



# **Documentación técnica**

**Medidores de caudal por diferencia de presión**

**Luis Santamaría**  
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA  
Universidad de Oviedo

## Contenido

Objetivos:.....	2
Normas de referencia:.....	2
Medidores propuestos: .....	2
VEN-B30-D22 .....	3
Justificación del diseño:.....	3
Especificaciones:.....	4
Conclusiones:.....	5
ORI-B33-D22 .....	5
Justificación del diseño:.....	5
Especificaciones:.....	6
Conclusiones:.....	8
VOM-B37-D20.....	8
Justificación del diseño:.....	8
Especificaciones:.....	9
Conclusiones:.....	11

## Objetivos:

Proveer alternativas a caudalímetros comerciales de uso médico debido a su posible escasez en el marco del COVID-19. Se busca en primer lugar, que los caudalímetros sean capaces de medir con precisión en el rango de caudales de tratamiento médico contra esta enfermedad y, en segundo lugar, que sean accesibles y de bajo coste. El objetivo de los caudalímetros propuestos no es el de sustituir a sensores comerciales, si no de suplir una posible ausencia de estos. La recomendación es que si hay sensores comerciales disponibles se opte por ellos.

## Normas de referencia:

- ISO 5167-1:2003
- ISO 5167-2:2003
- ISO 5167-4:2003
- ISO 5356-1:2015

Se declara que el uso de estas normas ha sido puramente académico y no se busca ningún beneficio económico o de otro tipo diferente al de suplir las posibles necesidades de material necesario para el bienestar de pacientes afectados por COVID-19.

## Medidores propuestos:

Se han estudiado varios diseños de medidores de caudal por presión diferencial. Para el estudio se ha tomado como referencia un rango de regulación de Volumen Tidal de 250 a 600 ml, el cual, aplicando un ciclo típico de ventilación forzada da lugar a los caudales mostrados en la *Figura 1*.

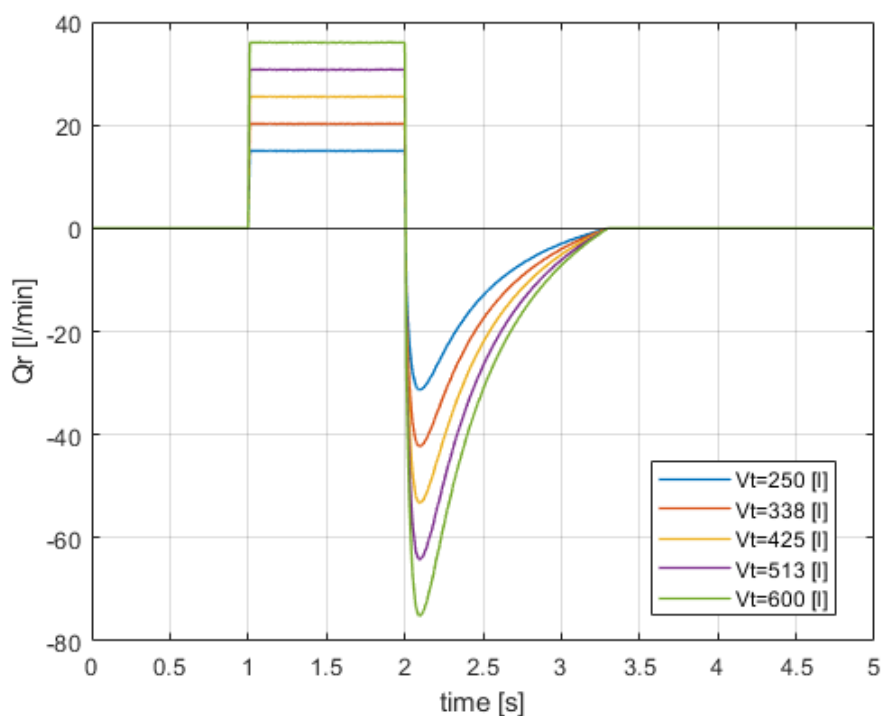


Figura 1: Ciclos de caudal de estudio.

De los diseños estudiados se proponen tres, que se designarán por un código de 9 caracteres separados por guiones en tres grupos de tres caracteres, el código hace referencia a lo siguiente:

- “VEN”: Principio de funcionamiento.
- “B11”: Dos posiciones decimales de la Relación de Diámetros Nominal.
- “D22”: Diámetro Mayor Nominal.

