



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

SIMULACIÓN CFD DE UNA VÁLVULA DOSIFICADORA



Memoria

Autor/a: Martin Ortega, Daniel
Director/a: Torres Cámara, Ricardo
Convocatoria: junio 2020

Resumen

Gracias al avance de la tecnología en las últimas décadas se ha conseguido crear programas para el análisis de situaciones reales sin tener que llevar a cabo experimentos manuales, permitiendo así el ahorro de recursos materiales y de tiempo. El avance de la tecnología ha permitido la mejora de los sistemas de cálculo numérico para poder llevar a cabo ensayos en pocos minutos y con una exactitud impensable años atrás.

El presente proyecto tiene como objetivo analizar una válvula para bombas dosificadoras, perteneciente a la empresa ITC Dosing Pumps, para un rango de fluidos y de caudales preseleccionados a conciencia para estudiar la válvula en unas condiciones semejantes a las reales. Para llevar a cabo el estudio, se utilizará el programa COMSOL Multiphysics el cual nos permite modelizar la geometría, llevar a cabo el cálculo y post-procesar los resultados que se obtienen a partir de la aplicación de los métodos de elementos finitos en la mecánica de fluidos.

Tras llevar a cabo las simulaciones, se creará una aplicación mediante un módulo específico de COMSOL Multiphysics la cual permitirá variar algunas propiedades de los fluidos y de las condiciones de entrada para que el usuario pueda llevar a cabo sus propias simulaciones. Además, nos ofrecerá la posibilidad de visualizar los resultados de los estudios que haga el usuario y de las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo.

Resum

Gràcies al avanç de la tecnologia en les últimes dècades s'ha aconseguit crear programes per l'anàlisi de situacions reals sense tenir que realitzar experiments manuals, permetent l'estalvi de recursos material i de temps. L'avanç de la tecnologia a permès la millora dels sistemes de càlcul numèric per poder fer assajos en pocs minuts i amb una exactitud impensable anys enrere.

El present projecte té l'objectiu d'analitzar una vàlvula per bombes dosificadores, pertanyent a la empresa ITC Dosing Pumps, per un rang de fluid i de caudal preseleccionats a consciència per estudiar la vàlvula en unes condicions similars a les reals. Per dur a terme l'estudi, s'utilitzarà el programa COMSOL Multiphysics el qual ens permet modelitzar la geometria, realitzar els càlculs y post-processar els resultats que s'obtinguin a partir de la aplicació del mètodes d'elements finits en la mecànica de fluids.

Després de realitzar les simulacions, es crearà una aplicació mitjançant un mòdul específic de COMSOL Multiphysics la qual permetrà variar algunes propietats dels fluids i de les condicions de entrada per a que l'usuari pugui dur a terme les seves pròpies simulacions. A més, ens oferirà la possibilitat de visualitzar els resultats dels estudis que faci l'usuari i de les simulacions realitzades en aquest treball.

Abstract

Thanks to the development of the technology in the last decade it has been possible to create software for the analysis of real situation without having to conduct manual experiments, allowing us to save material resources and time. Those new technological developments have led to significant improvements in numerical calculation systems to be able to carry out test in a few minutes and with an unthinkable accuracy years ago.

The aim of this project is to analyze a valve for dosing pumps, which belongs to the company ITC Dosing Pumps, for a range of fluids and flow rate conscientiously preselected to study the valve in similar conditions as the real ones. In order to realize this project, we will use Comsol Multiphysics which allows us to model the geometry, perform the calculation and post-process the results obtained from the application of the finite element methods in fluid dynamics.

After finishing all the simulations, we will create an app using a specific Comsol Multiphysics module which will allow to change some fluids properties and inputs conditions with the intention of providing an easy way to the users to do their own simulations. In addition, it will offer us the possibility to visualize the results of the studies made by the user and the simulation carried out in this work.



Agradecimientos

A mi familia, por todo el apoyo moral que me ha dado a lo largo del grado y de la realización de este proyecto. Sin ellos, no hubiera tenido ni la posibilidad ni la intención de estudiar para alcanzar mis sueños.

A un viejo amigo, que a lo largo de los años me ha ayudado a entender su manera de ver las cosas y me ha permitido mejorar mucho más de lo que hubiera conseguido por mi cuenta.

A Ricardo Torres, por descubrirme el fascinante mundo de las simulaciones computacionales y por ayudarme a desarrollar el proyecto.

A todos ellos, gracias.



Glosario

CFD – Computational fluid dynamics.

MEF – Método de los elementos finitos.

Válvula – Mecanismo que regula el flujo de la comunicación entre dos partes de un sistema.

Fluido – Sustancia incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos sin desplazarse.

Viscosidad – Propiedad de los fluidos que caracteriza la resistencia al fluir.

Densidad – Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.

Caudal – Volumen de fluido que pasa por unidad de tiempo a través de una superficie.

Malla – Unión de nodos a partir de la formación de elementos que cubre toda la geometría.

Elemento – Figura resultante de la unión de 2 nodos en 2D o de 3 nodos en 3D.

Nodo – Puntos de unión de los MEF correspondientes a las zonas donde se evalúa el sistema.

Ítem – Cada uno de los elementos que forman parte de un conjunto de datos.



Índice tablas

Tabla 1 - Parámetros establecidos en Comsol (Fuente propia)	25
Tabla 2 - Viscosidades de los fluidos utilizados (Fuente propia)	26
Tabla 3 - Densidades de los fluidos utilizados (Fuente propia)	27
Tabla 4 - Propiedades del agua (Comsol Multiphysics)	28
Tabla 5 - Características de los tamaños de malla (Fuente propia)	31
Tabla 6 - Resultado caudal volumétrico cuando $Y_POS_BOLA= 0.0016$ (fuente propia)	34
Tabla 7 - Diferencias del mallado utilizando la herramienta de caras compuestas (Fuente propia)	36
Tabla 8 - Número de nodos y tiempos de simulación (Fuente propia)	36
Tabla 9 - Impacto ambiental del estudio	65



Índice gráficos

Gráfico 1 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura máxima (Fuente propia)	35
Gráfico 2 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 25% (Fuente propia)	37
Gráfico 3 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 50% (Fuente propia)	37
Gráfico 4 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 75% (Fuente propia)	38
Gráfico 5 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 100% (Fuente propia)	38
Gráfico 6 - Evolución presión de entrada en función del caudal para agua (Fuente propia)	43
Gráfico 7 - Evolución presión de entrada en función del caudal para agua salada (Fuente propia)	44
Gráfico 8 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 94%	44
Gráfico 9 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 98%	45
Gráfico 10 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 100%	45
Gráfico 11 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para agua (Fuente propia)	47
Gráfico 12 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para agua salada (Fuente propia)	47
Gráfico 13 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 94% (Fuente propia)	48
Gráfico 14 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 98% (Fuente propia)	48
Gráfico 15 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 100% (Fuente propia)	49
Gráfico 16 - Coeficiente de pérdidas para agua (Fuente propia)	50

Gráfico 17 - Coeficiente de pérdidas para agua salada (Fuente propia)	50
Gráfico 18 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 94% (Fuente propia)	51
Gráfico 19 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 98% (Fuente propia)	51
Gráfico 20 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 100% (Fuente propia)	52
Gráfico 21 - Coeficiente de capacidad de la válvula para agua (Fuente propia)	53
Gráfico 22 - Coeficiente de capacidad de la válvula para agua salada (Fuente propia)	54
Gráfico 23 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 94% (Fuente propia)	54
Gráfico 24 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 98% (Fuente propia)	55
Gráfico 25 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 100% (Fuente propia)	55

Índice ecuaciones

Ecuación 1 – Expresiones de Navier-Stokes	8
Ecuación 2 - Combinación de las ecuaciones de Navier-Stokes	8
Ecuación 3 - Coeficiente de pérdidas	10
Ecuación 4 - Coeficiente de capacidad	11
Ecuación 5 - Fórmula de densidad relativa	11



Índice ilustraciones

Imagen 1 - Alcance de las ecuaciones de Navier-Stokes _____	9
Imagen 2 - Explosionado del ensamblaje (Fuente propia) _____	19
Imagen 3 – Sección de salida del fluido y perfil del machón (Fuente propia) _____	19
Imagen 4 - Junta tórica 18x10 y su asentamiento en anillo de retención (Fuente propia) _____	20
Imagen 5 - Junta tórica 18x10 y su asentamiento (Fuente propia) _____	20
Imagen 6 - Anillo de retención (Fuente propia) _____	21
Imagen 7 – Salida y entrada anillo guía (Fuente propia) _____	21
Imagen 8 – Salida y entrada anillo tope (Fuente propia) _____	22
Imagen 9 - Bola (Fuente propia) _____	22
Imagen 10 - Sub-ensamblaje de anillos (Fuente propia) _____	23
Imagen 11 - Posición bola completamente cerrada y abierta (Fuente propia) _____	26
Imagen 12 - Dominio del fluido (Fuente propia) _____	29
Imagen 13 - Configuración de las propiedades del fluido (Fuente propia) _____	29
Imagen 14 - Perfil de velocidades sin deslizamiento (Fuente: Mecánica de fluidos, Frank M. White, 5ª Edición) _____	30
Imagen 15 - Configuración entrada fluido y sección de entrada del fluido (Fuente propia) _____	30
Imagen 16 - Configuración salida fluido y sección de salida del fluido (Fuente propia) _____	31
Imagen 17 - Mallado extremadamente grueso (Fuente propia) _____	32

Imagen 18 - Mallado extremadamente fino (Fuente propia)	32
Imagen 19 - Configuración barrido paramétrico para el estudio de convergencia (Fuente propia)	34
Imagen 20 - Malla sin y con caras compuestas (Fuente propia)	35
Imagen 21 - Configuración barrido paramétrico (Fuente propia)	41
Imagen 22 - Pantalla principal de simulación (Fuente propia)	60
Imagen 23 - Pantalla secundaria (Fuente propia)	62
Imagen 24 - Contenido barra menús sección principal (Fuente propia)	62
Imagen 25 - Contenido en barra de menús de la biblioteca (Fuente propia)	63

Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
ÍNDICE TABLAS	IX
ÍNDICE GRÁFICOS	XI
ÍNDICE ECUACIONES	XIII
ÍNDICE ILUSTRACIONES	XV
1. PREFACIO	1
1.1 Origen del trabajo	1
1.2 Motivación	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1 Objetivos del trabajo	3
2.2 Alcance del trabajo	3
3. MECÁNICA DE FLUIDOS	5
3.1 Tipos de flujos	6
3.2 Hipótesis del medio continuo	7
3.3 Ecuaciones de Navier-Stokes	8
3.4 Coeficiente de pérdida de carga	10
3.5 Coeficiente de capacidad de la válvula	11
3.6 Métodos de resolución	11
4. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	15
5. COMSOL MULTIPHYSICS	17
5.1 Módulos del programa	17
5.2 Requisitos del programa	18
6. GEOMETRÍA	19



7.	CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO	25
7.1	Parámetros	25
7.1.1	Y_POS_BOLA.....	25
7.1.2	Viscosidad (μ)	26
7.1.3	Densidad	27
7.1.4	Caudal	27
7.2	Librería de materiales.....	27
7.3	Física Fluid Flow	28
7.3.1	Propiedades de los fluidos	29
7.3.2	Pared	29
7.3.3	Entrada del fluido (Inlet).....	30
7.3.4	Salida del fluido (Outlet).....	30
7.4	Módulo de mallado	31
8.	ESTUDIO DE CONVERGENCIA	33
8.1	Ejemplo de cálculo	34
8.2	Resultados del estudio de convergencia	36
9.	RESULTADOS	41
9.1	Configuración del cálculo	41
9.2	Resultados	41
9.2.1	Presión en función del caudal	43
9.2.2	Presión en función de la apertura de la válvula.....	46
9.2.3	Coeficiente de pérdidas.....	49
9.2.4	Coeficiente de capacidad de la válvula	53
9.2.5	Distribución de velocidades, presiones y líneas de flujo	56
10.	APP PARA EL ESTUDIO	59
10.1	Pantalla principal	60
10.2	Pantalla secundaria	61
10.3	Barra de menús	62
11.	ESTUDIO IMPACTO AMBIENTAL	65
	CONCLUSIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	69

1. Prefacio

1.1 Origen del trabajo

La idea para realizar este proyecto surgió tras la realización de la asignatura de simulación computacional en la mecánica de fluidos y en la transferencia de calor, la cual me demostró la cantidad de aplicaciones que tiene el software que se usará.

En el presente proyecto se busca parametrizar una válvula para bombas dosificadoras, adquirida de la empresa ITC Dosing Pumps, mediante los MEF con la finalidad de analizar sus características en diferentes situaciones. Además, se pretende diseñar y desarrollar el modelo a partir de la creación de una aplicación.

1.2 Motivación

Tras tener una pequeña introducción acerca de las posibilidades que nos brinda Comsol, apareció una gran inquietud para aumentar mis conocimientos y mi manejo del programa ya que hoy en día el uso de este tipo de softwares en la industria es muy frecuente. Además, la idea de realizar un proyecto ligado a la mecánica de fluidos, a parte de suponerme todo un reto personal, me da la oportunidad de poner a prueba los conocimientos adquiridos a lo largo del grado.

Por otro lado, la propuesta de realizar una aplicación para el estudio me pareció una oportunidad para tener un primer contacto con algo que siempre me ha creado cierta incertidumbre, que es la creación y el diseño de apps.



2. Introducción

2.1 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este proyecto es hacer un estudio de las características de la válvula “62_806_Válvula_3_4_aspiración_inj” para cinco fluidos y un rango de caudales de entrada, previamente seleccionados por la empresa ITC Dosing Pumps, con el fin de llevar a cabo un estudio de interés para la empresa.

Asimismo, tras cumplir el objetivo principal se realizará una aplicación para simplificar el uso del modelo estudiado y que cualquier persona, con un mínimo de conocimientos acerca de la mecánica de fluidos y de los MEF, pueda llevar a cabo sus propias simulaciones. De igual modo, en el caso de ser un usuario experto que no dispone del software ni de los recursos para costeárselo, la aplicación le brinda igualmente la posibilidad de llevar a cabo sus estudios.

2.2 Alcance del trabajo

El alcance de este proyecto se basa en hacer un estudio y en crear una app a partir de simulaciones CFD de una válvula dosificadora, mediante el programa Comsol, con la intención de analizar sus características fluidodinámicas.



3. Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos se ocupa del estudio de los fluidos ya sea cuando están en movimiento o estáticos. Tanto los líquidos como los gases son considerados fluidos, lo que significa que la mecánica de fluidos puede ser implementada en una gran variedad de aplicaciones. Bien pensado, casi todo lo que existe en este planeta o es un fluido o se mueve bajo la acción de uno.

Para llevar a cabo la aplicación de la mecánica de fluidos es necesario disponer de ciertas ecuaciones que, en su forma diferencial o integral, nos permitan modelizar los flujos que deseamos estudiar. Además, hay que tener en cuenta que como ciencia la mecánica de fluidos está basada en un compromiso adecuado entre teoría y experimentación. Es decir, gracias a que es una rama de la mecánica se dispone de un conjunto de leyes de conservación bien documentadas que nos permiten llevar a cabo un tratamiento teórico riguroso. No obstante, la teoría es a veces frustrante ya que da lugar a situaciones idealizadas que no pueden ser válidas en casos prácticos.

En particular, en la mecánica de fluidos se cumplen las leyes de conservación de la cantidad de movimiento, de la masa (o ecuación de la continuidad) y de la energía. En nuestro caso, solo necesitamos las ecuaciones anteriores en su forma diferencial, las cuales vienen incorporadas en una sola ecuación que se verá a continuación. Cabe destacar que, gracias a las ecuaciones anteriores, el movimiento de un fluido queda completamente descrito ya que son capaces de determinar el comportamiento del sistema sin información dinámica adicional. Por otro lado, la única información necesaria está relacionada con la naturaleza del fluido, por ejemplo, si es un gas ideal, si es un flujo incompresible, etc. A modo de conclusión, un fluido se considera completamente conocido si, en cualquier instante y en cada punto del dominio, se conoce el campo de velocidades y un número mínimo de propiedades estáticas que dependan del tipo de fluido. Por ejemplo, una propiedad para fluidos incompresibles sería la presión.

Por último, en este apartado encontramos las diferentes ecuaciones mencionadas anteriormente, juntamente con los coeficientes de pérdida de carga y de capacidad de la válvula. A más a más, encontramos los diferentes tipos de flujos que nos podemos encontrar y los distintos métodos que se emplean para obtener las soluciones.

3.1 Tipos de flujos

Dentro del compartimiento que tienen ciertos flujos, podemos clasificarlos en 4 grupos:

- Flujo estacionario/no estacionario: Se dice que tenemos un flujo estacionario cuando la velocidad y la densidad de un fluido en un punto no depende del tiempo y no estacionario en el caso contrario. No obstante, esto no quiere decir que la velocidad y la densidad deban ser las mismas en puntos distintos, pero sí que en un mismo punto no deben variar con el tiempo. Hay que destacar que, en nuestro estudio todos los flujos se han considerado estacionarios.
- Flujo compresible/incompresible: Cuando un flujo varía su densidad decimos que es un flujo compresible, como pasa en la mayoría de los gases. En caso contrario, cuando la densidad es constante, tenemos un flujo incompresible. Vale la pena destacar que, es posible tener un flujo incompresible, aunque el fluido en si sea compresible, siempre que en la región considerada la densidad del fluido sea prácticamente la misma en todos los puntos. En nuestras simulaciones se han considerado todos los líquidos como incompresibles.

A continuación, podemos encontrar otras dos clasificaciones de flujo las cuales no se haya tenido en cuenta en nuestro trabajo:

- Flujo viscoso/no viscoso: Se considera un flujo viscoso cuando aparecen importantes fuerzas de rozamiento que no se pueden despreciar ya que nos crean una serie de fuerzas tangenciales entre las capas del fluido en movimiento. En caso contrario, cuando si que podemos despreciar los efectos de la viscosidad, decimos que tenemos un flujo no viscoso.
- Flujo irrotacional/rotacional: En los casos en los que el elemento del fluido en un punto dado no tenga una velocidad angular neta alrededor de dicho punto se considera un flujo irrotacional, en caso contrario decimos que es rotacional. Por ejemplo, en el caso de tener un fluido que circula a través de una tubería recta tendríamos un flujo irrotacional, mientras que un remolino de río sería lo contrario.

3.2 Hipótesis del medio continuo

La hipótesis del medio continuo consiste en suponer que los fluidos son medios en los que magnitudes tales como la masa, cantidad de movimiento o energía, están distribuidas en el espacio de forma continua. Es decir, esta hipótesis considera que las propiedades del flujo, como serían densidad o temperatura, son funciones continuas.

Por otro lado, tras introducir la hipótesis del medio continuo nos aparece el concepto de partícula fluida el cual es muy importante en la mecánica de fluidos. Se denomina partícula fluida a la masa elemental de fluido que en un instante determinado se encuentra en un punto del espacio. Dicha masa elemental ha de ser lo suficientemente grande como para contener un gran número de moléculas, y lo suficientemente pequeña como para poder considerar que en su interior no hay variaciones de las propiedades macroscópicas del fluido, de tal modo que en cada partícula podamos asignar un valor a estas propiedades. Cabe destacar que es importante tener en cuenta que la partícula fluida se mueve con la velocidad macroscópica del fluido, de tal manera que dicha partícula esta formada siempre por las mismas moléculas. Lo que significa que un determinado punto del espacio estará ocupado por diferentes moléculas en distintos instantes de tiempo.

Por tanto, se entiende como medio continuo un conjunto infinito de partículas que va a ser estudiado macroscópicamente, es decir, sin considerar las posibles discontinuidades existentes a nivel microscópico. En consecuencia, se admite que no hay discontinuidades entre las partículas y que la descripción matemática de este medio y de sus propiedades se puede realizar mediante funciones continuas. (*Oliver y Saracíbar, 2000*)

3.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

Cuando estamos trabajando en tres dimensiones las ecuaciones de Navier-Stokes son un total de cinco ecuaciones distintas las cuales incorporan, en su forma diferencial, las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, energía y masa. Estas ecuaciones son derivadas parciales que dependen del tiempo y están completamente acopladas a través del vector velocidad, que son tres incógnitas diferentes, y dos cantidades termodinámicas como, por ejemplo, la presión y la densidad. Dicho acoplamiento se produce a través de los campos de velocidad, de la densidad y de los campos de temperatura cuando los efectos térmicos son significativos. A continuación, podemos ver las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})I \right) + F$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)T \right) = -(\nabla \cdot \vec{q}) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)p \right) + Q$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$S = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T)$$

$$\tau = 2\mu S - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I$$

Ecuación 1 – Expresiones de Navier-Stokes

Como ya se ha comentado, las ecuaciones diferenciales parciales anteriores son una herramienta idónea para describir el transporte de masa, momento y energía. Cabe destacar que, en los análisis de flujos de fluidos, sean líquidos o gases, la ecuación de movimiento, continuidad y energía se pueden combinar en una sola ecuación de conservación.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} = B$$

Ecuación 2 - Combinación de las ecuaciones de Navier-Stokes

Donde:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v_j \\ \rho E \end{bmatrix} \rightarrow \text{Variables conservadas}$$

$$G_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{ij} \\ -\tau_{ij}v_j + q_i \end{bmatrix} \rightarrow \text{Flujos difusivos}$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \rho v_i \\ \rho v_i v_j + p\delta_{ij} \\ \rho E v_i + p v_i \end{bmatrix} \rightarrow \text{Flujos conectivos}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho F_j \\ \rho F_j v_j \end{bmatrix} \rightarrow \text{Términos fuente}$$

A continuación, vemos un esquema del alcance que tienen las ecuaciones de Navier-Stokes haciendo las simplificaciones adecuadas:

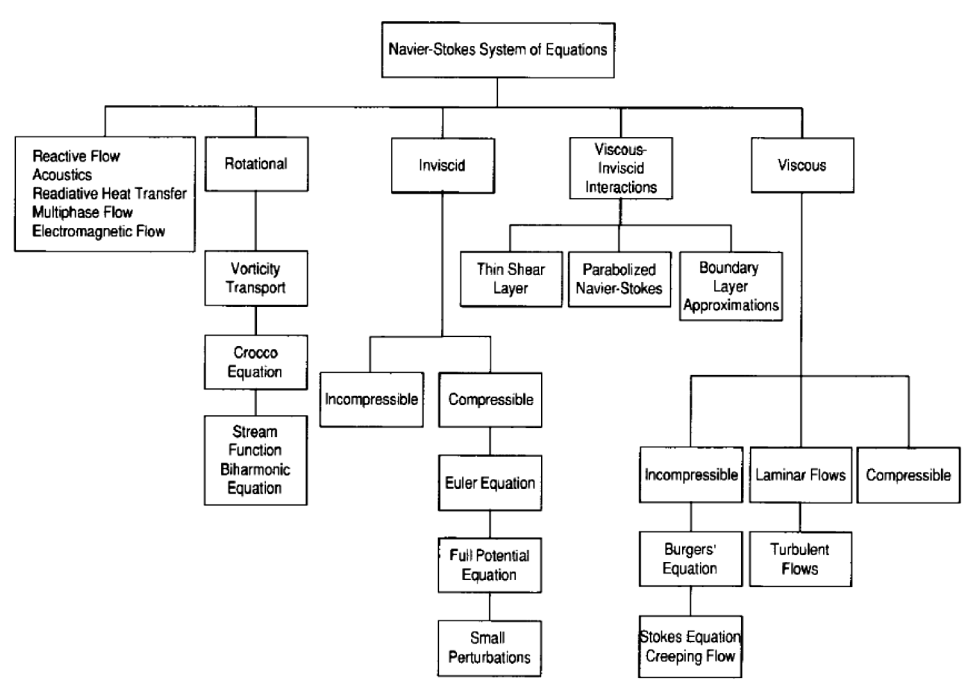


Imagen 1 - Alcance de las ecuaciones de Navier-Stokes

En referencia a las ecuaciones escritas anteriormente, cabe destacar que cada una de ellas es no lineal, hecho que trae consigo consecuencias en toda la mecánica de fluidos como, por ejemplo:

- La no linealidad dominante es debido al término convectivo $\rho(v \cdot \nabla)v$, el cual es el responsable del desarrollo de la turbulencia.

