



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

# **Diseño y construcción de un túnel de viento bidimensional**

**Autor:**

**Oliva Cajal, Hugo**

**Tutor:**

**Castro Ruiz, Francisco**  
**Ingeniería Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, 09/2020.**



## AGRADECIMIENTOS:

A mi tutor Francisco Castro por toda la ayuda prestada, el tiempo dedicado, consejos, correcciones y pautas, claves para la realización de este proyecto.

A a los dos técnicos del laboratorio José Ángel Moneo y Eric Sánchez por su colaboración.

A mis amigos por acompañarme durante estos años.

Y en especial a mi familia por ayudarme y apoyarme durante toda mi vida de forma incondicional.

Muchas gracias a todos.

## Contenido

Resumen y palabras clave.....	3
Resumen: .....	3
Palabras clave: .....	3
Abstract and keywords .....	4
Abstract:.....	4
Keywords:.....	4
Capítulo 1: Introducción y justificación .....	5
Capítulo 2: Estado del arte.....	6
Tipos de túneles de viento y sus elementos característicos:.....	6
Ventajas y desventajas.....	8
Clasificación según la velocidad de ensayo: .....	8
Visualización del patrón flujo:.....	9
Medición de la velocidad del fluido: .....	12
Impulsión de aire a lo largo del túnel de viento: .....	12
Capítulo 3: Prediseño .....	13
Requisitos de diseño: .....	13
Cálculos iniciales: .....	13
Simplificaciones: .....	15
Primer diseño conceptual .....	15
Segundo diseño conceptual:.....	16
Estructura de soporte: .....	17
Control de la velocidad de giro de los ventiladores:.....	18
Visualización del flujo de aire: .....	18
Capítulo 4: Diseño y construcción.....	19
Diseño .....	19
<b>Tapas superior e inferior</b> .....	19
<b>Tapas laterales</b> .....	20
<b>Tacos y chapas de los soportes</b> .....	20
<b>Estructura metálica</b> .....	21
<b>Estabilizador de flujo</b> .....	24
<b>Ventiladores y sistema de regulación de caudal:</b> .....	25

<b>Desplazador del sistema de visualización del flujo</b> .....	27
Construcción .....	30
Medición de la velocidad del aire en la cámara de ensayo: .....	31
Perfiles para ensayar en el túnel:.....	32
Iluminación para visualizar correctamente el flujo de aire: .....	34
Capítulo 5: Memoria de prácticas a realizar .....	36
Objetivo.....	36
Descripción de la instalación.....	36
Funcionamiento .....	36
Realización de ensayos .....	38
Presentación de resultados.....	39
Capítulo 6: Presupuesto .....	40
Capítulo 7: Conclusiones.....	41
Bibliografía .....	42
Anexo .....	44
Cálculos de Excel .....	44
Planos.....	47
Plano de todo el conjunto:.....	47
Planos de las paredes del túnel de viento: .....	48
Archivo CAD .....	49

## Resumen y palabras clave

### Resumen:

La tarea de diseñar y construir un túnel de viento surge por la necesidad de crear una práctica para alumnos donde se observe el desprendimiento de la capa límite en cuerpos aproximadamente bidimensionales de diferentes geometrías a bajas velocidades, para incorporarse a las existentes en la asignatura "Mecánica de fluidos". Se persigue, además, poder observar la transición del patrón de flujo de un cuerpo aerodinámico a romo, según se varíe el ángulo de inclinación. Para alcanzar este objetivo final se ha de diseñar, fabricar y poner a punto la instalación experimental y elaborar una memoria de prácticas para que sean realizadas por los alumnos en torno a esta actividad.

### Palabras clave:

*Perfiles aerodinámicos, visualización, cuerpos romos, túneles de viento, prácticas aerodinámicas.*

## Abstract and keywords

### Abstract:

The task of designing and building a wind tunnel arises from the need to create a practice for students where the detachment of the boundary layer is observed in approximately two-dimensional bodies of different geometries at low speeds, to join the existing ones in the subject "Fluid Mechanics". In addition, it is pretended to be able to observe the transition of the flow pattern of a streamlined body to blunt as the attack angle is varied. In order to achieve this final objective, the experimental installation must be designed, manufactured and set up and set up, also a practices memory needs to be carried out by the students around this activity.

### Keywords:

*Aerodynamic profiles, visualization, blunt bodies, wind tunnels, aerodynamic practices.*

# Capítulo 1: Introducción y justificación

Un túnel de viento es, a efectos generales, un conducto con la dimensión longitudinal mucho mayor que el resto de dimensiones, existiendo en su interior un flujo de aire y con una sección en la que se realiza algún tipo de ensayo.

Una de las aplicaciones de un túnel de viento es observar cómo se comporta un flujo de aire al bordear un cuerpo, así como observar los efectos que dicho flujo causan en el cuerpo (vibraciones, fuerzas...) mientras se pueden controlar las variables del aire que afectan en el comportamiento global como velocidad, temperatura, humedad, presión, etc. Esto permite analizar, de manera experimental, conceptos complicados de entender de forma teórica, tales como la línea de corriente, desprendimiento de la capa límite, estela, desprendimiento alternativo de vórtices... Una de las funciones de los túneles de viento es la obtención de coeficientes aerodinámicos de forma que se puede caracterizar cualquier cuerpo, ya sea como o aerodinámico, para saber qué resistencia ofrecen al paso de un flujo de aire, o para saber qué fuerza de sustentación generará un cierto perfil de un ala a una velocidad del aire en concreto. (NASA, 2017)

La tarea de diseñar y construir un túnel de viento surge por la necesidad de crear una práctica para alumnos donde se observe el desprendimiento de la capa límite en cuerpos aproximadamente bidimensionales de diferentes geometrías a bajas velocidades, para incorporarse a las existentes en la asignatura "Mecánica de fluidos". Además, se quiere poder observar la transición del patrón de flujo de un cuerpo aerodinámico a como según se varíe el ángulo de inclinación.

El objetivo, por tanto, de este TFG es el de diseñar un túnel de viento bidimensional y elaborar una memoria de prácticas que será realizada por los alumnos en torno a esta actividad.

## Capítulo 2: Estado del arte

### Tipos de túneles de viento y sus elementos característicos:

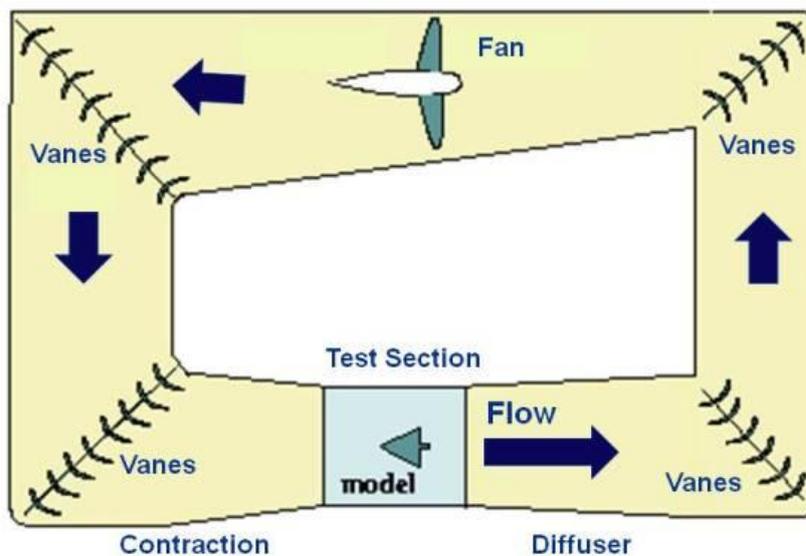
Hay varios tipos de túneles de viento. Podría hacerse una primera gran clasificación que consistiría en si es de flujo abierto o recirculado (Túnel de Prandtl) en función de si el aire que fluye por la cámara de ensayo recircula o no.

En la *Figura 1* se puede observar un esquema realizado por la NASA de un túnel de Prandtl que muestra los elementos más representativos de un túnel de viento de este tipo. Cabe destacar en este tipo de túneles de viento los deflectores (“Vanes” en el esquema). Estos deflectores, por lo general, son un conjunto de perfiles curvos que redirigen el aire en los giros del conducto para minimizar las pérdidas de carga del flujo. (NASA, 2015)

National Aeronautics and Space Administration

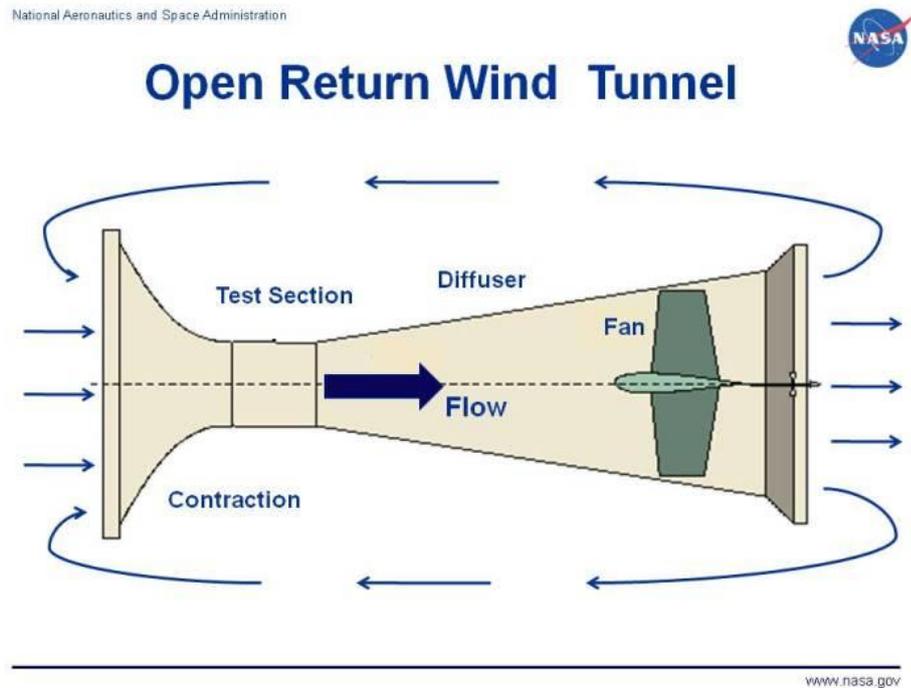


### Closed Return Wind Tunnel



*Figura 1. Esquema de un túnel de viento de tipo Prandtl.*

En la Figura 2 se muestra un esquema de un túnel de viento de flujo abierto. Las flechas indican que hay una parte de los gases que se recirculan al emplearse en recintos cerrados. (NASA, 2015)



*Figura 2. Esquema de un túnel de viento de flujo abierto*

Dentro de los dos tipos de túneles de viento, se pueden apreciar cuatro elementos que los caracterizan como tal. Estas son: la sección de contracción, la sección de ensayo, el difusor y ventiladores.

- **Sección de contracción:** es la parte por la que el flujo de aire, a medida que avanza por él, se acelera de manera que al entrar a la cámara de ensayo la velocidad es la máxima dentro del túnel.
- **Cámara de ensayo:** en ella se ubicará el cuerpo a ensayar y el flujo aquí debe de ser lo menos turbulento posible, por lo que la sección de la cámara de ensayo a lo largo de la misma permanece constante para no generar perturbaciones externas a las del ensayo.  
Es posible que la sección de ensayo sea abierta y, como tal, no haya una cámara de ensayo. Esto no aporta ninguna ventaja e introduce severos problemas como turbulencias descontroladas en el ensayo, por lo que no se le va a dedicar más tiempo a este tipo de túneles.
- **Difusor:** en esta parte ocurre el efecto contrario que en la entrada. El aire decelerará hasta que salga a la atmósfera de nuevo o alcance la velocidad del circuito de recirculación. El ángulo del difusor, respecto de la cámara de ensayo, será siempre menor que el de la sección de contracción, además será de mayor longitud.
- **Ventiladores:** son los elementos que mueven el aire a lo largo del túnel. Estos pueden ir colocados de forma que el túnel sea de impulsión o de aspiración, en

función de si están ubicados en la sección de concentración o en el difusor respectivamente.

## Ventajas y desventajas

A pesar de los puntos en común de los dos tipos principales de túneles de viento, existen diferencias tanto en la operatividad de los mismos como en su fabricación:

- Los túneles de flujo cerrado presentan algunas ventajas frente a los túneles de flujo abierto:

- Se consigue una calidad de flujo superior en la cámara de ensayo.
- Se reducen los costes de operación del túnel ya que los ventiladores solo deben aportar la energía perdida a lo largo del túnel, de manera que se ahorra energía porque los ventiladores no deben de acelerar el aire de manera constante.
- Debido a que se necesita menos potencia para operarlo, es un tipo de túnel más silencioso que los abiertos.

- Las principales ventajas que presentan los túneles de viento de flujo abierto frente a los de flujo cerrado son:

- El coste de fabricación es significativamente más reducido que el de uno de flujo recirculado.
- Es más fácil diseñar el mecanismo de visualización del flujo para que este se aprecie correctamente. Además, al no haber recirculación de aire dentro del túnel, no hay necesidad de diseñar un sistema de purga en contraposición a los de flujo cerrado, que sí lo necesitan para mantener el sistema en estado estacionario.
- Al contrario que en los de flujo cerrado, hay una renovación constante y casi completa del aire, por lo que no existe calentamiento de los mismos cuando se encuentra el túnel en funcionamiento, razón por la que no es necesario diseñar un sistema de refrigeración que extraiga la energía calorífica absorbida por los gases.

(NASA, 2015)

## Clasificación según la velocidad de ensayo:

Otro criterio de clasificación es la velocidad del aire en la sección de ensayo. Se pueden encontrar 4 tipos de túnel (WIKIPEDIA, 2020):

1. **Subsónicos:** la velocidad es más baja que Mach 1 a nivel del mar.
2. **Transónicos:** la velocidad es aproximadamente igual a Mach 1 a nivel del mar.
3. **Supersónicos:** la velocidad se encuentra entre Mach 1 y Mach 5 a nivel del mar.
4. **Hipersónicos:** la velocidad es superior a Mach 5 a nivel del mar.

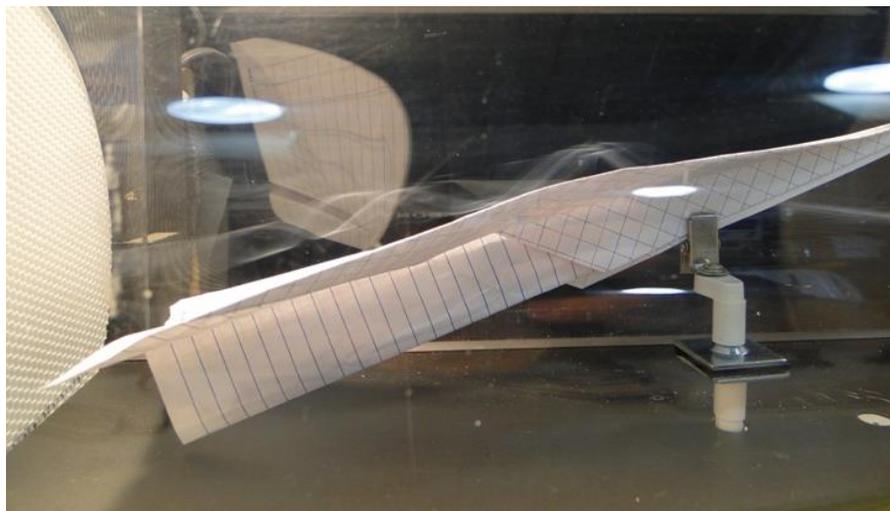
## Visualización del patrón flujo:

En caso de que el objetivo, o uno de los objetivos del proyecto, sea observar la interacción del flujo de aire con el cuerpo a ensayar, deberá de implementarse en el túnel algún sistema de visualización que permita conseguirlo. Para ello hay varias opciones en función de lo que se busque (WIKIPEDIA, 2020), (NASA, 2015):

### **A. En caso de querer visualizar el movimiento del aire alrededor del cuerpo a ensayar:**

- **Humo:** puede ser generado mediante reacciones químicas o simplemente inyectarse al sistema desde un recipiente en el que esté comprimido. Algunas formas de generar humo son a partir de tetracloruro de titanio y tetracloruro de estaño, el problema es la corrosión que estas sustancias producen. Se puede usar nitrógeno ya que no tiene efectos nocivos. Este sistema permite visualizar vórtices generados por la interacción del aire con el cuerpo al alejarse de este.
- **Partículas finas en suspensión:** funciona de forma similar al humo
- **Niebla:** se puede generar a partir de agua mediante algún tipo de nebulizador. Estos aparatos consiguen, mediante diferentes medios, nebulizar el agua de tal forma que se genera una columna de agua que podríamos asemejar a una nube, de manera que es posible visualizar su trayectoria.  
Existen principalmente dos tipos de nebulizadores: los que se basan en la impulsión a alta velocidad del aire, para que al encontrarse con el líquido se genere un aerosol, y los que funcionan mediante ultrasonidos. En este caso, una pieza que genera ultrasonidos provoca la formación y suspensión de las gotas del líquido nebulizado.
- **Sublimación:** se basa en la sublimación de algún tipo de compuesto como por ejemplo el CO<sub>2</sub> (hielo seco).

