



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE
ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA
VENTOSA CON DIFERENTES MECANISMOS
DE SALIDA DEL AIRE MEDIANTE TÉCNICAS
CFD**

AUTOR: SÁNCHEZ ARTERO, DANIEL

TUTOR: IGLESIAS REY, PEDRO LUÍS

COTUTOR: MARTINEZ SOLANO, FRANCISCO JAVIER

Curso Académico: 2015-16

Agradecimientos

A mis Padres, Diego y Sagrario, a mi hermana Irene y a Javi y a mis abuelos y abuelas. Gracias por enseñarme tanto y confiar en mí.

Resumen

La presencia de aire en el interior de las instalaciones hidráulicas a presión, especialmente durante el llenado y vaciado de las mismas, presenta un grave riesgo para la integridad de la instalación. Este aire se acumula en determinadas zonas, y para poder gestionarlo de una forma adecuada se hace uso de las ventosas. Este tipo de dispositivos permiten la expulsión del aire acumulado durante el llenado de las instalaciones y su entrada durante el vaciado. Además, permite la gestión del mismo en condiciones de funcionamiento normales.

Además de estar colocadas en un lugar adecuado, tiene que realizarse un dimensionado preciso para que cumplan su papel de forma segura en el interior de las instalaciones. Sin embargo, su caracterización es compleja, y en ocasiones la curva proporcionada por el fabricante no se ajusta plenamente con el comportamiento real de las ventosas.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar de forma precisa el modelo de ventosa IRUA-960-DN80 y el efecto que tiene su cubierta mediante la utilización de técnicas CFD (siglas en inglés de Mecánica de Fluidos Computacional). De esta forma se pretende llegar a un modelo real del funcionamiento de la ventosa más allá de la curva proporcionada por el fabricante, y estudiar como un cambio en la geometría de la cubierta puede modificar su comportamiento.

La simulación se ha realizado mediante el uso de ANSYS y su paquete de CFD Fluent. Además, la geometría ha sido preparada previamente con Autodesk Inventor. Estas herramientas han permitido crear un modelo matemático para caracterizar el comportamiento de la ventosa para diferentes caudales de expulsión. Además, sobre este modelo se ha podido variar y estudiar las variaciones en los puntos de funcionamiento de la ventosa con las diferentes geometrías de carcasa propuestas.

El modelo original se ha validado con datos experimentales obtenidos por el profesor Pedro Luis Iglesias Rey.

Palabras Clave: CFD, Ventosas, Mecánica de Fluidos Computacional

Resum

La presència d'aire en l'interior de les instal·lacions hidràuliques a pressió, especialment durant l'ompliment i buidatge de les mateixes, presenta un greu risc per a la integritat de la instal·lació. Este aire s'acumula en determinades zones, i per a poder gestionar-ho d'una forma adequada es fa ús de les ventoses. Este tipus de dispositius permeten l'expulsió de l'aire acumulat durant l'ompliment de les instal·lacions i la seua entrada durant el buidatge. A més, permet la gestió del mateix en condicions de funcionament normals.

A més d'estar col·locades en un lloc adequat, ha de realitzar-se un dimensionat precís perquè complisquen el seu paper de forma segura en l'interior de les instal·lacions. No obstant això, la seua caracterització és complexa, i de vegades la corba proporcionada pel fabricant no s'ajusta plenament amb el comportament real de les ventoses

Este treball té com a objectiu caracteritzar de forma precisa el model de ventosa IRUA-960-DN80 i l'efecte que té la seua coberta per mitjà de la utilització de tècniques CFD (sigles en anglès de Mecànica de Fluids Computacional) . D'esta manera es pretén arribar a un model real del funcionament de la ventosa més enllà de la corba proporcionada pel fabricant, i estudiar com un canvi en la geometria de la coberta pot modificar el seu comportament.

a simulació s'ha realitzat per mitjà de l'ús d'ANSYS i el seu paquet de CFD Fluent. A més, la geometria ha sigut preparada prèviament amb Autodesk Inventor. Estes ferramentes han permés crear un model matemàtic per a caracteritzar el comportament de la ventosa per a diferents cabals d'expulsió. A més, sobre este model s'ha pogut variar i estudiar les variacions en els punts de funcionament de la ventosa amb les diferents geometries de carcassa proposades.

El model original s'ha validat amb dades experimentals obtinguts pel professor Pedro Luis Esglésies Reu

Paraules clau: CFD, Ventosa, Mecànica de Fluids Computacional

Abstract

Air presence inside pressurized installations, especially during filling and emptying, risk heavily installation integrity. Air gathers inside the installation in certain points, and it is there where Airing valves are required. These devices allow the air flow outside during filling and permit it to flow inside when emptying. They also manage the air flow during steady conditions.

A part from being well located, they have to be correctly sized. Otherwise, they won't perform as they had been designed. The main problem is that normally manufacturers curve does not represent the real performance of the valve.

This project goal is to accurately characterize the Airing Valve IRUA-960-DN80 and the effect different case geometries have on its performance. This has been done by using CFD methods (Computerized Fluid Dynamics). In this way, the objective was obtaining an accurate model a part from the manufacturer one, and obtaining the difference between different cases.

Simulation has been done by using ANSYS and its CFD module Fluent. Geometry has been previously adjusted in Autodesk Inventor. This tools have permitted to make a mathematical model to characterize the airing Valve performance and using this model it has been possible to see the change in different working points and cases.

Original model has been proved with experimental data provided by professor Pedro Luis Iglesias Rey.

Keywords: CFD, Airing Valve, Computerized Fluid Dynamics

Índice del trabajo Final de Grado

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto
- Planos

Índice de la memoria:

Capítulo 1: Introducción.....	2
1.1. Justificación del TFG.....	2
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos del TFG	3
Capítulo 2: Las ventosas en las instalaciones.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Presencia del aire y problemas derivados.....	6
2.2.1. Problemas derivados.....	6
2.2.2. Origen del aire atrapado	7
2.3 Ventosas.....	8
2.3.1 Principio de funcionamiento	9
2.3.2 Clasificación de ventosas.....	11
Capítulo 3. Caracterización de ventosas	14
3.1. Introducción	14
3.2. Flujo isentrópico en toberas	14
3.3. ANALOGÍA ENTRE FLUJO EN TOBERAS Y FLUJO EN VENTOSAS	18
3.3.1. Admisión.....	18
3.3.2. Expulsión	19
3.4. Curva característica de la ventosa.....	20
3.5. Flujo compresible e incompresible	21
Capítulo 4: Modelo CFD para ventosas	26
4.1. introducción a las técnicas CFD.....	26
4.2 Ecuaciones CFD	26
4.2.1 Ecuación de continuidad	27
4.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	27
4.2.3 Ecuación de la energía.....	27
4.3 Método de trabajo con un modelo CFD.....	27
4.4 Aplicaciones de las técnicas CFD.....	29
4.5 Análisis de ventosas con CFD: metodología del proyecto.	29
4.5.1. Geometría	30

4.5.2. Mallado.....	31
4.5.3 Solver: ANSYS Fluent.	36
4.5.4 Post Procesado	38
Capítulo 5: Análisis de resultados	40
5.1. Validación modelo original.....	40
5.2. Comparativa con el resto de modelos	42
5.2.1. Carcasa a 6 mm más alta	42
5.2.2. Carcasa invertida	44
5.2.3. Carcasa con diseño distinto.....	45
5.2.4. Carcasa con codo a 90º	46
5.2.5. Carcasa con codo acabado en chaflán.	48
5.3. Comparativa de resultados:	50
Capítulo 6: Conclusiones	52
Bibliografía	55

Índice de figuras

Figura 1- Instalación con ventosas- IRUA (www.irua.es)	8
Figura 2- (a) Flotador arriba (bloqueo) - (b) Flotador abajo (www.construmática.com)	10
Figura 3- Ejemplo de ventosas de gran orificio (www.construmática.com)	11
Figura 4 – Ejemplo de ventosas de pequeño orificio . (www.construmática.com)	12
Figura 5- Tobera convergente (Fuertes et Al, 2001)	14
Figura 6 – Curva característica de una ventosa de gran orificio (Fuertes 2001).....	20
Figura 7 – Curva característica de una ventosa de pequeño orificio (Fuertes 2001).....	21
Figura 8 – Ejemplo de modelo CFD	26
Figura 9 – Modelado de geometría con Autodesk Inventor	31
Figura 10 – Ventosa IRUA con malla de 2mm.....	32
Figura 11 – Ventosa IRUA con malla de 5 mm	32
Figura 12- Skewness: Ángulos máximo y mínimo	33
Figura 13 – Aspect Ratio: geometrías	33
Figura 14 – Número de elementos en función del tamaño de malla	35
Figura 15 – Ejemplo de Named Selection en ANSYS	36
Figura 16 – Evolución de residuos durante el cálculo de Fluent.....	37
Figura 17 – Mapa de presiones de una ventosa con ANSYS fluent.....	38
Figura 18- Gráfico comparativo de resultados ANSYS-Experimental.....	40
Figura 19- Forma de la carcasa en el modelo IRUA original.....	42
Figura 20-Modelo IRUA - Carcasa 6mm más alta.....	42
Figura 21 – Curva de expulsión IRUA prototipo 2	43
Figura 22 - Modelo IRUA - Carcasa invertida	44
Figura 23 – Curva de expulsión IRUA prototipo 3	44
Figura 24 - Modelo IRUA - Carcasa con diseño distinto	45
Figura 25 – Curva de expulsión IRUA prototipo 4	46
Figura 26 - Modelo IRUA - Carcasa con codo a 90º.....	47
Figura 27 - Curva de expulsión IRUA prototipo 5	47
Figura 28 - Modelo IRUA - Carcasa con codo acabado en chaflan.....	48
Figura 29 - Curva de expulsión IRUA prototipo 6.....	49

Figura 30 – Comparativa de resultados obtenidos entre los diferentes prototipos..... 50

Figura 31 – Diferencia de caudales para una misma presión de trabajo 51

Índice de tablas

Tabla 1- Comportamiento del flujo en toberas convergentes	17
Tabla 2 – Condiciones del flujo durante la admisión.	18
Tabla 3 – Valores típicos Skewness	33
Tabla 4 - Tamaños de malla y error respecto al experimental.....	34
Tabla 5- Resultados ensayo Modelo original con CFD	40
Tabla 6- Error entre ensayo experimental y ensayo con CFD	41
Tabla 5- Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 2	43
Tabla 6 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 3.....	45
Tabla 7 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 3.....	46
Tabla 8 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 5.....	48
Tabla 9 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 6.....	49

Memoria

Capítulo 1: Introducción

1.1. Justificación del TFG.

Las válvulas de aireación o ventosas son un elemento de una gran importancia en instalaciones hidráulicas y de distribución de agua por las situaciones de peligro que estas pueden evitar. La no eliminación del aire en los procesos de llenado de instalaciones o la falta de este durante el vaciado puede producir situaciones críticas en la instalación que pueden terminar con la destrucción de la misma. Por eso mismo se tiene que garantizar el correcto funcionamiento de estas ventosas.

Muchas veces estas válvulas se encuentran al aire libre y por eso mismo sus partes están expuestas a los elementos, lo que hace necesario que aparte de resistir las condiciones de funcionamiento estas válvulas tengan otros elementos que las protejan de posibles problemas externos. Es por eso que la zona de salida de aire está protegida con carcasas u otros elementos para evitar obstrucciones. Sin embargo, estos mismos elementos pueden condicionar la capacidad de expulsión de aire de las mismas y es lo que vamos a estudiar.

Gracias a la gran revolución Tecnológica vivida en las últimas décadas y a un continuo estudio de nuevas formas de ahorrar costes, hoy en día técnicas como los CFDs permiten realizar complejos ensayos mediante el cálculo computacional y predecir de una forma muy exacta el comportamiento que luego se daría en la realidad.

Es por esto que apoyándose en ensayos experimentales se puede llegar a la conclusión de cuál de las soluciones de protecciones de la ventosa es más adecuada para no tener pérdidas excesivas.

1.2 Motivación

El trabajo de Fin de Grado constituye una última prueba para los alumnos del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales antes de poder obtener su título de Grado. Su justificación está en la demostración de que el alumno ha adquirido las competencias de su titulación y por lo tanto está capacitado para continuar sus estudios de Master en Ingeniería Industrial o incorporarse al mercado laboral como ingeniero.

También este trabajo se presenta como una primera forma de especialización. Desde que cursase por primera vez una asignatura relacionada con el tema en segundo curso, el autor de este trabajo siempre se ha sentido atraído por la rama de la Mecánica de Fluidos y la Hidráulica. Es por eso que decidió realizar su trabajo en el departamento. Además, el haber cursado la asignatura de CFDs ha supuesto un extra de motivación al ver el gran campo de aplicación que esta ciencia tiene.

Todos estos factores han supuesto para el alumno la motivación para decidirse por este trabajo y de esta forma profundizar aún más en el estudio de este campo de trabajo. Así como poder mejorar en el manejo de CFDs.

1.3 Objetivos del TFG

Como se ha comentado con anterioridad, estos dispositivos cuentan con una tapa o carcasa que se encuentra en la parte superior de la ventosa y que se encarga de proteger a esta frente a posibles obstrucciones o problemas causados por la entrada accidental de elementos en su interior.

En el caso de este TFG, se ha pretendido estudiar como las diferentes formas de esta carcasa pueden influenciar la capacidad de expulsión de una ventosa y variar el rendimiento de la misma.

Para ello se ha escogido una ventosa industrial modelo IRUA-960-DN80 y se ha estudiado como varía su capacidad de expulsión para diferentes diseños de tapa.

Se han escogido 6 diseños diferentes partiendo del original, en los cuales se ha variado tanto la geometría de la tapa como su posición con respecto al primer modelo.

Este trabajo tiene como objetivo no solo la caracterización de los diferentes diseños de salida de la ventosa, si no el aplicar los conocimientos aprendidos a lo largo del Grado y en la asignatura de CFDs. No solo se pretende evaluar mediante CFDs la capacidad de expulsión de la ventosa, si no que se ha querido también demostrar mediante comparación con ensayos experimentales la validez de estos métodos de estudio.

Es por esto que el trabajo se distribuye en diferentes objetivos o etapas que nos permiten obtener el resultado final.

- Selección de los diversos modelos, así como su representación en CAD.
- Estudio del mallado del elemento.
- Estudio del comportamiento de las ventosas mediante técnicas CFDs, así como la monitorización de los resultados del proceso.
- Comparación de resultados obtenidos en los análisis con resultados reales.
- Análisis de resultados y obtención de conclusiones.

Capítulo 2: Las ventosas en las instalaciones

2.1. Introducción

Por el carácter esencial que tiene el agua para los seres humanos su transporte y gestión siempre ha sido de vital importancia para ellos. Sin embargo, con el aumento de tamaño de las instalaciones y la evolución de estas, aparecen cada vez más esfuerzos y riesgos para estas.

Durante las etapas de llenado y vaciado, así como durante el funcionamiento de las instalaciones, puede aparecer aire atrapado en el interior. Este puede ocasionar graves problemas si no es gestionado correctamente. Por esto, las ventosas cumplen un papel fundamental en cualquier red a presión. La capacidad que tienen de controlar la salida y entrada de aire hacen que puedan evitar grandes problemas derivados de su presencia.

2.2. Presencia del aire y problemas derivados

2.2.1. Problemas derivados

Muchas veces, en el interior de las tuberías se puede dar la presencia de aire, en formas muy diversas. Esto representa un gran peligro tanto para el funcionamiento de las ventosas como para las instalaciones colindantes y las personas. Los principales problemas relacionados con la presencia de aire en las instalaciones son:

- Reducción de la sección efectiva de la tubería: esto es debido a la presencia de bolsas de aire a lo largo del recorrido de la instalación y trae consigo problemas tales como una menor capacidad, mayores pérdidas de carga, y en ocasiones puede causar fenómenos de cavitación.
- Falta de presión en instalaciones de impulsión: en este tipo de instalaciones se suele contar con dispositivos como bombas que aplican una determinada energía al agua para alcanzar la presión requerida en los diferentes puntos de la instalación. Por la naturaleza del aire, este es un fluido compresible y con una densidad del orden de mil veces menor a la del agua. Esto hace que la energía necesaria para moverla será enormemente mayor. Esto puede dar lugar a que las bombas no sean capaces de mover todo el fluido y que en ocasiones no solo no de la presión requerida, si no que el fluido se quede totalmente parado.
- Rotura de tuberías: tanto por sobrepresión como por succión. La presencia del aire en tuberías en ocasiones puede producir aumentos drásticos de la presión. Si las tuberías no están dimensionadas previendo estas tensiones, pueden romper. Por otro lado, el vaciado de las tuberías, si no se hace de una forma escalonada puede ejercer succiones sobre la misma que en caso de no estar controladas puede suponer el colapso de las mismas.

- Fenómenos de cavitación: la existencia de aire en las tuberías unida al aumento de la velocidad del fluido puede provocar la formación de burbujas de vapor que posteriormente pueden generar cavitación en el interior de estas.

Viendo todos los problemas derivados de la presencia de aire en las instalaciones, se convierte una necesidad encontrar su origen con el fin de evitar su aparición. Además, durante el dimensionado de una instalación hidráulica, no solo los elementos principales se diseñan en función a los esfuerzos. También los elementos auxiliares y de protección se deberán diseñar correctamente teniendo en cuenta posibles apariciones de aire.

2.2.2. Origen del aire atrapado

Son diversos los motivos por los que el aire puede quedar atrapado en el interior de una tubería. El estudio a lo largo de los años ha permitido encontrar diferentes motivos con naturalezas muy diferentes. En ocasiones, el aire queda atrapado de forma intencionada en el interior de las instalaciones con algún uso concreto. Otras veces, el aire queda atrapado de forma accidental, ya sea por algún error en la manipulación de los elementos de la instalación o por roturas o fenómenos derivados con el movimiento del agua.

Los principales fenómenos que originan la existencia de aire atrapado en el interior de las tuberías son:

- Liberación de aire disuelto en el agua: cambios como el ascenso de la temperatura o descensos de presión originan una menor capacidad de retención de los átomos de oxígeno por parte del agua y esto deriva en la formación de burbujas de aire.
- Errores de diseño o purga: si no se tiene en cuenta durante el diseño de la instalación la entrada de aire y las posibles zonas de acumulación de este, pueden formarse grandes bolsas de aire que, en caso de no ser correctamente purgadas, pueden generar los fenómenos anteriormente nombrados.
- Entrada de aire en condiciones de funcionamiento: la generación puntual de vórtices durante la aspiración en las bombas al introducir aire en condiciones atmosféricas, la admisión de aire en ventosas o roturas y grietas en zonas de presiones bajas pueden hacer que el aire sea introducido en la instalación.
- Liberación de gases de aguas residuales: en instalaciones como depuradoras u otras en las cuales se transporten aguas residuales se debe tener en cuenta la presencia de aire y otros gases como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica.

2.3 Ventosas

Las válvulas de aireación, también conocidas como ventosas, son unos dispositivos que se sitúan en puntos concretos de las instalaciones hidráulicas con el fin de regular el paso de aire entre el interior y el exterior. De esta forma, se puede controlar la cantidad de aire almacenado en el interior de las tuberías y controlar las operaciones de purgado con el fin de evitar los peligros derivados.

Al expulsar el aire durante el llenado de una tubería, la ventosa evita que la instalación sufra los sobreesfuerzos derivados de mover masas de aire en el interior que, al ser compresible, aumenta de forma considerable el esfuerzo requerido para su movimiento. En la Figura 2 se puede ver una instalación con varias ventosas.



Figura 1- Instalación con ventosas- IRUA (www.irua.es)

Por otra parte, durante el vaciado de tuberías, se admite aire del exterior a través de las ventosas con el fin de evitar que las tuberías puedan colapsar por depresión. Esto también se hace en instalaciones de altura con demandas elevadas.

También las ventosas son utilizadas en aplicaciones tales como controlar transitorios hidráulicos, amortiguando con bolsas de aire situadas en las zonas de depresiones las sobrepresiones generadas durante el transitorio.

Teniendo en cuenta las múltiples aplicaciones y estando prácticamente todas relacionadas con la seguridad, tanto de la instalación como de las personas, queda patente la importancia de un buen dimensionado de estas y una correcta localización dentro de la instalación. De este modo, poder controlar las zonas críticas de la instalación.

2.3.1 Principio de funcionamiento

Dentro de las instalaciones de distribución de agua, las principales tareas de una ventosa son:

- Descarga de grandes caudales máxicos de aire durante el llenado de agua de un sistema hidráulico, ya esté este total o parcialmente vacío.
- Admisión de grandes caudales máxicos de aire durante el vaciado de agua de un sistema hidráulico a fin de evitar el colapso por las depresiones generadas.
- Purgado de aire residual que pueda quedar o que se genere durante el funcionamiento normal de la instalación hidráulica.

Por lo tanto, se puede resumir la misión de una ventosa como la de mover masas de aire en función del interés provocado por el estado de la instalación.

Para comprender el funcionamiento de las ventosas se debe tener en cuenta los diferentes elementos que la forman. Las ventosas tienen un cuerpo de fundición a través del cual el aire y el agua pasan entre su orificio de entrada y de salida. En el interior de este cuerpo, un espacio hueco aloja un flotador. Tanto el peso específico γ_f como el volumen específico \forall_f del flotador han sido diseñados para unas condiciones de flotabilidad determinada en función del resto de la válvula y la instalación, siendo el peso específico siempre inferior al del agua γ_{agua} .

Además, existen elementos auxiliares como la protección en la salida que serán tratadas más adelante en este trabajo y que pueden influir en las condiciones de aspiración y expulsión de la válvula. El funcionamiento de la válvula es sencillo. En condiciones de purgado de aire de la instalación, el aire entra por el orificio de entrada hacia el de salida. Cuando deja de haber aire, debido a las condiciones de flotación el agua trasegada hace que el flotador suba y bloquee la salida. En el caso del vaciado de la instalación, el aire entraría por el orificio de salida y entraría en la instalación sin tener ningún bloqueo por parte del flotador. En la figura 3 se pueden ver las diferentes posiciones del flotador.

Para poder ver de forma visual el funcionamiento físico de la instalación se puede plantear un balance de fuerzas que actúan sobre el flotador.

Estas son:

- Peso propio del flotador: Que puede obtenerse como producto de su volumen y su peso específico.
- Empuje del agua: Que se obtiene como producto del volumen sumergido del flotador y del peso específico del agua.
- Fuerza generada por el desequilibrio de presiones: Derivada de la diferencia de presiones entre el interior y el exterior y de la sección de salida de la válvula.
- Otras: Derivadas de las corrientes de aire circulante en la instalación. Estas tienen una difícil medida y requieren de estudios más complejos.



Figura 2- (a) Flotador arriba (bloqueo) - (b) Flotador abajo (www.construmática.com)

Además de estas fuerzas citadas se debe tener en cuenta la existencia de otras que pueden condicionar enormemente el funcionamiento de la ventosa si no se tienen correctamente en cuenta durante el diseño de esta. La principal es la conocida como adherencia F_a . Muchos factores influyen en esta fuerza, como el material utilizado o el estado de la ventosa entre otros. Esta fuerza puede alcanzar valores de hasta un 50% del peso del flotador, llegando incluso en ocasiones a impedir su apertura (fenómeno conocido como agarrotamiento). Es por ello que se tiene que tener muy en cuenta este fenómeno a la hora de diseñar la válvula. Hay que tener muy en cuenta los materiales utilizados y la frecuencia de uso que se le va a dar, puesto que estos bruscos cierres y aperturas de la bomba podrían dar lugar a picos de presión realmente perjudiciales para la instalación y que agravarían la presencia de aire en el interior.

