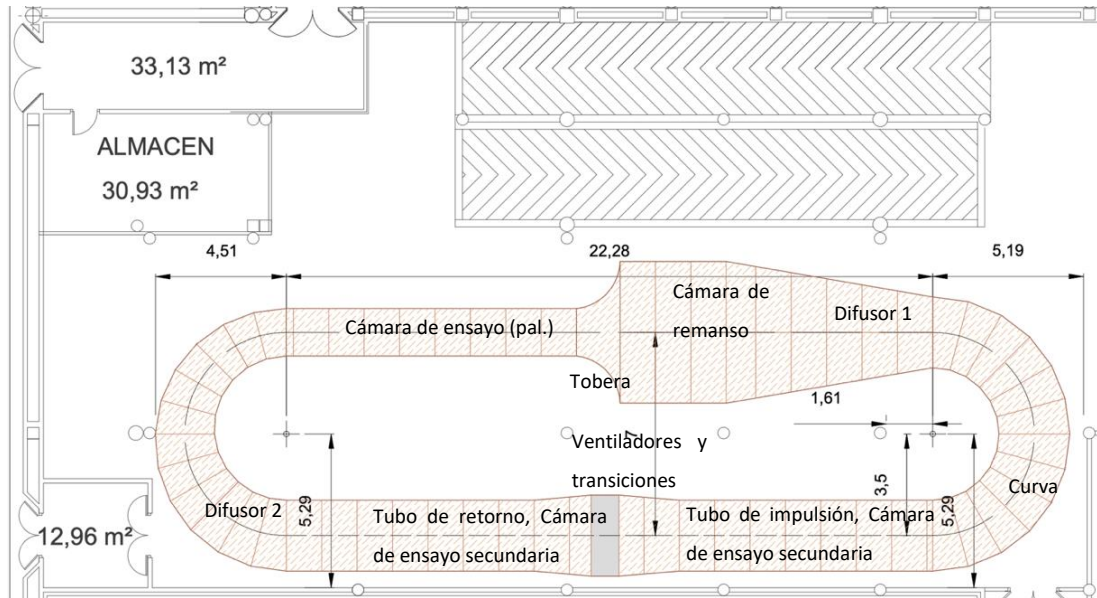


Figura 13. Planta del túnel aerodinámico.

El túnel está construido en madera por motivos de economía y, también, por la versatilidad en la adaptación/sustitución de cualquiera de las 61 secciones o dovelas que lo componen. Todos los elementos están atornillados entre sí y se han construido diferentes rigidizadores interiores y exteriores, así como solapas y sellados entre módulos, para garantizar su resistencia y estanqueidad. La infraestructura apoya sobre largueros en la solera del laboratorio y ha sido anclada al techo en aquellas secciones con una luz mayor. La Figura 14 muestra los alzados y planta del túnel:

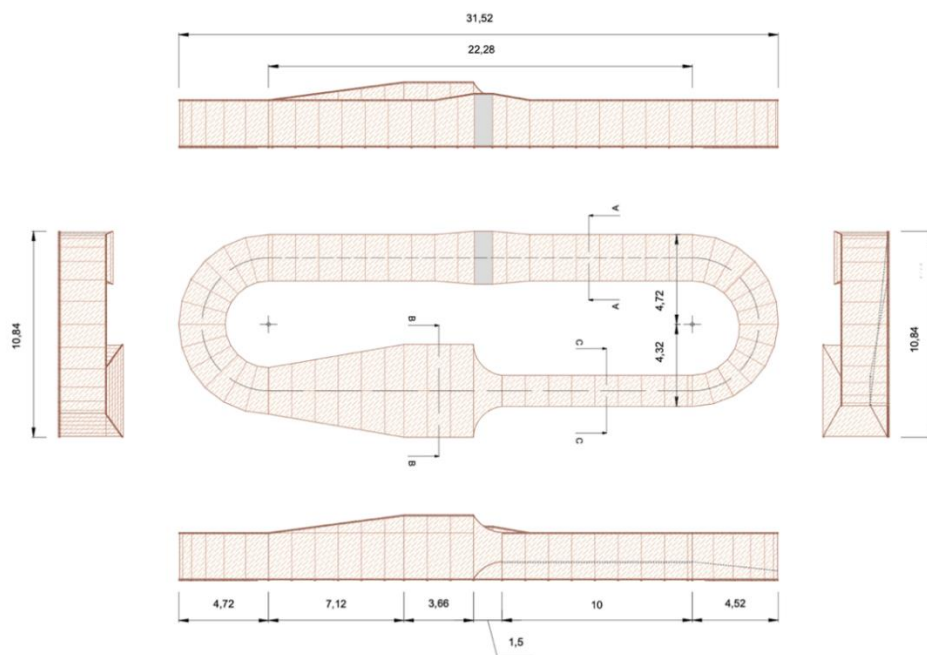


Figura 14. Alzados y planta del túnel aerodinámico.

4.1.3 VENTILADORES.

Comenzando por la planta de potencia, los 4 ventiladores, de 1250 mm de diámetro y 12 álabes, están instalados en paralelo (4x45 kW) y proporcionan al flujo la energía suficiente para moverse en el interior del túnel. Las curvas características de los mismos son (Figura 16):

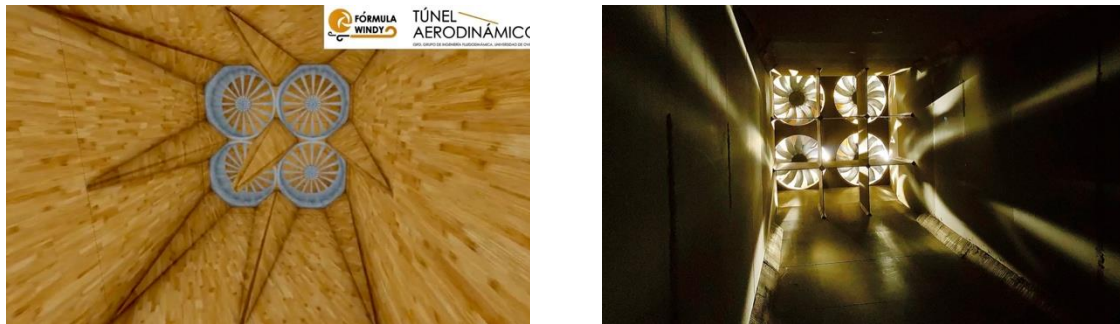


Figura 15. Ventiladores, 180 kW de potencia.

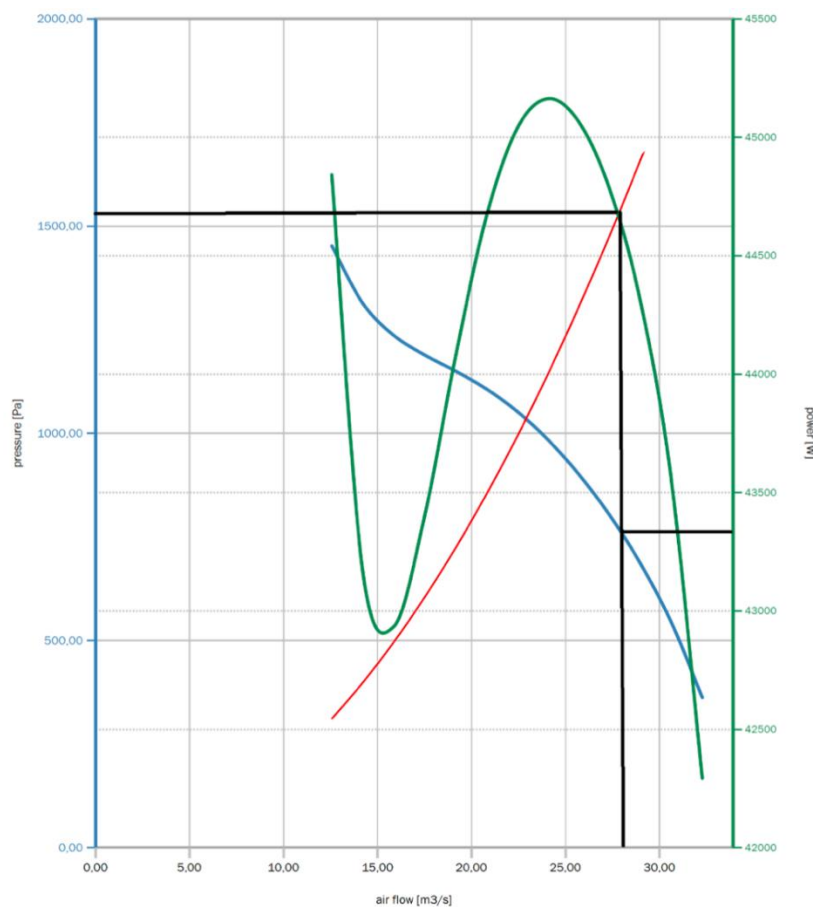


Figura 16. Curva característica de los ventiladores, y punto de funcionamiento teórico al máximo caudal.

4.1.4 TRANSICIÓN 1 Y ENDEREZADOR 1.

La transición 1 es una pequeña contracción para adaptar la sección de los ventiladores a la sección tipo del conducto desemboca en el primer enderezador, que divide la sección en 9 canales y está encargado de disipar en parte la fuerte componente radial del flujo a la salida de los ventiladores (Figura 17). Para mejorar de forma sustancial el rendimiento de la instalación, se podrían disponer unos “estátor” en los ventiladores (actualmente en fase de diseño y que se llevarán a cabo junto con el resto de los remates finales de la infraestructura). Alternativamente, o, además, se podrían diseñar unos difusores a la salida de cada ventilador.



Figura 17. Enderezador 1 a la salida de los ventiladores.

4.1.5 TUBO DE IMPULSIÓN Y CURVA.

El tubo de impulsión de sección aproximadamente cuadrada y dimensiones 2.44 m de alto x 2.30 m de ancho por motivos constructivos, conduce a la primera de las curvas (Figura 18). Todo el tubo del túnel está rematado en sus esquinas con berenjeno a 45º y de 15 cm de lado. Este tubo de impulsión incorpora la primera de las puertas para acceder a esta parte del túnel, y puede ser utilizado como cámara de ensayo secundaria, alcanzándose una velocidad máxima de 18 m/s, 65 km/h, dada la correcta distribución de velocidad media en todo el ancho de la sección. Para ello, sería imprescindible disponer de un “honeycomb” adicional, y disminuir al menos 27 veces el hueco del enderezador número 1, en su extremo aguas abajo. En ese caso, habría que disponer de una segunda entrada para inspección y mantenimiento de los ventiladores.



Figura 18. Tubo de impulsión y curva.

Se ha optado por diseñar la primera curva de forma circular, de sección constante e igual al tubo de impulsión, en vez de utilizar la clásica configuración de tramo recto y esquinas a 90°. En principio, era esperable cierto desprendimiento del flujo en la cara interior de la curva. Las mediciones efectuadas hasta el momento parecen indicar que no se produce separación.



Figura 19. Guías en la curva a la entrada del difusor 1.

4.1.6 DIFUSOR 1 Y ENDEREZADOR 2.

La curva desemboca en el primer difusor. Se han dispuesto dos guías (Figura 19) en las tres y dos últimas dovelas de la curva, respectivamente, con el objeto de corregir la distribución de caudales ante el seguro desprendimiento del flujo al final de la curva y comienzo del difusor.

Este difusor está diseñado en recta con una ampliación simétrica en planta de ángulo 10°, y una ampliación del techo de unos 8°. El parámetro que condiciona su relación de aspecto y, por tanto, el ángulo de este es la longitud (cuanto mayor, mejor). Incorpora en su inicio el segundo de los enderezadores, que, como continuación de las guías de la curva, distribuye el flujo de forma homogénea en toda la sección del difusor, a la par que mitiga en parte el efecto de la separación del flujo que sin duda se produce.



Figura 20. Enderezador 2 en el difusor 1.

Tras un primer diseño de las guías y de este segundo enderezador (Figura 20), se han realizado simulaciones numéricas CFD con un modelo de detalle (Impulsión, curva, difusor, cámara de remanso, tobera y cámara de ensayo) para optimizar el funcionamiento de estos elementos. Aunque el objetivo final es conseguir un flujo de buena calidad en la cámara de ensayo, se ha hecho un esfuerzo enorme en el diseño y construcción de cada parte: en este caso, se pretende conseguir una distribución de velocidades y caudales lo más uniforme posible, incluso antes de llegar al “honeycomb”. Para ello, la longitud y posición de las guías, los canales del enderezador se han analizado de forma paramétrica, y modificado hasta conseguir el necesario compromiso entre eficiencia y economía de construcción, minimizando las separaciones de flujo y pérdidas de carga todo lo posible. Otra alternativa de diseño sería confiar toda la redistribución del flujo a las “screens” de la cámara de remanso, a costa de introducir una pérdida de carga significativa (del orden de 100 Pa, en este caso).

