



Simulación de la respuesta fluido-dinámica del sistema de refrigeración del sincrotrón ALBA

Detección de aire en tuberías

Alumno: Alex Baliu Henne

Director de proyecto: Xavier Escaler

Fecha: 06/05/2016

Resumen

Este proyecto consiste en desarrollar y validar un modelo numérico para simular la respuesta del sistema de refrigeración por agua del sincrotrón ALBA frente a perturbaciones o transitorios operacionales que sirvan para detectar posibles bolsas de aire.

Este trabajo correspondiente a la simulación de la respuesta fluido dinámica del sistema de refrigeración del sincrotrón ALBA forma parte de las actividades integradas en un plan de mejora de su estabilidad y fiabilidad promovido por el Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz Sincrotrón (CELLS).

El estudio se ha realizado mediante simulaciones transitorias unidimensionales con el programa "Flowmaster" para predecir los cambios en las presiones de las tuberías en presencia de depósitos de aire frente a fluctuaciones provocadas por la oscilación sinusoidal de la posición de cierre de una válvula.

La primera parte del proyecto ha consistido en el aprendizaje y la familiarización con el programa Flowmaster para, posteriormente, realizar las simulaciones. Para ello, se han diseñado modelos reducidos y simples para seleccionar los componentes y los parámetros adecuados para generar fluctuaciones y medir sus efectos. Además también se ha estudiado la sensibilidad del modelo a las características de las tuberías, al tipo de válvula oscilatoria, a la frecuencia y amplitud de la oscilación, entre otros. Finalmente se ha determinado la respuesta del sistema tanto aguas abajo como arriba de la perturbación.

Seguidamente, una vez asentados los conocimientos necesarios para la correcta realización de las simulaciones, se han simulado perturbaciones con el modelo real del sistema de refrigeración de CELLS ya previamente desarrollado que incluye los sistemas de bombeo y los anillos. En particular, se han llevado a cabo una serie de simulaciones numéricas con el objetivo de analizar las fluctuaciones de presión en distintos puntos de la instalación y sus cambios cuando existen bolsas de aire.

Como conclusión, el modelo real ha permitido verificar que la respuesta del sistema cambia frente a las perturbaciones generadas y por lo tanto dicho conocimiento puede ser aplicado a la detección de bolsas de aire en la instalación.

Sumario

RESUMEN	2
SUMARIO	4
1. PREFACIO	9
1.1. Origen del proyecto.....	9
1.2. Motivación.....	9
1.3. Requerimientos previos.....	10
2. INTRODUCCIÓN	11
2.1. Objetivos del proyecto.....	11
2.2. Alcance del proyecto.....	12
3. EL SINCROTRÓN ALBA	13
3.1. Breve descripción de la instalación.....	14
3.1.1. El edificio principal.....	15
3.1.2. Edificio técnico.....	16
3.1.3. El edificio del taller y el edificio de las oficinas.....	18
4. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	19
4.1. Funcionalidad de los componentes del sistema.....	19
4.2. Descripción del método numérico.....	21
4.2.1. Descripción del software Flowmaster.....	21
4.2.2. Descripción del modelo.....	22
5. INTRODUCCIÓN AL FLUJO EN CONDUCTOS	23
5.1. Teorema de la conservación de la masa.....	23
5.2. Teorema de la conservación de la cantidad de movimiento.....	23
5.3. Pérdidas de carga en conductos.....	24
5.3.1. Pérdida de carga en un conducto rectilíneo.....	25
5.3.2. Pérdidas de carga localizadas o accidentales.....	25
5.4. Sistemas de bombeo.....	26
5.4.1. Bombas roto-dinámicas.....	26
5.4.2. Bombas en serie y en paralelo.....	28
5.4.3. Sistemas de regulación.....	29
5.4.3.1. Depósitos.....	29
5.4.3.2. Regulación de válvulas.....	31

6.	PROBLEMAS DE LA PRESENCIA DE AIRE EN CONDUCTOS	33
6.1.	Introducción.....	33
6.2.	¿Por qué es el aire un problema?.....	33
6.3.	Fuentes principales de la presencia de aire en tuberías.....	35
6.4.	Patrones de flujo en conductos presurizados.....	36
6.4.1.	Patrones de flujo verticales.....	36
6.4.2.	Patrones de flujo inclinados.....	38
6.4.3.	Patrones de flujo horizontales.....	38
6.5.	Impacto del aire en el sistema.....	39
7.	TIPOLOGÍAS DE VÁLVULAS	43
7.1.	Clasificación de válvulas.....	43
7.1.1.	Lineales.....	43
7.1.2.	Multi-giro.....	43
7.1.3.	Cuarto de giro.....	44
7.2.	Válvula de mariposa.....	45
7.3.	Válvula de bola.....	46
7.4.	Válvula de globo.....	47
7.5.	Comparación de las leyes de cierre de las válvulas.....	48
8.	SIMULACIÓN DE PERTURBACIONES	51
8.1.	Validación de los componentes a utilizar.....	51
8.2.	Sensibilidad del sistema al tipo de perturbación.....	52
8.2.1.	Tipo de válvula.....	53
8.2.2.	Longitud de la tubería.....	55
8.2.3.	Número de tuberías.....	56
8.2.4.	Anchura de la tubería.....	57
8.2.5.	Señal del controlador.....	58
8.2.5.1.	Anchura de la señal del controlador.....	58
8.2.5.2.	Frecuencia de la señal del controlador.....	60
8.2.5.3.	Ratio de apertura de la señal sinusoidal del controlador.....	61
8.3.	Respuesta del sistema a la presencia de aire.....	62
8.3.1.	Simulaciones con el acumulador de aire en el nodo 5.....	63
8.3.2.	Simulaciones con el acumulador de aire en el nodo 3.....	64
8.3.3.	Simulaciones con acumuladores en los nodos 3 y 7.....	66

9. SIMULACIONES CON EL MODELO DE ALBA	68
9.1. Viabilidad y alcance de la señal sinusoidal.....	69
9.2. Efecto del aire dentro del sistema	70
9.2.1. Respuesta del sistema ante la colocación de acumuladores de aire cercanos al foco oscilatorio.....	71
9.2.2. Respuesta del sistema ante la colocación de acumuladores de aire lejanos al foco oscilatorio.....	73
10. PLANIFICACIÓN	74
10.1. Diagrama circular	74
10.2. Diagrama de Gantt.....	75
11. IMPACTO AMBIENTAL	76
12. PRESUPUESTO	77
CONCLUSIONES	80
AGRADECIMIENTOS	82
BIBLIOGRAFÍA	83
Referencias bibliográficas	83
Bibliografía complementaria	84

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

Actualmente, el Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz del Sincrotrón (CELLS) está en fase de ejecución de un proyecto transversal para llevar a cabo una actualización y mejora del sistema de refrigeración con la finalidad de aumentar su fiabilidad (más protección contra posibles fallos puntuales) y estabilidad (mayor robustez frente a variaciones de carga). Las actividades involucradas en este plan se agrupan en tres grupos:

- La comprensión de la dinámica de fluidos y el control térmico del sistema de refrigeración del sincrotrón.
- Mejora física del circuito mediante la instalación de nuevos reductores de presión, filtros, purgadores de aire o sistemas parecidos para evitar sobrepresiones o bolsas de aire en el sistema.
- La integración de un sistema de control redundante para garantizar la protección de los equipos y para reducir el tiempo de respuesta ante una situación de alarma.

1.2. Motivación

Los principales alicientes para la realización de este proyecto han sido el interés por la mecánica de fluidos y termodinámica, y la curiosidad por conocer el funcionamiento e instalaciones del sincrotrón ALBA.

En este documento se aborda la tarea referente a la comprensión del comportamiento del sistema de refrigeración y de sus mecanismos de regulación termo-hidráulica, mediante simulaciones numéricas y gráficas. Con este conocimiento, se podrá facilitar la toma de decisiones del equipo de ingeniería responsable de su operación.

1.3. Requerimientos previos

Como en cualquier otro proyecto de ingeniería, para su correcta elaboración y ejecución se deben conocer una serie de conceptos y tener claras las ideas y teoremas que envuelven el tema a tratar.

Obviamente, para abordar este proyecto, se deben tener conocimientos previos de mecánica de fluidos, pues el programa a utilizar se basa en las fórmulas que forman los pilares básicos de la mecánica de fluidos: el teorema de la conservación de la masa y el teorema de la conservación de la energía.

También pueden interesarnos diversos aspectos de la fluidotécnica pues estaremos trabajando con presiones, velocidades y circuitos constituidos por bombas, válvulas,... observando caídas de presión, golpes de ariete,...

Además, es necesario conocer el programa Flowmaster, puesto que de éste saldrán todas las conclusiones después de la realización de las diversas simulaciones. El aprendizaje de dicho programa es un valor añadido en el proyecto, pues debido a su complejidad ha ocupado gran parte del mismo.

Finalmente, no sería comprensible realizar este estudio sin una serie de conocimientos básicos sobre el sincrotrón ALBA, como por ejemplo, que es un acelerador de partículas del cual se quiere perfeccionar el sistema de refrigeración para evitar al máximo las paradas por fallos inesperados debido a la creación de bolsas de aire en el circuito.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la viabilidad de un sistema de detección de bolsas de aire en sistemas de bombeo presurizados. La idea consiste en verificar si las pulsaciones de presión generadas de forma controlada mediante una válvula oscilatoria se ven modificadas por la existencia de dichas bolsas. Para ello se realizarán pruebas mediante un modelo 1D del sistema de bombeo y regulación térmica ya previamente elaborado y validado.

Para llegar a tal fin se proponen una serie de objetivos más concretos:

- Determinar el tipo de válvula más adecuada
- Determinar el rango de oscilación
- Validar el elemento para simular una bolsa de aire
- Cuantificar el volumen mínimo de aire detectable
- Identificar los cambios de amplitud y de forma de onda en las pulsaciones

Así pues, a partir de la evaluación del comportamiento transitorio del sistema, se quieren determinar pautas que permitan anticiparse a posibles inestabilidades y actuar en consecuencia para corregirlas.

2.2. Alcance del proyecto

Para conseguir los objetivos citados en el apartado anterior, partiendo de diferentes escenarios termo-hidráulicos y menospreciando los efectos de la compresibilidad del fluido, se harán simulaciones numéricas del flujo fluido unidimensional.

Para las diferentes situaciones estudiadas, el resultado principal sobre el que se precisará información será la evolución de la presión. No se profundizará en todas las propiedades puesto que, únicamente, se pretenden ver las variaciones que provoca la presencia de aire en la tubería.

Flowmaster V7.9.0 es la herramienta que se utilizará tanto para el modelado como para las simulaciones. Este programa permite reducir significativamente el tiempo y potencia de procesamiento requerida en comparación con otras simulaciones tipo CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) dada la dimensión del sistema estudiado.

3. El sincrotrón ALBA

ALBA es el nombre asignado al sincrotrón de tercera generación, ubicado en Cerdanyola del Vallès, promovido por el Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz del Sincrotrón (CELLS) y cofinanciado por los gobiernos catalán y español. Esta instalación, que es la primera de estas características en el sud-oeste de Europa, forma parte del nuevo parque dedicado a la investigación y desarrollo científicos llamado Parque del ALBA; como se puede observar en la *Figura 3.1*. Este último está integrado en uno de los principales corredores europeos de excelencia tecnológica y empresarial llamado *Catalonia Innovation Triangle*; el cual agrupa los municipios de Rubí, Cerdanyola del Vallès y Sant Cugat del Vallès. Este entorno, donde las empresas colaboran para ser más innovadoras, reúne en un radio de 10km: la Universidad Autónoma de Barcelona, el Parque tecnológico del vallés, ESADE Creápolis y la Universidad Politécnica de Cataluña.



Figura. 3.1. Centro Direccional de Cerdanyola del Vallès [1]

El sincrotrón ALBA es un equipamiento de 22870 m² que acelera los electrones hasta una velocidad, muy cercana a la de la luz, donde emiten radiación electromagnética tangencialmente a su trayectoria [2]. Esta pérdida energética, llamada luz sincrotrón, tiene longitudes de onda comprendidas desde los rayos infrarrojos hasta los rayos X. Esta propiedad de la luz permite estudiar la estructura molecular y subatómica de todo tipo de materiales, hecho que da la licencia de asimilar el ALBA a un microscopio.

3.1. Breve descripción de la instalación

Algunas de las aplicaciones del sincrotrón ALBA son:

- Estudio de las estructuras biológicas y las proteínas.
- Diseño de nuevas terapias médicas de diagnóstico para la imagen y de nuevos implantes quirúrgicos.
- Estudio de organismos vivos, como virus y bacterias.
- Creación de nuevos fármacos.
- Creación de nuevos materiales semiconductores, plásticos, químicos o tejidos.
- Diseño de micro-dispositivos.
- Análisis de la autenticidad de restos históricos y obras de arte.

Como podemos observar en la siguiente figura (*Figura 3.2*), se distinguen cuatro edificios en las instalaciones: el principal, el técnico, el taller y las oficinas.

Los edificios de más interés para el proyecto son el principal y el técnico pues en ellos se focaliza toda la materia de estudio del trabajo a realizar.

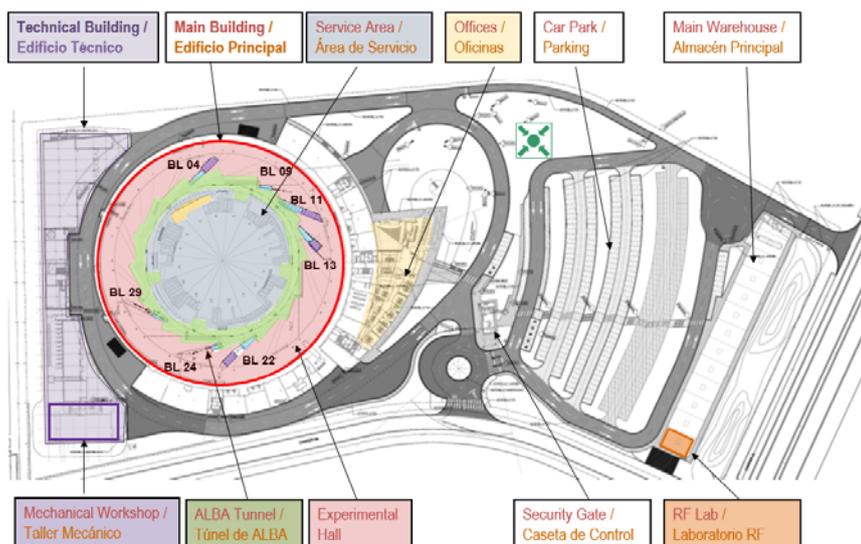


Figura. 3.2. Centro Direccional de Cerdanyola del Vallès [3]

3.1.1. El edificio principal

Con un diámetro superior a los 140m, contiene los elementos de más relevancia de la instalación. Como sincrotrón de tercera generación, los componentes principales son: un acelerador lineal, un acelerador circular y un anillo de almacenamiento.

El acelerador lineal o Linac consiste en un tubo al ultra alto vacío(UHV; grado de vacío comprendido de 10^{-7} Pa hasta 10^{-10} Pa) que acelera hasta 100MeV, mediante campos eléctricos, los electrones emitidos por un cañón. Estos electrones son dirigidos hacia un acelerador circular, también con una presión de ultra alto vacío, mediante una conexión llamada línea de transferencia [4]-[5]. El acelerador circular tiene un perímetro de 250m y, mediante campos eléctricos y magnéticos, eleva la energía de los electrones hasta 3 GeV. Estos electrones de alta energía se inyectan, mediante una línea de transferencia, a un anillo de almacenamiento [4]-[6].

En el anillo de almacenamiento, de 268,8m de perímetro, los electrones circulan a un nivel de energía constante y se controla su trayectoria, casi circular, mediante diferentes tipos de electroimanes. El interior de este anillo se encuentra al ultra alto vacío con el fin de eliminar la mayor parte de moléculas de gas residual y así, evitar que los electrones se desvíen de su trayectoria al chocar con ellas [7]. En el anillo de almacenamiento también es donde se realiza la emisión tangencial de luz, exactamente en los puntos en los que el campo magnético curva la trayectoria del electrón.

Parte de la radiación emitida, se extrae del anillo de almacenamiento a través de unas aperturas tangenciales, denominadas *Front Ends*, y se dirige hacia las estaciones experimentales a través de un muro que aísla los aceleradores del exterior. Este aislamiento se debe también a un conjunto de sistemas de alarma y bloqueo que impiden la puesta en marcha del acelerador en caso de que alguna persona esté en el interior o acceda al túnel. Las líneas de luz están constituidas por tubos de aceros donde, una vez llega la luz sincrotrón procedente del anillo de almacenamiento, se selecciona la longitud de onda deseada para llevar a cabo los experimentos adecuados. Aunque el sincrotrón puede tener hasta 33 líneas de luz, tan solo siete de éstas están en marcha:

- BL11 - NCD: Difracción no cristalina (*Non-Crystalline Diffraction*).
- BL13 - XALOC: Cristalografía Macromolecular (*Macromolecular Crystallography*).
- BL09 - MISTRAL: Microscopio de Rayos-X (*X-Ray Microscopy*).
- BL22 - CLAESS: Espectroscopias de Emisión y Absorción a Nivel Nuclear (*Core Level Absorption and Emission Spectroscopies*).

- BL04 - MSPD: Ciencia de Materiales y Difracción de Polos (*Materials Science and Powder Diffraction*).
- BL24 - CIRCE: Fotoemisión Espectroscópica y Microscópica (*Photoemission Spectroscopy and Microscopy*).
- BL29 – BOREAS: Dispersión y Absorción Resonante (*Resonant Absorption and Scattering*).

En la *Figura 3.3* se puede observar un esquema del complejo de aceleradores y líneas de luz.