Existe otro fenómeno conocido como “fuerza de sustentación”. Este depende fundamentalmente de la velocidad del flujo de aire en contacto con el flotador durante la expulsión. En ocasiones, una velocidad elevada puede producir el cierre inesperado de la bomba, dejando en el interior de la tubería bolsas de aire además de producir picos no deseados. Esta fuerza depende de la energía cinética del aire, la sección del flotador o de la forma de la ventosa.

Todos estos factores tienen que ser tenidos en cuenta en el momento de dimensionar la ventosa. Ya que tanto la apertura como el cierre de la válvula tienen que tener en cuenta todos los factores para evitar futuros problemas de cierres inesperados.

Para el descenso del flotador se entiende que el peso de este debe vencer el empuje del agua y la diferencia de presiones entre el interior y el exterior. Luego cuando la presión del interior es mayor que la atmosférica y el flotador se encuentra en estado de bloqueo, la situación que debe darse para que el peso del flotador venza las fuerzas de empuje se expresa como:

$$\forall_f \gamma_f > \forall_{sum} \gamma_{agua} + p_t A_0 \quad (1)$$

En el caso límite contrario, es decir, aquel en el flotador está en descenso y la ventosa está completamente llena de aire, la relación que se debe cumplir es

$$\forall_f \gamma_f > p_t A_0 \quad (2)$$

En las anteriores ecuaciones, \forall_{sum} representará el volumen del flotador sumergido en el instante del caso estudiado. p_t será la presión manométrica del interior de la instalación, cambiando el sufijo "t" por "d" en caso de que se encuentre en estado de presión negativa o depresión.

2.3.2 Clasificación de ventosas

A la hora de dimensionar una instalación hidráulica, hay que comprender las necesidades de esta. En función de ello, luego se acudirá a un catálogo de fabricantes y se escogerá la ventosa que más se adapte al funcionamiento deseado.

Existen dos principales grandes clasificaciones de ventosas. Por una parte, aquella referida a su morfología, concretamente a su orificio de salida. Por otra tenemos una clasificación referida a las diferentes funciones o formas de hacer pasar el aire de las mismas.

En cuanto a la dimensión del orificio de salida podemos distinguir entre dos grandes grupos: Ventosas de pequeño y de gran orificio:

- Ventosas de gran orificio (baja presión): También conocidas como bifuncionales por permitir la circulación de aire en ambas direcciones. Tienen su orificio de salida de un tamaño de entre 25mm y 400mm de diámetro. Pueden trasegar una gran cantidad de aire.

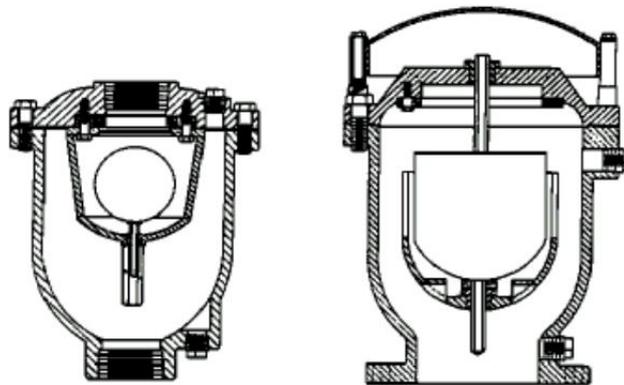


Figura 3- Ejemplo de ventosas de gran orificio (www.construmática.com)

Durante el llenado de la instalación, estas ventosas permiten la expulsión de grandes caudales de aire. De esta forma, permite amortiguar las sobrepresiones generadas por la compresión del aire.

Por otra parte, durante el vaciado de las instalaciones, permite la admisión de aire por parte de las tuberías. Esto hace que, en caso de depresión, la tubería no colapse al llenar estos vacíos con aire.

Hay que destacar que estas ventosas no están pensadas para una apertura durante su funcionamiento normal. Si no que están pensadas para un uso exclusivo de operaciones de llenado y vaciado por la gran cantidad de fluido que pueden trasegar. Por ello, el diseño del flotador y la elección de la ventosa tiene que estar correctamente pensado para evitar problemas durante su uso.

En aquellos casos en los que el caudal de aire a trasegar sea muy grande, se opta por colocar varias ventosas en paralelo. Ya sea bien porque no existan ventosas suficientemente grandes para satisfacer la demanda, o bien por motivos de seguridad. Así en caso de que alguna falle o se agarrote la otra pueda trasegar parte del caudal dando así un cierto margen de maniobra.

- Ventosas de pequeño orificio (Alta presión): También conocidas como purgadores. Estas tienen un tamaño de orificio de ordenes muy pequeños respecto a las de gran orificio. De entre 1,5mm y 12.5mm de diámetro. Estas permiten la expulsión de aire en sistemas presurizados en condiciones de régimen permanente.

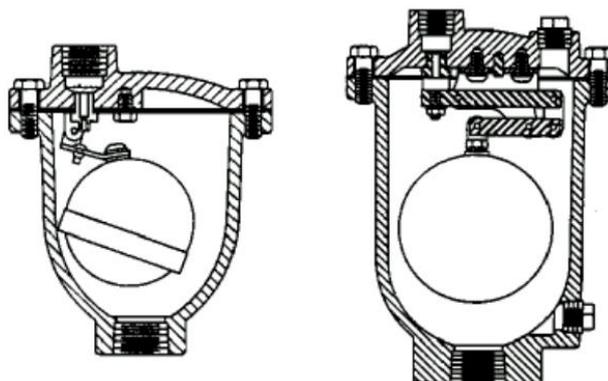


Figura 4 – Ejemplo de ventosas de pequeño orificio o purgadores.
(www.construmática.com)

Estas, debido a la necesidad de poco espacio para el orificio, en ocasiones emplean sistemas de palanca para amplificar el tamaño del flotador, consiguiendo así reducir considerablemente su tamaño.

A diferencia de las ventosas de gran orificio, los purgadores solo permiten la salida de aire en una sola dirección.

Como se ha visto en los dos tipos anteriores de ventosa, el sentido del flujo del aire no es el mismo para todo tipo de ventosas. Y es según este flujo de aire según el cual se puede realizar la otra gran división: en función de las funciones de la bomba.

Esta subdivisión se realiza en tres grandes grupos: Monofuncionales, bifuncionales y trifuncionales. Las ventosas monofuncionales son aquellas que solo permiten el paso de aire en una dirección, como es el caso de los purgadores o de las ventosas unidireccionales. Las ventosas bifuncionales son aquellas que permiten el paso en ambas direcciones durante el llenado y el vaciado de las instalaciones. Por sus características coinciden con las ventosas de gran orificio. Por último, existen las ventosas trifuncionales. Estas son una combinación de las vistas anteriormente. Permiten el paso de aire en ambas direcciones durante el llenado y el vaciado de las instalaciones y por otra parte permiten el purgado de las mismas en condiciones de régimen nominal.

En este trabajo se va a caracterizar y estudiar la ventosa IRUA-960-DN80. Se trata de una ventosa bifuncional (o de gran orificio) y que tiene un orificio de entrada y de salida de aproximadamente 80 mm, lo cual le permite expulsar y admitir grandes cantidades de aire.

Se pretende estudiar precisamente la variación que existe en esa capacidad de expulsión de aire en función de diferentes soluciones constructivas para su carcasa.

Capítulo 3. Caracterización de ventosas

3.1. Introducción

Para poder realizar un correcto modelado de la ventosa y una correcta selección es necesario disponer de un buen sistema de caracterización de estas. Para ello es importante tener en cuenta qué características son interesantes estudiar para prever el comportamiento de la ventosa y tener un modelo matemático que, si bien no sea excesivamente complejo para permitir el cálculo, permita conocer las características de una forma fiable.

Para la caracterización de este tipo de válvulas de aireación, se necesita conocer tanto la presión de admisión y expulsión como el caudal de aire circundante en la misma.

No existe un único modelo matemático para la caracterización de las ventosas. No obstante, todos ellos parten de una serie de asunciones teóricas previas comunes. Todos ellos toman el aire como un fluido ideal y compresible. Además, modelos como el de Wylie y Streeter (1982) o el de Boldy (1992), simplifican el comportamiento del fluido al de un flujo isentrópico en toberas de tipo convergente-divergente.

Todas estas consideraciones se realizan para simplificar al máximo el modelo matemático, y con ello el cálculo. Pero estas simplificaciones dan lugar a unos resultados que realmente se asemejan al comportamiento real de las válvulas de aireación.

3.2. Flujo isentrópico en toberas

Debido al corto periodo de tiempo que el gas pasa en el interior de una tobera, a efectos prácticos se considera este flujo adiabático.

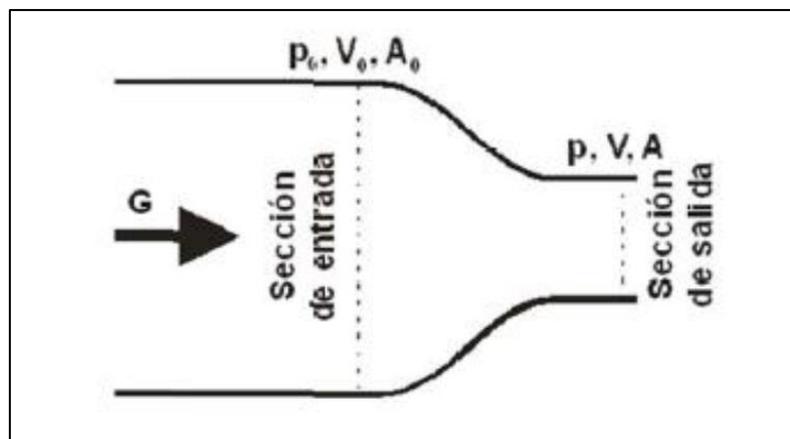


Figura 5- Tobera convergente (Fuertes et Al, 2001)

Así mismo, se considera el aire un gas ideal, y por lo tanto cumple la ecuación de los gases perfectos:

$$p^* = \rho RT \quad (3)$$

Donde p^* es la presión absoluta del gas, ρ es la densidad de este, y $R = 287 \frac{N*m}{Kg*K}$ (Constante del aire) y T es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Tomando p_0^* , T_0 , ρ_0 y v_0 como condiciones de presión, temperatura, densidad y velocidad a la entrada de la tobera de sección A_0 , se hace lo propio con p^* , ρ , T y v siendo estas condiciones en el interior de la tobera con una sección A . Se considera también un coeficiente adiabático $K=1.4$ por la composición diatómica del gas.

Para modelar el comportamiento isentrópico, estas variables se relacionan entre si de la siguiente manera:

$$\frac{p_0^*}{p_0^k} = \frac{p^*}{p^k} \quad (4)$$

$$\frac{T_0}{(p_0^*)^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{T}{(p^*)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (5)$$

$$\frac{T_0}{\rho_0^{k-1}} = \frac{T}{\rho^{k-1}} \quad (6)$$

Por último, se clasifica el flujo en función de su velocidad. De esta forma, se compara la velocidad del flujo con respecto a la del sonido en el medio c (aire en este caso). De tal forma que si $v > c$ se considera flujo súper sónico, $v < c$ el flujo es subsónico, o si $v = c$ el flujo es sónico.

La velocidad del sonido en el aire c se calcula como:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (7)$$

Una vez definidas estas variables, se trata de definir una presión p_1 a la salida de la tobera y se varía la presión interior p_0 . De esta forma se puede estudiar los diferentes sentidos del flujo determinado por la diferencia de presiones y de cuál de estas es mayor. En caso de una igualdad de presiones entre p_1 y p_0 no se producirá flujo alguno.

En caso de que la presión en el interior supere a la de salida de la tobera ($p_0 > p_1$) se establece un flujo subsónico en la boquilla de esta. Esta velocidad viene definida por la expresión matemática:

$$v = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right]} \quad (8)$$

Si la presión interior siguiese aumentando, la diferencia de presiones llega a un punto de ser tan alta que la velocidad del flujo llega a niveles sónicos. Por tanto, para que se cumpla que $v = c$, se debe de cumplir la siguiente relación matemática:

$$\sqrt{kRT} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right]} \quad (9)$$

Si se despeja la relación de presiones de la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.528 \leftrightarrow \frac{p_0}{p_1} = 1.893 \quad (10)$$

Una vez llegada a esta relación de presiones, esta se mantiene constante a partir de entonces, debido a que en una tobera convergente no puede existir flujo supersónico. Es por esto que si se continúa aumentando el valor de la presión en el interior de la tobera (p_0), aumentará proporcionalmente la presión en la boquilla. De esta forma la relación de presiones entre ambas se mantiene constante. Por tanto, la relación anterior se mantiene constante y $p = 0.528 p_0 > p_1$. Este fenómeno se conoce como bloqueo sónico.

El caudal másico de la boquilla es:

$$\frac{dm}{dt} = p_0 v_0 A_0 = \rho v A \quad (11)$$

Esta ecuación combinada con la demostrada anteriormente con la evolución de la presión del fluido isentrópico, se puede obtener la velocidad del flujo:

$$v_0 = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/k} \frac{A}{A_0} v \quad (12)$$

Como se asume intercambio nulo de temperatura con el medio, y por tanto T_0 constante, un intercambio de presión se traducirá también en un incremento de la densidad del fluido. De esta forma la fase subsónica del caudal aumentaría de la misma forma que el caudal másico.

Una vez alcanzadas condiciones sónicas en el fluido, el caudal volumétrico se tiene que mantener constante, debido a que la velocidad del fluido queda fijada al tener una T_0 constante.

$$v = \sqrt{kRT} = \sqrt{kRT} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} T_0} = \sqrt{kR} \sqrt{0.0833 T_0} = cte \quad (13)$$

Además, ha quedado demostrado que para un flujo de carácter sónico la presión a la boquilla de la tobera es $p = 0.528 p_0$ y por tanto se puede ver la velocidad del flujo como:

$$v_0 = 0.634 \frac{A}{A_0} v \quad (14)$$

De este modo, como se ha demostrado previamente, la velocidad de la entrada de la tobera se mantiene constante y en consecuencia el caudal volumétrico. Sin embargo, el caudal másico sí que puede variar debido a que un aumento de presión haría variar la densidad del fluido.

Una vez definidas todas estas condiciones, el siguiente paso es estudiar el caso inverso. Teniendo fijadas las condiciones interiores de la tobera (p_0, T_0 y ρ_0), se variará la presión a la salida de la boquilla (p_1).

Nuevamente el sentido del flujo vendrá definido por la relación de presiones entre la entrada y la salida de la tobera. En caso de que estas sean iguales no existirá flujo alguno. Mientras que si la presión de salida disminuye la diferencia de presiones generará un aumento en el caudal. Como se ha visto anteriormente, mientras que nos encontremos en condiciones subsónicas o sónicas, la presión a la salida de la boquilla será la misma que en el exterior.

Si se alcanzasen condiciones sónicas ($p_0 = 1.893 p_1$), la presión en la boquilla se mantiene constante, aunque la presión exterior siga disminuyendo. En relación a los caudales como se ha estudiado en el caso anterior, tanto el volumétrico como el másico aumentarían siempre y cuando aumente la diferencia de presiones. Cuando se alcancen nuevamente condiciones sónicas, la presión se fijará en un punto (bloqueo sónico) y el caudal volumétrico permanecerá invariable.

El caudal másico también permanecería constante en este caso concreto de estudio, ya que al considerar la velocidad de entrada a la tobera constante también se considera así la densidad.

En las condiciones que se han tratado, el comportamiento del flujo en este caso de estudio podría sintetizarse de la siguiente manera:

Presión a la salida $p_1^* = cte$	Flujo Subsónico $p_0^* < 1.893 p^*$	Q aumenta si p_0^* aumenta G aumenta si p_0^* aumenta
	Flujo Sónico $p_0^* \geq 1.893 p^*$	Q se mantiene constante G aumenta si p_0^* disminuye
Presión a la entrada $p_0^* = cte$	Flujo Subsónico $p_1^* > 1.893 p^*$	Q aumenta si p^* disminuye G aumenta si p^* disminuye
	Flujo Sónico $p_1^* \leq 1.893 p^*$	Q se mantiene constante G se mantiene constante

Tabla 1- Comportamiento del flujo en toberas convergentes

3.3. ANALOGÍA ENTRE FLUJO EN TOBERAS Y FLUJO EN VENTOSAS

Tras definir el comportamiento del flujo que circula en una tobera convergente y sus características, se puede establecer la analogía entre toberas y ventosas. Mediante el modelo de Wylie y Streeter (1982), se definen los casos de admisión y expulsión de la siguiente forma.

3.3.1. Admisión

Para el modelado de la admisión, se asumen las siguientes condiciones:

$$p_0^* = p_{atm}^* \quad (15)$$

$$\rho_0 = \rho_{atm} \quad (16)$$

$$T_0 = T_{atm} \quad (17)$$

$$p_1^* = p_t^* \quad (18)$$

En estas ecuaciones el subíndice atm indica condiciones atmosféricas, mientras que el subíndice "t" indica aquellas relativas al interior de la tubería.

Durante la admisión, variable objeto de estudio es la presión en el interior de la tubería. Al ser esta la variable de estudio, esta variará en función de las condiciones de estudio de cada punto. p_{atm}^* no obstante, se mantendrá constante en todo momento. Es por esto que la presión a la entrada de la ventosa será del mismo modo invariable y por lo tanto el valor que se variará será el de presión a la salida de la ventosa.

Tomando como referencia el comportamiento del flujo en toberas, si la presión en el interior de la tubería $p_t^* > 0.528 p_{atm}^*$, entonces existen condiciones de flujo subsónico y el caudal másico (G) y el volumétrico (Q) aumentan en el momento que la presión en el interior de la tubería disminuye. Para presiones inferiores a esta, el flujo alcanza bloqueo sónico y esto provoca que ambos caudales se mantengan constantes.

Si se considera $p_{atm}^* = 1.013 \text{ bar}$, tomando la diferencia de presiones entre entrada y salida como Δp se pueden sintetizar los extremos de comportamiento del flujo de la siguiente forma

Flujo subsónico	$p_t^* > 0.535 \text{ bar}$	$\Delta p < 0.48 \text{ bar}$
Flujo sónico	$p_t^* \leq 0.535 \text{ bar}$	$\Delta p \geq 0.48 \text{ bar}$

Tabla 2 – Condiciones del flujo durante la admisión.

De forma analítica podemos expresar el modelo como:

Si $p_{atm}^* > p_t^* > 0.528 p_{atm}^*$ (flujo subsónico)

$$\frac{dm}{dt} = G = C_{d,adm} A_{adm} \sqrt{7 p_{atm}^* \rho_{atm}^* \left[\left(\frac{p_t^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.428} - \left(\frac{p_t^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (19)$$

Si $p_t^* < 0.528 p_{atm}^*$ (flujo sónico)

$$\frac{dm}{dt} = G = C_{d,adm} A_{adm} \frac{0.686}{\sqrt{RT_{atm}}} p_{atm}^* = \text{constante} \quad (20)$$

En estas ecuaciones $C_{d,adm}$ y A_{adm} representan el coeficiente de admisión característico de la válvula ($C_{d,adm} < 1$) y la sección en la admisión respectivamente.

3.3.2. Expulsión

Para modelar la expulsión las condiciones son las siguientes

$$p_0^* = p_t^* \quad (21)$$

$$\rho_0 = \rho_t \quad (22)$$

$$T_0 = T_t \quad (23)$$

$$p_1^* = p_{atm}^* \quad (24)$$

Siendo las variables con subíndice “atm” aquellas referentes a condiciones atmosféricas y aquellas con subíndice “t” las referidas al interior. Esto ocurre de forma análoga durante la expulsión. Sin embargo, en este caso se considera fija la presión en la salida de la válvula, pudiéndose variar la presión anterior a la válvula.

En estas condiciones, el flujo subsónico vendrá determinado por una presión en el interior $p_t^* \leq 1.8929 p_{atm}^*$. De esta forma, tanto el caudal másico como el volumétrico aumentarían en tanto la presión de la tubería aumentase.

Durante la expulsión el modelo se puede ver como:

Si $p_t^* \leq 1.8929 p_{atm}^*$ (flujo subsónico)

$$\frac{dm}{dt} = G = C_{d,exp} A_{exp} p^* \sqrt{\frac{7}{RT} \left[\left(\frac{p_{atm}^*}{p_t^*} \right)^{1.428} - \left(\frac{p_{atm}^*}{p_t^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (25)$$

Si $p_t^* > 1.8929 p_{atm}^*$ (flujo sónico)

$$\frac{dm}{dt} = G = C_{d,exp} A_{exp} \frac{0.686}{\sqrt{RT_t}} p_t^* \quad (26)$$

Siendo A_{exp} la sección de salida de la ventosa y $C_{d,exp}$ el coeficiente de expulsión característico de la válvula (menor que la unidad).

3.4. Curva característica de la ventosa

Como se ha visto con anterioridad, la curva característica de la ventosa va a dar el comportamiento de una ventosa concreta en sus diferentes fases para diferentes condiciones. En el mercado existe una gran variedad de modelos de ventosas. Cada ella con unas formas y unas características determinadas. Es por ello que es importante conocer y saber interpretar estas curvas para poder escoger la adecuada para satisfacer los requerimientos de la instalación.

Esta curva viene dada a partir de ensayos experimentales a partir de la cual se obtiene una relación matemática entre el caudal de aire y la diferencia de presiones, tanto en la fase de admisión como en la de expulsión. Las características de nuestra curva vendrán dadas también por la importancia que tenga la fase.

Existen ventosas de uso más genérico como las de gran orificio en la que tanto la admisión como la expulsión de aire tienen una gran importancia en un determinado rango de presiones. En otras como las ventosas de pequeño orificio, solo la fase de expulsión a grandes presiones presenta un interés práctico. Esto hace que, como se puede observar en los ejemplos, únicamente se muestre un determinado rango de presiones y caudales en función de su utilidad.

