

Dinámica de Fluidos computacional

Jesús M. Sobrado Vallecillo

Túnel de viento en vacío. Análisis de flujo en el interior de un micro túnel de vacío, que simule las condiciones ambientales de la atmósfera de Marte.

DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Objetivo

Probar el funcionamiento y calibrar sensores de velocidad del viento, módulo y dirección, en condiciones atmosféricas especiales. Para verificar de manera segura el sensor de viento se ha de diseñar un túnel especial de fugas en vacío. Estas condiciones están basadas en las condiciones ambientales de Marte, por lo cual, en el interior del túnel se ha de conseguir una atmosfera con la misma composición gaseosa (95% CO₂), una presión total entre 5 y 12 mbar y una velocidad del viento entre 0 y 10 metros/segundo.

Mediante el software de simulación de procesos físicos COMSOL®, se pretende realizar un estudio previo, que nos permita determinar el grado de cumplimiento que vamos a poder obtener, teniendo en cuenta las restricciones ya impuestas por nuestro sistema físico, (bombas, túnel).

Cámara experimental

La necesidad de probar nuevos dispositivos electromecánicos de lectura de velocidad y dirección del viento en condiciones atmosféricas extremas, como es el caso de las condiciones de Marte, ha obligado al diseño y construcción de túneles de viento específicos para estas condiciones. Dos tipos de diseños o experimentos son posibles:

El primero de ellos (**túnel de vacío**), consiste en un túnel de grandes dimensiones sobre el que se establecen las condiciones de Marte (presión y composición de gases), (esquema 1). En estas condiciones y en estático, se modifica la relación de velocidad del sensor mediante la acción de una cinta transportadora desde un motor situado en el exterior, de este modo y modificando los valores internos de la presión se consiguen distintas relaciones de velocidad.

El segundo túnel (**túnel de fugas**), objeto de este trabajo, está pensado para poder trabajar en él, de manera que el flujo sea producido por la succión de una bomba. El diseño permite controlar el flujo de entrada de gas de la misma manera que se estudia el comportamiento de una fuga en un sistema de vacío. La combinación ideal esta en conseguir una velocidad del viento adecuada para la lectura del sensor, mientras se mantiene constante el valor de la presión. En la esquema 2, se muestra este diseño. Se trata de una cámara de vacío cilíndrica de pequeñas dimensiones, en las que una cara sirve de entrada de gas mediante el control de flujo de una válvula manual de aguja, o mediante tapones con orificios de distintos diámetros (conductancias), [0.2, 0.5, 1, 1.5, 2]mm. En la cara opuesta se encuentran dos bridas, una KF16, con una T, en la cual se conectan un tubo flexible hacia una bomba rotativa con una alta velocidad de bombeo, y en el otro puerto de la T, un medidor de vacío de tipo mecánico (no influya el tipo de gas). La otra brida KF40, se conecta un pasamuros con conexiones eléctricas, para comunicarse con el sensor de viento. En el interior del cilindro que forma la cámara de vacío y pegado a la cara de entrada de gas, se sitúa un difusor de entrada, cuyo objetivo es crear un flujo laminar y paralelo sobre el tubo de la cámara de vacío. El control de la velocidad en el interior de la cámara se determina en función de todos los factores geométricos, y se regula por la válvula de fugas de entrada de gas, y la forma de este flujo, por la acción del difusor interno.

Contamos con el siguiente instrumental, referenciado en la imagen 1 inferior:

- 1, Bomba de vacío rotativa de una etapa con gas ballast: $S=6\text{m}^3/\text{h}$, presión final $\approx 1\text{mbar}$
- 2, Sensor de vacío Piezo-resistivo: rango (1100 mbar a 0,1mbar)
- 3, Medidor de vacío Dual Gauge
- Válvula reguladora de conductancia: control de flujo entre ($E3\text{mbar/l.}$ a $5E-6\text{mbar/l.}$)
- 4, Válvula reguladora de fuga: Válvula Swagelock.
- 5, Tapones Swagelock con orificios de distintos diámetros, [0.2, 0.5, 1, 2]mm
- 6, Túnel de viento: 35cm de largo por 20 de diámetro.
- Difusor de viento, desde la entrada de la fuga hacia el interior del túnel (3mm a 15mm)
- 7, Anemómetro interior
- 8, Maqueta del "boom" o sensor de viento.