## VEN-B30-D22

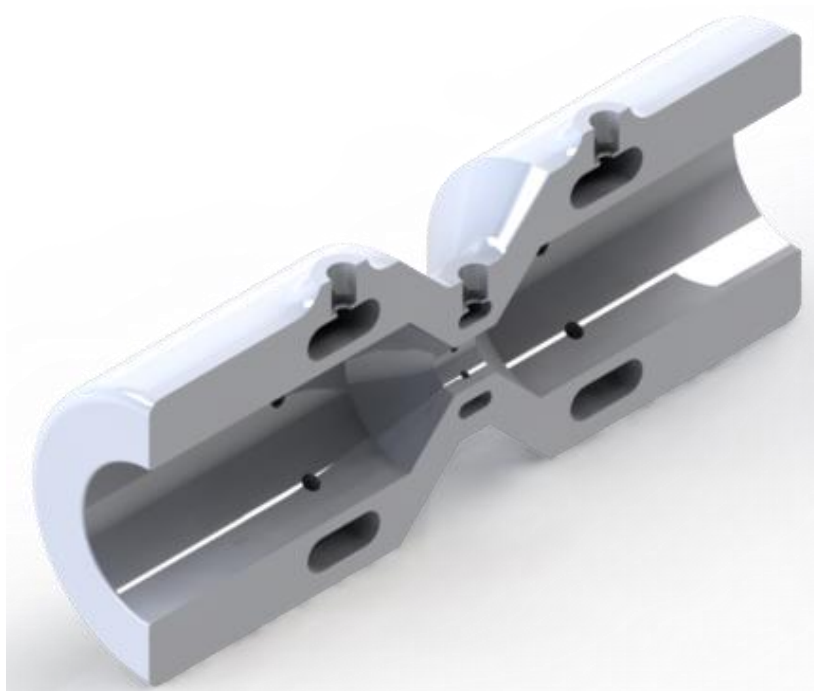
### Justificación del diseño:

Este diseño se basa en el efecto Venturi. La bidireccionalidad del flujo y el rango de caudales implican que la norma ISO sobre medidores basados en este principio no se puede aplicar en este caso. No obstante, se han mantenido algunas de las relaciones geométricas como el posicionamiento y el diámetro de las tomas de presión, además de la longitud de las secciones tubulares. Se ha realizado una versión con cámaras anulares y varias tomas de presión y una más sencilla con tomas directas.

El estrechamiento y el ensanchamiento tienen ambos un ángulo de  $45^\circ$ . Se comprobó mediante simulación computacional de fluidos (CFD) que, debido a la naturaleza del flujo, a pesar de utilizar un ángulos convencionales de  $12^\circ$  el flujo no mantenía la adherencia a las paredes en el ensanchamiento. Por ello se opta por un ángulo más abrupto que permite reducir la longitud del caudalímetro sin perjuicio de su funcionamiento.

El diseño se ha realizado para su conexión directa a conos médicos macho de 22mm. En cuanto a la fabricación, el diseño está hecho para fabricación aditiva, pudiendo ser FDM una tecnología apropiada, siempre y cuando se cumplan las dimensiones. Los modelos se han realizado de forma paramétrica para poder corregir los factores de expansión.

En la *Figura 2* se puede observar una vista de sección del diseño.