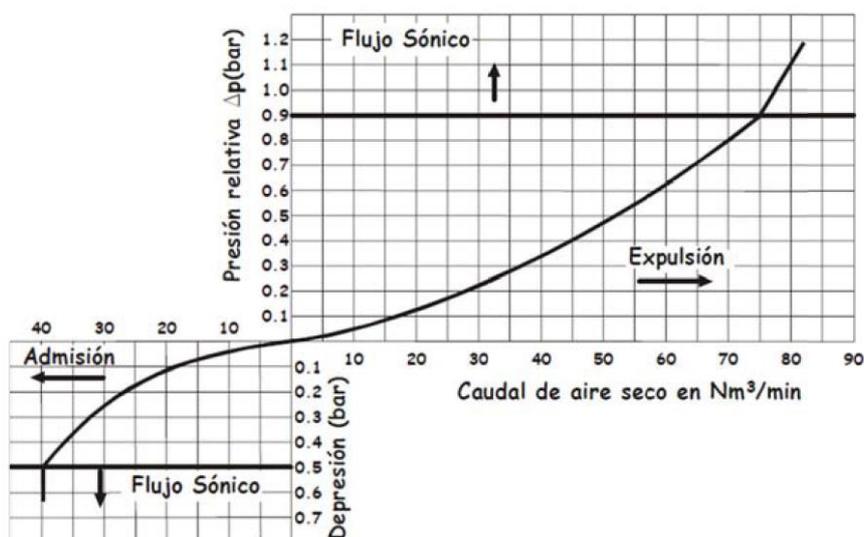


Figura 6 – Curva característica de una ventosa de gran orificio (Fuertes 2001)

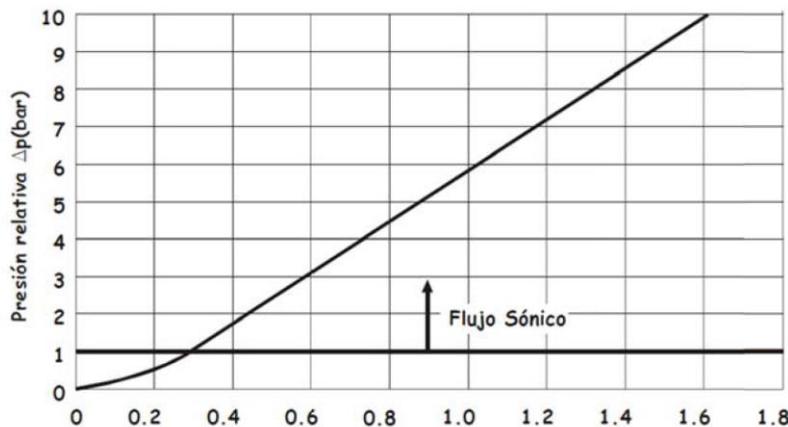


Figura 7 – Curva característica de una ventosa de pequeño orificio (Fuentes 2001)

El eje vertical representa la diferencia de presiones entre entrada y salida de la válvula. Siendo esta diferencia:

Para la admisión:

$$\Delta p = p_{atm}^* - p_t^* \quad (27)$$

Para la expulsión:

$$\Delta p = p_t^* - p_{atm}^* \quad (28)$$

Por otra parte, el eje horizontal representa el caudal volumétrico medido en condiciones normales. Esto es, temperatura ambiente presión atmosférica. Se puede obtener el caudal másico de forma directa multiplicando el caudal volumétrico por la densidad ρ_{atm} , medido nuevamente en condiciones normales.

A pesar de la gran utilidad de las curvas, se han de tener en cuenta sus grandes limitaciones. En ocasiones estas curvas proporcionadas por los fabricantes han sido obtenidas a partir de ensayos cuyas condiciones no son especificadas. Esto hace que, dependiendo de las condiciones de la instalación, el comportamiento real de la curva difiera de una forma notable. Como se ha visto en capítulos anteriores, el aire puede generar una serie de peligros considerables en estas instalaciones, por tanto, el no tener una ventosa adecuada puede tener graves consecuencias. Es por esto que a pesar de tener las curvas características de nuestras válvulas es conveniente en tanto sea posible comprobar su comportamiento real en nuestra instalación.

3.5. Flujo compresible e incompresible

A modo de alternativa al modelo de Wylie y Streeter (1982), Fuentes y otros (2001) propusieron un modelo en el cual el aire es sustituido por agua en los ensayos. La principal diferencia reside en la consideración de aire como fluido compresible y el agua como incompresible.

De esta forma, se pretende estudiar y justificar la diferencia entre considerar el aire como fluido compresible o no compresible, así como una posible extrapolación de resultados entre aire y agua. A raíz de estos ensayos, se podría justificar que los efectos de la compresibilidad sobre el aire son poco significativos en el comportamiento de las ventosas con la simplificación a efectos de cálculo posterior que esto tendría.

Para este estudio se parte de la ecuación de la energía. Esta previamente simplificada a efectos de cota, ya que esta es mínima. Además, se toma una densidad de referencia constante para considerar la incompresibilidad teórica del fluido:

$$RT \frac{dp^*}{p^*} + v * dv = 0 \quad (29)$$

$$\frac{dp^*}{p^*} + v * dv = 0 \quad (30)$$

Integrando entre los puntos de la sección de entrada y salida se obtiene:

$$\frac{p^* - p_0^*}{\rho_{ref}} + \frac{v^2 - v_0^2}{2} = 0 \quad (31)$$

Siendo las variables con el subíndice 0 las referentes a las condiciones de entrada de la ventosa y el resto de variables las referidas a la salida de esta.

Si se desprecia el término cinético en la entrada se obtiene la siguiente relación

$$\frac{v_0^2}{2} = 0 \rightarrow \frac{p^* - p_0^*}{\rho_{ref}} + \frac{v^2}{2} = 0 \rightarrow v = \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} \quad (32)$$

Por tanto, relacionando la velocidad y el caudal se obtiene:

$$Q = Av = A \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} \quad (33)$$

Si ahora se relaciona caudal másico y volumétrico, ambos referidos a una densidad fija para tratar el fenómeno de la incompresibilidad, entonces:

$$G = \rho_{ref}Av = \rho_{ref}A \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} = A \sqrt{2\rho_{ref}(p_0^* - p^*)} \quad (34)$$

Para que esta ecuación realmente se cumpla y el caudal másico sea realmente el obtenido, se tiene que corregir el valor mediante un coeficiente “C” que relaciona el valor real y el ideal. Ya que esta ecuación se basa en un comportamiento isentrópico reversible. Este coeficiente se obtiene mediante ensayos.

Finalmente, el modelo real se puede formular como:

Para salida de aire:

$$G_{real} = C_{exp} \sqrt{\Delta p \cdot p_t^*} \quad (35)$$

Para entrada de aire:

$$G_{real} = C_{adm} \sqrt{\Delta p \cdot p_{atm}^*} \quad (36)$$

Y la densidad de referencia se toma como:

$$\rho_{ref} = \frac{\rho_t + \rho_{atm}}{2} \quad (37)$$

Donde G representa el caudal másico trasegado por la ventosa, ρ_t es la densidad del aire en el interior, ρ_{atm} la densidad del aire en condiciones atmosféricas, Δp es el diferencial de presiones en el interior y por último C_{exp} y C_{adm} los coeficientes característicos de la ventosa a la entrada y la salida respectivamente.

CAPITULO 4: Modelo CFD para ventosas

4.1. introducción a las técnicas CFD

Al no conocer la solución analítica de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, es necesario encontrar otras formas de hallar la solución para este tipo de problemas.

Hasta hace poco, la única forma que había para resolver este tipo de problemas era la experimentación. Sin embargo, dependiendo del problema que se deba resolver, hacerlo de forma experimental podía resultar muy costoso y en ocasiones muy caro.

Es por esto que el desarrollo en las últimas décadas de la tecnología de computación permitió solventar estos problemas mediante lo que se conoce como CFDs (Computational Fluid Dynamics), o Mecánica de fluidos computacional (Figura 9).

La mecánica de fluidos computacional (CFD) se puede definir como la rama de la mecánica de fluidos que permite predecir el comportamiento de un fluido desde diferentes puntos de vista (Problemas de flujo, reacciones químicas, transferencia de energía, turbulencia...) mediante el uso de técnicas de cálculo de elementos finitos y métodos matemáticos.

El funcionamiento de estas técnicas no solo se basa en las matemáticas y la mecánica de fluidos, sino que también depende de la capacidad de análisis del ingeniero o la capacidad de cálculo de la máquina entre otras.

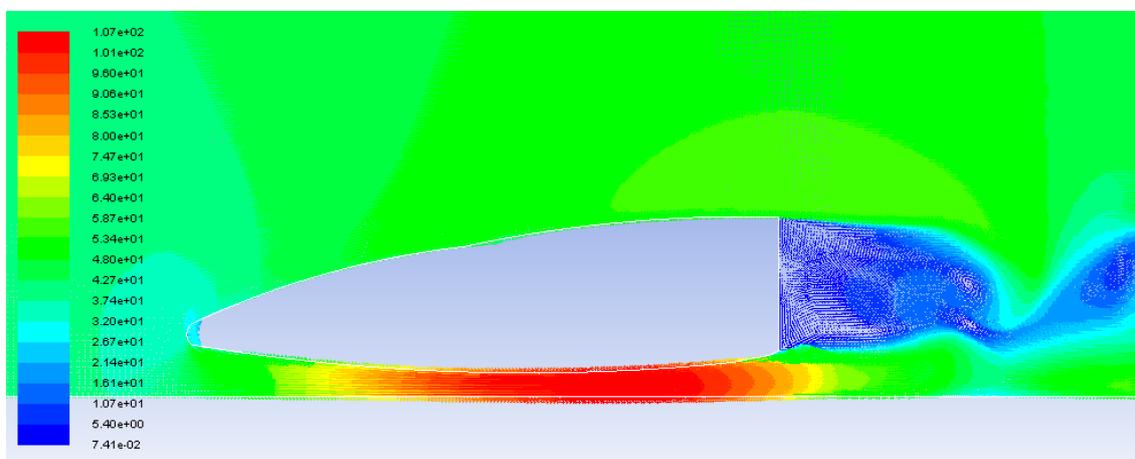


Figura 8 – Ejemplo de modelo CFD

4.2 Ecuaciones CFD

Estos paquetes de cálculo están basados en las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. Y a partir de estas se han desarrollado los algoritmos propios de los Solvers de estos programas que son los encargados de encontrar la solución de estos problemas.

Por tanto, para entender el funcionamiento de estos métodos es conveniente conocer las ecuaciones fundamentales.

4.2.1 Ecuación de continuidad

En el estudio de mecánica de fluidos, la ecuación de continuidad se trata de una ecuación de conservación de la masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (38)$$

La masa por unidad de tiempo que pasa por la superficie de entrada de un determinado volumen de control es igual a la que atraviesa la superficie de salida. La ecuación esta dada en términos de densidad.

4.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones por derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido en el tiempo y el espacio. Describen el movimiento de cualquier fluido newtoniano, ya sea una corriente marina, el viento o el flujo alrededor de un

Ecuaciones de Navier – Stokes (Momento):

$$x: \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (39)$$

$$y: \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (40)$$

$$z: \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (41)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, $v u$ y w son componentes de la velocidad, p es la presión y S don las diferentes fuerzas aplicadas sobre el cuerpo.

4.2.3 Ecuación de la energía

Finalmente, la ecuación que completa este sistema es la ecuación de la energía, que viene dada por la expresión:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i u) = -p \text{div}(u) + \text{div}(k \text{grad } T) + \phi + S_i \quad (42)$$

4.3 Método de trabajo con un modelo CFD

Estas ecuaciones en su conjunto representan, mediante una adaptación algorítmica el funcionamiento de los CFDs. A partir de ellas, a través de métodos matemáticos, las

computadoras son capaces de llegar a soluciones muy aproximadas a la realidad sin tener un resultado analítico de los problemas.

En los últimos años, la capacidad de cálculo de estas máquinas se ha visto incrementada de una forma asombrosa. Es por eso que cada vez se pueden abordar temas más complejos y con unos tiempos menores. En un futuro, el estudio de la mecánica cuántica en la computación puede dar lugar a velocidades de cálculo infinitamente mayores y a que problemas que hoy en día resultan imposibles de resolver se resuelvan en segundos.

No obstante, no todo el trabajo de los CFDs se basa en capacidad de computación. El proceso de análisis por CFD cuenta de varias partes en las que el pre-procesado y el post-procesado ocupan la mayor parte del trabajo del ingeniero.

Antes de abordar el cálculo de un problema, existe un trabajo previo del cual depende gran parte del resultado de nuestro trabajo.

Las ecuaciones de las que hemos hablado tienen que trabajar sobre un modelo de cálculo, y su resultado depende inmensamente de la correcta definición de este. Una mayor complejidad del modelo no tiene por qué significar un mejor resultado a la hora de analizar. En ocasiones, es necesaria una gran simplificación del modelo para poder llegar a un resultado, y para poder alcanzarlo en un tiempo razonable.

No solo es importante definir correctamente el modelo, sino que también hay que establecer unas correctas condiciones de contorno. De esta forma se plantea el problema en un escenario que dé como resultado un comportamiento lo más parecido al real posible.

Al tratarse de un proceso iterativo, en ocasiones el tamaño del problema puede volverse excesivo y el cálculo difícil. Es por esto que en función del análisis que se realice se imponen unas condiciones de discretización y se estudia la forma de análisis de los diferentes elementos.

Dependiendo de la forma de tratar y analizar los diferentes nodos y la forma de discretizar el dominio se puede distinguir entre dos técnicas.

- Volúmenes finitos: Este método emplea directamente las ecuaciones de conservación en forma integral sobre los poliedros de nuestra geometría. Sobre estos se ha realizado previamente una discretización espacial. La principal ventaja de este método es que la discretización espacial se realiza directamente sobre el sistema físico, lo cual implica que al no ser necesaria una transformación de coordenadas, la complejidad matemática del problema es menor.
- Elementos finitos: Este método se basa en la división del dominio en triángulos (2D) o tetraedros (3D), generando una malla no estructurada. Dependiendo de la precisión requerida o de la geometría del modelo se utiliza un tamaño de malla más o menos fino. En este caso las ecuaciones utilizadas son denominadas funciones de forma, que son distribuciones lineales de la función, que dan lugar a aproximaciones de segundo orden en la representación.

El método de elementos finitos presenta una matemática muy sólida, sobretodo en problemas de tipo elíptico y parabólico. No obstante, en ocasiones el método es equivalente al de volúmenes finitos, siendo en este último la complejidad matemática enormemente inferior. Es

por esto que generalmente se ha impuesto el uso del método de volúmenes finitos, aunque en ocasiones, dependiendo de la complejidad del problema, estos se combinan.

4.4 Aplicaciones de las técnicas CFD

El desarrollo de las técnicas de análisis con CFDs supuso un gran avance en múltiples disciplinas por sus múltiples campos de aplicación. La mecánica de fluidos computacional puede ser aplicada en casi cualquier fenómeno en el que esté involucrado un fluido. Además, no solo es posible estudiar su movimiento, sino también la evolución de sus temperaturas, su comportamiento en mezclas o su fuerza entre otros.

Las principales aplicaciones en el campo de la ingeniería son:

- Aerodinámica (Principalmente aviones y automóviles)
- Hidrodinámica en embarcaciones
- Motores
- Turbomáquinas
- Transferencia de calor en sistemas de enfriamiento/calentamiento
- Ingeniería de procesos (Mezclas y reacciones)
- Estructuras (Cargas de viento)
- Prevención y estudio de incendios
- Ingeniería medioambiental

4.5 Análisis de ventosas con CFD: metodología del proyecto.

Una vez hechas todas las introducciones teóricas previas para el desarrollo del proyecto, es importante comprender cuál es la finalidad del proyecto propiamente dicho. Cuáles son sus principales objetivos y que pasos se siguen hasta llegar hasta ellos.

En primer lugar, este proyecto se ha planteado como una demostración de que la capacidad de expulsión de las ventosas se ve modificada no solo por los elementos propiamente dichos de esta. Si no que un elemento como es la carcasa protectora influye en su capacidad, y en un momento dado, si no se tiene en cuenta, esta reducción de la capacidad puede producir alguno de los problemas vistos con anterioridad.

No solo se pretende verificar esto, sino que también se quiere hacer ver el potencial de las técnicas CFD. Ya que un correcto análisis con estos métodos permite comprobar estos cambios de una manera rápida y bastante fiable.

Para la realización de este proyecto primero se ha realizado un modelo CFD de la ventosa original IRUA. Este modelo se ha validado de forma experimental mediante un ensayo realizado de la bomba. A partir de ahí se realizaron las correspondientes modificaciones geométricas y se ensayaron con CFD a partir del modelo de la bomba original.

En los apartados anteriores se ha estudiado las principales características de las ventosas, sus usos y su caracterización. A la hora de caracterizarlas y obtener su curva hay dos aspectos importantes: el caudal y la diferencia de presiones. De esta forma, en el trabajo se ha caracterizado el modelo de ventosa IRUA tomando el modelo original y validando experimentalmente el modelo CFD. Posteriormente y teniendo el modelo validado se ha procedido a la modificación de la carcasa en el orificio de salida de la ventosa del modelo CFD y se han analizado los resultados en los diferentes modelos.

La caracterización de ventosas mediante CFDs requiere de un trabajo previo al análisis de estudio y preparación del modelo que representa la mayor parte del proceso. Este proceso se ha completado con los conocimientos adquiridos durante el curso en la asignatura de Mecánica de Fluidos Computacional y aplicados al modelo de estudio concreto. Esta preparación del modelo incluye la preparación de la geometría, el mallado, el estudio de condiciones y el análisis y posterior procesado de datos.

Hay que tener muy en cuenta que este proceso es un proceso iterativo y que no es cerrado. Ya que a lo largo del ciclo hay que ir analizando los resultados obtenidos y ser críticos con ellos para poder llegar a un modelo realmente fiable.

En esta parte del proyecto se explicará este proceso en profundidad, teniendo en cuenta cada uno de los subprocesos presentes y las pautas a seguir.

4.5.1. Geometría

El primer paso a realizar en el estudio de la ventosa es la definición de la geometría. Un modelado preciso de la ventosa dará como resultado un modelo similar al real y por lo tanto los datos posteriormente obtenidos representarán mejor el comportamiento de la ventosa. Hay que tener en cuenta que la parte de la ventosa que nos interesa es aquella por la que circula el fluido. De esta forma, hay que tener en cuenta que la parte de la ventosa que nos interesa modelar es aquella que está en contacto con el flujo, y es aquella en la que tendremos que centrar nuestros esfuerzos en lograr un buen diseño. En las zonas que no están en contacto con este, resulta de especial interés simplificarlas al máximo, puesto que pueden complicar posteriores fases de diseño y cálculo al necesitar recursos excesivos siendo que no son de especial importancia.

A pesar de que ANSYS cuenta con una herramienta de modelado de geometrías (Conocida como *Design Modeler*), este no resulta adecuado para este proyecto. La complejidad de la geometría hace que sea necesario un programa específico de procesamiento de geometrías del cual posteriormente exportar el modelo a ANSYS. En el caso de este proyecto el programa utilizado ha sido Autodesk Inventor. Este programa cuenta con una interfaz mucho más intuitiva que la extensión gráfica de Inventor. Por esto, permite la edición de las geometrías de una manera mucho más simple y rápida, agilizando enormemente el proceso y permitiendo un nivel de detalle mayor.

Debe tenerse en cuenta que al estar utilizando una versión de estudiante de ANSYS, existe un límite de celdas en la malla de 500.000 unidades. Además, una mayor cantidad de celdas haría que el proceso de cálculo posterior fuese mucho más lento. Es por esto que, durante el

procesado de la geometría, elementos externos al flujo de aire o geometrías complejas cuyo recorrido no sea interesante deben ser evitadas con tal de lograr la mayor simplicidad posible.

Para este proyecto se ha tenido la suerte de contar con el modelo original en 3D. Partiendo de este modelo, se han ido realizando las correspondientes modificaciones en inventor. Este proceso de modelado como hemos tratado anteriormente es un proceso iterativo, de esta forma se irá rediseñando la geometría las veces que sea necesaria hasta que se adapte a nuestras necesidades.

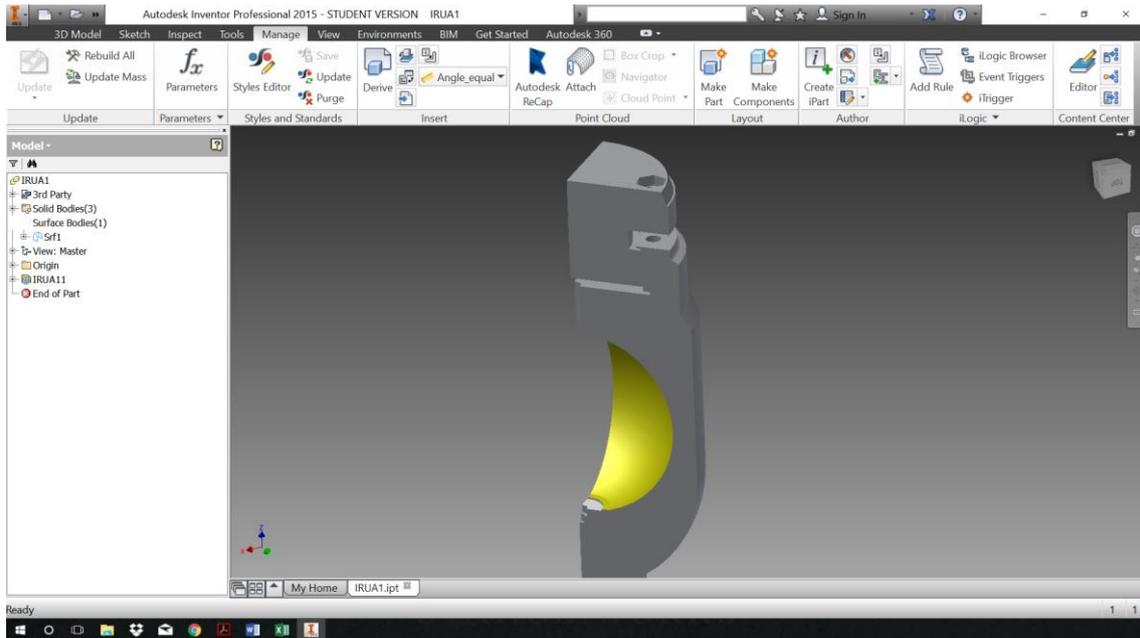


Figura 9 – Modelado de geometría con Autodesk Inventor

Otro paso importante durante la simplificación del modelo de ventosas es el estudio de la simetría que pueda existir. El hecho de disponer de geometrías con uno o dos planos de simetría permite que tanto la cantidad de elementos de la malla como el tiempo de cálculo se reduzca en gran medida.

4.5.2. Mallado

4.5.2.1. Características de la malla

Como se ha visto en apartados anteriores, la malla es un elemento determinante en el cálculo de CFDs. Su tamaño, forma o distribución harán que tanto el tiempo como el resultado del cálculo varíe. Por esto, es conveniente repasar que parámetros modifican la calidad de la malla y realizar un estudio completo para determinar el tamaño y la forma más óptima.

El mallado no solo involucra la selección de tamaño y forma de las celdas. También incluye la parte de selección de superficies en las cuales se establecen las condiciones de contorno, conocidas como "*Named Selections*".

En estas imágenes se pueden ver diferentes tamaños de malla para el mismo modelo de ventosa.

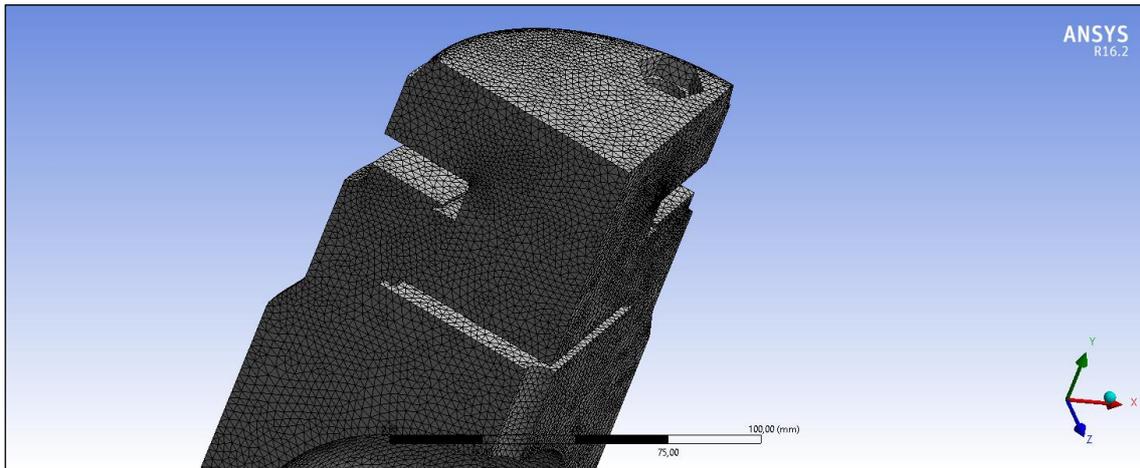


Figura 10 – Ventosa IRUA con malla de 2mm.