En la *Figura 3* se puede ver un ejemplo con humo de lo que se puede visualizar aproximadamente mediante cualquiera de los métodos descritos previamente.



*Figura 3. Visualización de flujo con humo. (NASA, 2015)*

- **Sistema Schlieren:** esta técnica de visualización se fundamenta en los cambios de dirección que experimenta la luz al encontrar cambios de densidad en un fluido. Este sistema de visualización se emplea para observar flujo alejado de la superficie del cuerpo ensayado.

En el esquema de la *Figura 4* se puede observar el mecanismo de funcionamiento de este sistema de visualización. En primer lugar, se emite luz a través de una ranura que se refleja en un espejo, después la luz atraviesa el aire que fluye alrededor del modelo y se cambia de dirección según los cambios en la densidad del aire. Posteriormente, la luz se refleja en otro espejo hacia una cámara y está almacena la información.

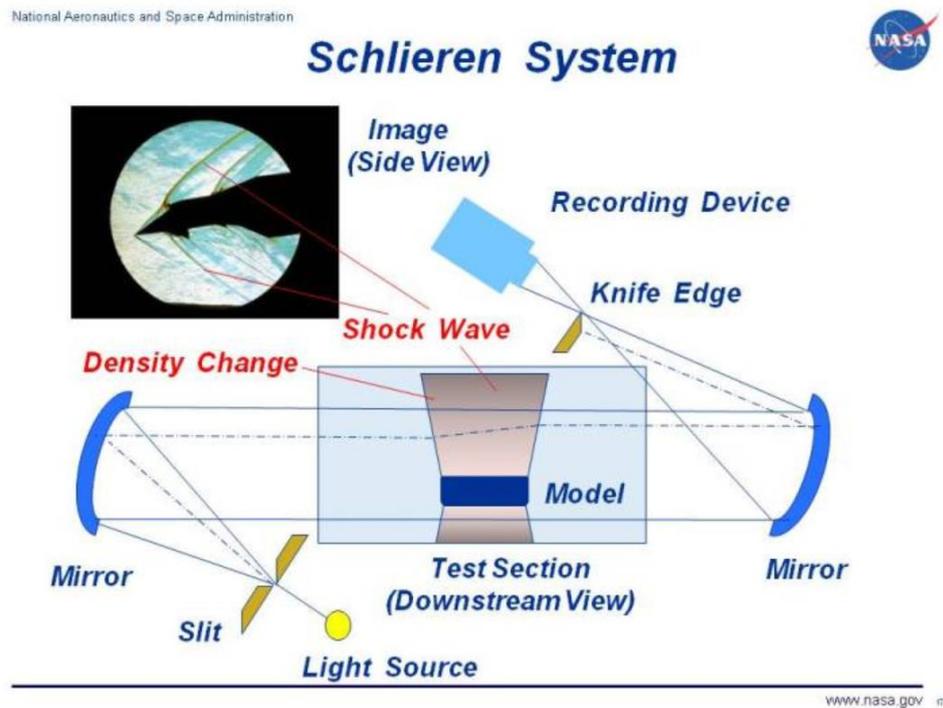


Figura 4. Sistema Schlieren. (NASA, 2015)

Puede ser interesante, e incluso necesario según el sistema de visualización, añadir algún sistema de iluminación en estos casos para poder visualizar con mayor detalle el flujo de aire. Para ello, se pueden utilizar focos dispuestos en lugares clave con la orientación adecuada para cada diseño de túnel. Es posible también instalar un dispositivo que emita una lámina láser, de manera que se puede visualizar con gran detalle lo que sucede en el plano de la pantalla.

Tanto la visualización con el sistema de luz como el de la pantalla láser, se basan en la reflexión de la luz en las partículas visibles inyectadas al túnel.

**B. Cuando el objetivo sea captar la interacción del aire con la superficie del cuerpo ensayado existen otras opciones:**

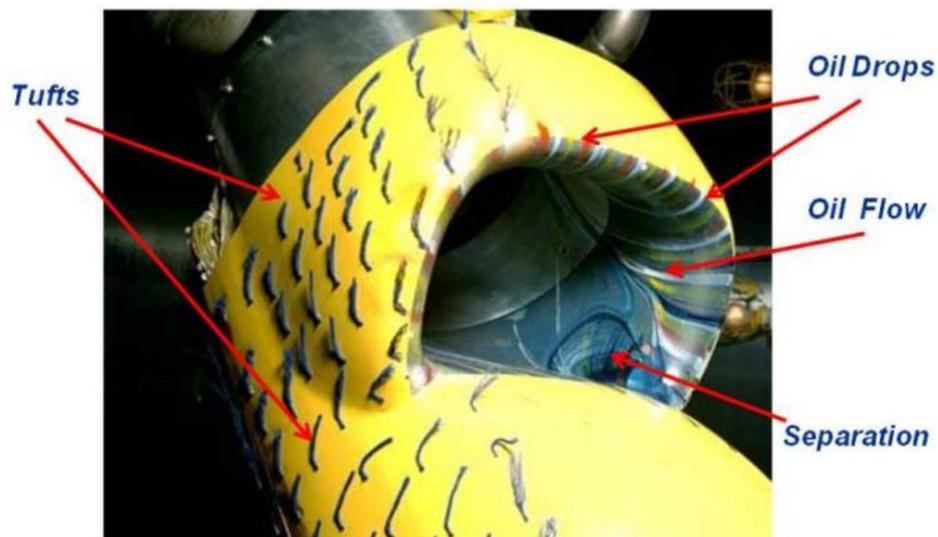
- **Pegar mechones a lo largo de la superficie del cuerpo:** este sistema de visualización consta de cordones o hilos deshilachados en el extremo libre adheridos al modelo con cinta adhesiva o pegamento en el otro extremo. Esto

permite observar el tipo de flujo que tiene lugar cerca de la superficie o si existe desprendimiento de la capa límite. La principal desventaja de este sistema es que interpretar la información proporcionada por los mechones requiere de experiencia y habilidad. En la *Figura 5* se puede observar cómo se colocan los mechones en un modelo con el que se está experimentando.

- **Untar la superficie del cuerpo con aceite:** el aceite empleado para esta aplicación es 40W al que se puede añadir aditivos con pigmentos, u otros compuestos, para variar sus propiedades en función de las necesidades que se planteen. La información que se consigue gracias a este método de visualización es dónde hay desprendimiento de la capa límite, ya que el aceite no puede avanzar más allá de este límite. El mayor inconveniente de este sistema es que es complicado de realizar y se necesita experiencia para llevarlo a cabo. En la *Figura 5* se puede apreciar cómo se ha añadido aceite de forma estratégica para obtener la información deseada y se puede observar que en la zona señalada hay una clara separación de la capa límite.

National Aeronautics and Space Administration

## Surface Oil Flow



www.nasa.gov

*Figura 5. Ensayo con sistemas de visualización de mechones y aceite. (NASA, 2015)*

- **Pintar la superficie con pintura sensible a la presión:** en este caso se emplea pintura que varía su color de acuerdo a la presión que sufre, de esta manera se puede saber qué zonas están sometidas a mayor o menor presión por el aire que fluye alrededor.

En estos casos, puede ser positivo añadir algún sistema de iluminación para poder visualizar mejor los efectos del flujo, aunque quizá no sea tan necesario.

## Medición de la velocidad del fluido:

El túnel deberá contar con un dispositivo en la sección de ensayo que mida la velocidad del aire en su interior, para ajustar con ello la velocidad de giro de los ventiladores hasta conseguir la necesaria. Algunas de las opciones más utilizadas son las siguientes (GIS IBÉRICA, s.f.):

- **Diafragma:** se basa en estrangular el flujo de aire de forma que se genere una pérdida de carga significativa al pasar por él, de manera que, midiendo la presión antes y después del mismo, se puede saber la velocidad del fluido.
- **Anemómetro ultrasónico:** obtiene la velocidad de movimiento del aire midiendo el tiempo que tarda en desplazarse el sonido por el mismo.
- **Anemómetro de hélice:** mide la velocidad aprovechando que la velocidad de giro de la hélice será proporcional a la del aire. Este tipo de anemómetros precisan estar bien orientados en la dirección del flujo de aire.
- **Anemómetro de cazoletas:** la velocidad de giro de las copelas será proporcional a la del aire. En este tipo de anemómetros no es necesario posicionarlo de cara al viento ya que recoge el mismo en 360°.
- **Anemómetro de hilo caliente:** este tipo de anemómetros obtienen la velocidad del aire midiendo las pérdidas de calor de una resistencia atravesada por el flujo de aire. Son adecuados para flujos de aire turbulentos y ofrecen una respuesta muy rápida.
- **Anemómetro de remanso (tubo de Pitot):** se basa en la medición de las presiones dinámica y estática de manera que, por comparación de ambas presiones, se puede obtener la velocidad del aire.

De todas estas opciones hay algunas de ellas apropiadas para altas velocidades, como el tubo de Pitot, y otras para velocidades más bajas como el anemómetro de hilo caliente.

## Impulsión de aire a lo largo del túnel de viento:

Un elemento imprescindible en un túnel de viento son los ventiladores. Estos pueden instalarse de diversas formas (uno por túnel o varios), ubicándolos en serie y/ o paralelo en función de las necesidades para conseguir los caudales que proporcionen las velocidades deseadas, teniendo en cuenta las pérdidas de presión propias de cada túnel. Los túneles de viento también deben poseer, antes de la cámara de ensayo, un estabilizador de flujo, es decir, una pieza que mitigará en la medida de lo posible las turbulencias del flujo para que este sea lo menos turbulento posible en la cámara de ensayo.

En cuanto al control de la velocidad de giro de los ventiladores para variar el caudal, hay dos opciones existentes para instalar en el túnel (Fernández, 2014):

- Variador de frecuencia
- Reóstato

## Capítulo 3: Prediseño

Con motivo de las ventajas que presentan los túneles de flujo abierto frente a los de flujo recirculado, se ha optado por diseñar uno de este tipo para este TFG. Además de ser un túnel de flujo abierto, se va a tratar de un túnel bidimensional ya que solo nos interesa el comportamiento del aire en un plano perpendicular al perfil. Las diferentes secciones del túnel serán rectangulares. Debido a que el túnel será de tipo bidimensional, la anchura será significativamente menor que la altura de la cámara de ensayo, ya que será la dimensión que no nos aporte resultados para los ensayos a realizar.

### Requisitos de diseño:

Para la construcción del túnel se deben de cumplir algunos requisitos que condicionarán su diseño y funcionamiento, tales como la utilización de algunos ya existentes en el laboratorio:

- Los ventiladores que moverán el aire a través del túnel serán 3 axiales de la marca ebm, modelo W2E200-HH38-01 con unas dimensiones de 225x225x80mm. que irán montados en toberas protegidas con rejilla y montadas en una placa de PVC, para evitar posibles accidentes.
- La sección de ensayo deberá de poder ser visualizada a través de una placa de metacrilato.
- El cuerpo a ensayar debe poder cambiarse mediante algún método que se implemente en la sección de ensayo
- El desprendimiento de la capa límite en la sección del cuerpo debe poder observarse correctamente
- Se deberá poder medir la velocidad del aire.

### Cálculos iniciales:

Para comenzar a diseñar el túnel, se han hecho algunos cálculos iniciales para definir los parámetros más importantes del túnel. Estos son las dimensiones de la cámara de ensayo. Para ello, en primer lugar, se ha establecido un espesor máximo del perfil que se ensayará de 30mm.

En la **Figura 6** se muestra un posible perfil a ensayar y se acota el espesor máximo que no deberá superar los 30mm.

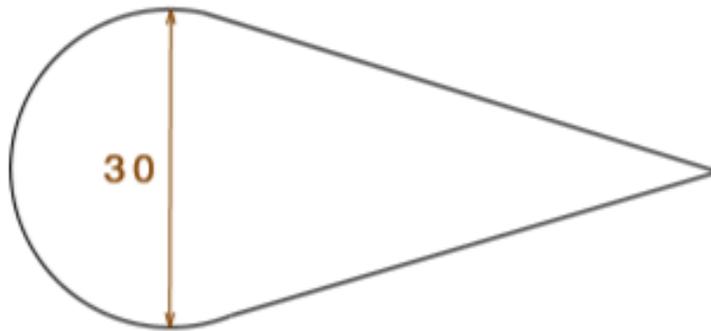


Figura 6. Ejemplo de posible perfil a ensayar

Se debe dimensionar la cámara de forma que no exista bloqueo en la sección de ensayo. Para ello, el área frontal del perfil a ensayar debe de ser como máximo un 10% del área de la sección. En el caso de este túnel de viento, el cuerpo a ensayar ocupa todo el ancho de la cámara de ensayo, de manera que el área frontal es 30mmxAnchura y el área de la sección  $Altura \times Anchura$ . Al hacer el cociente de estos dos productos, se elimina el factor Anchura y queda la siguiente expresión que debemos cumplir:

$$\nexists \text{ bloqueo si } \frac{30}{\text{Altura}} \leq 0,1$$

Se ha seleccionado (de forma que el túnel sea lo menos voluminoso posible) una altura de 300mm.

Al tratarse de un túnel bidimensional, la altura debe de ser mayor que la anchura. Con esta condición, se ha establecido una anchura de 150mm para la cámara de ensayo y una altura de 300mm. El diámetro hidráulico que resulta de estas dimensiones es, por tanto, de 200mm

En consecuencia, los datos definidos en estos primeros pasos del diseño han sido los de la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros de la cámara de ensayo.

Anchura de la sección ensayo (m)	0,15
Alto sección ensayo (m)	0,3
$D_{\text{hidráulico}}$ de la sección de ensayo (m <sup>2</sup> )	0,2
Área sección ensayo (m <sup>2</sup> )	0,045

Una vez establecidas las dimensiones con las que se va a construir la cámara de ensayo, se ha establecido que el número de Reynolds mínimo que deberá de darse para el flujo en la sección de ensayo es de 1000. Este número de Reynolds se empleará para obtener la velocidad mínima del aire en la cámara de ensayo de manera que, despejando la velocidad de la fórmula adimensional de Reynolds, obtenemos: (White, 2008):

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D}$$

De esta manera, la velocidad mínima del aire que deberá poder generarse en la cámara de ensayo por los ventiladores es de 0,5m/s.

Con estos cálculos realizados, se ha obtenido que el caudal mínimo del túnel de viento será 80,73m<sup>3</sup>/h, de manera que cada ventilador (los 3 ventiladores están colocados en paralelo) deberán mover 26,92m<sup>3</sup>/h.