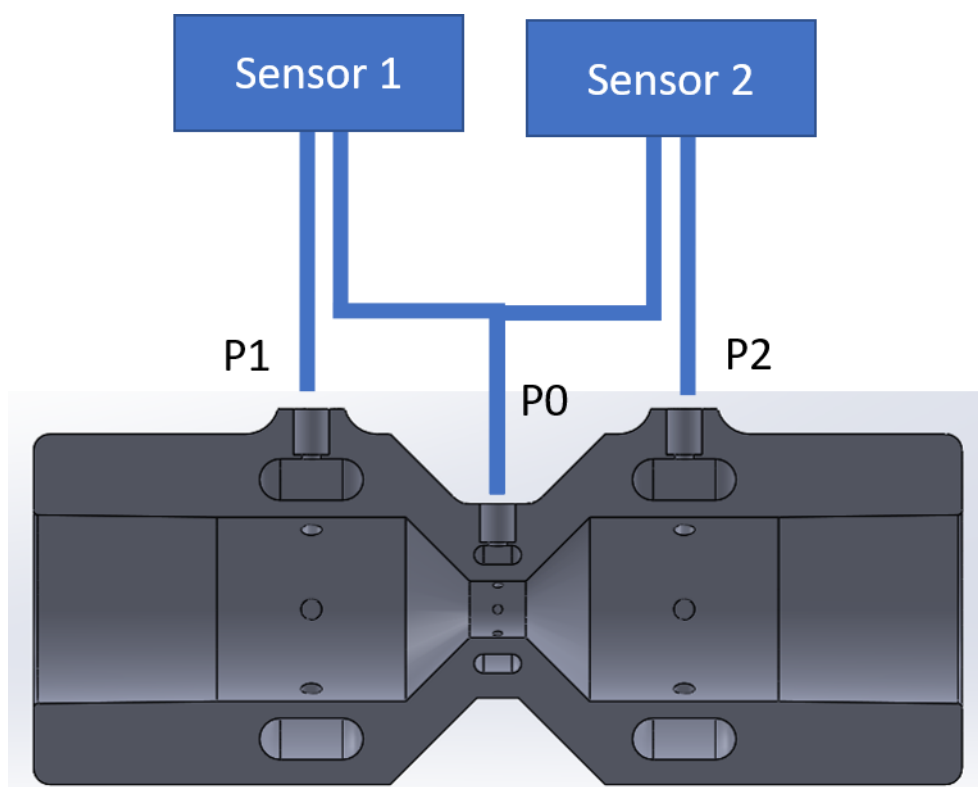
*Figura 2: VEN-B30-D22.*

## Especificaciones:

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones más relevantes:

Dimensión:	Descripción:	Valor
D	Diámetro de la mayor de las secciones tubulares.	21.82 mm
d	Diámetro de la menor de las secciones tubulares.	6.5 mm
$\beta$	Relación de diámetros.	0.298
dt	especificación del tipo de tubo neumático que precisa, diámetro exterior/diámetro interior.	4/2 mm
C	Coeficiente de descarga estimado.	0.887
dc	Diámetro nominal del cono médico con el que es compatible.	22 mm

Este diseño de caudalímetro usa dos sensores de presión diferencial, conectados según el esquema de la *Figura 3*. La medida del caudal siempre se debe realizar entre la toma de entrada y la toma central, de forma que se utiliza el sensor 1 si el flujo entra por la zona de P1, o el sensor 2 si el flujo entra por la zona de P2.



*Figura 3: Esquema de conexiones del caudalímetro.*

Las diferencias de presión estimadas para el rango de caudales de estudio y con un flujo inspiratorio entrante por P1 se pueden ver en la *Figura 4*, donde se muestra la diferencia de presión entre las tomas P1 y P0 hasta el segundo 2, y entre las tomas P2 y P0 del segundo 2 en adelante. Debido a la gran diferencia entre la inspiración y la expiración se propone el uso de dos sensores de presión diferenciales de rangos diferentes, concretamente uno de 250Pa para el sensor 1 y uno de 1000Pa para el sensor 2.

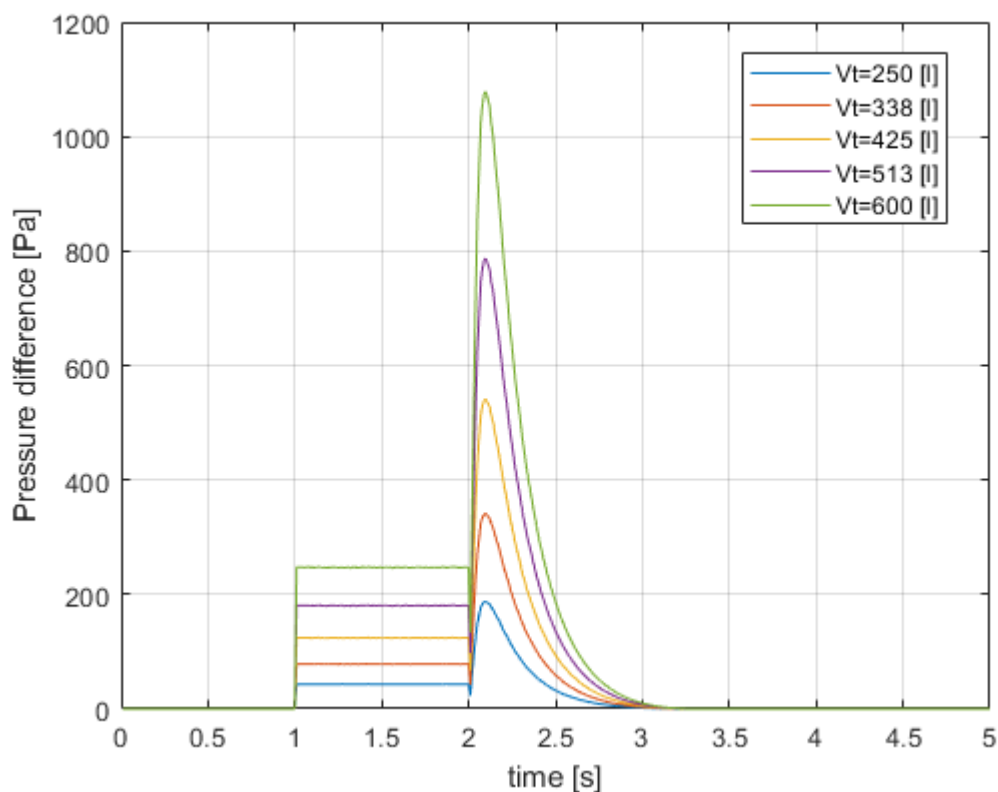


Figura 4: Presiones estimadas entre P0 y P1 hasta el segundo 2 y entre P2 y P0 desde el segundo 2 en adelante.