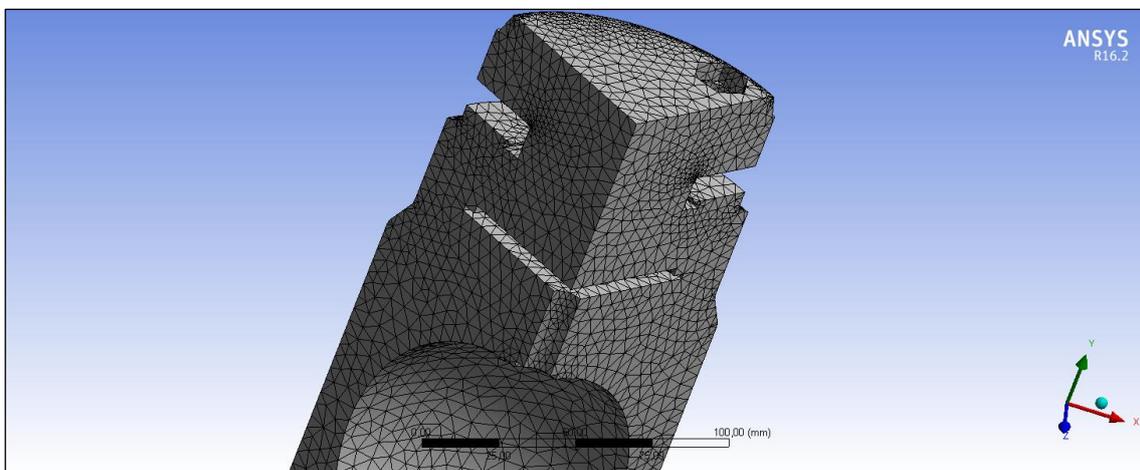


Figura 11 – Ventosa IRUA con malla de 5 mm

En geometrías complejas como la ventosa la forma de celda que mejor se amolda es la tetraédrica, ya que jugando con los tamaños y la distribución de las celdas se puede conseguir un buen nivel de detalle.

La calidad de la malla viene dada principalmente por tres factores fundamentales:

- **Skewness:** Que en castellano sería la asimetría de la malla. Esta tiene su fundamento en la desviación del equiángulo de la celda (90° para cuadrados y 60° para triángulos).

La asimetría se mide de la siguiente forma:

$$Skewness = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (43)$$

Siendo en esta ecuación θ_e el equiángulo nombrado anteriormente y θ_{max} y θ_{min} el ángulo máximo y mínimo que exista entre dos aristas de la celda.

En esta tabla se puede ver los rangos de calidad de la asimetría.



Skewness	Calidad de la malla
0-0,25	Excelente
0,25-0,5	Buena
0,5-0,8	Aceptable
0,8-0,95	Pobre
0,95-0,98	Inadecuada
0,99-1	Deteriorada

Figura 12- Skewness: Ángulos máximo y mínimo

Tabla 3 – Valores típicos Skewness

- **Smoothness:** Establece la suavidad o progresividad que hay en el cambio de tamaño de una a otra celda. Esta simplemente se calcula como la diferencia entre los dos puntos más alejados de celdas consecutivas, y la diferencia de tamaño no puede superar un 20% entre una celda y ninguna de sus adyacentes.
- **Aspect Ratio:** Define la relación entre el lado más largo y más corto de la celda. El ratio aspecto óptimo para el cálculo será 1 que haría un triángulo equilátero en el caso de que tenga forma triangular o un cuadrado en caso de que tenga forma tetraédrica.

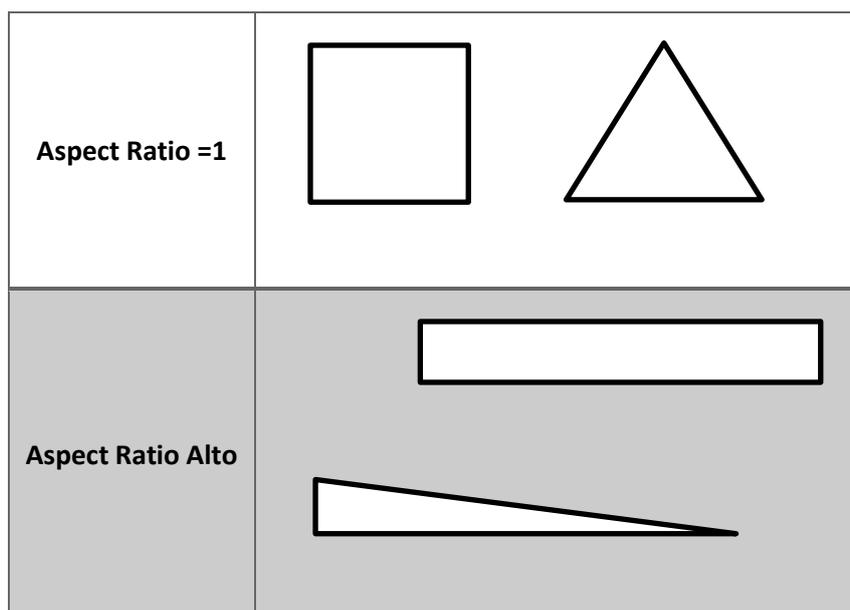


Figura 13 – Aspect Ratio: geometrías

Junto a estos parámetros existe otro elemento fundamental en el diseño de la malla y este es el tamaño de la celda. Un diseño muy fino de la malla da un nivel de detalle mayor, sin embargo, puede que si este es excesivo el nivel de complejidad de cálculo haga que no se pueda llegar a una solución al problema y tener problemas con el cálculo en el Solver. Por otra parte, tener una malla muy basta con tamaños grandes de celda puede hacer que esta, a pesar de tener una complejidad de cálculo menor, llegue a una solución que no sea representativa de la realidad.

Es por esto, que antes de poder realizar los análisis definitivos e ir cambiando los prototipos de carcasas de la ventosa se debe de realizarse un estudio de la malla para determinar qué tamaño es bueno para que el resultado sea representativo dentro de unos límites que permitan el cálculo.

4.5.2.2. Estudio de Malla

Como se ha dicho, antes de realizar los análisis definitivos y las modificaciones en las geometrías se debe hacer un estudio sobre el tamaño de malla más adecuado para el problema. De esta forma, se podrá mejorar el uso de recursos de cálculo y por tanto el análisis.

Para el estudio de malla de este proyecto se optó por probar 5 tamaños de malla diferentes.

El estudio se realiza fijando un caudal de entrada bajo ciertas condiciones. En este caso se fijó un caudal de 2315 Nm³/h. Para este mismo caudal, se realizó el mismo análisis únicamente variando el tamaño de la malla, obteniéndose:

TAMAÑO DE MALLA (mm)	PRESIÓN (bar)	Error %	NUMERO CELDAS
1	0,310	3,816	1.626.682
2	0,310	3,816	477.150
3	0,300	0,541	345.202
4	0,261	13,043	241.640
5	0,314	5,133	257.972
10	0,319	6,802	232.657

Tabla 4 - Tamaños de malla y error respecto al experimental

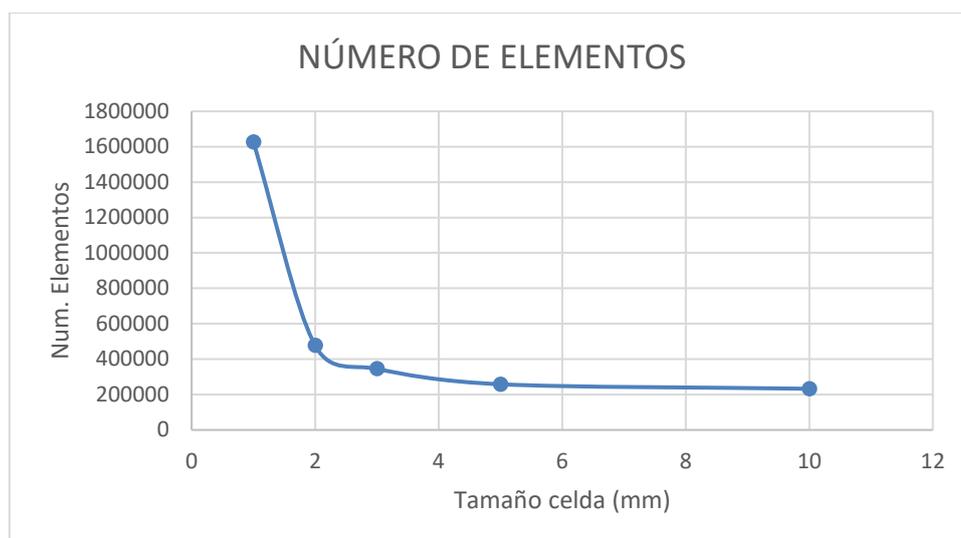


Figura 14 – Número de elementos en función del tamaño de malla

Si se analizan los resultados se puede ver que prácticamente todos los puntos entre 1 y 5 mm se encuentran en un rango de valores entre 0.3 y 0.315. Entonces en cuanto a precisión de resultados cualquiera de los puntos sería aceptable. Sin embargo, hay que tener en cuenta que al disminuir los tamaños de celda se aumenta el número de estas. El tiempo de análisis aumenta también con el número de celdas, y además este lo hace de forma exponencial. De esta forma, la diferencia de tiempo puede ser de muchas horas o incluso días.

De esta forma, el tamaño a utilizar en el resto de análisis es de 0.005m, ya que ofrece buenos resultados con un tiempo de computación contenido. El tiempo de cálculo aproximado de 40 minutos por simulación y cada simulación representa un punto de funcionamiento en la curva de la ventosa. Aunque este tiempo varía según las condiciones de contorno de cada punto y de la cubierta que se esté ensayando.

4.5.2.3. Definición de superficies

Finalmente, en la parte del mallado está la definición de las superficies. Durante el análisis, las condiciones de contorno del problema se aplicarán en función del tipo de superficie que tengamos. Si no se da a una superficie concreta un nombre durante la fase de mallado, está será tomada como pared (Wall) por defecto durante el cálculo. Es por esto que hay que definir aquellas zonas en las que queremos definir las condiciones de contorno de una forma especial.

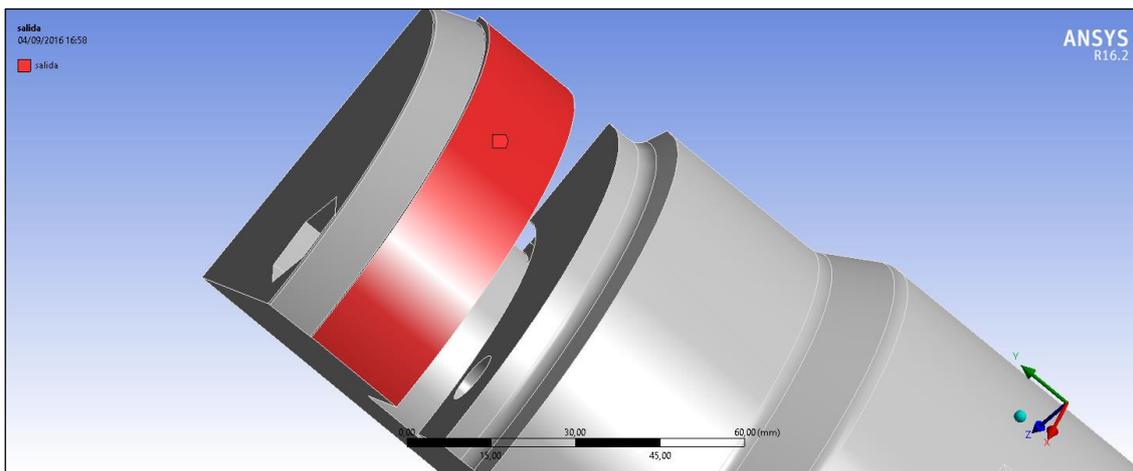


Figura 15 – Ejemplo de Named Selection en ANSYS

4.5.3 Solver: ANSYS Fluent.

4.5.3.1. Configuración de Fluent

Antes de realizar el análisis propiamente dicho del comportamiento de la ventosa, es necesaria realizar la configuración y del problema. Este proceso es realmente importante ya que en él se definirán todas las condiciones de contorno del problema, y por tanto una buena o mala configuración determinarán la semejanza con el problema real.

ANSYS dispone de software para realizar el análisis de muchos tipos de problemas. Para nuestro caso concreto en el que estamos analizando el movimiento de aire en el interior de una ventosa utilizaremos Fluent.

Se debe definir correctamente el tipo de problema. En el caso de la ventosa el problema es de tipo “pressure-based, ya que la presión es el parámetro de mayor peso en este problema y el resultado dependerá directamente de si se tienen en cuenta los aspectos que más le afectan. Tiene que verse también que parte del problema se quiere estudiar a la hora de configurar el Solver, ya que no es lo mismo estudiar la parte del transitorio que el funcionamiento en régimen permanente.

El modelo matemático de la simulación es otra variable a seleccionar en el Solver. Es una buena idea comparar con trabajos que se hayan realizado sobre el mismo tema para elegir un buen modelo. En trabajos anteriores de caracterización de ventosas se ha utilizado con éxito el modelo viscoso k- ϵ Realizable.

En este análisis la simulación se realizará para la expulsión de Aire, es por esto que el modelo utilizado tendrá en cuenta la ecuación de la energía. Esto se debe al carácter compresible del aire que, a pesar de ser tomado como gas perfecto, presenta una serie de complejidades matemáticas que deben ser tratadas.

Por último, una vez definido el modelo se deben de definir las condiciones de contorno. ANSYS Fluent establece como defecto las superficies de la geometría como “Wall” (Pared). Sin embargo, al haberse dado la calidad de “Named Selection” a ciertas superficies, estas pueden ser modificadas.

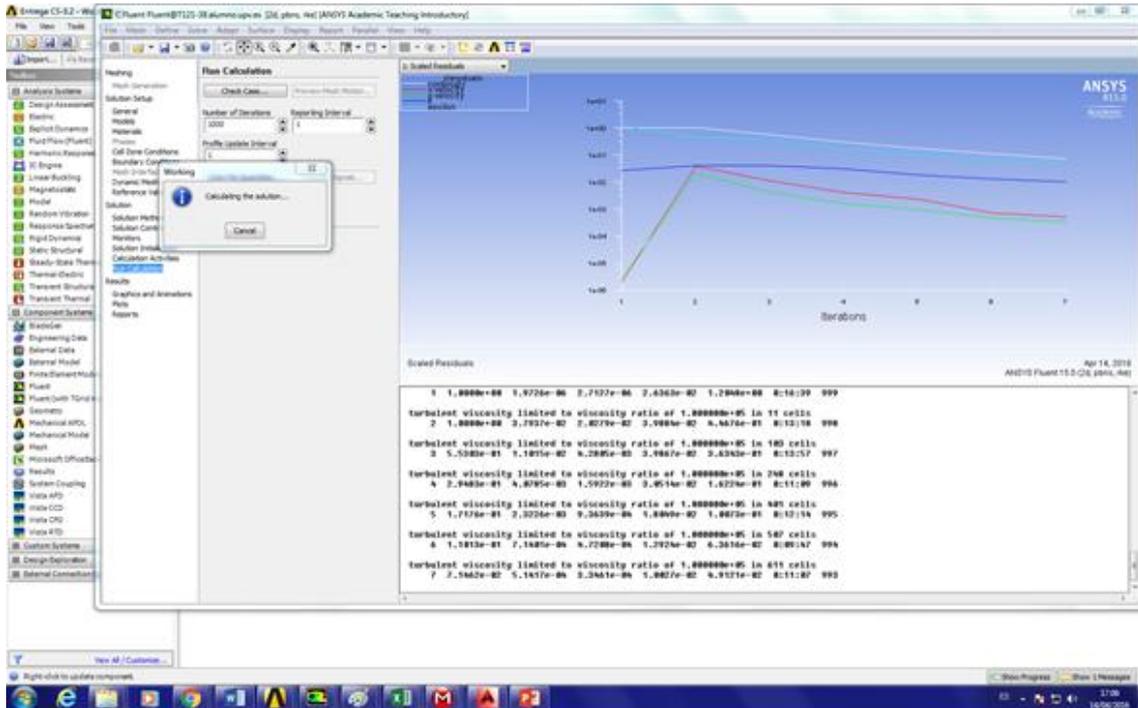


Figura 16 – Evolución de residuos durante el cálculo de Fluent

Las condiciones de contorno que se deben definir para nuestro problema son las siguientes:

- **Caudal de entrada:** En primer lugar, para fijar el caudal de entrada de la ventosa, se fijará el orificio de entrada de esta como “mass flow inlet”. Este caudal se puede ir modificando para sacar la curva de la ventosa.
- **Presión en la salida:** La superficie correspondiente al orificio de la ventosa se tomará como pressure outlet. De esta forma se tiene la referencia de la presión atmosférica en un punto.
- **Simetría:** Finalmente, para terminar con las Named Selections, se fijarán cada uno de los planos de simetría como “symmetry”. Dependiendo de la variante de carcasa se tienen uno o dos planos de simetría. Se tiene que tener en cuenta que en el caso de que se realice de forma simétrica también se tiene que modificar el caudal de entrada a la bomba.
- **Paredes:** Como se ha dicho anteriormente todas aquellas superficies que no han sido modificadas por defecto tienen la característica de tipo “Wall” o pared. Estas superficies delimitan el paso del fluido.

4.5.3.2. Cálculo en Fluent

Antes de efectuar el análisis se debe inicializar la solución con respecto a algún punto. De esta forma se puede agilizar el proceso de cálculo llegando antes al estado permanente.

Hay que tener en cuenta que el proceso de cálculo de Fluent no es cerrado. No existe una configuración general para todos los problemas, si no que durante el proceso de cálculo es necesario comprobar que resultados se están obteniendo y ajustar los diferentes valores en función de los resultados obtenidos.

También hay casos en los que los factores de relajación y otros parámetros deben ser modificados para conseguir una convergencia rápida del problema. De lo contrario los procesos iterativos pueden durar un tiempo excesivo sin llegar a ninguna solución.

Durante el proceso de cálculo en este trabajo se fijaron unas 2500 iteraciones. Sin embargo, a la vez que se realizaba el análisis se ha monitorizado el resultado y esas 2500 iteraciones han variado en función de que se obtuviese antes o después una estabilización del valor de monitorización que en este caso se trata del “facelet average” de la presión a la entrada.

4.5.4 Post Procesado

Una vez realizados los análisis y encontrado una solución al problema es momento de procesarlos e interpretarlos. Estos análisis principalmente se estudiarán desde un enfoque analítico, ya que el último objetivo es obtener las curvas de funcionamiento.

Sin embargo, ANSYS, y más concretamente el módulo Fluent, permiten un procesado de datos y de las geometrías desde enfoques gráficos que pueden resultar de enorme ayuda a la hora de interpretar las soluciones.

En función de los resultados obtenidos y de cómo resulten los análisis, se tiene que ir realizando un análisis crítico y modificando los valores que se han introducido en el origen antes de realizar el análisis con tal de llegar a unos buenos resultados.

Para poder obtener la curva característica de la ventosa, se debe ir variando el valor del caudal de entrada (Mass flow Inlet). Así se obtendrá un valor de presión a la entrada para cada valor de caudal. El valor de presión que se tomará será un valor representativo en toda la superficie conocido como “Average of facelet values”.

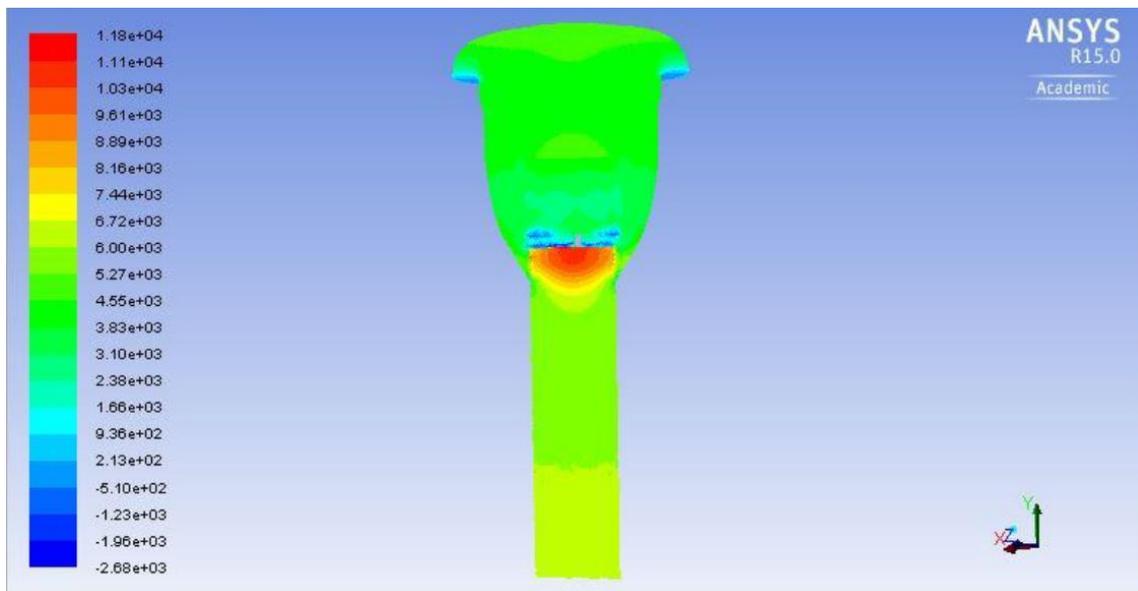


Figura 17 – Mapa de presiones de una ventosa con ANSYS fluent.

Mientras se realiza el análisis no solo se mira la convergencia de los residuos, ya que en ocasiones se puede llegar a un valor estable de presión sin que los residuos hayan convergido.

Es por esto que es conveniente representar la presión mientras se realiza el análisis para ver como varía el valor y en qué punto se puede finalizar el análisis.

Existe también la opción de parametrizar el Mass flow inlet. De esta forma se puede dejar correr el análisis para todos los puntos de la curva sin necesidad de ir modificándolos cada vez. Sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto se ha preferido hacer de forma manual para poder controlar en cada momento el proceso.

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1. Validación modelo original

El objetivo último de este proyecto era por una parte demostrar la validez de los modelos CFD, y por otra llegar a una conclusión sobre cuál de los diferentes modelos de carcasa tenía un mejor rendimiento en el modelo de IRUA que se ha tomado.

En primer lugar, se ha realizado una comparación entre el modelo original de ventosa, del cual se disponían de ensayos experimentales realizados en la propia casa, y el modelo hecho en ANSYS Fluent. De esta forma, se puede validar el modelo principal y extrapolarlo a las pequeñas modificaciones que se han hecho sobre las diferentes cubiertas del orificio de salida de la ventosa.