- En flujos compresibles los productos de densidad y velocidad representan otra fuente de no linealidad que explica la aparición de ondas de choque en flujos supersónicos.
- Cuando ocurren distribuciones no uniformes de temperatura aparecen no linealidades, que reciben el nombre de células de Bénard, representativas de fenómenos complejos de convección térmica.

Por tanto, las no linealidades conducen a tener soluciones no únicas lo cual comporta la existencia de múltiples configuraciones de flujo posibles para unas mismas condiciones iniciales y/o de contorno. En consecuencia, en el caso de que se quería reducir el tiempo de cálculo se deben hacer simplificaciones como la reducción de la direccionalidad o de la dimensionalidad del problema, el desacoplamiento entre las ecuaciones o la disminución de la no linealización.

3.4 Coeficiente de pérdida de carga

A medida que nuestro flujo avanza por una tubería o accesorio, como podrían ser las válvulas, tienen lugar las pérdidas de carga de forma continua, aunque no se cambie la dirección del flujo ni la sección de la tubería. Dichas pérdidas de carga traen consigo una pérdida de presión entre dos puntos de la tubería.

La pérdida de energía es, por lo general, una función compleja de la geometría del sistema, de las propiedades del fluido y de las características del flujo. Los valores experimentales de pérdidas de carga generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia “ K_c ” de la siguiente forma:

$$\Delta P = \frac{1}{2} K_c \rho v^2$$

Ecuación 3 - Coeficiente de pérdidas

Donde:

- $\Delta P \rightarrow$ Diferencia de presión entre la entrada y salida del accesorio [Pa]
- $K_c \rightarrow$ Coeficiente de pérdidas adimensional
- $v \rightarrow$ Velocidad del fluido [m/s]
- $\rho \rightarrow$ Densidad del fluido [kg/m³]

3.5 Coeficiente de capacidad de la válvula

De la misma forma que el apartado anterior, el coeficiente de capacidad nos indica la cantidad de caudal que puede pasar a través de una válvula o accesorio. Cada válvula tiene su propio coeficiente de caudal que depende de la geometría que tenga la válvula y del grado de apertura.

Es importante conocer dicho coeficiente ya que nos ayuda a seleccionar el tipo de válvula que necesitamos para una aplicación específica. Por ejemplo, en el caso de tener una válvula que pasará su mayor parte del tiempo de trabajo abierta es conveniente seleccionar una con poca pérdida de carga para ahorrar energía. Por otro lado, si se trata de una válvula de control el rango de coeficientes de capacidad en las diferentes posiciones de apertura deberían permitirnos cumplir las necesidades de regulación de la aplicación. A continuación, podemos ver la expresión para buscar el coeficiente de capacidad:

$$K_v = \dot{V} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$$

Ecuación 4 - Coeficiente de capacidad

Donde:

- $\Delta P \rightarrow$ Diferencia de presión entre la entrada y salida del accesorio [bar]
- $K_v \rightarrow$ Coeficiente de capacidad
- $\dot{V} \rightarrow$ Caudal volumétrico [m³/s]
- $\gamma \rightarrow$ Densidad relativa del fluido respecto del agua

A modo de recordatorio, la densidad relativa respecto del agua se calcula de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{\text{densidad fluido}}{\text{densidad del agua}}$$

Ecuación 5 - Fórmula de densidad relativa

3.6 Métodos de resolución

Desde el principio de los tiempos, en el mundo que nos rodea persisten fenómenos que se escapan del deseable pleno control del ser humano como, por ejemplo, la propagación de un incendio, el desarrollo

de las turbulencias aéreas y marinas o algo tan banal como hacer la previsión del tiempo. Si nos fijamos, las causas que provocan estos fenómenos tienen algo en común: están originados por fluidos.

Por este motivo, la formación académica que se obtiene acerca de la mecánica de fluidos y otras ciencias afines relacionadas con fenómenos de flujo se ha llevado a cabo mediante el uso de formulaciones analíticas diferenciales e integrales, técnicas de análisis dimensional y procesos experimentales. Sin embargo, en algunas ocasiones algunas de estas técnicas no nos permiten alcanzar un resultado debido a la dificultad que conlleva resolver las ecuaciones que se plantean. (*Apuntes Ricardo Torres, 2020*)

- **Análisis diferencial e integral:** En algunos casos las formulaciones matemáticas no permiten obtener soluciones en ingeniería. Esto sucede cuando estudiamos flujos complejos debidos a la turbulencia o cuando la geometría es tan compleja que nos obliga a dejar de lado cualquier tipo de simplificación.

Por este motivo, este tipo de análisis únicamente se utiliza cuando tenemos casos con geometrías sencillas y con fluidos con propiedades constantes. A modo de conclusión, este tipo de análisis se ve limitado en muchas ocasiones debido al alto nivel de dificultad de las ecuaciones.

- **Análisis dimensional:** Este tipo de herramienta es muy utilizada en la física en general pero donde destaca más es en la mecánica de fluidos. Consiste en identificar las variables de mayor influencia en nuestro modelo y agruparlas en grupos adimensionales. Esta metodología lo que nos permite es optimizar los recursos experimentales y evitar la generación de información redundante en nuestro estudio.

La importancia del análisis dimensional está en que nos permite establecer relaciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica para poder extrapolar los resultados que se obtienen sobre modelos a escala.

- **Experimentación:** En la mayoría de los experimentos, la validez de los resultados que se obtienen está condicionada por la forma en que se ha llevado a cabo el proceso y por la

exactitud de los instrumentos que se han utilizado. En cualquier caso, la programación, el diseño y la ejecución de un experimento requiere mucho tiempo, recursos humanos y dinero.

- Simulación computacional: Con el avance de la tecnología y de los ordenadores en particular, se han conseguido desarrollar nuevas técnicas de análisis computacional que nos permiten llevar a cabo la resolución de las ecuaciones de flujo de fluidos. Para que esto sea posible, se utilizan diferentes herramientas numéricas que nos brindan la posibilidad de discretizar el dominio de solución espacial y temporal.

Sin embargo, del mismo modo que los métodos experimentales, los métodos numéricos llevan consigo un cierto grado de incertidumbre que hay que aprender a gestionar para tener garantía de que los resultados obtenidos son correctos. A continuación, podemos ver algunos de los errores más usuales que nos llevan a la obtención de resultados erróneos:

- Errores en los datos de entrada: Pueden ser ocasionados por la falta de información acerca de algunas propiedades del flujo o del fluido.
- Errores de discretización: Este tipo de error es común para los varios métodos numéricos que existen.
- Errores en las condiciones iniciales o en las de contorno: Este hecho puede llevar a no linealidades muy complejas que generan diferentes configuraciones del flujo frente a pequeños cambios.
- Errores de modelización: Se podría considerar como uno de los errores más graves ya que nos dan a entender que el flujo que se está estudiando manifiesta alguna física subyacente mal modelizada. Por ejemplo, algunas de estas físicas podrían ser la turbulencia, los flujos multifásicos o geofísicos, etc.

No obstante, la simulación computacional tiene muchas ventajas como, por ejemplo:

- La generación de los resultados puede ser algo muy rápido, produciendo información detallada acerca de los parámetros de interés. Este hecho nos permite estudiar la influencia de otras variables sobre el modelo.
- Son capaces de simular las condiciones de contorno y las condiciones iniciales de modelos a escala real.
- Puede simular situaciones ideales para estudiar la importancia de los parámetros relevantes.
- Otorga la posibilidad de simular estados irrealizables prácticamente como las explosiones.

4. Método de los elementos finitos

Tras comentar los diferentes tipos de análisis que se disponen para la resolución de las ecuaciones en la mecánica de fluidos, debemos destacar que en el presente proyecto se ha llevado a cabo el análisis computacional para la resolución del modelo planteado a partir del método de los elementos finitos.

A lo largo de la historia grandes civilizaciones han utilizado este tipo de métodos para llevar a cabo proyectos. Por ejemplo, durante la época de la construcción de las pirámides los egipcios utilizaban métodos de discretización para calcular su volumen. También, personajes como Arquímedes utilizaban esta técnica para deducir el volumen de todo tipo de sólidos o el volumen de las áreas.

Sin embargo, el método de los elementos finitos que conocemos hoy en día se empezó a utilizar en el análisis de estructuras donde se le daba uso para calcular los esfuerzos y las tensiones que se producían. Para ello, se dividía la estructura en varias subestructuras de distintas formas y se volvían a unir todas después de analizar todas y cada una. No obstante, tras ver la gran variedad de problemas que podía abarcar en el análisis de estructuras se vio que también podía ser un método muy útil para resolver problemas del medio continuo en general, incluyendo las complejas situaciones de la mecánica de fluidos.

Por tanto, la idea general de los elementos finitos consiste en dividir el medio continuo que se quiere analizar en un conjunto de pequeños elementos interconectados entre si por una serie de puntos llamados nodos. De esta forma, se consigue pasar de un sistema con infinitos grados de libertad, que se rige por una ecuación diferencial o por un sistema de ecuaciones diferenciales, a uno con un número finito de grados de libertad cuyo comportamiento se describe por un sistema de ecuaciones lineales.

De forma general, podríamos describir en tres fases la aplicación del método de elementos finitos en el análisis de flujos:

- Fase preprocesado: Es la etapa donde se deben definir las condiciones de contorno e iniciales, definir la geometría y asignar las propiedades relevantes del fluido que se estudia.
- Fase de cálculo: El resultado del procesado y el tiempo de resolución depende significativamente del tipo de ecuaciones que se deben resolver. En un problema estacionario

que no depende del tiempo es mucho más sencillo de solucionar ya que se pueden utilizar sistemas de ecuaciones lineales. Por otro lado, cuando tenemos un problema no estacionario se nos genera una sucesión finita de sistemas de ecuaciones que deben solucionarse uno por uno y cada solución depende de la anterior.

- Fase postprocesado: Es cuando el método ya ha calculado las soluciones en cada nodo y podemos calcular diferentes magnitudes derivadas de los resultados.

A más a más, cabe destacar que una de las ventajas principales de este método es que no requiere de la creación de mallas estructuradas ya que es capaz de modelar las formas irregulares con facilidad. Además, nos permite variar el tamaño de los elementos de forma general o en secciones conflictivas para reducir el tiempo de cálculo.

A modo de conclusión, este método está basado en la definición de ciertos valores funcionales asociados a los nodos de la malla donde el valor numérico de las funciones incógnita, además de sus derivadas, deben ser determinados. El número total de incógnitas en los nodos son los conocidos grados de libertad. *(Di Capua, 2007)*

5. COMSOL Multiphysics

Para llevar a cabo las simulaciones para el estudio de la válvula se ha utilizado el programa conocido como Comsol. Dicho programa es utilizado por ingenieros y científicos de todo el mundo para la simulación de sus diseños o productos. El motivo por el cual es tan utilizado es porque es una herramienta de modelado y análisis muy potente que permite modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que se pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales.

Por otro lado, también contiene un módulo que nos permite modelar simultáneamente cualquier combinación de fenómenos. A más a más, el programa nos permite dos formas de modelar nuestro estudio: a través de las aplicaciones predefinidas que permiten caracterizar el problema o a partir de las ecuaciones que modelan el problema. Además, es un software que se puede vincular con otros programas como, por ejemplo, SolidWorks, Matlab, AutoCAD o Excel.

5.1 Módulos del programa

Este software dispone de más de 40 módulos distintos donde se contienen diferentes tipos de estudios en cada uno. Dentro de la gran variedad de módulos, algunos de los más populares que hacen referencia a las físicas aplicables y que debemos destacar son:

- Mecánica de estructuras.
- Transporte de especies químicas
- Electroquímica
- Transferencia de calor
- Matemática aplicada
- Flujo de fluido
- Electricidad

Sin embargo, aunque Comsol tenga una gran cantidad de aplicaciones interesantes en nuestro caso solo se han utilizado los siguientes módulos:

- Módulo CFD de flujo de fluido: Corresponde al módulo para el estudio de la dinámica de fluidos. Dentro de este módulo encontramos el estudio para flujos laminares.
- Módulo de importación CAD: En este caso la gran utilidad de este módulo está en permitirnos importar la geometría para llevar a cabo los estudios.
- Constructor de aplicaciones: En cuanto a este módulo nos ha servido para construir la aplicación comentada anteriormente, además viene incluido con la licencia de Comsol.

5.2 Requisitos del programa

A medida que van saliendo actualizaciones del programa, se requieren mejores ordenadores para que la utilización del software sea cómoda y eficaz, ya que cada vez se van añadiendo nuevas herramientas y físicas. En nuestro caso, se ha utilizado la versión de Comsol 5.4 el cual, según el asistente técnico de Comsol, requiere:

- Un mínimo de 4 GB de memoria RAM.
- De 2 a 10 GB de memoria destinados a la aplicación, dependiendo de la licencia que se tenga.
- Sistema operativo INTEL o AMD de 64 bits.
- Adobe Reader para poder visualizar los resultados de Comsol como PDF.

En nuestro caso, para llevar a cabo el proyecto se ha utilizado un ordenador Acer que cumple los requisitos mínimos para poder utilizar Comsol sin problemas. A continuación, podemos ver las características del ordenador que se ha utilizado:

- 12 GB de memoria RAM
- 1000 GB de memoria
- Tarjeta gráfica NVIDIA GForce 940 MX, la cual está dentro del rango de tarjetas gráficas recomendadas para la optimización del uso del software.
- Procesador Intel Core i5 de 3.1 GHz.

6. Geometría

En primer lugar, la geometría “Válvula_62_806” que se ha utilizado ha sido facilitada por la empresa ITC Dosing Pumps donde las utilizan para bombas dosificadoras. La válvula en cuestión consta de un total de 7 componentes diferentes. En este apartado, podemos encontrar una breve descripción de cada uno además de imágenes para saber identificar cada una de las partes. Por otro lado, debemos destacar la importancia de la herramienta “Move” que nos permite situar la bola interior en diferentes posiciones para llevar a cabo el cálculo.

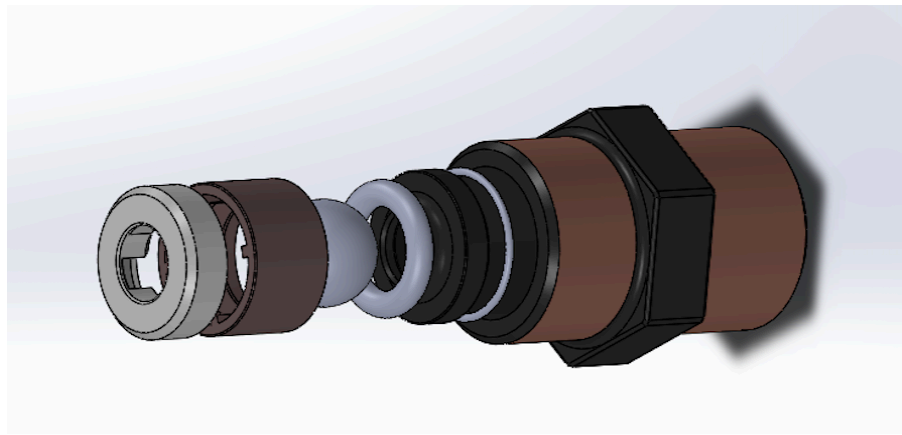


Imagen 2 - Explosionado del ensamblaje (Fuente propia)

- Machón: Es la única pieza visible cuando tenemos la válvula ensamblada ya que es la que constituye el cuerpo de la geometría. Como podemos ver en la imagen de a continuación, en medio del cuerpo tiene un aumento del diámetro interior para poder alojar los anillos que confinan la zona de paso de fluido.

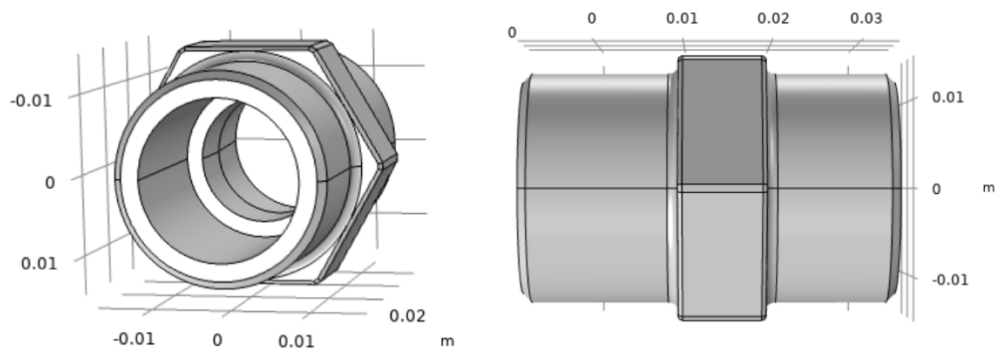


Imagen 3 – Sección de salida del fluido y perfil del machón (Fuente propia)

- Junta tórica 18x10: En cuanto a este accesorio, debemos destacar que su función mas importante es evitar que haya fugas entre las diferentes piezas de la válvula. En este caso, esta junta se encuentra situada en medio del anillo guía y el anillo de retención donde se asienta perfectamente en ambas piezas gracias a la geometría de estas.

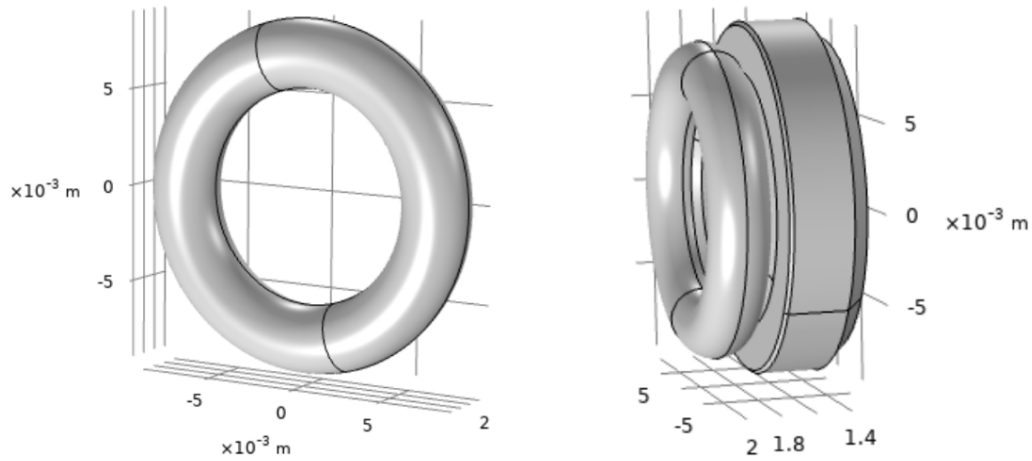


Imagen 4 - Junta tórica 18x10 y su asentamiento en anillo de retención (Fuente propia)

- Junta tórica 11x35: A diferencia de la junta tórica anterior, esta junta tiene únicamente la función de evitar fugas. Por otro lado, encontramos este accesorio situado en un pequeño espacio que queda entre las paredes del machón y una de las caras inclinadas del anillo de retención. A continuación, podemos ver donde queda asentada:

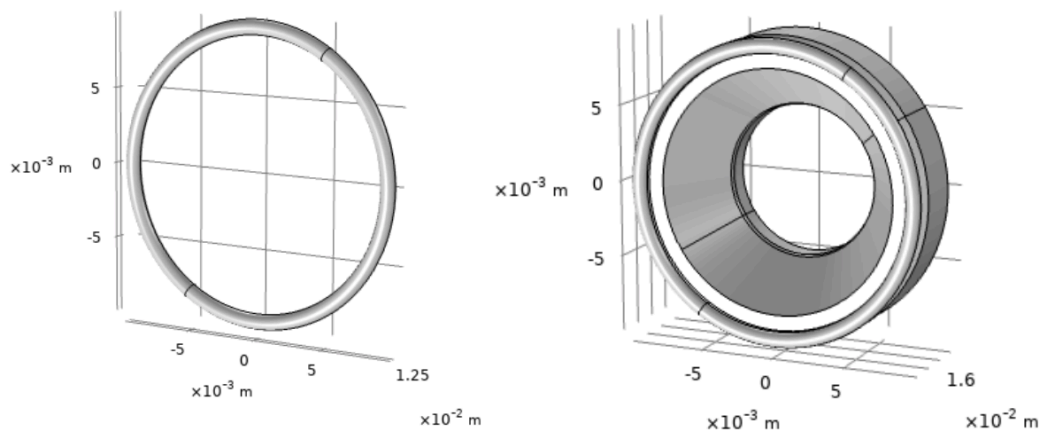


Imagen 5 - Junta tórica 18x10 y su asentamiento (Fuente propia)

- Anillo de retención: Este elemento es el más complejo que tiene la geometría sin tener en cuenta el machón. Por un lado, tenemos una cara que está en contacto con el machón, donde encontramos la junta tórica 11x35, que tiene forma de embudo para reducir el diámetro de entrada del machón. Por otro lado, tenemos una pequeña continuación del embudo que nos permite colocar la junta tórica 18x10 que a su vez hace de asiento de la bola interior.