## Conclusiones:

Las ventajas de este diseño residen en la baja perturbación que produce al flujo de aire en forma de pérdidas de carga y en la buena precisión esperada utilizando sensores del rango recomendado. La principal desventaja es que precisa de dos sensores.

A pesar de contar con una aproximación sobre el valor del coeficiente de descarga, caudalímetro deberá ser calibrado tras su fabricación.

## ORI-B33-D22

### Justificación del diseño:

Se trata de un diseño basado en una placa orificio clásica con tomas en las bridas. Al igual que sucedía con el diseño del Venturi la norma ISO sobre placas orificio no contempla el uso de este instrumental para este tipo de caudales. Sin embargo, por la facilidad de fabricación y simpleza del diseño se ha propuesto una versión de este clásico instrumento.

El diseño cuenta con tres piezas independientes que se ensamblan y se fijan mediante tornillo-tuerca de métrica 4. Sería más que recomendable utilizar juntas tóricas entre las piezas para garantizar la estanqueidad. Una vez más se ha diseñado el caudalímetro para su conexión con un cono médico macho de 22mm. En la Figura 5 se puede observar una vista de sección de este diseño.

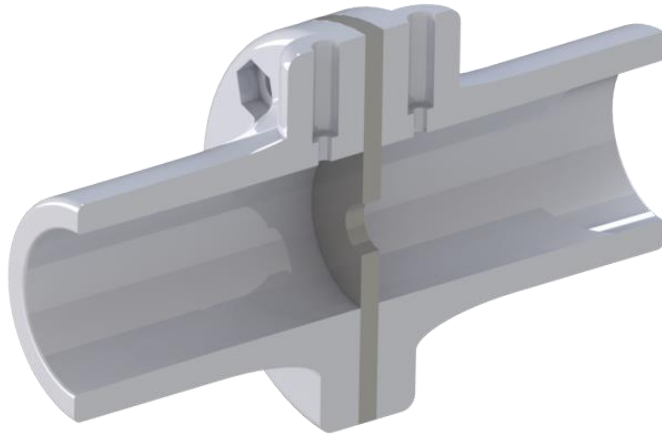


Figura 5: ORI-B33-D22.

### Especificaciones:

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones más relevantes:

Dimensión:	Descripción:	Valor
D	Diámetro de la mayor de las secciones tubulares.	21.82 mm
d	Diámetro de la menor de las secciones tubulares.	7.6 mm
$\beta$	Relación de diámetros.	0.333
dt	especificación del tipo de tubo neumático que precisa, diámetro exterior/diámetro interior.	4/2 mm
dc	Diámetro nominal del cono médico con el que es compatible.	22 mm

Este diseño de caudalímetro usa un único sensor de presión diferencial, conectado según el esquema de la Figura 6.