Para comparar ambos datos, se han comparado los resultados tanto gráfica como analíticamente. Obteniéndose para el modelo original:

Caudal			Presión Entrada	
Real (Kg/s)	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,33333	4000	0,3333325	630445	0,78635
1,1666	3500	0,29165	454255	0,61991
1	3000	0,25	389388	0,48184
0,8333	2500	0,208325	310407	0,35
0,6666	2000	0,16665	221390	0,24173
0,5	1500	0,125	144876	0,102
0,3333	1000	0,083325	78635	0,06706
0,166666	500	0,0416665	24173	0,0342

Tabla 5- Resultados ensayo Modelo original con CFD

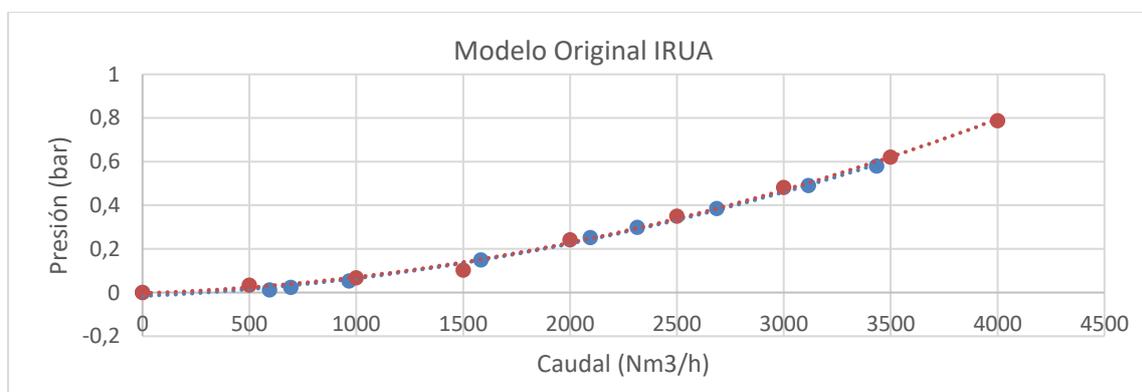


Figura 18- Gráfico comparativo de resultados ANSYS-Experimental

Se puede comprobar que la diferencia entre las dos curvas es muy pequeña y que los modelos obtenidos en ANSYS y de forma experimental son muy similares.

Para comprobar de forma analítica estas diferencias, se han tomado las ecuaciones de las curvas características y se han representado diferentes puntos en ella, tomando como base los puntos originales a partir de los cuales se han obtenido las curvas. Después, se ha sacado la diferencia entre ambos.

Se pueden ver los resultados en la tabla 5:

CAUDAL	PUNTOS CURVA ANSYS	PUNTOS CURVA EXPERIMENTAL	ERROR MÁXIMO
4000	0,757	0,784	2,68%
3500	0,592	0,614	2,18%
3434	0,572	0,593	2,11%
3115	0,478	0,496	1,80%
3000	0,447	0,464	1,68%
2686	0,366	0,380	1,37%
2500	0,322	0,334	1,18%
2315	0,281	0,291	0,99%
2095	0,235	0,243	0,78%
2000	0,217	0,224	0,68%
1583	0,145	0,147	0,26%
1500	0,132	0,134	0,18%
1000	0,067	0,064	0,32%
966	0,063	0,060	0,35%
694	0,037	0,031	0,63%
595	0,029	0,022061	0,73%
500	0,022	0,0141	0,82%

Tabla 6- Error entre ensayo experimental y ensayo con CFD

Se puede comprobar que la diferencia entre ambas es muy pequeña, siendo el error máximo de un 2,68%.

Estos resultados demuestran que el modelo realizado con CFD tiene un nivel de similitud con el comportamiento real de la ventosa muy alto. Es por esto que se puede considerar que el modelo ha sido validado y por lo tanto que es representativo del comportamiento de la ventosa. Por esto, partiendo sobre este modelo, se realizarán las diferentes modificaciones a la geometría de la carcasa con el fin de llegar a una conclusión sobre qué solución puede ser mejor.

5.2. Comparativa con el resto de modelos

Partiendo del modelo original, se ha querido ver por medio del uso de CFDs como podría mejorarse la salida de aire de la ventosa variando la geometría de la carcasa. En el modelo original la disposición de la carcasa protectora es tal como se muestra en la Figura 19

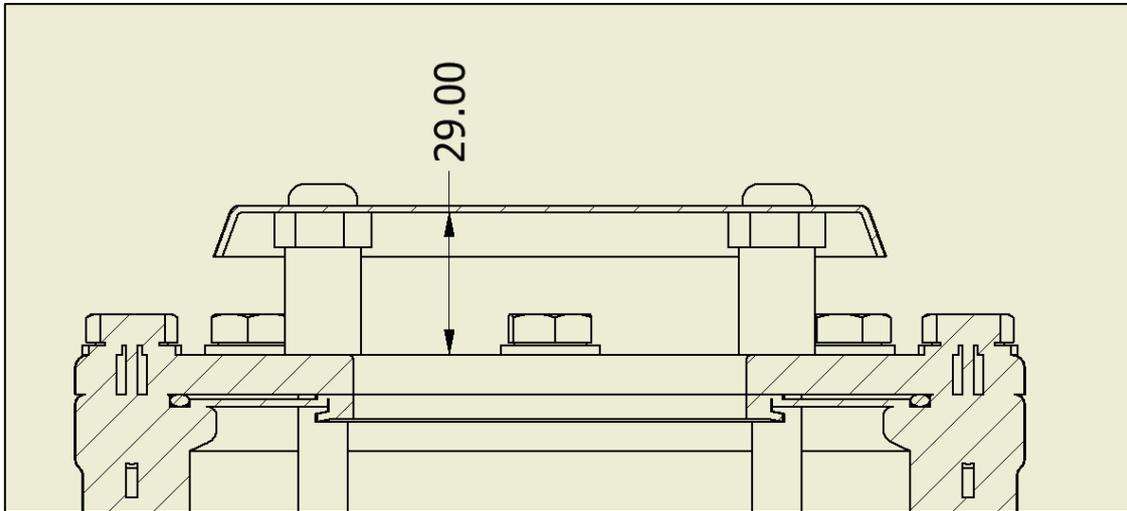


Figura 19- Forma de la carcasa en el modelo IRUA original

Las diferentes variantes de la geometría han sido:

5.2.1. Carcasa a 6 mm más alta

La diferencia con el modelo original es que la carcasa está situada 6 mm por encima, siendo la superficie de salida de aire mayor con respecto a la original como se aprecia en la figura 20.

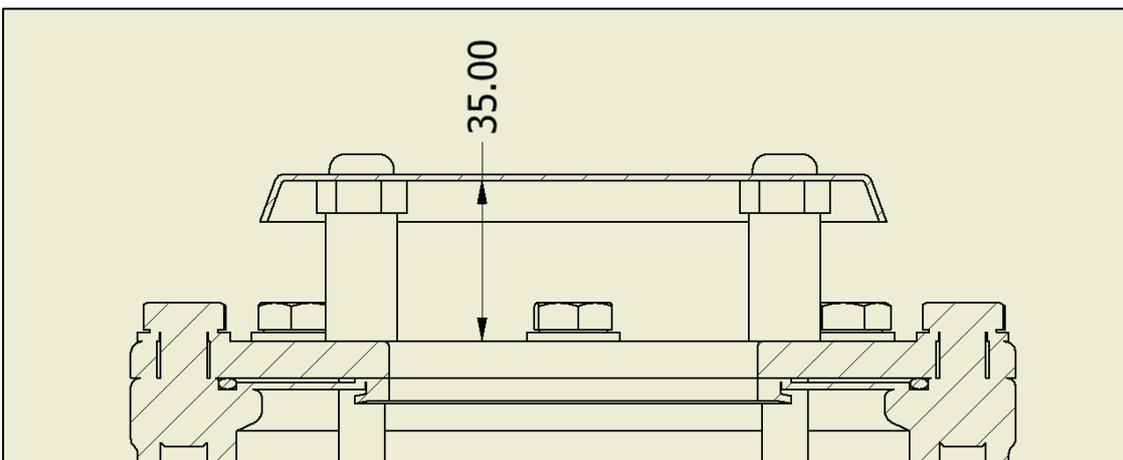


Figura 20-Modelo IRUA - Carcasa 6mm más alta

Los resultados obtenidos con esta carcasa se pueden ver en la Tabla 7 de forma gráfica en la figura 21.:

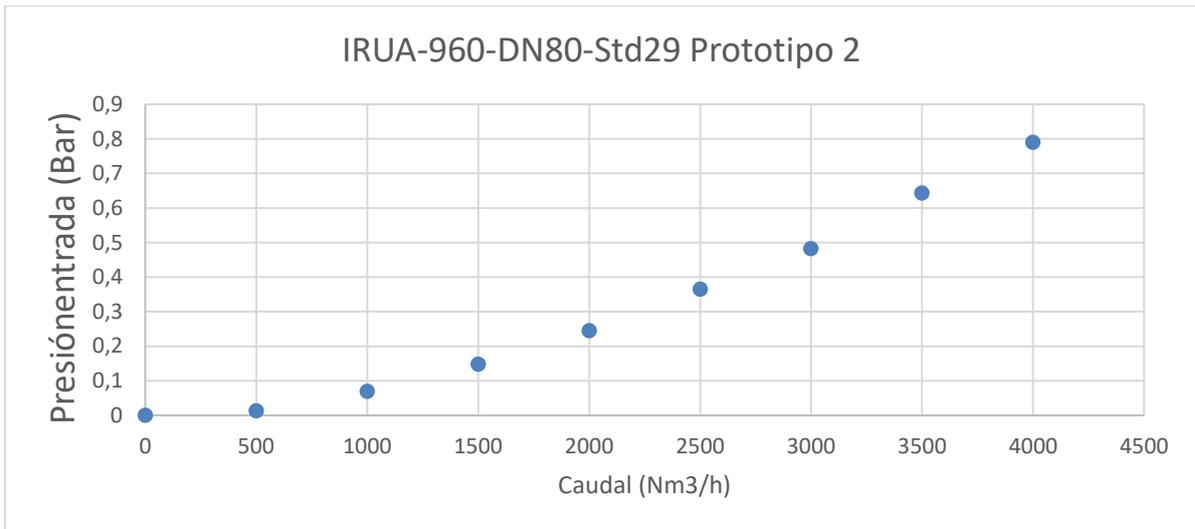


Figura 21 – Curva de expulsión IRUA prototipo 2

Caudal			Presión Entrada	
Real (Kg/s)	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,333	4000	0,333	78994,91	0,789
1,166	3500	0,291	64314,61	0,643
1,000	3000	0,250	48199,23	0,481
0,833	2500	0,208	36512,13	0,365
0,666	2000	0,166	24529,31	0,245
0,500	1500	0,125	14768,49	0,147
0,333	1000	0,083	6946,43	0,069
0,166	500	0,041	1279,44	0,012
0,000	0	0	0	0

Tabla 7- Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 2

Este prototipo concreto se ha estudiado por tener una mayor superficie de salida del aire.

5.2.2. Carcasa invertida

En este modelo la carcasa original está situada a la misma altura, pero se ha invertido con respecto al primer modelo, quedando su geometría de la forma que se ve en la Figura 22.

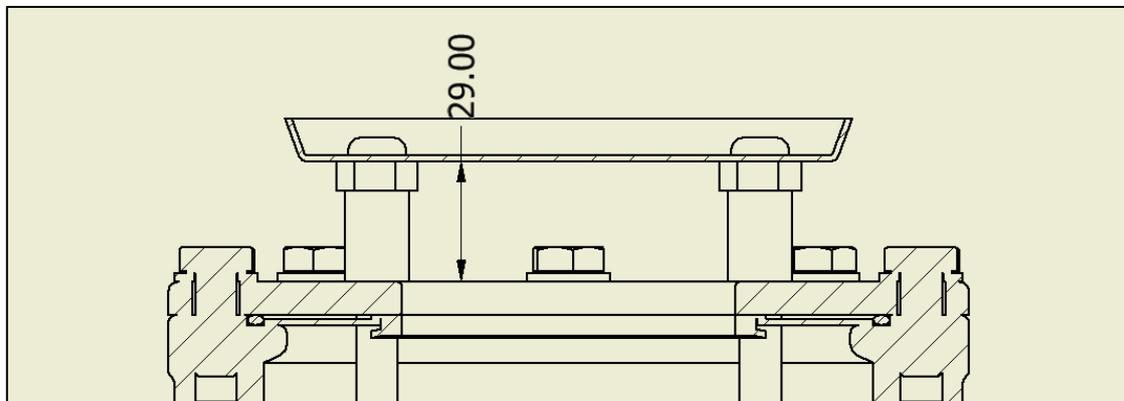


Figura 22 - Modelo IRUA - Carcasa invertida

Este diseño parte de la situación inicial, pero tiene algo más de superficie de expulsión al haberse situado la carcasa de forma invertida teniendo la parte achaflanada ahora fuera de la zona de contacto con la salida de aire.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8 y la figura 23:

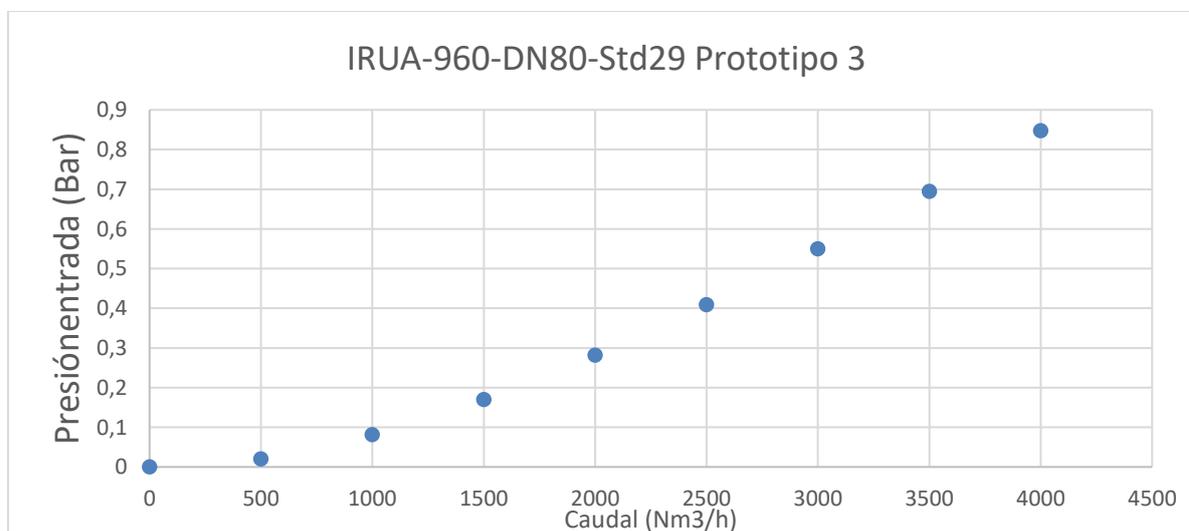


Figura 23 – Curva de expulsión IRUA prototipo 3

Real (Kg/s)	Caudal		Presión Entrada	
	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,333	4000	0,333	84808,49	0,848
1,166	3500	0,291	69458,36	0,694
1,000	3000	0,250	55010,11	0,550
0,833	2500	0,208	40882,66	0,408
0,666	2000	0,166	28193,99	0,281
0,500	1500	0,125	17034	0,170
0,333	1000	0,083	8140,99	0,081
0,166	500	0,041	2030,11	0,020
0	0	0	0	0

Tabla 8 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 3

5.2.3. Carcasa con diseño distinto

En este modelo de carcasa la forma es completamente diferente, incluyendo la forma que se puede ver en la figura 24:

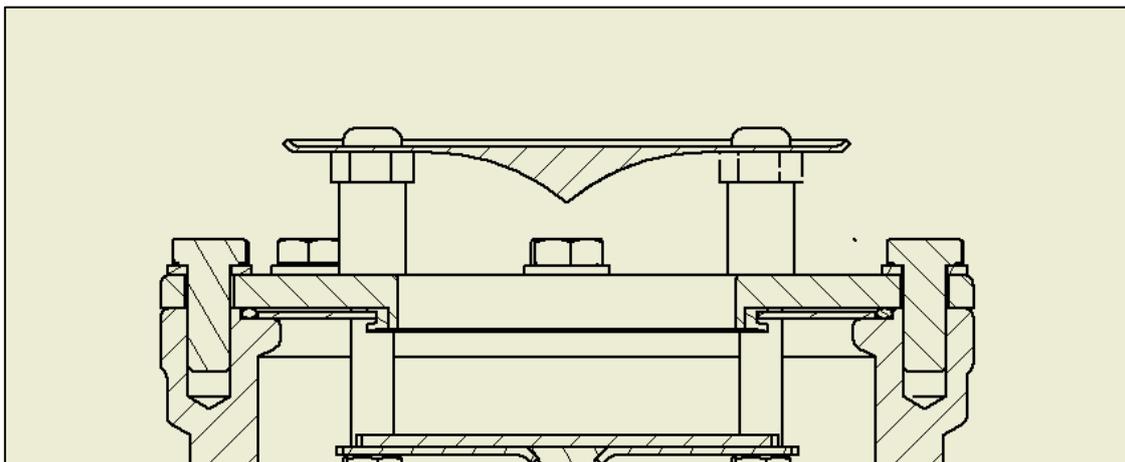


Figura 24 - Modelo IRUA - Carcasa con diseño distinto

Este diseño cuenta con una carcasa diferente que en teoría podría favorecer el guiado del aire a la salida de la ventosa.

Los resultados obtenidos para esa ventosa se pueden ver en la figura 25 y la tabla 9

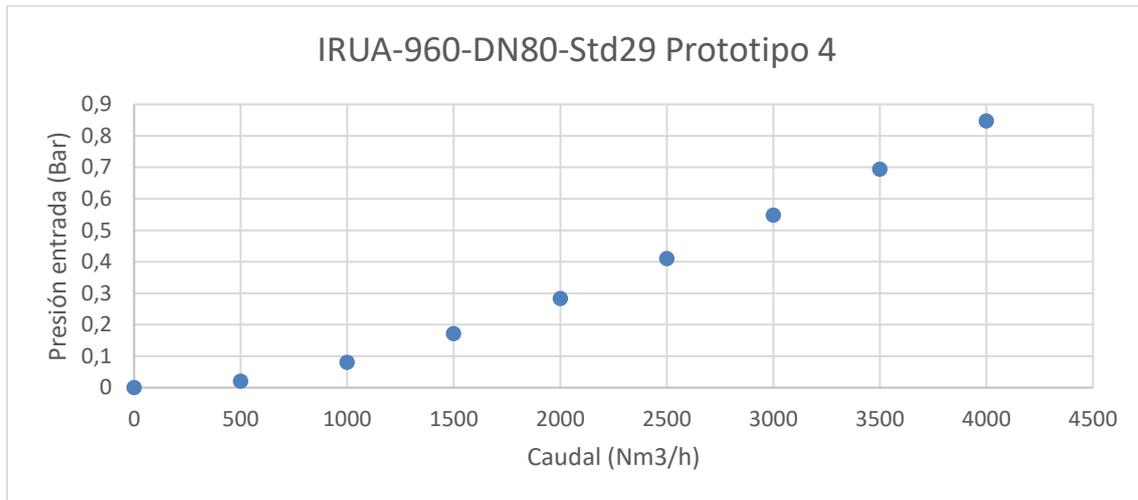


Figura 25 – Curva de expulsión IRUA prototipo 4

Real (Kg/s)	Caudal		Presión Entrada	
	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,333	4000	0,333	84742,33	0,847
1,166	3500	0,291	69409,24	0,694
1,000	3000	0,250	54782,12	0,547
0,833	2500	0,208	41062,06	0,410
0,666	2000	0,166	28311,24	0,283
0,500	1500	0,125	17145,04	0,171
0,333	1000	0,083	8087,69	0,080
0,166	500	0,041	2107,32	0,021
0	0	0	0	0

Tabla 9 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 3

5.2.4. Carcasa con codo a 90º

En este modelo se ha incluido un codo a 90º en la salida en vez de una carcasa protectora típica, como se puede apreciar en la figura 26.

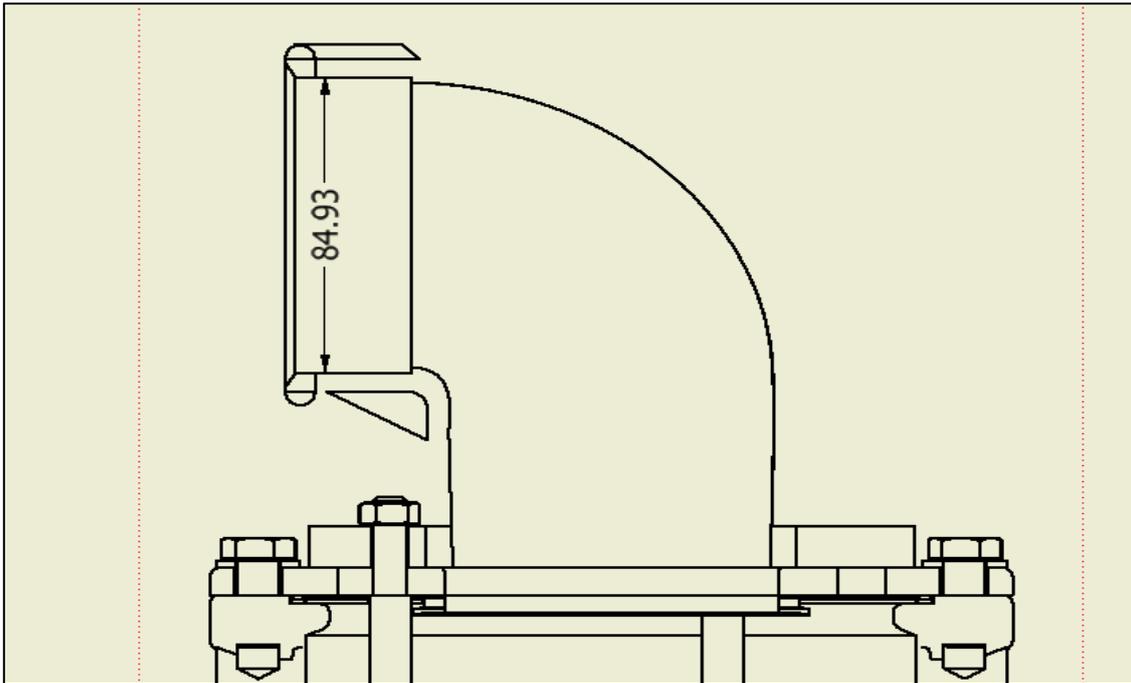


Figura 26 - Modelo IRUA - Carcasa con codo a 90°

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 27 y la tabla 10.

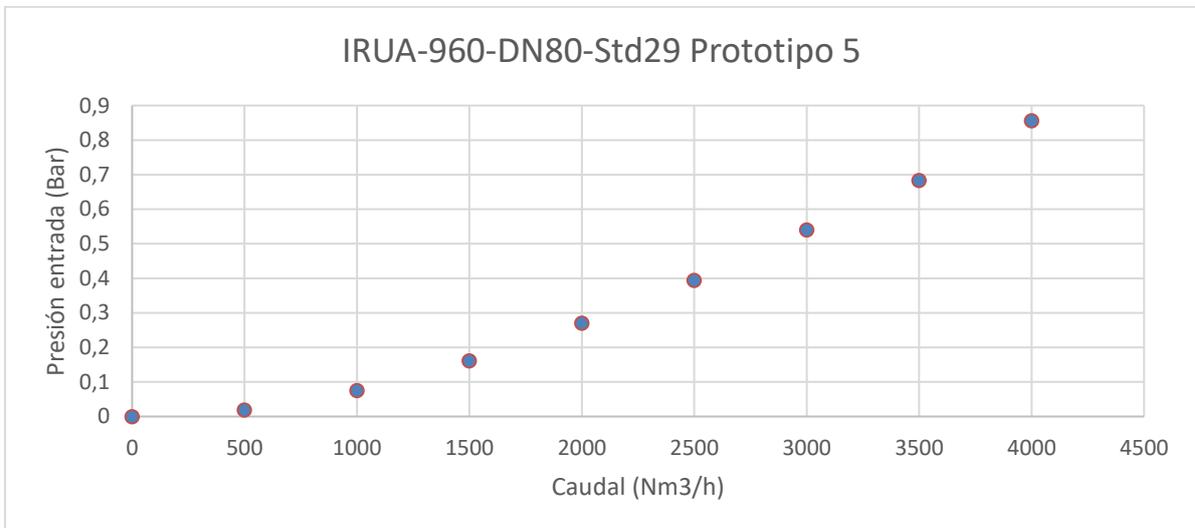


Figura 27 - Curva de expulsión IRUA prototipo 5

Este prototipo al tener el codo tiene un mayor recorrido para el aire y de esta forma puede tener un mejor guiado hacia la salida.