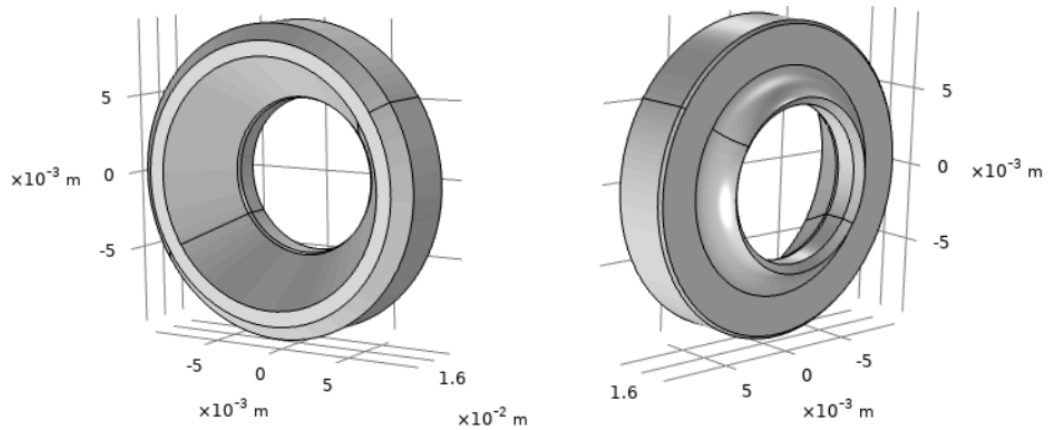


Imagen 6 - Anillo de retención (Fuente propia)

- Anillo guía: Del mismo modo que el anillo tope contiene el asentamiento de la bola, en este anillo tenemos los nervios que hacen de guía para que la bola no vibre durante el trayecto a su máxima apertura. Tal y como podemos ver a continuación, por el otro lado de este componente tenemos una pequeña rebaba para poder fijar la junta tórica:

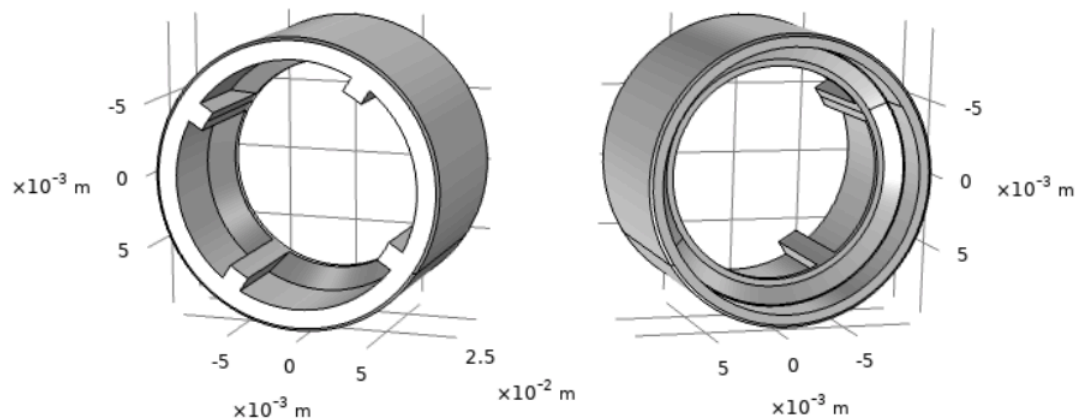


Imagen 7 – Salida y entrada anillo guía (Fuente propia)

- Anillo tope: Es el componente más externo que constituye la zona por donde pasa el líquido. En él es donde se encuentran los nervios responsables de acoger la bola interior cuando esta alcanza su máxima posición de apertura. Seguidamente, podemos ver imágenes de su estructura:

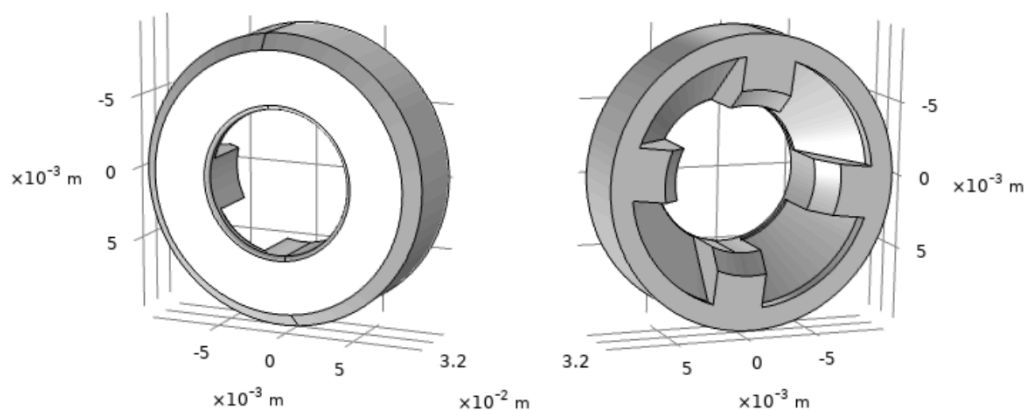


Imagen 8 – Salida y entrada anillo tope (Fuente propia)

- Bola: Este elemento se podría considerar el más importante de la válvula ya que es el responsable de que la válvula en si cumpla con su función. Es el responsable de obstruir el paso del fluido cuando está completamente cerrada y de dejar fluir el líquido a medida que se va moviendo hacia su posición de máxima apertura.

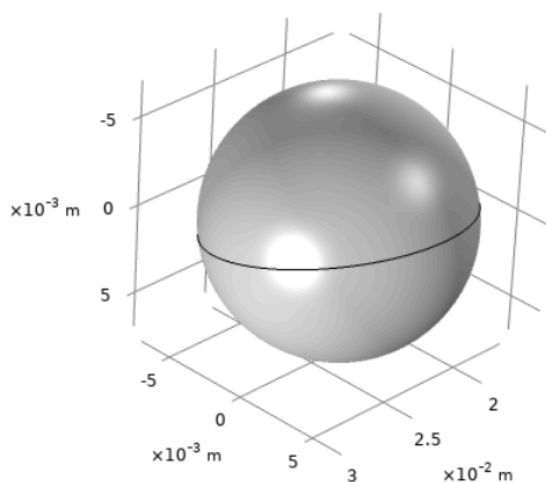


Imagen 9 - Bola (Fuente propia)

Por último, con el fin de complementar las explicaciones individuales anteriores se ha insertado, a continuación, una imagen del sub-ensamblaje que forman los anillos que confinan el camino del fluido. Por otro lado, en caso de que el lector quiera conocer las medidas de los distintos componentes que conforman la válvula véase los planos del *Anexo D*.

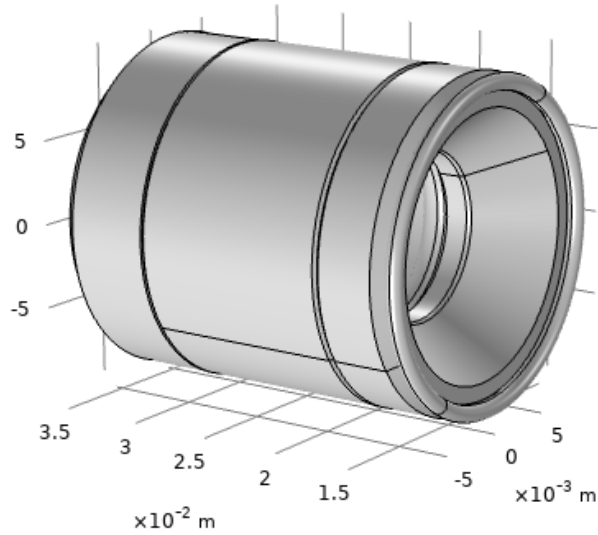


Imagen 10 - Sub-ensamblaje de anillos (Fuente propia)



7. Configuración del estudio

En cuanto al contenido de este apartado, podemos encontrar los parámetros utilizados para llevar a cabo nuestro estudio, los materiales empleados, la física seleccionada y por último la configuración de la malla. Además, podemos encontrar la justificación del criterio de elección de los parámetros de estudio y las diferentes configuraciones, dentro de cada módulo, para poder hacer circular diferentes fluidos y comprobar en que escenario trabaja mejor nuestra válvula.

7.1 Parámetros

Dentro de la lista de parámetros que tenemos dentro del archivo utilizado para llevar a cabo el proyecto podemos diferenciar entre parámetros fijos, los cuales no cambian su valor en ningún estudio, y los parámetros variables. Sin embargo, dentro de los parámetros variables tenemos algunos que solamente varían cuando, por ejemplo, se quiere cambiar el fluido que atraviesa la válvula. A continuación, podemos encontrar una tabla con los datos que se le han especificado al programa:

Nombre	Expresión	Descripción
Y_POS_BOLA	0.0016 [m]	Posición de la bola respecto al eje de coordenadas global
Viscosidad	1 [mPa*s]	Viscosidad del fluido
Caudal	60 [l/h]	Valor establecido del caudal para definir la variable
Dsalida	0.010597 [m]	Diámetro de salida de la válvula
Dentrada	0.0188942 [m]	Diámetro de entrada de la válvula
Densidad	1000 [kg/m ³]	Densidad del fluido

Tabla 1 - Parámetros establecidos en Comsol (Fuente propia)

7.1.1 Y_POS_BOLA

En referencia a este parámetro, podemos considerar que es el más importante de todos ya que es el único parámetro geométrico que nos define la posición de la bola interior, respecto el eje de coordenadas global de la geometría a lo largo del eje Y. Para la válvula que se va a estudiar, tenemos que considerar que el rango de trabajo de la bola queda definido desde la posición Y_POS_BOLA=0 (m) hasta Y_POS_BOLA=0.0016 (m), siendo esta última la máxima apertura posible. No obstante, cabe destacar que no se ha simulado que pasa cuando la bola esta completamente obturando el paso del fluido, ya que partimos de la hipótesis de que el periodo de tiempo en el cual la bola estará en esa posición, durante su estado de trabajo, es casi nulo. Sin embargo, se ha comprobado que cuando

establecemos la posición de totalmente cerrado la bola se asienta correctamente sobre la junta tórica. Del mismo modo, cuando ponemos la bola interior en su posición máxima vemos que se asienta perfectamente sobre los nervios internos situados en la salida de la válvula.

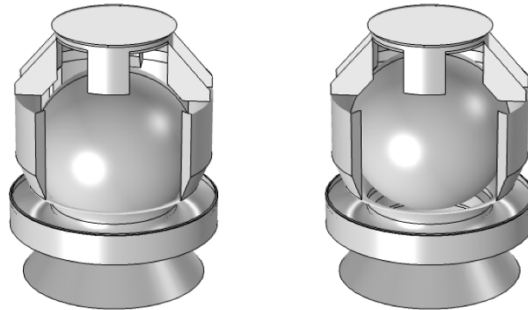


Imagen 11 - Posición bola completamente cerrada y abierta (Fuente propia)

7.1.2 Viscosidad (μ)

En cuanto a este parámetro, tiene la función de definir los diferentes fluidos que queremos estudiar en conjunto con la densidad. En vez de utilizar la biblioteca de materiales que nos ofrece el programa se ha preferido definir los distintos fluidos a partir de variables, ya que nos da la posibilidad de definir un rango de materiales más pequeños. Es decir, dentro de la librería de Comsol encontramos fluidos con propiedades muy diferentes entre ellos mientras que nuestro propósito es estudiar líquidos con propiedades similares.

El rango de sustancias que se quieren estudiar está compuesto por un total de cinco fluidos Newtonianos diferentes los cuales han sido seleccionados por la empresa propietaria de la válvula. Seguidamente, podemos ver las viscosidades que tiene cada uno:

Fluido	Viscosidad (mPa*s)
Agua	1
Agua Salada	1
Glicerina 94%	450
Glicerina 98%	900
Glicerina 100%	1400

Tabla 2 - Viscosidades de los fluidos utilizados (Fuente propia)

7.1.3 Densidad

Este parámetro nos deja definir la densidad de los diferentes fluidos que utilizamos, lo cual tenemos tres valores diferentes de densidad para nuestro estudio. A continuación, podemos ver los distintos valores:

Fluido	Densidad (kg/m ³)
Agua	1000
Agua Salada	1500
Glicerina 94%	1250
Glicerina 98%	1250
Glicerina 100%	1250

Tabla 3 - Densidades de los fluidos utilizados (Fuente propia)

7.1.4 Caudal

En relación con este parámetro, nos sirve para fijar el caudal volumétrico que entra a la válvula a partir de un rango de valores que va desde 0 a 60 (l/h) con un paso de 5 (l/h). El motivo por el cual hemos seleccionado este rango es porque nos interesa ver la evolución de la presión de entrada necesaria a medida que aumentamos el caudal. Hay que destacar que, del mismo modo que los diferentes fluidos seleccionados, este rango de valores ha sido definido por la empresa ITC Dosing Pumps.

7.2 Librería de materiales

Como se ha comentado de forma breve anteriormente, la librería de Comsol nos ofrece un amplio rango de líquidos para llevar a cabo nuestro estudio. Sin embargo, aunque se haya definido cada fluido con los parámetros de viscosidad y densidad es conveniente seleccionar un líquido de la librería para que el programa use como referencia. En nuestro caso se ha seleccionado el agua cuando se encuentra una temperatura de 20°C. A continuación, podemos ver las propiedades del agua que tiene por defecto Comsol:

Descripción	Valor	Unidad
Viscosidad dinámica	$\eta(T[1/K])[Pa*s]$	Pa*s
Coef. Dilatación adiabática	1.0	1
Conductividad eléctrica	$\{\{5.5e-6[S/m], 0, 0\}, \{0, 5.5e-6[S/m], 0\}, \{0, 0, 5.5e-6[S/m]\}\}$	S/m
Capacidad térmica	$C_p(T[1/K])[J/(kg*K)]$	J/(kg*K)
Densidad	$\rho(T[1/K])[kg/m^3]$	kg/m ³
Conductividad térmica	$\{\{k(T[1/K])[W/(m*K)], 0, 0\}, \{0, k(T[1/K])[W/(m*K)], 0\}, \{0, 0, k(T[1/K])[W/(m*K)]\}\}$	W/(m*K)
Velocidad del sonido	$c_s(T[1/K])[m/s]$	m/s

Tabla 4 - Propiedades del agua (Comsol Multiphysics)

Como podemos ver en la tabla anterior, seleccionando el agua de la librería de materiales le damos mucha más información al software acerca de las propiedades del fluido que queremos simular. Sin embargo, es algo que realmente no es necesario ya que las únicas propiedades que intervienen en nuestros cálculos son la viscosidad dinámica y la densidad. Por este motivo, aunque se cambien tales valores para simular el resto de los líquidos y los demás se mantengan igual, no importa, ya que no nos intervienen en el cálculo.

7.3 Física Fluid Flow

Para llevar a cabo nuestro estudio, primero de todos debemos decirle al programa cuál es la física que mejor describe lo que pase dentro de nuestra válvula para poder realizar las simulaciones y que estas sean las adecuadas para aproximarse a lo que pasaría en el modelo real. En nuestro caso, lo que queremos es que en el dominio de dentro de la válvula, por donde pasa el líquido, se de un flujo laminar monofásico. Cabe destacar que, tras seleccionar la física comentada, se nos abrirán varios subapartados los cuales hay que configurar antes de pasar a procesar las simulaciones. Sin embargo, asignando el dominio donde queremos que se aplique la física automáticamente se configurarán varios de los subapartados. Por otro lado, dentro del módulo de fluid flow también debemos definir la compresibilidad del fluido, el cual se considerará que es incompresible tal y como se ha mencionado en el apartado 3 de teoría.

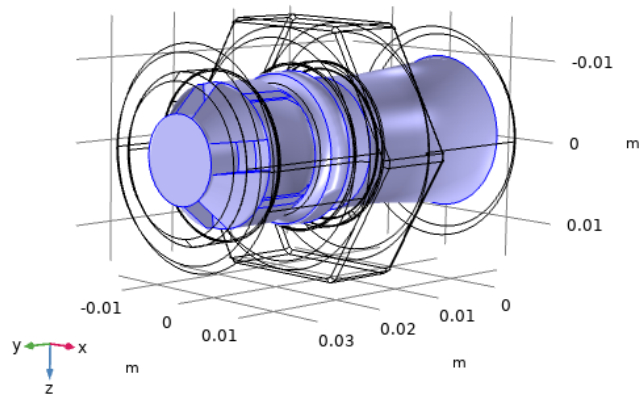


Imagen 12 - Dominio del fluido (Fuente propia)

7.3.1 Propiedades de los fluidos

En cuanto a este apartado, es donde debemos definir la viscosidad y la densidad del líquido que queremos que pase por el dominio del fluido. Hay que destacar que, al haber llevado a cabo el cálculo en estado estacionario, las propiedades del fluido se mantendrán constantes a lo largo de la válvula. A continuación, podemos ver una imagen de la configuración de este apartado:

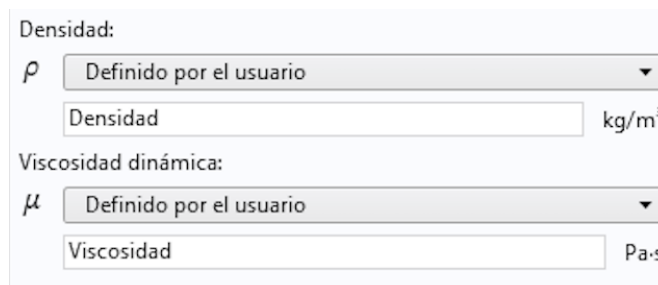


Imagen 13 - Configuración de las propiedades del fluido (Fuente propia)

7.3.2 Pared

En relación con la configuración de este subapartado, simplemente debemos decirle que en las paredes que definen el dominio y confinan el fluido se les debe imponer la condición de no deslizamiento. De esta forma, tras imponer dicha condición nos aseguramos de que cuando el fluido está en contacto directo con un sólido se adhiere a la superficie debido a los efectos viscosos y, en consecuencia, la velocidad del fluido en ese punto es nula. A más a más, debemos destacar la importancia de esta propiedad ya que solo pasa en materiales impermeables que no se dejan atravesar

por la sustancia que confinan. Seguidamente, podemos ver una imagen del perfil de velocidad que se desarrollará con la condición de no deslizamiento:

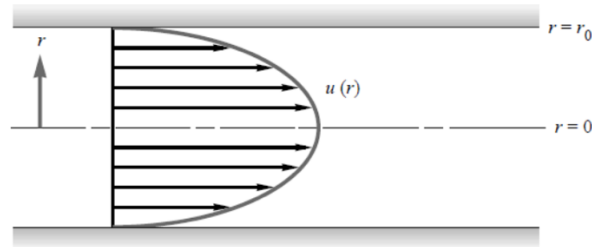


Imagen 14 - Perfil de velocidades sin deslizamiento (Fuente: Mecánica de fluidos, Frank M. White, 5ª Edición)

7.3.3 Entrada del fluido (Inlet)

En referencia a este apartado, es donde debemos definir la cara del dominio por donde entra el fluido y en qué condiciones lo hace. Es decir, aquí es donde le definiremos al programa que nos interesa hacer pasar un caudal volumétrico de entrada específico para llevar a cabo los cálculos. Además, debemos definir que el flujo que entrará está completamente desarrollado ya que suponemos que nuestra válvula estará conectada entre dos tubos en una instalación. Seguidamente, podemos ver una imagen de la configuración del apartado y la sección de entrada de la geometría:

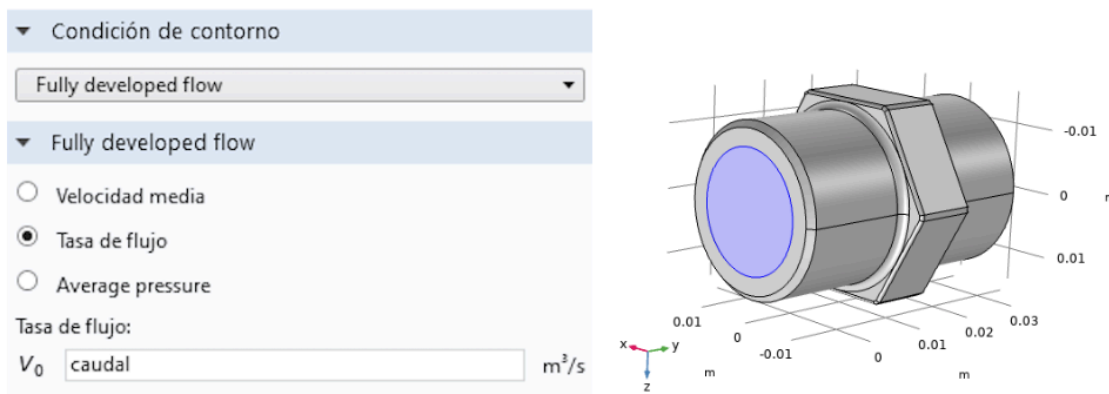


Imagen 15 - Configuración entrada fluido y sección de entrada del fluido (Fuente propia)

7.3.4 Salida del fluido (Outlet)

De igual forma que en el apartado anterior, debemos definir la cara o sección por donde saldrá nuestro fluido además de las condiciones en que lo hará. En cuanto a la condición que se impondrá en la salida, se indicará que la presión en la salida es nula. Posteriormente, podemos encontrar una imagen correspondiente a la sección de salida del fluido y a la configuración del apartado:

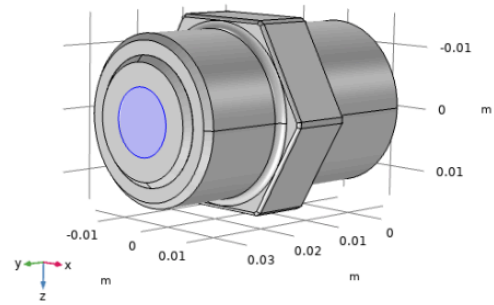
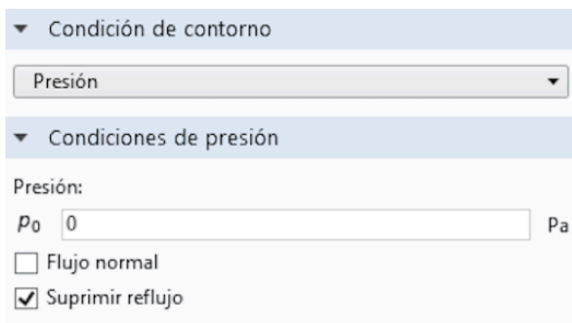


Imagen 16 - Configuración salida fluido y sección de salida del fluido (Fuente propia)

7.4 Módulo de mallado

En este apartado, es donde debemos configurar la malla para llevar a cabo la discretización del medio continuo con la máxima exactitud posible. Cabe destacar que, para poder elegir el tamaño de malla óptimo se debe hacer previamente un estudio de convergencia, para ver a partir de que tamaños los resultados convergen, el cual encontramos en el siguiente capítulo.