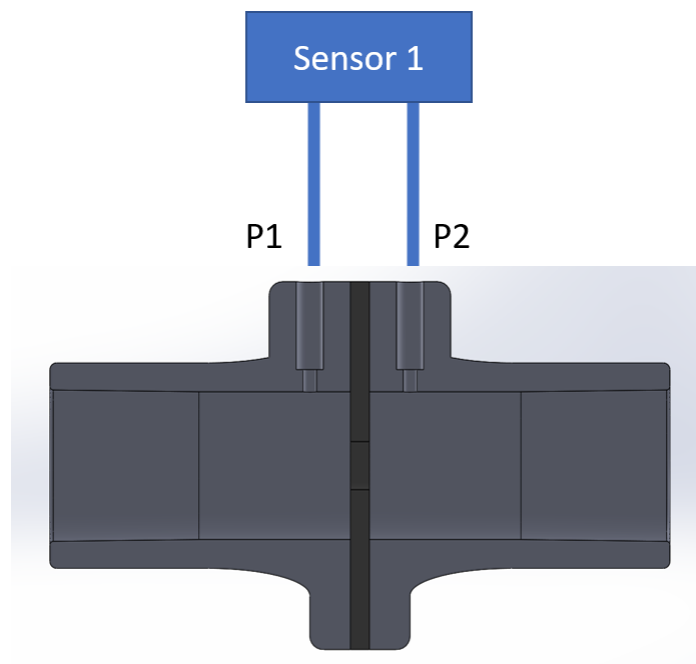
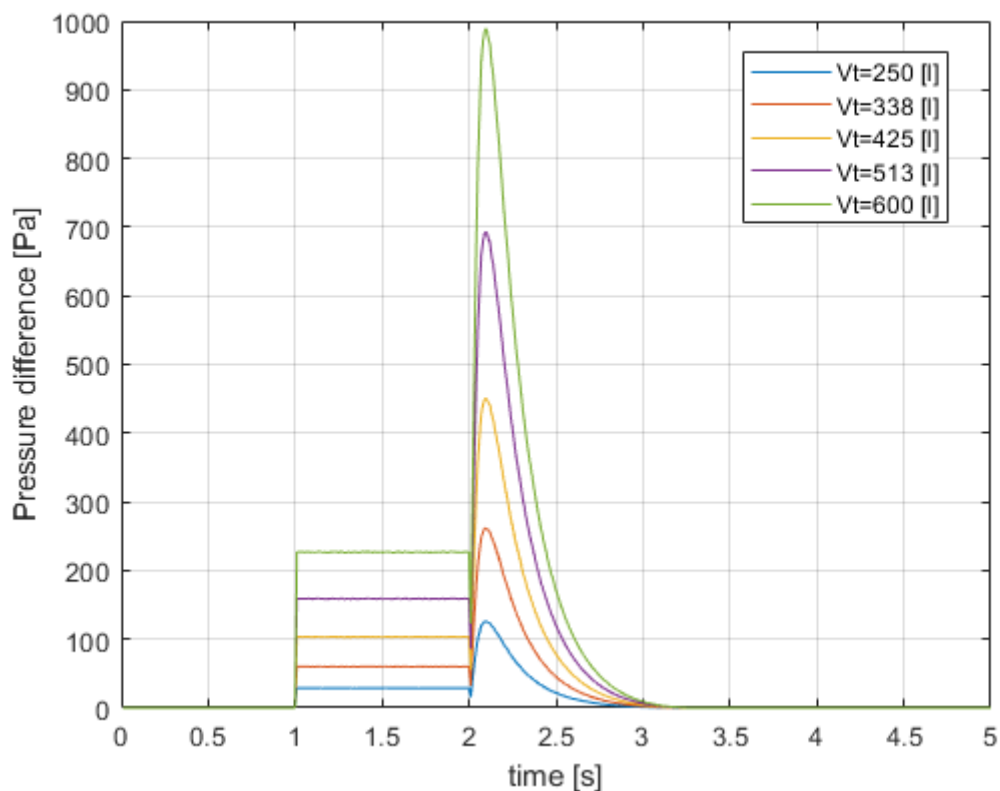


Figura 6: Esquema de conexión del caudalímetro.

Las presiones diferenciales estimadas para los caudales de estudio se pueden ver en la *Figura 7*, donde se ha representado el valor absoluto de la diferencia de presión. Como sucedía con el anterior modelo las diferencias de presión en la espiración son mucho mayores que en la inspiración. Por ello se recomienda utilizar un sensor:

- De  $\pm 1000\text{Pa}$  si se desea abarcar todo el rango, teniendo en cuenta que debe ser suficientemente preciso para medir bien presiones de aproximadamente  $30\text{Pa}$ , correspondientes al menor caudal de estudio.
- De  $\pm 500\text{Pa}$  para abarcar la mayor parte del rango y quizás limitar el uso de este medidor a ese rango de ventilación.
- De  $250\text{Pa}$  si únicamente se desea utilizar para medir el caudal en el inspiración.



*Figura 7: Presiones estimadas para el caudalímetro de placa orificio.*

Los coeficientes de descarga estimados se muestran en la *Figura 8*.