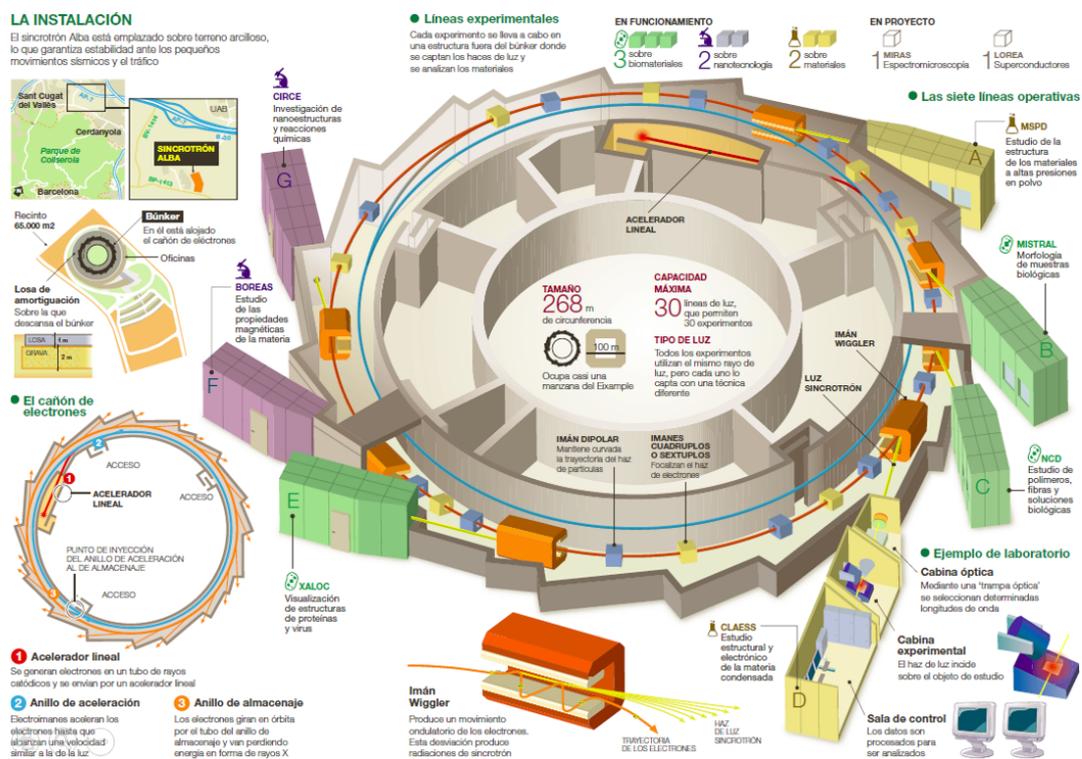


Figura 3.3. Esquema del túnel y el Experimental Hall del sincrotrón ALBA [8]

3.1.2. Edificio técnico

El edificio técnico, separado del edificio principal para evitar la transmisión de vibraciones y permitir la necesaria ventilación y accesibilidad, está situado bajo rasante con el fin de aprovechar la pendiente natural del terreno. Consecuentemente, se minimiza el impacto del volumen bajo una cubierta vegetal que, no solo recompone la topografía original, sino que también protege las instalaciones críticas de la exposición directa.

Los diversos gases (gas natural y aire comprimido) y fluidos (diésel y fluidos técnicos), almacenados o recibidos desde la red, se distribuyen al resto de la instalación a través de una galería subterránea; cómo podemos comprobar en la *Figura 3.4*.

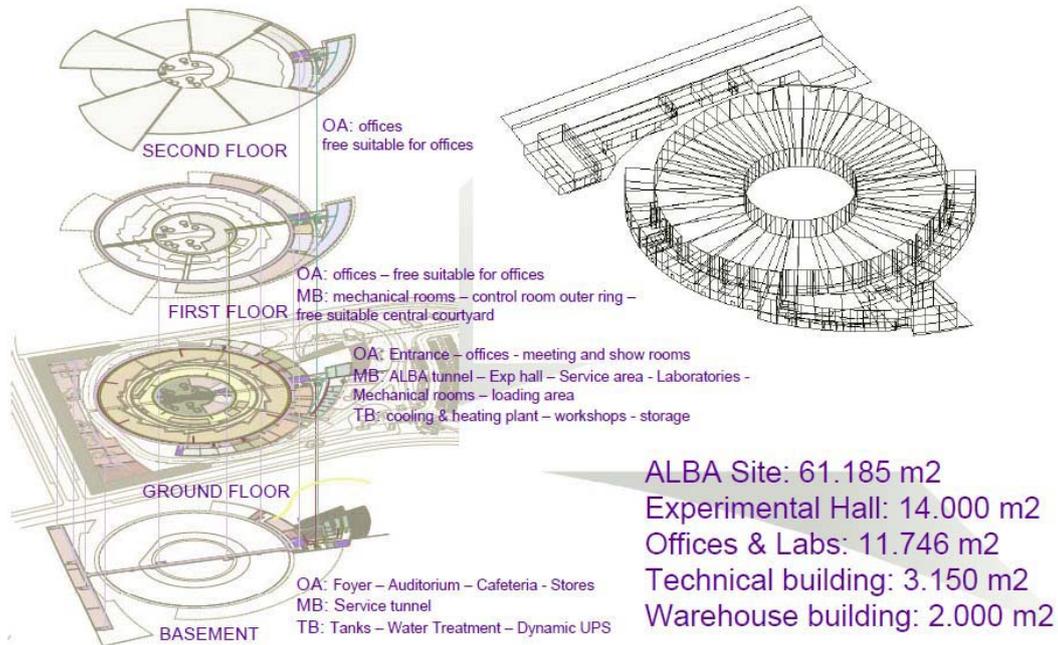


Figura 3.4 Edificios de la fuente de luz del sincrotrón ALBA [1]

La producción de energía térmica y frigorífica se lleva a cabo en las plantas situadas en este edificio, el cual también tiene instaladas las bombas que garantizan la distribución de agua fría y caliente. Atendiendo a los diversos puntos de utilización finales se distinguen diversos circuitos de distribución de agua:

- Agua de refrigeración, a $7 \pm 0,5$ °C, principalmente para la climatización en verano [1].
- Agua caliente, a 50 ± 1 °C, fundamentalmente para la climatización en invierno [1].
- Agua des ionizada, a $23 \pm 0,2$ °C, para refrigerar los imanes del túnel así como el equipamiento científico. Estos equipos requieren que el refrigerante cumpla una serie de parámetros técnicos. Para garantizar dichas propiedades, el agua se trata mediante unidades de descalcificación y de osmosis inversa [1].

3.1.3. El edificio del taller y el edificio de las oficinas

Con el edificio del taller y el edificio de las oficinas se cierra todo el establecimiento del sincrotrón ALBA. Como ya hemos mencionado anteriormente, estos dos edificios, pese a tener funciones muy significativas e imprescindibles dentro del complejo no son objeto directo de estudio dentro del proyecto y, por lo tanto, no profundizaremos en ellos tanto como en los dos predecesores.

Simplemente, puntualizar que en el edificio del taller se llevan a cabo tareas de mantenimiento y mejora del sistema y en el edificio de oficinas todas las gestiones y proyectos relacionados con el sincrotrón.

4. Descripción física del sistema de refrigeración

4.1. Funcionalidad de los componentes del sistema

Un circuito de agua desionizada refrigera los cuatro anillos principales de la instalación, siendo cada uno de ellos alimentado por un grupo de impulsión. La correlación entre los anillos y los grupos de bombeo es la indicada a continuación:

- Booster Ring (BO): grupo P09
- Storage Ring (SR): grupo P08
- Service Area (SA): grupo P10
- Experimental Arena (EA): grupo P07

Cada grupo de impulsión trabaja con una o dos bombas idénticas en paralelo. Los grupos P09 y P07 disponen de dos bombas, mientras que los grupos P08 y P10 disponen de tres bombas en paralelo. La velocidad de giro de cada bomba está regulada por un variador de frecuencia con el fin de garantizar una presión de impulsión fija en la entrada de los anillos. El objetivo de esta regulación es garantizar que no se llega a la presión máxima de diseño de los componentes que los integran.

El agua caliente resultante de su paso por los componentes electromagnéticos de los anillos se agrupa en una única línea llamada retorno común (ver *Figura 4.1* y *Figura 4.2*). Una parte de este cabal puede ser aspirado por los grupos impulsores con el fin de regular la temperatura del agua de alimentación de los anillos. El cabal restante se dirige por otro grupo de bombeo (P11), regulado también por un variador de frecuencia, hacia un par de intercambiadores (EX07) que refrigeran dicha agua. El agua ya enfriada se lleva a un acumulador (D02).

En un punto del conducto que transporta el agua refrigerada por los intercambiadores EX07 hacia el acumulador D02, hay conectado un sistema de mantenimiento de la presión. Éste, denominado depósito de expansión D03 o Pneumatex, tiene como objetivo garantizar una presión de retorno de 2×10^5 Pa.

En las dos figuras que se muestran a continuación se observa cómo, en la aspiración de los grupos de impulsión, la temperatura del agua se regula mediante unas válvulas mezcladoras

que combinan el agua procedente del acumulador D02 con la del retorno común.

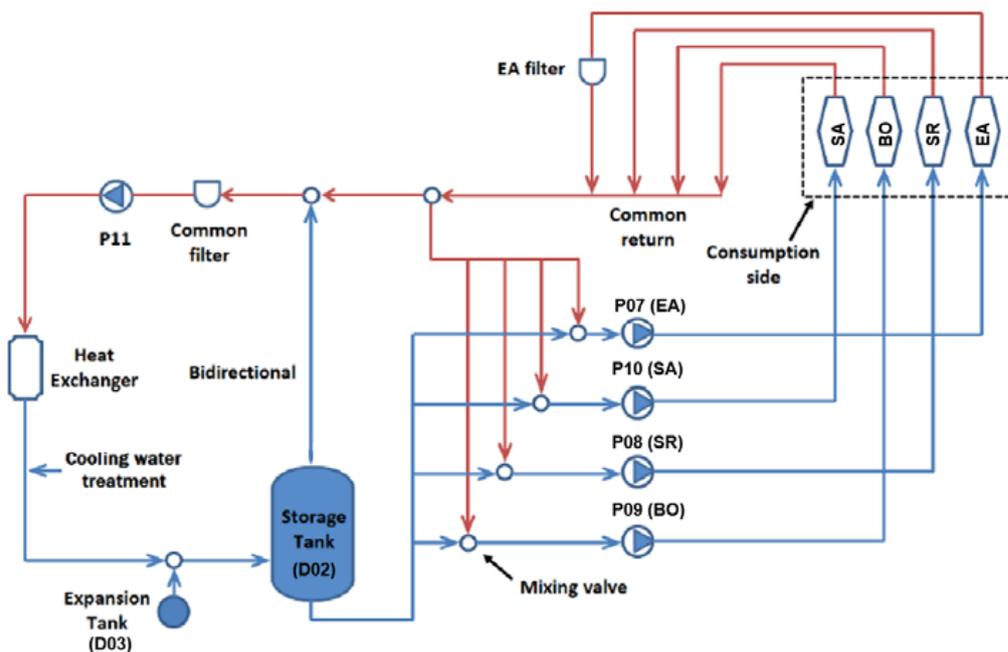


Figura 4.1 Esquema simplificado del sistema de refrigeración [9]

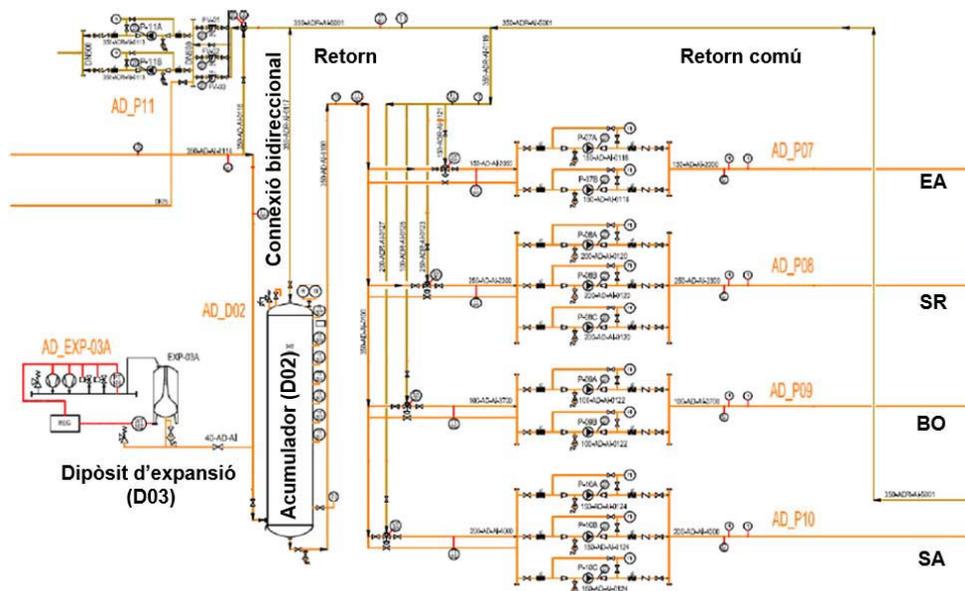


Figura 4.2 Esquema detallado del sistema de refrigeración [9]

4.2. Descripción del método numérico

4.2.1. Descripción del software Flowmaster

Como ya se ha mencionado anteriormente, Flowmaster es la herramienta elegida en este proyecto para realizar los modelados y simulaciones del sistema. Este programa permite reducir de forma significativa el tiempo y potencia de procesamiento requeridos en comparación con otros programas semejantes.

El programa Flowmaster V7 es una herramienta avanzada de modelación virtual de sistemas que permite modelar en instalaciones complejas todo tipo de problemas termo-hidráulicos.

También permite entender los efectos del flujo de fluidos dentro de un sistema complejo calculando el flujo interno y los efectos térmicos a través del uso de relaciones empírico-matemáticas de presión, ratio de flujo y temperatura.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

- Cooperación: Flowmaster facilita las herramientas para asegurar que los datos de simulación y modelos puedan ser compartidos de manera segura en una organización o cadena de suministros. Permite organizar los datos de simulación dentro de catálogos personalizados.

- Integración: La estructura de Flowmaster permite la integración de los sistemas existentes de diseño y fabricación establecidos en la librería del mismo.

- Gestión de datos: Con Flowmaster se puede establecer una completa trazabilidad de pruebas de simulación permitiendo encontrar, identificar y sacar los resultados de simulaciones pasadas y compararlas entre sí.

- Escalable: Ofrece la flexibilidad de configurar el software para el diseño de modelos y para la colaboración de proyectos.

- Modelado inteligente: Con una “inteligencia propia” incorporada, durante el diseño de un sistema no permite la utilización de componentes que no sean idóneos, eliminando posibles errores humanos.

- Continuidad: Al actualizarse la versión de Flowmaster también se actualizan automáticamente todos los diseños realizados en la versión anterior.

- Estructura del software: con una estructura flexible de la red, Flowmaster facilita herramientas para modificar el software de forma que se adapte a la utilización precisa en cada instante. Con un servidor Microsoft SQL como base de su estructura, Flowmaster puede facilitar acceso a todos los diseños, librerías y componentes personalizados a todos los miembros del grupo de proyecto.

4.2.2. Descripción del modelo

El modelo se ha adquirido de un proyecto previamente realizado y ha sido diseñado a partir de los elementos disponibles del programa Flowmaster. Las propiedades de los diversos componentes se han adquirido de datos reales proporcionados por la empresa como planos o características técnicas. La *Figura 4.3* muestra como el modelo está formado por distintos subsistemas que se detallan en los siguientes apartados.

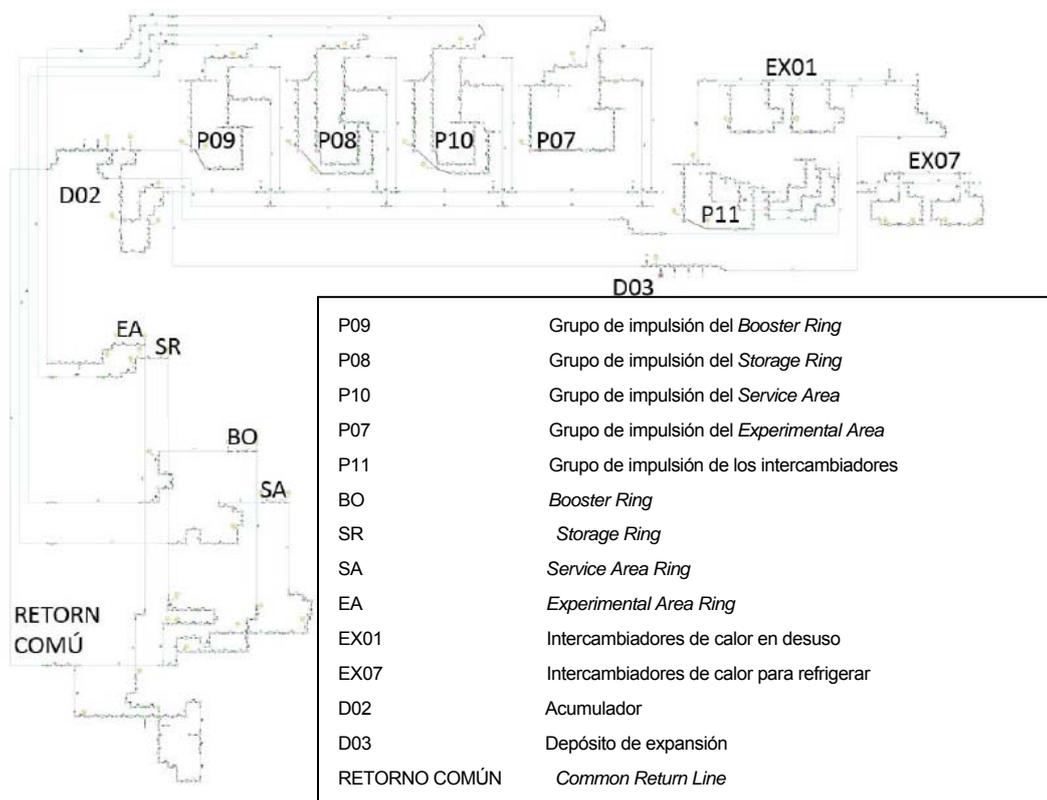


Figura 4.3 Esquema del modelo entero y sus subsistemas

5. Introducción al flujo en conductos

Para convertir el análisis de un sistema (masa fija) en el análisis de un volumen de control (región específica) se tiene que utilizar un teorema matemático, el teorema del transporte de Reynolds, y se puede aplicar en todas las leyes básicas de la mecánica de fluidos.

El teorema de Reynolds relaciona la derivada temporal de una propiedad del sistema con la variación de esta propiedad en el volumen de control.

5.1. Teorema de la conservación de la masa

Este teorema defiende que en un flujo permanente los flujos másicos de entrada son iguales a los flujos másicos de salida.

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Para un VC en general: $\frac{d}{dt}(B_{sist}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{vc} \beta \rho dV \right) + \int_{sc} \beta \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$

Para un VC fijo e indeformable: $\frac{d}{dt} \left(\int_{vc} \rho dV \right) + \int_{sc} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$

5.2. Teorema de la conservación de la cantidad de movimiento

El teorema de la conservación de la cantidad de movimiento está estrechamente ligado con el teorema de la conservación de la energía. La ley de la conservación de la energía afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía.

