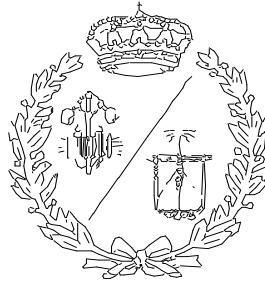


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**DISEÑO DE SOFTWARE DE CONTROL
PARA UN SIMULADOR PARA CIRUGIA
CARDIOTORÁCICA Y MODELADO DE SU
FUNCIONAMIENTO.**

**(Control software design for a cardio-thoracic
surgery simulator and its operation modeling)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

**Autor: Javier Sánchez Espiga
09 - 15**

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a mi familia, amigos, pareja y personas más allegadas, por motivarme a luchar por nuevas metas cada día y tratar de mejorarme, además de apoyarme en los momentos no tan buenos y siempre pretender lo mejor para mí.

Extiendo mi agradecimiento a los profesores Alonso Rentería, Pérez Oria y Viadero Rueda por su ayuda y por todo lo que me han aportado a lo largo de la realización de este proyecto y en mi desarrollo como ingeniero. Sin olvidarme de todos aquellos que han compartido sus conocimientos conmigo y así me han facilitado la consecución de este objetivo que sin ellos y su colaboración no habría sido posible.

TÍTULO	DISEÑO DE SOFTWARE DE CONTROL PARA UN SIMULADOR PARA CIRUGIA CARDIOTORÁCICA Y MODELADO DE SU FUNCIONAMIENTO.		
AUTOR	JAVIER SÁNCHEZ ESPIGA		
DIRECTOR / PONENTE	FERNANDO VIADERO RUEDA Y JUAN MARÍA PÉREZ ORIA		
TITULACIÓN	MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL	FECHA	21/09/2015

PALABRAS CLAVE

Software control, modelo virtual, simhydraulics, Simulink, realismo, reductor de presión, válvulas reguladoras, todo o nada, sistema de bombeo, alta presión, baja presión, caudal, versatilidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se plantea la continuación del PFG de título “Diseño de simulador para cirugía cardiotorácica”. Partiendo de la arquitectura hardware diseñada y desarrollada en el ya nombrado PFG se realizará el software de control que gobernará el funcionamiento de los equipos y además un modelo virtual del conjunto del simulador con el objetivo de analizar su comportamiento.

En el caso del modelo virtual se podía realizar con diferentes software comerciales que permiten el trabajo con sistemas hidráulicos y que otorgan resultados más que satisfactorios. Finalmente se determinó que el más adecuado sería Simulink al disponer de librerías con bloques donde se modeliza el comportamiento de los componentes que se necesitan.

Además al formar parte de MATLAB dispone del potencial de cálculo que caracteriza a este software.

Otro punto a favor es la posibilidad de emplear otros bloques en el modelo para poder plantear mejoras en la arquitectura en vista de los resultados que se obtienen en la simulación.

Para el diseño del software de control se podría haber trabajado con un diseño sencillo en el que no hubiese que realizar cálculos y simplemente se utilizasen los valores conocidos para los casos que se plantean en los cálculos. Sin embargo en busca de una mayor versatilidad y de que el equipo sea capaz de trabajar en un mayor número de situaciones se ha incluido la posibilidad de introducir datos por teclado y que a partir de ellos se realicen los cálculos necesarios para la situación planteada.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para contextualizar el proyecto en tanto en cuanto es la continuación de un trabajo anterior se incluye en la memoria el recordatorio de las partes del PFG que presentan relevancia para el trabajo que se realiza en este PFM.

En la primera parte del proyecto se ha realizado la construcción del modelo virtual de la arquitectura diseñada previamente. Para llevar a cabo esta construcción se han empleado bloques de la librería *simhydraulics* que posibilitan considerar diversos fenómenos que ocurren en los sistemas hidráulicos como la compresibilidad del fluido o la inercia entre otros.

Una vez construida la arquitectura ya diseñada y observados los resultados se plantea algún cambio que facilita la obtención del resultado deseado para el funcionamiento del simulador.

Estos cambios consisten en la inclusión de un par de válvulas en puntos estratégicos del sistema para conseguir que las lecturas de los parámetros principales (presión de alta, presión de baja y caudal) sean las deseadas.

Con estos cambios incorporados se realiza un análisis del montaje explicando la función de cada uno de los elementos y a su vez de los resultados obtenidos y las causas de los mismos.

Además de esos cambios se ha tenido que incorporar algún factor añadido para poder considerar uno de los fenómenos que ocurren en el interior de un sistema hidráulico que no es otro que las pérdidas por fricción.

Para incorporar estas pérdidas se ha trabajado con otro miembro de la Ecuación de Bernoulli como son las diferencias de cotas entre la entrada y la salida de los conductos.

Como segunda parte del proyecto se realiza el diseño del software que manejará el funcionamiento de los equipos realizando cada uno lo que se le ordene por parte del algoritmo de control.

En este sistema de control se ha incorporado el código que gobierna tanto las válvulas reguladoras como las válvulas todo o nada. Además estos códigos están diseñados para poder trabajar en situaciones muy diferentes según la frecuencia cardiaca fijada.

De la misma manera que se realizaba con el modelo virtual se han analizado los resultados de la ejecución del software y algún inconveniente que se puede presentar a la hora de su implementación en el modelo físico.