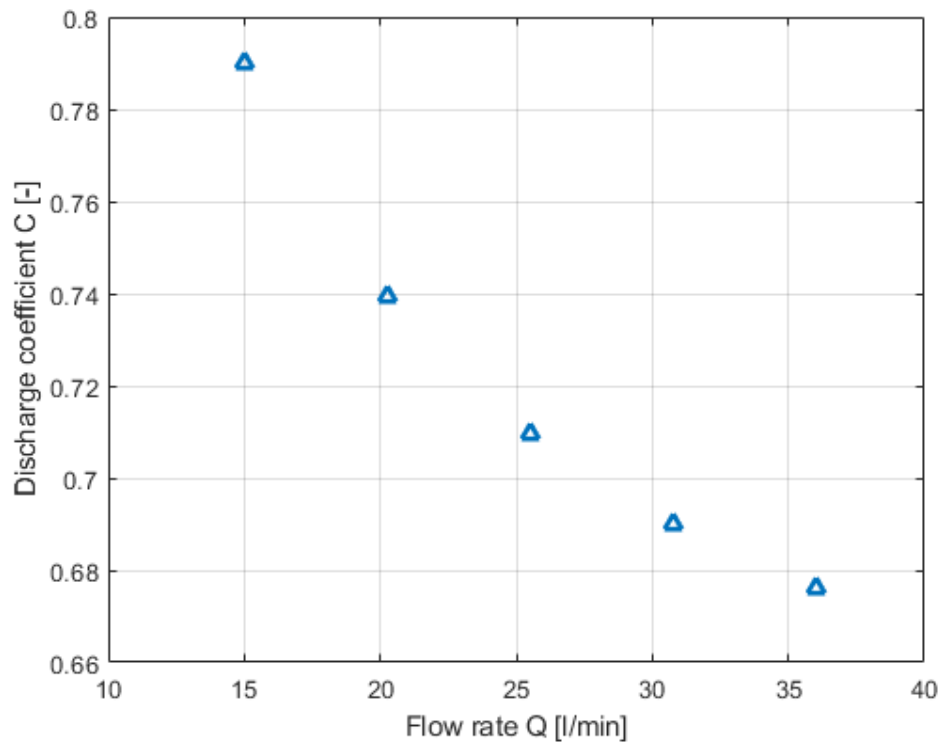


Figura 8: Coeficientes de descarga estimados.

## Conclusiones:

Las ventajas de este diseño son su sencillez y que con un sólo sensor diferencial de presión puede medir en los dos sentidos de caudal. La desventajas de este diseño son que requiere bastante precisión del sensor si se quiere abarcar todo el rango y que el coeficiente de descarga es variable con el caudal en el rango de caudales de aplicación. Al igual que con el caudalímetro anterior se precisa una calibración tras su fabricación.

## VOM-B37-D20

### Justificación del diseño:

Este diseño está basado en una placa orificio de sección variable con el caudal, un sistema más conocido con sus siglas en inglés VOM (Variable Orifice Meter) y que ya se utiliza en caudalímetros comerciales de aplicación médica. Existe muy poca documentación sobre este tipo de caudalímetros, así que este diseño está propuesto más bien para su desarrollo y no para su aplicación directa.

Se trata de un diseño dividido en cuatro piezas, similar al de la placa orificio, con la diferencia de que el orificio es rectangular y formado por las dos piezas centrales llamadas Flaps que son flexibles. Estos Flaps se doblan de una forma proporcional al caudal, haciendo que la relación entre la diferencia presión y el caudal sea casi lineal. Esto soluciona el problema que presentaba el caudalímetro de placa orificio anterior, ya que las diferencias de presión para los diferentes caudales son mucho menores.

En la zona de unión entre las piezas este diseño necesita juntas tóricas, ya que tiene espacio entre las partes.

En este caso, a diferencia de los anteriores, se ha optado por un diseño para conexión con cono médico hembra de 22m. En la *Figura 9* se puede observar una vista de sección del diseño.