Real (Kg/s)	Caudal		Presión Entrada	
	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,333	4000	0,666	85588,52	0,855
1,166	3500	0,583	68336,41	0,683
1,000	3000	0,500	54017,09	0,540
0,833	2500	0,416	39430,16	0,394
0,666	2000	0,333	27002,72	0,270
0,500	1500	0,250	16134,94	0,161
0,333	1000	0,166	7503,42	0,075
0,166	500	0,083	1937,27	0,019
0	0	0	0	0

Tabla 10 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 5

5.2.5. Carcasa con codo acabado en chaflán.

Finalmente, la última variable es igual que la anterior, pero incluyendo un difusor en el extremo del codo.

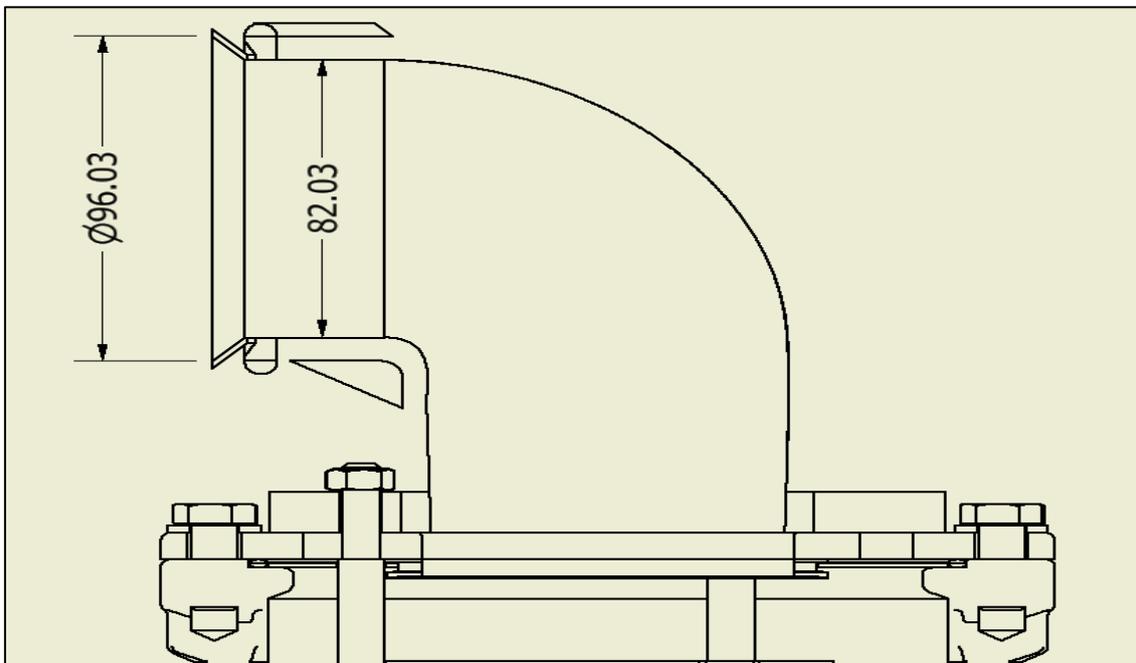


Figura 28 - Modelo IRUA - Carcasa con codo acabado en chaflan.

Los resultados obtenidos para este modelo se muestran en la figura 29 y la tabla 11:

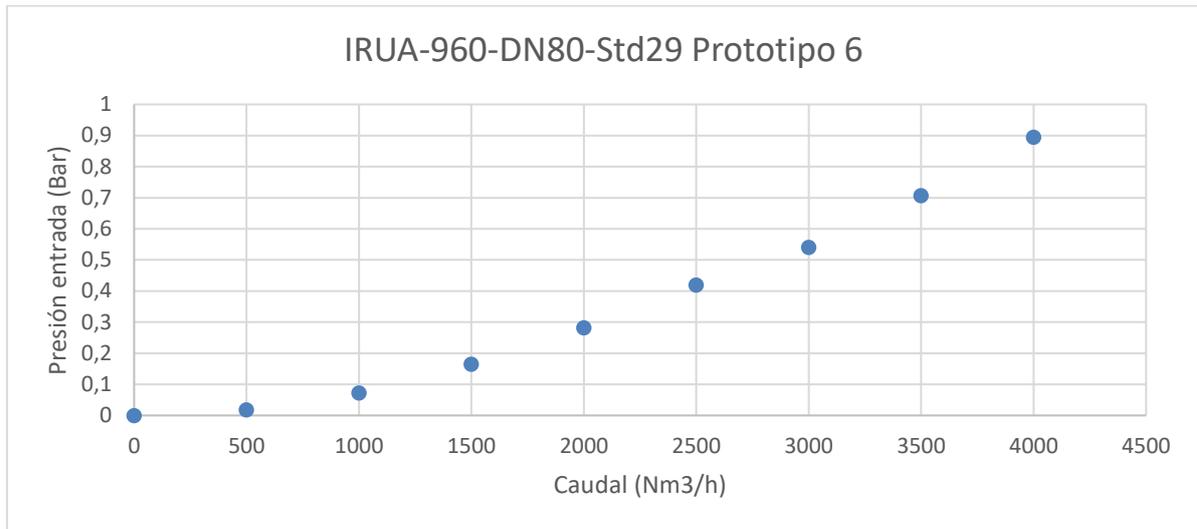


Figura 29 - Curva de expulsión IRUA prototipo 6

Caudal			Presión Entrada	
Real (Kg/s)	Real(Nm3/h)	Introducido en ANSYS (Kg/s)	Pascal	Bar
1,33333	4000	0,666665	89420,73	0,8942073
1,1666	3500	0,5833	70693,71	0,7069371
1	3000	0,5	53997,39	0,5399739
0,8333	2500	0,41665	41952,23	0,4195223
0,6666	2000	0,3333	28199,87	0,2819987
0,5	1500	0,25	16447,5	0,164475
0,3333	1000	0,16665	7228,47	0,0722847
0,166666	500	0,083333	1829,84	0,0182984
0	0	0	0	0

Tabla 11 - Resultados numéricos del ensayo de expulsión IRUA prototipo 6

Teóricamente el difusor podría mejorar la salida de aire con respecto al modelo anterior de codo a 90°.

5.3. Comparativa de resultados:

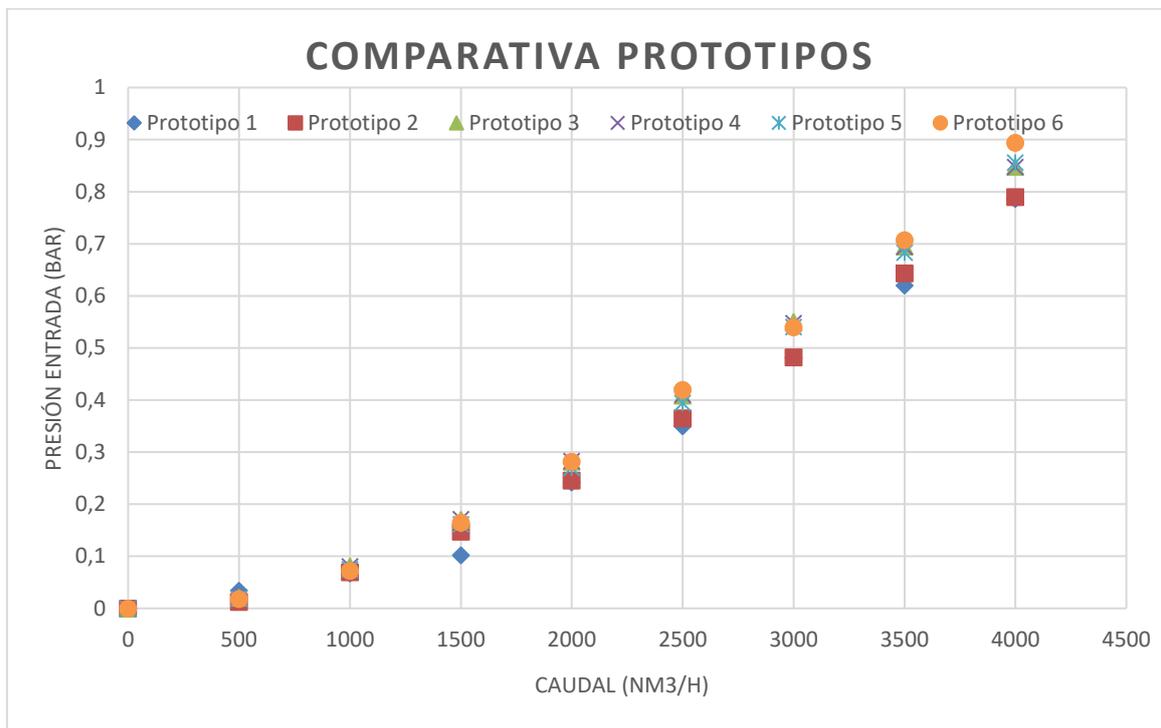


Figura 30 – Comparativa de resultados obtenidos entre los diferentes prototipos.

Al comparar los resultados se puede ver las diferencias existentes entre los diferentes prototipos de carcasa. En la mayoría de puntos el modelo original y la primera variante tienen unos resultados similares, siendo las que menos diferencia de presiones necesitan para poder evacuar el caudal de aire. Los modelos con codo y las variantes de forma tienen peores resultados, ya que necesitan una mayor diferencia de presiones para evacuar el mismo caudal y por lo tanto se debe aplicar una mayor cantidad de energía en la instalación para poder obtener el mismo resultado.

Para poder ver mejor como se traducen estas diferencias en el comportamiento se puede tomar una misma diferencia de presiones para el prototipo con mejor comportamiento y el prototipo con peor comportamiento. En la figura 31 se puede comprobar que para una misma presión en la entrada el modelo original es capaz de trasegar casi 3100 Nm³/h mientras que el prototipo con codo a 90° no es capaz de llegar a los 2900 Nm³/h.

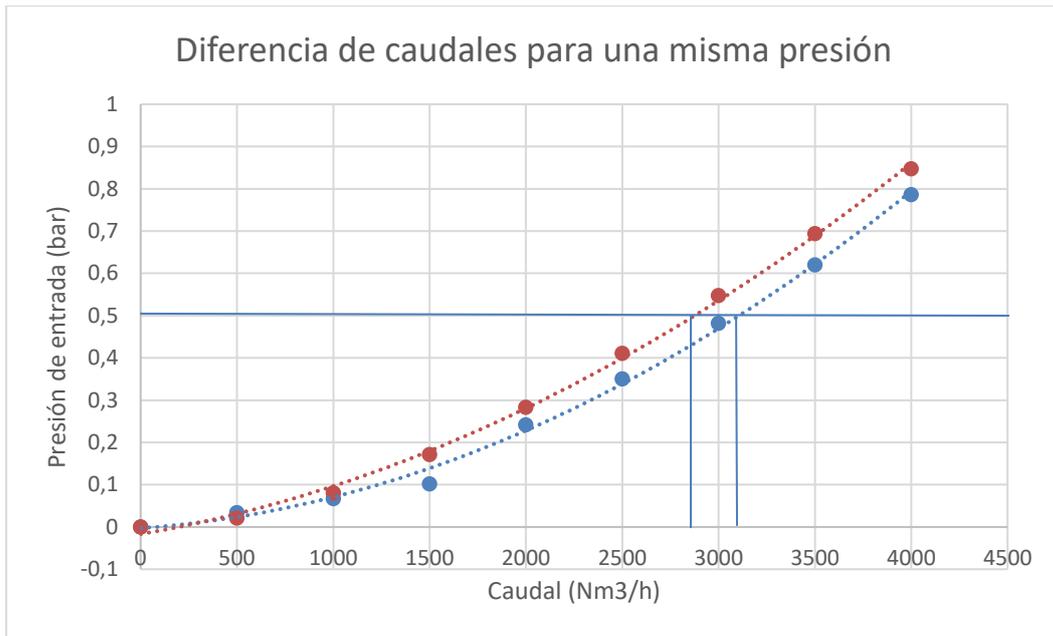


Figura 31 – Diferencia de caudales para una misma presión de trabajo

Capítulo 6: Conclusiones

Una vez realizado el trabajo, es necesario no simplemente observar los resultados y compararlos de una forma analítica, si no llegar a una serie de conclusiones y de interpretaciones. Esto debe hacerse siempre desde una perspectiva crítica que permita no tan solo analizar los resultados obtenidos si no los potenciales campos de mejora o continuaciones del mismo.

Por una parte, se ha podido comprobar, tanto durante el desarrollo del trabajo como de la asignatura de CFDs, que esta herramienta tiene un gran potencial a la hora de analizar el comportamiento de los fluidos. Esto lo hace tremendamente interesante por el enorme coste que tiene el análisis de una instalación de forma experimental y por lo tanto por el ahorro que supone que estos análisis se puedan realizar por medio de la computación. Ya que existe un ahorro tanto de medios y de energía como de tiempo. Y todo eso se traduce en dinero.

De esta forma también se ha comprobado que los métodos CFD utilizados permiten caracterizar correctamente las ventosas y de esta forma, como se ha hecho en el trabajo, permiten estudiar sobre un modelo validado posibles modificaciones y estudiar su viabilidad.

La investigación y el trabajo realizado han permitido también llegar a interesantes conclusiones con respecto a las ventosas.

En primer lugar, ha quedado patente que estos dispositivos tienen una tremenda importancia en el interior de las instalaciones. Su presencia (con dimensiones y una localización adecuada) realiza un papel fundamental a la hora de proteger el resto de la red. Y queda clara la importancia de conocer sus capacidades y sus límites, con tal de poder seleccionarlas correctamente, siendo aconsejable poder probar por uno mismo en la instalación estas capacidades que en ocasiones no se ajustan a las dadas por el fabricante.

En segundo lugar, se ha demostrado que la hipótesis inicial del trabajo era correcta. La carcasa protectora de la ventosa condiciona su funcionamiento. Es por esto que cualquier modificación que se realice sobre esta debe ser comprobada con anterioridad ya que puede modificar las capacidades de expulsión y admisión de la ventosa y, por tanto, variar su funcionamiento en el interior de la instalación.

Bibliografía

Boldy, A.P (1992). *The representation and use of air inlet/outlet valves for pressure surge control.*

Cabrera, E.; Espert, V.; García-Serra, J.; Martínez, F. (1996). *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua.* UD Mecánica de fluidos, Universidad politécnicas de Valencia.

Fuertes, V.S. (2001). *Transitorios con aire atrapado.* Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

Fuertes, V.S.; Iglesias Rey, P.L.; García Mares, F.J.; Mora Meliá, D. (2009). *Air valves behaviour. Comparison between compressible and incompressible flow.* International Workshop on Environmental Hydraulics, IWEH09, Valencia, Spain.

UNE-EN 1074-1 (2001). AENOR. *Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 1: Requisitos generales.*

UNE-EN 1074-4 (2001). AENOR. *Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 4: Purgadores y ventosas.*

Iglesias Rey, P.L. (2016). *Apuntes de la asignatura de mecánica de fluidos computacional.*

Wylie, E.B.; Streeter, V.L. (1982). *Fluid transients.* Michigan, USA.

Catálogo IRUA (2016). www.irua.es

Imágenes de ventosas. www.construmática.com

Presupuesto

Índice del presupuesto:

Partes del presupuesto:

- Desglose por capítulos
- Resumen

Partes del desglose:

- Costes de simulación
- Ensayos físicos con aire
- Honorarios

Consideraciones previas

El siguiente presupuesto ha sido realizado utilizando Microsoft Office Excel 2016. En la elaboración del presupuesto se ha tenido en cuenta el coste que supondrían las licencias de ANSYS y Autodesk Inventor a pesar de haberse realizado con licencias educativas. De esta forma se ve como sería el presupuesto si se realizase este proyecto por un particular o por una institución no educativa. En ambos casos se ha tomado un pago anual de las mismas.

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Capítulo 1		Simulación computacional		
Capítulo 1.1		Licencias de software		
0,1235	Licencia ANSYS	15000	1852,5	
0,1235	Licencia AUTODESK INVENTOR	15000	1852,5	
Total capítulo 1.1				3705
Capítulo 1.2		Cálculo computacional		
80	Coste computacional	0,1	8	
Total capítulo 1.2				8
Total capítulo 1				3713

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
----------	-------------	--------	----------	---------

Capítulo 2	Ensayo con Aire			
------------	-----------------	--	--	--

Capítulo 2.1	Desplazamientos			
--------------	-----------------	--	--	--

1	Billete vuelo: Manises (VLC) Bilbao (BIO)	90	90	
1	Billete vuelo: Bilbao (BIO) Manises (VLC)	90	90	
2	Estancia hotel	60	120	
3	Dietas	50	150	
2	Desplazamientos Aeropuerto - Hotel	40	80	
6	Desplazamientos Hotel - Aeropuerto	15	90	

Total capítulo 2.1			620	
--------------------	--	--	-----	--

Capítulo 2.2	Ensayos en el laboratorio			
--------------	---------------------------	--	--	--

2	Alquiler de la instalación	2000	4000	
5000	Coste energético	0,15	750	

Total capítulo 2.2			4840	
--------------------	--	--	------	--

Total capítulo 2			5460	
------------------	--	--	------	--

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Capítulo 3				
Honorarios				
Capítulo 3.1				
Ensayos laboratorio				
1	Ingeniero Industrial Senior	90	90	
1	Técnico de laboratorio	90	90	
Total capítulo 3.1				180
Capítulo 3.2				
Simulación con CFD				
70	Ingeniero GITI Junior	30	2100	
Total capítulo 3.2				2100
Capítulo 3.3				
Realización de memoria, planos y presupuesto				
160	Ingeniero GITI Junior	30	4800	
Total capítulo 3.3				4800
Total capítulo 3				7080

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Capítulo 4	Ventosa IRUA-960-DN80-Std29			
1	Ventosa IRUA-960-DN80-Stf29	1250	1250	
Total capítulo 4				1250
Total presupuesto				17503

Resumen del presupuesto

Código	Descripción	Subtotal	Importe
Capítulo 1	Simulación computacional	3713	
Capítulo 1.1	Licencias de software	3705	
Capítulo 1.2	Cálculo computacional	8	
Capítulo 2	Ensayo con Aire	5460	
Capítulo 2.1	Desplazamientos	620	
Capítulo 2.2	Ensayos en el laboratorio	4840	
Capítulo 3	Honorarios	7080	
Capítulo 3.1	Ensayos laboratorio	180	
Capítulo 3.2	Simulación con CFD	2100	
Capítulo 3.3	Realización de memoria, planos y presupuesto	4800	
Capítulo 4	Ventosa IRUA-960-DN80-Std29	1250	
Suma ejecución Material			17503
Total Presupuesto ejecución Material			17503
	13% Gastos generales	2275,39	
	6% Beneficio industrial	1050,18	
	Suma de gastos generales y beneficio industrial		3325,57
Total presupuesto de Inversión			20828,57
	21% I.V.A	4373,99	
Total presupuesto de Ejecución por contrata			25202,56

El presupuesto de Ejecución por contrata asciende a la suma de VEINTICINCO MIL DOSCIENTOS DOS EUROS Y CINCUENTA Y SEIS CÉNTIMOS

Planos

Índice de planos

Plano número 1: Modelo original de la ventosa IRUA.

Plano número 2: Modelo con carcasa 6mm más alta.

Plano número 3: Modelo con carcasa invertida.

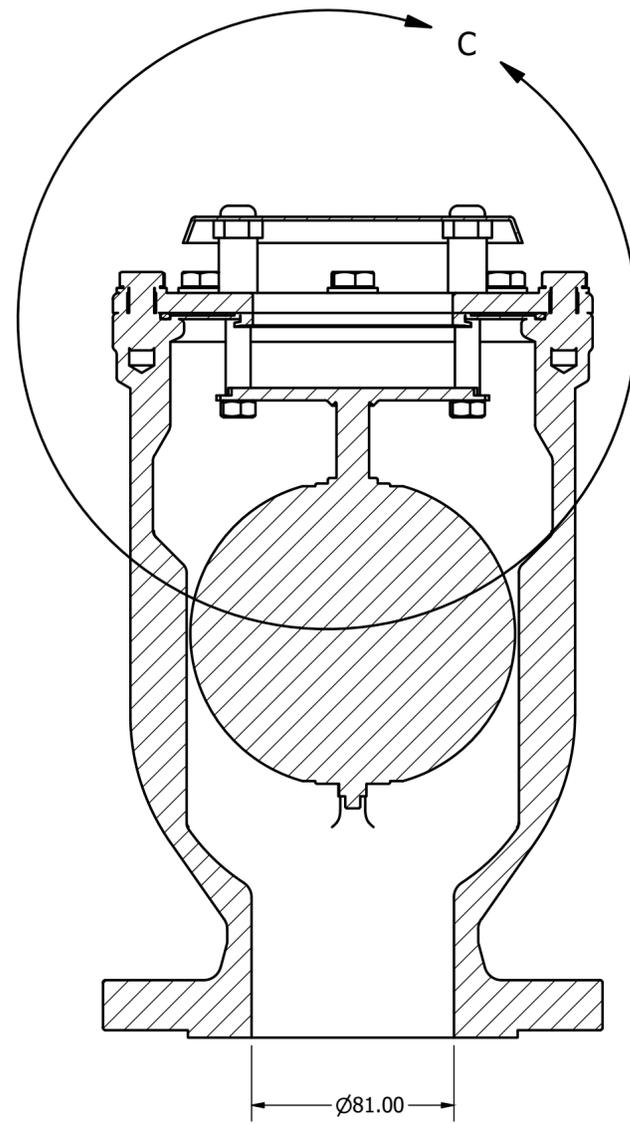
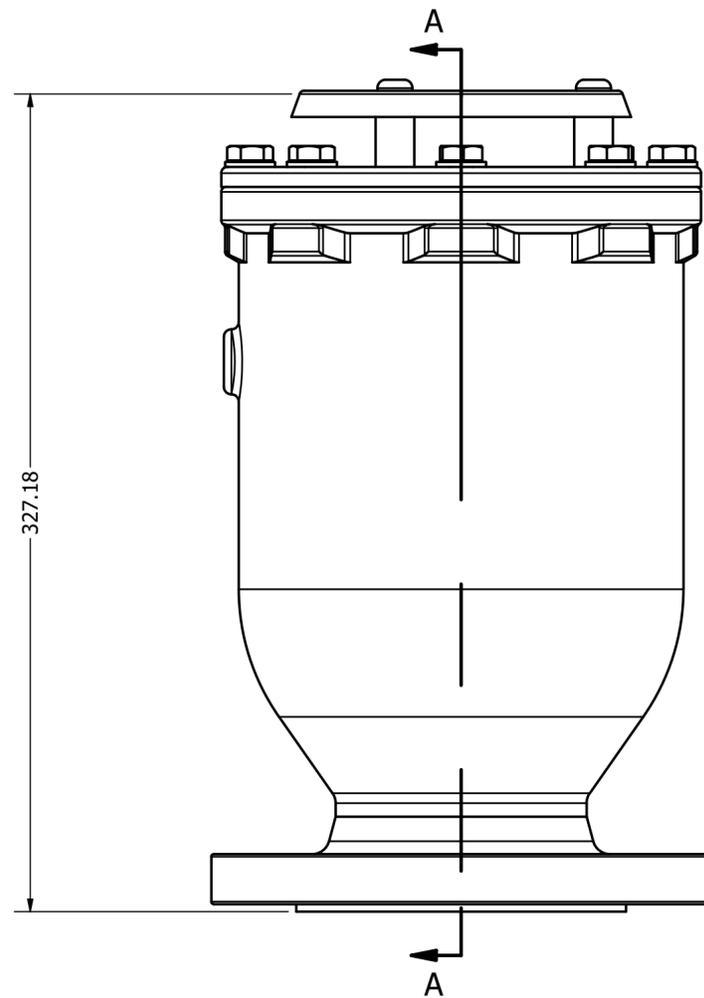
Plano número 4: Modelo con otro diseño de carcasa.