A continuación se muestran las fórmulas en las cuales se basa el teorema de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\boxed{\sum \bar{F} = \frac{d\bar{P}}{dt} \Big|_{\text{sys}} = \frac{d(m\bar{V})}{dt} \Big|_{\text{sys}}}$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}(\mathbf{B}_{\text{sist}}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{vc} \beta \rho dV \right) + \int_{sc} \beta \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA}$$

$$\boxed{\vec{B} = m\vec{v} \quad \vec{\beta} = \frac{d\vec{B}}{dm} = \vec{v}}$$

Para un volumen de control fijo:

$$\boxed{\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_{vc} \vec{V} \rho dV \right) + \int_{sc} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA}$$

ΣF Vector suma de todas las fuerzas que actúan sobre el volumen de control:
fuerzas de superficie + fuerzas de volumen.

5.3. Pérdidas de carga en conductos

La pérdida de carga en una tubería o canal es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc.



5.3.1. Pérdida de carga en un conducto rectilíneo

Las pérdidas de carga en un conducto rectilíneo son pérdidas de carga debidas a la fricción del fluido contra sí mismo y contra las paredes de la tubería rectilínea.

Si el flujo es uniforme, es decir que la sección es constante, y por lo tanto la velocidad también es constante, el principio de Bernoulli, entre dos puntos puede escribirse de la siguiente forma:

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum \lambda$$

Dónde:

g= aceleración de la gravedad;

y_i= altura geométrica en la dirección de la gravedad en la sección i = 1 o 2;

P= presión a lo largo de la línea de corriente;

ρ= densidad del fluido;

v= velocidad del fluido;

∑λ= pérdida de carga.

5.3.2. Pérdidas de carga localizadas o accidentales

Las pérdidas de carga localizadas o pérdidas secundarias son pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc.

Las pérdidas localizadas se expresan como una fracción o un múltiplo de la llamada "**altura de velocidad**" de la forma:

$$h_v = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Dónde:

h_v= pérdida de carga localizada;

V= velocidad media del agua, antes o después del punto singular, conforme el caso;

K= Coeficiente determinado en forma empírica para cada tipo de punto singular.

En la siguiente tabla se dan algunos de los valores K para diferentes tipos de puntos singulares:

Tipo de singularidad	K
Válvula de compuerta totalmente abierta	0,2
Válvula de compuerta mitad abierta	5,6
Curva de 90°	1,0
Curva de 45°	0,4
Válvula de pie	2,5
Emboque (entrada en una tubería)	0,5
Salida de una tubería	1,0
Ensanchamiento brusco	$(1-(D_1/D_2)^2)^2$
Reducción brusca de sección (Contracción)	$0,5(1-(D_1/D_2)^2)^2$

Tabla 5.1 Tipos de singularidades con sus valores K respectivos

5.4. Sistemas de bombeo

Un sistema de bombeo consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos.

5.4.1. Bombas roto-dinámicas

La primera clasificación posible de las bombas es separarlas en el grupo de bombas de desplazamiento positivo y bombas roto-dinámicas. Las primeras operan de forma volumétrica: desplazan un determinado volumen por unidad de tiempo, independientemente de la presión. Son bombas de émbolos, paletas, engranajes, etc., utilizadas en óleo hidráulica, donde se requieren unos caudales ínfimos con presiones muy elevadas. En esta publicación no se va a estudiar más sobre estas bombas.

Las bombas roto-dinámicas, en cambio, consiguen incrementar la energía del fluido a base de aumentar la energía cinética -por medio de la deflexión y el efecto centrífugo que provocan los álabes del rodete- recuperando esta energía posteriormente en forma de presión.

La principal forma de clasificación de las bombas roto-dinámicas es separarlas en bombas axiales, mixtas y radiales, según la dirección de salida del flujo con respecto al eje. El nombre común para las radiales es bombas centrífugas a pesar de que a veces se utiliza



este término para referirse a todo el conjunto de bombas roto-dinámicas.

En las *Figuras 5.1, 5.2 y 5.3* pueden verse esquemas de bombas roto-dinámicas de los tres tipos citados.

La utilización de bombas axiales está indicada cuando se necesitan grandes caudales con pequeñas alturas de elevación. Las centrífugas, cuando se necesitan grandes alturas y pequeños caudales. Las bombas mixtas constituyen un caso intermedio.

Hay otras muchas características que hacen a las bombas susceptibles de clasificaciones distintas, y así se pueden tener bombas de una o varias etapas, bombas de cámara partida, bombas auto aspirantes, bombas sumergibles, bombas horizontales o verticales, etc.

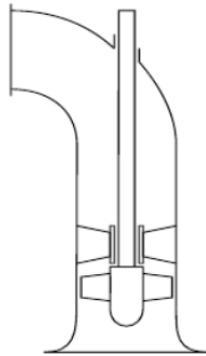


Figura 5.1 Bomba axial [11]

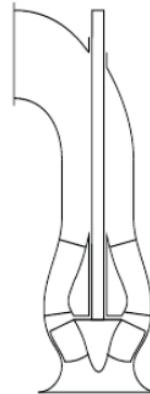


Figura 5.2 Bomba mixta [11]

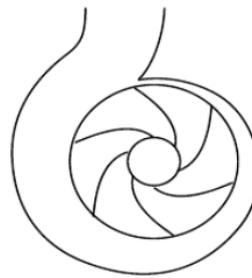
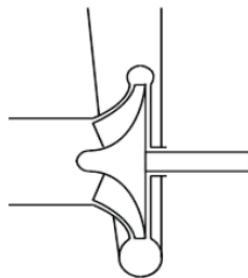


Figura 5.3 Bomba centrífuga [11]

5.4.2. Bombas en serie y en paralelo

En ocasiones se utilizan varias bombas trabajando en serie o en paralelo sobre el mismo circuito. Esto puede resultar útil como sistema de regulación, o cuando se requieren características muy variables.

Cuando varias bombas se colocan en serie, se pueden sustituir, para el cálculo, por otra bomba hipotética que genere una altura suma de las individuales para cada caudal (véase *Figura 5.4*).

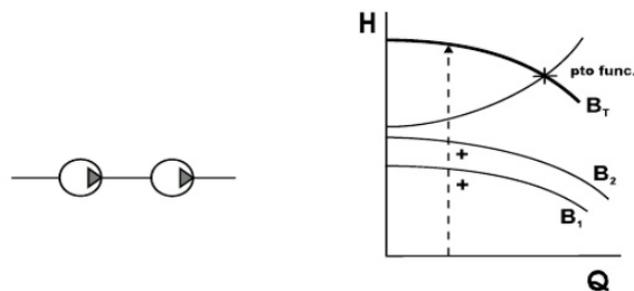


Figura 5.4 Bombas en serie [11]

De la misma forma, varias bombas en paralelo darán una curva característica conjunta en la que se suman los caudales para cada altura.

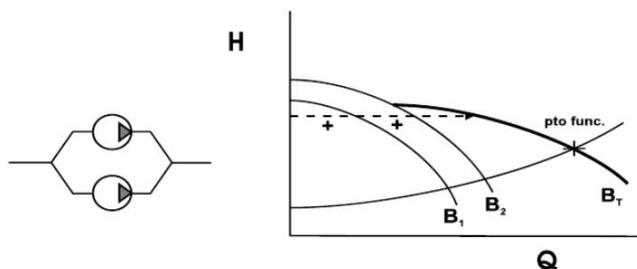


Figura 5.5 Bombas en paralelo [11]

Para colocar bombas en serie, y sobre todo en paralelo, es conveniente que sean similares, mejor aún si son idénticas, para evitar que alguna de ellas trabaje en una zona poco adecuada.



5.4.3. Sistemas de regulación

5.4.3.1. Depósitos

Los depósitos se utilizan para los siguientes fines:

- Asegurar el suministro de agua frente a averías.
- Mantener la presión (depósitos elevados).
- Simplificar el control y reducir el tamaño de la instalación de bombeo.
- Reducir la presión de las traídas de agua por gravedad y amortiguar transitorios.

Existen dos tipologías distintas de depósitos: los depósitos abiertos y los depósitos a presión.

Depósitos abiertos

Se suelen realizar en hormigón armado o pretensado. Para tamaños no demasiado grandes se utiliza también la chapa de acero, materiales plásticos o compuestos. Últimamente están dando buenos resultados los excavados sin más en el terreno, con la impermeabilización adecuada. Si se quiere realizar la distribución por gravedad deben situarse en una zona topográficamente más alta que los puntos de consumo. Cuando esto no es posible hay que construir depósitos elevados con forma de torre, seta, etc.

Para el cálculo del volumen de un depósito no hay un criterio universal, aunque es bastante común dimensionarlo para regular el día de máximo consumo que se produzca durante los años previstos de utilización de la instalación. Según este criterio, el caudal bombeado al depósito debe ser igual al caudal medio de ese día máximo. El volumen del depósito se puede calcular exactamente como el área por encima de la línea de caudal medio en el diagrama horas-consumo del día máximo.

El arranque-parada de las bombas que aportan agua al depósito suele hacerse de forma automática, mediante un sensor de nivel.

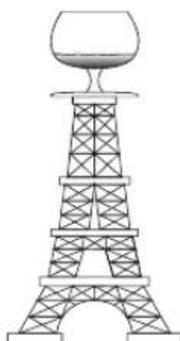


Figura 5.6 Ejemplo de depósito abierto [11]

Es conveniente que el depósito esté provisto de un desagüe con capacidad de evacuar todo el caudal suministrado, en previsión de posibles averías en el sensor de nivel.

Depósitos a presión

Cuando no es necesario mantener una capacidad de almacenamiento, pero el consumo es muy aleatorio (por ejemplo: el consumo de agua potable en un edificio), puede ser conveniente instalar un depósito a presión a la salida de la bomba. Esto disminuye el número de arranques y paradas necesarios en la bomba y se puede hacer que funcione en la zona de rendimientos elevados.

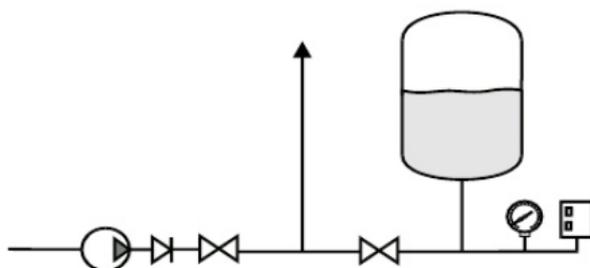


Figura 5.7 Instalación de un depósito a presión [11]



5.4.3.2. Regulación de válvulas

Válvulas en serie y by-pass

Las dos formas más sencillas de regular el caudal son: una válvula en serie con el circuito que aumente su resistencia y/o un by-pass que desvíe parte del caudal. La Figura 5.8 muestra el primer método. Con la válvula de control totalmente abierta, el punto de funcionamiento del sistema es el A. A medida que se va cerrando, aumenta la resistencia y el punto de funcionamiento sube por la curva característica de la bomba. Con el caudal reducido a Q_{reg} , B es el punto de funcionamiento de la bomba. De esta altura, sólo B' son pérdidas de carga en el circuito, de B' a B son pérdidas en la válvula de control.

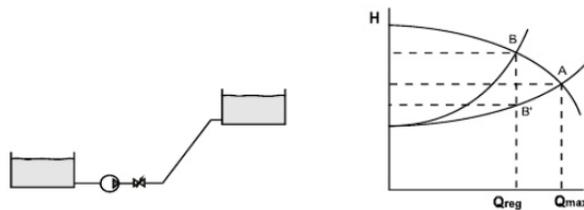


Figura 5.8 Regulación con válvula en serie [11]

La regulación con by-pass puede verse en la Figura 5.9. Con la válvula cerrada, el sistema funciona en el punto A. Al abrirla, existen dos ramas en paralelo, con lo que la bomba pasa a funcionar con caudales mayores: B. De este caudal, Q_{bomb} , sólo una parte, Q_{reg} pasa al circuito, el resto vuelve al depósito por el by-pass. En éste se está disipando una altura igual a la suministrada por la bomba.

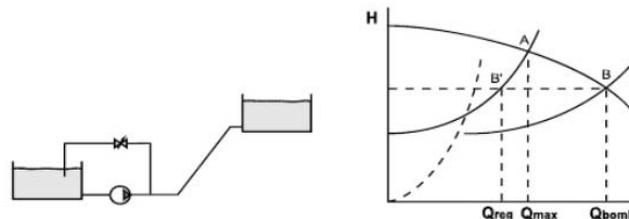


Figura 5.9 Regulación con by-pass [11]

Con ambos sistemas se está desperdiciando energía hidráulica: el caudal que pasa por la válvula multiplicado por la pérdida de carga en ella. Un método será más eficiente que otro, hidráulicamente hablando, en función de las pendientes de la curva resistente y la curva característica de la bomba. Pero más que la eficiencia hidráulica, para elegir uno u otro debe tenerse en consideración el consumo de potencia de la bomba.

Cuando se quiere obtener un Q_{reg} (Figura 5.10) regulando en serie, la bomba trabaja con caudales menores: B ; mientras que en paralelo lo hace con caudales mayores: C . Si el consumo de potencia es creciente con el caudal -típico de las bombas centrífugas- interesa más la regulación en serie, mientras que en caso contrario -típico de bombas axiales- conviene decantarse por el by-pass.

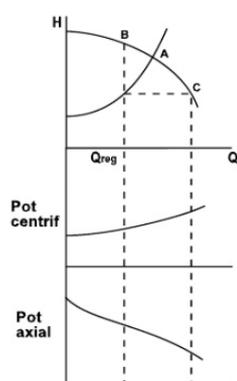


Figura 5.10 Comparación del consumo de potencia en los dos métodos [11]



6. Problemas de la presencia de aire en conductos

6.1. Introducción

En el transporte de fluidos por tubería es necesario tener siempre en cuenta la aparición de cantidades incontroladas de aire en las distintas fases de actividad de la conducción (llenado, funcionamiento, vaciado), ya que su presencia, con la consecuente formación de burbujas y bolsas, es causa de incidentes. Algunos de estos fenómenos son: circulación real de caudales menores de los calculados, errores en los elementos de medida, bajo rendimiento de los grupos de bombeo, fenómenos de desgaste y cavitación destructiva, roturas de tuberías, etc.

6.2. ¿Por qué es el aire un problema?

El aire en las tuberías puede generar una serie de problemas en el sistema:

- Las bolsas de aire reducen el diámetro de tubería efectivo que resulta en una reducción de capacidad de la tubería.
- Las propiedades generales del fluido (mezcla de aire y agua) están cambiadas. Esto afecta mayoritariamente a la densidad y la elasticidad.
- La presencia de aire modifica la estructura de la turbulencia de flujo y posiblemente también los 'esfuerzos en las paredes' ("*wall shear*").
- Debido a su flotabilidad las burbujas de aire introducen inercia vertical en el flujo y ejercen importantes efectos en el campo de flujo.
- En fenómenos transitorios hidráulicos, la presencia de grandes bolsas de aire tiene como resultado olas de presión que son fuertemente amortiguadas y deformadas. No obstante, también se ha visto que pequeñas acumulaciones de aire pueden tener un efecto adverso en los momentos transitorios de presión, incrementando las sobretensiones ya vistas.
- La acumulación de aire en un sistema puede llevar a la interrupción en el flujo y causar efectos como el reventón ("*blow-out*") o retroceso ("*blow-back*"). Por ejemplo, aire arrastrado dentro de un salto hidráulico podría no poder moverse corriente abajo y por el contrario causar un efecto de retroceso a través del salto. Esto puede producir vibraciones y causar inestabilidad de la superficie del agua.

- El aire puede causar dificultades con el funcionamiento de los filtros. Las sobretensiones ocasionadas por la cambiante presión del aire hace difícil el buen funcionamiento de los filtros. Además, burbujas pueden quedar atrapadas en los filtros de arena y reducir su eficiencia.
- La presencia de aire puede reducir la eficiencia de las bombas y las turbinas. Cuando agua mezclada con aire entra en una turbina, ocasiona una pérdida de potencia y con ello reduce su eficiencia. También puede ocasionar presiones de golpe de ariete. La entrada de aire en una bomba puede causar la pérdida de imprimación.
- En tuberías ferrosas, la presencia de aire favorece la corrosión ya que proporciona más oxígeno al proceso.
- La estanqueidad, una transición de flujo de tubería parcialmente llena a totalmente llena, puede causar vibraciones de la estructura, acompañadas de sobretensiones del flujo.
- El aire puede llevar a falsas lecturas de los equipos de medición.
- Sistemas de agua de refrigeración llevan aditivos anticorrosivos y esto incrementa la formación de espuma en el agua.

Además:

- Aire transportado se liberará en la localización de descargas. Esto crea preocupaciones medioambientales que incluyen: la formación de espuma, particularmente combinada con la actividad algar (de algas); visual, la apariencia del agua puede ser muy gasificada (por ej. En agua blanca); y el olor, de aguas residuales/alcantarillado.
- El aire está asociado con efectos de flotabilidad en tuberías bajo agua, como vertidos/desagües.



6.3. Fuentes principales de la presencia de aire en tuberías

El aire en una tubería presurizada en operación proviene de tres fuentes primarias. Primero, antes de la puesta en marcha, la línea no está vacía – está llena de aire. Para llenar una tubería completamente con líquido, es necesario eliminar este aire. Conforme la línea se va llenando, gran parte de este aire será impulsado aguas abajo para ser liberado mediante los hidrantes, grifos, etc. Pero una gran cantidad quedará atrapada en lugares elevados del sistema (véase en la *Figura 6.1*). Este fenómeno se produce porque el aire es más ligero que el agua y por ello, gravita hacia puntos elevados.

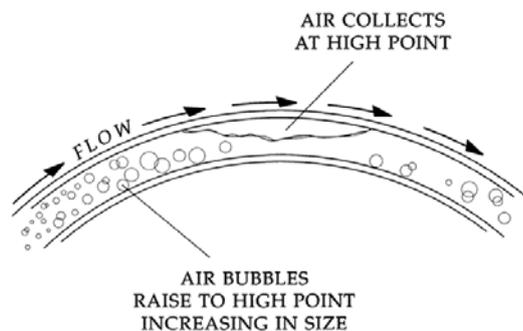


Figura 6.1 Bolsa de aire en una parte elevada de la tubería

La segunda fuente es el agua en sí. El agua contiene aproximadamente 2% de aire por volumen. Durante el funcionamiento del sistema, el aire atrapado, continuamente, se irá desprendiendo del agua y de nuevo se acumulará en los puntos elevados del sistema.

La tercera fuente de aire es la que entra a través del equipo mecánico (*Figura 6.2*). Esto incluye aire que se fuerza dentro del sistema por las bombas así como aire que se absorbe a través de embalaje, válvulas, etc. en condiciones de vacío. Como se puede ver una tubería presurizada nunca estará sin aire y típicamente el volumen es sustancial.