4.1.7 CÁMARA DE REMANSO.

El siguiente elemento es la cámara de remanso, cuyas dimensiones de 3.38 x 4.74 m han sido llevadas al máximo disponible en el espacio que ocupa el túnel. En ella, el flujo prácticamente se para y la presión es máxima, comenzando así el proceso de disminución de la turbulencia.

Para ello se dispone un “honeycomb” justo a la entrada de la misma (Figura 21), con un tamaño de malla de unos 3.5 cm y una longitud total de 25 cm; este elemento (con una porosidad muy elevada y, por tanto, una pérdida de carga muy reducida) reduce la turbulencia fundamentalmente transversal y también la longitudinal, encauzando el flujo a través de los canales.



Figura 21. Cámara de remanso y “honeycomb”.

Con una separación de unos centímetros se pueden colocar también una o varias “screen” (en función de las necesidades), con el objeto de reducir la turbulencia fundamentalmente longitudinal, mediante un salto de presión o pérdida de carga (la porosidad de este elemento es mucho menor que la del “honeycomb”, y produce una uniformización muy significativa del flujo).

El resto de escala de turbulencia que sería necesario disipar una vez el flujo haya atravesado estos elementos, ya se reduciría por medio de la longitud disponible, justo antes de la tobera. Por lo que la longitud de la cámara debe de ser suficiente, al menos, igual de larga que de ancha.

Es de destacar la importancia de que toda la cámara de presión tiene flujo distribuido en toda la sección (aún sin la necesidad de “screens”) aunque éste sea de muy baja velocidad (en una primera aproximación, se puede considerar incluso 0). En la cámara de remanso se incorporan las dos puertas de acceso al túnel e interior del anillo.

4.1.8 TOBERA.

La tobera es el elemento encargado de acelerar el flujo y conducirlo a la cámara de ensayo y se muestra en la Figura 22. Debe cumplir varios requisitos, controlados principalmente a través de su forma y su longitud.

La curva debe enlazar dos secciones muy diferentes (llamándose contracción N al cociente entre el área transversal de la cámara de remanso y la de la cámara de ensayo, en este caso $N=7,12$), proporcionando un flujo uniforme y de muy baja turbulencia, para lo cual la variación de presiones a lo largo del desarrollo de la tobera debe estar cuidadosamente calculado [28].

Como se ha indicado antes, los elementos precedentes juegan también un papel crucial en la calidad del flujo que finalmente se obtendrá en la salida de la tobera. En este caso se ha elegido una curva logarítmica (realmente son dos, por la ligera disimetría de la cámara de remanso), con un solo tramo [29], dado que se debía optimizar la longitud total del túnel aerodinámico.

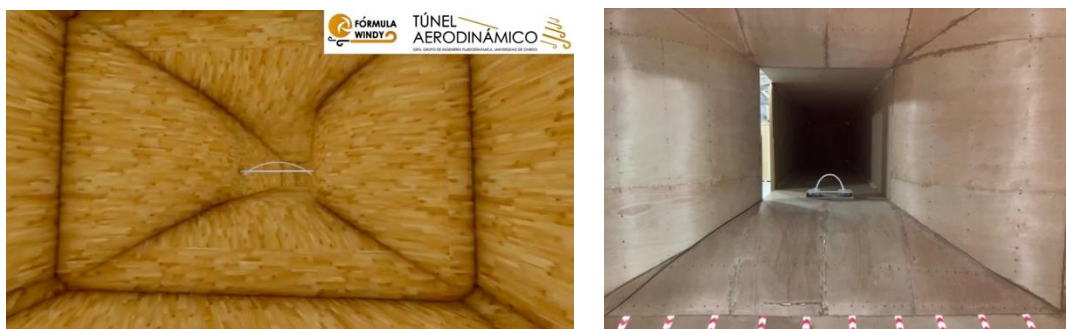


Figura 22. Tobera.

4.1.9 CÁMARA DE ENSAYO.

El elemento esencial, que es la cámara de ensayo (principal), en la que se colocan los modelos que se pretende ensayar. Esta cámara de sección cuadrada de 1.5 x 1.5 m (Figura 23) dispone de dos zonas claramente diferenciadas:

- en la primera parte adyacente a la tobera se pueden realizar ensayos que requieran condiciones de flujo uniforme (en este caso, la velocidad máxima es superior a 45 m/s, unos 165 km/h) y turbulencia muy baja;
- en la segunda, tras 10 m de longitud, se pueden estudiar problemas que requieran el desarrollo de una capa límite terrestre (un flujo controlado con un perfil de velocidades variable en altura y con el espectro de turbulencia adecuado y concordante en intensidad y escala de la misma). Para este último caso se disponen espiras y elementos generadores de rugosidad en la solera de la cámara. La cámara dispone de dos carros extraíbles, con mesa giratoria y sendos ventanales de acceso.

Los modelos a escala del prototipo que se pretenden ensayar deben cumplir, en general, con la condición de no superar un 10% de bloqueo. De lo contrario, el flujo alrededor del objeto se vería alterado de forma significativa, si no se efectúan las medidas correctoras de forma cuidadosa [30].



Figura 23. Cámara de ensayo (principal).

4.1.10 DIFUSOR 2 Y ENDEREZADOR 3.

Una vez el flujo abandona la cámara de ensayo, y con el objeto de reducir paulatinamente la velocidad para minimizar las pérdidas de carga por rozamiento en el conducto de retorno y por desprendimiento en el giro del circuito del túnel, se diseña un difusor con la particularidad de que está en curva; esta variación se materializa aumentando la distancia entre las paredes y descendiendo la solera a medida que se desarrolla la curva, hasta el encuentro con la sección tipo del tubo de retorno.

Nuevamente se ha preferido esta solución frente a la clásica de sucesión de difusores enlazados con esquinas a 90°, ya que tiene un comportamiento mucho más fino, a pesar de incrementar la dificultad de construcción. A diferencia de la primera curva, en esta sí se va a producir desprendimiento del flujo, debido sobre todo a la apertura del difusor y no tanto al radio de curvatura. Por este motivo se diseña un enderezador o guía que parte el difusor a la mitad en la dimensión vertical (Figura 24), comenzando prácticamente al inicio del difusor.

Adicionalmente, se construyen dos deflectores al final del difusor 2 (ver también Figura 29), con el objetivo de mejorar el reparto uniforme de velocidades en su salida. El funcionamiento de este diseño es satisfactorio, toda vez que se recupera parte de la energía cinética perdida en el difusor, en forma de un porcentaje de la presión en el tubo de retorno.



Figura 24. Difusor 2 en curva, con la guía central.

4.1.11 TUBO DE RETORNO Y TRANSICIÓN 2.

Finalmente, el tubo de retorno de sección aproximadamente cuadrada, igual a la sección del conducto de impulsión, devuelve el flujo a los ventiladores, terminando en un pequeño difusor (transición 2) para acoplar la sección del conducto tipo a la sección de la matriz de los 4 ventiladores (Figura 25).



Figura 25. Tubo de retorno.

Por motivos de seguridad, se ha colocado una reja que impida el paso a los mismos, añadiendo una red metálica que los proteja frente al posible impacto de cualquier partícula o elemento que se pueda desprender de los modelos situados en las secciones de ensayo.

Al igual que ocurría en el tubo de impulsión, se puede disponer de otra cámara de ensayo en este elemento (con velocidad de hasta 17 m/s, unos 60 km/h, al igual que en el tubo de impulsión), para lo cual se necesitaría de nuevo un “honeycomb” a la salida del difusor en curva. También aquí se disponen dos puertas o accesos al túnel.

4.1.12 CALIBRACIÓN INICIAL.

En cuanto a la campaña de calibración inicial, la uniformidad de la velocidad medida en las secciones críticas del túnel ha sido superior al 95%. Una primera aproximación de la intensidad de turbulencia medida en la cámara de ensayo principal es del 2 %.

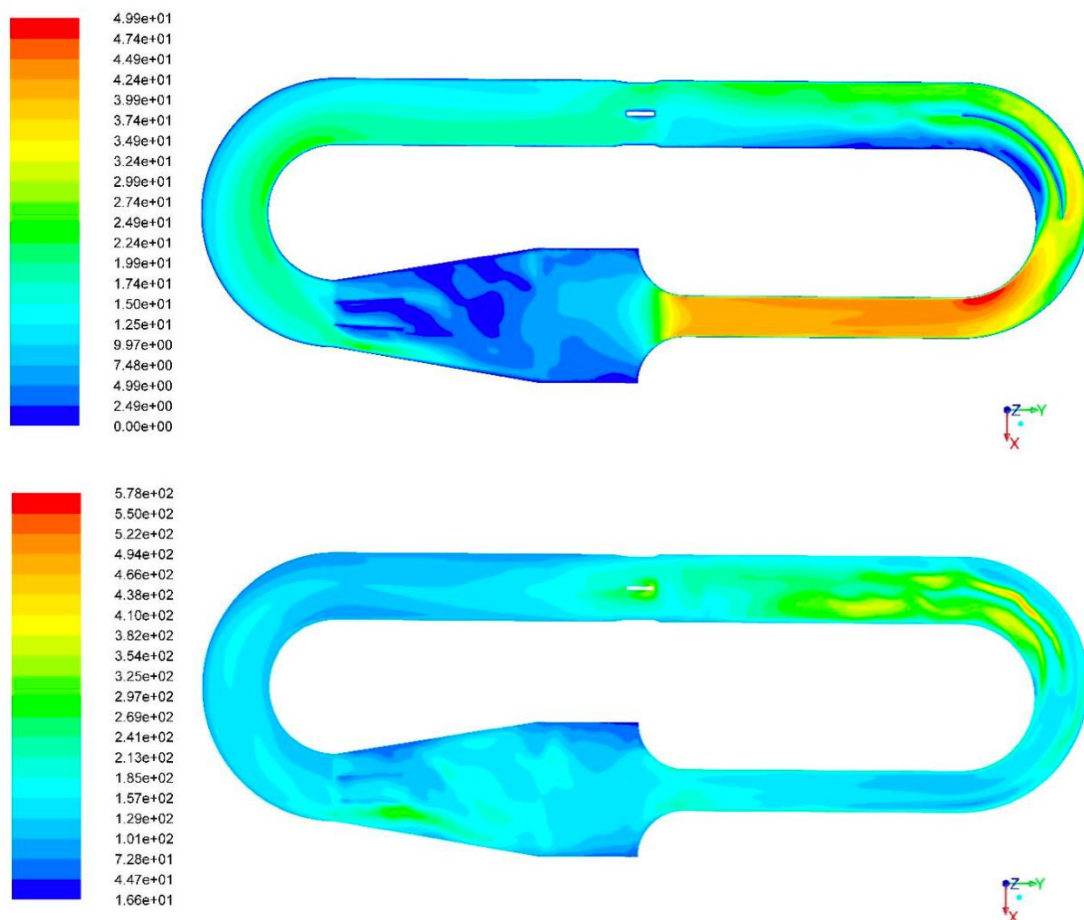


Figura 26. Simulaciones CFD, velocidades (arriba) e intensidad de turbulencia (abajo) por el plano medio horizontal a la altura de la cámara de ensayo.

Los números correspondientes a la simulación CFD [31] (Figura 26) no tienen en cuenta las correcciones efectuadas a posteriori en las guías de ambas curvas, ni la presencia de enderezadores, deflectores; en alguna de ellas, sí se ha considerado una pérdida de carga equivalente para simular el “honeycomb”.

Esta simulación se realizó con anterioridad a la construcción del túnel. La única modificación de calado sobre el diseño original que fue necesario hacer, consistió en separar los ventiladores de la salida del difusor 2. Con ello se disminuyeron las pérdidas de carga y se mejoró el comportamiento de los campos de presiones y velocidades a lo largo del circuito.

Los resultados analíticos siguen la metodología propuesta por [32] ajustándolas a nuestro diseño mediante las hipótesis recogidas en [33].

Por último, las pérdidas de carga se han medido (a la máxima velocidad nominal 50 m/s) con un manómetro digital, en varios puntos del desarrollo del túnel, confirmándolas para los tramos rectos con las fórmulas de Colebrook. Descripciones detalladas de la formulación se pueden encontrar en [34-38].