Para poder construir la malla debemos definir en este módulo el tamaño y la forma que queremos que tengan los elementos que constituyen la malla. En cuanto a la forma utilizada, se han generado tetraedros ya que tienen la fama de tener una gran versatilidad a la hora de mallar cuerpos tridimensionales. Por otro lado, Comsol nos ofrece un listado de nueve tamaños de malla distintos los cuales tienen por defecto sus propios valores para definir el tamaño máximo y mínimo de elemento, la tasa de crecimiento y el factor de curva. Como es de esperar, la diferencia entre los varios tamaños de malla está en el tiempo necesario para crear la malla y para llevar a cabo el estudio. A continuación, podemos ver el tiempo necesario y las características de cada tamaño:

Tamaño de malla	Tamaño Max. Elemento	Tamaño Min. Elemento	Tasa crecimiento	Factor de curva	Tiempo creación (s)
Extremadamente gruesa	0.022	0.00308	2	1	0.93
Extra gruesa	0.0132	0.00238	1.85	0.9	1
Más gruesa	0.0087	0.00176	1.7	0.8	1.08
Gruesa	0.00661	0.00123	1.6	0.7	1.2
Normal	0.00441	7.93E-4	1.5	0.6	1.8
Fina	0.00352	4.41E-4	1.45	0.5	3.41
Más fina	0.00242	1.76E-4	1.4	0.4	11.51
Extra fina	0.00154	6.61E-5	1.35	0.3	33.38
Extremadamente fina	8.81E-4	8.81E-6	1.3	0.2	286.12

Tabla 5 - Características de los tamaños de malla (Fuente propia)

Por último, para dejar constancia de las diferencias que tienen los distintos tamaños de malla podemos ver, en las imágenes situadas a continuación, la diferencia entre la malla menos refinada y entre la más refinada. Cabe destacar que cuando creamos la malla con la opción de “Extremadamente grueso” vemos que ni si quiera nos moldea correctamente la forma cilíndrica que hay en la entrada de la válvula. Además, el propio programa nos indica que este tamaño no es conveniente para llevar a cabo el cálculo.

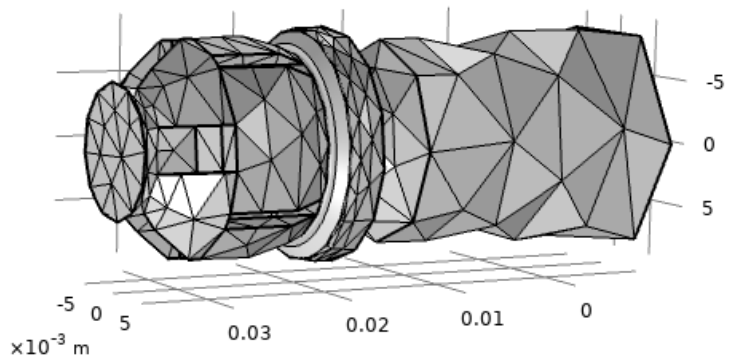


Imagen 17 - Mallado extremadamente grueso (Fuente propia)

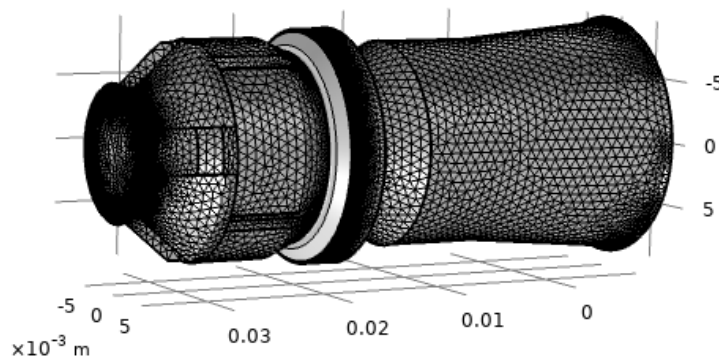


Imagen 18 - Mallado extremadamente fino (Fuente propia)

8. Estudio de convergencia

En primer lugar, antes de realizar un estudio mediante el método de elementos finitos tenemos que realizar un estudio de convergencia. La finalidad de dicho estudio está en analizar el tiempo necesario de simulación y la exactitud de los resultados para diferentes tamaños de malla. Cabe destacar que, en el software usado para llevar a cabo el trabajo, tenemos por defecto nueve tipos diferentes de malla. Sin embargo, los dos tamaños de malla más grandes no se han podido incluir en el estudio ya que el programa nos advertía de que el tamaño de los elementos y el número de nodos era insuficiente para llevar a cabo con éxito la discretización de nuestra geometría.

En segundo lugar, en el estudio realizado para evaluar la convergencia de las soluciones se han seleccionado a conciencia tres valores de velocidad de entrada distintos (m/s) para analizar los valores del caudal de salida. En cuanto a la idea inicial, se tenía la intención de utilizar valores de caudal volumétrico de entrada (m^3/s) para llevar a cabo el estudio. Sin embargo, tras tener en cuenta que para obtener un caudal volumétrico tan solo debemos multiplicar la velocidad de por el área de entrada de la válvula se decidió utilizar los valores de velocidad equivalentes a tales caudales. Además, el uso de la velocidad como parámetro característico en el estudio también nos permite asegurar que el flujo que pasa a través de la válvula es laminar.

Por lo tanto, una velocidad de 0,01 (m/s) en nuestra válvula corresponde a un caudal de entrada de 20 (l/h) y una velocidad de 0,05(m/s) a un caudal de 60 (l/h). Ambos valores de caudal de entrada mencionados corresponden al rango de valores que nos interesa estudiar después de analizar la convergencia de los resultados. A más a más, se ha calculado también con una velocidad de 0,1 (m/s) para comprobar que, aunque tengamos valores muy grandes, el estudio sigue convergiendo. En cuanto al parámetro Y_POS_BOLA, se han realizados todos los estudios de este proyecto para una apertura equivalente al 25%, 50%, 75% y 100%.

En cuanto al proceso para llevar a cabo el cálculo se ha requerido un total de 8 simulaciones, una para cada tipo de mallado, y un total de 6 horas y 17 minutos. No obstante, gracias a la ayuda de una herramienta que incorpora Comsol, llamada Barrido Paramétrico, se ha conseguido ganar mucho tiempo ya que nos evita la necesidad de crear estudios individuales para cada posición y velocidad. A continuación, podemos ver una imagen de la configuración utilizada:

Configuración del estudio

Tipo de barrido: Todas las combinaciones

Nombre de parámetro	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parámetros
Y_POS_BOLA	range(4.0e-4,4.0e-4,0.0016)	m
U0	0.01,0.05,0.1	m/s

Imagen 19 - Configuración barrido paramétrico para el estudio de convergencia (Fuente propia)

8.1 Ejemplo de cálculo

Para dar un ejemplo del proceso que se ha llevado a cabo podemos encontrar a continuación la tabla de valores que se ha obtenido para la máxima apertura de bola y el gráfico de convergencia para tal apertura. Cabe destacar que se ha elegido la máxima apertura de bola ya que en realidad será la posición en la que nuestra válvula pasa su mayor parte del tiempo durante su funcionamiento.

Y_BOLA (m)	Vel. Inlet (m/s)	Mas Gruesa (1)	Gruesa (2)	Normal (3)
		Caudal Volumétrico Outlet (m ³ /s)		
0.0016	0,01	2,892E-06	2,972E-06	3,076E-06
	0,05	1,449E-05	1,479E-05	1,501E-05
	0,1	2,903E-05	2,962E-05	2,993E-05

Fina (4)	Mas Fina (5)	Extra fina (6)	Extremadamente fina (7)	Vel. Inlet (m/s)
Caudal Volumétrico Outlet (m ³ /s)				
3,230E-06	3,338E-06	3,408E-06	3,378E-06	0,01
1,565E-05	1,645E-05	1,706E-05	1,678E-05	0,05
3,105E-05	3,262E-05	3,345E-05	3,317E-05	0,1

Tabla 6 - Resultado caudal volumétrico cuando Y_POS_BOLA= 0.0016 (fuente propia)

Como podemos comprobar a priori, vemos que hay una diferencia notable entre los valores obtenidos con los primeros tamaños en comparación con los tamaños más refinados. A más a más, se aprecia una mayor dispersión en los valores a medida que aumenta la velocidad de entrada del fluido. No obstante, como que puede ser un poco tedioso analizar estos valores en la tabla se ha insertado el gráfico correspondiente a continuación, donde en el eje de abscisas tenemos el tamaño de malla y en el eje de ordenadas los valores del caudal de salida:

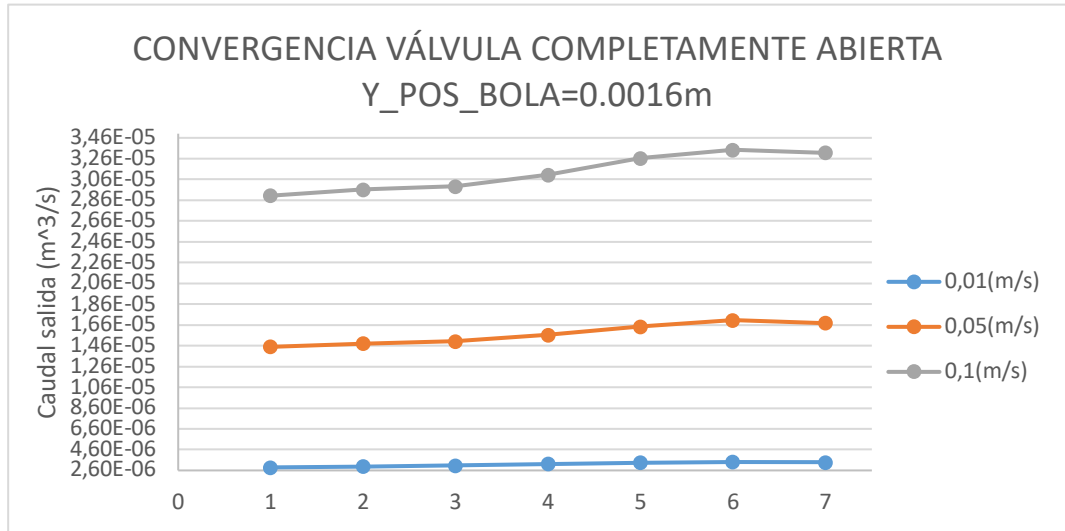


Gráfico 1 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura máxima (Fuente propia)

Cabe destacar que, tras hacer un primer análisis inicial, nuestro posible tamaño candidato para llevar a cabo nuestro trabajo es el tamaño “Mas Fino” correspondiente al número 5 del gráfico anterior. La importancia de haber echo este primer análisis es que nos permite hacer otro estudio de convergencia con el tamaño candidato aplicando una herramienta llamada Caras Compuestas (CC). Dicha herramienta nos permite refinar la malla que nos crea por defecto el ordenador, mediante la creación de caras compuestas, para reducir el tiempo de procesado y evitar que se acumulen nodos en zonas exteriores donde no es necesario llevar a cabo un cálculo tan preciso. A continuación, podemos ver una imagen antes y después de utilizar esta herramienta además de las diferentes características que tiene cada una:

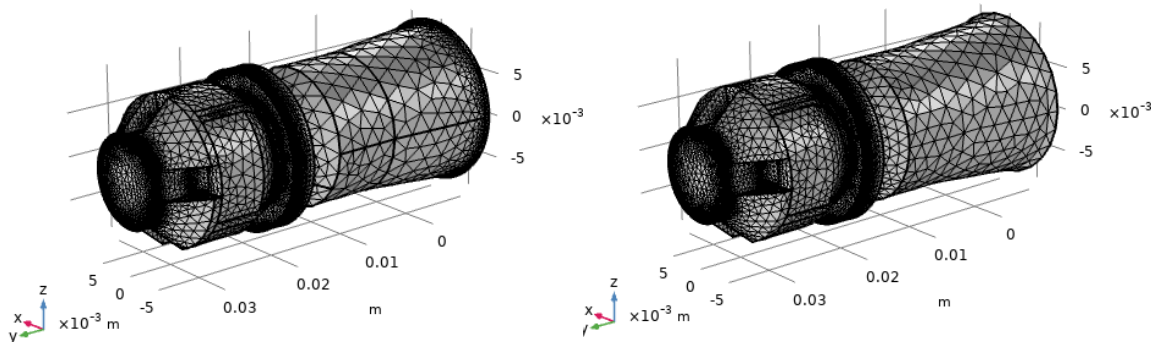


Imagen 20 - Malla sin y con caras compuestas (Fuente propia)

	Más Fina (5)	Más Fina CC (6)
nº vértices	128	80
nº aristas	4434	1487
nº contorno	46778	41648
nº elementos	140027	125774
Calidad min. Elementos	0,1106	0,06021
Tiempo simulación	16 min 30s	14 min

Tabla 7 - Diferencias del mallado utilizando la herramienta de caras compuestas (Fuente propia)

Como era de esperar, a simple vista cuesta ver las diferencias entre una malla y otra, pero si buscamos el número de elementos vemos que mediante la creación de caras compuestas se ha reducido el número de elementos del mallado. Por tanto, además de haber reducido el número de elementos desde 140.027 a 125.774, se ha comprobado que en todos los casos la variación del caudal entre ambos mallados: la cual fluctúa alrededor del 0,5%.

8.2 Resultados del estudio de convergencia

En este apartado podemos encontrar las gráficas que representan la convergencia para las diferentes Y_POS_BOLA. Dentro de cada gráfico, podemos ver la evolución del caudal de salida que se obtiene para los distintos tamaños de malla y para las distintas velocidades de entrada seleccionadas. Previamente, en la tabla situada a continuación podemos ver los tiempos de simulación y el número de elementos que tiene cada tamaño de malla:

	nº elementos	Tiempo simulación (min)
Mas Gruesa (1)	4668	1,83
Gruesa (2)	8089	2,32
Normal (3)	16286	3,32
Fina (4)	39984	5,42
Mas Fina (5)	140027	16,50
Más Fina (6) CC	125774	14,00
Extra fina (7)	360195	43,15
Extremadamente fina (8)	1173523	290,50

Tabla 8 - Número de nodos y tiempos de simulación (Fuente propia)

Como podemos ver en la tabla anterior, se aprecia un incremento de tiempo y una diferencia notable entre el número de elementos que tiene un mallado 'Fino' y un mallado 'Más Fino', razón de más para intuir que nuestro tamaño de malla candidato será el elegido al final del estudio. De igual forma, vemos

que sucede algo similar entre los dos últimos tamaños de malla, aunque obviamente no se utilizará un mallado 'Extremadamente Fino' para llevar a cabo el proyecto debido a la cantidad de tiempo que necesita. Seguidamente, podemos ver la convergencia de los caudales de salida para cada posición de bola:

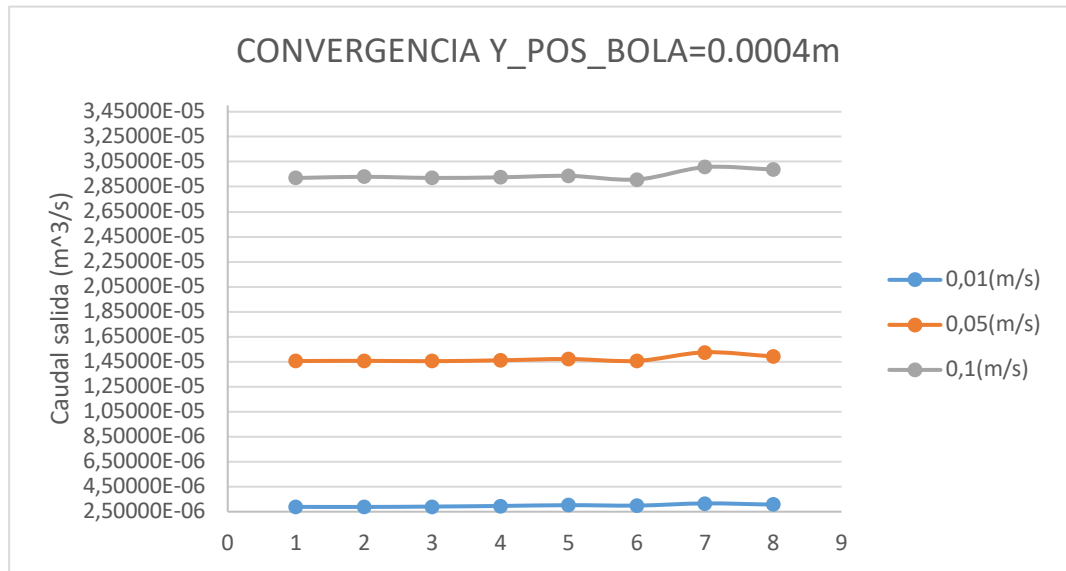


Gráfico 2 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 25% (Fuente propia)

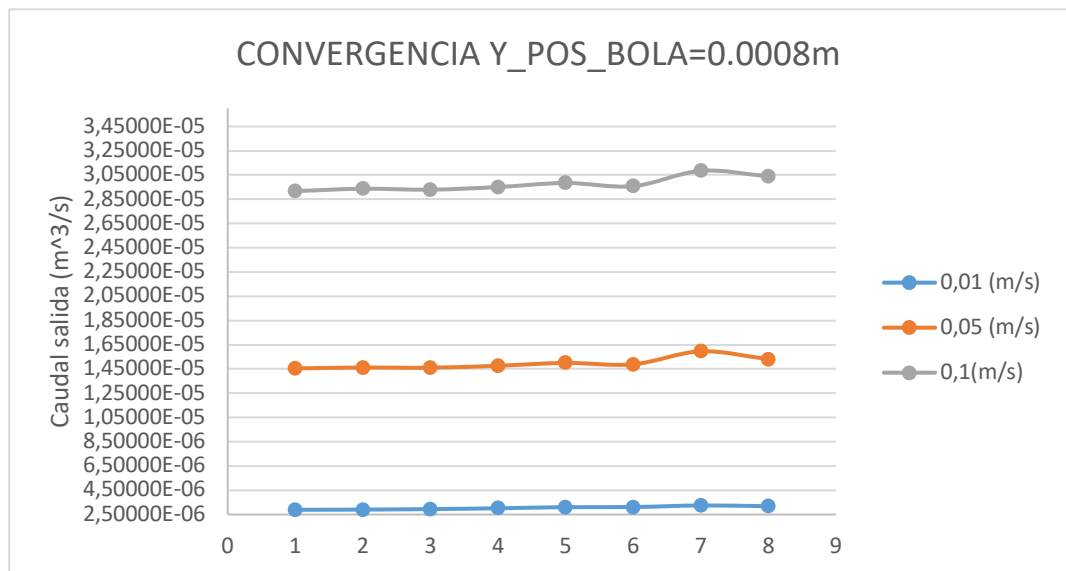


Gráfico 3 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 50% (Fuente propia)

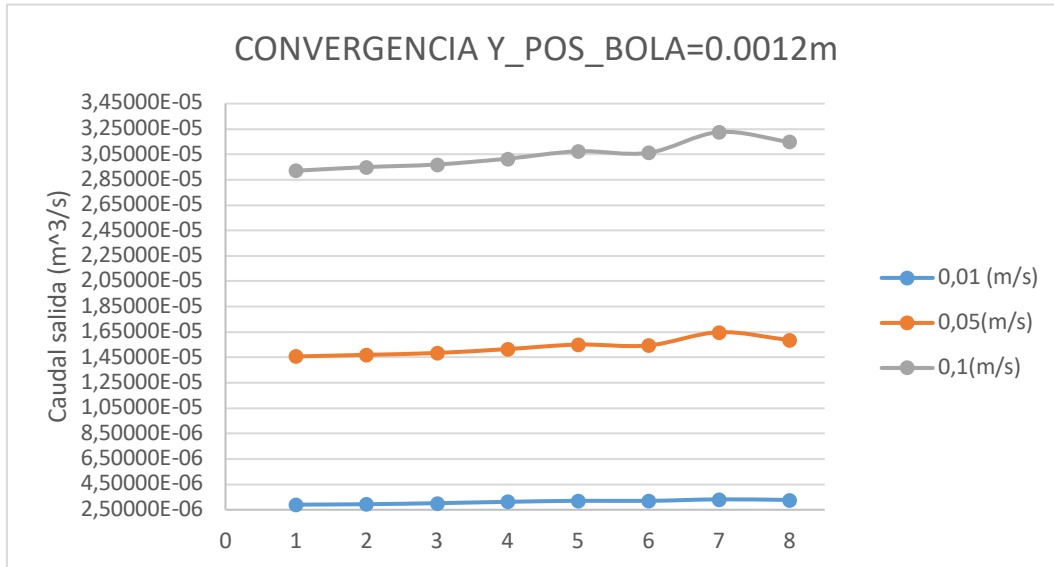


Gráfico 4 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 75% (Fuente propia)

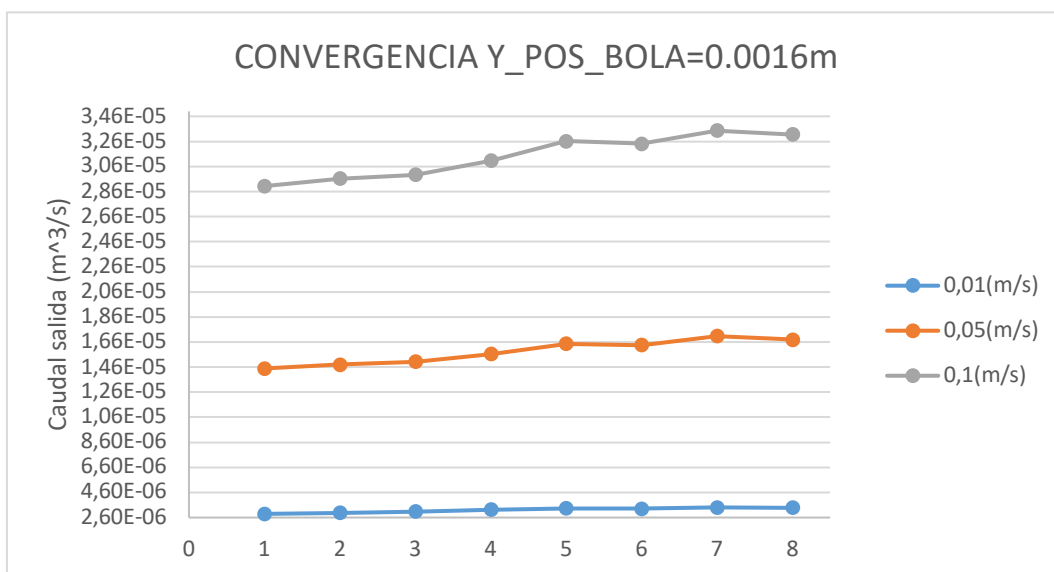


Gráfico 5 - Convergencia del caudal volumétrico para apertura del 100% (Fuente propia)

Revisando los gráficos anteriores, podemos ver que todos cuatro tienen una cosa en común; a medida que aumentamos la velocidad de entrada los valores tienden a fluctuar mucho más para cualquier valor de Y_POS_BOLA. Por tanto, si nos fijamos en la convergencia para una velocidad de entrada de 0,05 (m/s), equivalente al caudal máximo que se estudiará, vemos que utilizando un tamaño de malla 'Más Fino' los resultados serán correctos.