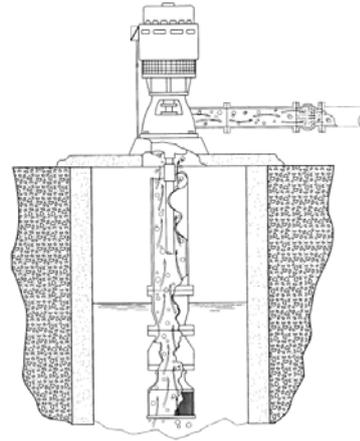


Figura 6.2 Aire entrante a través de la maquinaria

6.4. Patrones de flujo en conductos presurizados

La proporción relativa de aire y agua que se transporta en un sistema de tuberías crea una serie de diferentes patrones de flujo. Estos patrones también varían dependiendo de la pendiente de la tubería. Debajo se muestra un resumen de los diferentes posibles patrones de flujo.

6.4.1. Patrones de flujo verticales

Patrones de flujo verticales, que generalmente son más asimétricos cuando se comparan con los flujos horizontales, se pueden describir como sigue:

- Flujo de burbujas (*Bubble flow*)- el aire es distribuido en el agua en forma de una capa de burbujas esféricas (pequeñas con respecto al diámetro conductor). Este patrón de flujo se produce cuando una cantidad de aire relativamente pequeña se mezcla con un caudal moderado de agua.
- Flujo de pistón/tapón (*Plug flow*) – Ocurre cuando el flujo de aire aumenta. La transición de flujo de burbujas a flujo de pistón ocurre cuando el diámetro de la burbuja es aproximadamente la mitad del diámetro del conducto.
- *Slug flow* – conforme el flujo de aire sigue incrementando, se produce una cadena regular de burbujas muy grandes. Cada una de estas burbujas ocupa casi la totalidad del diámetro de la tubería, menos una capa delgada en la pared y su longitud mide



varias veces el diámetro de la tubería.

- *Churn flow* – conforme el flujo de aire sigue creciendo el tapón rompe en un patrón desordenado y turbulento de aire y agua. A este patrón de flujo a menudo se le llama ‘mezcla espumosa’(*froth flow*) o (*churn turbulent flow*)
- Anular (*Annular*) – para ratios de flujo de aire relativamente altos con un caudal de agua bajo, se produce el flujo anular. El flujo de agua fluye por la pared de la tubería mientras el aire se mueve a través de la parte central de la tubería.
- Flujo pulverizado (*Spray flows*) – para flujos de aire muy grandes, la película anular se ‘despega’ de las paredes de la tubería y es arrastrada por el aire en forma de gotitas. A esto se le llama a veces flujo de gotas de niebla anular.

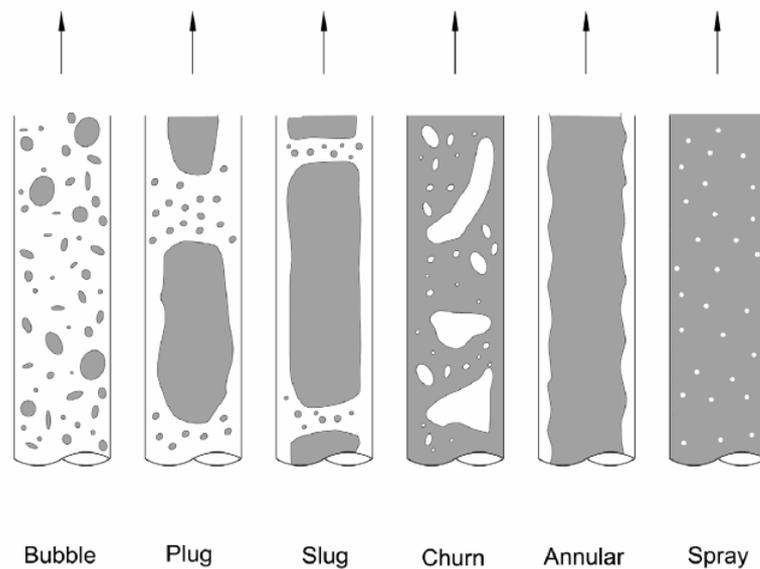


Figura 6.3 Patrones verticales de flujo (aire + agua)

6.4.2. Patrones de flujo inclinados

Para regímenes de flujo en tuberías inclinadas los tipos de flujo son los mismos que para flujos verticales, excepto por la limitación o supresión total del patrón de flujo 'froth'.

6.4.3. Patrones de flujo horizontales

En general, la mayoría de los regímenes de flujos en tuberías de gravedad horizontal muestran patrones no simétricos, lo que se debe a los efectos de gravedad en fluidos con diferentes densidades. Esto genera una tendencia a la estratificación en dirección vertical, lo que quiere decir que el flujo del líquido tiende a ocupar la parte inferior de la tubería y a forzar el aire o vapor a las partes superiores.

- *Flujo de burbujas (Bubble flow)* – El aire se forma en la superficie superior de la tubería. Las velocidades de las burbujas y del agua son más o menos iguales.
- *Flujo de pistón/tapón (Plug flow)* – en caso de un incremento del flujo de aire, las burbujas de aire se fusionan formando un patrón de flujo intermitente en cual se desarrollan bolsas de aire. Estas bolsas o tapones están atrapados en flujo de agua general y son transportados con el flujo del agua a lo largo de la parte superior de la tubería.
- *Flujo estratificado suave (Stratified smooth flow)* – Se forma un claro interfaz entre el flujo aire y el flujo agua. Este patrón de flujo normalmente se observa en flujos de aire y agua relativamente bajos.
- *Flujo estratificado ondulado (Stratified wavy flow)* –según se incrementa el flujo del aire, aparecen ondas en la superficie estratificada del interfaz del flujo. El suave interfaz se volverá ondulado y rizado.
- *Slug flow* – la amplitud de las ondas es suficiente para sellar el conducto. Las ondas forman una mezcla espumosa (*frothy slug*) y tocan el techo de la tubería. Esta mezcla es transportada a una velocidad más elevada que la velocidad media del líquido.
- *Flujo anular (Annular flow)* –para flujos de aire elevados, el agua fluye por la pared de la tubería (la zona anular), mientras el aire fluye a alta velocidad por la parte central de la tubería.



- *Flujo pulverizado (Spray flow)* – En caso de flujos de aire muy grandes, la película anular es arrancada de las paredes de la tubería y transportada dentro del aire en forma de gotitas.

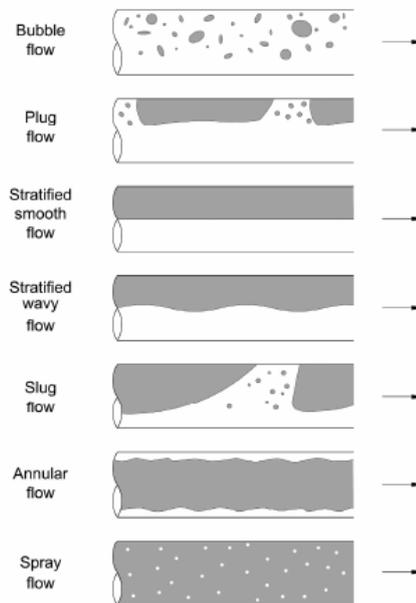


Figura 6.4 Patrones horizontales de flujo (aire + agua)

6.5. Impacto del aire en el sistema

Una vez identificadas las fuentes y los patrones de flujo, pasamos a considerar el impacto en el sistema. Hay dos impactos aparentes. Las bolsas de aire que se acumulan en los puntos elevados pueden ocasionar una restricción de línea (*Figura 6.5*). Como cualquier restricción, la bolsa de aire aumenta la pérdida de carga, amplía los ciclos de bombeo e incrementa el consumo de energía. Conforme el aire se sigue acumulando en los puntos altos del sistema, la velocidad del fluido incrementa ya que éste es forzado a pasar por un espacio (abertura) cada vez más pequeño.

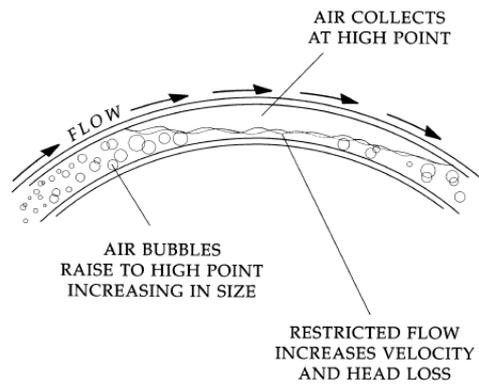


Figura 6.5 Bolsa de aire acumulada en el punto alto de la tubería

Como las bolsas crecen, ocurrirá uno de dos fenómenos. La primera posibilidad es el paro total del flujo (*Figura 6.6*). Si la dinámica del sistema no permite una retirada continua del aire por la velocidad incrementada del flujo y la presión de la corriente, entonces esto podría pasar. Como las bolsas siguen acumulando aire se podría crear una pérdida de presión mayor a la capacidad de la bomba, ocasionando una parada total del flujo.

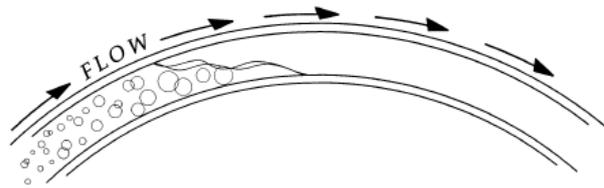


Figura 6.6 Paro total del flujo

La segunda posibilidad, y la más probable, es que la velocidad incrementada desprenda la bolsa de aire y la empuje corriente abajo (*Figura 6.7*). El cambio rápido repentino de velocidad del flujo cuando se 'desprende' la bolsa y luego se para en otro punto elevado, a menudo puede llevar a un aumento de presión (golpe de ariete). Esto puede ocasionar serios problemas en las válvulas, sellados, juntas o incluso una rotura de la línea. Esta es la consecuencia más seria de todas las posibles que puede ocasionar aire acumulado en los puntos elevados del sistema.



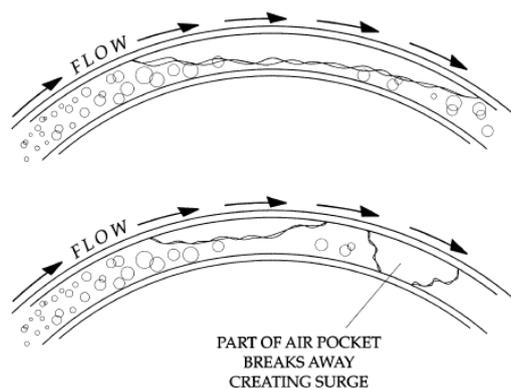


Figura 6.7 Desprendimiento de la bolsa de aire y se desplaza corriente abajo



7. Tipologías de válvulas

Las válvulas son una parte muy importante del diseño de sistemas de tuberías. Sus funciones principales son el cierre y la regulación. En el primer caso se utilizan para determinar qué ramas de la instalación van a estar en servicio, para aislar elementos, etc. Las válvulas de regulación son las que definen el punto de operación. Junto con estas dos funciones hay otras muchas para las que casi siempre existe una válvula adecuada: evitar el retorno del fluido, regular o limitar la presión, expulsar el aire, evitar el vacío, etc.

La selección de la válvula más adecuada en cada caso puede llegar a ser bastante complicada, debido a la gran variedad de modelos y precios que existen en el mercado.

7.1. Clasificación de válvulas

Una de las características por las cuales pueden clasificarse las válvulas es la operatividad del obturador de la válvula. La forma como se desplaza el obturador define la geometría y modo de funcionamiento de la válvula.

7.1.1. Lineales

El vástago de la válvula empuja el obturador mediante un movimiento lineal directo.

La mayoría de estas válvulas están actuadas por un actuador lineal o multi-giro (también de movimiento lineal).

Generalmente las válvulas lineales pasan a ser de tipo multi-giro cuando en vez de ser operadas por un actuador, lo son de forma manual [9].

7.1.2. Multi-giro

El obturador se desplaza siguiendo un movimiento lineal provocado por el empuje que hace su eje al girar sobre una rosca.

La operación es lenta, pero permite posicionar de forma precisa y estable el obturador, requisito en algunas válvulas de control.

Pueden ser operadas manualmente o mediante un actuador tipo multi-giro.

Tipos de válvulas: válvula anular, válvula de compuerta, válvula de diafragma, válvula de globo, válvula de cono fijo, válvula de aguja, válvula tipo *pinch* [9].

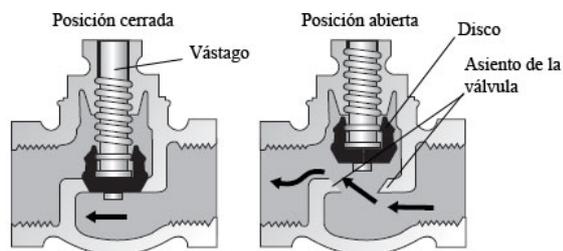


Figura 7.1 Válvula multi-giro de globo [9]

7.1.3. Cuarto de giro

El obturador y eje tienen un giro de 0° a 90° desde la posición totalmente abierta a cerrada. Son válvulas de rápida obertura.

Pueden ser operadas manualmente o mediante un actuador tipo cuarto-de-giro.

Tipos de válvulas: válvula de bola, válvula de mariposa, válvula tipo *plug*, válvula esférica.



Figura 7.2 Válvula rotativa de mariposa [9]

Para la realización del proyecto se han barajado tres válvulas posibles: la válvula de mariposa, la válvula de bola y la válvula de globo. Se han escogido estas tres tipologías de válvula frente a las demás porque, además de ser las más comunes, son de fácil accesibilidad en la librería del programa Flowmaster y sus propiedades proliferan la correcta ejecución de las simulaciones.



7.2. Válvula de mariposa

La válvula de mariposa es un dispositivo para interrumpir o regular el flujo de un fluido en un conducto, aumentando o reduciendo la sección de paso mediante una placa, denominada «mariposa», que gira sobre un eje. Al disminuir el área de paso, aumenta la pérdida de carga local en la válvula, reduciendo el flujo.

En el ámbito de las válvulas para uso en hidráulica, se distinguen por las siguientes características:

- Están en todos los casos contenidas en el interior de la tubería
- Tienen una baja pérdida de carga cuando están totalmente abiertas
- La relación entre el área de paso y el ángulo de giro de la mariposa no es lineal

Son utilizadas en conductos de aire, tuberías para líquidos y en aplicaciones mecánicas, cómo en algunos tipos de motores térmicos.

Hay que distinguir básicamente dos tipos de válvulas de mariposa:

- Válvulas de mariposa de eje centrado.
- Válvulas de mariposa de eje descentrado.

Las de eje centrado tienen el cuerpo totalmente recubierto de un elastómero, normalmente EPDM y tienen la ventaja que éste está protegido ante la posible corrosión del fluido vinculado, además de ser bidireccionales.

Las de eje descentrado se utilizan sobre todo en industria petroquímica puesto que para servicios de agua convencionales no están recomendadas. Sin embargo, pueden hacer cierres con seguridad fuego (metal-metal) o utilizarse en servicios de regasificación (-200 °C); estas necesidades con las de eje centrado no se pueden cubrir [9].

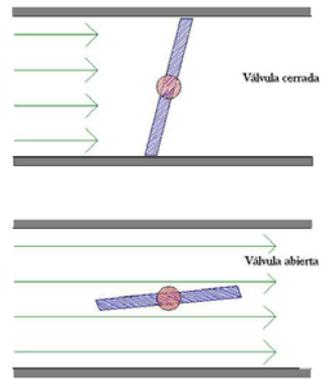


Figura 7.3 Estados de apertura de la válvula mariposa [9]

7.3. Válvula de bola

La válvula de bola o válvula de esfera, es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada.

Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera o bola perforada, de tal forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. La posición de la manilla de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada).

Este tipo de válvulas no ofrecen una regulación precisa al ser de un cuarto de vuelta, como se ha visto anteriormente. Su ventaja es que la bola perforada permite la circulación directa en la posición abierta con una pérdida de carga bastante reducida, y corta el paso cuando se gira la maneta 90° y cierra el conducto.

Las válvulas de bola manuales pueden cerrarse rápidamente, lo que puede producir un golpe de ariete. Por ello, y para evitar la acción humana, pueden estar equipadas con un servomotor ya sea neumático, hidráulico o motorizado.

Atendiendo al número de conexiones que posee la válvula, puede ser de dos o tres vías.

Las válvulas con cuerpo de una sola pieza son siempre de pequeña dimensión y paso reducido. Este tipo de construcción hace que la válvula tenga un precio reducido.

Las válvulas con cuerpo de dos piezas suelen ser de paso estándar. Este tipo de construcción permite su reparación.



Las válvulas de tres piezas permiten desmontar fácilmente la bola, el asiento o el vástago ya que están situados en la pieza central. Esto facilita la limpieza de sedimentos y remplazo de partes deterioradas sin tener que desmontar los elementos que conectan con la válvula.

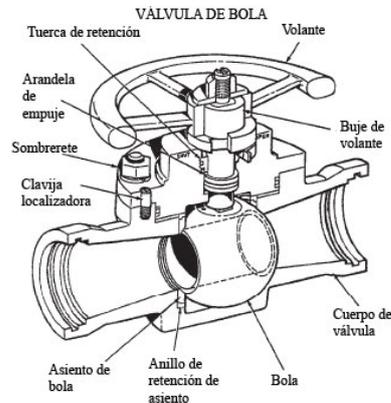


Figura 7.4 Croquis de una válvula de bola [9]

7.4. Válvula de globo

Las válvulas tipo globo a diferencia de las válvulas de compuerta, se pueden aplicar en la regulación de fluidos y realizan un cierre hermético cuando cuenta con un asiento flexible. En esta clase de válvulas el fluido no corre de manera directa y en una sola dirección como lo hacen en las válvulas de compuerta sino que el fluido entra y sube dentro del cuerpo de la válvula, es estrangulado por el émbolo según qué tan abierta o cerrada se encuentre la válvula, y después baja el fluido hacia la salida de la válvula.

En las válvulas globo, el fluido hace un movimiento de columpio dentro y choca con el émbolo que regula cuánto fluido debe de pasar por la válvula.

Las válvulas globo tienen la ventaja de regular, pero tienen la desventaja de que al detener cierta parte del fluido para regularlo, generan una caída de presión dentro de la línea lo que debe de ser considerado en los cálculos técnicos para que esta clase de válvulas y otras circunstancias que hay dentro de la línea no impidan que el fluido deba de llegar hasta donde se requiere.