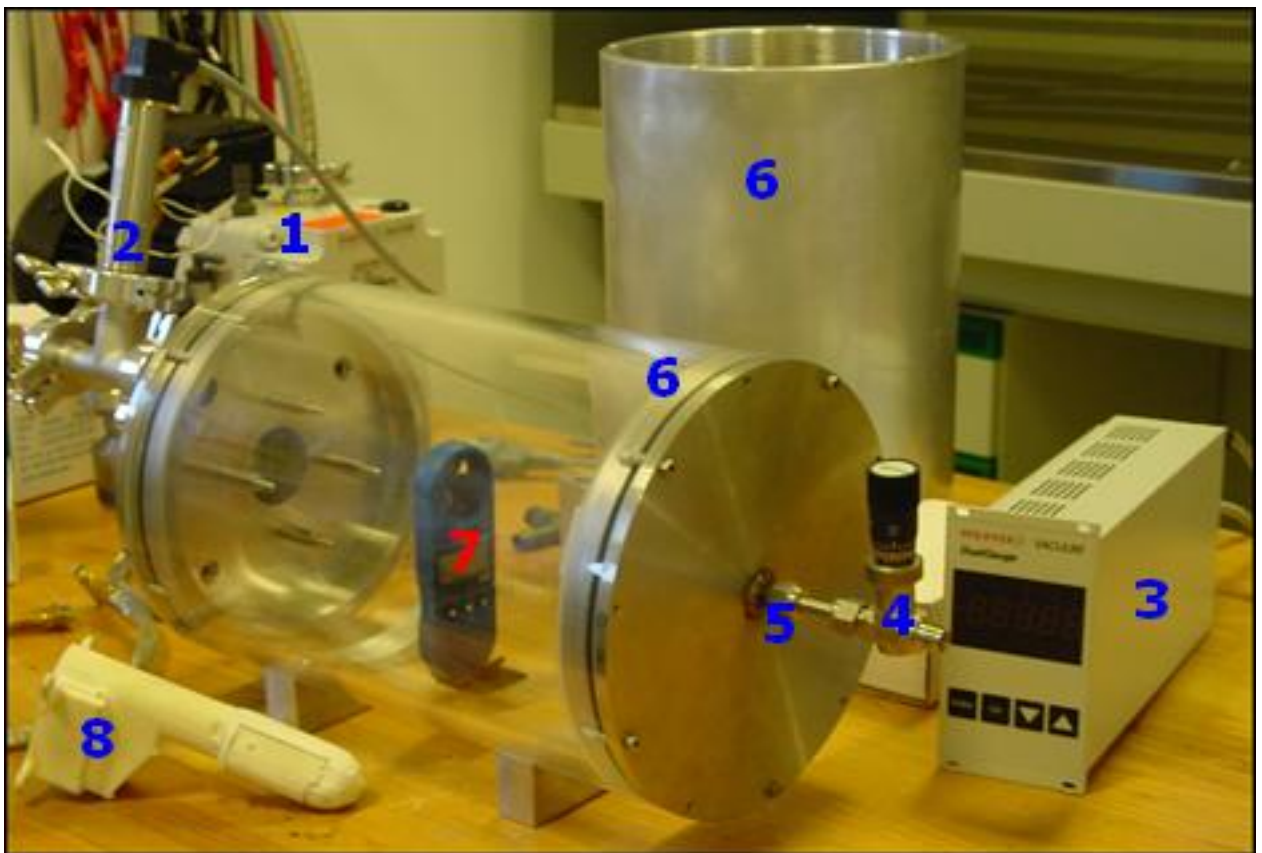
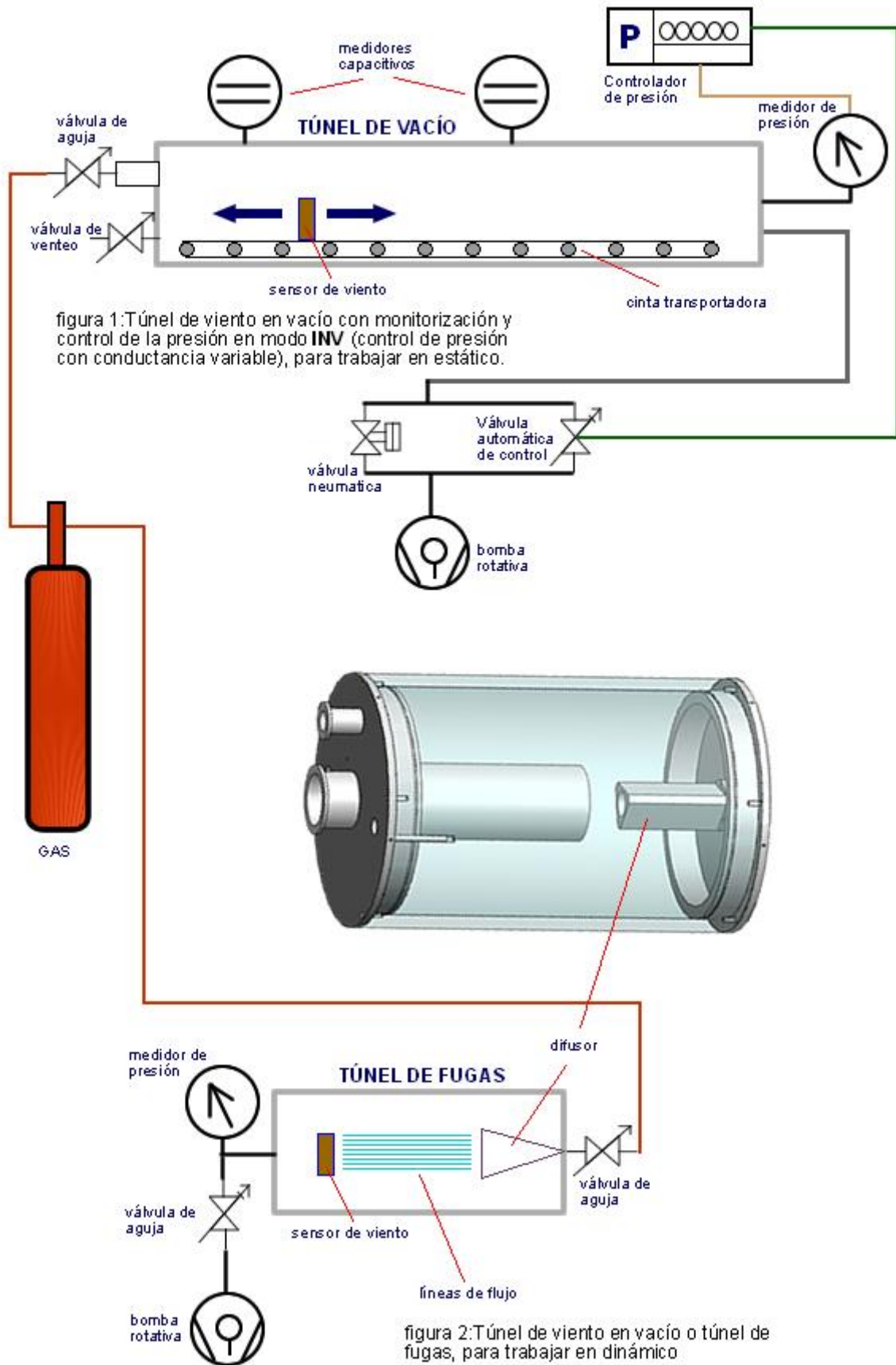