### Simplificaciones:

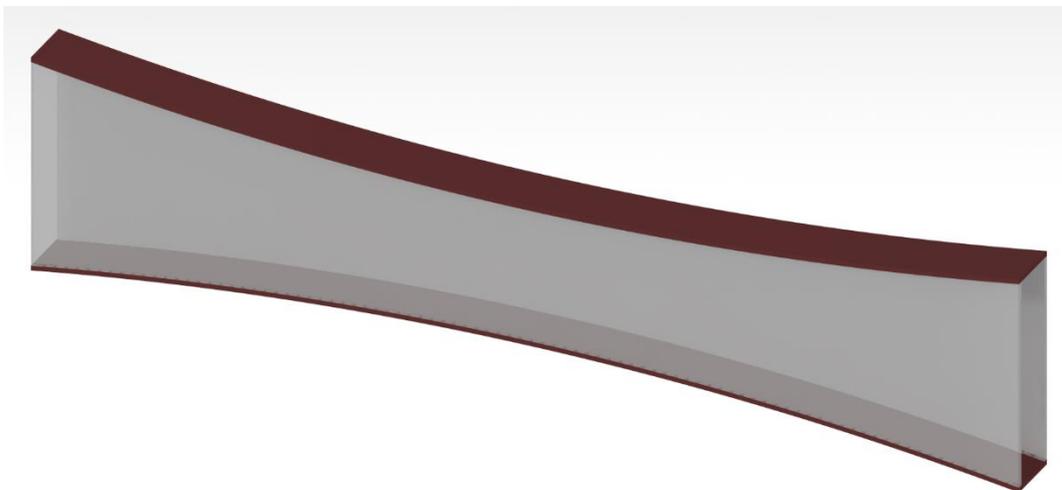
La velocidad máxima del túnel no deberá superar Mach=0,3 de forma que el flujo de aire, además de ser subsónico, se pueda considerar incompresible de acuerdo a lo estudiado en la asignatura “Mecánica de Fluidos”. Esto se demuestra posteriormente en el apartado “Ventiladores y sistema de regulación de caudal” del capítulo de diseño. La velocidad Mach 1 es la del sonido; para calcularla se emplea la siguiente fórmula:

$$M = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

Gamma ( $\gamma$ ) es el coeficiente de dilatación adiabático y se ha tomado para él un valor de 1,4, R es la constante de gases ideales y en cuanto a la temperatura (como no se puede saber exactamente la temperatura en la que se ensayará se ha tomado un valor estándar en interiores) se ha establecido en 20°C. Con estas condiciones la velocidad del sonido será 343,05m/s.

### Primer diseño conceptual

Una vez establecidas las dimensiones con las que se va a construir la cámara de ensayo, se ha realizado una primera propuesta para el diseño que hubiera consistido en dos arcos de circunferencia (como tapas superior e inferior) de 6,5m de radio de curvatura, encontrándose en la distancia mínima entre ambas, la sección en la que se hubieran ensayado los perfiles que se requieran. De largo, el túnel se ha dimensionado de 2m. En la Figura 7 se puede observar un esquema de la geometría propuesta.



*Figura 7. Primer boceto prediseño.*

Este diseño ha sido descartado antes de definir ninguna medida, además de las de la cámara de ensayo previamente mencionadas.

### Segundo diseño conceptual:

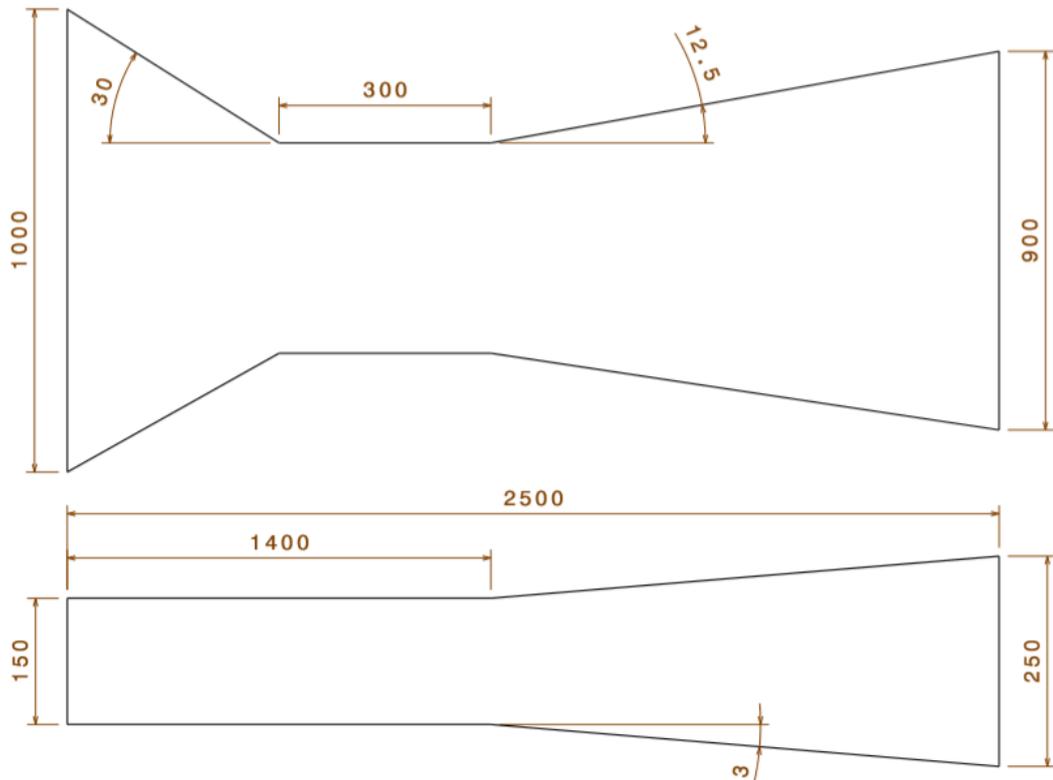
En esta revisión se ha decidido que las tapas superior e inferior del túnel deberán ser angulares. De esta forma será más sencilla su construcción y quedarán delimitadas de forma más evidente las secciones del túnel.

Debido a que la velocidad de giro de los ventiladores va a poder ser regulada, se podrán alcanzar caudales bajos a pesar de que las pérdidas de presión a lo largo del túnel no sean muy grandes. El caudal, que sí será condicionado por las pérdidas de presión que sufra el fluido en el túnel, será el máximo posible, por lo que, para que el túnel pueda alcanzar velocidades máximas lo más altas posibles, se deben minimizar las pérdidas de presión debidas a los cambios de sección (que es dónde podemos actuar de forma más sencilla). Para ello, deberán establecerse los ángulos más bajos que cumplan los requisitos de construcción, ya que son estos, junto a los diámetros hidráulicos, las variables que influyen en las pérdidas de presión. Las condiciones que se deben cumplir para establecer los ángulos son, por ejemplo, que sea posible que a la entrada haya una contracción del flujo no muy brusca y que, en el difusor, la sección se ensanche lo suficiente como para poder poner la placa en la que irán instalados los ventiladores. Además, los ángulos no podrán ser excesivos ya que, al doblar las placas, estas podrían romperse.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se ha establecido un ángulo del cono de entrada de  $60^\circ$  y un ángulo para el cono de salida de  $25^\circ$ . Estos ángulos no son definitivos, son solo unas condiciones iniciales para empezar a diseñar y serán ajustados posteriormente.

El ángulo que se ha establecido en la entrada es mayor que el de salida, como suele ser habitual. Esto es así debido a que, para las pérdidas de presión, el ángulo de salida de la cámara de ensayo es mucho más importante que el de la sección de contracción.

En un segundo diseño se ha realizado el siguiente prediseño (**Figura 8**) para empezar a hacer el diseño definitivo del túnel.



*Figura 8. Borrador prediseño.*

La parte de la tapa lateral en la sección de ensayo, por la que se observará el agua nebulizada alrededor de los cuerpos, será de metacrilato por varias razones. La principal es que el PVC transparente (material con el que se fabricará el resto de la tapa lateral) pierde transparencia, amarilleando con el tiempo, especialmente con el contacto con el agua, condición que se dará al ser utilizada agua nebulizada para la visualización del flujo alrededor de los perfiles. Además, el metacrilato permite (aun en perfectas condiciones del PVC) ver a través de él con mayor claridad de la que permite el PVC.

### Estructura de soporte:

Una vez establecido un prediseño de la forma que tendrá el túnel, se ha tenido que diseñar la forma en la que este iba a ser sostenido.

Se han planteado varias opciones:

- Construir un exoesqueleto que soporte la estructura, de manera que las placas no tengan ninguna función estructural.
- Construir una mesa sobre la que apoye la parte inferior del túnel.
- Sujetar el túnel por arriba y por abajo por varios puntos con una estructura metálica.

## Control de la velocidad de giro de los ventiladores:

Previamente se han comentado las dos formas que existen para regular la velocidad de giro de los ventiladores de forma que se varíe el caudal de aire impulsado a lo largo del túnel. En cuanto a la precisión y exactitud de los dos sistemas, es preferible el variador de frecuencia, pero es difícil encontrar variadores de frecuencia en el mercado para motores monofásicos. Respecto al coste, es mejor la solución de un reóstato ya que su coste es considerablemente menor.

## Visualización del flujo de aire:

Para la visualización del flujo de aire en el entorno de los perfiles a ensayar, se ha optado por emplear un nebulizador ultrasónico de agua. De esta forma se podrá observar la interacción del aire con el perfil. Al emplearse agua, en lugar de humo obtenido de reacciones químicas, se evitan riesgos para la salud y se consigue reducir costes frente a la utilización de nitrógeno o hielo seco.

Este sistema de visualización se deberá poder desplazar en vertical, de manera que se pueda visualizar el comportamiento del aire a diferentes alturas de la cámara de ensayo. Para ello, se ha planteado incorporar algún sistema de desplazador automático o manual basados en carriles V-Slot. El nebulizador y su desplazador, estarán ubicados a la entrada del túnel justo antes del estabilizador.

## Capítulo 4: Diseño y construcción

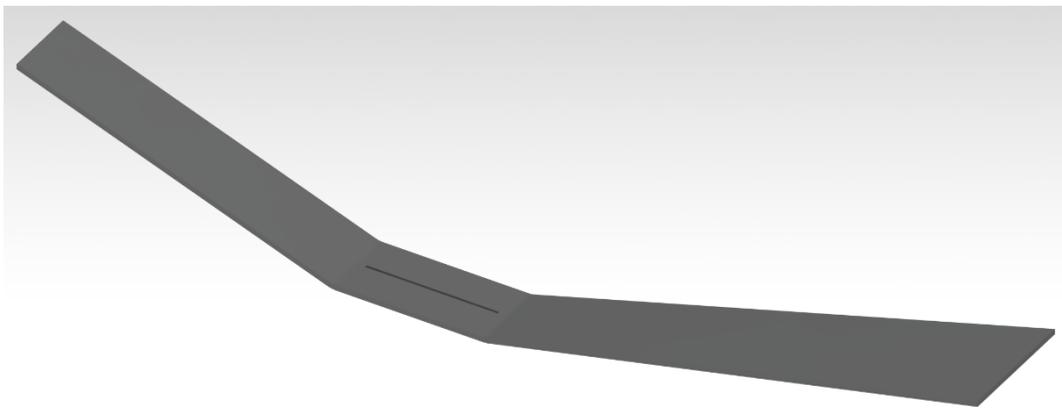
### Diseño

#### Tapas superior e inferior

En primer lugar, se han diseñado las tapas superior e inferior, las cuales son iguales y van a ir colocadas de forma simétrica en el túnel. Estas son las partes clave en el diseño del túnel y se han diseñado de acuerdo a los cálculos realizados para el dimensionado de la cámara de ensayo. De esta forma, el ancho de las mismas es de 150 hasta el final de la cámara de ensayo y, cuando se supera la zona de la cámara de ensayo, las tapas se ensanchan hasta alcanzar la dimensión que permite la instalación de los ventiladores W2E200-HH38-01.

En un principio, estas tapas iban a ser realizadas a partir de chapas de un grosor de 8mm y un largo de 2,5m que permitiera dimensionar el ángulo del difusor de salida algo menor.

Por facilidad y ahorro para adquirir las placas a partir de las que se van a fabricar las tapas superior e inferior, el diseño se ha adaptado acortando la longitud de la sección de concentración y del difusor, de forma que puedan ser obtenidas a partir de placas de 2m de longitud de PVC opaco de 10mm de espesor. La razón es que estas placas ya habían sido adquiridas previamente por el departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, abaratando así los costes de fabricación y reutilizando materiales.



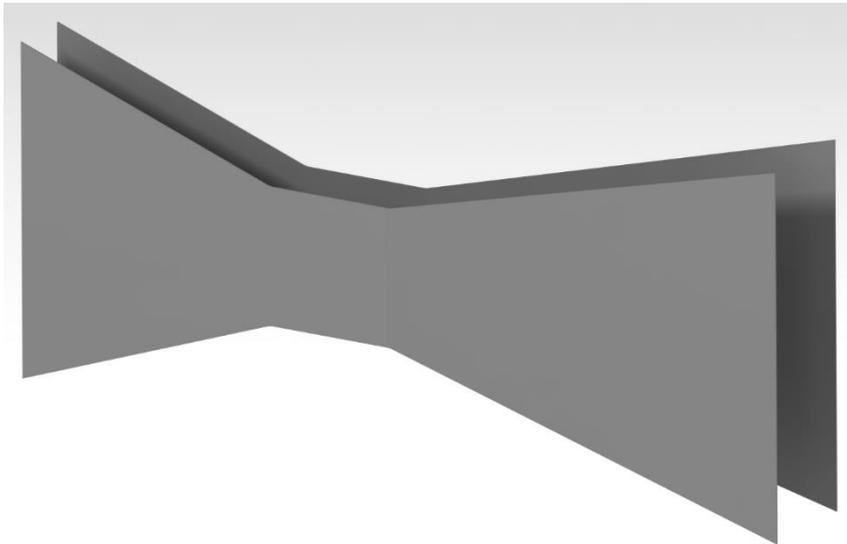
*Figura 9. Esquema de las tapas superior e inferior del túnel.*

En la Figura 9 se puede observar cuál ha sido el diseño final de las placas superior e inferior. Se han cumplido las dimensiones de los cálculos del capítulo anterior para obtener la cámara de ensayo y, teniendo en cuenta las dimensiones de la tapa en la que irán instalados los ventiladores, se ha modificado el ángulo del cono del difusor a  $29,875^\circ$  para que puedan instalarse los ventiladores. Debido a que la chapa irá doblada (y no cortada y ensamblada), el cono de la sección de ensayo no puede tener un ángulo excesivo para evitar que se rompa al doblarse.

En el diseño definitivo de la tapa superior, se ha incluido una ranura en cada una de las tapas por las que se iluminará el flujo de agua nebulizada para ver el desprendimiento de la capa límite. Esto se realizará mediante una pantalla de laser roja.

### Tapas laterales

Lo segundo en diseñarse han sido las tapas laterales atendiendo a los requisitos constructivos. En este caso, las dos tapas son simétricas en la forma que tienen pero son diferentes en su construcción. La tapa que queda en el frontal del túnel estará conformada por 3 piezas, dos de PVC transparente y la otra de metacrilato (que será la que quede a la altura de la cámara de ensayo). La tapa que quedará en la parte trasera del túnel, será hecha de una sola pieza de PVC transparente con un pliegue a la altura del cambio de sección del difusor. En la Figura 10 se puede observar la geometría que tendrán las placas una vez cortadas y dobladas.