Plano número 5: Modelo con codo a 90°.

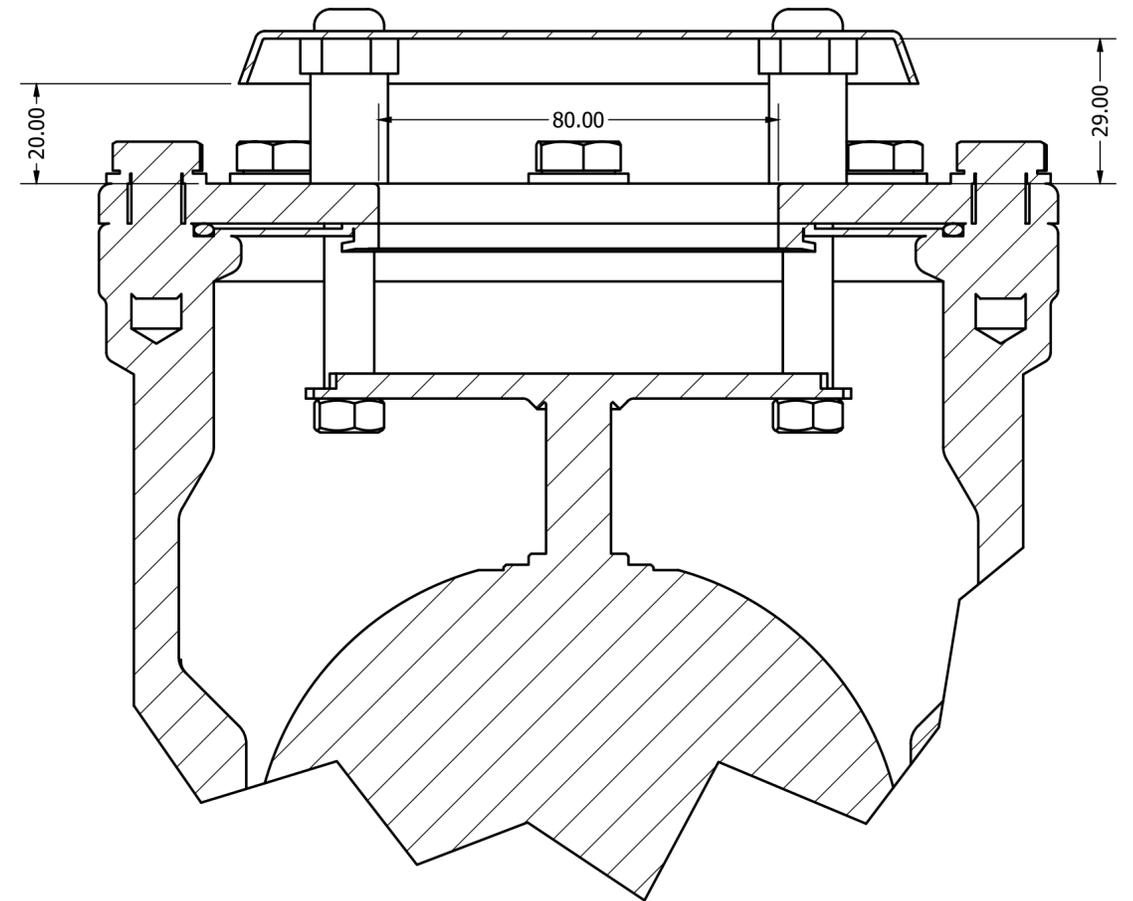
Plano número 6: Modelo con codo y chaflán.

CONSIDERACIONES PREVIAS

Los planos han sido realizados mediante el software AutoDesk Inventor a partir de las geometrías de las diferentes ventosas de las que se ha partido para realizar las simulaciones. La correcta definición de las geometrías resulta crucial para el correcto desarrollo del proyecto.



SECTION A-A
SCALE 1 : 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIEROS
INDUSTRIALES
VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y
EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON
DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DE AIRE
MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha:
Septiembre 2016

Escala:

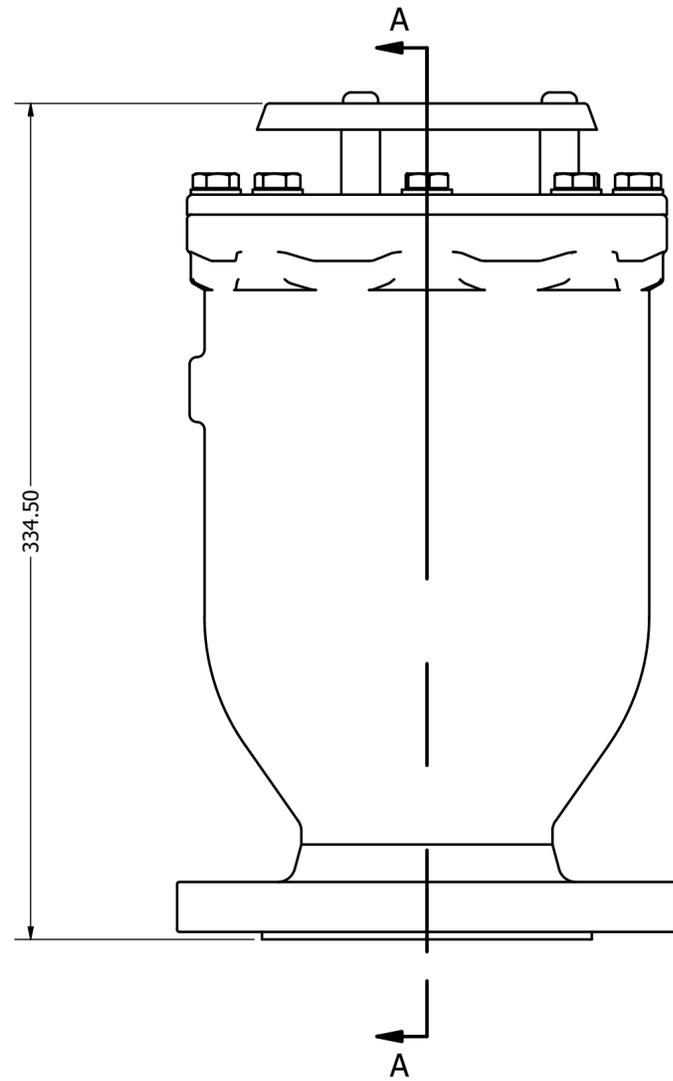
1/2

Plano:

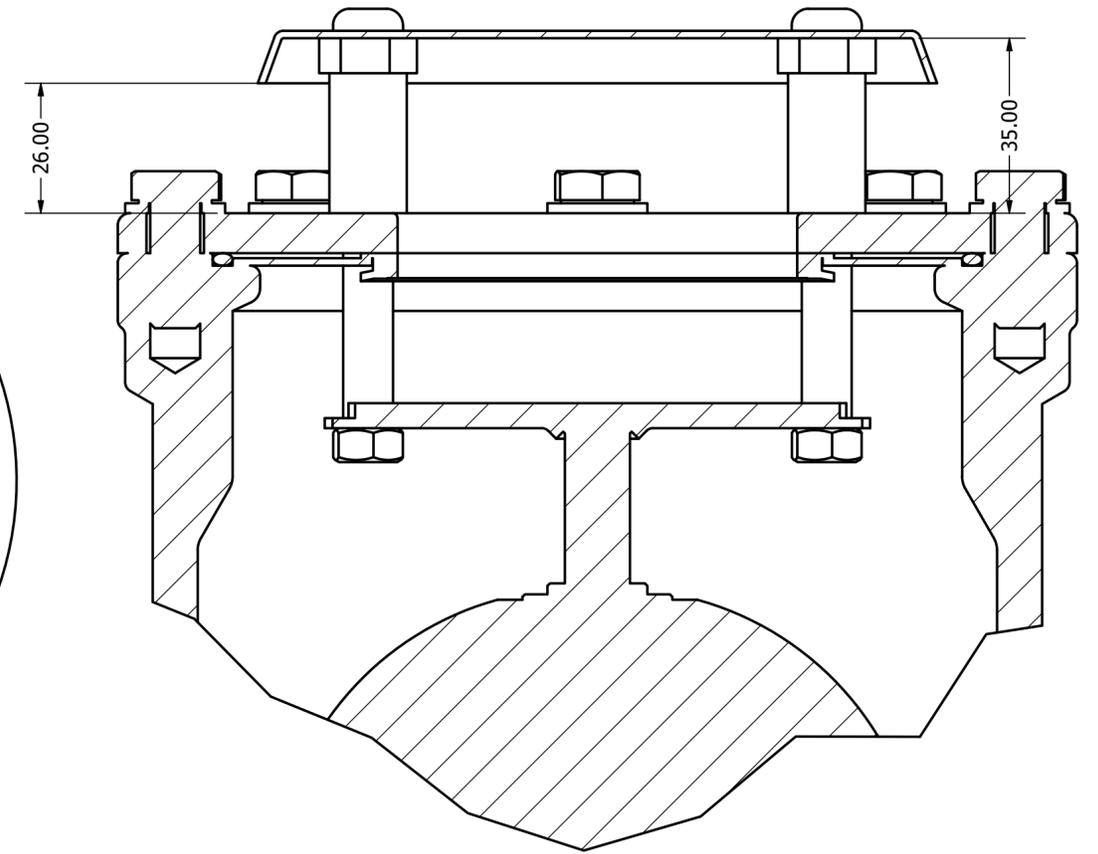
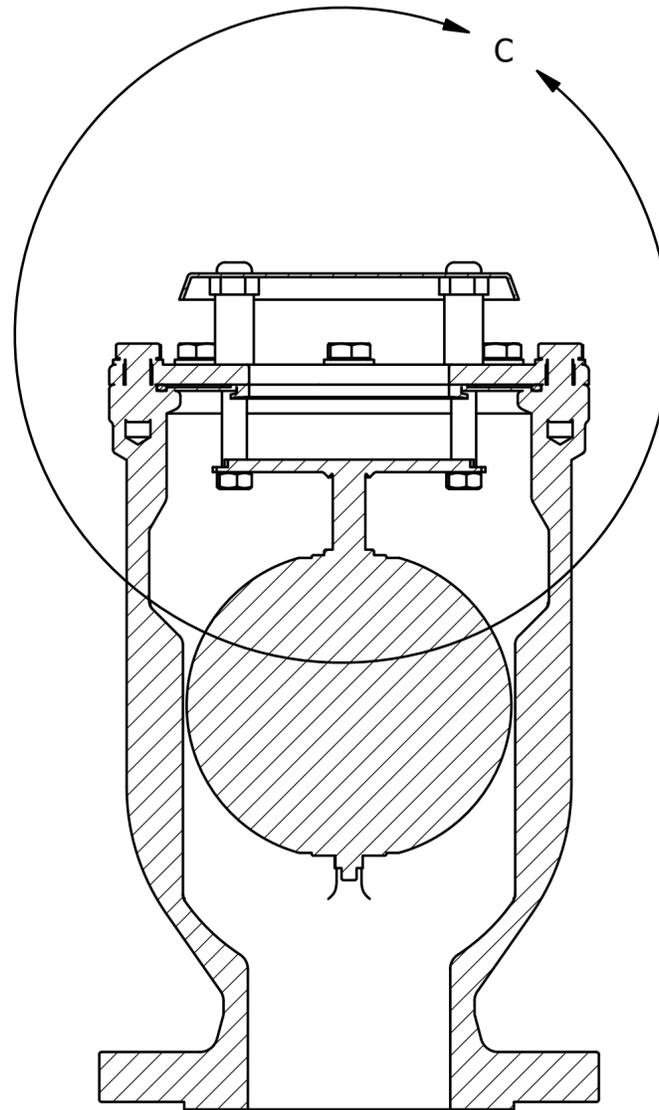
Nº Plano:

Modelo original ventosa IRUA

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto



SECTION A-A
SCALE 1 : 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIEROS
INDUSTRIALES
VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y
EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON
DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DE AIRE
MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha:
Septiembre 2016

Escala:

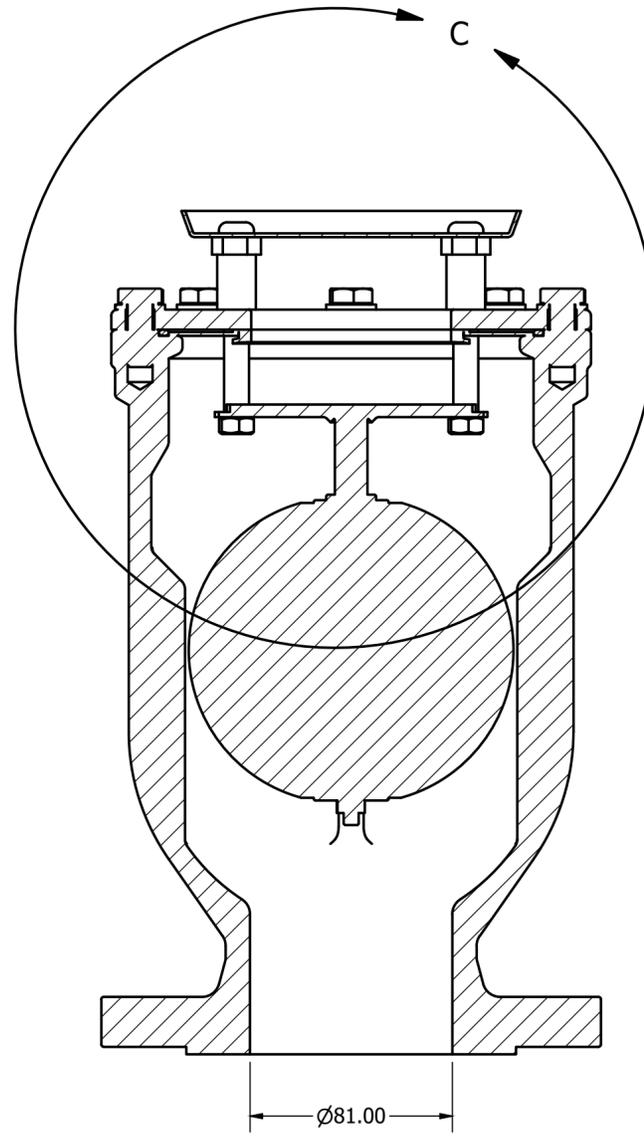
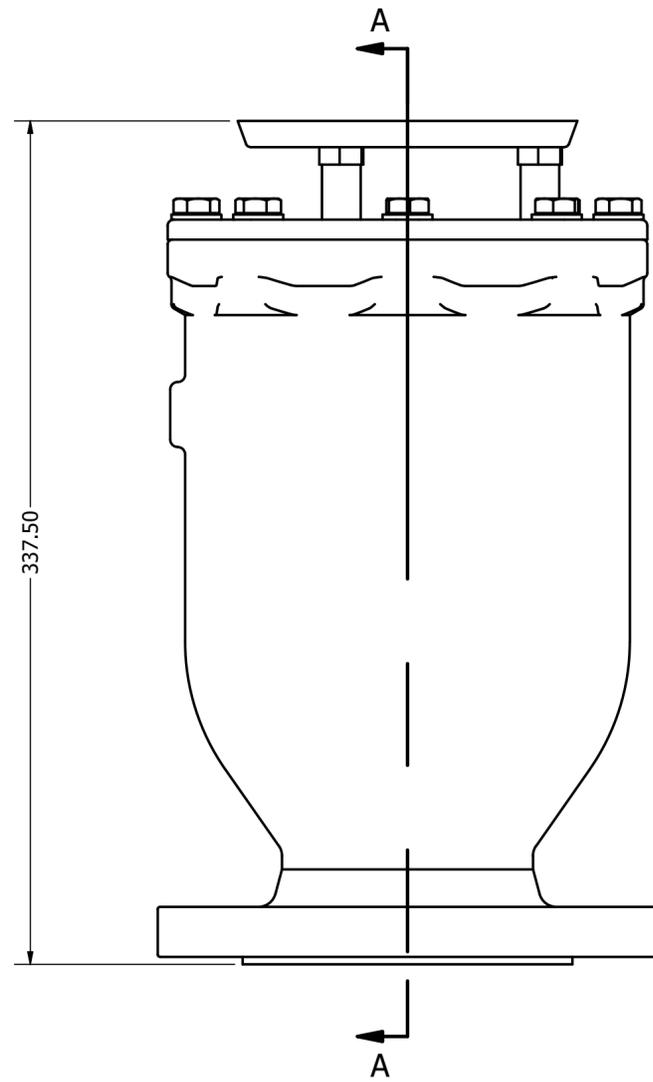
1/2

Plano:

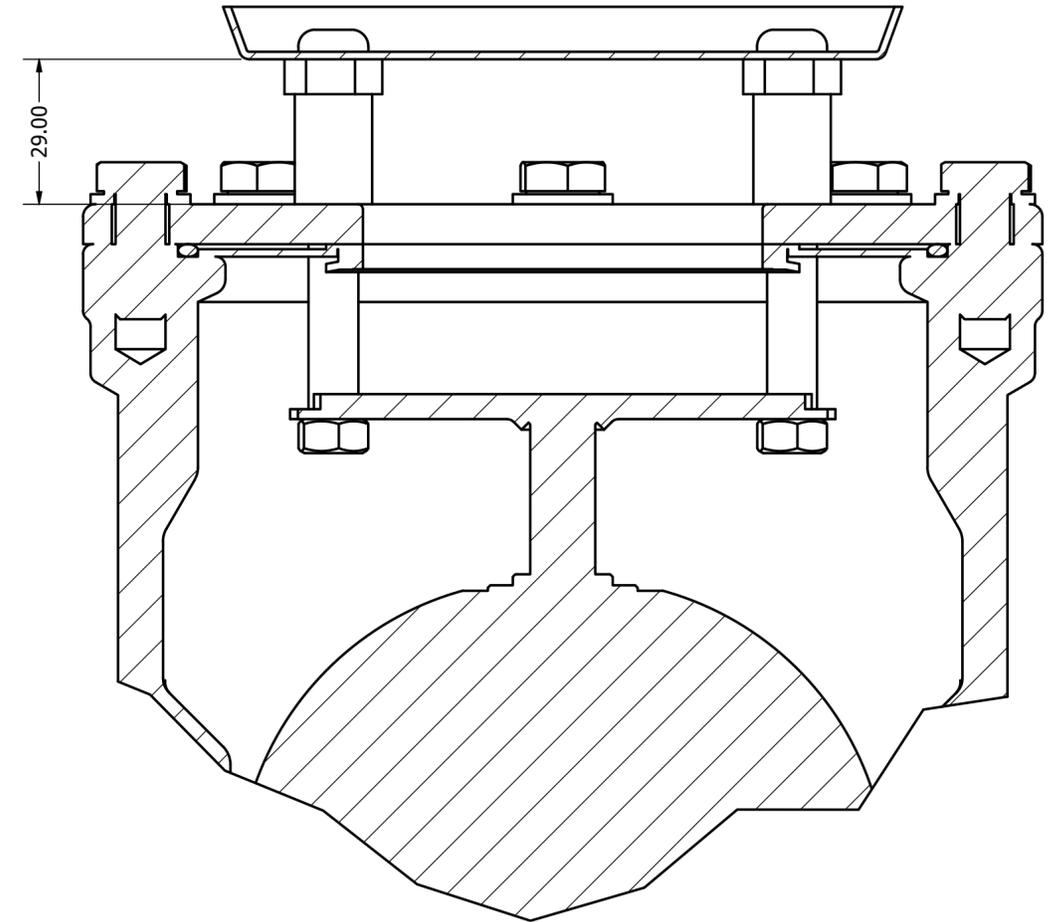
Nº Plano:

Modelo con carcasa 6 mm más alta

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto



SECTION A-A
SCALE 1 : 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIEROS
INDUSTRIALES
VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y
EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON
DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DEL AIRE
MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha:
Septiembre 2016

Escala:

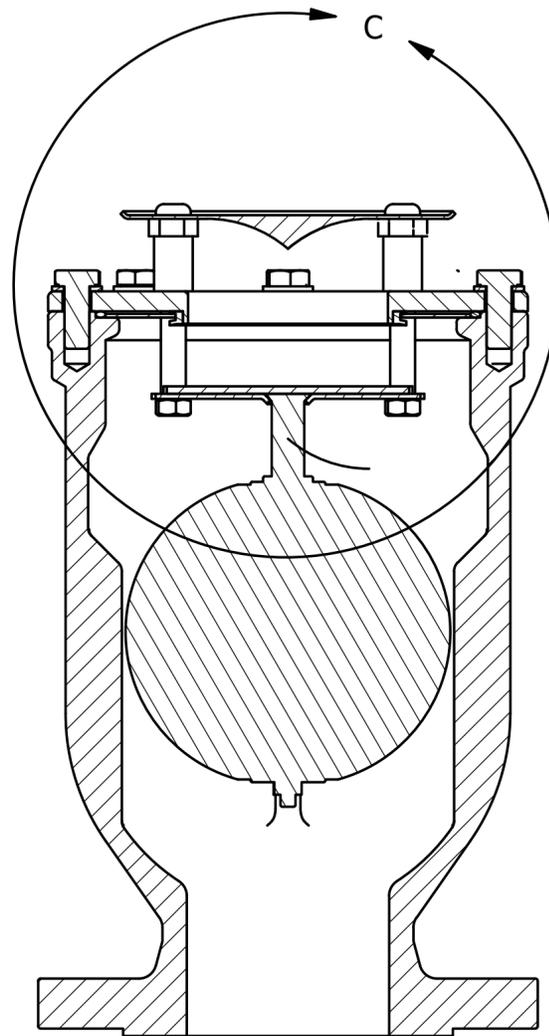
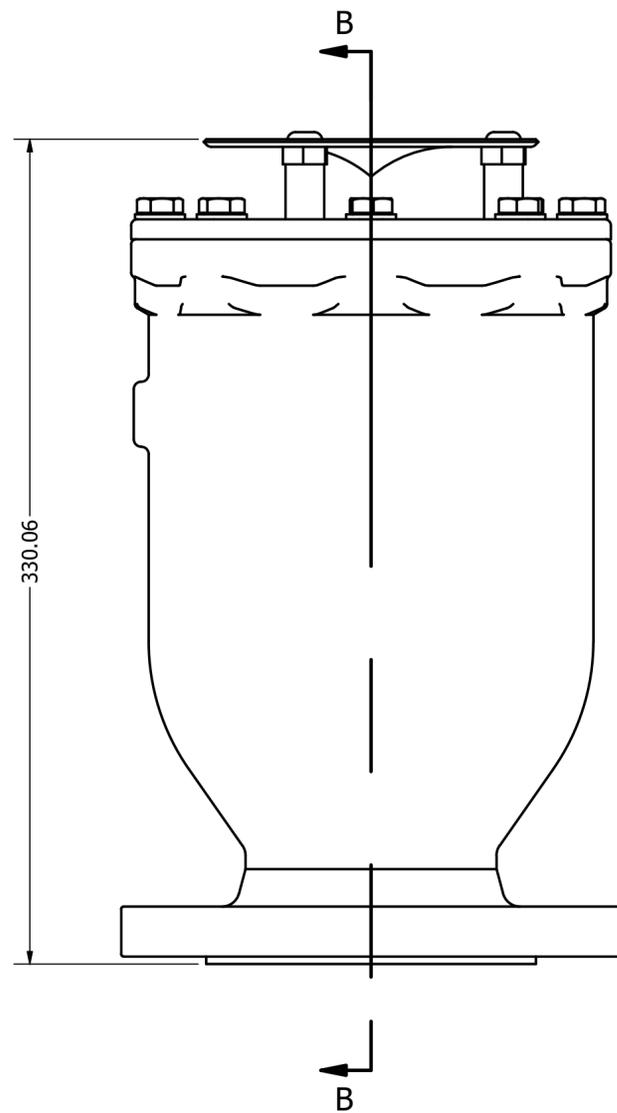
1/2