imagen 1



Estudio previo

Tenemos un sistema de vacío compuesto por una cámara, una bomba, un medidor de vacío y dos válvulas para poder controlar la fuga y la conductancia de la bomba. Consideramos nuestro sistema de vacío como si tuviéramos una fuga en el.

Disponemos de una cámara cilíndrica de 350mm de largo y de 200mm de diámetro, sobre la que queremos mantener una presión constante de 7mbar en una atmósfera de CO₂. Para ello contamos con una bomba con una velocidad de bombeo de 6m³/h, Queremos calcular la velocidad efectiva de nuestra bomba, así como el valor de nuestra fuga. Este valor nos dará una importante información sobre la velocidad de entrada del gas en nuestro túnel.

P _{entrada}	P _{interior}	S _{bomba}	S _{eff bomba}	lp del CO ₂
1013 mbar	7 mbar	6 m ³ /h (1.66LS ⁻¹)	5.076 m ³ /h (1.41LS ⁻¹)	5.51E-5 m mbar

Queremos simular el ambiente de MARTE, y realizamos nuestros experimentos con una botella de gas de CO₂ 5.5 Molar, sabiendo que en MARTE el 95% de la composición atmosférica está formada por este gas, calculamos primero la relación que existe entre el camino libre medio y la presión.