*Figura 10. Renderizado de las tapas laterales.*

### Tacos y chapas de los soportes

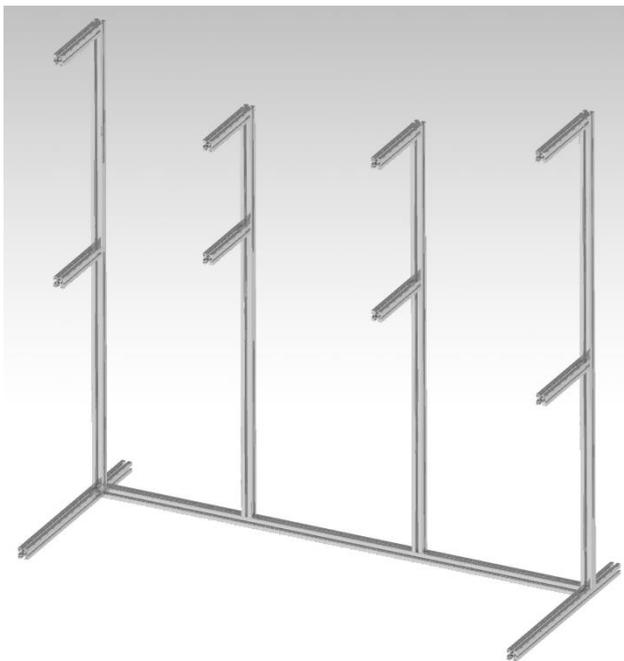
Una vez diseñados la forma del túnel y de las paredes que lo conforman, hay que definir un sistema para soportarlo. Para ello, se ha pensado unir unos tacos con adhesivo a las tapas superior e inferior que servirán para fijar las tapas a la estructura metálica que soportará el túnel. Para unir estos tacos a los perfiles de Fasten 40x40mm que conformarán la estructura, se van a emplear unas chapas de PVC que irán unidas a los tacos y a las barras mediante tornillos. Además de con tornillos, las chapas se fijarán a los tacos con adhesivo.

Los tacos serán fabricados a partir de un listón de PVC de 40x40mm de 1000mm de largo. Las chapas de PVC necesarias para el soporte se obtendrán con el excedente de la fabricación de las tapas superior e inferior, por lo que el grosor será de 10mm.

### Estructura metálica

Para diseñar la estructura que va a soportar el túnel, se ha decidido sostenerla por 4 secciones del túnel de manera que no haya ninguna pieza de PVC sometida a cargas excesivas, evitando así deformaciones que comprometan el correcto funcionamiento del mismo o posibles roturas.

El primer diseño planteado para la estructura de soporte es la de la *Figura 11*. Para asegurarse de que la estructura planteada es funcional en cuanto a los desplazamientos, se ha planteado calcular el desplazamiento de los extremos horizontales centrales sobre los que irá sostenido el túnel.



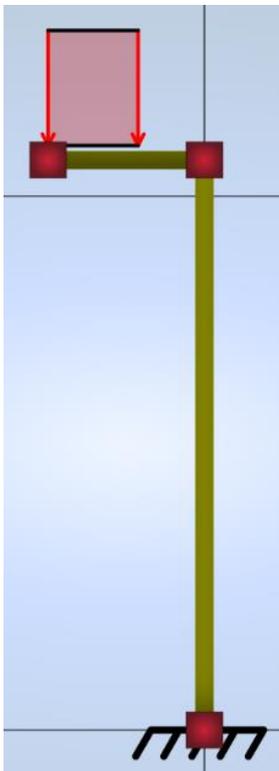
*Figura 11. Prediseño estructura de soporte.*

Para realizar este cálculo, se ha dividido el problema aplicando el principio de superposición en uno de torsión y en otro de deformación debido a una carga constante lineal que representa el peso del túnel. Se ha simplificado el problema a una sola barra horizontal por cada vertical, debido a que estas al ser muy poco esbeltas apenas van a presentar deformación, aunque la carga lineal que deban soportar sea el doble, no suponiendo por tanto un problema. Por esta razón, las que pueden presentar desplazamientos más importantes son las verticales. Se ha supuesto que solo están las barras inferiores y por lo tanto la deformación de las barras verticales será menor que aplicando la carga en las

barras superiores. De esta forma, si el desplazamiento es excesivo, sabremos que tampoco será válido con hipótesis menos favorables al diseño.

El peso del túnel, según las herramientas de diseño de CATIA, será de 40kg aproximadamente y se ha supuesto que cada barra va a sostener  $\frac{1}{4}$  del peso. La barra a estudiar deberá ser una de las centrales verticales de la de la *Figura 11*, ya que serán las que mayor desplazamiento presenten debido a que, al contrario que las de los extremos, estas también sufrirán un desplazamiento a causa de la torsión de la barra horizontal inferior sobre la que van montadas. Para realizar esta comprobación, se ha elegido la central izquierda desde la vista frontal de la estructura.

El problema de desplazamiento debido a la carga lineal que producirá la flexión, se ha modelado en el programa MDRfx empleado en la asignatura “Estructuras y construcciones industriales” para su posterior cálculo, resultando el planteamiento de la siguiente manera:



*Figura 12. Modelado barra central de la estructura de soporte.*

En la *Figura 13*, que se muestra a continuación, se puede observar que el desplazamiento causado en la estructura para esta parte del problema es de 1.2mm aproximadamente, a lo que debe sumarse el desplazamiento estimado que se debe a la torsión que no estará

presente en los extremos y que podría causar una deformación por pandeo lateral que influya negativamente en el desempeño del túnel si este es elevado.

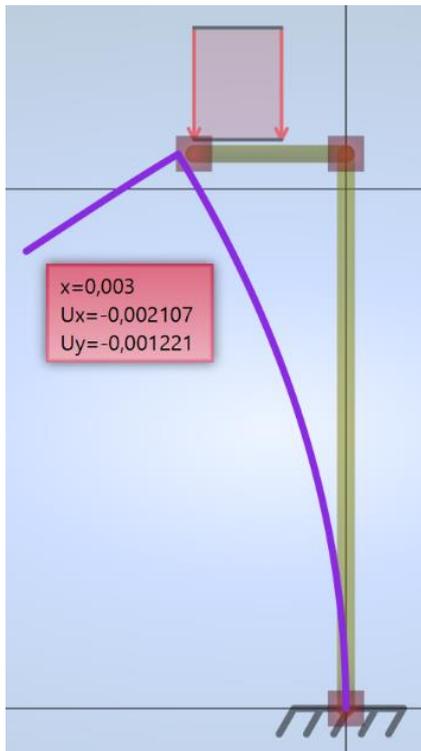


Figura 13. Desplazamiento de las barras de soporte centrales debido a flexión.

A continuación, para estimar el desplazamiento vertical debido a la torsión de la barra horizontal, se ha calculado, en primer lugar, el momento flector al que está sometida la barra vertical que será transmitido a la barra horizontal. Este momento será de 29Nm.

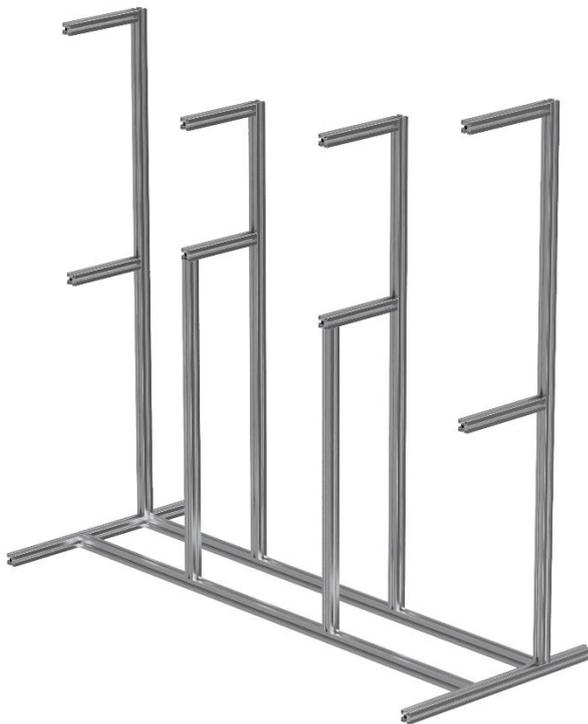
Como existe una simetría razonable entre las dos mitades, se va a simplificar la estructura para el cálculo del giro por torsión a una barra empotrada en voladizo, de forma que se pueda aplicar la siguiente fórmula que proporciona el giro de una barra por unidad de longitud:

$$\theta = \frac{M}{G \cdot J}$$

En esta fórmula M es el momento torsor al que está sometida la barra, es decir, los 29Nm calculados previamente, G el módulo de cortadura, que en el caso del aluminio es como mínimo  $25 \cdot 10^9 \text{Pa}$  y por último J es el momento de torsión que corresponde a la geometría del perfil empleado, que según el fabricante es  $1.6 \cdot 10^{-8} \text{m}^4$ . Por lo tanto, el giro de la barra por unidad de longitud es de 0.0725radianes. La mitad de la barra mide 921mm, por lo que el giro máximo de la barra es de 0.0668radianes. Por tanto, el desplazamiento vertical del punto indicado que se encuentra a una altura en la barra vertical de 1133mm es de 76mm.

Estos resultados implican que las secciones centrales del túnel con el diseño indicado, se desplazarían por el peso propio de la estructura mucho más que los laterales, dando lugar a deformaciones no deseadas. Además, el túnel quedaría inclinado.

Para solucionar el problema existente, se han planteado los refuerzos añadidos en la *Figura 14*. Estructura metálica de soporte. Gracias a este refuerzo, se elimina la deformación por torsión, que es la más problemática como hemos podido apreciar, de forma que la estructura presente unos desplazamientos pequeños que le permitan ser funcional.



*Figura 14. Estructura metálica de soporte*

### Estabilizador de flujo

El estabilizador de flujo se ha construido con celdas hexagonales ya que se maximiza el área de paso, al ser los hexágonos la forma geométrica más eficiente a la hora de teselar una superficie. Esto quiere decir que la superficie que tapa el plástico será la mínima posible para un diámetro hidráulico

En cuanto a la longitud del estabilizador, se ha determinado teniendo en cuenta que  $L/D$  debe de ser  $\ll 1$ , por lo que, estableciendo un  $D$  de 6,882mm, se ha empleado un  $L$  de 81mm, obteniendo un cociente de 0,085.

## Ventiladores y sistema de regulación de caudal:

Los ventiladores irán colocados sobre una placa de PVC a la salida del túnel, de manera que el flujo será movido por aspiración a lo largo del túnel para que este sea menos turbulento.

En la *Figura 15* se puede observar cual es la curva característica de los ventiladores.

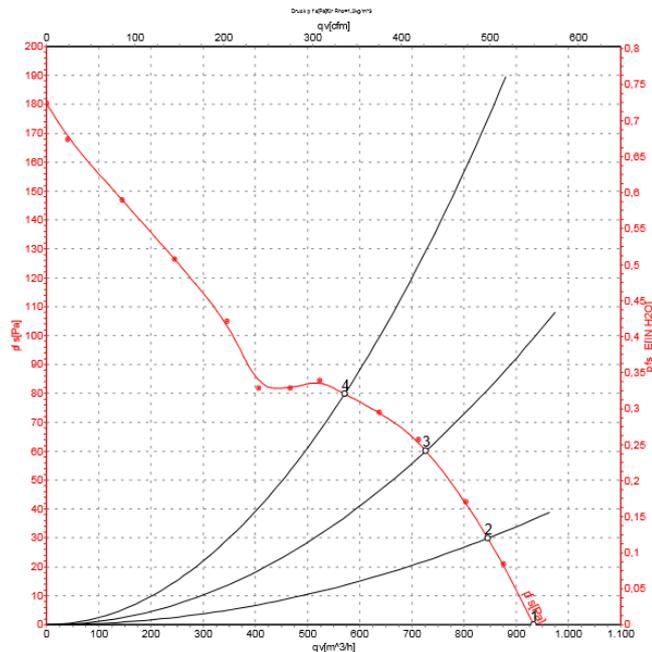


Figura 15. Curva característica del ventilador W2E200-HH38-01 aportada por el fabricante.

Las curvas 1, 2, 3 y 4 son 4 curvas de pérdidas de carga que ha ensayado el fabricante para que sirvan de referencia como posibles configuraciones de funcionamiento. Puntos de funcionamiento de los que nos ofrece las condiciones de funcionamiento en la siguiente tabla:

Tabla 2. Condiciones de funcionamiento para diferentes pérdidas de carga.

	U	f	n	$P_e$	I	qv	$P_{fs}$
	V	Hz	$\text{min}^{-1}$	W	A	$\text{m}^3/\text{h}$	Pa
1	230	50	2550	64	0.29	935	0
2	230	50	2500	67	0.32	845	30
3	230	50	2450	70	0.32	725	60
4	230	50	2410	72	0.33	570	80

U = Supply voltage · f = Frequency · n = Speed ·  $P_e$  = Power input · I = Current draw · qv = Air flow ·  $P_{fs}$  = Pressure increase

Debido a los cambios de sección que posee el túnel, se generarán unas pérdidas de carga en el mismo que serán las que predominen, por lo que la curva de pérdidas de carga se va a simplificar a las pérdidas derivadas de estos cambios de sección. Para estimar las pérdidas de carga derivadas de los cambios de sección se ha recurrido al libro "Flujo de

Fluidos - Crane- Mc Graw -Hill” que ofrece las siguientes ecuaciones y coeficientes para cambios de sección angulares:

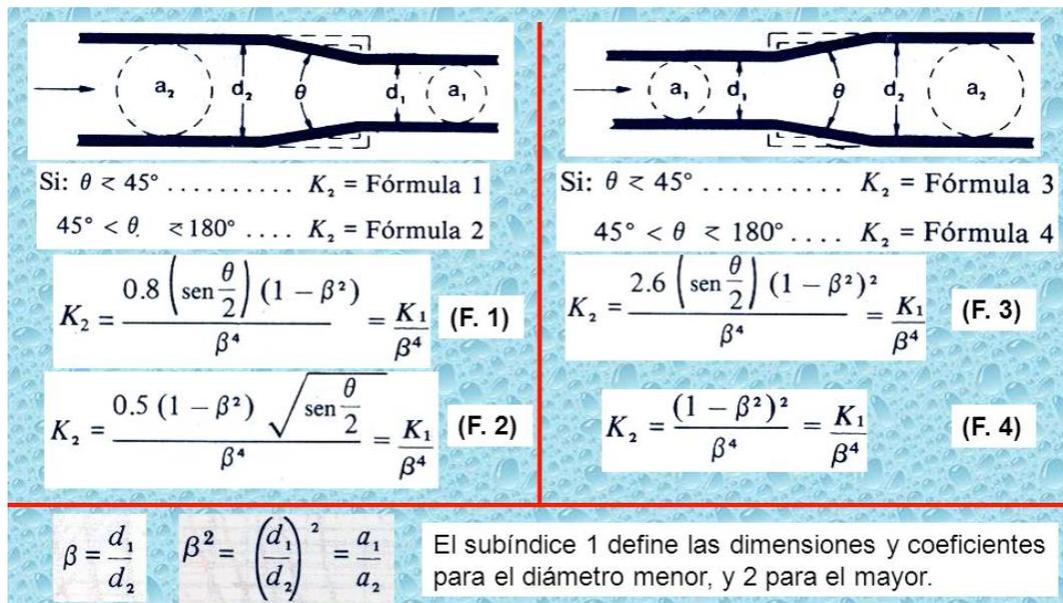


Figura 16. Pérdidas de carga por cambios de sección (SlidePlayer, s.f.).

Aplicando las ecuaciones de la **Figura 16** se han estimado los coeficientes de pérdidas de carga  $K_c$ . La curva que resulta de las pérdidas generadas en uno de los dos cambios de sección es del tipo  $\rho V^2 K_c$ . De esta forma se ha estimado que la curva de pérdidas de carga es:  $H_p = 1,3925E-05V^2$

Los ventiladores en condiciones nominales para la curva de pérdidas de carga estimada en el túnel giran a 2500 r.p.m. de forma que, cada ventilador impulsa aproximadamente un caudal de aire de 725m<sup>3</sup>/h. Debido a que irán colocados 3 en paralelo, el caudal total que se podrá impulsar será de 1740m<sup>3</sup>/h. Esto supone una velocidad máxima del aire en la cámara de ensayo de 13.43m/s.