En ambas partes de este proyecto así como ya se hizo en el PFG se ha pretendido que el nivel de realismo sea elevado ya que es uno de los pilares del funcionamiento de un simulador, el hecho de que su comportamiento se aproxime a la realidad.

Este nivel de realismo ha hecho que se produzcan algunas imprecisiones con respecto de los valores que se habían calculado teóricamente o con respecto de las formas de onda que se esperaban obtener.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

El funcionamiento del modelo virtual es satisfactorio, con los cambios incorporados se ha conseguido alcanzar un funcionamiento muy próximo al deseado. Las imprecisiones que se producen en su funcionamiento, en forma de escalones de presión cuando esta debería ser nula, son debidas al realismo incorporado en las características de los componentes de los circuitos.

Otra muestra de ese realismo son los tiempos de apertura y cierre de las válvulas distintos de 0. Estos producen que las subidas y bajadas en los perfiles de señal leídos en el modelo no tengan pendiente infinita.

Se ha tenido que aumentar la presión de trabajo en el circuito de baja como consecuencia de esos escalones de presión mencionados

anteriormente. Es un incremento asumible y que no afectará demasiado al grado de realismo y al comportamiento del simulador. Las mediciones auxiliares que han incluido en las conclusiones permiten la visualización de otros parámetros como la velocidad de giro y el par del eje de la bomba que dan una dimensión mayor al conocimiento del comportamiento del modelo.

En estas lecturas se aprecia como el régimen estacionario de funcionamiento se ve afectado por las variaciones en la apertura y cierre de las válvulas lo cual por otra parte es lógico por el funcionamiento en conjunto de todos los sistemas y equipos.

En cuanto al software de control se considera que su comportamiento es el adecuado pero teniendo que poner atención a los puntos dobles que se han introducido en los algoritmos para funcionamiento todo o nada.

Los algoritmos que gobiernan las válvulas reguladoras recrean perfectamente el perfil que deberían y presentan una precisión en los cálculos que no se ve influenciada por errores computacionales ni de redondeo.

BIBLIOGRAFÍA

RECURSOS EN PAPEL

Mott, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. Prentice-Hall Hispanoamérica, 4º ed, México [1996]

Moreno Saiz, Víctor Manuel. Estébanez Amigo, Emilio. Pigazo López, Alberto. *Monitorización y control con tarjeta de adquisición de datos*. Publican, Santander [2009]

CRANE, División d. i. *Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill [1989]

Chaturvedi, Devendra K. *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC Press, Florida [2010]

National Instruments. Guía para construir un sistema de adquisición de datos

DOCUMENTOS DIGITALES Y ENLACES WEB

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/>

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/features.html#key-features>

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/features.html#modeling-hydraulic-and-hydropneumatic-networks>

<http://es.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/gaschargedaccumulator.html>

https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/fquiros/Numerico2_03_04/capitulo2.pdf



<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/leyes-de-newton/principio-de-bernoulli>

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se plantea una colaboración entre la Universidad de Cantabria, el Hospital virtual Valdecilla y el IFIMAV con el objetivo del diseño y posterior construcción de un simulador para cirugía cardiotorácica.

Para la Universidad este proyecto supone un nuevo reto a afrontar, puesto que es un proyecto relacionado con un campo actual de investigación en diversas instituciones del mundo, pero las investigaciones son confidenciales por lo que no se cuenta con la oportunidad de consultar bibliografía específica del tema. Al mismo tiempo que es un reto, representa una ocasión inmejorable para continuar con la formación de nuevos ingenieros otorgándole la inestimable oportunidad a un alumno de realizar este proyecto como Proyecto de Fin de Grado, mejorando así su capacidad para desarrollar proyectos ingenieriles de diversas temáticas, aunque esta no esté directamente relacionada con los temas tratados a lo largo de los estudios del grado. Además el alumno trabajará con profesionales que cuentan con una dilatada experiencia y de los cuales puede extraer muchas enseñanzas al mismo tiempo que se realiza el proyecto.

A la Universidad una buena realización del proyecto le brinda la oportunidad del reconocimiento internacional, en un campo puntero hoy día, lo cual puede ser una llamada a oportunidades semejantes en tiempos venideros.

Desde el punto de vista de la ingeniería se plantean retos particulares: la recreación del flujo pulsante del corazón, la monitorización de los datos más relevantes del proceso que tiene lugar en el simulador, el diseño del soporte que actúe como estructura de apoyo del grupo cardiotorácico y que lo mantenga en la posición idónea, la programación del comportamiento de determinados componentes electrónicos que permitan el funcionamiento autónomo del dispositivo. Siempre teniendo en cuenta que el dispositivo tiene que tener una variedad de modos de trabajo, considerando que en una intervención quirúrgica se pueden plantear diversas situaciones y los profesionales tienen que estar preparados para solventarlas de la mejor manera, por lo que no es solo lograr esos objetivos sino también dotar al dispositivo del máximo realismo posible.

Por parte del Hospital virtual Valdecilla, primeramente se plantea a la Universidad de Cantabria la realización de este proyecto, más concretamente al departamento de Ingeniería Mecánica y Estructural, motivados por su continua búsqueda de la innovación y el desarrollo siempre con un fin didáctico para lograr el objetivo de que la preparación del personal sanitario sea lo más optima posible y las intervenciones quirúrgicas cada vez sean más satisfactorias. Además de la proposición del proyecto proporcionan la infraestructura necesaria para el desarrollo satisfactorio del proyecto así como profesionales del mundo de la salud, que asesoran y apoyan a los ingenieros que realizan la parte técnica del proyecto. Además colaboran en el proceso de investigación sobre este tipo de dispositivos recurriendo a diversas fuentes de información nacionales e internacionales de diversas índoles y siempre aportando un nuevo punto de vista que le da un mayor rango de acción al grupo de trabajo.