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n d^2}; d=2r$$

Sección eficaz de colisión del CO₂ es 0.52E-18m², CO₂ [σ/nm²]= 0.52, $d = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} = 4.06E-10m$

$$\bar{l}p = \frac{RT}{\sqrt{2}\pi N_A d^2} = \frac{8.314 \times 10^3 Pa m^3 kmol^{-1} \times 293K}{\sqrt{2}\pi \times 6.022 \times 10^{26} kmol^{-1} \times (4.06 \times 10^{-10})^2 m^2} = 5.51 \times 10^{-3} Pa \cdot m$$

$$\bar{l}p = 5.51 \times 10^{-5} m mbar para CO_2$$

Para un tubo de sección circular tenemos, sobre el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v_m D_h}{\eta}; \gamma(CO_2) \equiv 1.3$$

$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_o} + \frac{1}{C_{tot}}$, Relación entre conductancias y velocidades de bombeo. Calculamos la conductancia de nuestro sistema y después la velocidad efectiva de la bomba.

Suponemos que la presión en el interior de la bomba es de 1mbar (especificaciones del fabricante) y sabemos que la cámara se encuentra unida a la bomba mediante un tubo flexible KF16 de 1m de longitud.

$$\begin{aligned} C_{tubo} &= 135 \frac{d^4}{l} (\bar{p}) = 135 \frac{(1.6)^4}{1 \times 10^3} \left(\frac{p_{camara} + p_{bomba}}{2} \right) LS^{-1} \\ &= 8.84 \left(\frac{p_{camara} + p_{bomba}}{2} \right) LS^{-1} \end{aligned}$$

$$q_{PV,bomba} = S_o \times p_{bomba} = 1.66 LS^{-1} \times 1mbar = 1.66 mbar LS^{-1}$$

$$q_{PV} = C_{tubo} \times (p_{camara} - p_{bomba}) = 1.66mbar LS^{-1}$$

$$C_{tubo} = \left(\frac{1.66 \text{ mbar } Ls^{-1}}{p_{camara} - p_{bomba}} \right) = 8.84 \left(\frac{p_{camara} + p_{bomba}}{2} \right)$$

$P_{cámara}=1.17 \text{ mbar}$

$$S_{eff} = \frac{S_0 + p_{bomba}}{p_{camara}} = \frac{1.66}{1.17} = 1.41 Ls^{-1} = 5.076 m^3/h$$

Ahora calculamos el valor de la fuga, sabiendo que se realiza desde presión atmosférica a través de un tubo u orificio de 5mm de largo y 3mm de diámetro. Realizamos el cálculo mediante dos aproximaciones:

$\bar{l}p = 5.51 \times 10^{-5} m \text{ mbar para } CO_2$, a $p=E3\text{mbar}$, tenemos que el camino libre medio es de 5.51E-6 cm, si $d=3\text{mm}$, calculamos el número de Knudsen: $K_n = \frac{\bar{l}}{d} = \frac{5.51 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-2}} = 1.83 \times 10^{-4}$, en este caso $K_n \ll 0.01$, por lo que tenemos flujo viscoso.

Para 7mbar, tenemos que el recorrido libre medio es de 7.87E-4cm, y el número de Knudsen es de 0.02, por lo que en este caso tenemos un flujo de transición.

$$q_L = 135 \frac{d^4}{l} \left(\frac{p_{ext}^2 - p_{vac}^2}{2} \right) \text{ mbar} \cdot Ls^{-1}$$

$$q_L = 135 \frac{(3 \times 10^{-2})^4}{0.5} \left(\frac{1000_{ext}^2 - 7_{vac}^2}{2} \right) \text{ mbar} \cdot Ls^{-1} = 108 \text{ mbar } Ls^{-1}$$