Se indica que estas pérdidas se han medido con dos grandes aperturas (una en la cámara de ensayo 1 y otra en la puerta 5) y sin el sellado del túnel acabado. Se muestran a continuación (Tabla 1) las pérdidas de carga (presión estática) medidas y las calculadas por medios analíticos y numéricos. Y la Figura 27 muestra la distribución del porcentaje de las pérdidas en cada elemento del túnel.

Tabla 1. Pérdidas de carga, comparación entre los distintos métodos.

% ΔP [Pa]	MESSUREMENTS	ANLYTICAL	CFD
TEST SECTION	-20,5%	-12,9%	-15,5%
DIFUSSER 2	-50,0%	-70,7%	-49,1%
RETURN	-2,8%	-1,5%	-5,4%
POWER PLANT	100,0%	100,0%	100,0%
IMPULSION	-11,4%	-1,6%	-4,5%
CURVE	-3,5%	-5,9%	-7,7%

% ΔP [Pa]	MESSUREMENTS	ANLYTICAL	CFD
DIFUSSER 1	-9,5%	-2,9%	-13,0%
HONEYCOMB	-1,1%	-3,7%	-3,2%
SETTLING CHAMBER	-1,2%	-0,1%	-0,6%
NOZZLE	0,0%	-0,8%	-1,0%
ΔP [Pa]	-880,8	-708,3	-950,6

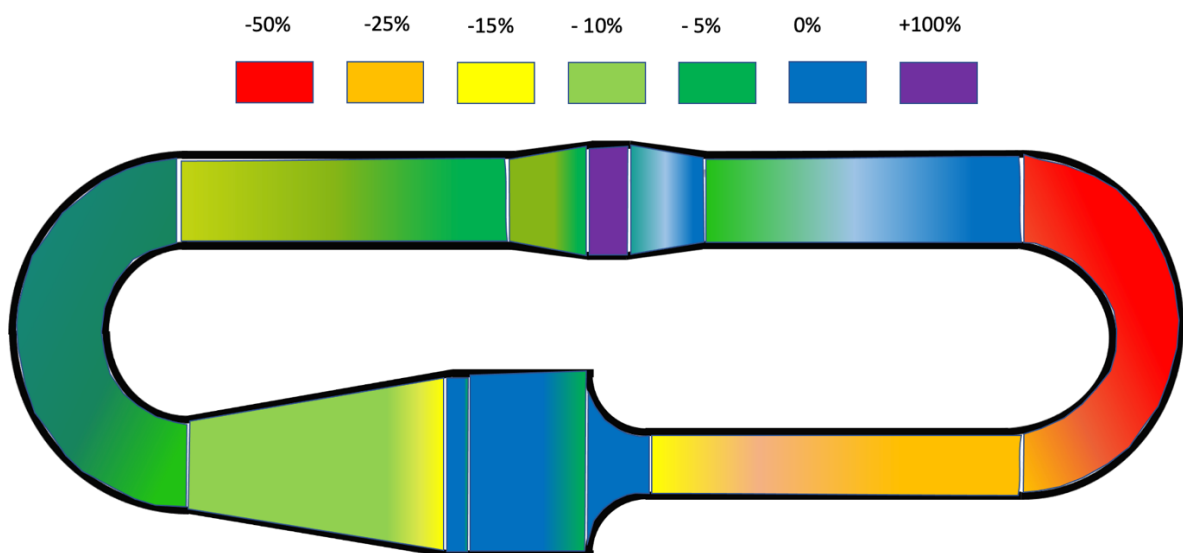


Figura 27. Porcentaje de pérdida de presión estática en cada elemento.

Las diferencias observadas se deben a varios factores, pero en general, demuestran el correcto diseño y lo que es más importante, un buen funcionamiento del túnel aerodinámico.

La siguiente gráfica en la Figura 28 recoge la línea de energía total, así como la presión estática y dinámica en el circuito, donde se puede comprobar el correcto funcionamiento del difusor 2. Se corresponden con las medidas experimentales realizadas con manómetro digital.

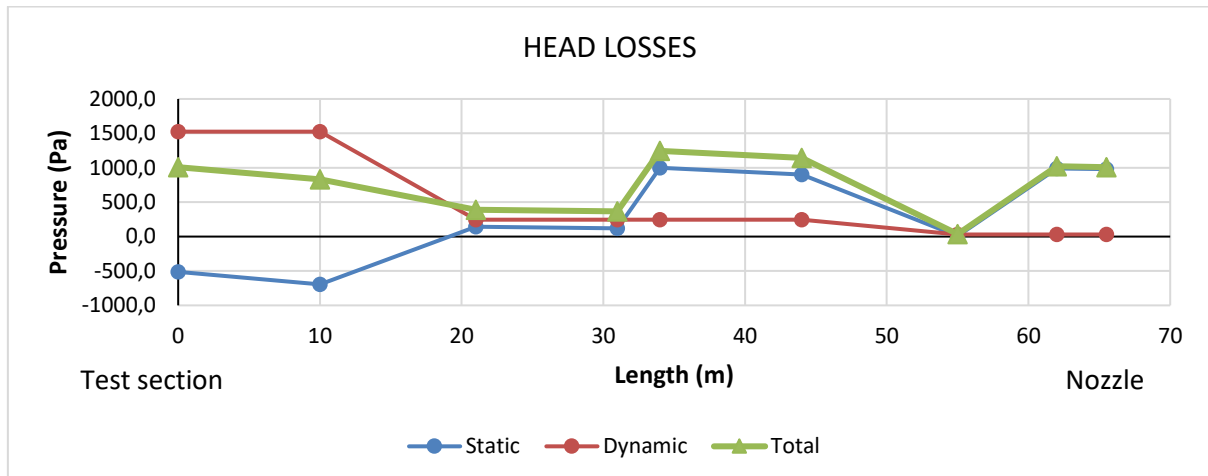


Figura 28. Líneas de energía y de presión medidas.

4.1.13 MODIFICACIONES POSTERIORES.

Una vez realizadas estas mediciones, se decide abordar un refinamiento de algunas de las partes del túnel. En primer lugar, y para recuperar en forma de presión la componente cinética circunferencial del flujo a la salida de los ventiladores se decide diseñar un estátor para cada ventilador, con 13 álabes fijos con ángulo variable entre 50 y 18 grados, de cubo a punta (Figura 29).

La recuperación de energía se estima en un 17,8% (157 Pa) y el aumento de velocidad en la cámara de ensayo es del 4%.

También es posible construir unos difusores a la salida de cada ventilador, partiendo la sección de la transición 1 en 4 canales, que independizan los 4 chorros de aire y limitan de forma apreciable la componente circunferencial del flujo impulsado, reduciendo las pérdidas de energía de forma significativa.

Esta solución produce una recuperación de unos 207 Pa de presión (23,5%), y que se puede traducir en un 5,3 % de incremento de velocidad en la cámara de ensayo. Una última ganancia de presión podría producirse si se aumenta la frecuencia del variador por encima de los 50 Hz, sin llegar al límite de potencia del motor (unos 225 kW).



Figura 30. Deflectores y modificaciones en guías y enderezadores (difusor 1, izqda. y difusor 2, dcha.).

Se han realizado también diversas simulaciones numéricas de detalle mediante CFD (Figura 31), con varias posibilidades para estos elementos, hasta alcanzar un compromiso entre calidad del flujo, minimización de pérdidas de carga y facilidad constructiva.

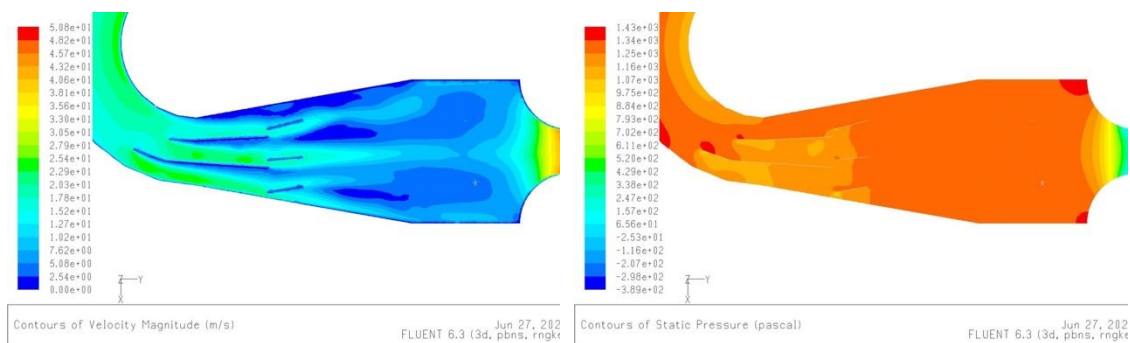


Figura 31. Simulaciones CFD de detalle de la curva, difusor 1 y cámara de remanso. Velocidades, izqda. y presión estática, dcha.

Estas modificaciones han mejorado sustancialmente la distribución de velocidades, a costa de introducir una pequeña pérdida de carga adicional, sobre la inicialmente prevista. La velocidad máxima es, además, función de los rendimientos mecánicos y aerodinámicos reales de los ventiladores. No obstante, las velocidades conseguidas en las cámaras de ensayo son suficientes para los estudios que se pretenden. En términos cualitativos, la velocidad en la cámara principal es suficiente para desplazar a una persona, ya que se está próximo a la velocidad de caída libre (unos 180 km/h).

4.1.14 CONCLUSIONES.



Figura 32. Vista panorámica del túnel.

Se desarrollan también las hipótesis y consideraciones que ha sido necesario realizar para el correcto dimensionamiento de todos los elementos.

Finalmente, las mediciones efectuadas en las pruebas de arranque del túnel han confirmado la bondad del diseño, así como todas las decisiones tomadas durante el proceso.

Un túnel aerodinámico es un equipamiento complejo, en cuyo diseño intervienen a partes iguales experiencia, precisión en los cálculos y economía. Nótese que las simulaciones numéricas por medio de CFD han servido únicamente para ultimar algunos detalles de su funcionamiento, pero nunca deben realizarse sin los sólidos conocimientos teóricos que se requieren ni dejar de contrastarse con los datos experimentales.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA

Con las 8 variables de fuerza, frecuencia, densidad y viscosidad del aire, velocidad de viento, longitud, inercia y rigidez ($F, f, \rho, \mu, U; L; I, K$) y 3 dimensiones básicas (M, L, T), se obtienen 5 números adimensionales. Se ha asumido que el amortiguamiento estructural es pequeño $C \ll 2 \cdot (KI)^{1/2}$, y que no influye en ese rango de valores. Tampoco se ha escalado la turbulencia del aire incidente, habiendo realizado los ensayos en flujo uniforme (turbulencia inferior al 1%).

Los números adimensionales típicos para fuerza, frecuencia y viscosidad (F, f, μ) son Euler, Strouhal y Reynolds, que representan, respectivamente, la fuerza sobre la estructura debida al viento, frecuencia de vibración del desprendimiento de vórtices debido al fluido, y la importancia de las fuerzas viscosas frente a las de inercia:

$$E_u = \frac{F}{1/2 \rho U^2 L^2} \quad (1)$$

$$S_t = \frac{fL}{U} \quad (2)$$

$$R_e = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3)$$

Para el momento de inercia y la deformación, se pueden elegir: la frecuencia reducida f_r (una variante del St), función de la frecuencia propia ω_0 (para una barra empotrada-libre a torsión) [39], y la variante del número de Euler para momentos E_{mom} , que sirve para definir el punto de aplicación de la fuerza:

$$f_r = \frac{\omega_0 L}{U} = \frac{\pi L}{2U} \sqrt{K/I} = \frac{\pi L}{2U} \sqrt{GJ/LI} \quad (4)$$

$$E_{mom} = \frac{K}{1/2 \rho U^2 L^3} \quad (5)$$

Igualando E_{mom} y f_r en el prototipo p y el modelo m , se obtiene:

$$K_m = K_p \frac{U_m^2 L_m^3}{U_p^2 L_p^3} \quad (6)$$

$$I_m = I_p \frac{L_m^5}{L_p^5} \quad (7)$$

La constante de torsión K_m del modelo determinará la relación de velocidades. Sin embargo, el momento de inercia está totalmente definido por la escala. En los casos estudiados, se han utilizado hasta tres materiales diferentes, uno para el eje de torsión y dos para el panel solar y su estructura de soporte, para conseguir la semejanza total entre modelo y prototipo. De esta manera ambos se comportarán igual, en valores reducidos (adimensionales) y de forma proporcional en valores absolutos, en todo momento y para todos los fenómenos ("galloping", vibración inducida por vórtices, divergencia torsional; en el caso del bataneo, se debería escalar la turbulencia también).