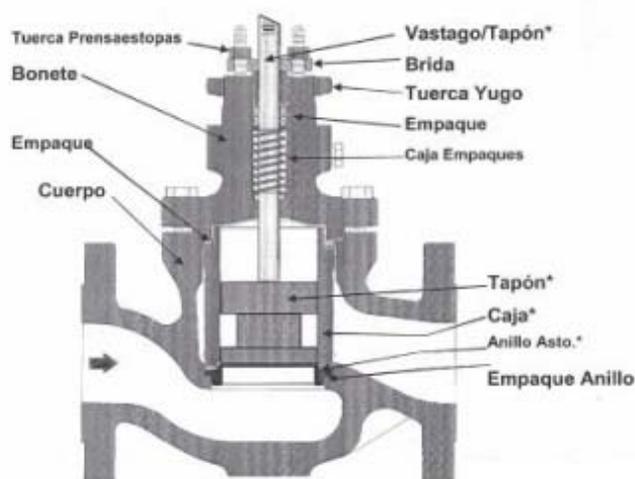


Figura 7.5 Esquema de una válvula de globo [9]

7.5. Comparación de las leyes de cierre de las válvulas

En el *Gráfico 7.1* se pueden observar las curvas de cierre para cada una de las válvulas a comparar: la válvula de mariposa, la válvula de bola y la válvula de globo. Se puede observar como la válvula de bola está casi en continuo crecimiento desde el principio, es decir, el ratio de apertura influirá desde el primer momento.

En el caso de la válvula de mariposa también aumenta progresivamente pero, al principio, 'le cuesta' un poco más. En cambio, la válvula de globo hasta que no se cierra hasta la mitad no empieza a sufrir las consecuencias que dicha limitación implica.



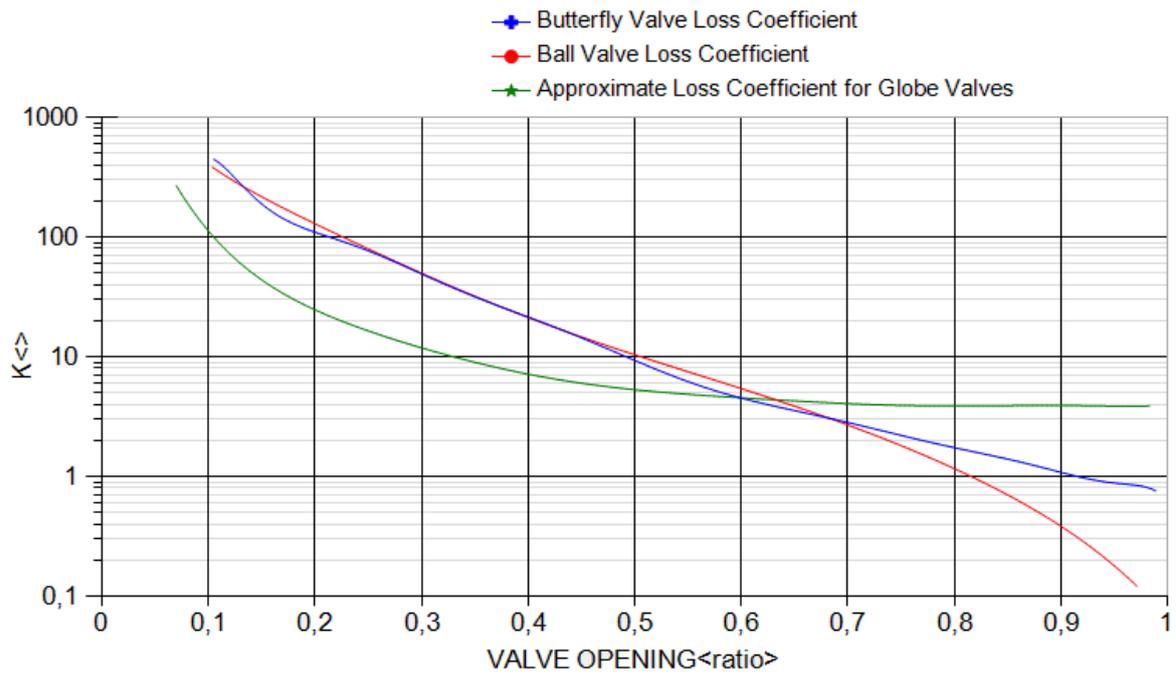


Gráfico 7.1 Representación gráfica de las leyes de cierre de las válvulas



8. Simulación de perturbaciones

Antes de realizar simulaciones con el modelo final, tanto para familiarizarse con el programa Flowmaster como para hacer un estudio de las propiedades que más afectación tendrán sobre el sistema, se han llevado a cabo simulaciones con sistemas menos complejos.

8.1. Validación de los componentes a utilizar

Primeramente, se ha simulado un sistema consistente en dos bombas que extraen flujo de un depósito de alimentación común. Una válvula de no retorno está colocada en la salida de cada bomba. Las dos bombas alimentan una tubería de impulsión ascendente común que, más adelante, se bifurca para alimentar los depósitos de descarga.

Se analiza el sistema en un periodo de diez segundos. Inicialmente las dos bombas están en funcionamiento y la válvula de control se encuentra completamente abierta. Entonces, durante los primeros dos segundos la válvula se va cerrando progresivamente. Después de otros dos segundos, una de las bombas se dispara.

Se supone que aparecerá el fenómeno de la cavitación a partir de la válvula de control. Por eso, se crea una “cavidad de vapor” dentro del sistema.

Los efectos de la cavitación son serios y podemos utilizar una serie de alternativas para abordar el problema:

- Operación de válvulas más lenta
- Añadiendo una válvula de admisión de aire
- Añadiendo un tanque de compensación o depósito de aire

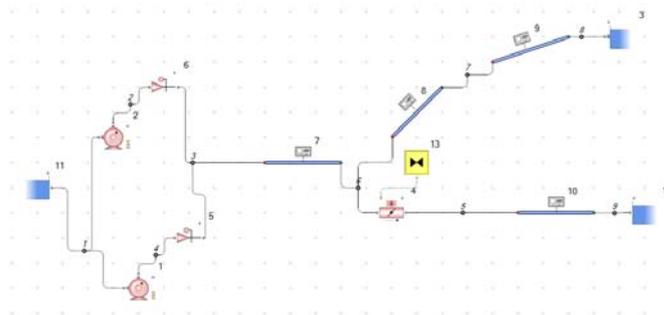


Figura 8.1 Esquema del primer modelado de pruebas

Con la simulación de este modelo se pretende verificar si es posible la correcta adición de elementos al sistema como depósitos de aire, puesto que, en los próximos modelos a simular se precisará de dicha información para poder avanzar el estudio.

En este caso, se ha tomado la vía del acumulador de aire, puesto que es la que más interesa. En las *Figuras 8.2 y 8.3* se observa la diferencia de presión sin acumulador de aire y con acumulador de aire.

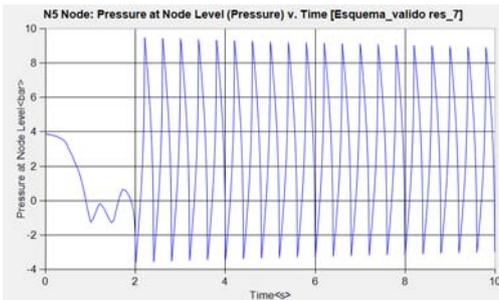


Figura 8.2 Presión en el nodo 5 sin acumulador de aire

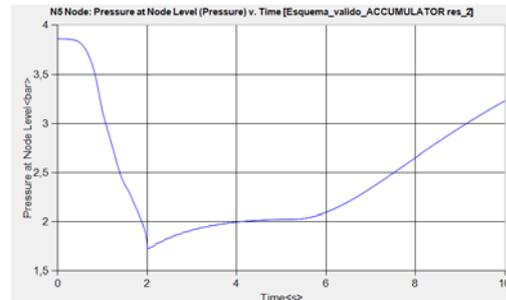


Figura 8.3 Presión en el nodo 5 con acumulador de aire

8.2. Sensibilidad del sistema al tipo de perturbación

Partiendo del primer esquema simulado, se procede a la simulación de otro modelo sin bifurcación para realizar un estudio de las variaciones o fluctuaciones de presiones en diferentes puntos del sistema.

El objetivo principal de este apartado es poder llegar a conocer los efectos de cada uno de los parámetros que afectarán al estudio de la presión antes de proceder a las simulaciones con acumuladores de aire para, así, obtener unos datos más fiables y precisos. En la *Figura 8.4* observamos el modelo de estudio.

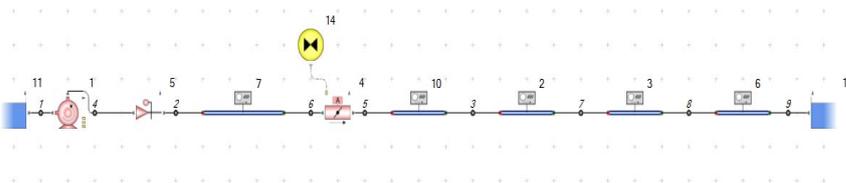


Figura 8.4 Esquema del modelo de pruebas

Los puntos de más interés serán los nodos que se encuentren después del controlador y la válvula, pues son los que recibirán la señal sinusoidal generada por el controlador.



Así pues, los parámetros en los que se focalizará el estudio son:

- Tipo de válvula
- Longitud tubería
- Número de tuberías
- Diámetro de la tubería
- Anchura de la señal sinusoidal del controlador
- Frecuencia de la señal sinusoidal del controlador
- Ratio de apertura de la señal sinusoidal del controlador

8.2.1. Tipo de válvula

Como se ha mencionado anteriormente, se han escogido tres tipos de válvulas, debido a sus propiedades, para el sistema a simular: la válvula de mariposa, la válvula de bola y la válvula de globo.

Para conseguir la máxima precisión en la extracción de los datos relacionados con el aumento o disminución de presión en cada tramo se precisa de una válvula que genere una señal con la **mayor amplitud** y la **menor distorsión** posibles. Para ello, se ha realizado una simulación manteniendo todos los parámetros del sistema iguales excepto la válvula, es decir, tanto la curva generada por el controlador, como la longitud de las tuberías, el número de tuberías, el diámetro, etc. son constantes.

Una vez realizada la simulación se analiza la presión resultante en cada uno de los puntos de estudio (nodos 5, 3, 7, 8 y 9) y se establece el gráfico representativo de cada una de las válvulas seleccionadas.

En las *Figuras 8.5, 8.6 y 8.7* podemos observar las representaciones gráficas de las presiones de cada uno de los puntos en diferentes instantes temporales para cada una de las válvulas. Así pues, observamos la evolución de las presiones en dichos puntos y constatamos que la válvula más idónea para nuestro estudio es la válvula de mariposa, pues tiene gran amplitud y poca distorsión. La válvula de bola y la válvula de globo se distorsionan a lo largo del tiempo y ese factor causaría problemas en el estudio del modelo, pues sucederían fenómenos no deseados como, por ejemplo, sobrepresiones.

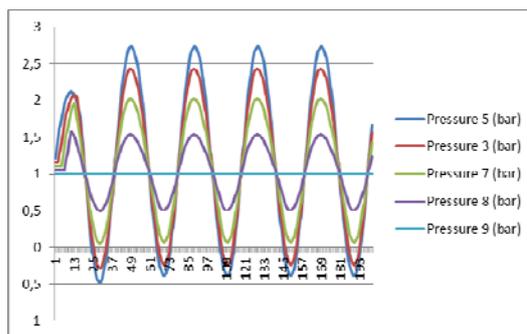


Figura 8.5 Representación gráfica de las presiones con la válvula de mariposa

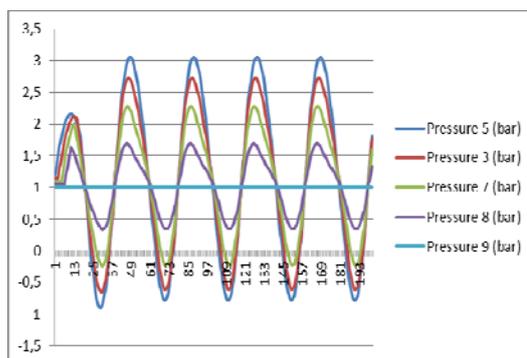


Figura 8.6 Representación gráfica de las presiones con la válvula de bola

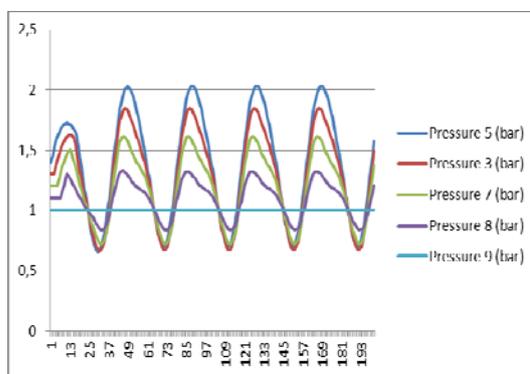


Figura 8.7 Representación gráfica de las presiones con la válvula de globo

Una vez verificada cuál de las válvulas aporta mayor fiabilidad en el diseño a simular, en este caso la válvula mariposa, las pruebas de los otros parámetros se realizarán con la válvula de mariposa junto al controlador.



8.2.2. Longitud de la tubería

Otro parámetro a considerar es la longitud de la tubería. Es importante conocer si influirá en el estudio puesto que dependiendo de ello la señal saliente del controlador puede variar.

Se han realizado pruebas con cuatro tuberías después de la válvula y del controlador. En las Figuras 8.8 y 8.9 se observa el resultado gráfico de dichas simulaciones. En un caso la longitud de las tuberías es de 25 metros ($L=25m$) y en el otro de 100 metros ($L=100m$).

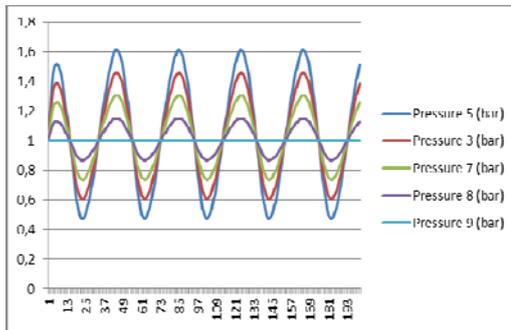


Figura 8.8 Representación gráfica de las presiones con $L = 25m$

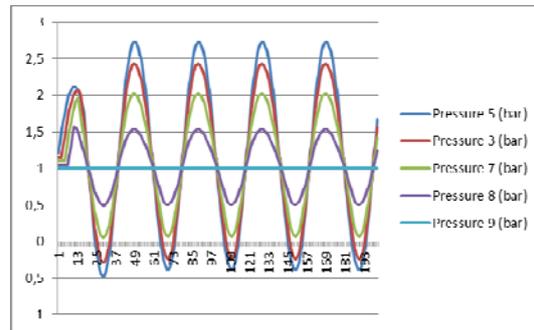


Figura 8.9 Representación gráfica de las presiones con $L = 100m$

Claramente la presión aumenta de manera proporcional a medida que lo hace la longitud de la tubería. Así pues, deberá estipularse una longitud de tubería para evitar confusiones cuando se realicen las simulaciones finales. Se tomará la longitud de 25 metros para las cuatro tuberías posteriores a la válvula.

8.2.3. Número de tuberías

Después de establecer la longitud de las tuberías, se debe averiguar si, en la misma distancia (en metros), la evolución de la presión en la red será la misma con distinto número de tuberías.

Para ello se ha llevado a cabo una simulación con cuatro tuberías de 25 metros, idéntica a la que se ha hecho anteriormente para el estudio de la longitud de la tubería, y otra con una tubería de 100 metros (véanse las Figuras 8.10 y 8.11).

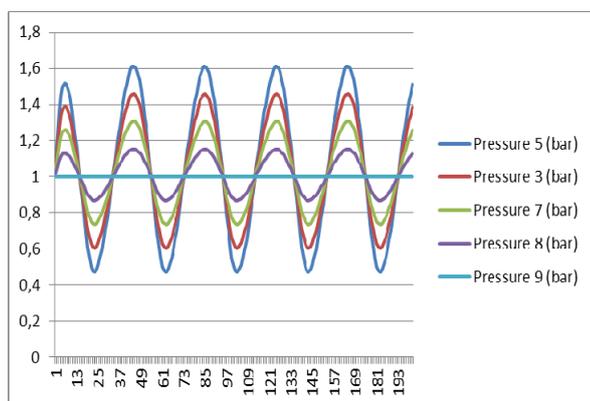


Figura 8.10 Representación gráfica de las presiones con 4 tuberías

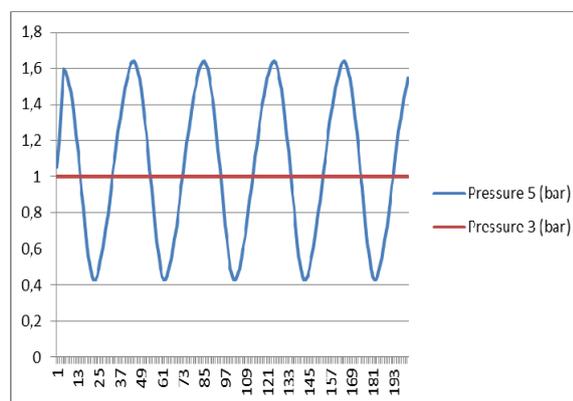


Figura 8.11 Representación gráfica de las presiones con 1 tubería

Al quitar tres de las cuatro tuberías, sólo nos quedan los puntos de entrada y salida de la única tubería existente, es decir, obviamente no tendremos los mismos puntos que con las cuatro tuberías. Independientemente de ello, se observa claramente como la evolución del nodo 5 es exactamente la misma, tanto en la Figura 8.10 con cuatro tuberías, como en la Figura 8.11 con una sola tubería. Debido a ello, el número de tuberías es indiferente mientras se respete una única distancia perteneciente a la suma de todas ellas.



8.2.4. Anchura de la tubería

Una vez concretada la válvula a utilizar y la longitud de las tuberías, se ha procedido al estudio del sistema para diferentes diámetros de tubería.

De la misma forma que en los anteriores casos, se ha simulado el mismo sistema variando únicamente el parámetro de estudio, en este caso la anchura o diámetro de la tubería.

Anteriormente hemos observado que el número de tuberías es indiferente para la evolución de la presión en un tramo con longitud definida, las simulaciones para concretar el diámetro de las tuberías se han hecho con el sistema de una única tubería después del controlador.

Dichas simulaciones se han realizado con una anchura de tubería de 0,2 metros ($D=0,2m$), 0,3 metros ($D=0,3m$) y 0,4 metros ($D=0,4m$). Al realizar las pruebas con diámetros tan parecidos se pretende poder observar como la presión va variando paulatinamente de un caso a otro.

En las *Figuras 8.12, 8.13 y 8.14* se pueden observar las distintas evoluciones del nodo 5 para los casos de 0,2 metros, 0,3 metros y 0,4 metros, respectivamente.