$$C_{fuga} = 12.1 \frac{d^3}{l} = 6.53 \times 10^{-4} Ls^{-1}$$

$$q_L = C_{fuga} (p_{ext} - p_{vac}) = 0.64 \text{ mbar } Ls^{-1}$$

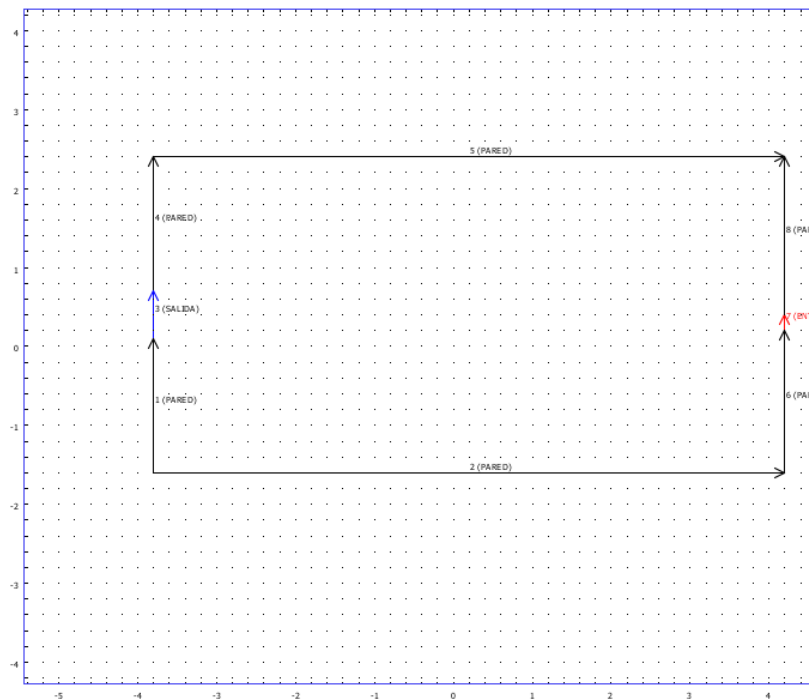
Esto nos indica de que el valor de nuestra fuga se encuentra entre 0.64 y 108 mbar Ls^{-1} .

Análisis mediante COMSOL

Se pretende resolver la ecuación de Navier-Stokes en dos dimensiones, para un sistema rectangular con una abertura de entrada y otra de salida.

Aproximamos nuestro sistema a un rectángulo con un orificio de entrada y otro de salida. El área que encierra el rectángulo es la atmósfera de Marte que se encuentra a **700 Pa**, en un ambiente de CO₂. El orificio de entrada de gas, se encuentra enfrente del de salida. Podemos controlar el flujo de entrada de gas aumentando o disminuyendo la sección del orificio, sabiendo que la presión de entrada es la presión atmosférica 1013 mbar. La presión de salida no la podemos controlar, ya que está determinada por la velocidad de bombeo de la rotativa, sabiendo eso si que la mínima presión en el interior del rotor es de 100 Pa.

Figura 1: Esquema del área de simulación



Consideramos para todos los cálculos, en el **interior** del túnel:

ρ	Densidad [Kg/m ³]	0.01
η	Viscosidad dinámica [Pa*s]	0.001

$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}$, ecuación de transporte de momento, donde η es la viscosidad dinámica, p la densidad, \mathbf{u} es el vector velocidad, p la presión y \mathbf{F} es el campo de fuerza como la gravedad.

Ecuación de continuidad para fluidos incompresibles: $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

En las **paredes** del túnel de vacío:

$$\mathbf{u}=0$$

En este caso el contorno es una pared, sin deslizamiento, por lo que la velocidad normal a la superficie en todo el contorno es de 0 m/s.

Y tanto en el orificio de **entrada** en rojo en la figura 1, como de **salida** azul en la figura 1 tenemos:

$$[\eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)]\mathbf{n} = \mathbf{0}, p = p_0$$

Orificio de entrada	Presión, sin tensión viscosa	100000 Pa
Orificio de salida	Presión, sin tensión viscosa	100 Pa

Esta condición nos permite un control total de la presión, y nos dice que la presión es normal a ambos orificios.

Una vez que tenemos las condiciones de nuestro sistema, mallamos toda el área de medida. En principio, no necesitamos una gran definición, sobre todo cuando no tenemos ningún objeto en el interior del túnel y lo único que queremos calcular es la velocidad en la línea horizontal que une el orificio de entrada con el de salida.