Este proyecto le otorgaría al Hospital, muchas posibilidades de realizar negocios o colaboraciones con otras instituciones relacionadas con el mundo de la salud potenciando el papel del Hospital como potencia en el mundo de la simulación sanitaria y la formación de profesionales muy cualificados.

Por parte del IFIMAV se colabora en la obtención de financiación para la realización del proyecto, recurriendo a diversos concursos realizados por el Gobierno de Cantabria u otras instituciones que fomentan la investigación y entregan fondos a proyectos como el que se plantea. Por otra parte también colaboran con dos ingenieras que forman parte del grupo de trabajo, que cooperan con el resto del grupo y que aportan asesoramiento tanto técnico como jurídico.

En definitiva lo que se plantea es el funcionamiento de un grupo muy heterogéneo de profesionales, con un mismo objetivo, combinando sus conocimientos y los medios de los que disponen con el fin de obtener un resultado muy satisfactorio y comenzar una vía de estudio que hasta el día de hoy no se ha desarrollado en España y solo se ha hecho en lugares puntuales del mundo. Se pretende que este proyecto actúe como punto de partida que luego de lugar a dispositivos más sofisticados.

INDICE GENERAL

1. MEMORIA 5

2. CÁLCULOS 116

5. CONCLUSIONES 137

1.

MEMORIA

INDICE MEMORIA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.2 RECORDATORIO MEMORIA.....	12
Planteamiento del problema	12
Circuito neumático	18
Circuito Hidráulico.....	18
Circuito de control	22
1.3 RECORDATORIO CÁLCULOS	25
Cálculos bombeo	25
Cálculos de pérdidas de carga	27
Pérdidas de carga secundarias	37
Válvula reductora.....	42
Perfiles de presiones.....	43
1.4 SIMHYDRAULICS	47
1.4.1 Acumuladores	47
1.4.2 Cilindros hidráulicos	49
1.4.3 Útiles hidráulicos	53
1.4.4 Resistencias hidráulicas localizadas	55
1.4.5 Bloques de baja presión	59
1.4.6 Orificios	62
1.4.7 Conductos	64
1.4.8 Bombas y Motores	65
1.4.9 Válvulas	69
1.5 OTROS BLOQUES NECESARIOS	82
1.6 MODELO VIRTUAL	84
1.6.1 Sistema de bombeo	86
1.6.2 Reductor de presión	89

1.6.3 Circuitos de alta y baja presión	92
1.6.4 Control válvulas reguladoras	921
1.6.5 Medición de presión	95
1.6.6 Válvulas todo o nada	96
1.6.7 Control todo o nada 1.....	98
1.6.8 Circuito auxiliar.....	99
1.7 CAMBIOS INTRODUCIDOS.....	103
1.8 SOFTWARE DE CONTROL	104
1.9 BIBLIOGRAFIA	107
RECURSOS EN PAPEL.....	107
DOCUMENTOS DIGITALES Y ENLACES WEB	107
ANEXO I: SOFTWARE	112
I.1 Programa perfiles de alta presion.....	113
I.2 Programa de perfiles de baja presion	113
I.3 Programa todo o nada 1	114
I.4 Programa todo o nada 2	115

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este PFM es la continuación del PFG de título “Diseño de un simulador para cirugía cardiotorácica” realizado en el curso 2013-2014. En esa primera parte se definió una arquitectura hardware con la que se pretendía la consecución de diversos objetivos. En esta segunda parte del trabajo lo que se persigue es la modelización virtual de esa arquitectura mencionada, con el objetivo de analizar el funcionamiento de la misma y poder plantear algún cambio que permita conseguir un comportamiento más cercano al deseado. Este modelo virtual es una de las partes de que está compuesto el PFM.

Para la realización del modelo virtual se podía recurrir a diferentes herramientas virtuales muy potentes como pueden ser: LABVIEW, MATLAB, Simulink (estando esta incluida en MATLAB)... Finalmente se decidió emplear la herramienta Simulink que además de ser parte de MATLAB con el consiguiente potencial de cálculo y funciones intrínsecas que este incluye, provee de un interfaz gráfico que hace mucho más fácil la visualización del modelo y de los resultados de su funcionamiento. En el caso de que se hubiese realizado la simulación en MATLAB a partir de la programación de un algoritmo que realizase todos los cálculos que hacen los bloques de Simulink el resultado sería el mismo pero con una solución mucho menos eficiente y, que además dificultaría la visualización de la estructura hardware y el planteamiento de otras posibles soluciones si se diera la situación de que el hardware diseñado no tiene el comportamiento esperado.

Otra ventaja que incluía esta opción era el hecho de que Simulink dispone de una toolbox complementaria al modelo básico del programa, la cual, de nombre *simscape*, entre otras cosas incluye un módulo dedicado a los sistemas hidráulicos de nombre *simhydraulics*. Este módulo incorpora la mayor parte de los componentes hidráulicos que son necesarios para la construcción del simulador virtual, además facilita la tarea y da la posibilidad de introducir los parámetros característicos de las piezas escogidas en el PFG para formar parte del hardware como los parámetros de los bloques que van a recrear cada una de esas piezas.