Por otro lado, si revisamos la malla donde se ha utilizado la herramienta de caras compuestas vemos que los valores son prácticamente iguales y que solo varían alrededor del 0,5% en comparación con el mismo tipo de malla, pero sin caras compuestas. A más a más, también podemos considerar los resultados obtenidos con la malla número 6 como válidos ya que presentan una variación aproximada del 2%, en todos los casos, respecto al valor obtenido con la malla más compleja. En consecuencia, tras ver estos resultados podemos utilizar dicha técnica para ahorrar tiempo teniendo la certeza de que los resultados serán correctos. (Ver resto de tablas en el *Anexo A*)

Por último, tras llevar a cabo el estudio de convergencia se ha llegado a la conclusión de que se utilizará el mallado número 6, correspondiente a el tamaño 'Mas Fino' con caras compuestas, para llevar a cabo el resto de los estudios de este proyecto.



9. Resultados

Como ya se ha comentado anteriormente en otros apartados, el parámetro a partir del cual se ha llevado a cabo el cálculo ha sido el caudal. Con ello, se ha buscado la presión de entrada necesaria para que circule un rango de valores concreto.

Con la intención de poder obtener el mayor número de puntos posibles para construir los gráficos que se obtienen, el rango que se ha utilizado está comprendido entre 0 y 60 (l/h), con un paso de 5 (l/h), lo que hace un total de doce valores distintos para cada una de las posiciones de la válvula. Sin embargo, no se han dibujado todos los caudales en los gráficos ya que nos supone tener una gran cantidad de líneas que perjudican la lectura y la comprensión de las representaciones.

En cuanto a la posición de la válvula, el cual definimos con el parámetro Y_POS_BOLA, inicialmente se seleccionaron cinco posiciones distintas incluyendo la posición de Y_POS_BOLA=0 (m), que hace referencia a la válvula completamente cerrada. Sin embargo, tras comprobar que no proporciona ninguna información relevante se ha decidido excluirla de los resultados.

9.1 Configuración del cálculo

Como hemos comentado anteriormente, al utilizar un rango de parámetros de entrada necesitamos la herramienta que nos proporciona el programa que se llama “Barrido Paramétrico” para que automáticamente nos evalúe todas las combinaciones. A continuación, podemos ver un ejemplo:

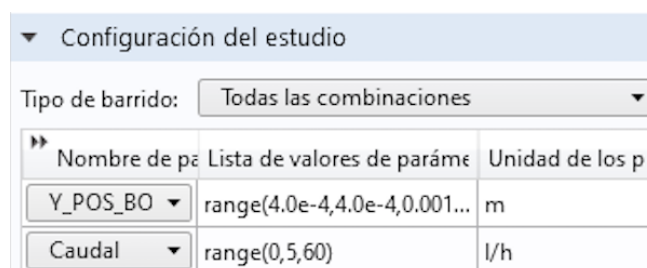


Imagen 21 - Configuración barrido paramétrico (Fuente propia)

9.2 Resultados

En referencia a la organización de este apartado, se pueden encontrar los mismos resultados para varios fluidos dentro del mismo apartado, es decir, en el subapartado de representación de la presión

en función del caudal encontraremos un gráfico para cada uno de los líquidos estudiados. A modo de recordatorio, los diferentes fluidos que se han utilizado son: agua, agua salada, glicerina 94%, glicerina 98% y glicerina 100%.

En primer lugar, encontraremos los valores de la presión de entrada en función del caudal que se quiere para distintas posiciones de bola. Este gráfico nos indica la presión que necesitamos para una posición de la bola determinada a medida que aumentamos el caudal.

En segundo lugar, encontramos un gráfico de la presión de entrada en función de la posición de bola para diferentes caudales. En este caso, podemos ver la evolución de la presión de entrada a medida que vamos abriendo la válvula.

Por un lado, tenemos la evolución del coeficiente de pérdidas y del coeficiente de capacidad en función de la posición de la bola para diferentes caudales. Donde, el coeficiente de pérdidas nos ayuda a dimensionar la instalación a partir de la diferencia de presiones en la entrada y en la salida de la válvula. Por otro lado, el coeficiente de capacidad de la válvula nos indica al caudal máximo que podemos tener para una diferencia de presión dada.

A más a más, se han obtenido imágenes donde podemos ver la evolución de la distribución de la velocidad, de la presión y de las líneas de corriente paralelas y perpendiculares a la dirección del fluido. La importancia de estas imágenes está en que nos muestran como evoluciona la velocidad del fluido y la presión dentro la válvula a medida que hacemos pasar más caudal y aumentamos el grado de apertura. Además, las líneas de flujo nos ayudan a conocer la evolución del fluido a lo largo de la válvula para comprobar que no se tiene ninguna dificultad para travesarla y que no se forman remolinos en las zonas donde se producen cambios de sección.

Por último, estas representaciones se han incluido en el *Anexo B* ya que la organización de cara al estudio de los resultados es más adecuada debido a la gran cantidad de información que hay. También, hay que destacar que no se han añadido todos los valores con los que se ha llevado a cabo el cálculo ya que el paso entre ellos es muy pequeño y no se aprecian diferencias notables. Por este motivo, se han seleccionado tres valores diferentes de caudal con los cuales si que se aprecia la diferencia entre ellos de cómo evolucionan los fluidos. Además, como que la distribución de la velocidad y de la presión solo varía al cambiar la posición de la bola, independientemente del caudal, encontramos la

representación de dichas distribuciones con tres escalas distintas donde cada una representa un caudal diferente.

9.2.1 Presión en función del caudal

En la siguiente representación, en el eje de abscisas encontramos el caudal en litros/hora y en el eje de ordenadas la presión en pascales donde, además, tenemos diferentes series para cada posición de bola. Para ver a que fluido pertenece cada uno léase el pie de gráfico.

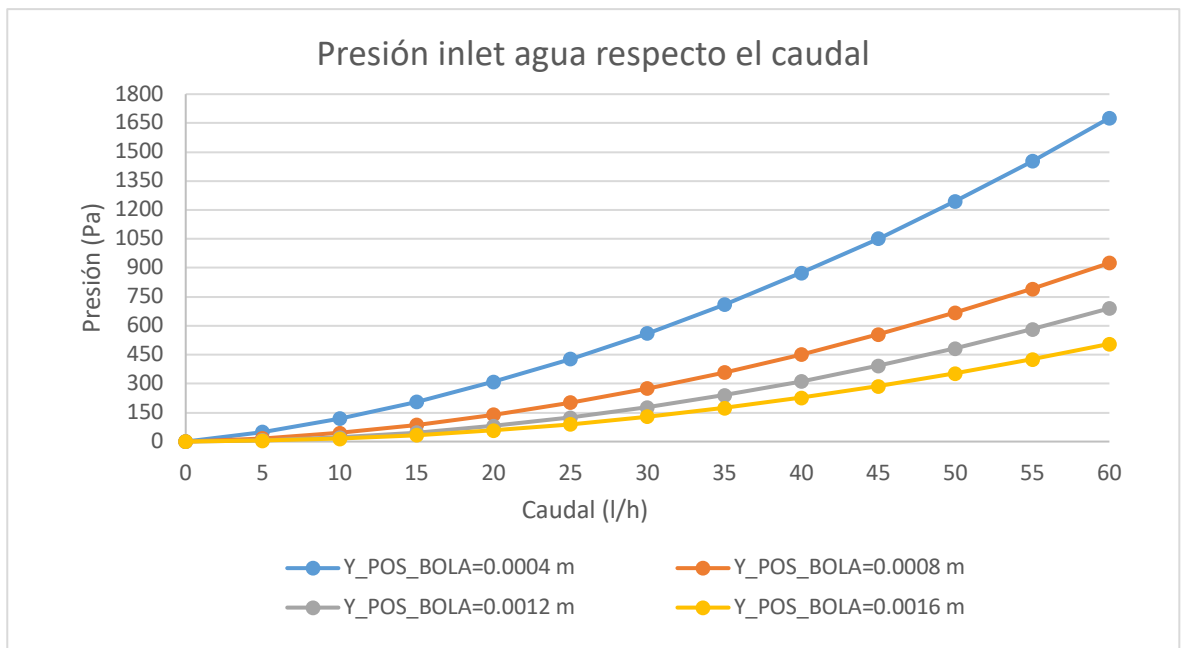


Gráfico 6 - Evolución presión de entrada en función del caudal para agua (Fuente propia)

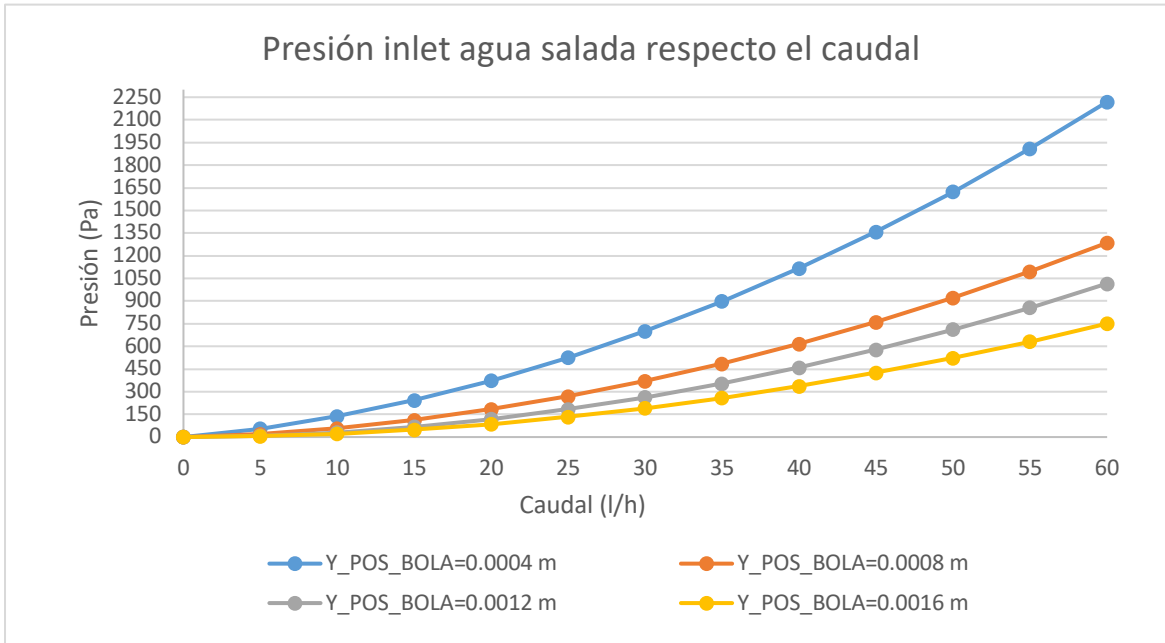


Gráfico 7 - Evolución presión de entrada en función del caudal para agua salada (Fuente propia)

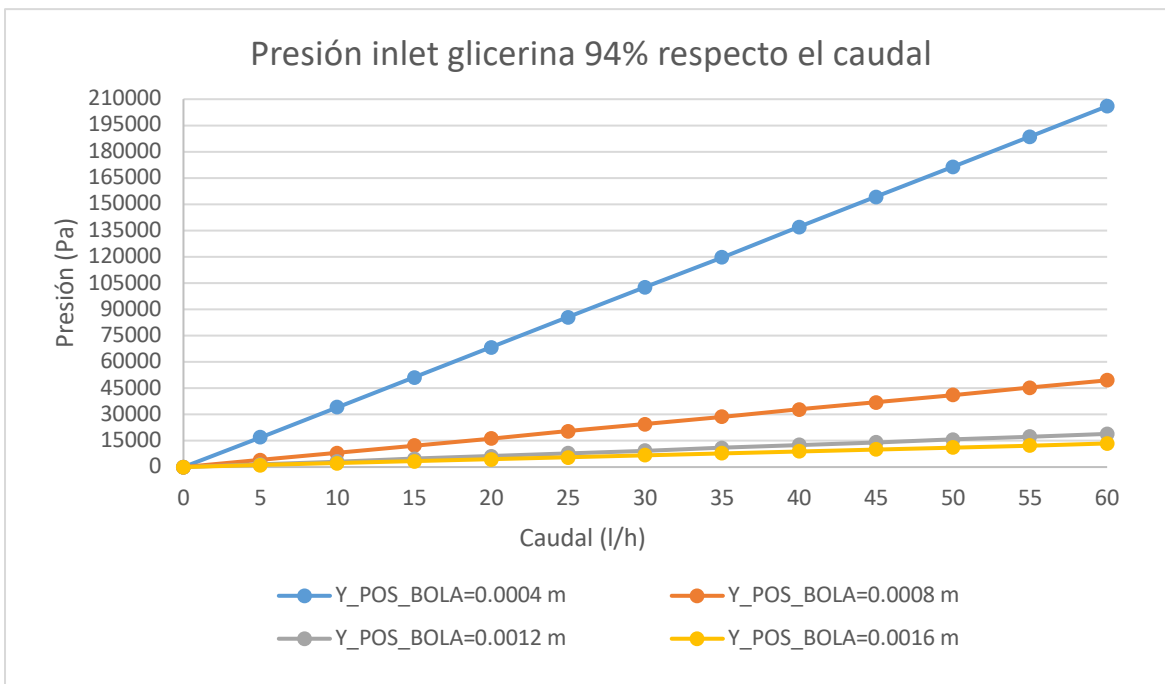


Gráfico 8 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 94%

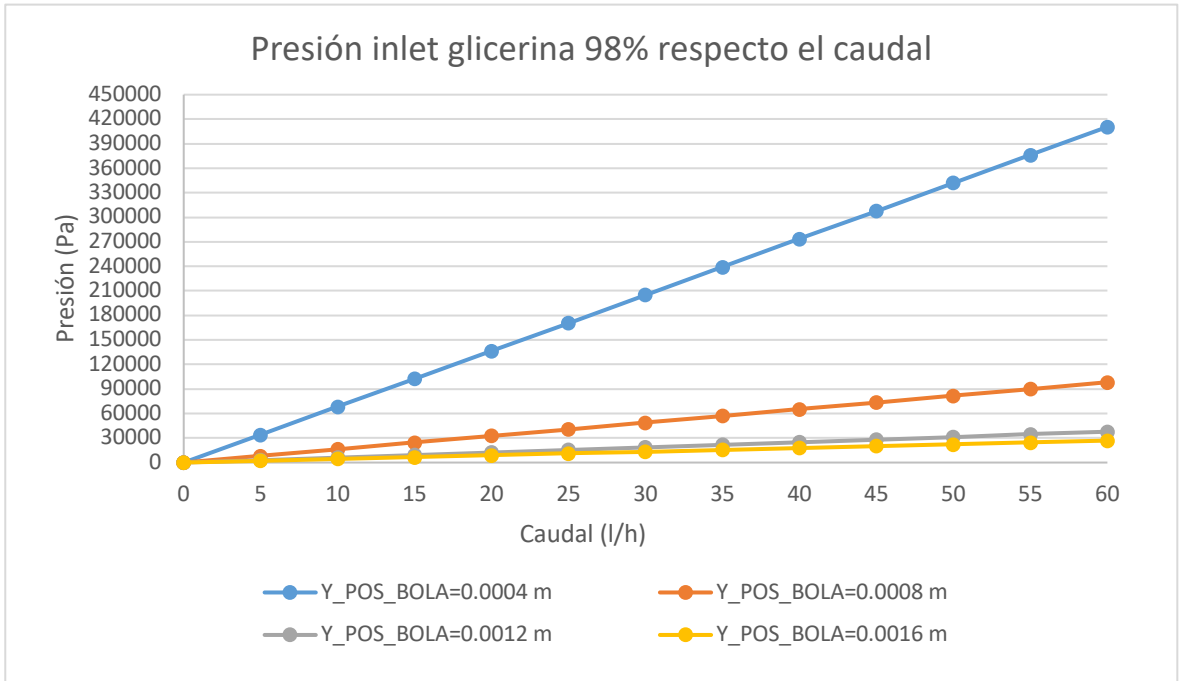


Gráfico 9 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 98%

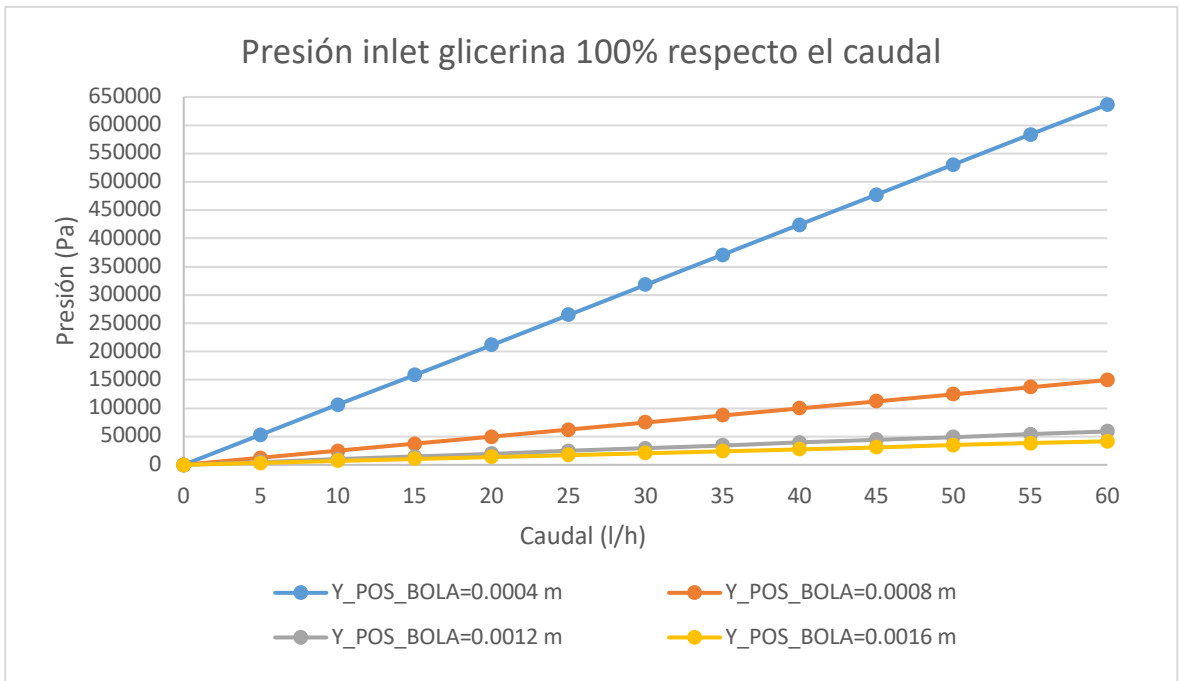


Gráfico 10 - Evolución presión de entrada en función del caudal para glicerina 100%

Para analizar de forma ordenada las gráficas anteriores, primero nos vamos a fijar en la del agua y en la del agua salada y luego en las glicerinas. El motivo por el cual lo haremos así es porque las dos primeras tienen la misma viscosidad y las tres últimas la misma densidad.

Como podemos ver, la primera y la segunda gráfica tienen una tendencia muy similar a medida que aumentamos el caudal de entrada. Además, no hay una gran diferencia entre las presiones máximas que se necesitarían cuando queremos hacer pasar un caudal de 60 (l/h) en la posición $Y_POS_BOLA=0.0016$ (m). Este hecho nos indica que los fluidos que tengan una densidad entre 1000 y 1500 kg/m^3 y una viscosidad igual a la del agua pueden hacerse circular sin problemas a través de la válvula. A más a más, las presiones necesarias para hacer pasar los valores de caudal seleccionados son bastante pequeñas, por lo que parecen resultados coherentes ya que no necesitaríamos dimensionar grandes instalaciones.

Por otro lado, en las gráficas pertenecientes a la glicerina podemos ver que tienen una evolución lineal a medida que aumentamos el caudal y que la presión necesaria cuando la apertura de la válvula es del 50% ($Y_POS_BOLA=0.0008$) es muy similar a la necesitamos cuando está al 100%. Por tanto, podríamos interpretar que el hecho de aumentar la viscosidad es más notable de cara a empezar a hacer pasar el fluido y vencer esa resistencia inicial que se nos presenta mientras que, para acabar de abrir la válvula nos sería suficiente mantener una misma presión constante. Por otro lado, a partir de la escala de los gráficos podemos llegar a la conclusión que el incremento de viscosidad es proporcional a la presión de entrada necesaria. Por ejemplo, si queremos tener un caudal de 60 (l/h) de glicerina 94% para una apertura del 100% necesitaríamos una presión de entrada de alrededor 13.000 (Pa). En cambio, para la glicerina 98%, que es el doble de viscosa en las mismas condiciones, necesitaríamos aproximadamente 26.000 (Pa). Por tanto, como se puede ver la viscosidad y la presión de entrada son proporcionales.

9.2.2 Presión en función de la apertura de la válvula

En los gráficos situados a continuación, encontramos la presión en pascales en el eje de ordenadas y la apertura de la válvula en forma de porcentaje en el eje de abscisas. Hay que destacar que, en vez de poner los valores del parámetro Y_POS_BOLA referentes a las diferentes aperturas de válvula se ha optado por establecerlo en porcentajes para que sea más fácil de interpretar. En el *Anexo B* encontramos los valores numéricos para todos los caudales ensayados, incluyendo aquellos que no se representan en los gráficos.