Como se ha mencionado en el capítulo de prediseño, se va a ajustar la velocidad de giro de los ventiladores como forma de controlar el caudal de aire en el túnel. La relación que guardará el caudal con la variación en la velocidad de giro puede ser estimadas a partir de la siguiente ecuación: (Crespo Martínez, 2006)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

En el capítulo de prediseño en la sección de simplificaciones, se ha mencionado que el Mach en la sección de ensayo no debe superar 0,3 para poder considerar el flujo de aire como incompresible. En el mejor de los casos, el caudal de aire que puede impulsar uno de los ventiladores empleados (suponiendo que no hubiera pérdidas de carga) es de 950m<sup>3</sup>/h. Se van a emplear 3 en paralelo, por lo que el caudal total máximo sería 2850m<sup>3</sup>/h, lo que supone 0,792m<sup>3</sup>/s. El área en la sección de ensayo es de 0,045m<sup>2</sup>, a lo que hay que restar el área ocupada por el perfil de ensayo que suponemos como máximo 0.0045m<sup>2</sup>. Con estas condiciones, la velocidad máxima del aire en la sección de ensayo va a ser 19,55m/s. La velocidad de Mach 1 a una temperatura de 293°K, con  $\gamma$  1,4 y R 286,9 es de 343.05m/s. Por tanto 0,3 Mach equivale a 102.91m/s, por lo que, en cualquier caso,

la velocidad del flujo de aire será menor de 0,3Mach de forma que se confirma la simplificación de flujo incompresible.

El método escogido para la regulación de la velocidad de giro de los ventiladores consistirá en un reóstato que regulará la cantidad de potencia entregada a los ventiladores. Estos funcionan en condiciones normales con 64W cada uno, de manera que entre los tres consumirán 192W. Por tanto, el reóstato debe entregar como mínimo estos 192W para poder llegar a alcanzar el máximo caudal posible.

El reóstato elegido para esta finalidad es el de la Figura 17 que, como se ha mencionado, permitirá variar la cantidad de potencia entregada a los ventiladores y con ello su régimen de giro.



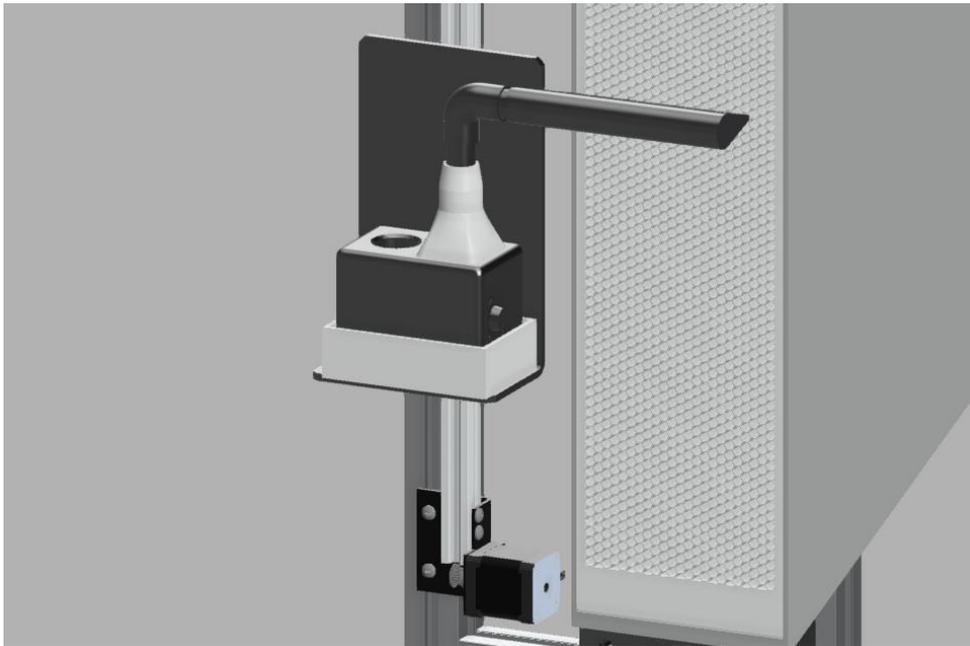
Figura 17. Reóstato para la regulación de la velocidad de giro de los ventiladores de aspiración.

### Desplazador del sistema de visualización del flujo

Para poder visualizar el flujo de aire se va a emplear una corriente de agua nebulizada. Esto se conseguirá mediante un nebulizador. El nebulizador se podrá trasladar en dirección vertical, de manera que el chorro de agua nebulizada pueda desplazarse para

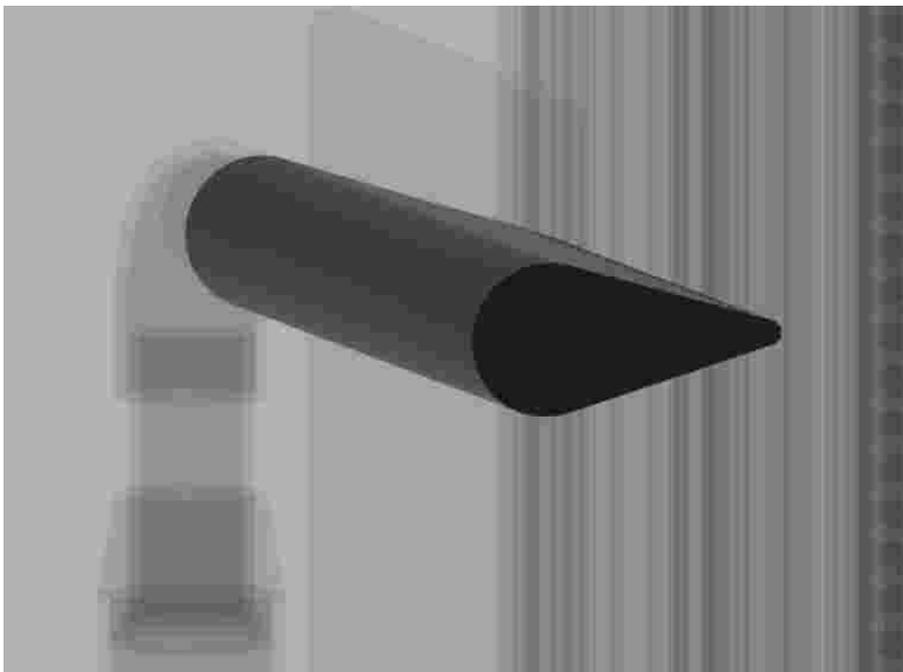


El motor que moverá el conjunto se ubicará debajo, sujeto con una pletina, y transmitirá el movimiento mediante una correa dentada.



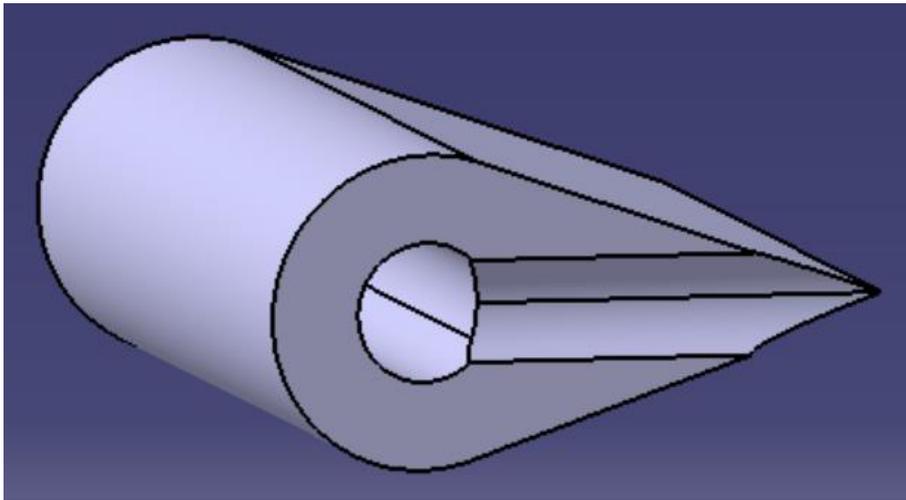
*Figura 19. Conjunto de nebulizador y su desplazador.*

Cabe destacar en este conjunto el perfil del tubo que se sitúa en frente del estabilizador de flujo, que será el que inyecte el agua nebulizada al túnel. El perfil de este tubo será aproximadamente el de una gota de agua, ya que es el perfil más aerodinámico que existe, de forma que el flujo a la entrada se perturbe lo menos posible. Esto se puede observar con mayor detalle en la *Figura 20*.



*Figura 20. Tubo inyector de agua nebulizada.*

En la *Figura 21* se puede observar el perfil que inyecta el agua nebulizada seccionado por el centro del orificio por el que saldrá el agua nebulizada.



*Figura 21. Inyector de agua nebulizada seccionado.*

## Construcción

En primer lugar, se ha construido la estructura metálica que soportará y ayudará a dar forma al túnel. Para ello, una vez diseñada la estructura metálica, se han cortado las barras. A continuación, se han ensamblado, mediante diferentes tipos de uniones, todas las barras. Las uniones más críticas se han reforzado con cartelas unidas a las barras con tornillos.

Una vez ensamblada la estructura, se ha procedido a cortar las chapas de PVC para doblarlas y obtener las tapas superior e inferior. Para cortarlas, se han marcado en las chapas (con cinta de carroceros) las trayectorias que debe de realizar la sierra, de forma que sea más fácil llevar a cabo el corte. Como preparación, antes de plegarlas, se han mecanizado realizando las ranuras por dónde se iluminará el flujo de aire y agua nebulizada con ayuda de una fresadora. Con esta misma fresadora, también se ha marcado una guía para doblar la chapa por el sitio correcto de forma que se eviten desviaciones en el pliegue.

Una vez obtenidas y preparadas las chapas desplegadas, se ha procedido al doblado. Esto se ha realizado con una plegadora de chapa y una pistola de calor para evitar la rotura de la placa al doblar en frío. Para verificar que el ángulo del pliegue sea el correcto, se ha usado un medidor de ángulo hasta ajustarlo a una tolerancia lo más reducida posible. El siguiente paso, ha sido cortar los tacos a partir de listones de PVC y unirlos mediante adhesivo a las tapas superior e inferior en las posiciones del diseño.

## Medición de la velocidad del aire en la cámara de ensayo:

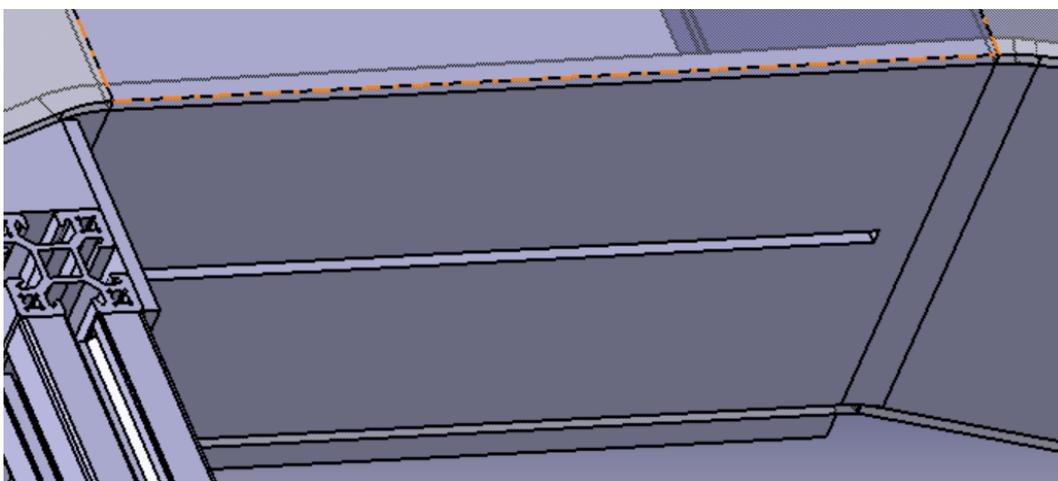
La velocidad del aire en la cámara de ensayo será medida mediante un anemómetro de hilo caliente, cuya sonda será introducida en la cámara de ensayo mediante la ranura realizada en la parte inferior de dicha cámara.

El anemómetro será de la marca PCE, modelo T-430 que permitirá medir velocidades desde 0m/s hasta 30m/s con una precisión de  $\pm 3\%$  o de  $\pm 0.015\text{m/s}$ , en el caso de que la velocidad sea muy baja. El anemómetro será el de la *Figura 22*:



*Figura 22. Anemómetro PCE T-430.*

La ranura por la que se introducirá la sonda en la cámara de ensayo será la que aparece en la siguiente figura:



*Figura 23. Ranura para la medición de la velocidad del aire en la cámara de ensayo.*

La medición se realizará después de que el aire haya pasado por el perfil piriforme de manera que no se perturbe el flujo de aire y que se pueda visualizar lo mejor posible. Como se puede apreciar en la *Figura 23*, la ranura recorre casi toda la cámara de ensayo por lo que se podrá medir la velocidad a diferentes alturas de la cámara si así se desea.

## Perfiles para ensayar en el túnel:

En este túnel de viento se podrán ensayar perfiles de cualquier geometría, siempre que el espesor máximo de estos no supere los 30mm, ya que esta condición ha sido uno de los puntos de partida para establecer las dimensiones de la cámara de ensayo y, si es mayor, podría haber problemas de bloqueo.

Se va a fabricar, para los ensayos y puesta a punto, un perfil que se asemeja mucho al que puede ser el de una gota de agua. Se trata de un perfil simétrico respecto al eje horizontal. Concretamente, se trata de una curva piriforme con las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\begin{cases} x = a(1 - \sin t) \cos t \\ y = b(\sin t - 1) \end{cases} ; a = 1, b = \frac{5}{2}$$

Para que el perfil en el frontal sea aproximadamente esférico, el valor de  $t$  debe encontrarse en el intervalo  $[\pi/2, 3\pi/2]$ . Con los valores de  $a$  y  $b$  indicados y tomando  $\pi/2$  para el valor de  $t$ , se obtiene el siguiente perfil que, extrusionado, será la pieza a ensayar en el túnel:

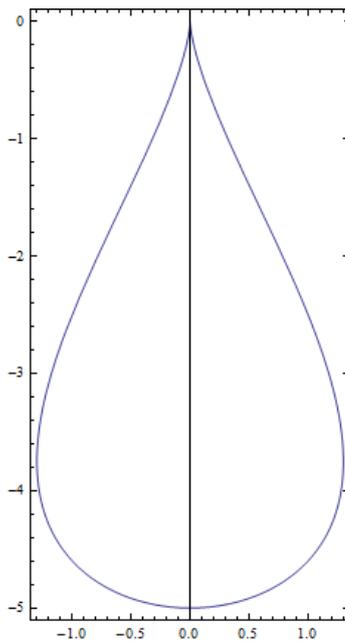


Figura 24. Curva piriforme del perfil a ensayar. (i-ciencias, 2011)

Esta curva es una representación a escala de la que será la real una vez producida con la impresora 3D.