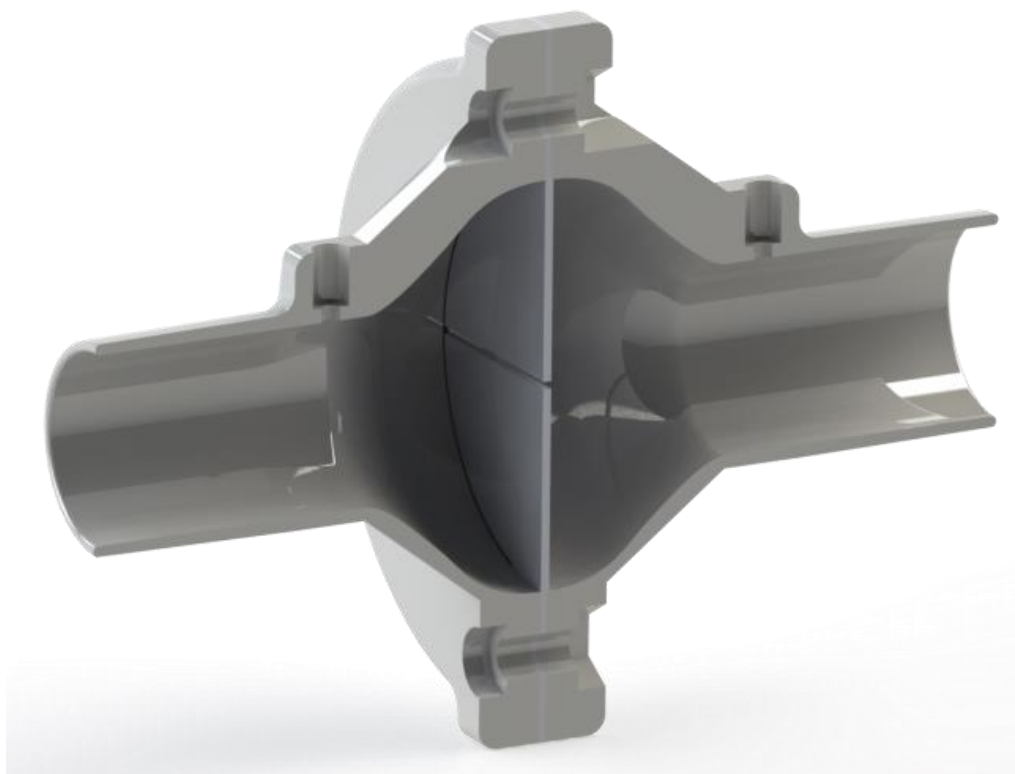


Figura 9: VOM-B37-D22.

### Especificaciones:

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones más relevantes:

Dimensión:	Descripción:	Valor
D	Diámetro de la mayor de las secciones tubulares.	19.57 mm
d	Distancia vertical entre los Flaps sin flexión.	1 mm
L	Longitud del espacio entre los Flaps.	20.55 mm
$\beta$	Raíz cuadrada de la relación de áreas sin flexión.	0.368
dt	especificación del tipo de tubo neumático que precisa, diámetro exterior/diámetro interior.	4/2 mm
dc	Diámetro nominal del cono médico con el que es compatible.	22 mm

Este diseño, al igual que el de placa orificio utilizaría un único sensor diferencial de presión, que se conectaría como se puede observar en la *Figura 10*.

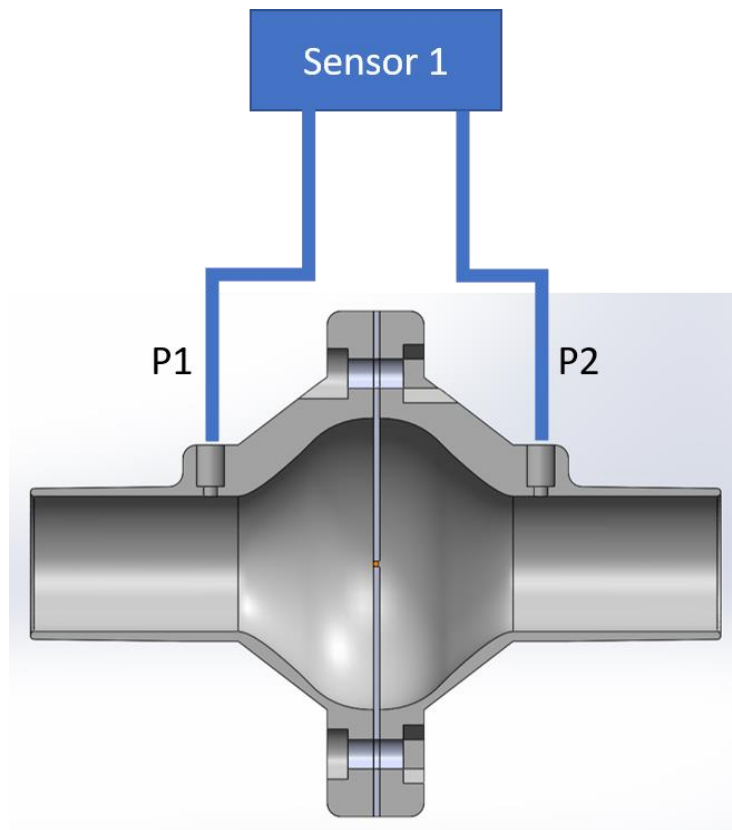


Figura 10: Esquema de conexiones del caudalímetro.

Las presiones diferenciales estimadas (valor absoluto) para este diseño suponiendo una flexión máxima de  $10^\circ$  en los Flaps correspondiente al caudal máximo se muestran en la Figura 11.