Para el fenómeno que nos ocupa, las oscilaciones del flujo y del objeto están íntimamente relacionadas, por lo que se puede afirmar que el caso analizado es totalmente no estacionario, demostrando los experimentos que se está fuera del rango de aplicación de la teoría cuasi-estática.

La Figura 33 muestran los detalles y variedad de los modelos a escala utilizados en los ensayos:



Figura 33. Detalles constructivos de los modelos.

La Tabla 2 recoge las características geométricas y estructurales de algunos los modelos a escala analizados:

Tabla 2. Características de los modelos.

Id	L (m)	b (m)	k (N·m)	I (kg·m ²)	ω_0 (Hz)
1	0.677	0.067	0.200	5.43E ⁻⁶	48.0
2	0.677	0.100	0.200	3.65E ⁻⁵	18.5
3	0.677	0.067	0.200	7.82E ⁻⁶	40.0
4	0.677	0.067	0.200	9.24E ⁻⁶	36.8
5	0.677	0.067	0.202	1.14E ⁻⁵	33.2
6	0.677	0.091	0.200	2.84E ⁻⁵	21.0
7	0.677	0.134	0.900	1.34E ⁻⁴	20.0

Los ensayos se han realizado con una configuración geométrica bien definida: aprovechando la simetría de la estructura, solo se ensaya medio “tracker” disponiendo un plano vertical en la sección de empotramiento o “driver”. Igualmente, se coloca otra pared en el borde libre, para eliminar los efectos de borde. El bloqueo de la sección es menor del 8% y ninguno de los dos bordes longitudinales del panel penetra en la pequeña capa límite que se comienza a desarrollar en el suelo de la sección de ensayo (Figura 34). Se ha tenido un especial cuidado además en el detalle de la cabeza del pilar, asegurando un rozamiento prácticamente nulo en el “torque tube”.

De esta manera, partiendo del panel de cada posición inicial θ_0 y al ir aumentando de forma gradual la velocidad del aire en la cámara de ensayo el modelo comienza a girar, con ángulo variable a lo largo del tubo, reproduciendo perfectamente el giro diferencial de cada panel, en función de su distancia a la sección de empotramiento (Figura 35).

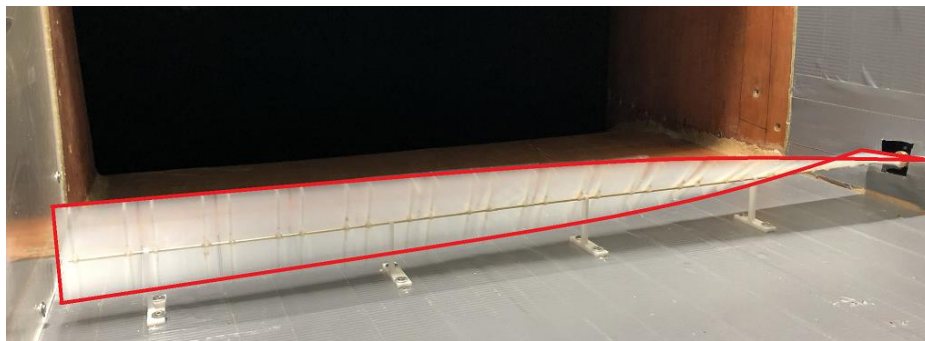
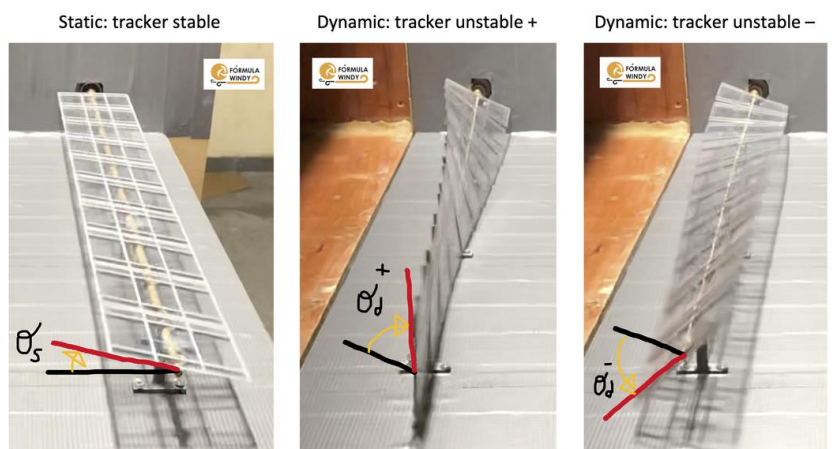


Figura 34. Ensayo de un “tracker” en el túnel aerodinámico.

Este comportamiento es radicalmente diferente al de placa plana con inclinación constante que se describe en toda la literatura, y se considera fundamental para la explicación del fenómeno.



FULL AEROELASTIC WIND TUNNEL TEST. ENERGY DEPARTMENT, UNIVERSITY OF OVIEDO. #formulawindy

Figura 35. Deformación torsional en el modelo.

Además, se ha comprobado en los experimentos la escasa influencia del valor de la amortiguación (para valores bajos de amortiguamiento) en las velocidades críticas de disparo de la inestabilidad. Por lo que se puede asumir que $\xi_m = \xi_p$, añadiendo a las leyes de semejanza el siguiente número adimensional:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{KI}} \quad (8)$$

Finalmente, el método de ensayo ha consistido en la medición sistemática, para ángulos de inclinación inicial, "tilt", en el rango operacional de los "trackers" (60° a -60°) de los momentos en el "driver", de los ángulos girados en el extremo libre y de las velocidades de galope. Para ello, desde una velocidad superior a la velocidad crítica de galope, se ha ido bajando la velocidad del flujo en escalones de 0,15 m/s aproximadamente

4.3 MODELOS DE SEGUIDORES SOLARES

Los modelos de los seguidores solares se diseñaron con el programa informático Sketchup, es un programa de diseño en 3D que contiene herramientas para diseñar formas y objetos al gusto, además de poder caracterizarlos poniéndoles distintas texturas y materiales para que sean más reales. Una vez ya se tiene el diseño se debe exportar a formato .stl para que sea compatible con la impresora 3D (Figura 36).

Una vez que se ya se tenía realizado el diseño y se exportaba el archivo a formato .stl, se necesitaba otro programa, este programa llamado Slic3r, permitía visualizar el diseño final de impresión y visualizar las diferentes secciones. Una vez que en este programa se visualizaba todo de forma correcta y el diseño estaba listo para imprimir, se establecían unas características de impresión en Slic3r: el grosor del filamento de la impresora, la densidad de las líneas, la temperatura del extrusor, etc. Por último, se exportaba el diseño a una tarjeta de memoria SD.

Una vez se tiene en la tarjeta SD el modelo listo para imprimir, se inserta la tarjeta en la impresora y esta lee el archivo para comenzar con la impresión del modelo. Para la impresión de los modelos se utilizó polímero termoplástico (PLA), este material lo hay de distintos colores.

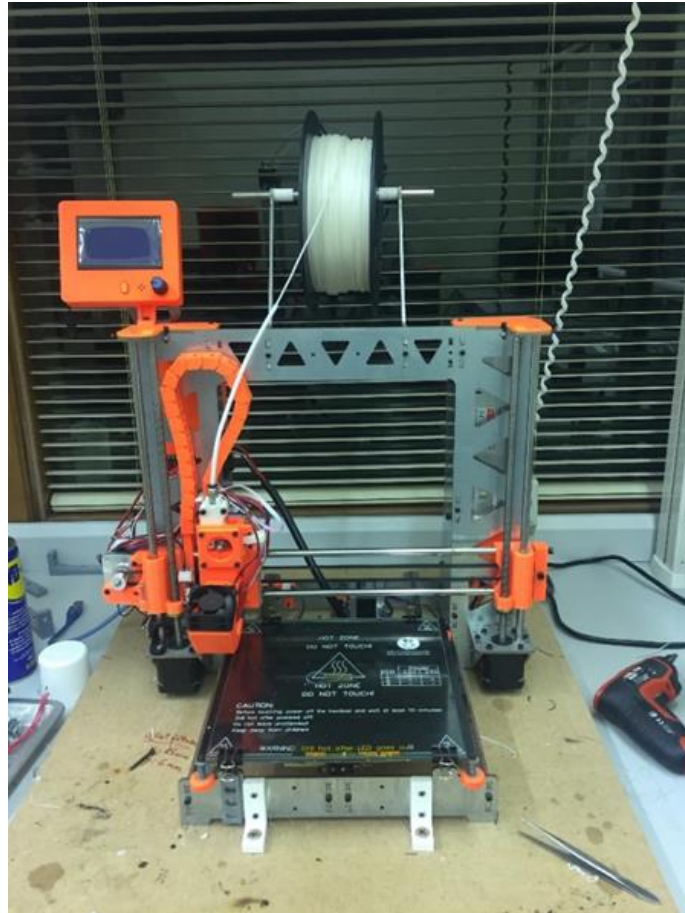


Figura 36. Impresora 3D en la que se imprimieron los modelos.

La impresión depende de la dificultad de la forma a imprimir, así como de los ajustes preestablecidos, la impresión completa suele tardar varias horas. Para imprimir el modelo de correctamente no fue suficiente con imprimirlo una vez, debido a desajustes en la impresora, errores con el filamento o simplemente que se terminase el material, se tuvo que imprimir varias veces el modelo hasta conseguir el resultado esperado. Una vez finalizada la impresión del modelo, se esperaba un tiempo a que se enfriara el filamento y se podía retirar la pieza de la impresora.

4.4 INSTRUMENTACIÓN

Tubo de Pitot: Se utiliza para determinar la distribución de la velocidad que se da en la cámara de ensayo. El tubo de Pitot se encuentra acoplado a un manómetro, pero en el de este túnel, el tubo es enlazado a un traductor electrónico de tal forma que los valores tanto de la velocidad, en m/s, así como de la presión, en Pascales (Pa), se obtienen directamente de este.

Manómetro: Un manómetro es un instrumento de medición que permite conocer la presión manométrica de un fluido que se encuentra encerrado en una superficie. La presión

manométrica se mide de forma relativa a la presión atmosférica. El manómetro utiliza la presión atmosférica como presión de referencia, ya que el 0 de la presión manométrica equivale a la atmosférica (Figura 37).



Figura 37. Instrumentación situada en el túnel aerodinámico.

Balanza y células de carga: La balanza permite medir las fuerzas a las que el modelo se encuentra sometido, cuenta con tres células de carga, encargadas de transformar dichas fuerzas en una señal eléctrica, y que son dispuestas en dirección perpendicular. La célula de carga que se encuentra en vertical es la que se encarga de medir la fuerza horizontal o el arrastre, con la suma de las dos células situadas en horizontal, se determina la fuerza vertical o sustentación. El momento es obtenido mediante la diferencia de valores de las células colocadas en horizontal. La balanza utilizada es de 5 kg (Figura 38).

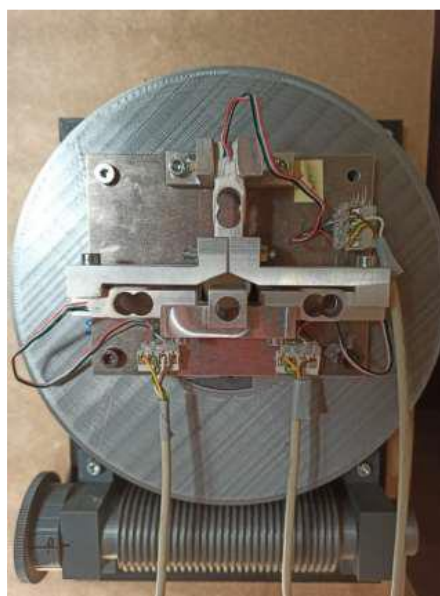


Figura 38. Balanza y células de Carga.

4.4.1 MONTAJE Y CALIBRACIÓN

Mediante la instrumentación disponible en el túnel aerodinámico es posible realizar los ensayos y obtener los resultados. La balanza anteriormente explicada, se encuentra conectada a un ordenador y a través del programa informático Matlab se realizan las lecturas del potencial eléctrico en Voltios (V). También se encuentra disponible en el túnel un manómetro, que será el encargado de determinar las velocidades (m/s) y las presiones (Pa) en los ensayos realizados.

Una vez que el modelo a ensayar está preparado, este se sitúa en la cámara de ensayo del túnel de viento. En general, la disposición de la maqueta en el túnel de viento debe realizarse de forma muy precisa, sin influir sobre la balanza, esta es muy sensible y un simple esfuerzo afectaría a los resultados obtenidos en los ensayos.



Figura 39. Modelo preparado en la cámara de ensayo.