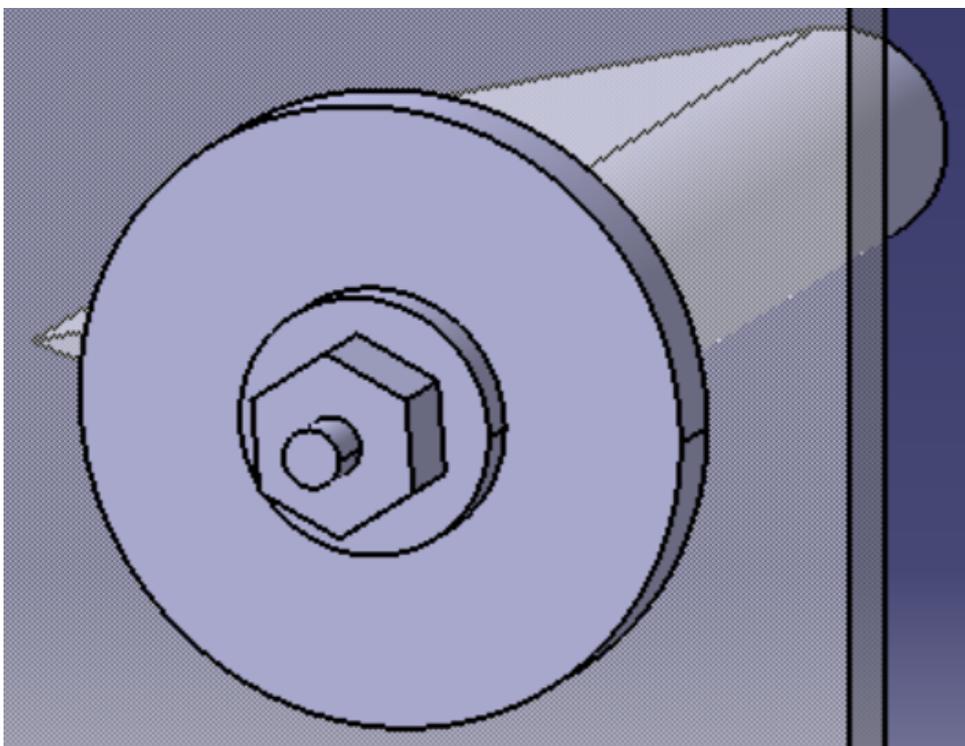
Los perfiles serán intercambiables mediante una escotilla en la parte trasera del túnel que irá fijada al túnel mediante pernos. Los perfiles que se quieran ensayar deberán contar con un inserto roscado que atravesará la escotilla y una polea dentada GT2 que irá conectada mediante una correa dentada a un motor eléctrico. En la **Figura 25** se puede observar cómo es el conjunto de poleas y correa que se empleará, la pequeña será la que se encuentre en el eje del motor y la grande en el eje del perfil, de manera que el conjunto actúe como una reductora.



*Figura 25. Poleas y correa para rotar el perfil del ensayo.*

Este eje se fijará por el lado externo con una tuerca.

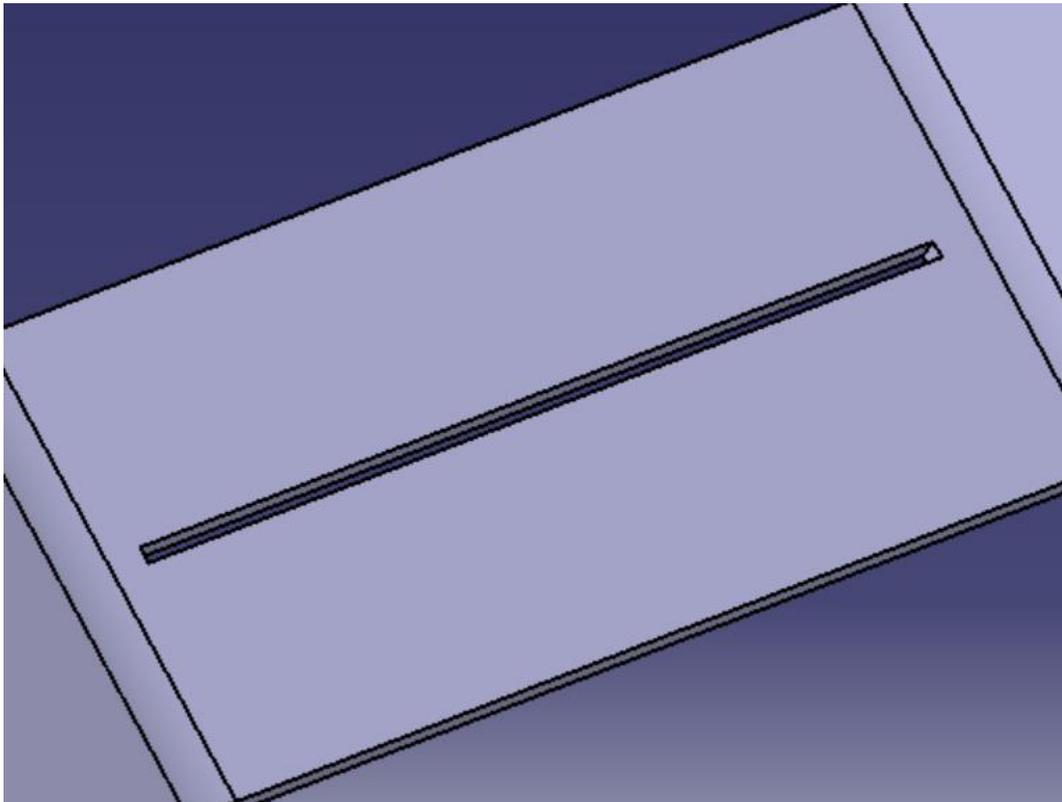
A continuación, en la **Figura 26**, se puede visualizar una representación CAD de cómo será el sistema descrito que permita rotar los perfiles y que a la vez puedan ser fácilmente intercambiables:



*Figura 26. Fijación del perfil a la escotilla del túnel.*

## Iluminación para visualizar correctamente el flujo de aire:

La iluminación que se va a instalar para la visualización del flujo de aire va a constar de una lámina láser que atraviese toda la cortina de agua nebulizada desde arriba del túnel hasta abajo. Para poder introducir la lámina láser dentro del túnel, se ha realizado una ranura a la altura de la sección de ensayo en la tapa superior con unas dimensiones de 260x5mm, como se puede observar en la *Figura 27*. Se ha buscado un compromiso entre dejar pasar la luz correctamente y perturbar lo menos posible el flujo de aire. En caso de que, en el futuro, se considere que la perturbación distorsiona excesivamente los resultados, podría insertarse un trozo de metacrilato en la ranura para eliminar la irregularidad superficial en la cara interna del túnel.



*Figura 27. Ranura tapa superior.*

La lámina láser que iluminará el agua nebulizada se va a crear mediante un láser de 100mW de potencia (de color verde) que proyecta una lámina en lugar de, como es habitual, un rayo láser. El láser lleva un soporte incorporado para poder fijarlo al túnel una vez en funcionamiento.

Se puede observar como es este láser y el soporte que incorpora en la *Figura 28*.



*Figura 28. Láser para iluminación túnel.*

El efecto que se desea conseguir es el mostrado en la siguiente figura de forma, que toda la sección del túnel que se desee observar, quede iluminada correctamente y quede resaltada.



*Figura 29. Ejemplo de visualización de flujo. (Lombilla, 2015)*

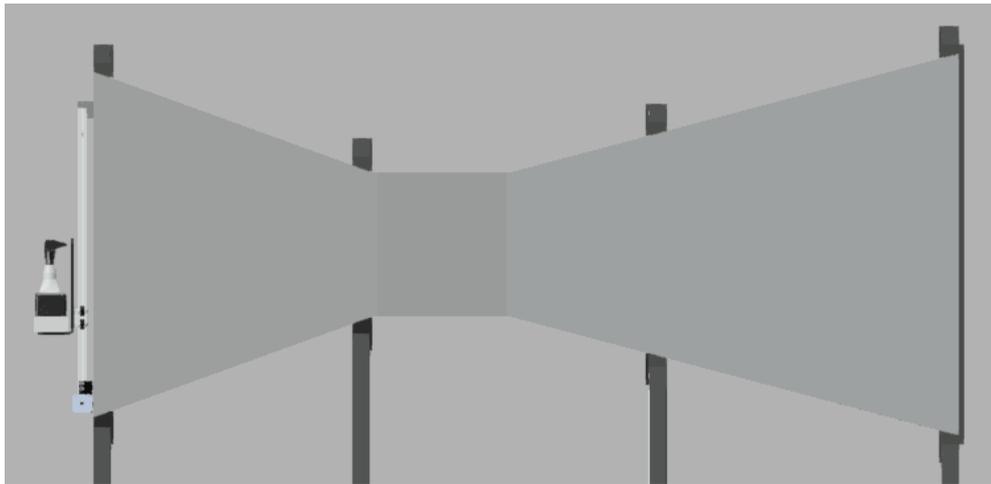
## Capítulo 5: Memoria de prácticas a realizar

### Objetivo

Con esta práctica se pretende que el alumno que la realice sea capaz de comprobar la transición de un cuerpo de aerodinámico a romo cuando se varía su ángulo de inclinación, además de cómo influye también en esto la velocidad del aire y que se pueda apreciar visualmente este fenómeno.

### Descripción de la instalación

Para realizar esta práctica, se cuenta con el siguiente túnel de viento bidimensional subsónico de aspiración con un sistema de visualización del flujo de aire, compuesto por un nebulizador de agua y un láser que proyectará una lámina para visualizar el flujo del agua nebulizada:



*Figura 30. Túnel de viento para prácticas de la asignatura Mecánica de Fluidos.*

### Funcionamiento

En este túnel de viento se podrá variar la velocidad del aire a lo largo del túnel controlando la velocidad de giro de los ventiladores, utilizando el controlador que se encuentra al frente del mismo.

También se podrá variar la inclinación del perfil mediante el controlador ubicado en el frente, en el que indica la inclinación en grados pudiendo girarlo en sentido horario o antihorario, según se requiera.

Para comenzar la práctica, deberemos realizar los siguientes pasos:

1. Encender el láser que se encuentra en la parte superior de la cámara de ensayo que forma parte del sistema de visualización del flujo.
2. Encender los ventiladores para que el aire comience a fluir a través del túnel.  
La velocidad del aire en la cámara de ensayo se controla mediante el reóstato en la parte frontal del túnel, que controla la velocidad de giro de los ventiladores para así influir, de manera directamente proporcional, en el caudal de aire que circula y, por tanto, en la velocidad del aire en la cámara de ensayo.

La velocidad de giro de los ventiladores y el caudal de aire impulsado están relacionados con la siguiente expresión:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Para medir la velocidad del aire en la cámara de ensayo, se empleará el anemómetro de hilo caliente mostrado en la siguiente figura:



Figura 31. Anemómetro de hilo caliente para la realización de la práctica.

3. Asegurarse de que el nebulizador de agua a la entrada del túnel tiene agua suficiente para funcionar y conectarlo

Este túnel de viento tiene el siguiente perfil piriforme instalado en la cámara de ensayo del túnel para realizar la práctica:

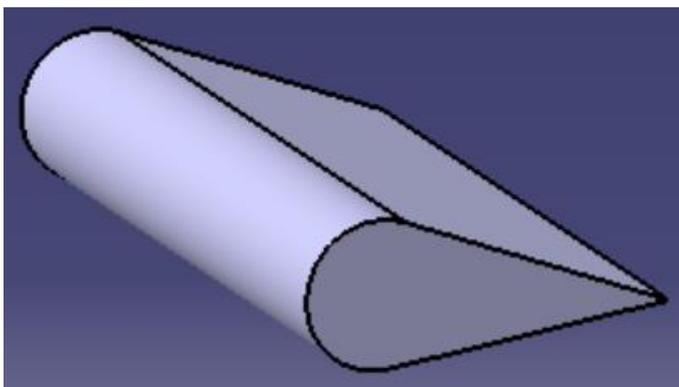


Figura 32. Perfil para realizar los ensayos en la práctica.

## Realización de ensayos

Una vez tengamos el túnel correctamente preparado, consistirá en ir variando el ángulo de inclinación grado a grado del perfil ensayado hasta que este se empiece a comportar como un cuerpo romo, cuando esto ocurra se debe anotar en qué ángulo de inclinación ocurre para diferentes números de Reynolds. Esto quiere decir que se debe de realizar este ensayo para diferentes velocidades del aire en la cámara de ensayo, siempre que la velocidad del aire permita observar el agua nebulizada porque esta no se difumine.

El número de Reynolds para una sección cuadrada conociendo la velocidad del anemómetro se calcula con la expresión:

$$Re_{D_h} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu}$$

Donde  $D_h$  es el diámetro hidráulico de una sección de la cámara de ensayo, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P}$$

En esta ecuación, A es el área de la sección de la cámara de ensayo que tiene unas dimensiones de 0,3x0,15m (que es donde se medirá la velocidad) y P el perímetro.

Además, se deberá considerar el número de Reynolds asociado al perfil, que se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Re_p = \frac{\rho \cdot V \cdot e}{\mu}$$

En este caso e, es una constante que equivale al espesor del perfil que se ensaya, 30mm en este caso.

Se deberá comprobar lo que se puede apreciar en la siguiente representación de la **Figura 33**. Cómo, al principio, con inclinaciones muy bajas, no habrá punto de desprendimiento hasta la parte final del perfil. Sin embargo, al ir aumentando la inclinación, este se hará notar a velocidades más reducidas e irá avanzando hacia el frente. También se deberá observar las turbulencias generadas a causa del desprendimiento de la capa límite y fotografiar las mismas.

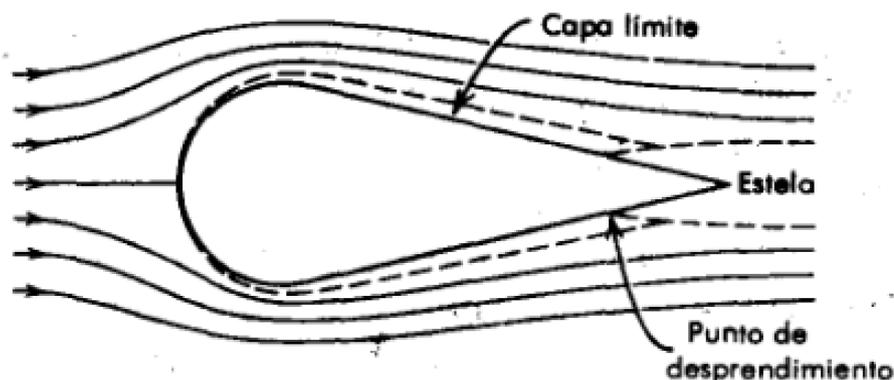


Figura 33. Esquema del comportamiento de la capa límite en un perfil piriforme. (monografias.com, s.f.)

Se deberá tomar una fotografía del desprendimiento de la capa límite en el último ensayo e indicar en la misma qué es lo que se puede observar del esquema de la *Figura 33*.

## Presentación de resultados

Además, se deberán realizar las siguientes tareas:

- Rellenar la siguiente tabla indicando los ángulos de inclinación del perfil en los que se produce la transición a cuerpo romo para distintos números de Reynolds, que corresponden a las velocidades indicadas en la columna de la izquierda:

V(m/s)	$Re_{D_h}$	$Re_p$	Ángulo de inclinación $\alpha$ (°)
0,07	1000	150	
0,11	1500	225	
0,15	2000	300	
0,19	2500	375	
0,22	3000	450	
0,26	3500	525	
0,30	4000	600	

- Realizar una gráfica en la que se represente el ángulo de transición frente al Reynolds del diámetro hidráulico y comentar qué se observa.

## Capítulo 6: Presupuesto

<b>AGRUPACIONES DE GASTO DEL TÚNEL:</b>		<b>COSTE:</b>
<b>MATERIALES:</b>		
Estructura de soporte		180€
Láminas de PVC para el túnel		68€
Metacrilato		15€
Electrónica		100€
Láser del sistema de iluminación		43€
Nebulizador		36€
Sistema del desplazador del nebulizador		80€
Anemómetro		150€
3 ventiladores EBM W2E200-HH38-01		513€
Enderezador de flujo		40€
<b>MANO DE OBRA:</b>	<b>COSTE € /HORA</b>	
Técnico mecánico 40 horas	60	2400€
Ingeniero 80 horas	90	7200€
<b>TOTAL:</b>		<b>10825€</b>

Los costes de mano de obra por hora han sido tomados teniendo como referencia el coste de un taller que pueda realizar este tipo de trabajos, aunque, realmente, el coste para la universidad es mucho menor.

## Capítulo 7: Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado se ha conseguido diseñar y comenzar a fabricar un túnel de viento bidimensional que da respuesta a la necesidad planteada de implementar una práctica en la asignatura “Mecánica de fluidos”.

Esta práctica permitirá a los alumnos observar fácilmente la transición de cuerpo aerodinámico a romo según se varíe el ángulo de inclinación del mismo. También será posible observar esta misma transición a diferentes velocidades del aire y así poder comparar cómo influye la velocidad del aire en esta transición.