Plano:

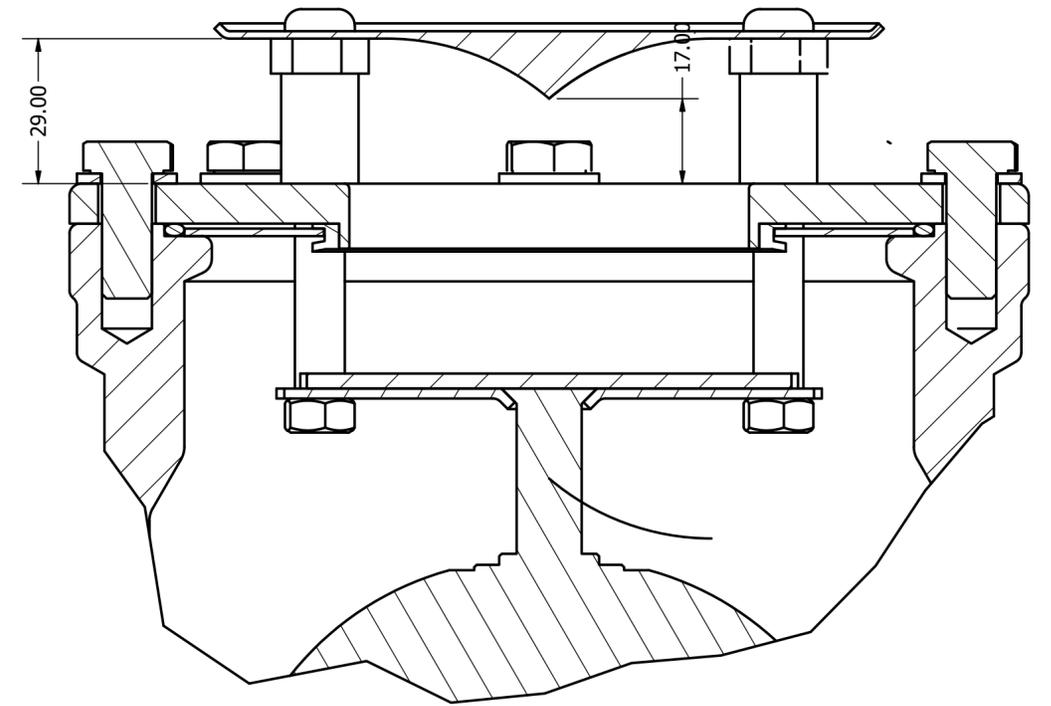
Nº Plano:

Modelo con carcasa invertida.

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto



SECTION B-B
SCALE 1 : 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIEROS
INDUSTRIALES
VALENCIA

Proyecto: ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y
EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON
DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DEL AIRE
MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha: Septiembre 2016

Escala:

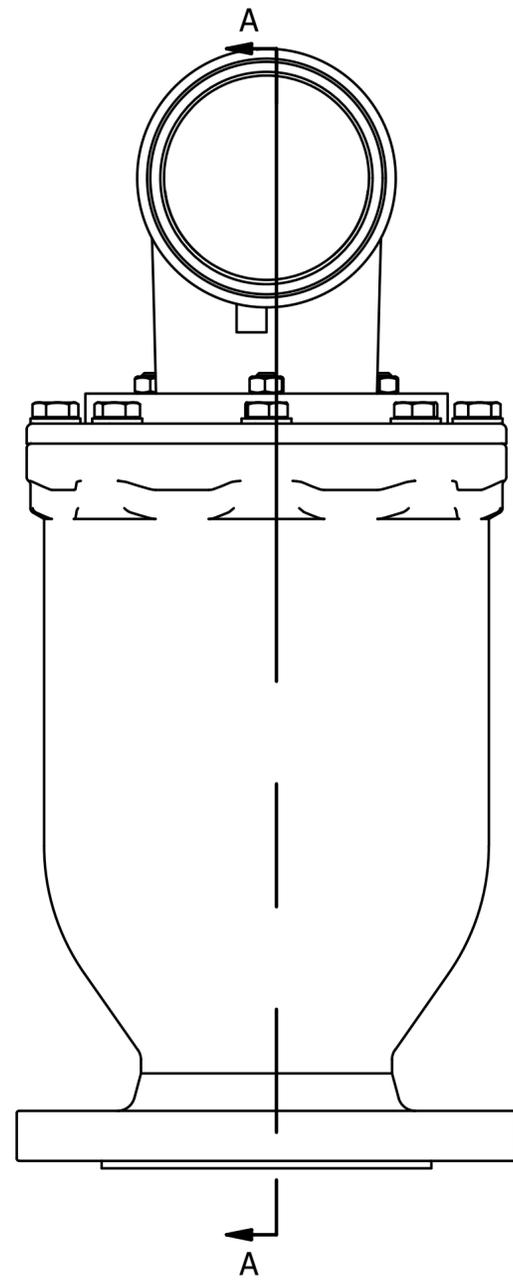
1/2

Plano:

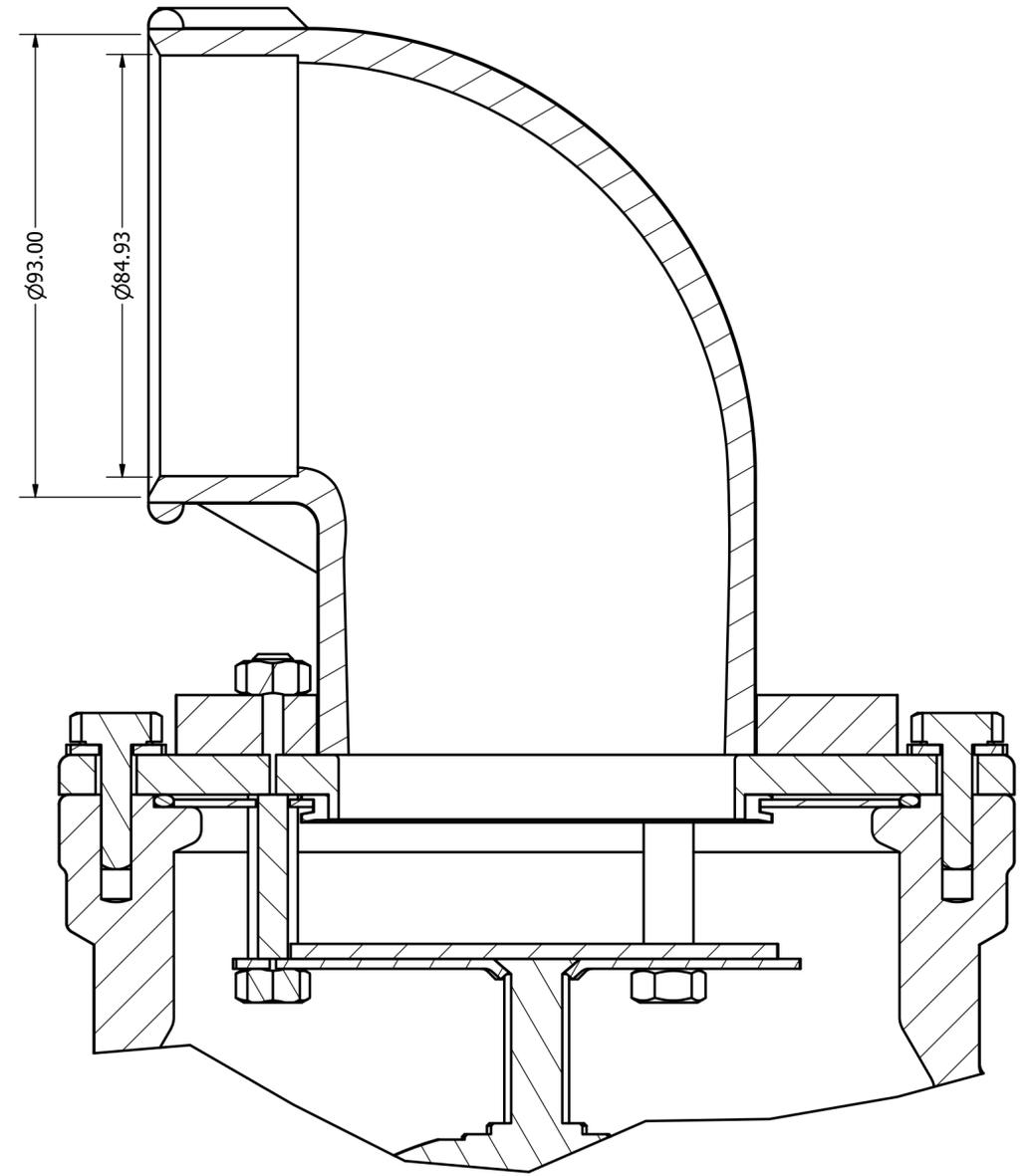
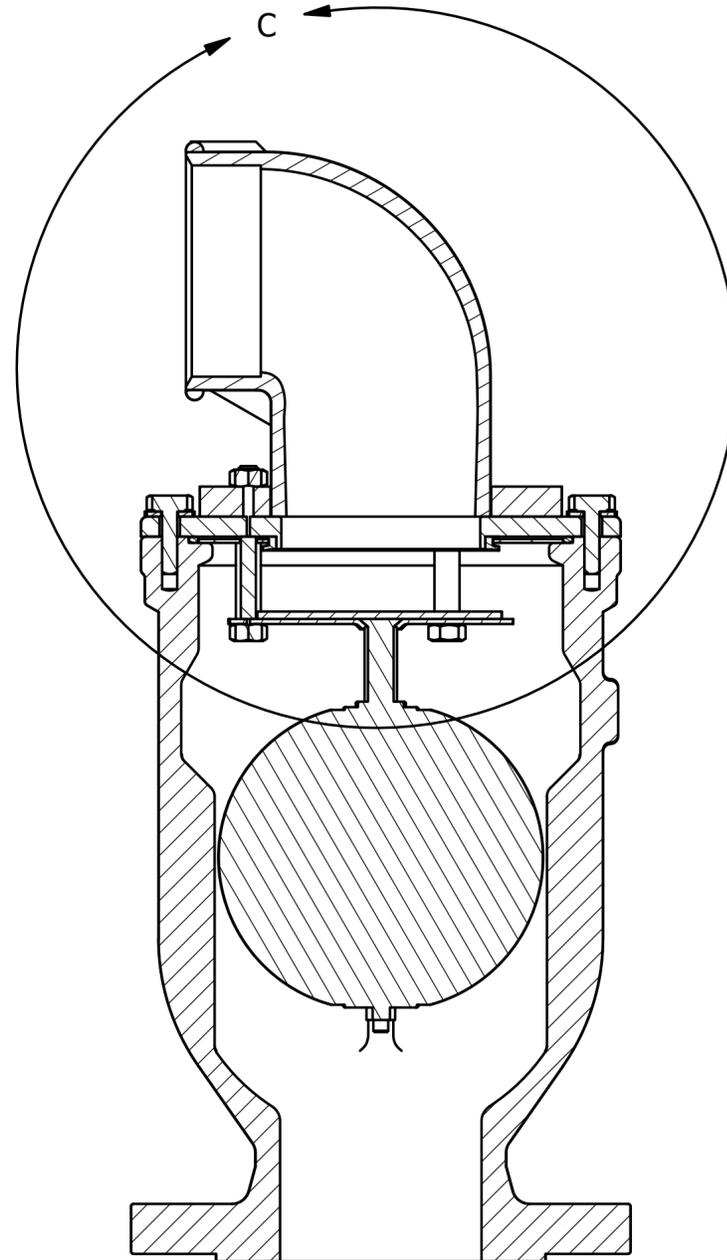
Nº Plano:

Modelo con otro diseño de carcasa

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto



SECTION A-A
SCALE 1 / 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIEROS
INDUSTRIALES
VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y
EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON
DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DEL AIRE
MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha:
Septiembre 2016

Escala:

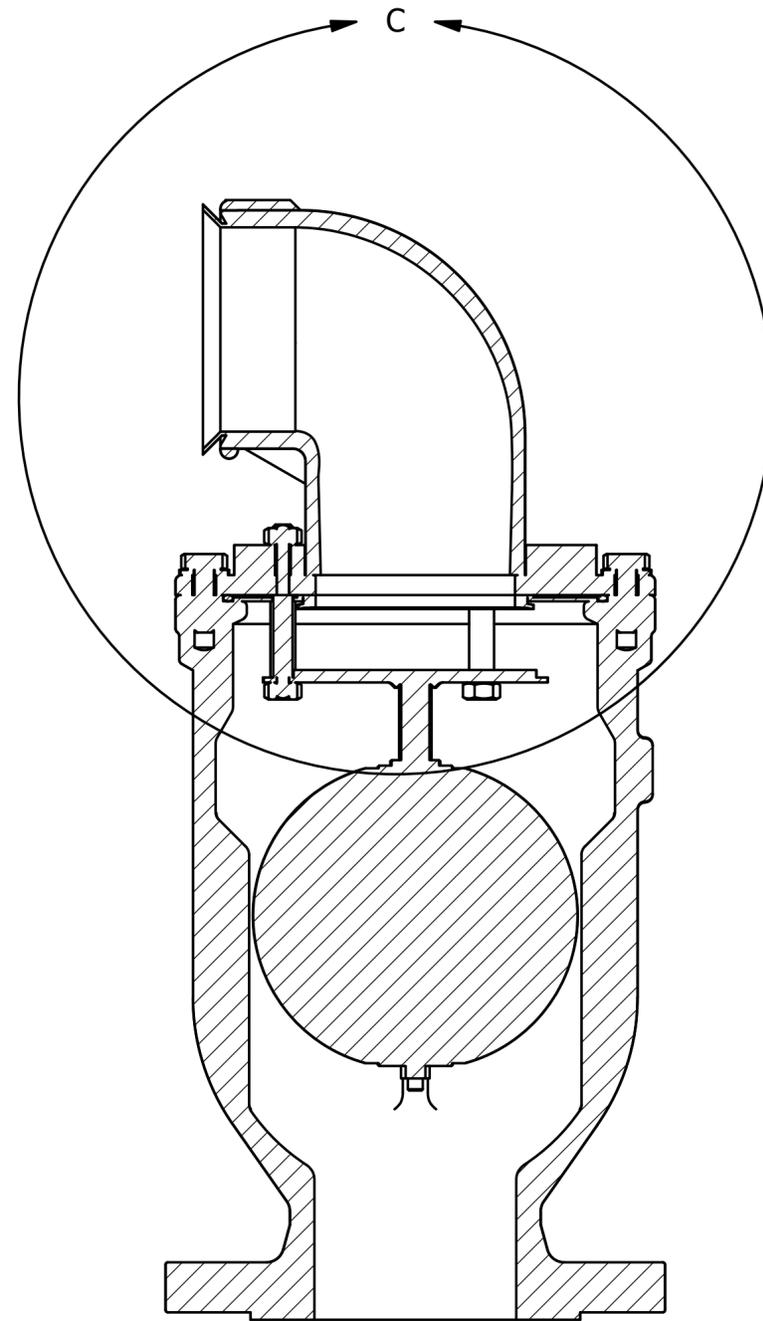
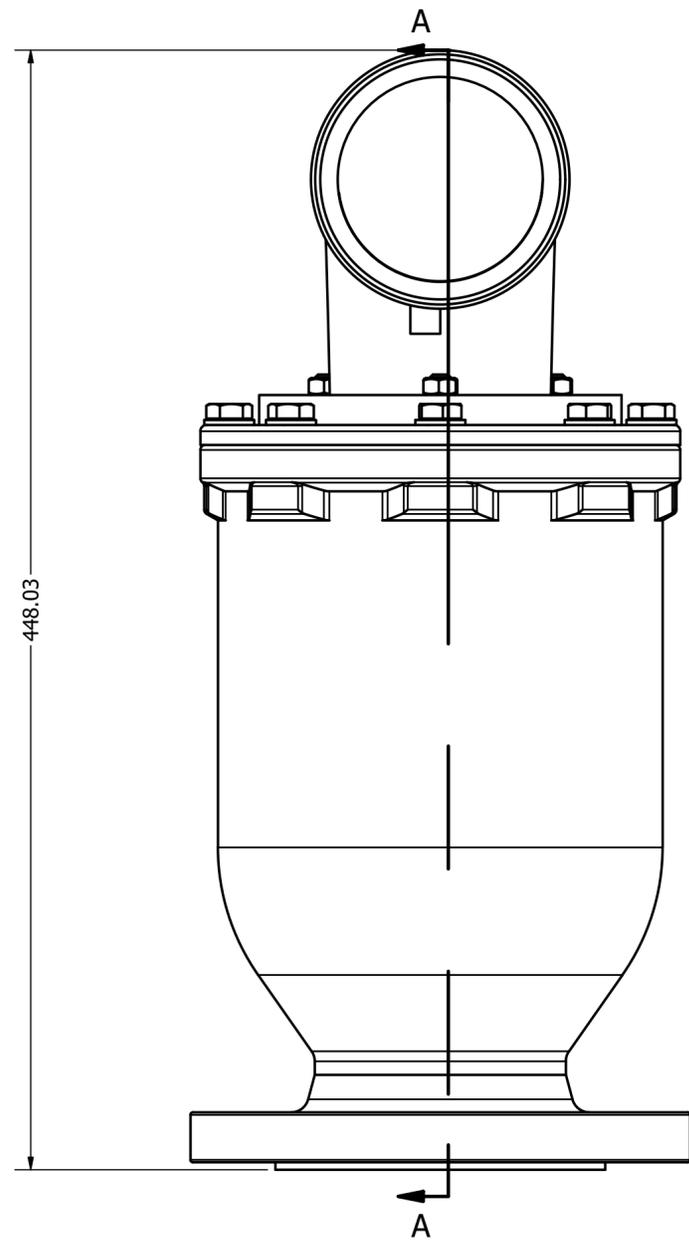
1/2

Plano:

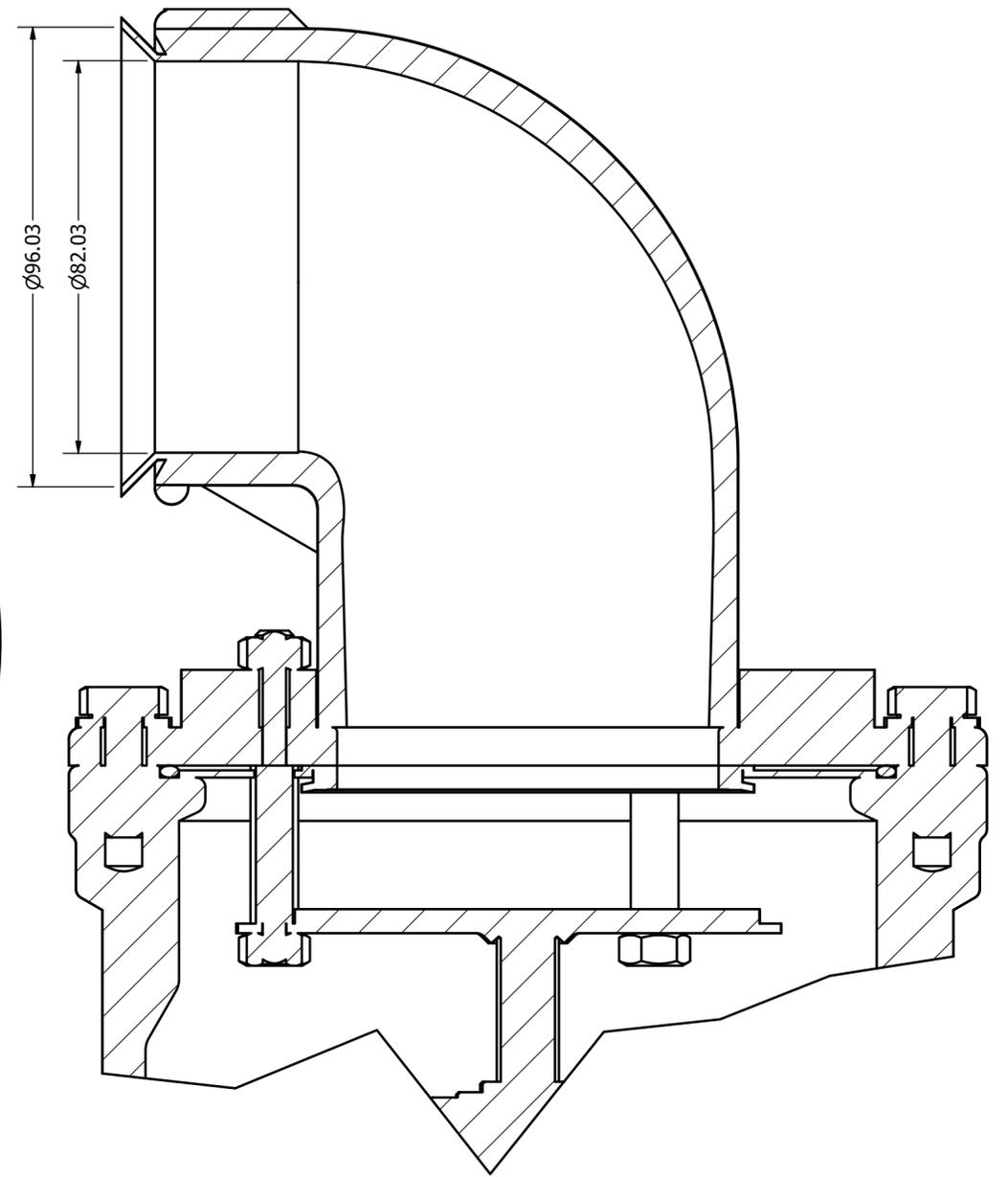
Nº Plano:

Modelo con codo a 90°

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto



SECTION A-A
SCALE 1 / 2



DETAIL C
SCALE 1 : 1

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Daniel Sánchez Artero
Autor proyecto

Proyecto: ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA CON DIFERENTES MECANISMOS DE SALIDA DE AIRE MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Fecha: Septiembre 2016

Escala: 1/2

Nº Plano: 6

Modelo con codo y chaflán.