El modelo ensayar, en general se sitúa sobre una varilla que puede ser de diferentes materiales, en la mayoría de los casos en una varilla de acero corrugado de un determinado diámetro. En el extremo donde se encuentra la balanza, se sitúa una arandela y una tuerca para fijar el modelo a la hora de realizar el ensayo.

La sujeción de la maqueta respecto a la balanza se realiza mediante una pinza metálica que se aprieta ajustándose lo más posible a la balanza. En algunos casos en los que se utilizan varillas de un diámetro, para que estas no se muevan demasiado en la balanza se hace uso de un tubo de plástico para que quede más ajustada la varilla en la balanza. La pinza se apretará completamente una vez que se compruebe que la maqueta está colocada completamente según la posición necesaria. Para comprobar las inclinaciones del modelo se utilizó un nivel tradicional.

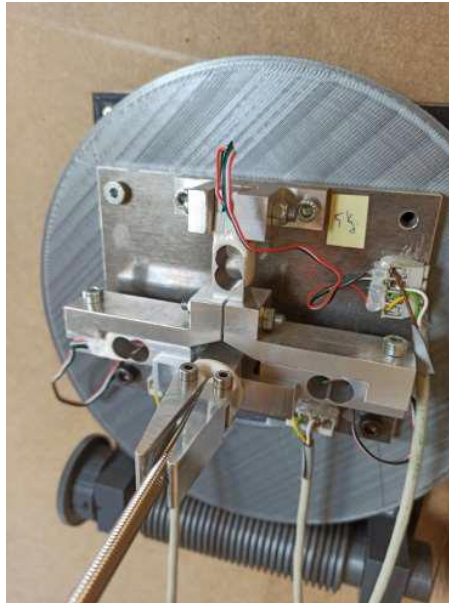


Figura 40. Fijación de la balanza y el modelo a ensayar.

Para comprobar la amplitud que sufre el modelo con las diferentes velocidades en los ensayos, se situó una plantilla en el lateral de la cámara de ensayo contrario a donde se encuentra la balanza. La plantilla se diseñó en AutoCAD y en ella se representan todos los ángulos formando un círculo completo.

A la hora de comenzar con los ensayos es imprescindible realizar la calibración de la balanza. Para la calibración se utilizan pequeños pesos, una báscula y un dinamómetro. La balanza cuenta con tres canales donde salen las señales en mVol, dichas señales las cuales deben transformar en unidades de fuerza, es decir, Newton (N).

Para realizar la calibración en estos ensayos en particular solo se calibra el momento, el cual fue determinado a partir de una fuerza en dirección vertical colocada a una distancia determinada.

4.4.2 CALIBRACIÓN MOMENTO

Para la calibración del momento se empleó un peso en forma de disco colgado de un pequeño alambre. Este peso se sitúa en el extremo del eje donde se encuentra la balanza, dicho alambre no se cuelga justo en el eje sino en una pieza impresa en 3D diseñado específicamente para dicho cometido. Para realizar la calibración el procedimiento consiste en aplicar una fuerza vertical cuyo valor se conoce a una distancia, que dará lugar al momento.

La matriz de calibración es la matriz que permite, transformar cualquier señal en mVol, procedente de los tres canales [ch] de los cuales dispone la balanza, a un vector de fuerzas en Newton (N).

5 EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

En el presente apartado se van a exponer los cálculos y resultados correspondientes al diagrama de estabilidad del tracker frente a galope, así como los datos obtenidos de los ensayos realizados a los diferentes modelos.

5.1 DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DEL TRACKER FRENTE A GALOPE

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos. Las primeras medidas que se obtienen para cada caso son las señales temporales del momento en el “driver”, y su correspondiente transformada rápida de Fourier (FFT), lo que permite calcular las frecuencias y amplitudes de las oscilaciones del “tracker” debidas a la acción del viento (Figura 41):

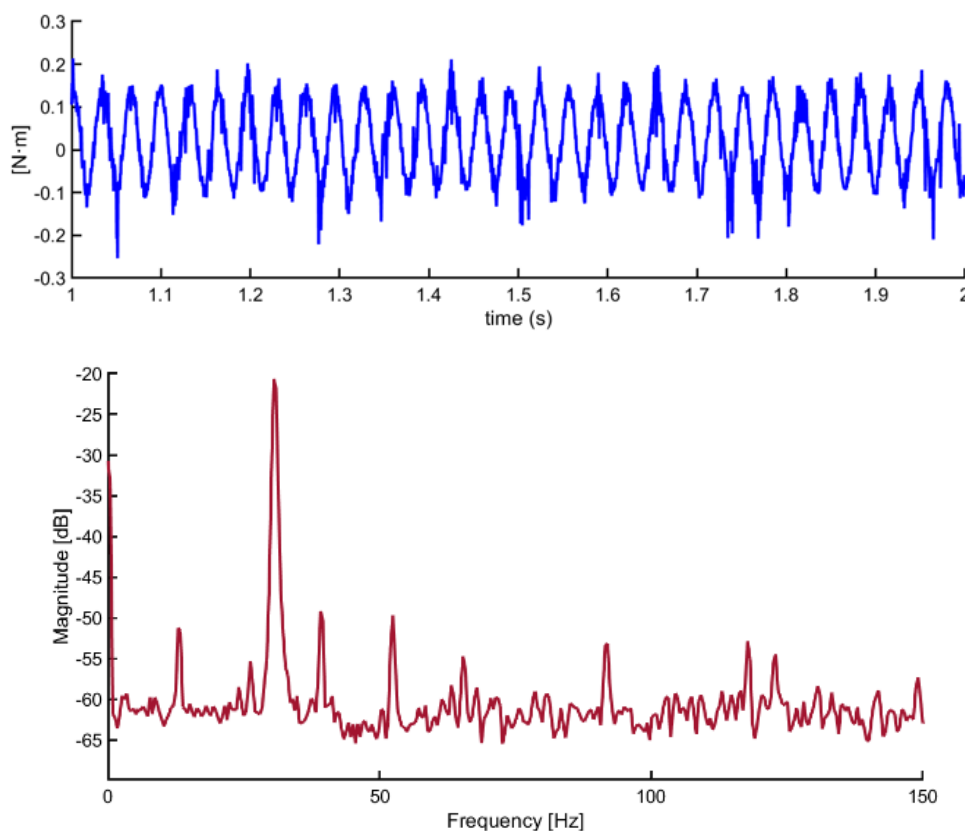


Figura 41. Modelo a 20° y 9,2 m/s.

Con estas curvas y la medida del ángulo girado en el extremo libre, es posible correlacionar las medidas de velocidades críticas de galope observadas con el comienzo de las ampliaciones de las oscilaciones (Figura 42) De hecho, estos datos permiten afirmar que el fenómeno que primariamente se produce (sin descartar que en algunos puntos singulares puedan aparecer otros) es el de “galloping” o flameo de un grado de libertad, dado que la oscilación tiene una frecuencia menor que el primer modo propio de torsión, comienza a partir de un determinado

umbral y mantiene amplitudes crecientes con la velocidad de viento hasta el colapso de la estructura.

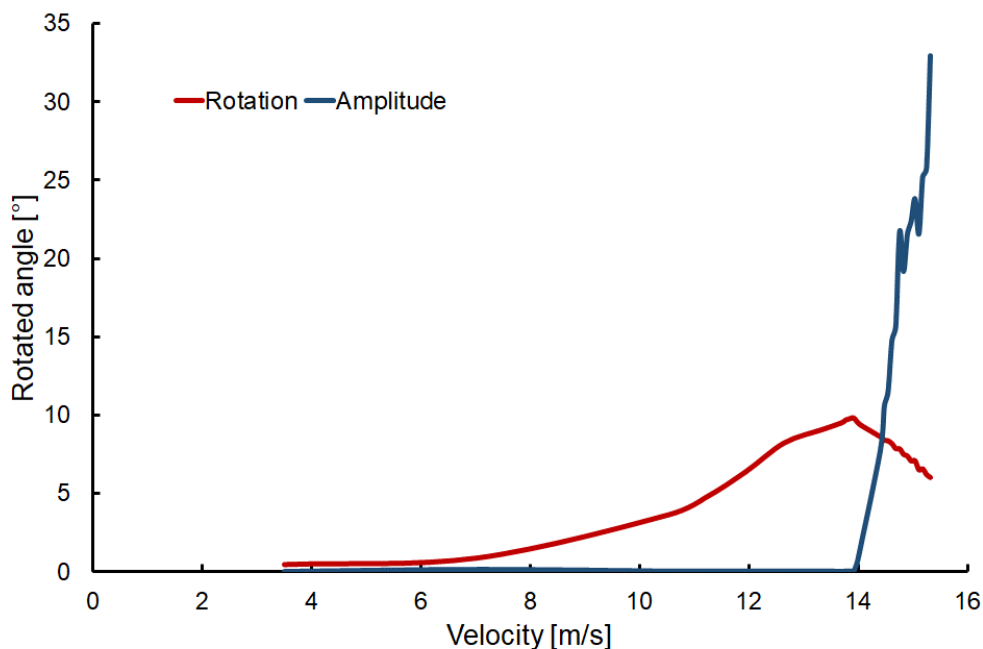


Figura 42. Modelo con un ángulo de 0°.

Con las curvas en el dominio de la frecuencia de cada seguidor, en función de la velocidad de viento, se pueden completar las cascadas de espectros (Figura 43) que identifican totalmente los fenómenos presentes, para cada ángulo de “tilt”.

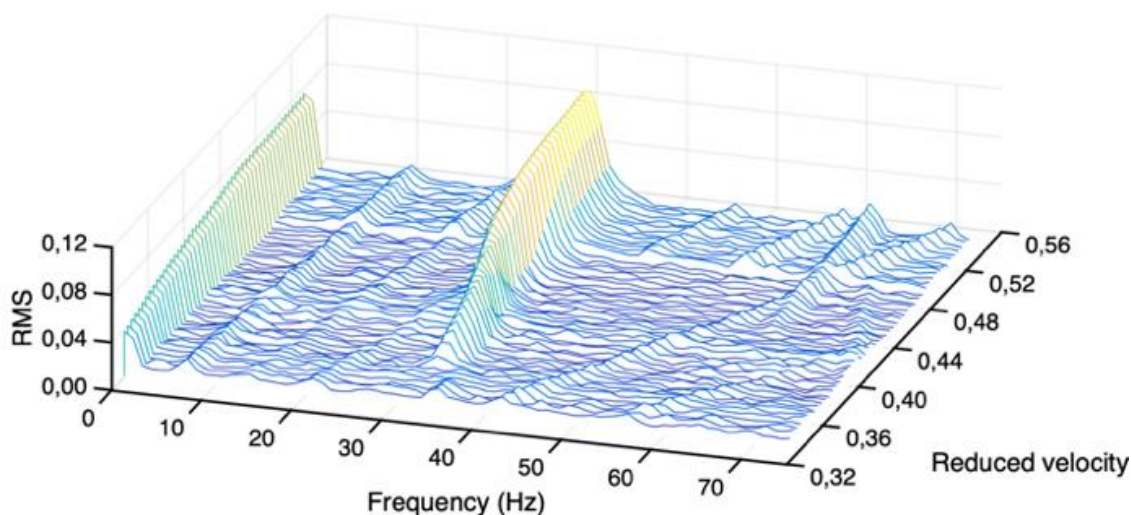


Figura 43. Cascada de espectros para modelo a 25°.

A continuación, se pueden dibujar las curvas de estabilidad (en velocidad absoluta) para cada “tracker” ensayado”, Figura 44:

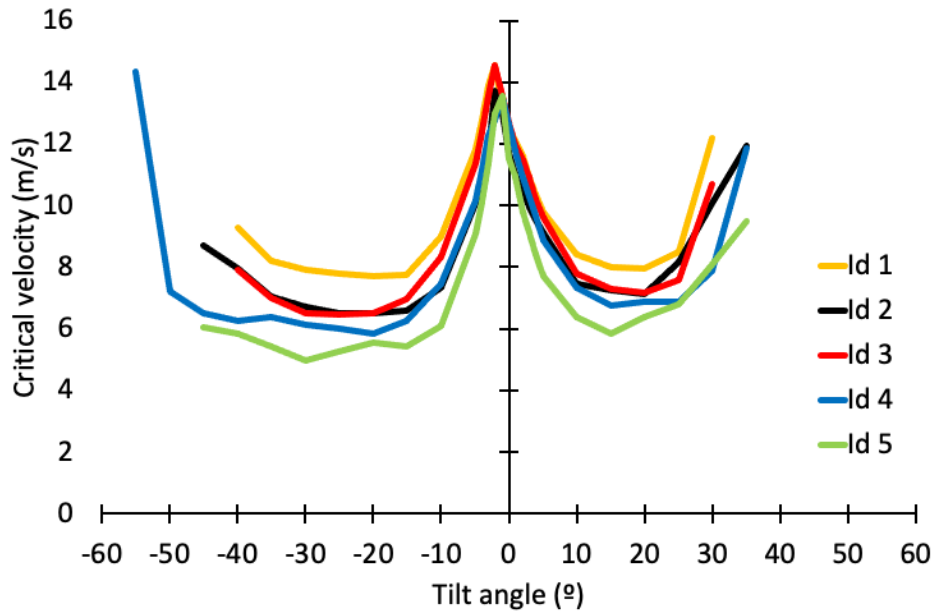


Figura 44. Velocidad crítica de galope.