No ha sido posible poner a punto el túnel debido a que la emergencia sanitaria actual no ha permitido terminar de construir el túnel físicamente. Sin embargo, todas las medidas y datos necesarios para su fabricación se encuentran en esta memoria y los ficheros del anexo.

Debido a que el túnel no ha podido ser montado y puesto a punto en la fecha de finalización de esta memoria, no se sabe con certeza si el láser seleccionado para el sistema de visualización funcionará de manera óptima o si se deberá sustituir por otro de mayor potencia.

En el sistema de visualización de flujo, se ha seleccionado un nebulizador de agua frente a las opciones de generadores de humo existentes en el mercado aunque estos ofrecen una mejor visualización, debido a cuestiones de salud, ya que, aunque muchos de estos generadores aseguran ser inocuos para la salud, es posible que produzcan algún tipo de inconveniente si se inhala una elevada cantidad y, puesto que esta práctica será realizada en interior, se ha optado por seleccionar el nebulizador de agua por ultrasonidos.

Los ventiladores con los que ha sido diseñado el túnel no son los más óptimos para este fin, pero uno de los requisitos del diseño era utilizarlos para abaratar costes ya que habían sido adquiridos por el departamento previamente. Por lo que, una de las líneas de mejora en cuanto a este túnel, sería sustituir los ventiladores indicados por otros cuyo punto óptimo de funcionamiento sea en caudales menores ya que, para alcanzar las velocidades requeridas, los ventiladores deberán girar a velocidades bajas e, incluso, desconectar alguno de ellos para alcanzar las velocidades más bajas en el caso de que no se pueda disminuir lo suficiente la velocidad de giro en la puesta a punto, por lo que, en este sentido, no está completamente optimizado el túnel.

Una mejora que se puede realizar a esta memoria consistiría en preparar más perfiles de ensayo, de manera que el alumno pueda hacer comparaciones entre diferentes geometrías y observar las diferencias en el comportamiento de cada una de ellas.

## Bibliografía

- Crespo Martínez, A. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: S.A. EDICIONES PARANINFO.
- Fernández, J. R. (2014). *Automatismos Industriales Electricidad - Electrónica*. España: S.A. Ediciones Paraninfo.
- GIS IBÉRICA. (s.f.). *Tipos de anemómetros*. Obtenido de GIS IBÉRICA: <http://www.gisiberica.com/anem%C3%B3metros/TIPOS%20ANEMOMETROS.htm>
- i-ciencias. (14 de 07 de 2011). *Una función matemática que dibuja la forma de una gota de agua*. Obtenido de i-ciencias: <https://www.i-ciencias.com/pregunta/26542/una-funcion-matematica-que-dibuja-la-forma-de-gota-de-agua>
- Lombilla, J. L. (2015). *Uniovi*. Obtenido de Uniovi: [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/51740/6/TFM\\_JoseLuisMu%C3%B1ozLombilla.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/51740/6/TFM_JoseLuisMu%C3%B1ozLombilla.pdf)
- monografias.com. (s.f.). *Conceptos Fundamentales De Mecánica De Fluidos*. Obtenido de monografias.com: <https://www.monografias.com/trabajos10/resumen/resumen.shtml>
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Closed Return Wind Tunnel*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Flow visualization*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvis.html#:~:text=Flow%20Visualization&text=Aerodynamicists%20use%20wind%20tunnels%20to,on%20the%20model%20are%20measured>.
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Open return wind tunnel*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Schlieren system*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvschlrm.html>
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Smoke and tufts*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html>
- NASA. (05 de 05 de 2015). *Surface oil flow*. Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvoil.html>

NASA. (05 de 04 de 2017). *What are wind tunnels?* Obtenido de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>

Openbuilds. (23 de 08 de 2018). *Openbuilds*. Obtenido de Openbuilds: <https://openbuilds.com.mx/producto/v-slot-20x20-guia-lineal-500mm/>

SlidePlayer. (s.f.). *Válvulas*. Obtenido de Slideplayer: <https://slideplayer.es/slide/4304773/>

White, F. (2008). *Mecánica de Fluidos*. España: S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA.

WIKIPEDIA. (17 de 04 de 2020). *Wind tunnel*. Obtenido de Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_tunnel](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel)

## Anexo

### Cálculos de Excel

Para la realización de algunos cálculos necesarios en esta memoria, se ha trabajado con el programa Excel de Microsoft Office, cuyo archivo se adjunta con esta memoria.

En dicho archivo, se han introducido las diferentes fórmulas para realizar los cálculos necesarios y se ha programado de forma que, si se desea, se pueda variar cualquiera de los valores de las constantes de las condiciones operativas, recalculándose los resultados automáticamente.

En primer lugar, se ha establecido la **Tabla 3** que recoge las condiciones ambientales del aire que fluirá por el túnel, medidas de la sección de ensayo y dos celdas que permiten, en función del caudal impulsado por un ventilador y el número de ventiladores conectados, conocer el caudal y la velocidad del aire en la cámara de ensayo.

*Tabla 3. Condiciones de operación del túnel.*

Caudal de un ventilador (m <sup>3</sup> /h)	600
Número de ventiladores en paralelo	3
Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1,204
Viscosidad del aire a 20°C (N·s/m <sup>2</sup> )	1,80E-05
Anchura sección ensayo (m)	0,15
Alto sección ensayo (m)	0,3
Espesor perfil	0,03
D <sub>hidráulico</sub> sección de ensayo (m)	0,200
Área sección ensayo (m <sup>2</sup> )	0,045
Perímetro sección de ensayo (m)	0,9
Caudal total (m <sup>3</sup> /h)	1800
Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	0,5
Velocidad del área de ensayo (m/s)	11,11

A lo largo de esta memoria, ha sido necesario calcular qué caudales se deben poder alcanzar, como mínimo, para lograr un Reynolds en la cámara de ensayo de 1000. En la siguiente tabla, se puede variar 1000 por cualquier otro número de Reynolds que se desee

en la cámara de ensayo y calcular qué caudal se deberá impulsar y a qué velocidad corresponde.

Tabla 4. Condiciones mínimas de funcionamiento.

Reynolds sección de ensayo mínimo	1000
Caudal mínimo del túnel (m <sup>3</sup> /s)	0,003363787
Caudal mínimo del túnel (m <sup>3</sup> /h)	12,10963455
Caudal mínimo de cada ventilador (m <sup>3</sup> /s)	0,001121262
Caudal mínimo de cada ventilador (m <sup>3</sup> /h)	4,03654485
Velocidad en la sección de ensayo	0,074751

En la **Tabla 5** se encuentran los cálculos necesarios para calcular las pérdidas de carga debidas al caudal indicado en la **Tabla 3** con las fórmulas de la **Figura 16**. En esta tabla también hay datos geométricos empleados en los cálculos, que podrían variarse en caso de modificarse el túnel en algún momento.

Tabla 5. Pérdidas de carga.

Pérdidas de carga por cambios de sección (Pa)	
Pérdida de carga entrada (Pa):	5,418519109
K (sección de ensayo):	0,072906985
$\beta$	0,85647113
D <sub>hidráulico</sub> sección de entrada (m <sup>2</sup> )	0,233516336
Anchura sección de entrada (m)	0,15
Alto sección de entrada (m)	0,526858
Área sección de entrada (m <sup>2</sup> )	0,0790287
Perímetro sección de entrada (m)	1,353716
Ángulo de sección de entrada (°)	40
cte1	21,67407644
Pérdida de carga salida (Pa):	36,11565
K (sección de ensayo):	0,48594147
$\beta$	0,533762685
D <sub>hidráulico</sub> sección de salida (m <sup>2</sup> )	0,374698355
Anchura sección de salida (m)	0,24
Alto sección de salida (m)	0,854
Área sección de salida (m <sup>2</sup> )	0,20496
Perímetro sección de salida (m)	2,188
Ángulo de sección de salida (°)	30,302
cte2	144,4626
Pérdida de carga total (Pa):	41,53416911

La siguiente tabla calcula el Reynolds del perfil y velocidad correspondientes al Reynolds de la sección de ensayo de manera que, en el “Capítulo 5: Memoria de prácticas a realizar” en función del Reynolds del perfil que se desee, se obtiene el del perfil y la velocidad del aire en la cámara de ensayo.

Por último, se ha elaborado una tabla en la que se recogen las pérdidas de carga estimadas para diferentes caudales totales del túnel de acuerdo a la *Tabla 5*.

Tabla 6. Pérdidas de carga para diferentes caudales.

Q (m <sup>3</sup> /h)	Pérdidas de carga (Pa)
2175	65,87361545
2100	61,40893521
1800	45,11676873
1500	31,33108939
1200	20,05189721
900	11,27919218
600	5,012974303
300	1,253243576
0	0

La curva de pérdidas que se ha obtenido es la de la *Figura 34*.

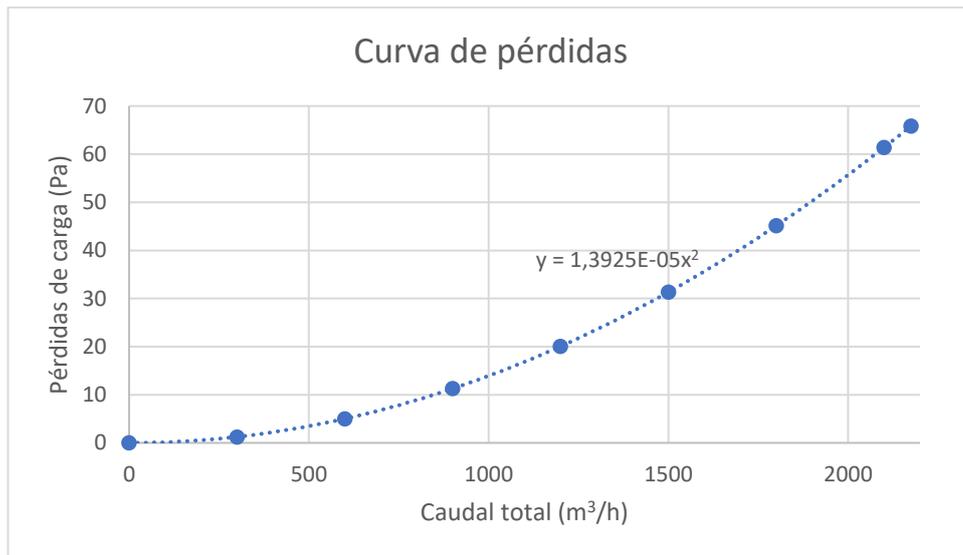
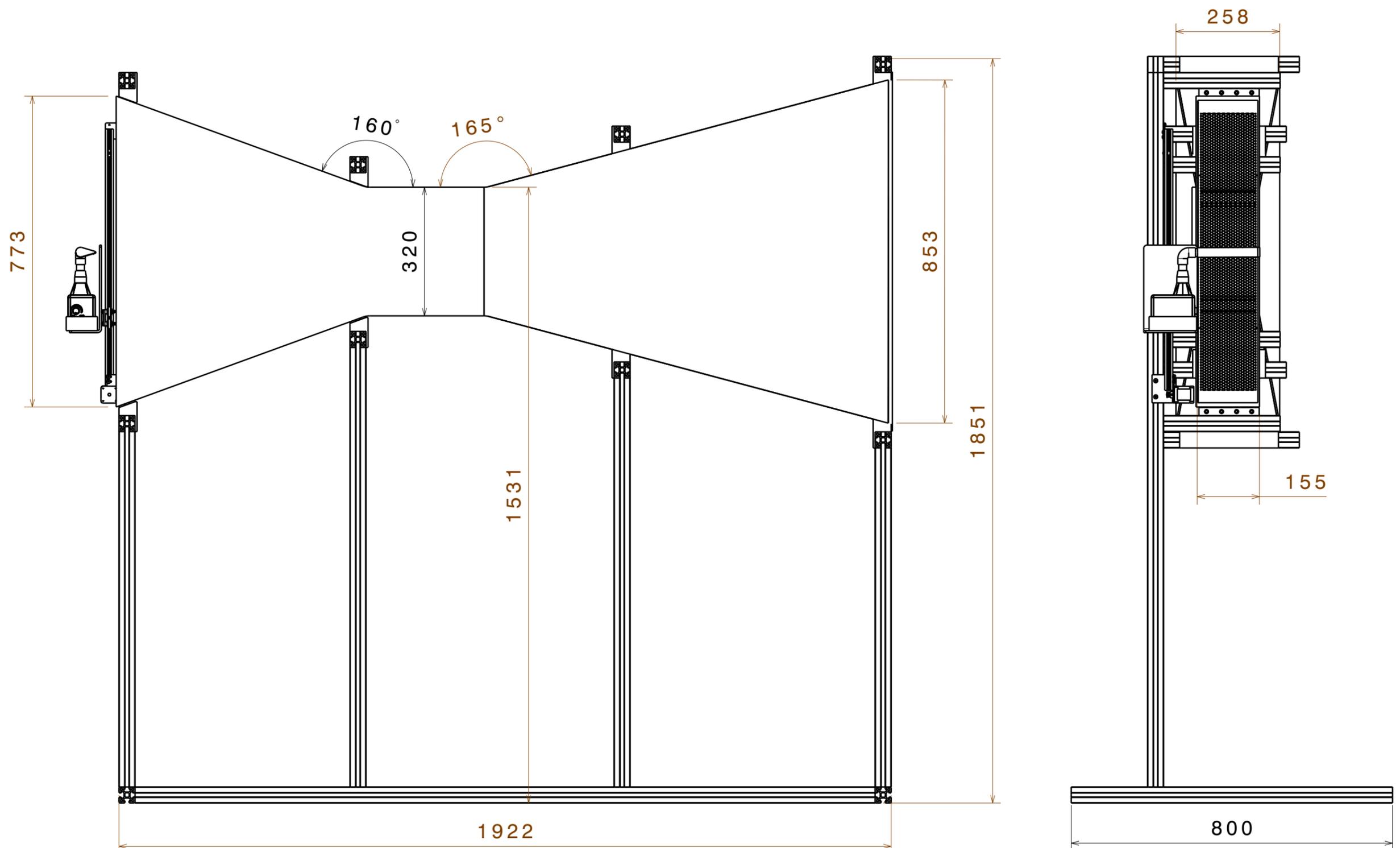


Figura 34. Curva de pérdidas del túnel bidimensional.

# Planos

Plano de todo el conjunto:

A continuación, se adjunta un plano del conjunto del túnel y la estructura de soporte ensamblados en el que se pueden apreciar las dimensiones del proyecto, así como la forma final.



DESIGNED BY:  
**Hugo Oliva Cajal**  
 DATE:  
 20/07/2020

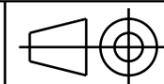


Universidad de Valladolid



**EII UVA**

SIZE  
**A3**



SCALE  
**1:10**

WEIGHT (kg)  
**3,50**

DRAWING NUMBER  
**PLANO ENSAMBLAJE COMPLETO**

SHEET  
**1 / 1**

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Planos de las paredes del túnel de viento:

Los siguientes planos muestran las cotas de las piezas que dan forma al túnel de viento y que son las más importantes del proyecto.