Otra parte importante de este modelo virtual y que se plantea como un punto a tratar en el PFM es la posibilidad de que, a la luz de los resultados que proporcione el modelo se planteen cambios en ese hardware, que den un comportamiento más real y como consecuencia un resultado más satisfactorio. O puede darse el caso de que los elementos elegidos no se comporten como era de esperar y hayan de ser sustituidos por otros con unas características diferentes pero que realicen la función esperada.

Para esta parte del proyecto en la que habrá que probar diversas opciones y sacar conclusiones a partir de los resultados de esas probaturas resulta una muy buena elección la de utilizar Simulink con el módulo *simhydraulics* ya que ofrece una amplia gama de accesorios y equipos hidráulicos con diferentes arquitecturas y que además se pueden modelizar a partir de los parámetros facilitados por los fabricantes.

Esta disponibilidad de posibles soluciones ofrece el potencial necesario para subsanar esos problemas que se producirán así como para conseguir el funcionamiento idóneo.

Afortunadamente Simulink dispone de bloques que modelizan virtualmente todos los elementos que se escogieron en el PFG, por lo que no se recurrirá a ningún otro, sí que se deberá incluir algún cambio en la disposición de los mismos para lograr algunos efectos que no se han logrado de la forma que se esperaba cuando se planteó el diseño del hardware.

Por otra parte la robustez de los módulos de cálculo de MATLAB los cuales también utiliza Simulink da una precisión de resultados excepcional.

En cuanto a la precisión de los cálculos también se planteaba la duda entre elegir un método implícito o uno explícito para la resolución de las ecuaciones de la simulación. El método elegido ha sido un ode23t que es un método explícito cuya principal potencialidad es la velocidad de cálculo la cual es mayor que en el caso de los métodos implícitos. En contraposición está la mayor probabilidad de que los cálculos no converjan, pero no es un problema preocupante al haber evitado poner valores nulos en las variables.

Si se hubiese empleado un método explícito se emplearía mas tiempo en hacer los cálculos y los resultados serian más precisos, pero la precisión obtenida con el método ode23t es más que suficiente.

Uno de los inconvenientes que se encuentran al emplear los bloques de Simulink es el hecho de que no consideran las pérdidas de carga primarias en corrientes de líquido que son aceleradas, por lo que los bloques que modelizan las pérdidas de carga debidas a la fricción de las partículas del líquido entre ellas y con las paredes del conducto actúan como si no existiesen esas pérdidas de carga, lo cual es imposible. Sin embargo ese problema tiene fácil solución al introducir diferencias de cotas entre la entrada y la salida del conducto y por consiguiente incluir esas pérdidas que existen en la ecuación de Bernoulli pero de una manera indirecta.

Además se tendrá que especificar el funcionamiento del sistema de control en el modelo virtual con elementos y valores para los parámetros de trabajo que sirvan como punto de partida a la hora de aplicar este sistema diseñado a las válvulas y demás componentes reales.

Los resultados de comportamiento que se consigan con este modelo virtual no serán definitivos pero si serán indicadores del funcionamiento del modelo físico futuro y también servirán para plantear mejoras.

Paralelamente se realizará la programación de un software de control a implementar en el modelo físico del simulador para controlar el funcionamiento del entramado de conductos así como realizar lecturas de los parámetros más relevantes del equipo que indicarán si el funcionamiento es el correcto o no.

A la hora de diseñar el algoritmo se podía utilizar diversos lenguajes de programación como pueden ser: C, C++, MATLAB, JAVA o incluso realizar un bloque de Simulink con la programación incorporada. Entre este rango de posibilidades se decidió utilizar el lenguaje de MATLAB, estando esta decisión motivada porque la tarjeta de adquisición de datos que escogida como parte del hardware al ser de National Instruments funciona con el lenguaje de MATLAB y con el de LABVIEW. Entre estos dos lenguajes se prefirió utilizar el MATLAB al haber empleado ya el Simulink para hacer el modelo virtual y ser el resultado satisfactorio además de otras buenas experiencias con él.

El programa habrá de ser capaz de controlar válvulas con comportamientos diferentes pero con los mismos ritmos de aperturas y cierres aproximadamente (sin tener en cuenta tiempos de aperturas y cierres), lo cual quiere decir que las válvulas funcionarán como un conjunto. Algunas de las válvulas van a tener un comportamiento todo o nada y otras proporcional representando diferentes perfiles de señal cada una de ellas.

Para estos programas se podría haber empleado los valores conocidos para una serie de puntos, a una frecuencia cardíaca determinada y simplemente mandar esos datos. En la búsqueda de que el programa sea útil para cualquier situación que se quiera practicar se ha incluido unos cálculos previos, a partir del valor de frecuencia cardíaca introducida por el usuario, estos cálculos no suponen mucho tiempo de cálculo y aumentan la versatilidad del software.

La solución escogida aunque es un poco más complicada lo compensa con la ya nombrada versatilidad manteniendo la precisión necesaria y los tiempos de cálculo en unos valores aceptables.