Para comparar los distintos especímenes ensayados (recordemos, de momento todos semejantes), se utiliza el parámetro adimensionalizado de la velocidad, denominado velocidad reducida:

$$U^* = \frac{U}{b\omega_0} = \frac{U}{b} \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{I}{k}} \quad (9)$$

Redibujando las curvas de nuevo, se observa que, ya que todos los “trackers” tienen el mismo comportamiento, tienen entonces la misma velocidad reducida crítica de galope (Figura 45):

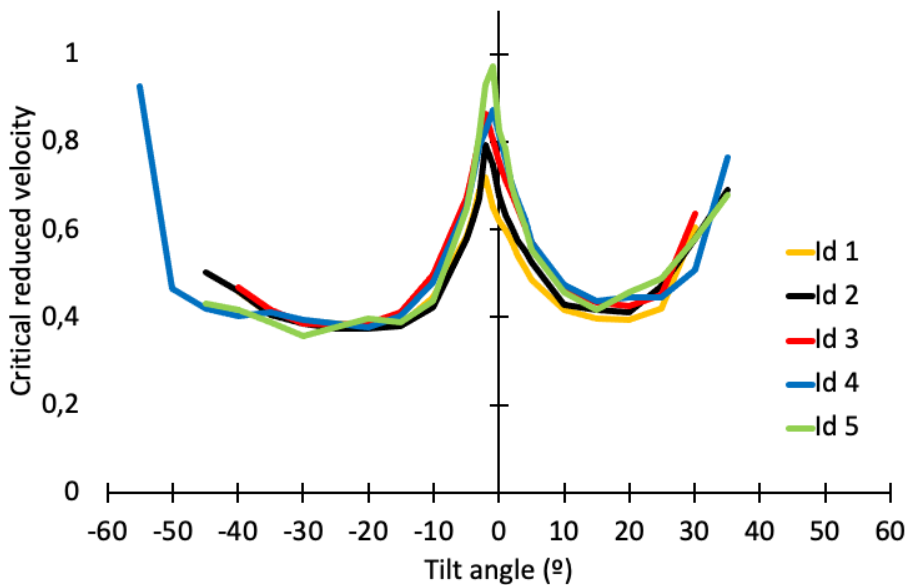


Figura 45. Diagramas de estabilidad de los modelos.

Esto implica la velocidad crítica de galope para un “tracker” concreto (prototipo), se puede calcular a partir del diagrama obtenido para un “tracker” semejante (i.e. un modelo reducido) ensayado en el túnel aerodinámico; y, además, como son semejantes, el comportamiento del prototipo será el mismo que el ensayado (en todo los aspectos, temporales y fenomenológicos):

$$U_{cr} = U_{cr}^* \cdot \frac{b \cdot \pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{k}{I}} \quad (10)$$

Todas estas consideraciones, se han apoyado también en modelos FEM y CFD calibrados con las medidas experimentales y validados mediante resultados de campo y campaña experimental adicional (Figura 46):

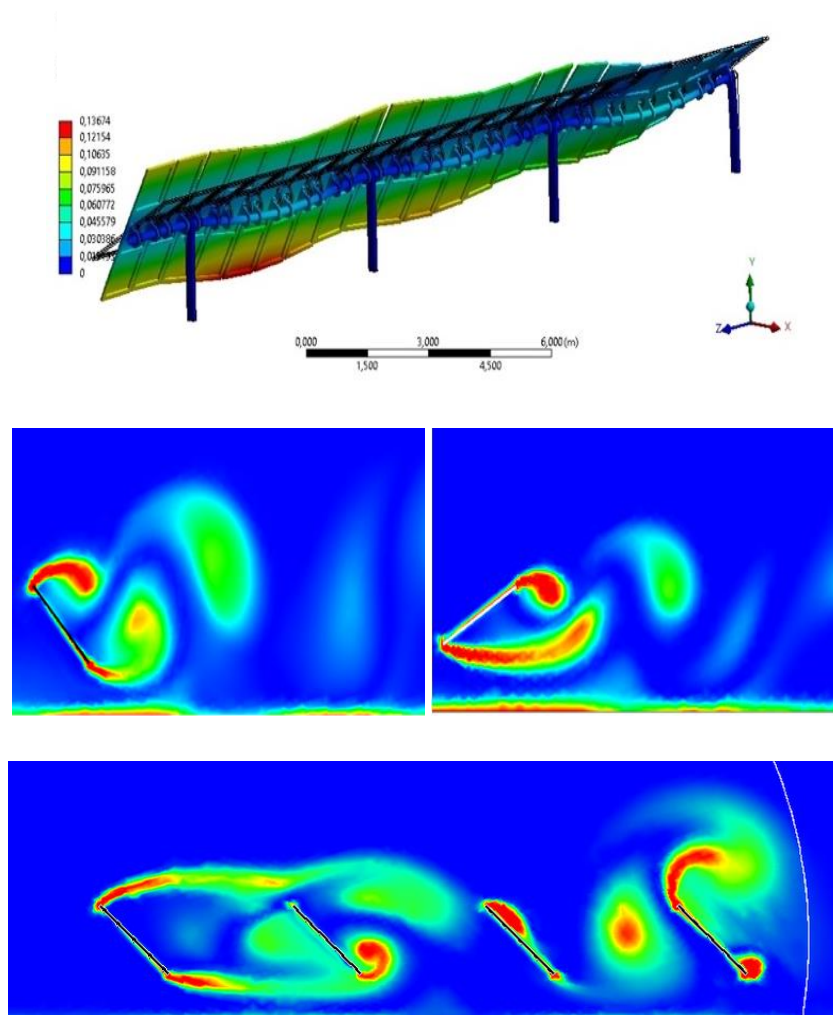


Figura 46. Modelos FEM y CFD.

5.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS A ESCALA ENSAYADOS

A continuación, se muestran varias de los modelos ensayados, aunque en el presente trabajo de fin de máster únicamente se va a hacer hincapié en 5 de los modelos. De algunos de los modelos no hay imagen, ya que en algunos casos un mismo modelo se ensaya de dos formas distintas cambiando el eje únicamente.



Figura 47. Modelos a escala diseñados.

Se va a realizar una breve explicación de los parámetros de diseño y sus objetivos de cada uno de los modelos.

- **ID 1:** este modelo no se encuentra en la Figura 46, ya que se utilizó la misma maqueta que para el modelo ID 3; como se puede ver la maqueta está construida con una base impresa en PLA y reforzada con celo. El objetivo del modelo era modificar la inercia respecto a ID 3, por ello primero se ensayó el de menor inercia (ID1) y luego se le añadió mayor cantidad de celo para aumentar la inercia (ID3).
- **ID 2:** este modelo es semejante/exacto al tracker real que se pretendía estudiar, en cuanto a geometría, rigidez, etc. Al ser un modelo exacto al prototipo, se comporta exactamente igual en todo. Es una maqueta realizada con celo y las bases impresas en PLA, cuyo eje es de acero.
- **ID 2*:** es una maqueta igual a la ID 2, únicamente se diferenciaban en que la presente maqueta tiene un eje de madera. Al realizar dos maquetas iguales, pero con ejes de distintos materiales se pretendía demostrar que el amortiguamiento estructural natural no afecta en los resultados, el comportamiento sería el mismo en ambas.

- **ID 3:** Explicada junto con ID 1 (misma maqueta).
- **ID 4:** esta maqueta fue impresa en 3D con PLA, su eje es de acero. En este caso no se cumple semejanza, inercia y relación de aspecto respecto al prototipo. Se ensayo para comprobar que se cumplía el diagrama (Figura 45).
- **ID 5:** esta maqueta fue impresa en 3D con PLA, su eje es de acero. Geométricamente es igual a la maqueta de ID 3, cambia el espesor. Esto se realizó con el objetivo de demostrar que el espesor no afecta en el comportamiento.

5.2.1 INFLUENCIA DEL AMORTIGUAMIENTO

Los ensayos de los modelos ID 2 e ID 2*, se realizaron con el objetivo de demostrar la influencia del amortiguamiento; por este motivo las dos maquetas son exactamente iguales en cuanto a geometría y características estructurales salvo en el amortiguamiento, madera y acero (5-1%).

A continuación, se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4 tal los resultados correspondientes a los modelos ID 2 e ID 2* cuya gráfica se puede ver en la Figura 45.

Tabla 3. Resultados del ensayo del modelo ID 2.

ID 2		
b [m]	0.1	
Fpropia[Hz]	18.50	
K [N·m]	0.2000	
I [m⁴]	3.6523E-05	
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
35	8.00	0.69
30	6.75	0.58
25	5.48	0.47
20	4.78	0.41
15	4.85	0.42
10	4.99	0.43
5	6.11	0.53
4	6.39	0.55
3	6.67	0.57
2	7.03	0.60
1	7.38	0.63
0	7.87	0.68
-1	8.70	0.75
-2	9.20	0.79
-3	7.80	0.67
-4	7.24	0.62
-5	6.74	0.58
-10	4.92	0.42

ID 2		
b [m]		0.1
Fpropia[Hz]		18.50
K [N·m]		0.2000
I [m ⁴]		3.6523E-05
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
-15	4.43	0.38
-20	4.36	0.37
-25	4.36	0.37
-30	4.50	0.39
-35	4.71	0.40
-40	5.34	0.46
-45	5.83	0.50

Tabla 4. Resultados del ensayo del modelo ID 2*.

ID 2*		
b [m]		0.1
Fpropia[Hz]		19.75
K [N·m]		0.1851
I [m ⁴]		2.8997E-05
ángulo tilt [°]	Vc[m/s]	Ur*
30	7.40	0.60
25	6.40	0.52
20	5.70	0.46
15	5.20	0.42
10	5.35	0.43
5	6.30	0.51
4	6.60	0.53
3	6.75	0.54
2	7.00	0.56
1	7.20	0.58
0	7.40	0.60
-1	7.60	0.61
-2	7.85	0.63
-3	8.20	0.66
-4	8.55	0.69
-5	9.10	0.73
-10	6.00	0.48
-15	4.90	0.39
-20	4.85	0.39
-25	5.10	0.41
-30	5.55	0.45

ID 2*		
b [m]	0.1	
Fpropia[Hz]	19.75	
K [N·m]	0.1851	
I [m⁴]	2.8997E-05	
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
-35	6.00	0.48
-40	6.90	0.56

5.2.2 INFLUENCIA DE LA INERCIA Y RELACIÓN DE ASPECTO

Una vez comprobado que trackers semejantes arrojan resultados idénticos en valores reducidos y proporcionales según las leyes de semejanza en valores absolutos, y una vez descartada la influencia del amortiguamiento estructural natural en los resultados de velocidad crítica, el siguiente paso fue construir maquetas no semejantes bien en geometría (relación de aspecto) o bien en características mecánicas (inercia) para comprobar la validez del diagrama de estabilidad en todos los trackers actualmente existentes en el mercado.

A estas conclusiones también se puede llegar a treves de formulaciones analíticas considerando ciertas simplificaciones o hipótesis y también utilizando modelo de CFD (como se indica en líneas futuras de investigación).

A continuación, se presentan en la Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 los resultados correspondientes a los modelos ID 1, ID 2, ID 3, ID 4 e ID 5 cuya grafica se puede ver en la Figura 45.

Tabla 5. Resultados del ensayo del modelo ID 1.