H G F E D C B A

4

3

2

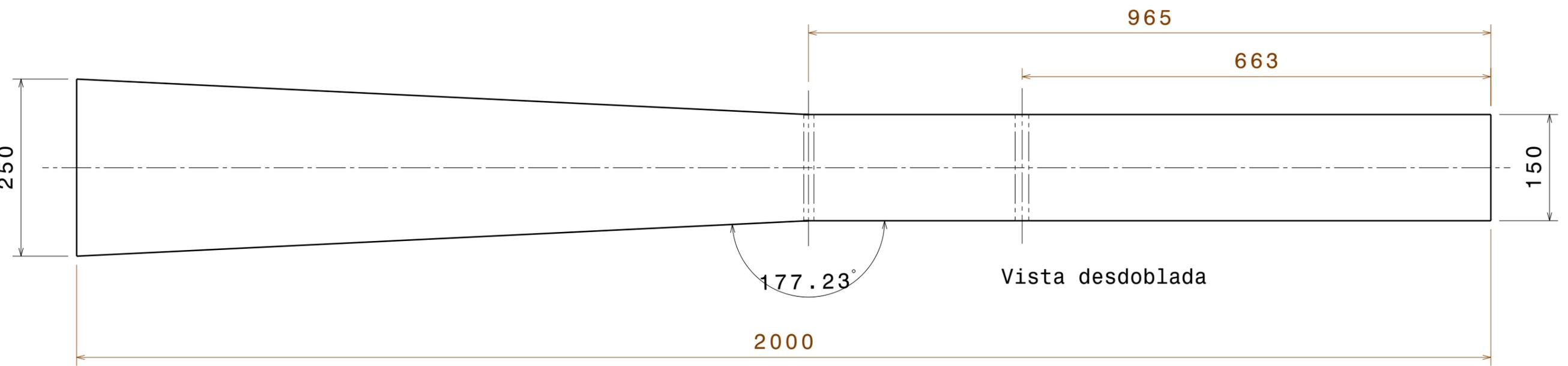
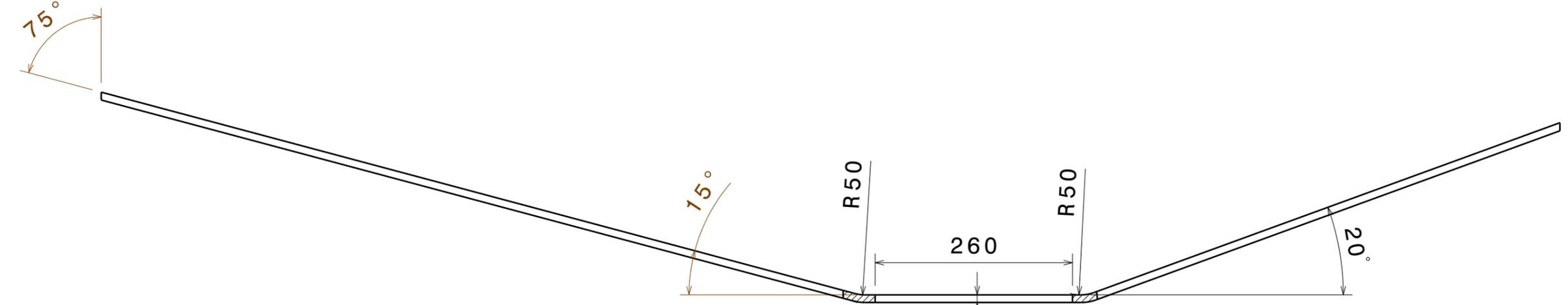
1

4

3

2

1



Vista desdoblada

DESIGNED BY:  
Hugo Oliva Cajal  
DATE:  
20/07/2020



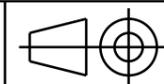
Universidad de Valladolid



EII UVA

SIZE  
**A3**

SCALE  
**1:6**



WEIGHT (kg)  
**3,50**

DRAWING NUMBER  
**TAPAS SUPERIOR E INFERIOR**

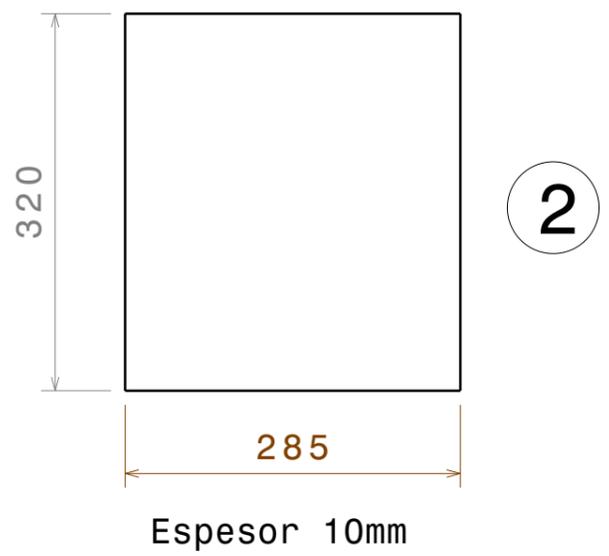
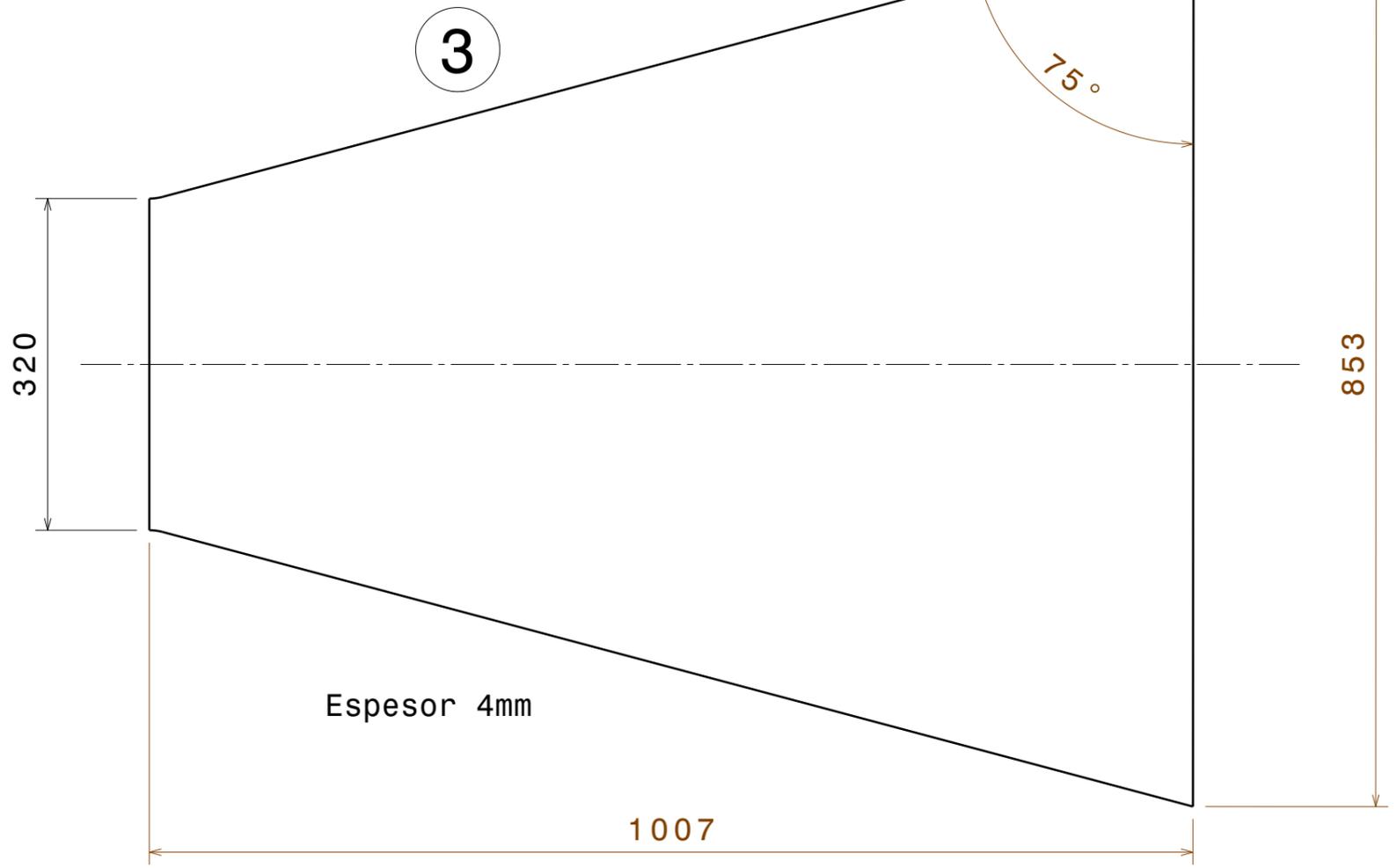
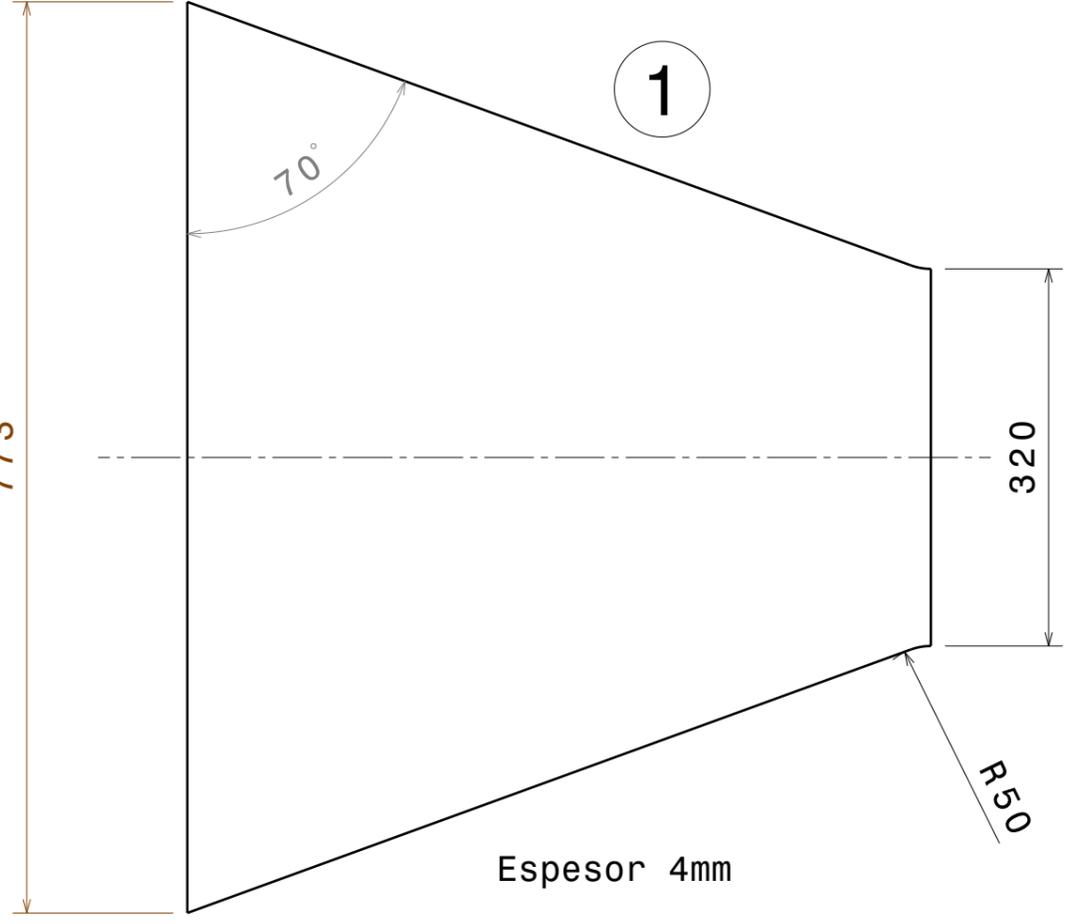
SHEET  
**1/3**

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

H G B A

H G F E D C B A



1	Tapa lateral sección de contracción
2	Tapa lateral cámara de ensayo
3	Tapa lateral sección de contracción

DESIGNED BY:  
Hugo Oliva Cajal  
DATE:  
20/07/2020



Universidad de Valladolid



I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

SIZE  
A3

EII UVA

SCALE  
1:6

WEIGHT (kg)  
3,50

DRAWING NUMBER  
TAPA LATERAL FRONTAL

SHEET  
2/3

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

H G B A

H G F E D C B A

4

4

3

3

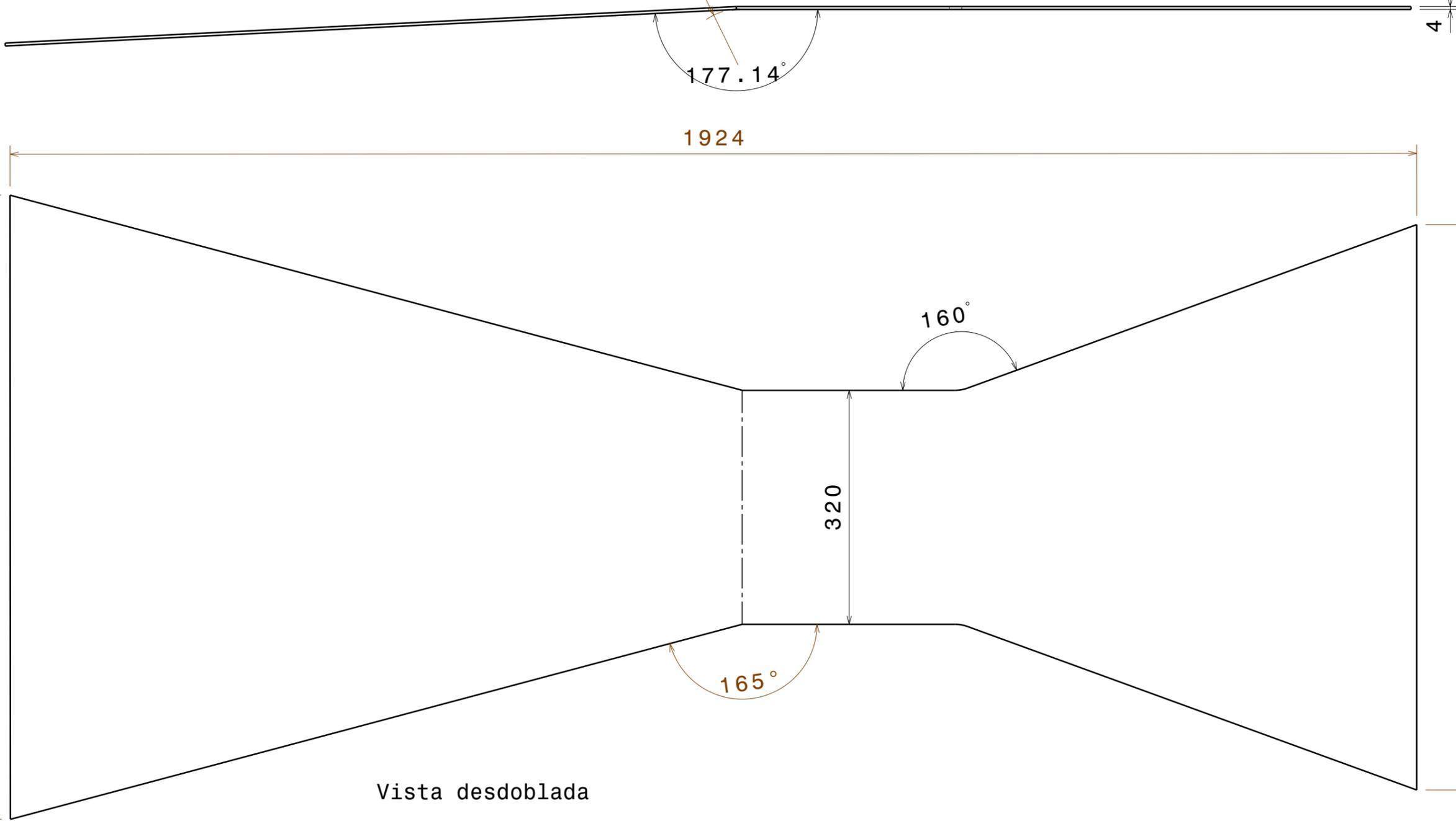
2

2

1

1

H G B A



Vista desdoblada

DESIGNED BY:  
Hugo Oliva Cajal  
DATE:  
20/07/2020

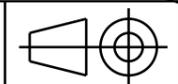


Universidad de Valladolid



EII UVA

SIZE  
A3



SCALE  
1:6

WEIGHT (kg)  
3,50

DRAWING NUMBER  
TAPA LATERAL TRASERA

SHEET  
3/3

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

# Archivo CAD