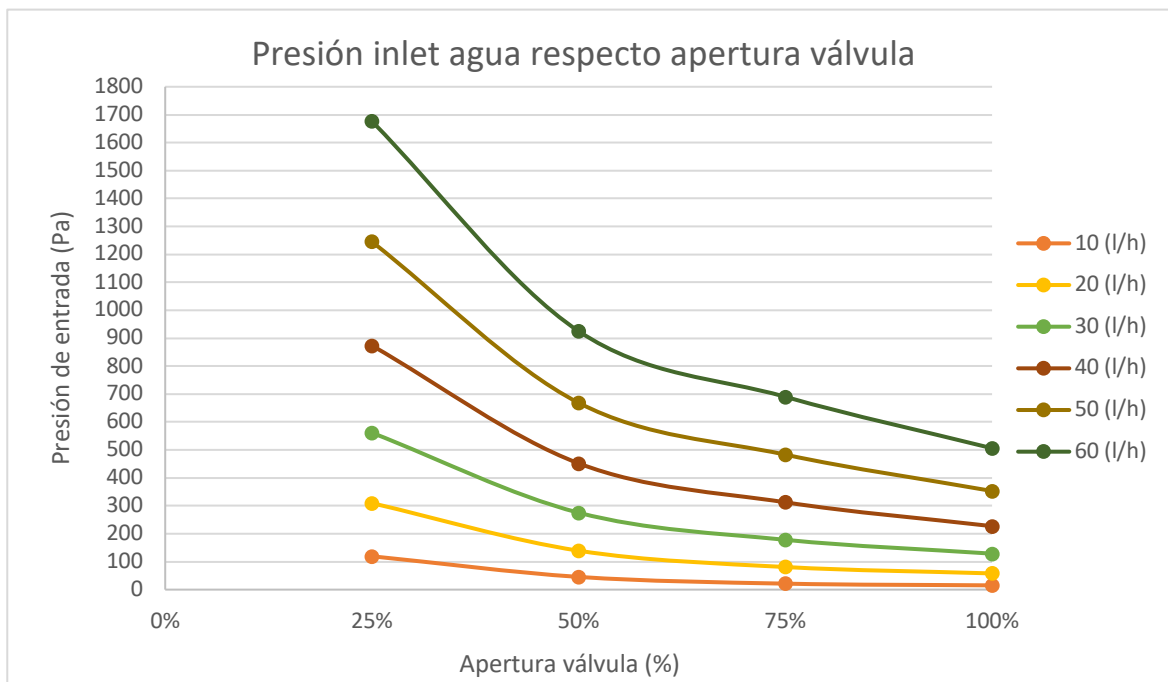


Gráfico 11 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para agua (Fuente propia)

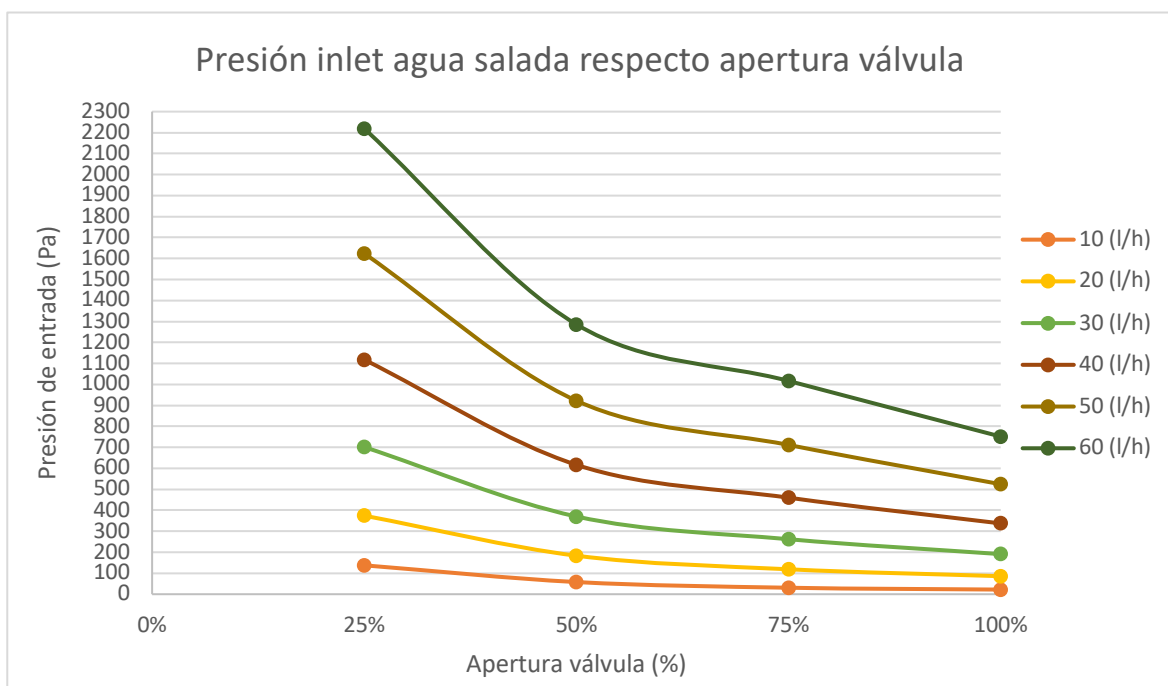


Gráfico 12 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para agua salada (Fuente propia)

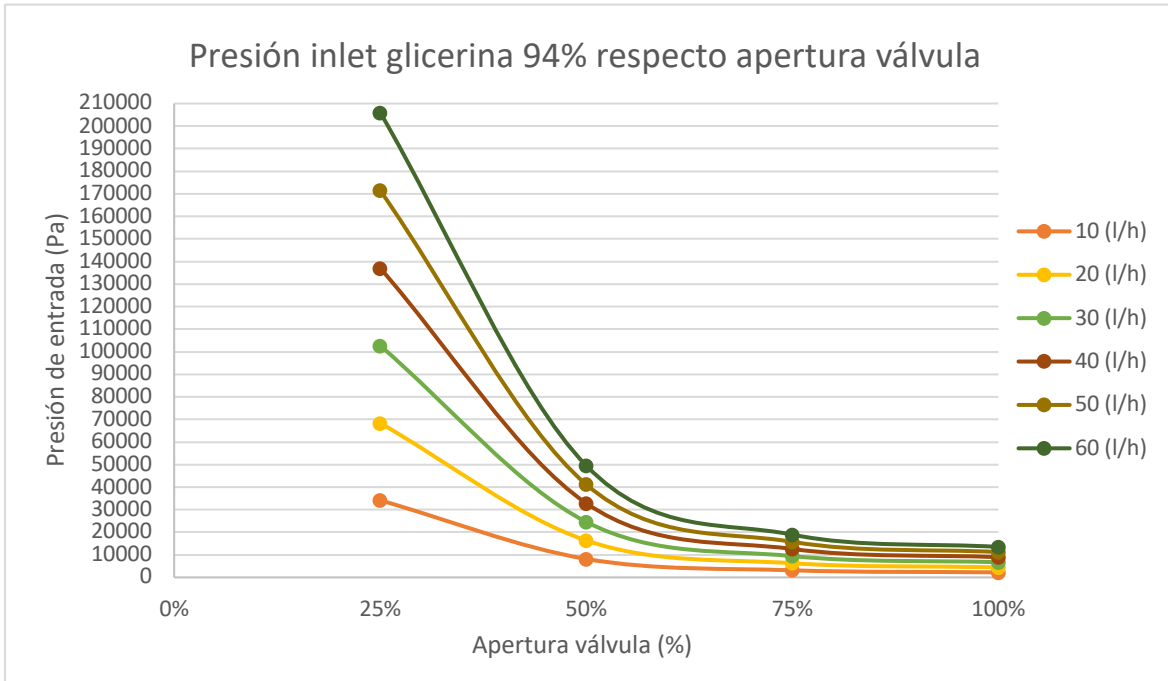


Gráfico 13 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 94% (Fuente propia)

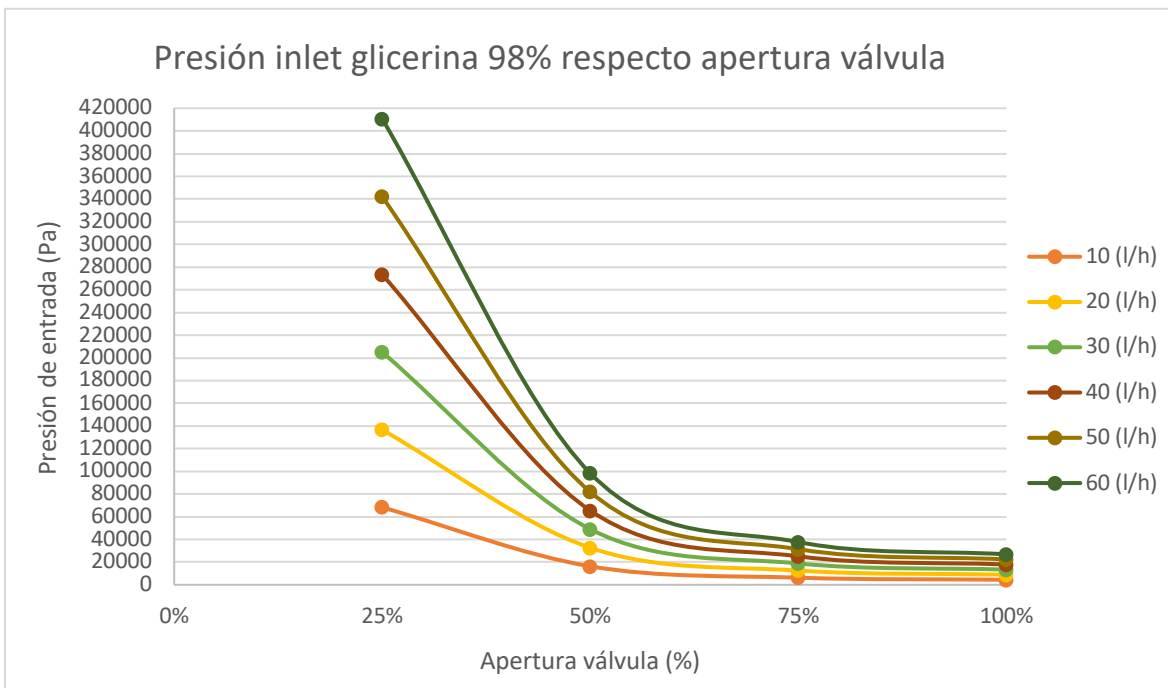


Gráfico 14 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 98% (Fuente propia)

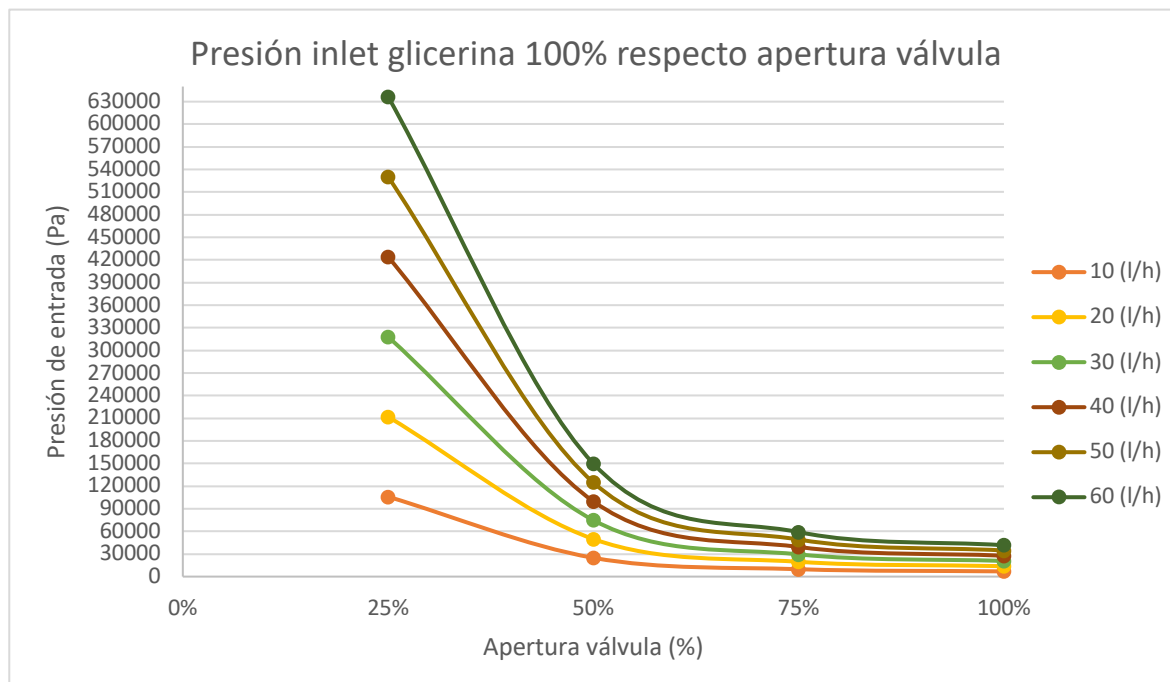


Gráfico 15 - Evolución presión de entrada en función apertura válvula para glicerina 100% (Fuente propia)

En referencia a las gráficas anteriores, podemos ver una diferencia notable en la evolución de la presión para el agua y el agua salda. A medida que aumentamos el caudal, vemos como la diferencia de presiones para pasar de un caudal a otro cada vez es más notable. Es decir, el incremento de presión que necesitamos para pasar de 20 a 30 (l/h) es menor al incremento que se tiene para pasar de 50 a 60 (l/h). Además, como la viscosidad es pequeña vemos que para caudales pequeños se necesita la misma presión en cualquier posición de bola.

En cuanto a los tres últimos gráficos correspondientes a las glicerinas, podemos ver lo comentado anteriormente acerca de la gran presión inicial que se necesita para empezar a hacer circular el fluido. Otro factor para corroborar la afirmación anterior se refleja en la presión que se necesita cuando pasamos el 50% de apertura ya que no hay tanta diferencia entre ellas. Sin embargo, se requeriría una instalación mucho más compleja que con fluidos poco viscosos debido al gran valor de presión que se necesita.

9.2.3 Coeficiente de pérdidas

En el siguiente dibujo podemos ver el coeficiente de pérdidas adimensional en el eje de ordenadas y la apertura de la válvula, nuevamente en porcentaje, en el eje de abscisas. Se pueden encontrar las tablas con los valores numéricos en el *Anexo B* para todos los caudales simulados.

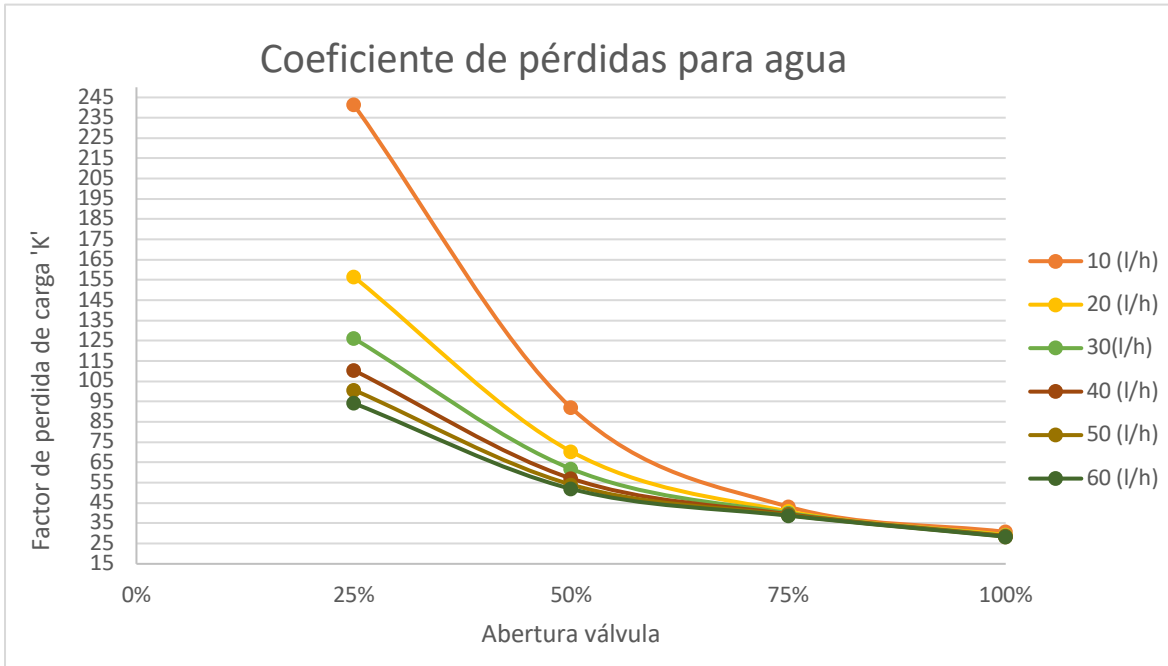


Gráfico 16 - Coeficiente de pérdidas para agua (Fuente propia)

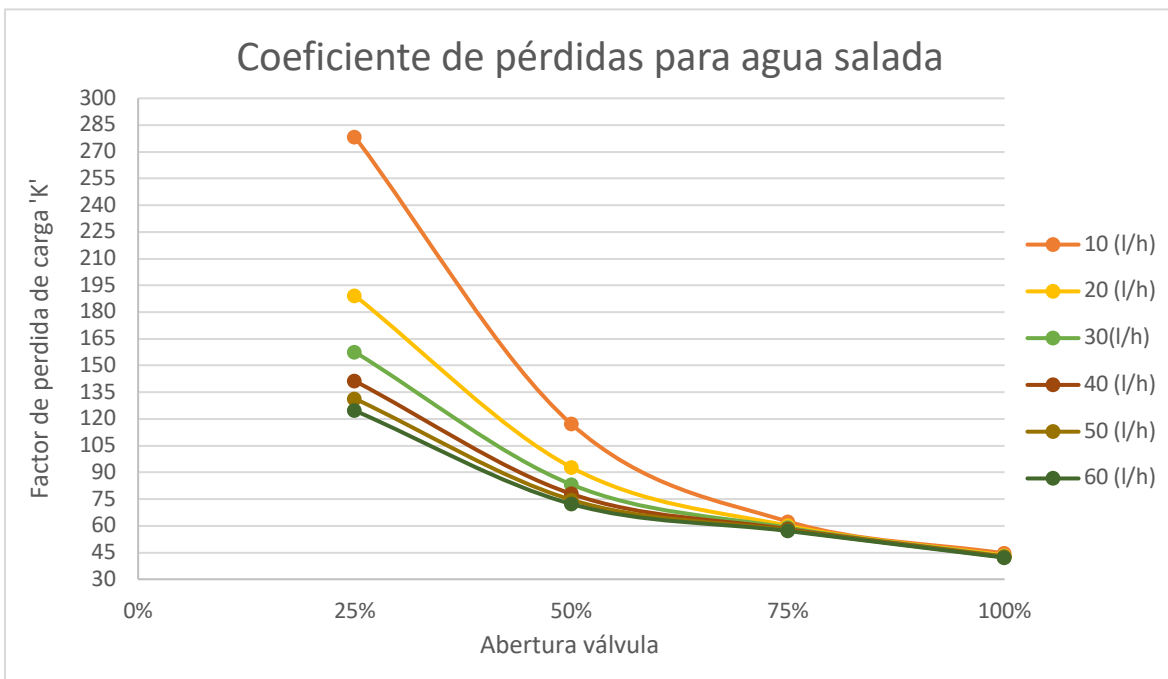


Gráfico 17 - Coeficiente de pérdidas para agua salada (Fuente propia)

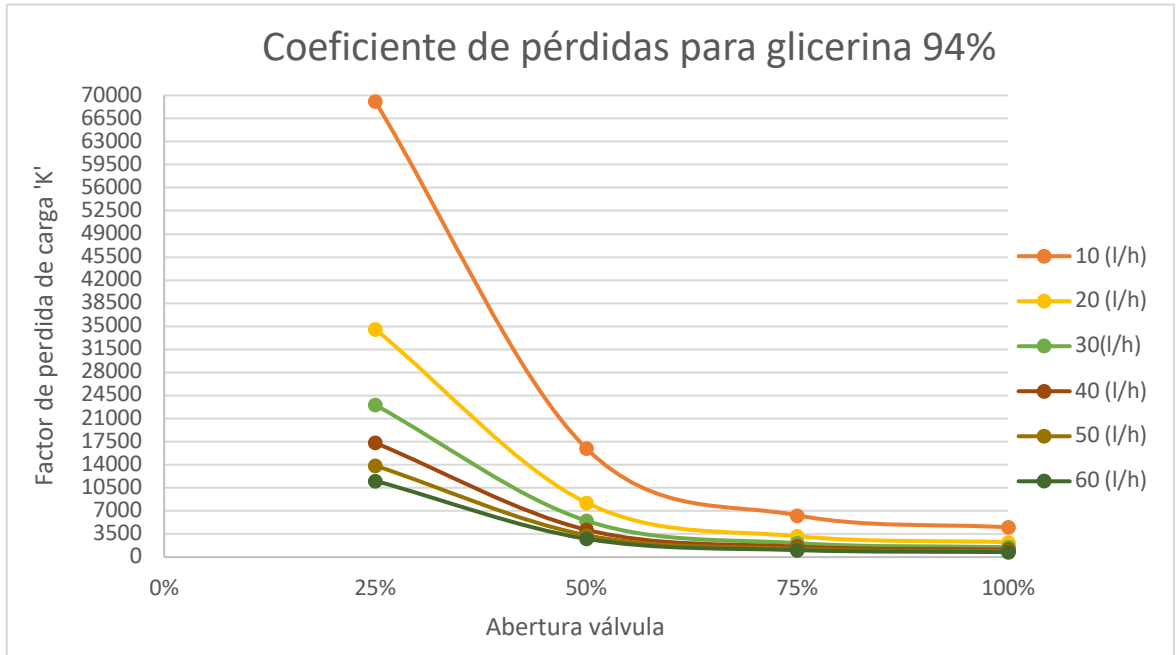


Gráfico 18 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 94% (Fuente propia)