Figura 2, mallado del rectángulo de simulación

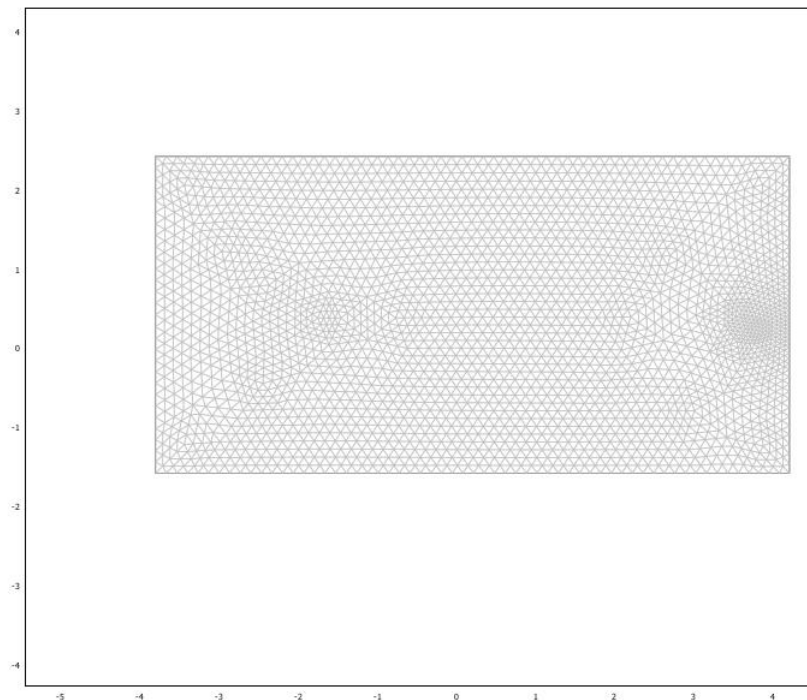
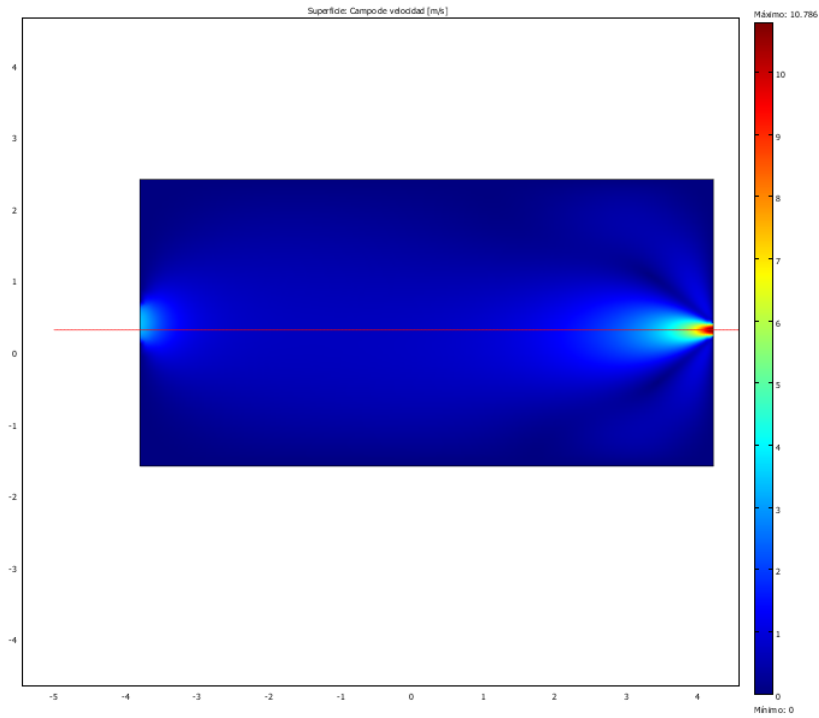
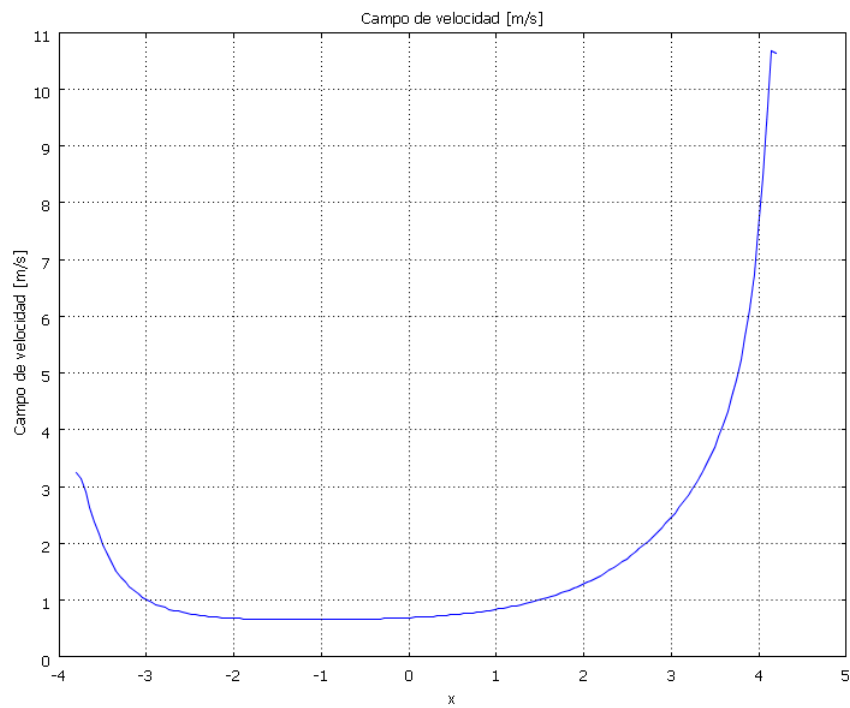