ID 1		
b [m]	0.067	
Fpropia[Hz]	48.00	
K [N·m]	0.2002	
I [m⁴]	5.4307E-06	
ángulo tilt [°]	Vc[m/s]	Ur*
30	12.20	0.60
25	8.50	0.42
20	7.95	0.39
15	8.00	0.40
10	8.40	0.42
5	9.80	0.49
4	10.35	0.51
3	10.90	0.54

ID 1		
b [m]		0.067
Fpropia[Hz]		48.00
K [N·m]		0.2002
I [m ⁴]		5.4307E-06
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
2	11.60	0.57
1	12.10	0.60
0	12.50	0.62
-1	13.15	0.65
-2	14.55	0.72
-3	13.90	0.69
-4	12.75	0.63
-5	11.80	0.58
-10	9.00	0.45
-15	7.75	0.38
-20	7.70	0.38
-25	7.80	0.39
-30	7.90	0.39
-35	8.20	0.41
-40	9.30	0.46

Tabla 6. Resultados del ensayo del modelo ID 2.

ID 2		
b [m]		0.1
Fpropia[Hz]		18.50
K [N·m]		0.2000
I [m ⁴]		3.6523E-05
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
35	8.00	0.69
30	6.74	0.58
25	5.48	0.47
20	4.78	0.41
15	4.85	0.42
10	4.99	0.43
5	6.11	0.53
4	6.39	0.55
3	6.67	0.57
2	7.03	0.60
1	7.38	0.63
0	7.87	0.68
-1	8.70	0.75
-2	9.20	0.79

ID 2		
b [m]		0.1
Fpropia[Hz]		18.50
K [N·m]		0.2000
I[m ⁴]		3.6523E-05
ángulo tilt [°]	Vc [m/s]	Ur*
-3	7.80	0.67
-4	7.24	0.62
-5	6.7440	0.58
-10	4.9175	0.42
-15	4.4258	0.38
-20	4.3555	0.37
-25	4.3555	0.37
-30	4.4960	0.39
-35	4.7068	0.40
-40	5.3390	0.46
-45	5.8308	0.50

Tabla 7. Resultados del ensayo del modelo ID 3.

ID 3		
b [m]		0.067
Fpropia[Hz]		40.00
K [N·m]		0.2002
I [m ⁴]		7.8202E-06
ángulo tilt [°]	Vc[m/s]	Ur*
30	10.70	0.64
25	7.60	0.45
20	7.15	0.42
15	7.30	0.43
10	7.80	0.46
5	9.60	0.57
4	10.20	0.61
3	10.90	0.65
2	11.50	0.68
1	12.00	0.71
0	12.70	0.75
-1	13.55	0.80
-2	14.55	0.86
-3	13.55	0.80
-4	12.40	0.73
-5	11.35	0.67
-10	8.35	0.50
-15	6.95	0.41

ID 3		
b [m]		0.067
Fpropia[Hz]		40.00
K [N·m]		0.2002
I [m ⁴]		7.8202E-06
ángulo tilt[°]	Vc[m/s]	Ur*
-20	6.50	0.39
-25	6.45	0.38
-30	6.50	0.39
-35	7.00	0.42
-40	7.90	0.47

Tabla 8. Resultados del ensayo del modelo ID 4.

ID 4		
b [m]		0.067
Fpropia[Hz]		36.8
K [N·m]		0.2002
I [m ⁴]		9.2393E-06
ángulo tilt[°]	Vc[m/s]	Ur*
35	11.85	0.76
30	7.88	0.51
25	6.88	0.44
20	6.88	0.44
15	6.76	0.44
10	7.34	0.47
5	8.85	0.57
4	9.65	0.63
3	10.30	0.67
2	10.92	0.70
1	11.78	0.76
0	12.65	0.82
-1	13.52	0.87
-2	12.78	0.82
-3	12.26	0.79
-4	11.14	0.72
-5	10.14	0.65
-10	7.45	0.48
-15	6.26	0.40
-20	5.86	0.38
-25	5.99	0.39
-30	6.13	0.40
-35	6.39	0.41
-40	6.26	0.40

ID 4		
b [m]	0.067	
Fpropia[Hz]	36.8	
K [N·m]	0.2002	
I [m⁴]	9.2393E-06	
ángulo tilt [°]	Vc[m/s]	Ur*
-45	6.51	0.42
-50	7.23	0.47
-55	14.34	0.93

Tabla 9. Resultados del ensayo del modelo ID 5.

ID 5		
b [m]	0.067	
Fpropia[Hz]	33.17	
K [N·m]	0.2023	
I [m⁴]	1.1382E-05	
ángulo tilt [°]	Vc[m/s]	Ur*
35	9.48	0.68
30	8.08	0.58
25	6.81	0.49
20	6.39	0.46
15	5.83	0.42
10	6.39	0.46
5	7.73	0.55
4	8.43	0.60
3	9.13	0.65
2	9.76	0.70
1	10.96	0.78
0	11.52	0.82
-1	13.56	0.97
-2	13.00	0.93
-3	11.38	0.82
-4	10.12	0.72
-5	9.06	0.65
-10	6.11	0.44
-15	5.41	0.39
-20	5.55	0.39
-25	5.27	0.38
-30	4.99	0.36
-35	5.41	0.39
-40	5.83	0.42
-45	6.04	0.43

5.2.3 RESULTADOS DEL DIAGRAMA DE ESTABILIDAD Y BANDA DE CONFIANZA

En esta tabla se presentan los valores del diagrama de estabilidad junto con su desviación, teniendo en cuenta los modelos anteriormente descritos (ID 1- ID 5) así como dos modelos más que se ensayaron. La Figura 48 muestra el diagrama de estabilidad que permite obtener la velocidad crítica de galope para cualquier tracker existente en el mercado.

Tabla 10. Valores de velocidad reducida de los 7 modelos ensayados.

Teta [°]	Acero_celo_1	AceroGovv_bis - Trans	Acero_celo_2	Modelo 03 acero	Modelo 04 acero bis	0.45 mm	Modelo 6mm acero - Trans_3 mm
	Ur [m/s]						
50					39.5	1	
45					37.5	0.88	
40					35	0.77	
35					31	0.63	
30	0.60	0.60	0.64	0.51	0.58	0.52	0.62
25	0.42	0.52	0.45	0.44	0.49	0.47	0.48
20	0.39	0.46	0.42	0.44	0.46	0.45	0.45
15	0.40	0.42	0.43	0.44	0.42	0.46	0.45
10	0.42	0.43	0.46	0.47	0.46	0.51	0.49
5	0.48	0.51	0.57	0.57	0.55	0.62	0.63
4	0.51	0.53	0.61	0.62	0.60	0.65	0.67
3	0.54	0.54	0.65	0.66	0.65	0.68	0.69
2	0.57	0.56	0.68	0.70	0.70	0.72	0.75
1	0.60	0.58	0.71	0.76	0.78	0.77	0.81
0	0.62	0.60	0.75	0.82	0.83	0.82	0.90
-1	0.65	0.61	0.80	0.87	0.97	0.88	0.98
-2	0.72	0.63	0.86	0.82	0.93	0.87	0.93
-3	0.69	0.66	0.80	0.79	0.82	0.79	0.83
-4	0.63	0.69	0.74	0.72	0.72	0.74	0.75
-5	0.58	0.73	0.67	0.65	0.65	0.67	0.69
-10	0.45	0.48	0.50	0.48	0.44	0.42	0.46
-15	0.38	0.39	0.41	0.40	0.39	0.38	0.42
-20	0.38	0.39	0.39	0.38	0.40	0.37	0.38
-25	0.39	0.41	0.38	0.39	0.38	0.36	0.38
-30	0.39	0.45	0.39	0.40	0.36	0.36	0.38
-35	0.41	0.48	0.42	0.41	0.39	0.37	0.41
-40	0.46	0.56	0.47	0.40	0.42	0.38	0.50
-45					-42.5	0.49	
-50					-45	0.55	
-55					-50	0.74	
					-55	0.99	

Tabla 11. Valores de la media y desviaciones típicas.

teta	Average Ur	desv_tip		Avg+ σ	Avg- σ
		%			
50				0.00	0.00
45				0.00	0.00
40				0.00	0.00
35				0.00	0.00
30	0.58	4.54	0.05	0.63	0.54
25	0.47	2.91	0.03	0.50	0.44
20	0.44	2.18	0.02	0.46	0.42
15	0.43	2.06	0.02	0.45	0.41
10	0.46	3.10	0.03	0.49	0.43
5	0.56	4.87	0.05	0.61	0.51
4	0.60	5.35	0.05	0.65	0.55
3	0.63	5.94	0.06	0.69	0.57
2	0.67	6.65	0.07	0.74	0.60
1	0.72	8.44	0.08	0.80	0.63
0	0.76	10.54	0.11	0.87	0.66
-1	0.82	13.46	0.13	0.96	0.69
-2	0.82	10.28	0.10	0.93	0.72
-3	0.77	6.16	0.06	0.83	0.71
-4	0.71	3.87	0.04	0.75	0.67
-5	0.67	4.24	0.04	0.71	0.62
-10	0.46	2.55	0.03	0.49	0.44
-15	0.40	1.40	0.01	0.41	0.38
-20	0.38	0.91	0.01	0.39	0.37
-25	0.38	1.46	0.01	0.40	0.37
-30	0.39	2.77	0.03	0.42	0.36
-35	0.41	3.35	0.03	0.45	0.38
-40	0.46	5.61	0.06	0.51	0.40
-45				0.00	0.00
-50				0.00	0.00
-55				0.00	0.00
			0.05		

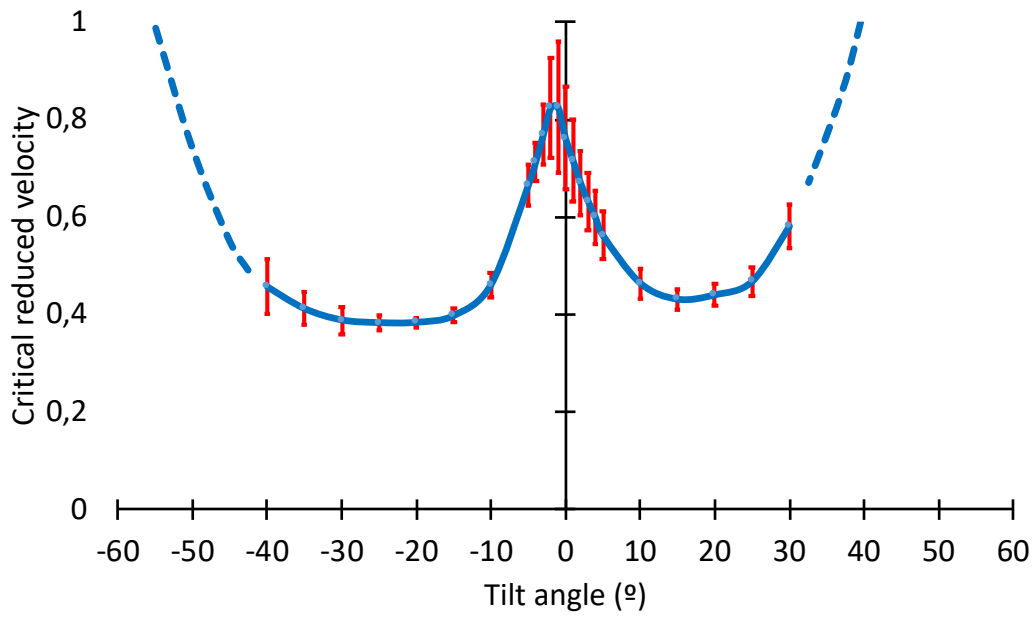


Figura 48. Diagrama de estabilidad del tracker.

Las relaciones de transformación que permiten calcular la velocidad crítica de galope para trackers no semejantes son:

$$I_2 = I_1 \frac{L_2}{L_1} \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^4 \quad (11)$$

$$U_2 = U_1 \frac{b_1}{b_2} \sqrt{\frac{k_2 L_1}{k_1 L_2}} \quad (12)$$

6 CONCLUSIONES

La potencia del método del “Diagrama de Estabilidad del Tracker” (Figura 48), investigación original y publicada por primera vez por el Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, radica en su capacidad para calcular la velocidad crítica de galope de los seguidores solares de un solo eje, con independencia de su relación de aspecto, rigidez del eje e inercia de la estructura.

Tras el completo “set” de ensayos (sobre modelos a escala geométrica, cinemática y dinámica, diseñados y construidos), y con un desarrollo analítico basado en la semejanza de modelos, se obtiene el valor límite de velocidad de viento (a través de la velocidad crítica reducida) en función del ángulo de posicionamiento o “tilt”. El método es válido para todo el rango de seguidores actualmente presentes en el mercado; y evita la laboriosa labor de obtener las derivadas de flameo de un modelo seccional y su posterior integración a lo largo de toda la estructura. También se obtienen las relaciones de transformación entre “trackers” no semejantes.