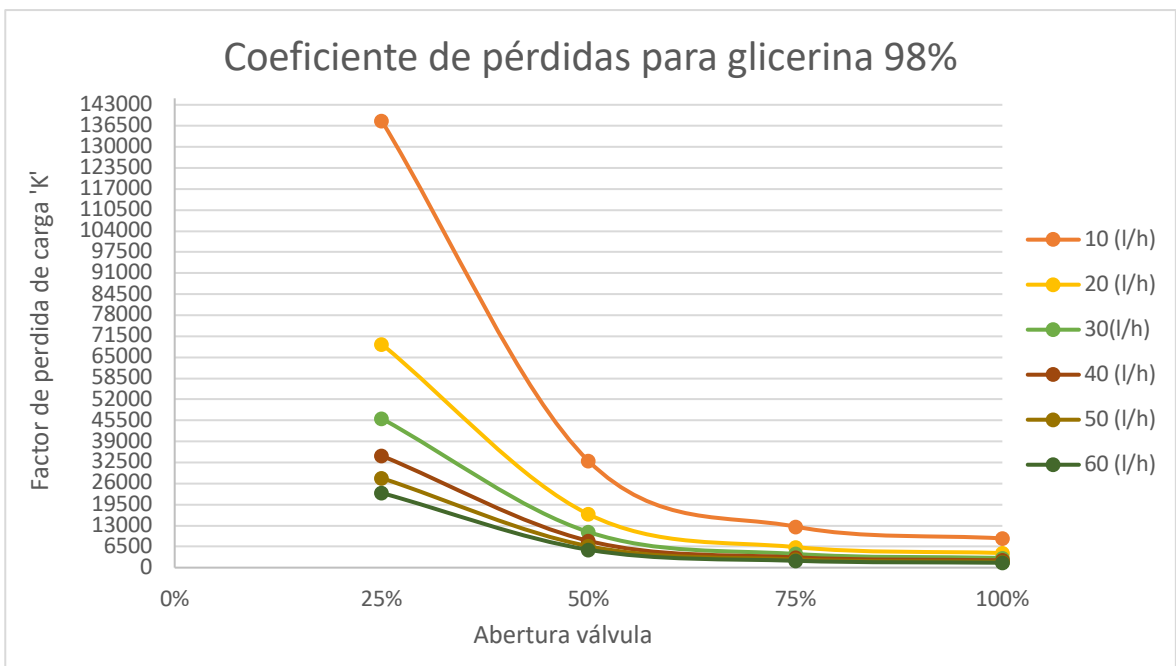


Gráfico 19 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 98% (Fuente propia)

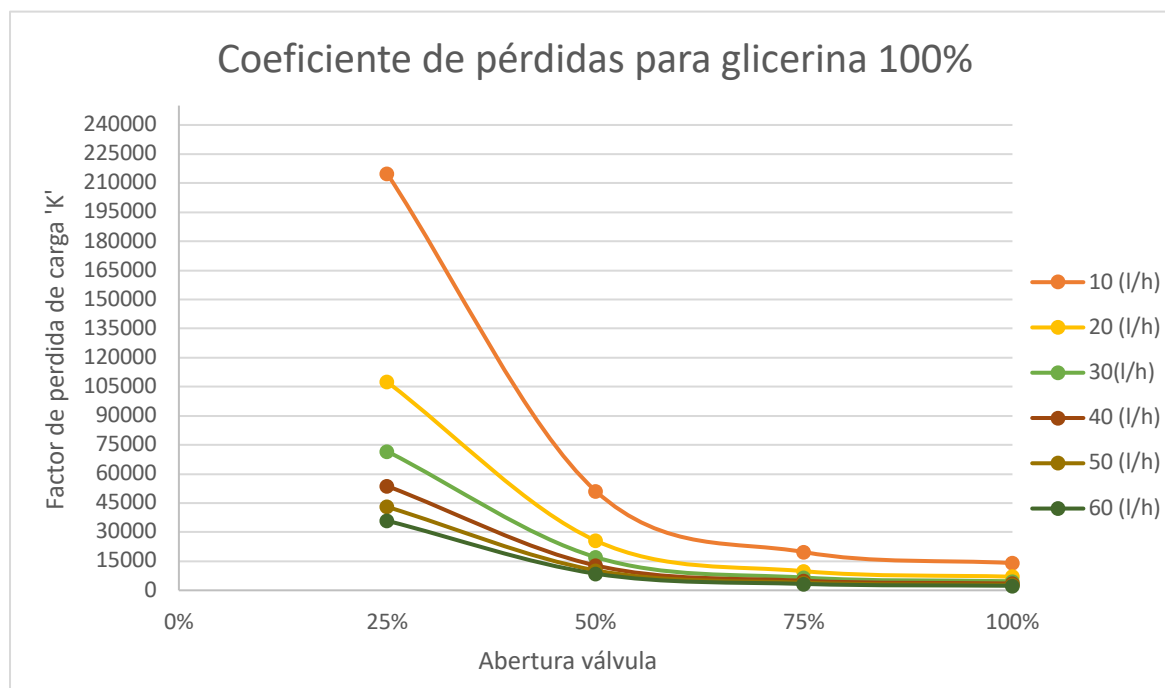


Gráfico 20 - Coeficiente de pérdidas para glicerina 100% (Fuente propia)

Del mismo modo que antes, para comentar las gráficas anteriores se empezará por las dos primeras que tienen la misma viscosidad y posteriormente se comentarán las que comparten la misma densidad.

En primer lugar, vemos que el coeficiente de pérdidas es mayor cuando tenemos caudales elevados y aperturas pequeñas mientras que, a medida que abrimos la válvula, el coeficiente de pérdidas es igual para todos los caudales en ambos líquidos. Este factor puede ser importante ya que en realidad cuando hacemos pasar el fluido a través de la válvula la bola interior, que regula el grado de apertura, alcanzará su posición máxima pocos segundos. Por tanto, como más caudal se hace circular más rápida será esa transición y menos pérdidas se tendrán, ya que se podrá controlar mejor la cantidad de fluido que se suministra.

En segundo lugar, vemos que la tendencia para todas las glicerinas es la misma que para el agua y el agua salda, pero tenemos un incremento muy notable de los valores del coeficiente de pérdidas ocasionado por el aumento de la viscosidad.

Por último, para confirmar la afirmación anterior acerca del movimiento de la bola interior se debería hacer un estudio en Comsol simulando dicha transición y buscando el tiempo que tarda en llegar a su

posición máxima, lo cual podría ser perfectamente una propuesta de trabajo de final grado como continuación al presente proyecto.

9.2.4 Coeficiente de capacidad de la válvula

En las representaciones siguientes, tenemos el coeficiente de capacidad de la válvula adimensional en el eje de ordenadas y la apertura de la válvula en porcentaje en el eje de abscisas. En el *Anexo B* se encuentran los valores numéricos correspondientes a los siguientes gráficos donde, del mismo modo que en los casos anteriores, se incluyen los valores el coeficiente de capacidad para los caudales que no se han representado.

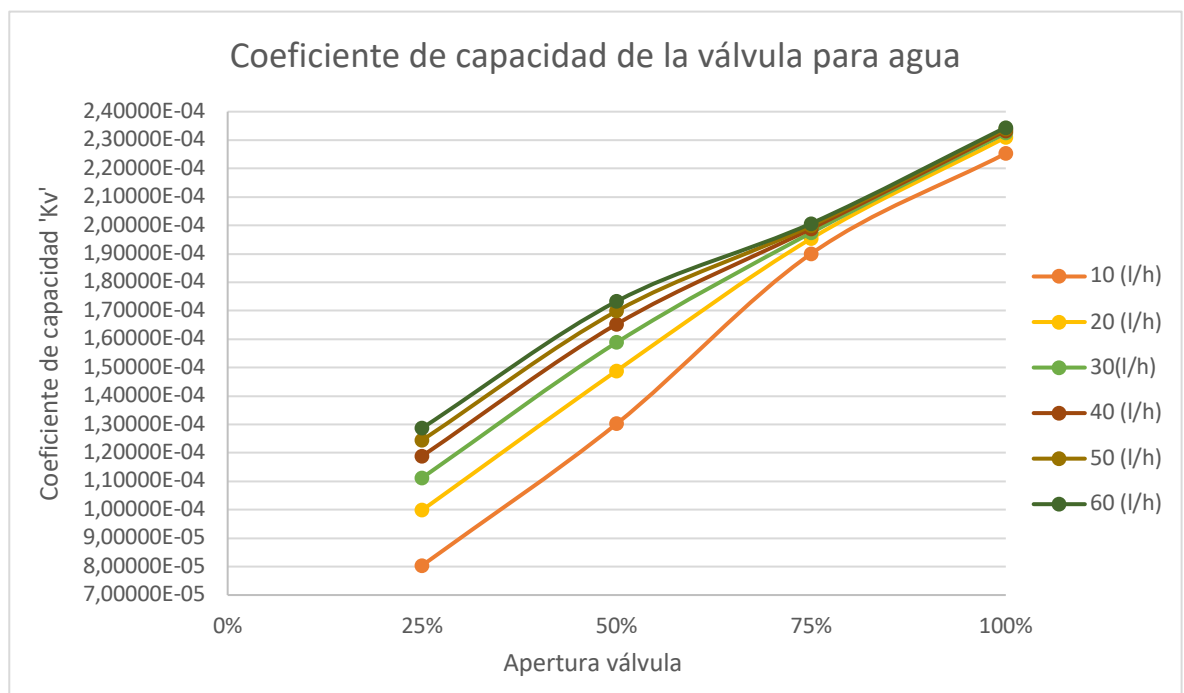


Gráfico 21 - Coeficiente de capacidad de la válvula para agua (Fuente propia)

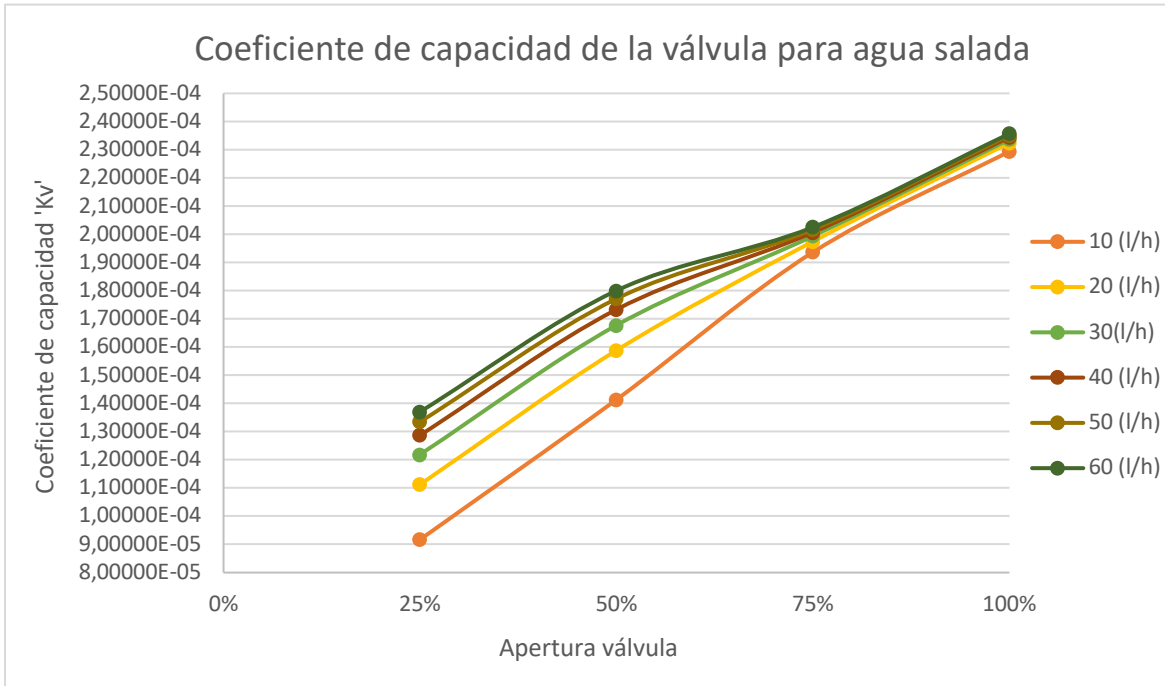


Gráfico 22 - Coeficiente de capacidad de la válvula para agua salada (Fuente propia)

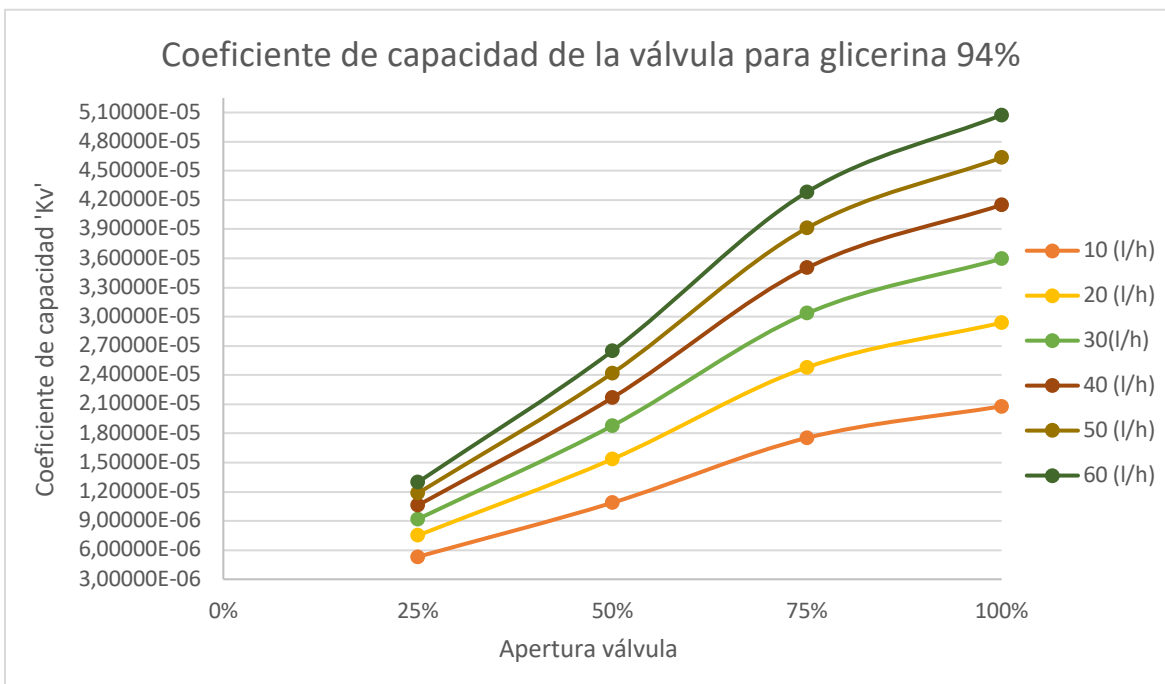


Gráfico 23 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 94% (Fuente propia)

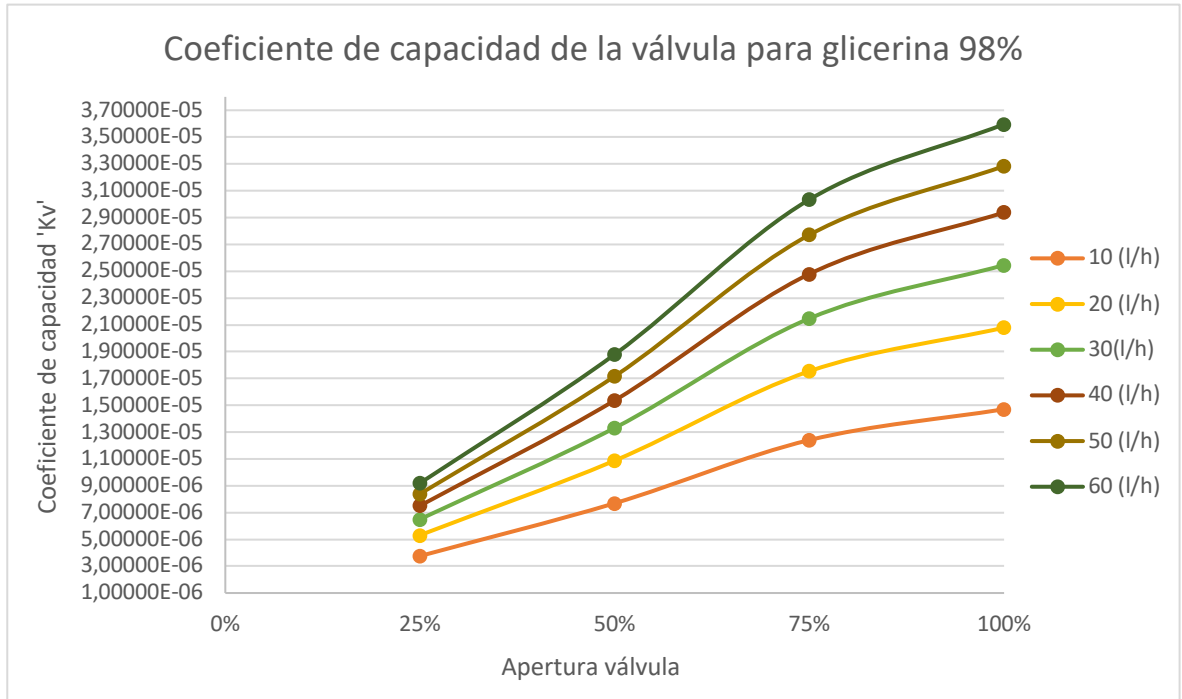


Gráfico 24 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 98% (Fuente propia)

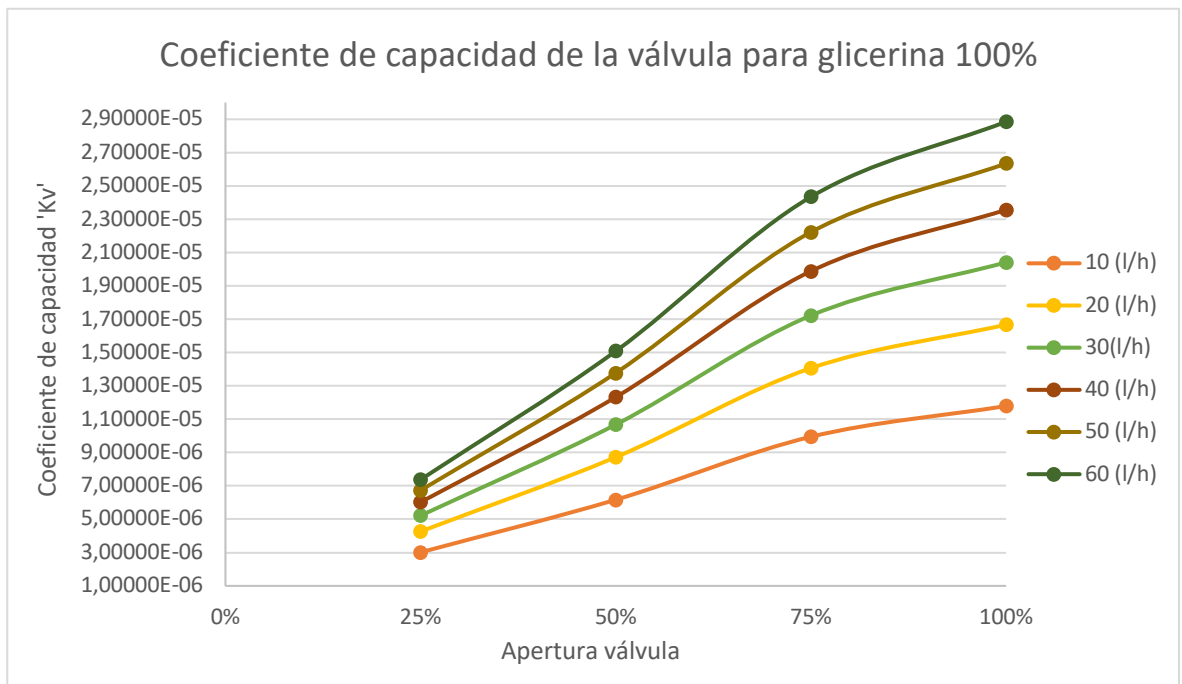


Gráfico 25 - Coeficiente de capacidad de la válvula para glicerina 100% (Fuente propia)

Como en los casos anteriores, para las primeras gráficas correspondientes al agua y al agua salada, vemos que tenemos una tendencia similar en ambos casos. El coeficiente de capacidad cuando la válvula está al 25% tiende hacia un mismo valor a medida que aumenta el caudal. No obstante, cuando la apertura es del 100% la capacidad de la válvula es prácticamente la misma independientemente del caudal que le hagamos pasar, excepto si el caudal es muy pequeño como, por ejemplo, de 10(l/h).

Sin embargo, al analizar los casos con glicerina, sin tener en cuenta si es glicerina 94%, 98% o 100%, vemos que el comportamiento es completamente el contrario. Esto es algo realmente interesante ya que nos da a entender que el coeficiente de capacidad está estrictamente relacionado con la viscosidad del fluido debido a que la densidad de la glicerina, en todos los casos, se encuentra entre 1000 kg/m^3 y 1500 kg/m^3 . Además, el valor de dicho coeficiente va disminuyendo de forma considerable a medida que aumentamos la viscosidad.

9.2.5 Distribución de velocidades, presiones y líneas de flujo

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente las imágenes de este bloque de resultados se encuentran en el *Anexo B*. Con los resultados obtenidos podemos ver cómo se distribuye el perfil de velocidades, de presión y las líneas de corriente a medida que aumentamos el caudal y la apertura de la válvula. Como se ha comentado anteriormente, en el caso de la distribución de velocidad y de presión, la representación únicamente varia cuando cambiamos la posición de la bola. Es decir, aunque cambiemos el caudal la distribución será la misma si la posición de la bola permanece igual, solo nos variarán las escalas de valores.

En segundo lugar, si nos fijamos en la evolución de la velocidad cuando el fluido atraviesa la válvula vemos que en las zonas donde se produce un estrechamiento el fluido aumenta su velocidad. Este hecho nos puede indicar que la física que hemos utilizado ha sido implementada correctamente ya que para mantener un valor de caudal constante a lo largo de la válvula se debe aumentar la velocidad del fluido en aquellas zonas donde el área de paso disminuye. Sin embargo, las velocidades más elevadas únicamente se encuentran concentradas en la zona donde el fluido debe empezar a bordear la bola interior, mientras que, una vez ha pasado dicho estrechamiento la distribución de velocidades es bastante uniforme. Por otro lado, hay que destacar que la diferencia más notable entre los diversos fluidos está en salida de la válvula: las glicerinas tienen menos velocidad al salir de la válvula en comparación con el agua y el agua salada.