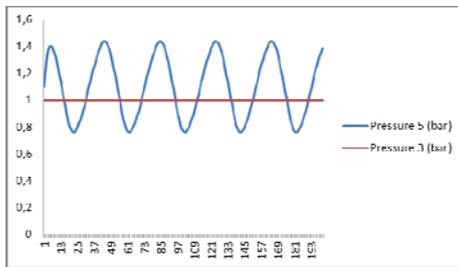


Figura 8.12 Representación gráfica de las presiones con $D=0,2m$

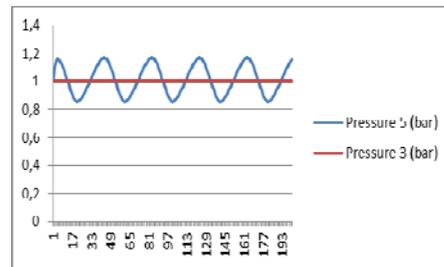


Figura 8.13 Representación gráfica de las presiones con $D=0,3m$

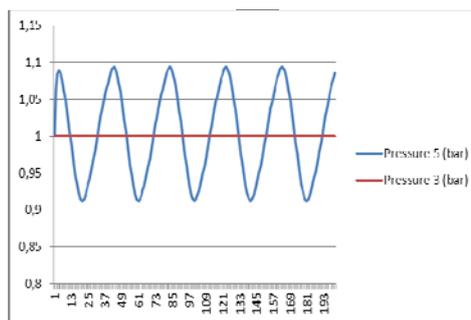


Figura 8.14 Representación gráfica de las presiones con $D=0,4m$

En las tres gráficas anteriores se visualiza como a mayor diámetro de tubería menor presión, así pues, son inversamente proporcionales.

8.2.5. Señal del controlador

Además de los parámetros relacionados con las tuberías y las válvulas, para la correcta realización de estas simulaciones se debe conocer el funcionamiento del controlador y la señal que éste transmite. Por ello, hay que estudiar cada uno de los parámetros que forman parte de su ecuación característica. La forma de la ecuación característica es la siguiente:

$$y = a + b * \text{Math.Sin} (2 * \text{Math.PI} * c * x)$$

Dónde:

a = Ratio de apertura;

b = Anchura;

c = frecuencia.

8.2.5.1. Anchura de la señal del controlador

El primer parámetro a valorar es la anchura de la señal sinusoidal que se precisará para generar una señal suficiente para poder observar su repercusión directa en la presión.

Se han realizado una serie de simulaciones manteniendo el ratio de apertura constante (el valor ha sido fijado basándose en la ley de cierre de la válvula mariposa) y la frecuencia constante. Así pues se visualizan los efectos de una mayor o menor anchura de señal.

Primeramente se ha establecido una anchura de 0,05 metros, luego de 0,1 metros y finalmente de 0,24 metros.

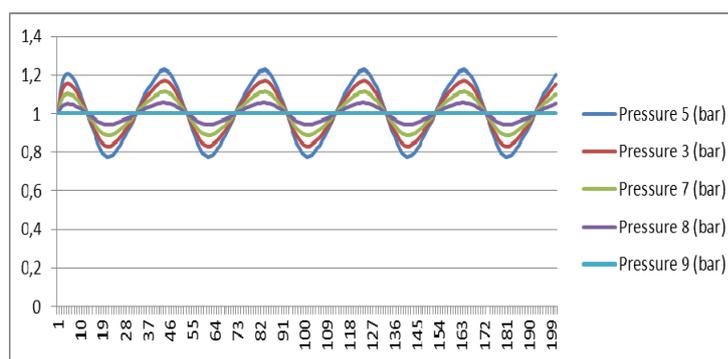


Figura 8.15 Representación gráfica de las presiones con $a = 0,05$



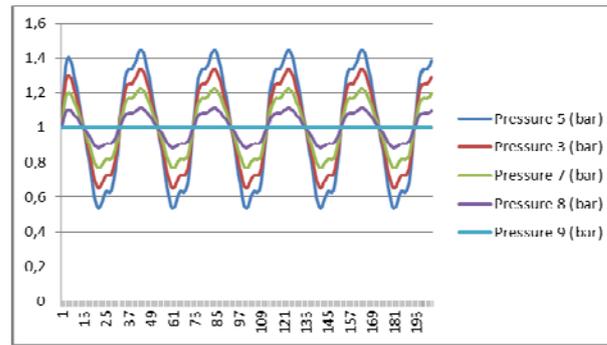


Figura 8.16 Representación gráfica de las presiones con $a = 0,1$

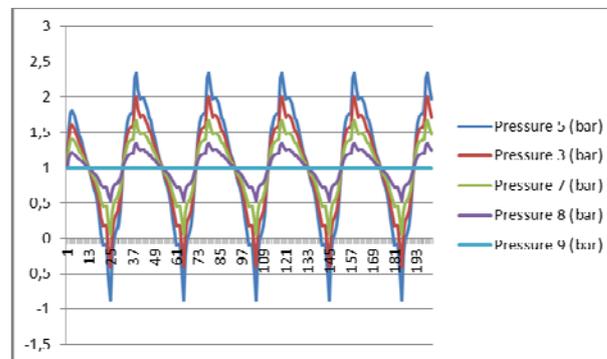


Figura 8.17 Representación gráfica de las presiones con $a = 0,24$

Se observa claramente cómo, a medida que se aumenta la anchura de la señal sinusoidal, también aumenta en consecuencia la presión. Además, en el segundo y tercer caso, se observa una distorsión de la gráfica debido a que la señal oscila hasta un punto muy cercano al cierre de la válvula y eso genera perturbaciones indeseadas. Así pues, a más anchura más presión pero siempre vigilando el ratio de apertura impuesto en la simulación pues dependiendo de éste la anchura no podrá crecer demasiado, pues se deben evitar posibles distorsiones o situaciones de flujo indeseadas.

En la *Figura 8.18* se pueden ver con claridad los comportamientos citados anteriormente a medida que se aumenta la anchura.

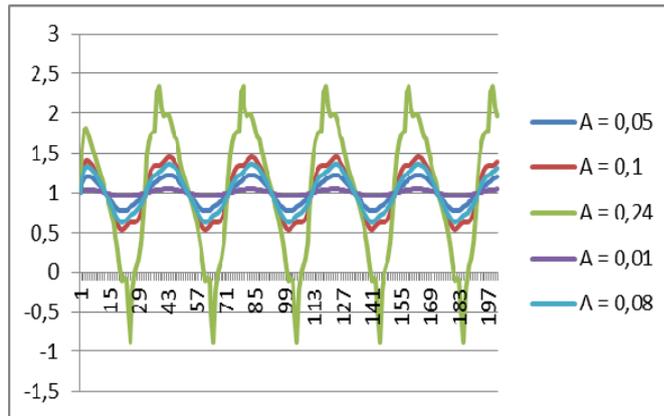


Figura 8.18 Representación gráfica de la presión en el nodo 5 para distintas anchuras

8.2.5.2. Frecuencia de la señal del controlador

La periodicidad en la que se generan las ondas de la señal sinusoidal también es un factor a tener en cuenta cuando se quieren establecer unos parámetros en la curva de un controlador. Por ello, se han realizado pruebas para ver su afectación en el sistema, más concretamente en su afectación sobre la presión durante su trayecto por la red.

Se han ejecutado tres pruebas distintas con tres frecuencias distintas ($f = 0.5, 1$ y 4) y, como siempre, manteniendo los demás parámetros constantes para poder conservar sólo el efecto de la característica a tratar.

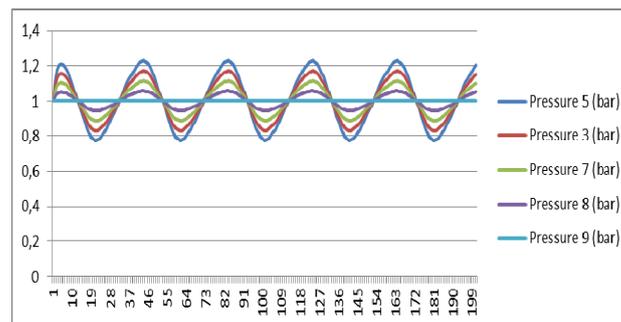


Figura 8.19 Representación gráfica de las presiones con $f = 0,5$



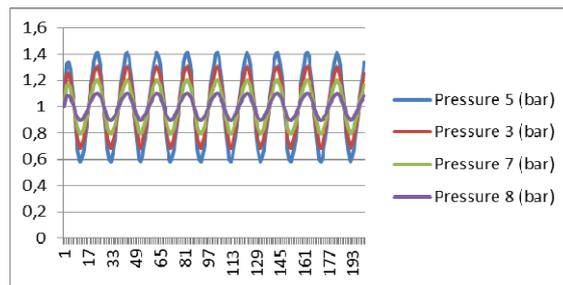


Figura 8.20 Representación gráfica de las presiones con $f = 1$

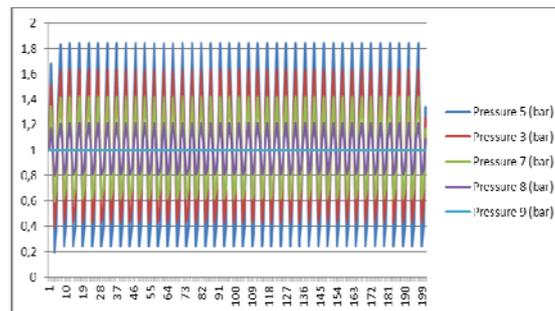


Figura 8.21 Representación gráfica de las presiones con $f = 4$

Observando las gráficas para los tres casos tratados, claramente se visualiza como a medida que incrementa la frecuencia de las ondas generadas por el controlador, aumenta la presión del interior del sistema a partir de dicha señal.

8.2.5.3. Ratio de apertura de la señal sinusoidal del controlador

La tercera y última variable a tener en consideración en la señal sinusoidal generada es el ratio de apertura de la válvula. Como ya hemos visto anteriormente, dependiendo de la ley de cierre de la válvula, en nuestro caso la de la válvula mariposa, tendrá una afectación mayor o menor el incremento o disminución del ratio de apertura en cada instante.

Al igual que con las variables anteriores, se han llevado a cabo una serie de simulaciones para observar qué sucede con la presión al aumentar o disminuir el ratio de apertura (R). En la *Figura 8.22* se puede ver perfectamente que cuanto mayor es el ratio de apertura, menor es la presión, es decir, son inversamente proporcionales.

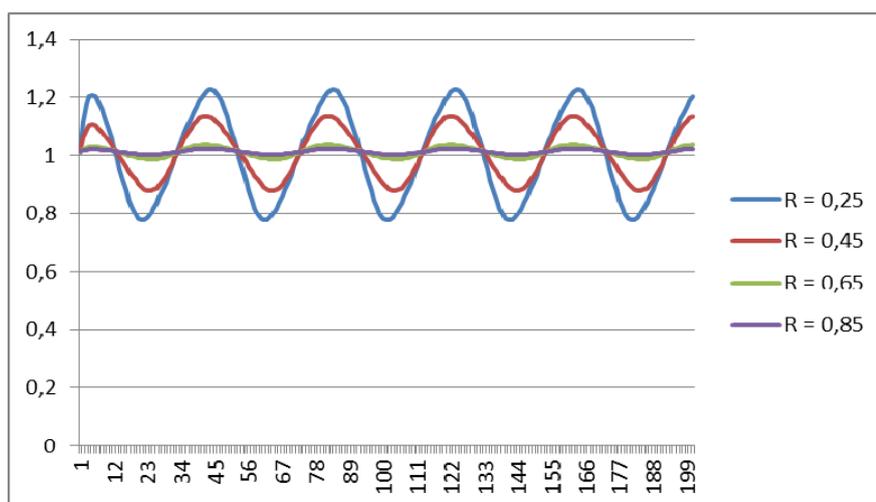


Figura 8.22 Representación gráfica de la presión en el nodo 5 con diferente ratio de apertura

8.3. Respuesta del sistema a la presencia de aire

Una vez establecidos los parámetros que afectan a la presión, se han llevado a cabo simulaciones con acumuladores de aire en distintos puntos del sistema para simular las posibles bolsas de aire generadas durante el funcionamiento diario de la instalación.

El objetivo, como bien se ha citado anteriormente, es estudiar la factibilidad de este sistema de detección de bolsas de aire mediante acumuladores de aire con la señal sinusoidal previamente estudiada.

Se han realizado simulaciones con:

- Un acumulador en el nodo 5
- Un acumulador en el nodo 3
- Un acumulador en el nodo 3 y otro en el nodo 7

Se pretende observar, en los puntos anteriores y posteriores a los acumuladores de aire, si hay diferencias significativas de presión o distorsiones en la señal para establecer un patrón de comportamiento dependiendo de la cantidad de aire contenida.



8.3.1. Simulaciones con el acumulador de aire en el nodo 5

En primera instancia, se ha procedido a situar un acumulador de aire en el nodo 5 (*Figura 8.23*) para, como ya hemos mencionado anteriormente, simular la presencia de aire dentro de la instalación en un punto concreto.

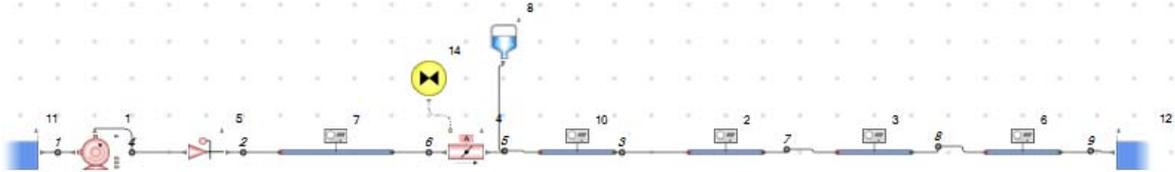


Figura 8.23 Esquema del sistema de simulación con un acumulador de aire en el nodo 5

Se ha llevado a cabo la simulación con distintas áreas del acumulador para simular diferentes posibles cantidades de aire dentro del sistema y, así, observar la afectación de un mayor o menor volumen de aire dentro de la tubería. En la *Figura 8.24* se puede ver como con un nivel bajo de aire la señal es prácticamente idéntica a la señal sin acumulador aunque aumenta ligeramente la amplitud. Con un nivel de aire un poco más elevado, además de verse modificada la amplitud, se distorsiona la señal produciéndose una especie de “doble montículo”. Al aumentar significativamente el volumen de aire, se produce una disminución de la amplitud i también de la frecuencia. Con un nivel de aire muy elevado se produce una amortiguación de la pulsación. Este fenómeno se produce aguas abajo desde el acumulador.

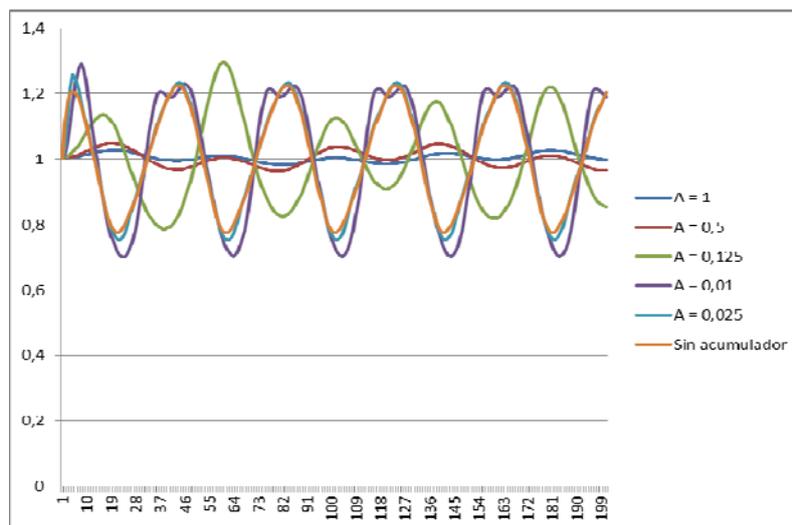


Figura 8.24 Representación gráfica de las señales de la presión en el punto 5 para distintas cantidades de aire

Se ha visto el comportamiento de la señal estudiando el punto en el que se ha situado el acumulador pero para sacar conclusiones más certeras se deben observar los puntos que le preceden (*Figura 8.25*).

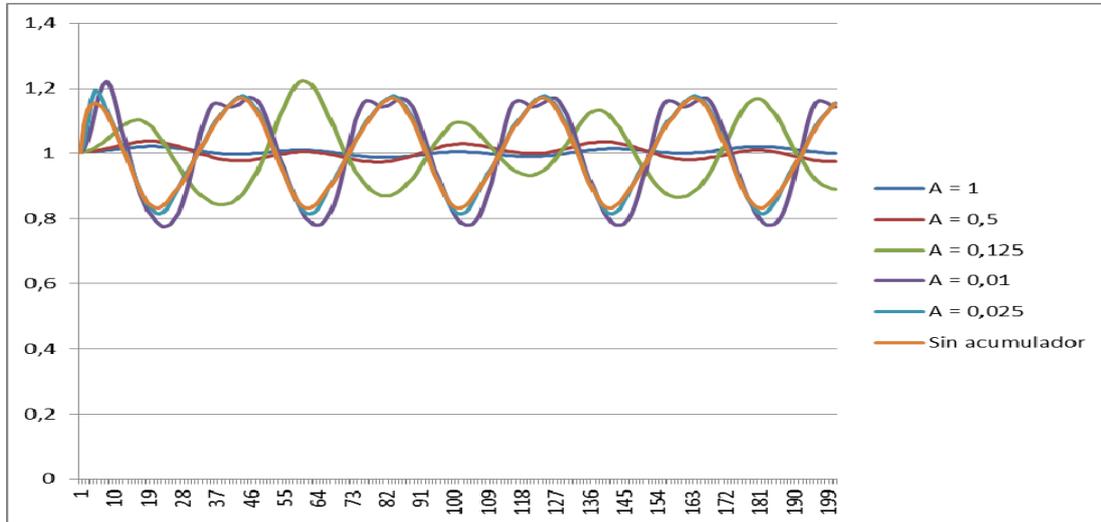


Figura 8.25 Representación gráfica de las señales de la presión en el punto 3 para distintas cantidades de aire

Se visualiza un comportamiento semejante al del observado en el nodo 5 con anterioridad. Por lo tanto, se mantiene el patrón de conducta tanto en el punto donde se sitúa el acumulador de aire como en los puntos posteriores al mismo.

8.3.2. Simulaciones con el acumulador de aire en el nodo 3

A continuación, se realiza una prueba idéntica a la anterior pero modificando el punto de colocación del acumulador, en este caso se situará en el punto 3 (véase *Figura 8.26*).

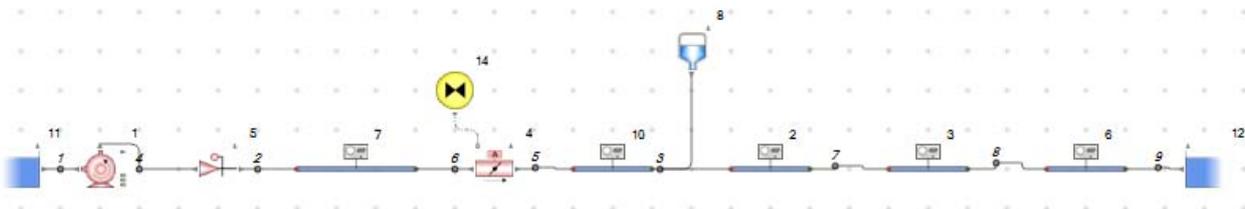


Figura 8.26 Esquema del sistema de simulación con un acumulador de aire en el nodo 3



Realizando la misma metodología de testeo, se han analizado las señales en los puntos 5 (Figura 8.27) y 7 (Figura 8.28), es decir, en el punto anterior y posterior a donde está colocado el acumulador de aire. Con ello se pretenden observar los fenómenos de afectación tanto aguas arriba como aguas abajo tomando el acumulador colocado como punto de referencia.