1.2 RECORDATORIO MEMORIA

En este apartado de la memoria se realizará un recordatorio de los principales aspectos del diseño presentado como PFG. Este diseño sirve de punto de partida para la construcción del modelo virtual y la programación del software de control, tras la observación del comportamiento del modelo virtual es posible que se plantee algún cambio en el hardware que dé lugar a un resultado mejor. En principio estos cambios no deberán ser de gran envergadura pero si algunos ajustes que se observan necesarios.

Primeramente se va a rememorar el planteamiento del problema que se tenía entonces para después ir al planteamiento de las soluciones para los inconvenientes que se veían.

Planteamiento del problema

Se planteaba el hecho de que en el campo de la cirugía, el margen de error es muy pequeño y la capacidad de reacción de los profesionales se pone a prueba día tras día. Prueba de esto es el lema “see one, do one, teach one” muy repetido por los cirujanos de todo el mundo y por el cual se rige su ejercicio.

En relación a esto se pretendía el diseño de un entrenador para cirugía cardiotorácica que permitiera la recreación más fidedigna posible de situaciones que precisan de intervención en el campo de la cirugía cardiotorácica. Esta posibilidad de la recreación de situaciones que se pueden presentar en cualquier momento en la actividad normal de un hospital permitiría primeramente el adquirir mayor experiencia a los cirujanos encargados de intervenir, siendo más importante aún para aquellos más nóveles en este campo. Además ofrece la oportunidad de practicar procedimientos de actuación con el objetivo de conseguir una mayor eficiencia y que los daños al paciente sean los mínimos posibles.

También se puede emplear en la práctica de nuevas formas de proceder, tanto en coordinación de los equipos de trabajo como en nuevas técnicas de intervención de determinadas patologías.

En vista de lo que se precisaba del simulador se presentaban varias posibilidades para poder realizarlo que podrían resultar igual de satisfactorias

pero era necesario encontrar una solución de compromiso entre todas esas posibilidades que logren conjuntamente el mejor funcionamiento del conjunto como un todo.

Empezando por el fluido a emplear dentro del mismo, no se dispone de sangre humana o de otro origen para utilizarla en el simulador por lo que se recurrirá a una mezcla de agua destilada y colorante alimenticio que le dé el color deseado al fluido. Se empleará una mezcla tan sencilla siguiendo la recomendación de los médicos que forman parte del grupo de trabajo, ya que de acuerdo con su consejo no es necesario una mezcla más sofisticada para lo que se busca de este equipo.

Esta decisión afectará directamente a los cálculos ya que en lugar de emplear los datos propios de la sangre a temperatura de 20°C, se utilizarán los datos correspondientes del agua. Esto afectaba al régimen en el que está el fluido y dado que la sangre es un fluido no newtoniano mientras que el agua es newtoniano por lo que el comportamiento no es el mismo. Otras posibles recetas de mezclas que se encontraron tampoco darían ese carácter de no newtoniano al fluido y es que para conseguir ese comportamiento sería necesario añadir un gel que diese viscosidad a la mezcla lo cual resultaba contraproducente considerando que se utilizan líquidos especiales para preservar los pulmones del grupo cardiotorácico en el mejor estado posible durante el mayor lapso de tiempo posible y este gel afectaría directamente a ese estado.

Otro punto importante del proyecto es el circuito neumático, en el cual se recurrirá a un montaje más bien sencillo pero que satisfaga por completo las necesidades del sistema. De la gama de ventiladores que ofertan las empresas que venden aparatos médicos, se ha escogido un ventilador sencillo, portable pero que cumple con las necesidades básicas. Además se dispondrá del tubo de salida del ventilador y de un catéter que conectará con el tubo y a su vez con la tráquea que forma parte del grupo cardiotorácico y que es el conducto que llega hasta los pulmones.

El objetivo primordial de este circuito neumático era recrear de forma realista la respiración humana, para que los cirujanos que trabajan con el simulador se

encuentren con unos pulmones en correcto funcionamiento al igual que en la vida real. El hecho de que estén en movimiento supone una dificultad añadida para los profesionales de la medicina a la hora de intervenir por lo que es algo que requiere de práctica y que además aumenta el realismo de la simulación.

Además el corazón había de latir de la forma más real posible. Para conseguirlo se disponía de un abanico de soluciones, primeramente se planteó estimular el tejido muscular del corazón con un circuito de electrodos provisto de un controlador de frecuencia de manera que se pudiese recrear el pulso, sin embargo se encontró el problema de que el tejido muerto no reacciona a los impulsos de los electrodos como el tejido vivo por lo que no se conseguiría el resultado deseado.

Otra posibilidad que se planteó fue la recreación del movimiento con dispositivos mecánicos, introducidos dentro de las cavidades cardiacas que al bombear el fluido estos dispositivos serian los que dilatarían y contraerían las aurículas y los ventrículos de la forma deseada. Esta idea se desechó debido a que se pretende hacer el menor daño que se pueda al grupo cardiotorácico para aumentar su vida útil y al hecho de que las válvulas que están dentro del corazón y que hacen estancas las cavidades, en el caso de un corazón muerto se encuentran permanentemente abiertas. Además la disposición de los elementos mecánicos en el interior del corazón seria un proceso laborioso y una vez que el grupo se saca del congelador empieza una carrera contrarreloj para poder emplear los pulmones en el mejor estado posible por lo que se perdería un tiempo muy valioso.