Del mismo modo que el perfil de velocidades, la distribución de presiones nos refleja que la condición impuesta en la salida se cumple ya que la presión va disminuyendo hasta ser cero en la salida. También, se observa que independientemente del caudal que hagamos pasar la distribución de las presiones es la misma, pero con una escala mayor a medida que aumentamos el caudal. Por tanto, el único parámetro que modifica dicha distribución es la posición de la bola y la viscosidad del fluido que se haga circular.

En referencia a las líneas de flujo transversales, se desarrollan uniformemente a medida que abrimos la válvula independientemente del fluido que se haga pasar. La única diferencia visible es la velocidad con la que se mueve el fluido, lo cual se representa mediante el tamaño de las flechas de corriente.

Por otro lado, las líneas de flujo perpendiculares en la sección de entrada donde se encuentra la bola nos muestran la formación de pequeños vórtices, los cuales desaparecen al alcanzar el 25% de apertura para el agua y para el agua salada. Del mismo modo, dichos vórtices se prolongan hasta que no se supera el 50% de apertura para el caso de las glicerinas. Hay que destacar que, el aumento del caudal de entrada no evita la formación de dichos vórtices en ningún caso, únicamente aumenta la velocidad de las líneas de flujo.

Por último, en la sección de salida de la válvula después de bordear la bola interior, vemos una pequeña diferencia al comparar el agua y el agua salada con las glicerinas. Como se ha podido observar en el apartado de geometría, tenemos cuatro nervios en la salida de la válvula los cuales tienen la función de hacer de asiento de la bola cuando esta alcanza su posición máxima. Para el agua y el agua salada vemos que se vuelven a formar pequeños remolinos a medida que aumentamos la apertura de la válvula. Mientras que, para las glicerinas tenemos unas líneas de corriente más uniformes y no nos aparecen interferencias para ningún caudal y ninguna posición de bola. A modo de conclusión, podríamos decir que como menos viscoso es el fluido más tendencia tiene a formar vórtices debido a que pueden alcanzar más velocidad al llegar a la salida de la geometría.



10. App para el estudio

Tras realizar los estudios para diferentes fluidos a partir de un rango de caudales de entrada, podemos empezar con la segunda parte del presente proyecto que consiste en la creación de una app para poder realizar estudios y explorar los resultados obtenidos. Debido a la cantidad de información que se ha generado en los estudios y a la complejidad para poder explorar tales resultados, o incluso para estudiar nuevos casos, se ha decidido crear una aplicación para facilitar ambas acciones.

Por tanto, la siguiente aplicación tiene la finalidad de realizar estudios sencillos para distintos fluidos cuyas propiedades, como la densidad y la viscosidad, queden dentro del rango definido. Además, también se la ha dotado con la capacidad de poder explorar los resultados más relevantes obtenidos en nuestro estudio anterior. Por tanto, a priori podemos decir que nuestra aplicación tiene dos funciones principales; simular y explorar. A lo largo de este apartado, podemos encontrar la forma en que se ha organizado además del motivo por el cual se ha diseñado de tal manera.

Hay que destacar que, para llevar a cabo la construcción de dicha aplicación se ha utilizado el módulo de “Constructor de aplicación” que dispone el programa Comsol. Dentro de este módulo encontramos muchísimas herramientas auxiliares que nos pueden ayudar a programar cosas realmente difíciles mediante el lenguaje Java, o bien, simplificarlos significativamente la creación de la aplicación sin la necesidad de conocer el lenguaje de programación anterior.

Por otro lado, este módulo tiene la finalidad de facilitar al usuario un método para crear una interfaz amigable, seleccionando solo los parámetros y los datos de mayor importancia, para que cualquier otra persona pueda entender el estudio y llevar a cabo sus propios análisis sin necesidad de tener tanto conocimiento previo. Esto es realmente interesante ya que nos permite reducir el coste de la infraestructura de cálculo y la dificultad de las simulaciones al mínimo.

Por último, lo que se ha buscado desde el principio de la construcción de la aplicación es que sea algo funcional, ligero y ágil. Por este motivo, se ha intentado en todo momento seleccionar aquello más relevante para poder entender con claridad el estudio que se ha echo, pero manteniendo siempre un equilibrio entre agilidad y finalidad. En el caso de querer conocer más acerca de la app como, por ejemplo, ver algún ejemplo de cómo llevar a cabo simulaciones o ver cómo explorar los resultados existentes, véase el manual de uso de la aplicación en el *Anexo C*.

10.1 Pantalla principal

En primer lugar, cuando ejecutamos la aplicación nos encontramos un interfaz donde podemos seleccionar las condiciones de entrada del fluido y las propiedades del fluido que queremos estudiar. Por tanto, la pantalla principal está exclusivamente dedicada a la realización de simulaciones y a explorar los resultados del estudio realizado previamente por el usuario.

La distribución de esta primera pantalla principal está compuesta por cuatro zonas diferentes. Por un lado, a la izquierda de la pantalla tenemos la entrada de valores para el estudio, los resultados de la simulación más relevantes y un pequeño bloque con información adicional acerca de la aplicación. Por otro lado, se ha insertado un recuadro de visualización de gráficos para poder ver la geometría, la malla y los resultados gráficos de las simulaciones que realice el usuario. A continuación, podemos ver una imagen de dicha distribución:

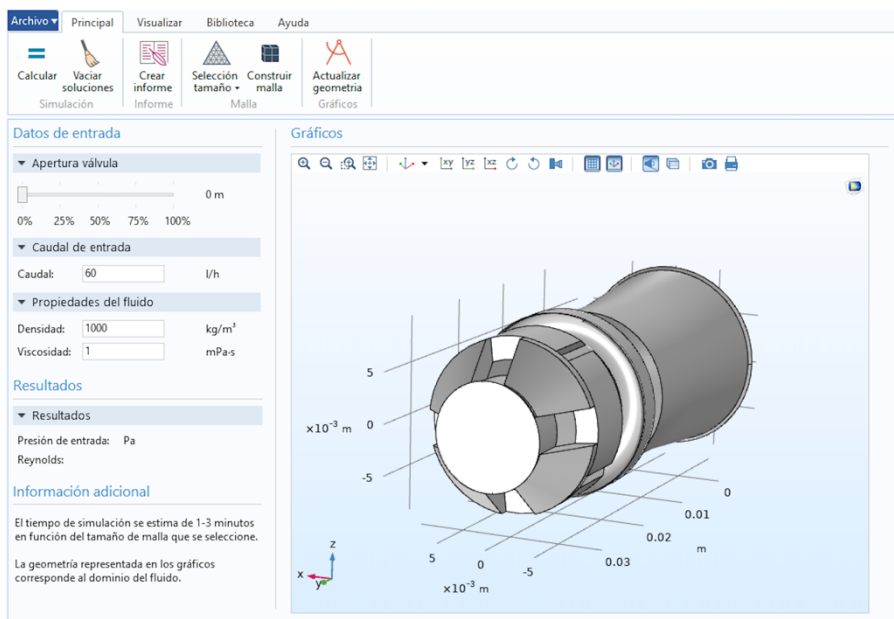


Imagen 22 - Pantalla principal de simulación (Fuente propia)

Cabe destacar que, todos los ítems destinados a dar las ordenes de realizar el cálculo, crear la malla, actualizar la geometría o visualizar resultados están situados en la barra de menús situada encima. El motivo por el cual se ha diseñado así es que nos interesa empezar a familiarizar al usuario con el estilo de Comsol o bien, hacer que el usuario se sienta más cómodo en el caso de tener experiencia previa

con el software. La disposición de dichos ítems en la barra de menús se explica más adelante en el presente apartado.

10.2 Pantalla secundaria

En referencia a la pantalla secundaria, cuando hablamos de ella nos referimos a la interfaz que nos muestra la aplicación cuando queremos entrar a la biblioteca para explorar los resultados que se han echo en la primera parte de este proyecto. Es decir, cuando se quieren analizar los resultados obtenidos para el rango de caudales seleccionado a diferentes aperturas de válvula para los cinco fluidos diferentes.

Hay que destacar que, la primera idea inicial del diseño de la app no incluía la opción de añadir los resultados que se han obtenido en el proyecto. Sin embargo, toda funcionalidad que se pueda añadir y que no afecte a la ligereza de la app es bienvenida. No obstante, no se han incluido los mismos gráficos que se permiten visualizar para las simulaciones realizadas por el usuario ya que es mucha información y nos perjudica la velocidad de la app. Por este motivo, en el apartado de biblioteca únicamente encontramos los gráficos de presión de entrada en función del caudal, para conocer en cada caso la presión que necesitamos, que es lo que verdaderamente nos importa.

En cuanto a la organización del interfaz, se podría considerar muy simple ya que únicamente cuenta con un solo elemento, el gráfico comentado anteriormente. Si se hubieran insertado las imágenes de la distribución de la velocidad, presión y líneas de flujo se podrían haber añadido otras herramientas para poder modificar los valores de entrada en cada uno y así, poder observar diferentes situaciones. Esto es un ejemplo más de lo potente que es el módulo de construcción de aplicaciones y de la gran variedad de posibilidades que nos otorga. En cuanto a la organización de dicha pantalla, la podemos ver a continuación:

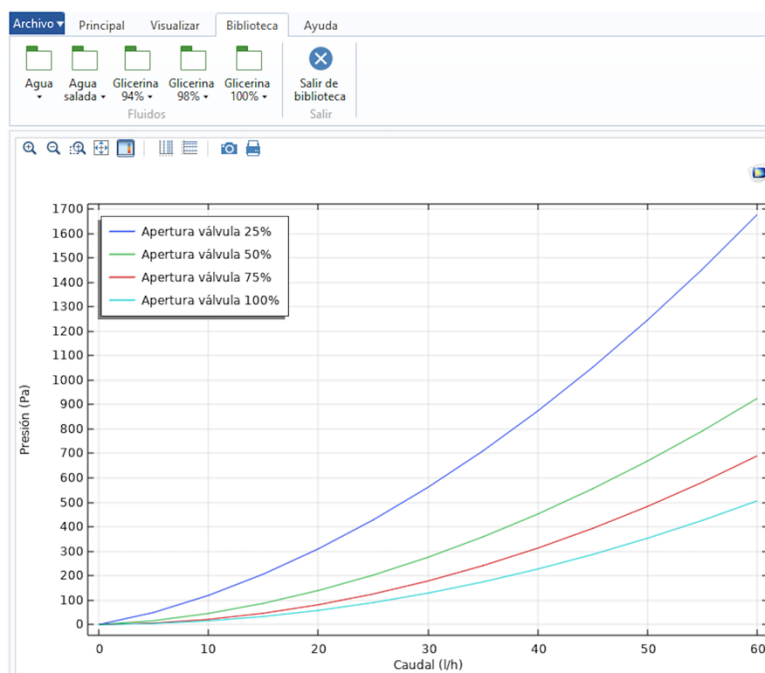


Imagen 23 - Pantalla secundaria (Fuente propia)

10.3 Barra de menús

Como ya se ha comentado anteriormente, se ha optado por este tipo de presentación para familiarizar al usuario con el diseño de Comsol o hacer que se sienta más cómodo usando una interfaz familiar en el caso de tener experiencia previa. Además, también se ha construido de esta forma con el fin de poder cambiar de interfaz y pasar de la pantalla principal a la secundaria con la mayor facilidad posible. A continuación, podemos ver las diferentes secciones que componen la barra de menús:

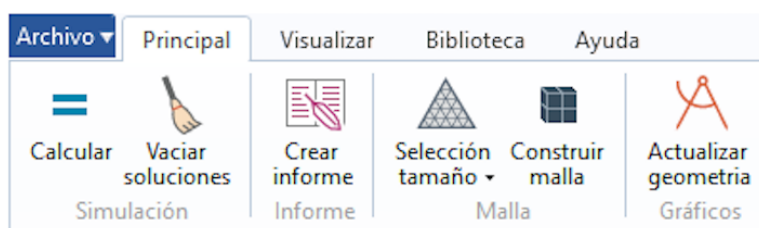


Imagen 24 - Contenido barra menús sección principal (Fuente propia)

Como podemos apreciar, en la sección de “Principal” que se nos muestra en la imagen anterior está todo lo relacionado con la pantalla principal de simulación. Por otro lado, en el apartado de “Visualizar” tenemos los ítems que se encargan de mostrar los gráficos 3D en la sección destinada a ello dentro del interfaz principal, los cuales provienen del estudio que realice el usuario. En el caso de que no se haya

echo ninguna simulación, nos mostrará el gráfico igual, pero estará vacío ya que no dispone de soluciones para crearlo.

Por otro lado, para pasar a la pantalla secundaria y poder ver los resultados de nuestro proyecto es suficiente con entrar en la sección de “Biblioteca”, elegir el fluido del cual se este interesado y desplegar su menú para seleccionar el gráfico de presión en función del caudal. A continuación, tras hacer clic en dicha opción desaparecerá la pantalla principal y únicamente se nos mostrará el gráfico seleccionado. Seguidamente, podemos ver el contenido de dicho apartado:

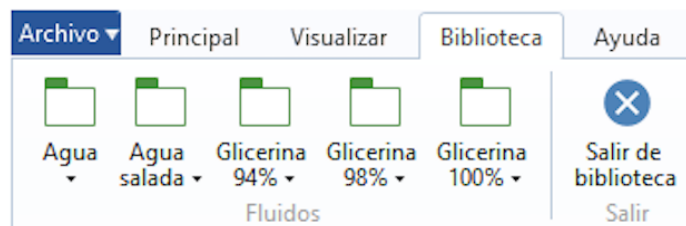


Imagen 25 - Contenido en barra de menús de la biblioteca (Fuente propia)

Hay que destacar que, en el caso de que se quiera volver al interfaz que nos permite hacer cálculos, basta con hacer clic en el ítem “Salir de biblioteca” que podemos ver en la imagen anterior.

Por último, como se ha comentado previamente al inicio de este apartado, en la sección de “Ayuda” encontramos un documento con información más detallada acerca de los aspectos generales de la app, un ejemplo para llevar a cabo con éxito una simulación y un ejemplo para ver como explorar los resultados.



11. Estudio impacto ambiental

En este capítulo podemos encontrar un estudio del impacto ambiental que ha producido la elaboración del presente proyecto.

Primero de todo, para llevar a cabo el trabajo se han utilizado dos ordenadores portátiles debido a que uno de ellos tiene el sistema operativo Apple y nos supone muchas dificultades a la hora de instalar softwares como Comsol. Por este motivo, se ha requerido de un segundo ordenador portátil con sistema operativo Windows. Todo lo referente a la búsqueda de información y a la redacción del proyecto se ha echo utilizando el ordenador Apple, mientras que las simulaciones y la creación de la app se ha realizado con el ordenador Windows.

Para llevar a cabo el análisis del impacto ambiental, previamente se ha tenido que hacer un recuento de las horas que se han necesitado para desarrollar el trabajo con el fin de intentar ser lo más exacto posible. En cuanto al consumo de cada ordenador, se considerará que de media se consumen cada hora 220W para el Mac y 300W para el otro, ya que dispone de una memoria gráfica mucho más potente que se ha utilizado para ejecutar Comsol. Por otro lado, para obtener la cantidad de kg de CO₂ que se han generado necesitamos conocer el factor mixto de emisiones que tiene nuestra comercializadora de electricidad. En nuestro caso, la empresa que nos suministra la electricidad, según un documento oficial del gobierno de España, tiene un factor de 0,27. A continuación, en la tabla siguiente encontramos toda la información necesaria para llevar a cabo el estudio:

	Horas de trabajo	Consumo [kW]	Consumo Total [kWh]	Factor de emisiones [kgCO ₂ /kWh]	Emisiones [kg CO ₂]
Ordenador Apple	130	0,22	28,6	0,27	7,722
Ordenador Windows	103	0,3	30,9	0,27	8,343
Total emisiones [kg CO₂]					16,065

Tabla 9 - Impacto ambiental del estudio

En conclusión, vemos que las emisiones para llevar a cabo este estudio son muy bajas en comparación con el número de horas que se han necesitado. Esto es sumamente importante ya que gracias a Comsol se ha conseguido estudiar la válvula sin realizar experimentos físicos, los cuales tienen un mayor impacto ambiental.



Conclusiones

Tras obtener y analizar los resultados de los distintos ensayos que se han llevado a cabo, podemos afirmar que el estudio CFD de las prestaciones fluidodinámicas de la válvula antirretorno de bombas dosificadoras ha sido llevado a cabo con éxito.

En primer lugar, podemos afirmar que el aumento de la viscosidad tiene un efecto mucho mayor sobre las prestaciones de la válvula que el aumento de la densidad. Para corroborar esta afirmación, basta con fijarnos en que la presión de entrada para la glicerina 94% es veinte veces mayor que para el agua salada. Asimismo, si comparamos las diferentes glicerinas vemos que el aumento de la presión de entrada es proporcional al aumento de la viscosidad. Además, este hecho también se refleja en el aumento del coeficiente de pérdidas y en la disminución del coeficiente de capacidad de la válvula. No obstante, hubiera sido muy interesante poder ajustar algunos parámetros geométricos para intentar enfocar la válvula al uso de fluidos viscosos ya que nos hubiera ofrecido mucha más información acerca del comportamiento de esta. Hay que recalcar que no se ha podido llevar a cabo a falta de la licencia de LiveLink, el módulo que permite hacer la sincronización entre SolidWorks y Comsol. Sin embargo, es una propuesta muy interesante que se podría llevar a cabo como otro trabajo de final de grado complementario al presente proyecto.

En segundo lugar, se ha comprobado que los fluidos con viscosidades bajas similares a la del agua no presentan ningún problema, aunque se aumente su densidad. Este hecho queda demostrado cuando se comparan las presiones entre el agua y el agua salada, ya que las presiones que se necesitan para hacer pasar un mismo caudal tienen muy poca diferencia. A más a más, el valor del coeficiente de pérdidas y del coeficiente de capacidad de la válvula se mantiene prácticamente constante en ambos casos en las situaciones de apertura máxima. Por tanto, podemos concluir que los fluidos con una viscosidad baja y con una densidad entre 1000 y 1500 kg/m³ son aptos para el uso de la válvula estudiada. Sin embargo, sigue siendo un rango de densidades pequeño y convendría aumentarlo para buscar los límites y aumentar el intervalo.

En cuanto al proceso previo al cálculo, podemos afirmar que, tanto el estudio de convergencia como las condiciones iniciales impuestas han sido correctas ya que se han obtenido resultados coherentes. Además, esta afirmación también se refleja en las representaciones de la velocidad y de la presión porque siguen el comportamiento que se esperaba desde un principio.

En referencia a la creación de la aplicación del modelo estudiado, podemos concluir que ha sido todo un éxito ya que se ha conseguido programar como una herramienta de estudio y como una herramienta de exploración de resultados, manteniendo el vínculo entre agilidad y funcionalidad. De igual forma, se ha dotado la aplicación con un diseño y con una organización amigable con la intención de familiarizar al usuario con el entorno de Comsol o, en el caso de que el usuario sea todo un experto, pueda extrapolar su conocimiento previo del software para intuir de forma sencilla el funcionamiento de la app. Hay que destacar que la creación de este tipo de aplicaciones puede ser algo de gran utilidad que incluso, podría llegar a plantearse como un modelo de negocio muy interesante.

Por último, a nivel personal podemos concluir que el presente proyecto ha sido clave para poner en práctica los conocimientos obtenidos acerca del programa, de los métodos de elementos finitos y para llevarlos más allá, aprendiendo a crear aplicaciones con todo tipo de funcionalidades para cualquier modelo que se simule en Comsol. Me gustaría destacar que, este último hecho me ha despertado mucha curiosidad acerca de la creación de aplicaciones, ya sean destinadas o no para temas de ingeniería, con lo que seguiré investigando para adquirir más conocimiento y poder sacar beneficios en un futuro.

Bibliografía

- [1] White, Frank M. *Mecánica de Fluidos 5ª Edición*. McGraw-Hill, 2004.
- [2] Martín Domingo, Agustín. *Apuntes mecánica de fluidos*. UPM, 2006/7.
Disponible en: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- [3] Blasco Alberto, Javier. *Teoría en válvulas y accesorios*. Universidad de Zaragoza, 2011.
Disponible en: http://piping.unizar.es/ejemplo_valvulas.pdf
- [4] Torres, R., Grau, J. *Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con Comsol Multiphysics*. Addlink Media, 2007.
- [5] Crane. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill, 1988.
Disponible en: https://www.academia.edu/7436924/1_Flujo_de_Fluidos_en_valvulas_Acesorios_y_Tuberias_-_Crane_-_Mc_Graw_Hill
- [6] Di Capua, Daniel. *Aplicaciones de la mecánica computacional*. ERM, 2007.
- [7] Carnicero, Alberto. *Introducción al método de elementos finitos*. Universidad Pontificia Comillas, 2001. Disponible en: https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf
- [8] Comsol Multiphysics. *System Requirements*. Disponible en: <https://www.comsol.com/system-requirements/54/general>
- [9] Comsol Multiphysics. *Recommended Hardware*. Disponible en: <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/866>
- [10] Wikipedia. *Introduction to Comsol Multiphysics*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics

- [11] Addlink. *Comsol Modules*. Disponible en:
<https://www.addlink.es/productos/comsol-multiphysics>
- [12] Comsol Support. *Aplication builder manual*. Disponible en:
https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ApplicationBuilderManual.pdf
- [13] Comsol Support. *Introduction to aplication builder*. Disponible en:
<https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToApplicationBuilder.pdf>
- [14] Youtube. *How to create a simulation App*. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=CGjJGHu2ghw&t=19s>
- [15] Youtube. *How to set up an organized simulation App*. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=aDnPk-z0P7I&t=525s>
- [16] Youtube. *Builing simulation Apps with Comsol*. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=wqmu4HsMgkc&t=20s>
- [17] Gobierno de España. *Factor de emisiones de CO₂ de las comercializadoras españolas*. Disponible en:
https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-479095.pdf
- [18] Gomar, Juan. *¿Cuánto consume realmente nuestra computadora?* Actualización 26/4/2020. Disponible en:
<https://www.profesionalreview.com/2017/08/07/cuanto-consume-realmente-nuestro-ordenador/>
- [19] Precios módulos Comsol. Disponible en:
<https://webstore.illinois.edu/shop/product.aspx?zpid=3764>
- [20] Oliver, Xavier; Saracíbar, Carlos. *Mecánica de medios continuos para ingenieros*. Ediciones UPC, 2000.