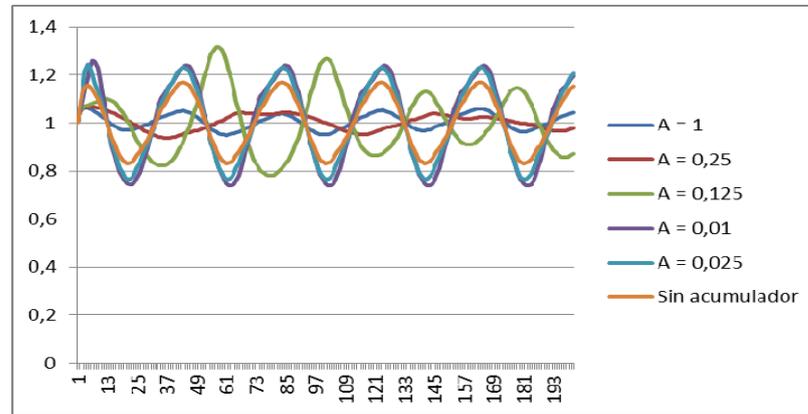


Figura 8.27 Representación gráfica de las señales de la presión en el punto 5 para distintas cantidades de aire

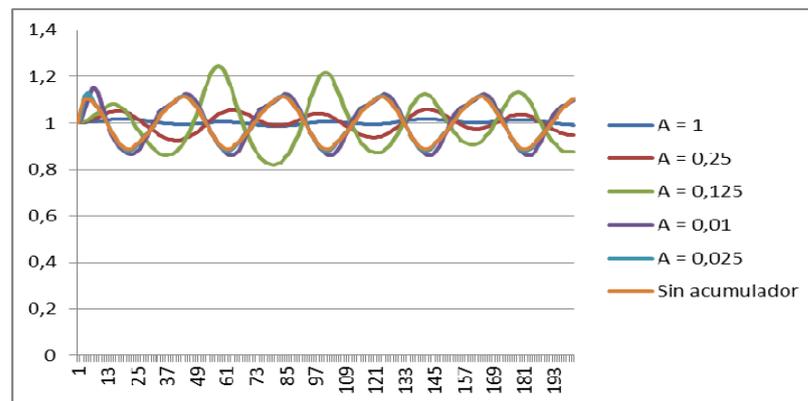


Figura 8.28 Representación gráfica de las señales de la presión en el punto 7 para distintas cantidades de aire

Claramente, el comportamiento situando el acumulador en el punto 3 se asemeja a la conducta observada cuando se colocaba en el nodo 5. Además, mediante esta prueba, se llega a la conclusión de que el acumulador afecta tanto aguas arriba como aguas abajo. Esto supondrá una complicación en el momento de localizar la ubicación de las bolsas de aire pues dificultará el saber su situación exacta.

8.3.3. Simulaciones con acumuladores en los nodos 3 y 7

Finalmente, debido a los resultados obtenidos al colocar los acumuladores primero en el nodo 5 y después en el nodo 3, se ha realizado una prueba con dos acumuladores en dos puntos distintos del sistema (*Figura 8.29*) para observar si se suman sus efectos o por el contrario se visualizan modificaciones en la señal del mismo tipo que las vistas anteriormente como modificación de la amplitud, frecuencia, etc.

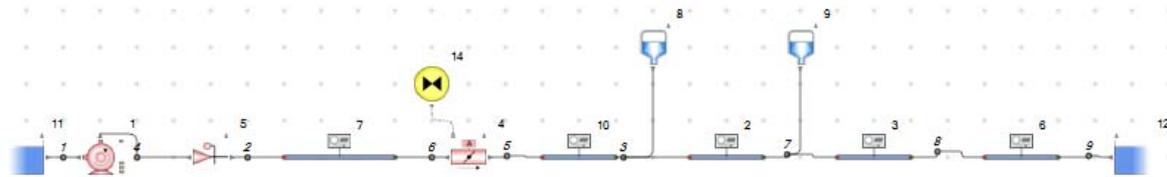


Figura 8.29 Esquema del sistema de simulación con acumuladores de aire en los nodos 3 y 7

En este caso se observará la evolución de la señal en cada uno de los puntos para un análisis exhaustivo y comparativo (*véase Figura 8.30*).

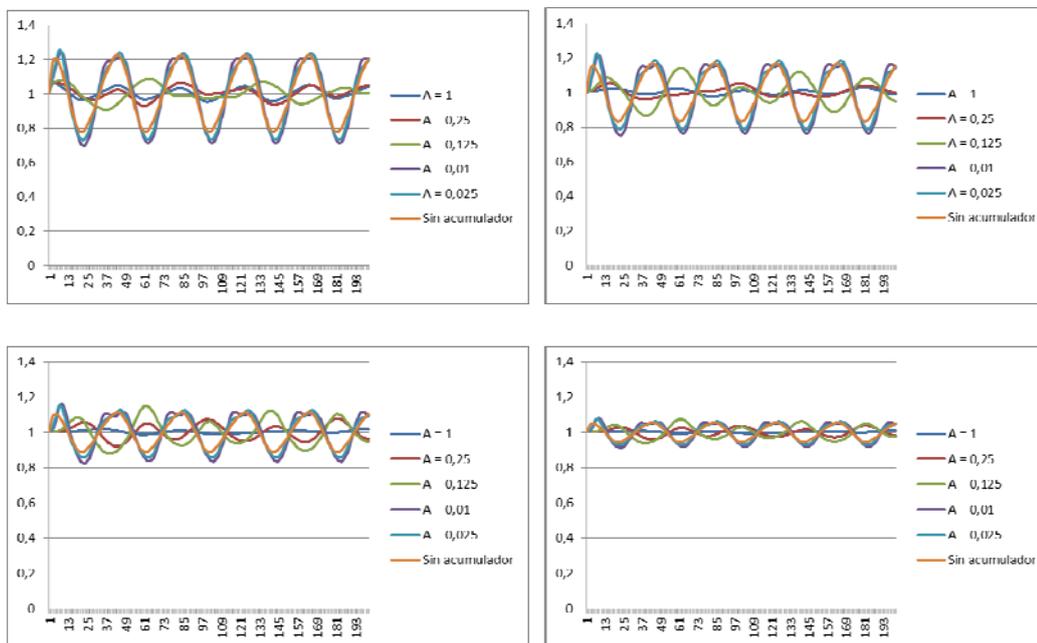


Figura 8.30 Representaciones gráficas de las presiones en cada uno de los puntos con la simulación de dos acumuladores en lugares distintos.



Observando en cada uno de los puntos de estudio del sistema la distribución de presiones a lo largo el tiempo se vuelve a repetir el mismo patrón que en los casos de un acumulador, pues tanto la señal como el efecto de las bolsas de aire se propaga por todos los nodos dificultando así el saber la posición exacta donde se encuentra la acumulación de aire.

9. Simulaciones con el modelo de ALBA

Una vez llevadas a cabo las simulaciones con los modelos reducidos para el estudio de las variables finales a utilizar y tener en cuenta, se ha procedido a la realización de las simulaciones con la instalación del ALBA. Primeramente, se han realizado pruebas en el grupo de impulsión del *Storage Ring*, es decir, el grupo de bombas P08 pues son las que tienen más cabal. Debido a ello, será de mayor facilidad determinar la afectación de la presencia de acumuladores de aire.

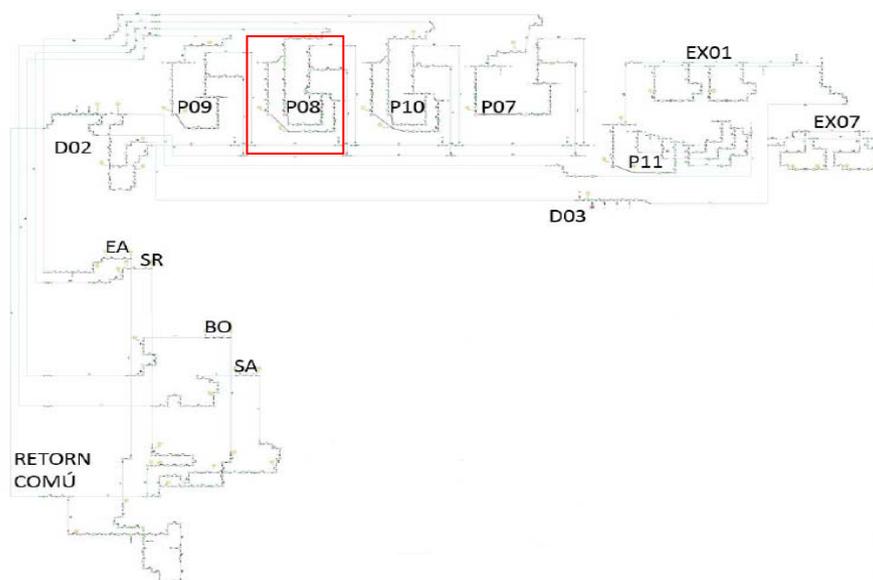


Figura 9.1 Esquema del modelo entero y sus subsistemas

El procedimiento para estas simulaciones se asemeja al de las pruebas con modelos sencillos. Primero se realizará una simulación del sistema sin oscilación en la válvula ni bolsas de aire para observar el comportamiento normal del sistema antes de imponerle perturbaciones. Más tarde, se lanzará una simulación haciendo oscilar una válvula para observar si se propaga la señal a través del sistema y hasta donde se propaga. Finalmente, se colocarán acumuladores de aire en distintos puntos del sistema (cercanos a la válvula, a una distancia intermedia entre las bombas y los anillos y lejos de la válvula) para observar su afectación sobre el mismo y para visualizar si su localización es determinante o, por lo contrario, afecta del mismo modo en un lugar u otro debido a la propagación de la señal por todo el sistema.



9.1. Viabilidad y alcance de la señal sinusoidal

Primeramente, se han realizado pruebas en el grupo de impulsión del *Storage Ring*, es decir, el grupo de bombas P08 pues son las que tienen más cabal. Debido a ello, será de mayor facilidad determinar la afectación de la presencia de acumuladores de aire.

Como se ha mencionado con anterioridad, se ha llevado a cabo una simulación con el sistema sin imponer señal oscilatoria y luego imponiendo la señal oscilatoria para observar si realmente se propaga y la instalación no compensa la señal. En la *Figura 9.2* se observa la diferencia entre ambos casos.

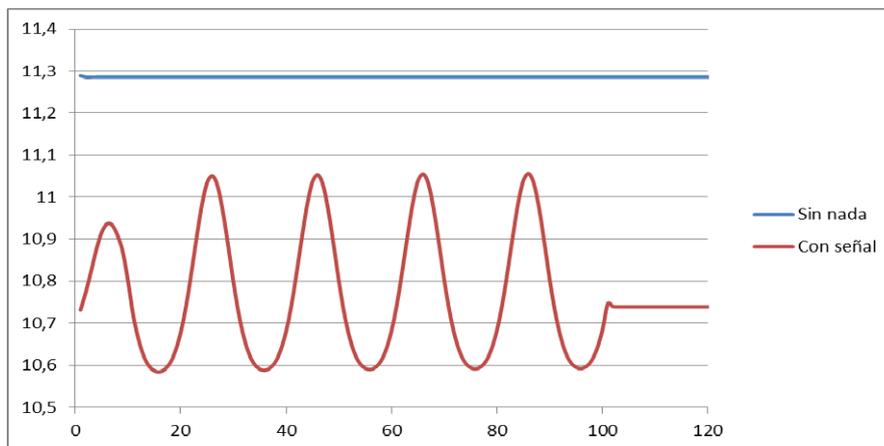


Figura 9.2 Señal sin oscilación de la válvula y con oscilación de la válvula

La figura anterior muestra la señal de un punto situado cerca de los anillos, es decir, alejado del lugar donde se inicia la señal. Así pues se observa como la señal sinusoidal se propaga por el sistema y eso permitirá la detección de aire de una forma más eficiente. Además, al establecer una comparativa entre ambas representaciones, se comprueba que el sistema de oscilación propuesto funciona correctamente ya que, sin señal sinusoidal se observa una presión constante y con la señal una oscilación durante los 10 segundos en los que se le aplica dicha señal al sistema.

Después de llevar a cabo la prueba con el grupo de impulsión P08 se ha comprobado que el comportamiento en los otros grupos de impulsión (P07, P09 y P10) se asemeja. Se ha llegado a la conclusión de que el sistema planteado con la señal sinusoidal funciona en todos los grupos de impulsión, propagándose la señal por cada una de las líneas en las que se aplica dicha señal.

En la *Figura 9.3* se ha hecho una comparación de la señal en un nodo cercano a la válvula oscilatoria y un punto muy alejado del foco inicial de la señal (cerca de los anillos).

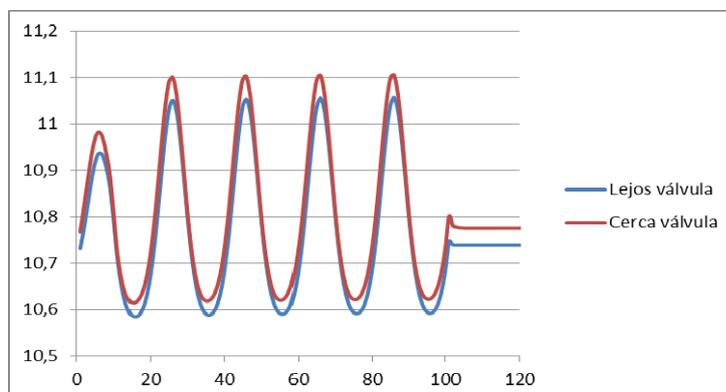


Figura 9.3 Análisis comparativo de las presiones entre 2 puntos del sistema

Claramente se observa una conservación de la señal con una pequeña disminución de la presión debido a la propagación a través de la instalación.

9.2. Efecto del aire dentro del sistema

Una vez validada la sistemática establecida con la oscilación de la válvula, al igual que se realizó con anterioridad en los sistemas más simples, se ha procedido a la colocación de bolsas de aire en el sistema para ver su afectación sobre el mismo.

En primera instancia, se han colocado acumuladores de aire en puntos cercanos a la válvula oscilatoria para observar su respuesta ante el sistema y se han observado las reacciones que se producen en puntos cercanos y lejanos en la instalación.



9.2.1. Respuesta del sistema ante la colocación de acumuladores de aire cercanos al foco oscilatorio

Pruebas con un acumulador de aire cercano a la válvula

De la misma forma que se llevó a cabo en las simulaciones iniciales con sistemas simplificados, se han colocado acumuladores de aire de distintas dimensiones para simular distintas áreas de bolsas de aire. Así pues, en la Figura 9.4 pueden observarse las distintas reacciones de la señal oscilatoria a diferentes cantidades de aire.

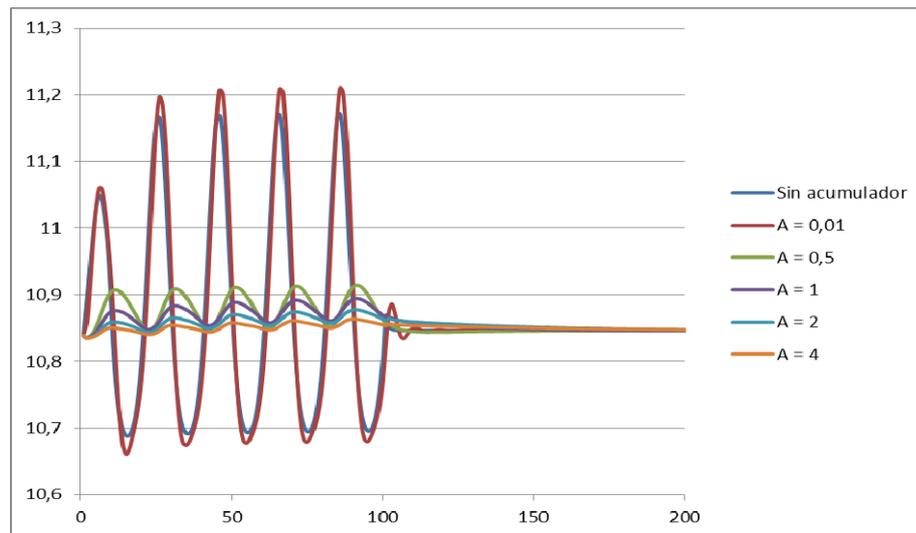


Figura 9.4 Representación gráfica de la señal producida con distintas cantidades de aire

Se puede observar como con una cantidad reducida de aire la señal es prácticamente igual a la señal sin acumulador aunque aumenta ligeramente la amplitud. Al aumentar significativamente el volumen de aire, se produce una disminución de la amplitud i también de la frecuencia. Con un nivel de aire muy elevado se produce una amortiguación de la pulsación.

El comportamiento de la señal es idéntico al que se había visto en las simulaciones iniciales, por ello, el sistema de detección de bolsas de aire es fiable. Por otro lado, como ya se había explicado en capítulos anteriores, esta señal se propaga por todos los puntos del sistema y dificulta la localización exacta de las bolsas de aire.

Pruebas con dos acumuladores de aire cercanos a la válvula

Ya validado el efecto de un acumulador de aire, se han realizado pruebas con dos acumuladores cercanos al foco de oscilación. En este caso se ha mantenido constante la cantidad de aire puesto que ya ha quedado demostrada la afectación del volumen de aire.

La respuesta en todos los puntos sigue el mismo patrón (*Figura 9.5*).

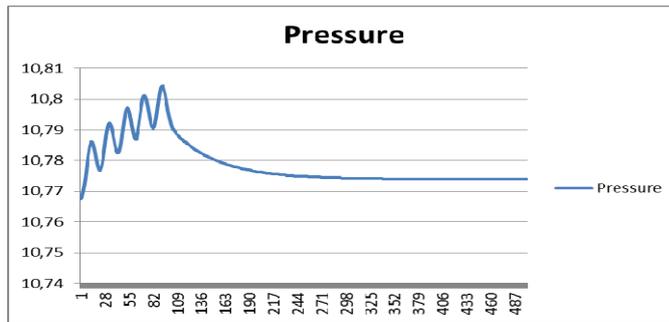


Figura 9.5 Representación gráfica de la señal resultante al colocar 2 acumuladores de aire con $A = 2 \text{ m}^2$

Al realizar la simulación, se ha observado un comportamiento semejante al de las pruebas realizadas con un solo acumulador con la misma cantidad de aire que la suma de los dos acumuladores tratados. Es decir, la simulación con un acumulador de área 2 m^2 se asemeja a la simulación con dos acumuladores de 1 m^2 . Por ello, se ha realizado un análisis comparativo entre dichos casos (*véase Figura 9.6*).