Otra de las opciones que se planteó fue la creación de dos circuitos hidráulicos, con una bomba para cada uno de ellos, puesto que cada circuito trabaja a una presión diferente. El circuito de baja presión se situaría entre el lado derecho del corazón y los pulmones, y el circuito de alta presión entre el lado izquierdo del corazón y el resto del cuerpo. Lo que se planteaba eran dos bombas con un deposito común, unidas por medio de tubos a la aurícula izquierda del corazón, uno de los tubos entraría en la aurícula y dejaría el fluido para que entre en el ventrículo y el otro tubo atravesará la pared cardiaca y entrará en la aurícula derecha debido a la estrechez de los capilares que comunican corazón y pulmones.

La pulsatilidad se lograría controlando los arranques y las paradas de ambas bombas de manera que el flujo de salida de ambas fuese pulsátil.

Finalmente esta idea se desechó por la dificultad añadida que supone trabajar en el régimen transitorio de las bombas dicha dificultad radica sobre todo en la incertidumbre añadida del comportamiento transitorio de los equipos, la información de los transitorios no es facilitada por la compañía y sin esa información no se podría dar el grado de realismo deseado entre otros inconvenientes de trabajar con una elevada incertidumbre.

La idea escogida finalmente es una idea sencilla pero eficaz, también una solución de tipo hidráulica pero consiguiendo eliminar esa incertidumbre de la que se hablaba. La pulsatilidad en lugar de lograrse con la bomba se generará con válvulas y la ayuda de un circuito auxiliar de desagüe. Disponiendo un circuito para la circulación menor y otro para la mayor así como un tercer circuito auxiliar que será por donde se evacue el líquido cuando el acceso a los otros dos esté cerrado consiguiendo así la pulsatilidad.

El funcionamiento de los circuitos será alterno, cuando los circuitos de circulación mayor y menor estén conduciendo líquido, el circuito auxiliar se encontrará vacío y el paso a su través cerrado. Durante este periodo de tiempo en que los circuitos se encuentren así, el grado de apertura de las válvulas se controlará para recrear los perfiles de presión de cada uno de ellos. En el momento en que esto termine se producirá el cierre de los circuitos mayor y menor y la apertura del circuito auxiliar durante todo el tiempo correspondiente a una pulsación en que el corazón no está bombeando sangre.

La pulsatilidad, así como el perfil de onda deseado para las presiones de entrada en las aurículas se conseguirá con la utilización de válvulas solenoidales reguladoras que estén controladas por ordenador.

Para presurizar el circuito de baja presión se planteó la posibilidad de emplear una válvula antirretorno, que consta de una pieza móvil, la cual se mueve en un sentido ante la presión de un flujo fluido y cuando este cesa vuelve a la posición de reposo que es la de la válvula cerrada. Esta idea se desechó y finalmente se recurrirá a la resistencia que oponen los propios pulmones, debida a la diferencia notable de diámetro existente entre la vena cava y los

capilares que conectan el corazón y los pulmones, la cual se considera suficiente puesto que la presión a la que se trabajará será muy baja. En el caso del circuito de alta presión se dispondrá una válvula solenoidal a la salida del ventrículo izquierdo que se abrirá en el momento en que ya no sea necesario que oponga resistencia al paso del líquido es decir, en el momento que se haya completado el perfil de presión.

Para el bombeo del fluido, se barajaron varias posibilidades. Primeramente se optó por una bomba de pistón que cumplía con la condición de bombeo pulsante, pero tras sondear el mercado, la idea no se pudo realizar porque estas bombas trabajan con unas presiones muy elevadas con lo que no sería una elección adecuada para las presiones con las que se ha de trabajar. Otra posibilidad que se investigó fue la de emplear una bomba centrífuga con un motor eléctrico gobernado por un variador de frecuencia que a su vez estuviese programado para reproducir el flujo pulsante. El problema que se encontró fue que son bombas con contacto entre piezas metálicas que precisan de lubricación la cual se mezcla con el líquido bombeado y, además dicha fricción da lugar a deposiciones de restos en el fluido lo cual hace que este tipo de bombas no sea apropiado para su utilización en aplicaciones sanitarias ni relacionadas con el mundo de la alimentación.

Finalmente se recurrirá a una bomba volumétrica que garantiza unos valores medianamente estables de presión y caudal a una velocidad de giro determinada algo que es vital en la aplicación que se plantea. Se precisará de un periodo de tiempo hasta que la bomba alcance el régimen estacionario pero una vez llegue a él, solo una avería hará que las condiciones de bombeo no sean las deseadas lo cual hace esta opción más atractiva que la bomba centrífuga. Además trabajará conjuntamente con la bomba una válvula reductora de presión para lograr el objetivo de que manteniendo el caudal lo más constante posible se pueda tener una presión también constante a la salida de la válvula.

Se añadirá una sensorización del circuito hidráulico de tal manera que se puedan conocer los valores de la presión a la que se bombea el fluido a través del mismo, así como del caudal de fluido que sale de la bomba en cada momento.

Para el caudalímetro en el mercado se encuentran múltiples posibilidades, los principales factores discriminantes son el fluido con el que se va a trabajar, el hecho de si este es inflamable o no, la presión de trabajo, la viscosidad y el caudal a medir. Se encontraron modelos que daban un resultado satisfactorio al caudal deseado y con fluidos semejantes al agua o con el agua concretamente, pero no cumplían con todos los requisitos ya que las presiones de trabajo eran inferiores a la necesaria.