Figura 3, esquema de colores, en el que se representa el campo de velocidad u , el máximo está en 10.786 m/s.



En la figura 4 se representa el campo velocidad en función de la distancia.



Se observa como el campo velocidad tiene un gradiente elevado a la entrada del cilindro, en el rango entre $X=1$ y $X=-3$, se mantiene constante, y a la salida tiene un gradiente algo más suave que el de la entrada. Esto nos indica que si queremos reproducir nuestros experimentos con las mismas condiciones, debemos de situar nuestro “boom”, en el rango de posición entre $[-3, 1]$ para X .

El aspecto más importante de la simulación es la interpretación de los datos reales de lectura de velocidad con el anemómetro.

Un anemómetro comercial, está diseñado para trabajar a presión atmosférica, si cambiamos la presión interior del cilindro, estamos cambiando el camino libre medio de las moléculas que forman el gas, por lo que estamos cambiando la relación l_p , esto nos indica que la relación de velocidad de lectura del anemómetro, esta relaciona con l_p , por lo que debemos de hacer una conversión de los datos, para obtener la lectura real del campo velocidad.

Para la comprobación de las medidas en el laboratorio, trabajamos como se explica al principio del documento en régimen dinámico, es decir la bomba siempre actúa en su régimen de funcionamiento máximo, y nosotros modificamos el caudal de nuestra fuga, es decir el diámetro, sin cambiar la presión, que es la atmosférica (1013 mbar). Nuestro sensor de viento es un Kestel 1000 air con un error de lectura de 0,3 m/s.

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{atm} \cdot V_{medida}^2$$

$$\rho_{atm} \cdot V^2 = P_{real} = \rho_{real} \cdot V_{real}^2$$

$$V_{real} = \sqrt{\frac{\rho_{atm}}{\rho_{real}}} \cdot V_{medida} = \sqrt{\frac{P_{atm}}{P_{real}}} \cdot V_{medida}$$

Presión estática en mbar	Velocidad medida en m/s	Velocidad real en m/s
12	3.7	34.1
11	3.3	31.7
10	2.1	21.2
9.6	1.0	10.3

Conclusiones

Se observa que la posición del sensor influye en la lectura del viento, así como puede crear efectos de turbulencias y remolinos a la salida del mismo (ver figura de portada, en el que las líneas rojas corresponden a líneas de flujo). Según nuestra experiencia, al colocar el sensor de viento en el interior del túnel, estamos condicionando la medida de velocidad. Hemos intentado colocar el sensor justo a la salida del difusor, que correspondería a $X=3$ en la figura 4. Esta situación nos daría una lectura del vector velocidad entre 2,5 y 3,5 m/s. que se correspondería con los datos experimentales obtenidos para un valor de la presión entre 7 y 12 mbar.

Bibliografía

- **Vacuum Technology calculations in chemistry** RS C. D.J. Hucknall and A. Morris
- **Flujo de fluidos e intercambio de calor.** Editorial Reverté, S.A. O. Levenspiel
- **Building Scientific Apparatus** (Third Edition) ABP. John H. Moore, Christopher C. Davis, Michael A. Coplan