Las principales aportaciones y conclusiones proporcionadas por este trabajo son:

- La necesidad de utilizar un túnel aerodinámico (en este caso, de régimen subsónico y de flujo laminar) correctamente caracterizado, diseñado y construido de forma precisa. Este tipo de estudios requiere generalmente de la utilización de infraestructura avanzada, por equipos de trabajo especializados, sin caer en la tentación de extrapolar resultados desde otros estudios, sin un detenido análisis fenomenológico y metodológico. Si bien esos trabajos pudieran tener cierta relación, la complejidad de la materia exige un cuidado planteamiento de las hipótesis.
- Si los modelos han sido escalados correctamente, tanto en sus características geométricas como mecánicas, es posible obtener los valores correspondientes al prototipo. Además, para el caso de modelos no semejantes, se han obtenido las relaciones de transformación que permiten calcular el comportamiento del prototipo, al menos, en el punto de comienzo de la inestabilidad.
- Es imprescindible el uso de una instrumentación adecuada (rango, precisión, etc.). En este caso, además de un manómetro para la medida de la velocidad de viento (que incluye medida de la temperatura cuando el túnel es de circuito cerrado), anemometría de hilo caliente para la medida de la turbulencia en la cámara de ensayo, se ha utilizado una balanza de fuerzas diseñada y construida por el equipo investigador, que permite la

medida del momento en la sección de empotramiento o “driver”. También se ha empleado la grabación de video en alta definición para la medida de los ángulos de giro en el extremo libre. Finalmente, se ha desarrollado un código informático para el procesamiento de la gran cantidad de datos, realizar la FFT para el paso del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y el dibujo de las cascadas de espectros, que identifican de forma precisa el fenómeno y sus principales características fluido-dinámicas.

- El “Diagrama de Estabilidad” permite obtener entonces el valor de la velocidad crítica de galope para un “tracker” cualquiera, dentro de un intervalo de confianza, en función de la velocidad crítica reducida, del ancho (cuerda) del panel y de la frecuencia propia del primer modo de torsión (función, a su vez, de la rigidez del “torque tube” y de la inercia de la estructura). Este resultado es una cota inferior para dicho valor crítico en condiciones de turbulencia, y debe ser usado para viento incidente perpendicularmente al “tracker” y en configuración “monorow” (típicamente, el “tracker” de primera línea, en el medio de una fila).
- Se ha obtenido la optimización de los elementos fundamentales de la estructura, para una superficie de captación determinada (cuerda por envergadura o longitud); así como la justificación de las posiciones de defensa o “stow” más efectivas.

7 LÍNEAS FUTURAS

Como futuras líneas de investigación, actualmente en marcha, se puede mencionar las siguientes:

- Análisis del comportamiento de configuraciones “multirow” y con diversas direcciones de viento.
- Estudio exhaustivo de la influencia de los medios de amortiguación externa, y su repercusión en la naturaleza dinámica del fenómeno aeroelástico.
- Diseño de otras medidas correctoras que aumenten la velocidad crítica de galope en instalaciones ya construidas, tales como pantallas, barreras, bloqueos, alerones, etc.
- Análisis de la existencia de otros fenómenos aeroelásticos, tales como Vibración Inducida por Vórtices, “VIV”. Los ensayos realizados hasta el momento demuestran su concurso en algunos puntos específicos del diagrama, y su probable independencia del galope o flameo (Figura 49):

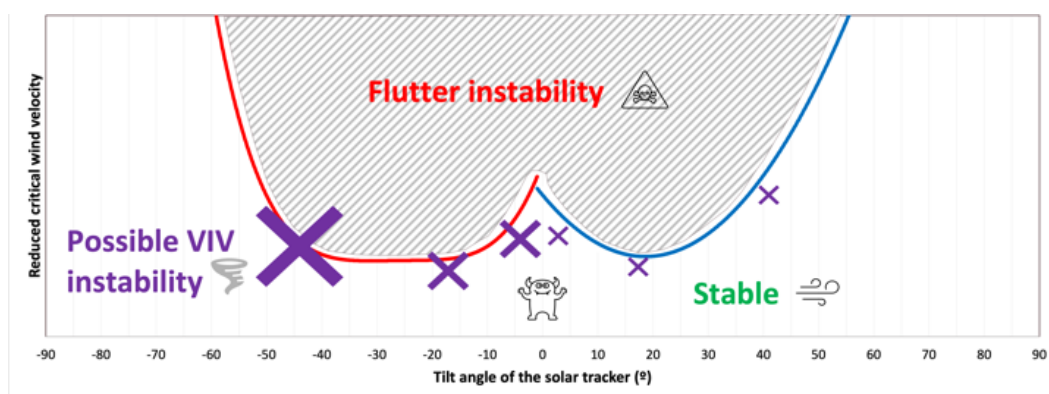


Figura 49. Regiones y puntos de inestabilidad.

- Investigación de la influencia de la flexibilidad propia del panel (en su plano), de la altura sobre el suelo del panel (este parámetro está actualmente estrechamente relacionado con la cuerda del panel).
- Construcción de modelos CFD que reproduzcan fielmente la interacción fluido-estructura.

8 REFERENCIAS

[1] Eva Martínez-García, Eduardo Blanco Marigorta, Jorge Parrondo Gayo and Antonio Navarro-Manso. "Influence of Inertia and Aspect Ratio on the Torsional Galloping of Single-Axis Solar Trackers", Engineering Structures (2021).

[Influence of inertia and aspect ratio on the torsional galloping of single-axis solar trackers](#)

[2] Wesoff E. Solar Trackers in Wind and the Terror of Torsional Galloping. PV Magazine USA; 2020. January 17th. <https://pv-magazine-usa.com/2020/01/17/dan-shugar-nextracker-ceo-on-solar-trackers-in-wind-and-the-terror-of-torsional-galloping/>.

[3] Lazard. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 12.0. Lazard, New York, USA; 2018. <https://www.lazard.com/media/450784/lazards-levelized-cost-of-energy-version-12-0-vfinal.pdf>.

[4] Energy Information Administration. Levelized Costs and Levelized Avoided Cost of New generation Resources in the Annual Energy Outlook. U.S. Energy International Agency; 2021. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.

[5] Talavera DL, Muñoz-Cerón E, Ferrer-Rodríguez JP, Pérez-Higueras PJ. Assessment of cost-competitiveness and profitability of fixed and tracking photovoltaic systems: the case of five specific sites. Renew Energy 2019;134:902–13. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf>

[6] Masson G, Kaizuka I. Trends 2019 in Photovoltaic Applications. (IEA) International Energy Agency; 2019. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-ie>

[7] Bahrami A, Onyeka Okoye C, Atikol U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. Renew Energy 2017;113:563–79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.

[8] Koussa M, Cheknane A, Hadji S, Haddadi M, Nouredine S. Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. Appl Energy 2011;88:1756–71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.002>.

[9] Lave M, Kleissl J. Optimum fixed orientations and benefits of tracking for capturing solar radiation in the continental. Renew Energy 2011;36:1145–52.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110003964?via%3Dihub>

[10] Galuppi L, Royer-Carfagni G. Enhanced Effective Thickness for laminated glass beams and plates under torsion. *Eng Struct* 2020;206:110077.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029619330433?via%3Dihub>

[11] Pickerel K. How the Solar Industry is Responding to the Increasing Intensity of Natural Disasters. *Solar Power World (SPW)* 2018, January 29th.

<https://www.solarpowerworldonline.com/2018/01/solar-industry-responding-increasing-intensity-natural-disasters/>

[12] Rohr C, Bourke PA, Banks D. Torsional instability of single-axis solar tracking systems. In: *Proc. 14th Int. Conf. Wind. Eng.* 2015, Porto Alegre Brazil, June.

[13] Willuhn M. Tracking in the wind. *PV Magazine Australia* 2019, September 7th.

<https://www.pv-magazine-australia.com/2019/09/07/long-read-pt-1-tracking-in-the-wind/>.

[14] Davenport AG. The buffeting of large superficial structures by atmospheric Turbulence. *Ann N Y Acad Sci* 1964;116:135–59. <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-6632.1964.tb33943.x>

[15] Jia J. Wind and structural modelling for an accurate fatigue life assessment of tubular structures. *Eng Struct* 2011;33(2):477–91.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029610004244?via%3Dihub>

[16] Pfahl A, Buselmeier M, Zschke M. Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers of various aspect ratios. *Sol Energy* 2011;85(9):2185–201.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X1100209X?via%3Dihub>

[17] Stathopoulos T, Zisis I, Xypnitou E. Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2014;125:195–206.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610513002821?via%3Dihub>

[18] [Miller RD, Zimmerman DK. Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields. Seattle, Washington: Boeing Engineering and Construction Company; 1981.](#)

[19] Kopp GA, Farquhar S, Morrison MJ. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted solar arrays. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2012;111:40–52.

<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.08.004>.

- [20] Strobel K, Banks D. Effects of vortex shedding in arrays of long inclined flat plates and ramifications for ground-mounted photovoltaic arrays. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2014;133:146–9. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.06.013>.
- [21] Simiu E. *Scanlan RH Wind Effects on Structures: Fundamentals and applications to design*. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd.; 1996.
- [22] Blevins RD. *Flow-Induced Vibration*. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Co.; 1990.
- [23] Seo D, Caracoglia L. Estimation of torsional-flutter probability in flexible bridges considering randomness in flutter derivatives. *Eng Struct* 2011;33(8):2284–96. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.016>.
- [24] Taylor ZJ, Browne MTL. Hybrid pressure integration and buffeting analysis for multi-row wind loading in an array of single-axis trackers. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2020;197:104056. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104056>.
- [25] Martínez-García E, Blanco-Marigorta E, Parrondo J, Navarro-Manso A. Experimental determination of the resistance of a single-axis solar tracker to torsional galloping. *Struct Eng Mech* 2021;78:519–28. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.78.5.519>
- [26] DYRBYE, C. & HANSEN, S.O. (1997). *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, Inc. New York (N.Y., U.S.A.).
- [27] FARREL, C. & IYENGAR, A.K.S. (1999). Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79. pg. 11-35.
- [28] METHA, R. D, & BRADSHAW, P. (1979). Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels. *Aero. Journal (Royal Aeronautical Society)*, 73. 443 pg.
- [29] RODRÍGUEZ, M., FERNÁNDEZ, J.M., GALDO, M., BLANCO MARIGORTA, E. & SANTOLARIA, C. (2013). Novel design and experimental validation of a contraction nozzle for aerodynamic measurements in a subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118. pg 35-43.
- [30] MASKELL, E. C. (1963). A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel. *R. & M.* 3400. November.

- [31] LAROSE, G.L. & D'AUTEUIL, A. (2006) On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. pg. 365-376.
- [32] AHMED, N.A. (2015). *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*, Edited by N. A. Ahmed, 2nd, ISBN-13: 978-953-51-1047-7.
- [33] VALLINA PITA, N. & NAVARRO-MANSO, A. (2018). *Diseño y Construcción de un Nuevo Túnel Aerodinámico para Aplicaciones de Ingeniería Civil y de Capa Límite Terrestre*, MEng. Thesis, Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, EPM – Universidad de Oviedo, 23-07-2018.
- [34] SKREBKOV, G.P. & LOZHKIN, S. N. (1985). Application of the LeShatelier principle to the calculation of a uniform flow in packed rods channels. *Teplofiz. Vys. Temp.*, vol. 23, nº. 4. pg. 748-753.
- [35] NIKURADSE, I. (1936). Laws governing turbulent flow in smooth tubes, in *Probl. Turbulentnosti*. M. A. Velikanov and N. G. Shveikovsky, Eds. ONTII Press. pg. 75-150.
- [36] TEPLOV, A. V. (1955). On the hydraulic calculation of asbestos-cement tubes. *Vodosnabzh. Sanit. Tekh*, nº 1. pg. 13-16.
- [37] ALTSHUL, A. D. (1982). *Hydraulic Resistance*. Nedra Press. Moscow. 224 pg.
- [38] NEKRASOV, B. B. (1954). *Hydraulics*. 290 pg.
- [39] [Rao SS. *Vibration of Continuous Systems*. New York: Wiley; 2007](#)

Otras fuentes consultadas para la realización de este trabajo son:

https://www.accion.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894 15, Enero de 2022

<https://www.edpr.com/es/esp%C3%B1a#photo-gallery> 5, Febrero de 2022

<https://climate.selectra.com/es/que-es/energias-renovables> 2, Mayo de 2022

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica> 25, Marzo de 2022

<https://www.otovo.es/blog/energia/que-es-la-energia-solar/> 26, Abril de 2022

<https://www.appa.es/appa-fotovoltaica/que-es-la-energia-fotovoltaica/> 30, Enero de 2022