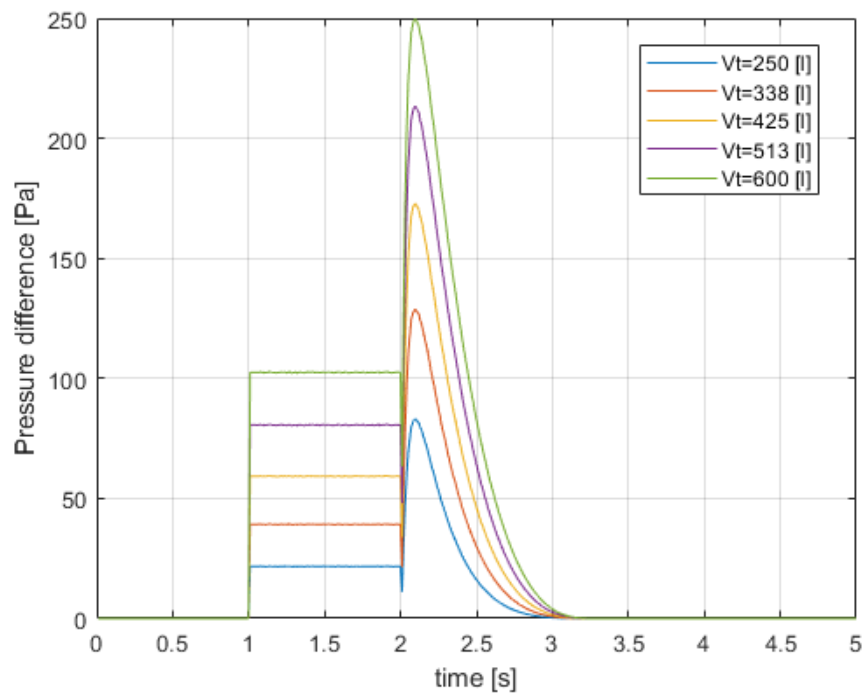
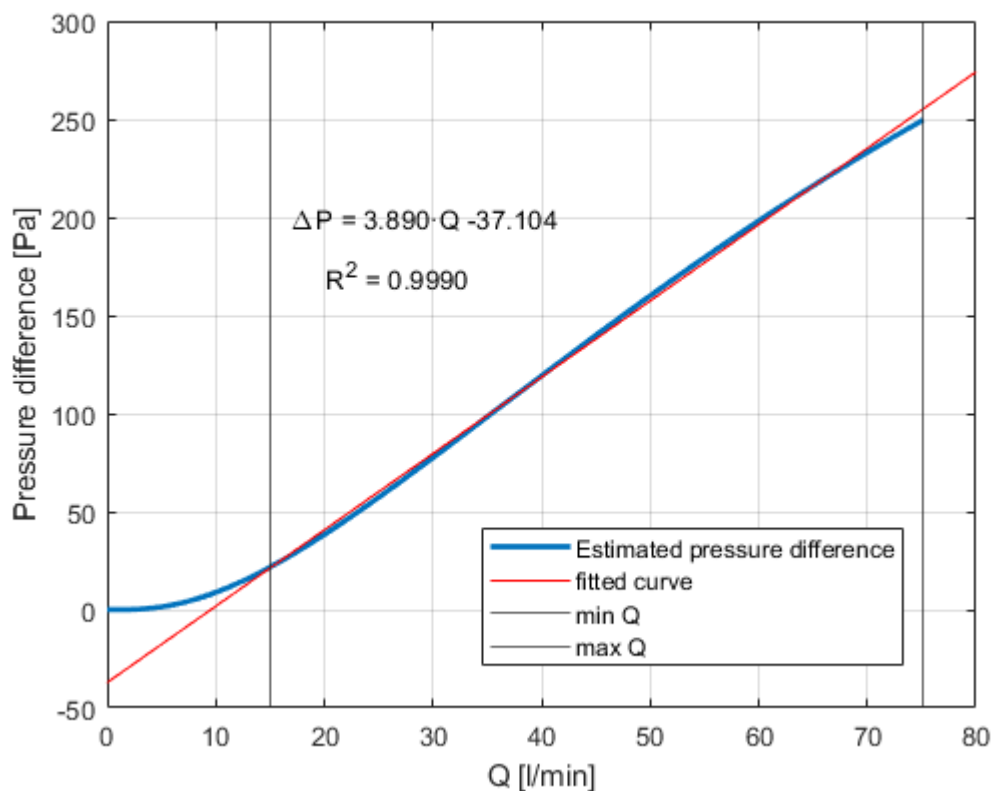


Figura 11: Presiones estimadas para el caudalímetro

Como se puede observar en la *Figura 11* el rango de presiones se reduce considerablemente en comparación con los otros caudalímetros, de forma que con un sensor de  $\pm 250\text{Pa}$  se abarca todo el rango con precisión.

Además, en el rango de caudales de estudio, la respuesta del sensor se puede aproximar con precisión por una recta, como muestra la *Figura 12*.



*Figura 12: Ajuste lineal de la presión en el rango de caudales de estudio.*

## Conclusiones:

Las ventajas de este diseño son que utiliza un único sensor diferencial de presión, que mide con precisión en todo el rango, y que la respuesta en el rango de caudales requerido se puede aproximar con precisión por una recta. La principal desventaja de este diseño es su complejidad, dado que los Flaps son elementos flexibles que deben tener una rigidez concreta para que el caudalímetro funcione correctamente. Además, el estudio realizado es puramente teórico. Para un correcto estudio de este diseño serían necesarios ensayos experimentales, que dadas las circunstancias no se han podido realizar. Por ello se propone como un diseño en desarrollo.