Finalmente se decidió recurrir a un caudalímetro capaz de soportar presiones de hasta 10 bares de manera que el funcionamiento del medidor sea óptimo incluso estando sometido a la presión de trabajo de la bomba, cuyo máximo será de 6 bares. Además el modelo escogido cumple con todas las demás condiciones que exige el simulador, en cuanto a caudales, temperaturas...

En el caso de los sensores de presión, existen diversos tipos para aplicaciones con exigencias específicas como pueden ser altas temperaturas, entornos agresivos o para mediciones en lugares sumergidos en el fluido.

Dado que las presiones a las que se va a trabajar no son elevadas se emplearán sensores que miden bajas presiones, donde también se ofrecen diversos intervalos de medida con precisiones mayores o menores.

Estos sensores se situarán en paralelo a la entrada en las cavidades cardiacas con el objetivo de que su lectura sea de un valor muy aproximado al que hay en la aurícula correspondiente. Este funcionamiento en paralelo está basado en la analogía con los circuitos eléctricos que se puede hacer en el caso de los circuitos hidráulicos donde la presión sería análoga a la tensión y el caudal a la corriente eléctrica siempre y cuando se considere un modelo eléctrico donde se tienen en cuenta las pérdidas a lo largo de las líneas como se hace con las pérdidas de carga en las conducciones hidráulicas. En el caso de no tenerlas en cuenta, se estaría considerando también un circuito hidráulico ideal donde no hay pérdidas, muy alejado de la realidad.

Se podrían haber situado en paralelo a la salida, pero tras el paso por el órgano el valor de la presión no sería indicativo de nada, por lo que la lectura del sensor no daría información relevante.

Circuito neumático

Este circuito constará de un ventilador que aporte unas características versátiles de tal forma que se puedan recrear diversas situaciones, ya que todos los pacientes son diferentes y por lo tanto es necesaria esa maniobrabilidad.

El ventilador es el elemento principal del circuito pero también se precisará de otros que lo completen, una serie de accesorios que son necesarios para el correcto funcionamiento del mismo.

Para empezar contaremos con un tubo de doble toma que irá conectado a las dos salidas de aire de las que consta el ventilador, este tubo irá conectado a un catéter que será el nexo entre el tubo y la tráquea del grupo cardiorácico en el que se ensayará la intervención.

Solo empleando estos tres elementos se conseguirá recrear la respiración asistida de un paciente real en el transcurso de una operación. El ventilador dispone de todos los elementos necesarios para el control de su funcionamiento y de todos los parámetros relacionados con la respiración artificial necesaria.

Circuito Hidráulico

El elemento principal del circuito hidráulico es una bomba volumétrica, que abastecerá de líquido a los circuitos de circulación mayor y menor. La bomba succionará el líquido de un depósito con la capacidad suficiente para hacer frente a las necesidades de ambos circuitos. El conducto de salida de la bomba volumétrica tiene un diámetro de 40 mm, en este conducto a una distancia de al menos 4 veces el diámetro nominal se va a situar una válvula reductora de presión con el objetivo de conseguir que la presión que llegue al resto de la instalación hidráulica sea constante a pesar de las variaciones que se produzcan en la presión de bombeo. Tras esta válvula se situará un estrechamiento gradual que convierta el diámetro del conducto de 40 mm en 25mm, de diámetro exterior. Al final de este tubo se colocará un accesorio que consta de una entrada y dos salidas, así se conseguirá dividir el tubo en otros dos el desagüe auxiliar y el que se conducirá a los dos circuitos.

En el tubo auxiliar se dispondrá un caudalímetro que dará una lectura del caudal circulante sin acrecentar las pérdidas de carga en el fluido destinado a ir al grupo cardiorácico. En este mismo tubo se situará una válvula senoidal, con ella conseguiremos que el circuito auxiliar funcione únicamente en los momentos precisos. Tras esta válvula se situará el caudalímetro y después el conducto auxiliar estará conectado con el depósito sin ningún obstáculo más.

El segundo tubo que sale de la bifurcación está destinado al abastecimiento de los circuitos de circulación mayor y menor. Este tubo también tendrá una longitud considerable antes de llegar a otro accesorio similar al colocado anteriormente que volverá a dividir el flujo en dos corrientes separadas.

Una de las corrientes, destinada a la circulación mayor, tendrá situada en el recorrido del conducto una válvula solenoidal reguladora, que será la que ejercerá el control sobre la presión de la corriente que llega a la aurícula izquierda de tal manera que se consiga de la forma más fidedigna posible el perfil de curva que representa la variación de la presión en la aurícula. Esta válvula será gobernada tal que su funcionamiento esté sincronizado con la del conducto auxiliar y con otra que irá situada en el circuito de baja presión.

Tras esta válvula y un tramo de conducto de una longitud suficiente para que el flujo vuelva a ser uniforme se situará otra bifurcación, con el objetivo de que una de las corrientes vaya a un sensor de presión de manera que se obtenga una lectura precisa del valor de la presión de la corriente que entra en la aurícula, así se podrá calibrar el funcionamiento correcto del sistema. El sensor estará situado en paralelo a la corriente que va al órgano de tal manera que el valor dado por el sensor sea aproximadamente el mismo que en el interior de la cavidad cardiaca, el conducto que conecte con el sensor tendrá una rosca de diámetro nominal 12,7mm de manera que sea el macho de la rosca hembra con la que cuenta el sensor. Esto hace que la bifurcación de la que sale el conducto que va al sensor tenga que tener una de sus salidas de un diámetro nominal menor que los de la entrada y la otra salida que serán de 20,4mm.