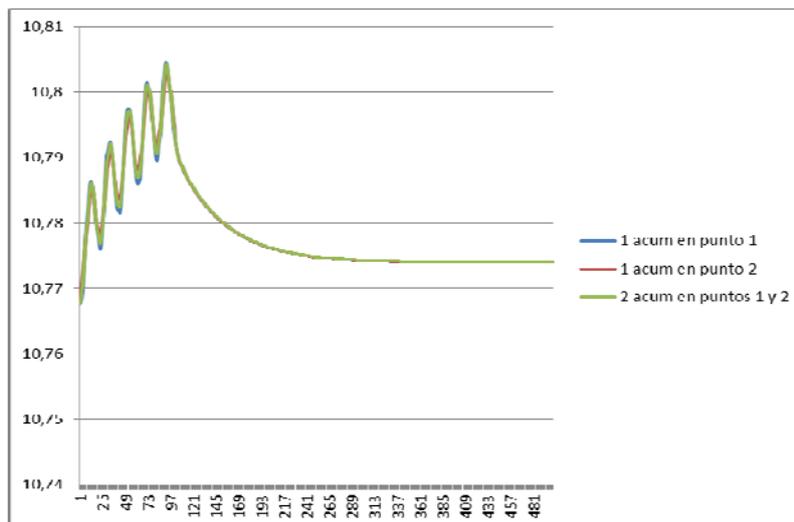


Figura 9.6 Comparación entre los casos de un acumulador y el caso de 2 acumuladores



Efectivamente el comportamiento es casi idéntico y, por lo tanto, la importancia reside en la en la cantidad de aire, independientemente del número de acumuladores de aire que se coloquen.

9.2.2. Respuesta del sistema ante la colocación de acumuladores de aire lejanos al foco oscilatorio

Finalmente, para acabar de corroborar que la colocación de los acumuladores o la cantidad de los mismos no influye en la afectación sobre el sistema, se han realizado unas pruebas con acumuladores muy alejados de la válvula oscilatoria, es decir, muy cerca de los anillos.

Observando la Figura 9.7 se observa una gráfica que sigue la misma conducta que las vistas con anterioridad. Por ello, la colocación del acumulador de aire es independiente de la reacción generada sobre el sistema debido a la propagación de la señal por toda la instalación.

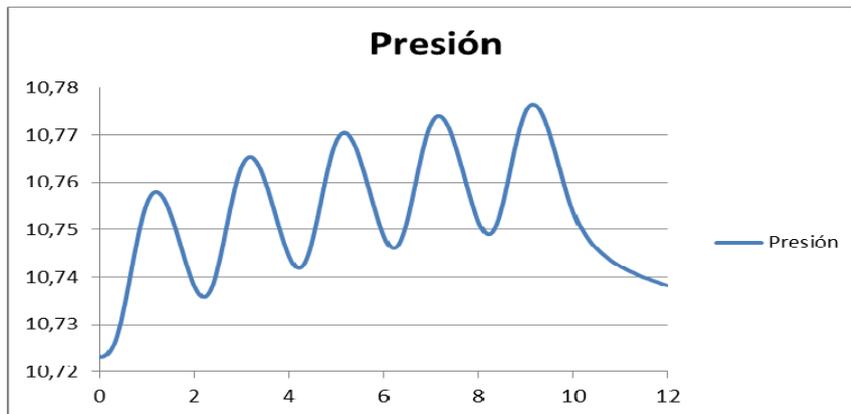


Figura 9.7 Señal de los puntos del sistema con acumulador lejos del foco oscilatorio

10. Planificación

Basándose en las necesidades del proyecto, se ha desarrollado una planificación adecuada para enfrentarse de la mejor forma posible a ellas, dentro de un marco estratégico que permite identificar las prioridades y determina los principios funcionales. Planificar es pensar en futuro, de tal manera que se pueda actuar de inmediato. Esto no quiere decir que se haya llevado a cabo todo según el plan establecido, puesto que siempre surgen imprevistos que dificultan el cumplimiento total de las pautas inicialmente estipuladas. Pero al hacer una buena planificación, la posibilidad de realizar ajustes, sin comprometer las metas globales; ha resultado mucho más apropiada.

La planificación del proyecto se ha estructurado a partir de dos tipos de gráfico: el diagrama circular y el gráfico de Gantt. El primer tipo de representación se ha utilizado para saber el porcentaje de tiempo invertido en cada tarea y el segundo para ver la evolución temporal de cada una de ellas.

10.1. Diagrama circular

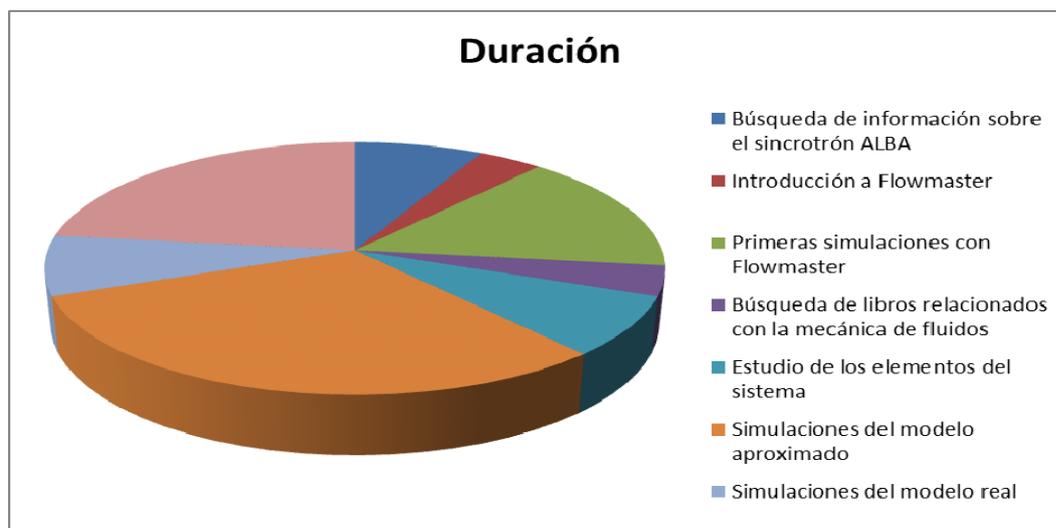


Figura 10.1 Diagrama circular de la duración de cada tarea del proyecto

Como puede observarse en el gráfico circular, las tareas de más duración han sido las relacionadas con simulaciones, pues al llevar a cabo pruebas de este tipo existen muchas variantes y posibilidades diferentes que deben barajarse, y el redactado de la memoria ya que deben agruparse todas las fases del proyecto con una lógica y una armonía.



10.2. Diagrama de Gantt

TAREA	Periodo de tiempo empleado (semanas)																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Búsqueda de información sobre el sincrotrón ALBA	█	█																			
Introducción a Flowmaster		█	█																		
Primeras simulaciones con Flowmaster			█	█	█	█															
Búsqueda de libros relacionados con la mecánica de fluidos							█														
Estudio de los elementos del sistema							█	█	█												
Simulaciones de la respuesta frente perturbaciones										█	█	█	█	█							
Simulaciones del modelo ALBA														█	█	█					
Redactado de la memoria								█	█			█	█					█	█	█	█

Figura 10.2 Diagrama de Gantt de la duración de cada tarea del proyecto

En este diagrama observamos la duración de cada una de las tareas y cuáles han podido hacerse de manera paralela. Por ejemplo, la mayor parte del redactado de la memoria se ha realizado al final del proyecto una vez estaba el proyecto realizado, pero una parte se ha ido redactando a medida que se realizaba el proyecto.

11. Impacto ambiental

Las simulaciones ejecutadas en el presente proyecto han permitido conocer la respuesta del sistema de refrigeración en diversas condiciones de operación habituales o accidentales. La identificación de posibles bolsas o cantidades de aire indeseadas en el sistema permite identificar, a tiempo, indicios de posibles inestabilidades del sistema que pueden desencadenar una parada del mismo. Por lo tanto, el estudio realizado conlleva la reducción de las pérdidas económicas derivadas de dicha parada, así como el ahorro de la energía necesaria para la posterior arrancada del sistema.

Asimismo, las operaciones necesarias para solucionar problemas como las fugas o paradas inesperadas, requieren del vaciado del agua des ionizada contenida en los conductos de la zona donde hay el imprevisto. A menudo, esta agua puede estar contaminada por diversos factores como el desgaste de los conductos y no cumplir los parámetros de pureza establecidos. Debido a ello, una vez finalizada la operación de mantenimiento, puede ser que el sistema deba rellenarse con agua des ionizada pura.

Nuevamente pues, el conocimiento derivado de las simulaciones realizadas implica un ahorro de energía necesario para vaciar y rellenar el agua del circuito. También se evita el consumo excesivo de la red y el coste económico derivado del abocamiento del agua residual.

Por otro lado, la determinación de las pautas de comportamiento mediante las simulaciones numéricas en vez de experimentos, supone una ganancia de energía, pues al realizar experimentos se gasta energía.

Al realizar las simulaciones se estudian los parámetros que menos afectación tendrán sobre el sistema, es decir, no se somete a la red a condiciones extremas para evitar un desgaste prematuro de la maquinaria involucrada. Por todo ello, no sólo se ahorra el coste derivado de la reparación de esta maquinaria o la adquisición de nuevos equipos sino también de las pérdidas económicas derivadas de no dar servicio a las líneas durante la ejecución de los experimentos.



12. Presupuesto

El presupuesto se ha determinado basándose en la estructura del Presupuesto de Ejecución de Material (PEM).

En primera instancia se han evaluado tanto los gastos relacionados con los trabajadores como los pertenecientes a los materiales.

COSTE DE LOS TRABAJADORES					
Recursos requeridos	Horas (h)	Coste por hora (€/h)	Coste (€)		
• 1 Ingeniero junior	240	20	4.800,00		
• Gastos de la S.S. del ingeniero junior (7%)			336,00		
• 1 Ingeniero Senior	14	35	490,00		
• Gastos de la S.S. del ingeniero senior (33%)			161,70		
TOTAL			5.787,70		
COSTE DEL MATERIAL DE TRABAJO					
Material requerido	Coste inicial (€)	Periodo de amortización (años)	Amortización anual (€/año)	Tiempo (años)	Amortización acumulada (€)
• 1 Ordenador portátil	821,99	6	137,00	0,5	68,50
• Licencia de Flowmaster	1.000,00	1	1.000,00	0,5	500,00
• Licencia Office	110,00	4	27,50	0,5	13,75
TOTAL					582,25

Tabla 12.1 Presupuesto de los gastos del proyecto

De acuerdo con la normativa vigente, Orden FOM/1824/2013 de 30 de Setiembre de 2013, se determina el Presupuesto de Ejecución por Contrato (PEC) indicado en la *Tabla 12.2*.

El artículo 131 del Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas [10], aprobado por Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre, establece que el presupuesto base de licitación de los contratos se obtendrá incrementando el de ejecución material en los conceptos de gastos generales de estructura y el 6 por ciento en concepto de beneficio industrial del contratista, así como el impuesto sobre el valor añadido, cuyo tipo se aplicará sobre la suma del presupuesto de ejecución material y los gastos generales de estructura.

Respecto a los gastos generales, señala que cada departamento ministerial fijará, a la vista de las circunstancias concurrentes, un porcentaje del 13 al 17 por 100 en concepto de gastos generales de la empresa, gastos financieros, cargas fiscales, impuesto sobre el valor añadido excluido, tasas de la Administración legalmente establecidas, que inciden sobre el costo de las obras y demás derivados de las obligaciones del contrato. Se excluirán, asimismo, los impuestos que graven la renta de las personas físicas o jurídicas.

PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO	
Gastos	Coste (€)
• Coste de los trabajadores	5.787,70
• Coste del material de trabajo	582,25
TOTAL	6.369,95
• Gastos generales (15%)	955,49
• Beneficio industrial (6%)	382,20
PEM a falta de IVA	7.707,64
IVA (21%)	1.618,60
PEC	9.326,24

Tabla 12.2 Presupuesto final del proyecto

El presupuesto total del proyecto es de NUEVE MIL TRESCIENTOS VEINTISÉIS EUROS CON VEINTICUATRO CÉNTIMOS (9.326,24 €), IVA incluido.



Conclusiones

El software utilizado (Flowmaster) cumple con las especificaciones necesarias para llevar a cabo las simulaciones y pruebas deseadas.

Mediante las pruebas realizadas con el modelo simplificado se ha verificado la posibilidad de simular bolsas de aire en el sistema mediante acumuladores de aire. Además se han valorado los parámetros a tener en cuenta en cuanto a características de las tuberías, tipos de válvulas y señal sinusoidal a utilizar.

En relación a los parámetros de la tubería, la longitud es una característica a tener en cuenta pues dependiendo de ésta la disminución de presión será mayor o menor. Por otro lado, se ha comprobado que el número de tuberías no tiene afectación alguna en la respuesta del sistema.

La válvula idónea para el estudio es la válvula de mariposa, puesto que genera fluctuaciones de mayor amplitud y menor distorsión que las demás válvulas. Su ley de cierre facilita el ajuste de la señal oscilatoria.

En cuanto al movimiento oscilatorio forzado en la válvula mediante un controlador, se han establecido unos valores de referencia que dan fluctuaciones significativas.

La amplitud de la oscilación influye en la presión máxima, pues a más anchura más presión. Eso sí, siempre y cuando no nos acerquemos al cierre de la válvula pues pueden producirse perturbaciones indeseadas. En cuanto al ratio de apertura medio alrededor del cual oscila la válvula se ha comprobado que a mayor valor menor será la presión ya que la válvula está más abierta.

En definitiva, los parámetros de la señal sinusoidal del controlador que se han definido para ser usados en el sistema real de ALBA son (referencia: 0 válvula cerrada, 1 válvula abierta):

- Amplitud del ratio de apertura: 0,05
- Frecuencia: 0,5 Hz
- Valor central de ratio de apertura: 0,25

Al introducir los acumuladores de aire (que simulan las bolsas de aire) en el sistema simplificado se ha llegado a la conclusión de que con volúmenes pequeños de aire la detección es difícil pues apenas varía la oscilación de presión respecto al caso sin acumulador, pero con volúmenes de aire a partir de 0,1 m², aproximadamente, se observa



una variación de la amplitud y de la frecuencia. Este factor se ha repetido y, por lo tanto, corroborado durante la realización de las pruebas con la instalación del ALBA, ya que para volúmenes reducidos de aire no se detectan apenas variaciones en la señal y a partir de un volumen aproximado de $0,5 \text{ m}^2$ sí que se observan.

Asimismo, no se ha podido encontrar un sistema de detección exacta de la localización de las bolsas de aire, pues la distorsión generada por el aire se propaga por todo el sistema. Esta propagación se produce tanto aguas arriba como aguas abajo tomando como punto de referencia la posición del depósito de aire.

En definitiva, al introducir la señal sinusoidal se pueden detectar ciertas cantidades de aire perjudiciales para el sistema pero no su localización exacta.

Para finalizar con éxito el proyecto, se debiera validar de forma experimental lo que se ha observado en la simulación pero todos los indicios indican a que el sistema es fiable y posible de ejecutar.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al tutor del proyecto, Xavier Escaler, su ayuda durante el transcurso del proyecto y elaboración del mismo.

No sólo le doy las gracias por su ayuda incondicional en la ejecución del proyecto sino también por su continuo esmero por dejar siempre todos los conocimientos claros y dando un aprendizaje extra al adquirido durante el Grado de Tecnologías Industriales.

Ha sido una experiencia muy gratificante trabajar con él y me ha guiado de una manera intensa pero a la vez amena durante todo el periodo de trabajo.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] DAVID, C. ALBA *Synchrotron Light Source, Infrastructure and General Services. Asset and Maintenance Management Workshop*, 2013. AMMW, Geneva, 2013. [<http://indico.cern.ch/event/233494/session/1/contribution/56/material/slides/7.pdf>, 3 de Marzo de 2014].
- [2] GENERALITAT DE CATALUNYA. GOVERN. Sincrotró ALBA. [<http://www.gencat.cat/web/multimedia/cat/sincrotró/index.htm>, 9 de Septiembre de 2013].
- [3] CELLS. HEALTH AND SAFETY. *Health and safety at ALBA (CELLS)*. Cerdanyola del Vallès, Salut i seguretat laboral, 2014.
- [4] BOLUFER, P. ALBA. *Anales de mecánica y electricidad*. Vol.87 (4), 2010, p. 60-63.
- [5] CELLS. NEWS AND EVENTS. *Oportunidades de negocio en el sincrotrón*. Bellaterra 2003. [<https://www.cells.es/NewsAndEvents/Files/Oportunidades-empresariales-sincrotron.pdf>, 11 de Noviembre de 2013].
- [6] CELLS. *The synchrotron light source ALBA*. Cerdanyola del Vallès, 2010. [<https://www.cells.es/inauguration-media/inauguration-ebook.pdf>, 13 de Febrero de 2014].
- [7] CAMPMANY, J. El sincrotró de Barcelona. *Revista física*. Vol. 12, p. 14-21.
- [8] MADRILEJOS, A. Sincrotrón a toda máquina. *El Periódico*, 4 de Mayo de 2013, p.2. [<https://www.elperiodico.com/es/noticias/ciencia/sincrotrón-toda-maquina-382879>, 2 de Mayo de 2014].
- [9] <http://www.valvias.com/tipos-de-valvulas.php>
- [10] https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-10541
- [11] <https://es.scribd.com/doc/52355465/1/DEFINICION-DE-SISTEMAS-DE-BOMBEO>

Bibliografía complementaria

GUTIÉRREZ, A., MARTÍN-GAGO J.A., FERRER S. *La luz sincrotrón: una herramienta extraordinaria para la ciencia. Apuntes de Ciencia y Tecnología.* (12), p. 37-46.

PEDRO, I. *Disseny i implementació d'una font de corrent commutada d'alta resolució pels imants d'un Sincrotró.* Treball Fi de Master, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2013.

ORTIGA, J., BRUNO, J.C., CORONAS, A. *Operational Experience of the Polygeneration Plant in Parc de l'Alba (Spain): Start-up and First Results.* International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE), p. 1-15, Pattaya, 2011.

ST-4 Polygeneration Plant. 2nd Conference on Polygeneration, Tarragona, 2011.

JEPPSON, R. W., *Analysis of flow in Pipe Networks.* Logan: Ann-Arbor science, 1977, p. 41.