El otro conducto que sale en la bifurcación del tubo destinado al abastecimiento de los circuitos de circulación mayor y menor, se destinará al circuito de baja presión. La entrada en la aurícula derecha se realizará a través de la aurícula

izquierda atravesando la pared cardiaca que separa ambas aurículas ya que los vasos sanguíneos que llegan a la aurícula derecha son demasiado estrechos como para utilizarlos como vía de entrada. En el circuito de circulación menor la disposición será semejante pero con salvedades ya que el valor de presión con el que se ha de trabajar es un orden de magnitud menor que en el circuito de alta. En este circuito la válvula reguladora seguirá otro perfil de señal y con unos valores más bajos. Además la anatomía de este circuito es diferente en cuanto al diámetro de los vasos sanguíneos que lo componen por lo que dan la oportunidad de aprovecharlo en beneficio de la pulsatilidad como la utilización de la diferencia de diámetros entre la vena cava y los capilares. También supondrá un inconveniente como es el hecho de no poder introducir directamente el tubo en la aurícula derecha sino que es necesario atravesar la pared cardiaca de la aurícula izquierda para llegar a esta otra.

Tras pasar por el interior del corazón el circuito de alta presión tendrá situada una válvula solenoidal, al encontrarse esta cerrada se conseguirá la presurización del circuito. Cuando la pulsación se haya producido, entonces la válvula se abrirá y el líquido irá a parar al depósito para poder ser utilizado de nuevo.

En el circuito de baja presión no será necesario disponer de una válvula para presurizar el circuito sino que al ser el valor de la presión no muy elevado, simplemente con la resistencia que se produce por el transito del líquido por los vasos sanguíneos que conectan el corazón con los mismos se conseguirá la presurización deseada, ya que estos son mucho más estrechos que los de entrada al corazón. Tras esto el líquido será conducido por un conducto de nuevo al depósito.

Elementos empleados en el circuito

- Tubo de PEX
- Tubo de Dacrón (reservado para los últimos tramos de los circuitos de circulación mayor y menor)
- 2 válvulas solenoidales reguladoras
- 2 válvulas solenoidales todo o nada

- 2 sensores de presión
- 4 conectores T
- 10 codos 90°

Desglose en cada uno de los circuitos

Circuito auxiliar

- Tubo de PEX
- 1 estrechamiento gradual
- 1 válvula solenoidal todo o nada
- 1 válvula reductora de presión
- 1 conector T
- 1 codo 90°

Circuito de alta presión

- Tubo de PEX
- Tubo de Dacrón
- 1 estrechamiento gradual
- 3 conectores T
- 6 codos 90°
- 1 sensor de presión
- 1 válvula reductora de presión
- 1 válvula solenoidal reguladora
- 1 válvula solenoidal todo o nada

Circuito de baja presión

- Tubo de PEX
- Tubo de Dacrón
- 1 estrechamiento gradual
- 3 conectores T
- 6 codos 90°
- 1 válvula solenoidal reguladora
- 1 válvula reductora de presión

Circuito de control

El planteamiento que se hace del circuito desde el punto de vista de la monitorización es la disposición de dos sensores de presión, uno para cada circuito y un caudalímetro dispuesto en el circuito auxiliar. Los sensores de presión se dispondrán en paralelo a la cavidad cardiaca y con un tramo de conducto lo suficientemente largo como para que la presión que lea el sensor tenga un valor aproximadamente igual al que esté experimentando el órgano por la entrada del fluido. El caudalímetro se dispondrá en el circuito auxiliar de manera que dé una lectura del caudal evacuado y a partir de este se pueda saber si el caudal bombeado es el correcto, la razón de disponer el caudalímetro en esta parte del circuito es evitar las pérdidas de carga que se producen en el mismo, ya que el cálculo de las mismas no sería sencillo y añadiría incertidumbre a los cálculos.

Desde el punto de vista del funcionamiento autónomo se situarán dos válvulas solenoidales todo o nada, dos válvulas solenoidales reguladoras y un variador de frecuencia. La primera de las válvulas solenoidales todo o nada se colocaría en el circuito auxiliar de manera que este solo evacúe el agua cuando el software de control permita que la válvula esté abierta. La otra válvula solenoidal todo o nada se pondría a la salida del corazón en el circuito de alta presión de manera que fuese esta la que posibilitase la presurización del circuito en el momento en que el fluido discurre por el mismo.

Las válvulas solenoidales todo o nada se van a montar de tal manera que estén alimentadas por la línea de 220V, pero siendo el sistema de control por ordenador el que, mediante un relé colocado entre la válvula y la línea, accione la primera cuando esté programado que tiene que hacerlo.

Las válvulas solenoidales reguladoras se situarán en los circuitos tanto de alta como de baja presión y estarán pilotadas por el software de control de tal forma que se consiga la recreación más fidedigna posible del perfil de presiones modelizado.

En este caso la tarjeta de salida del ordenador estará directamente conectada a la válvula y se conseguirá una acción en la válvula proporcional a la señal de entrada de c.c que se le esté introduciendo.

El variador de frecuencia servirá de controlador de la bomba que aporta el líquido a todo el circuito, consiguiendo con el correcto funcionamiento del mismo una velocidad constante de rotación en la bomba lo que se traducirá en un caudal constante de funcionamiento.

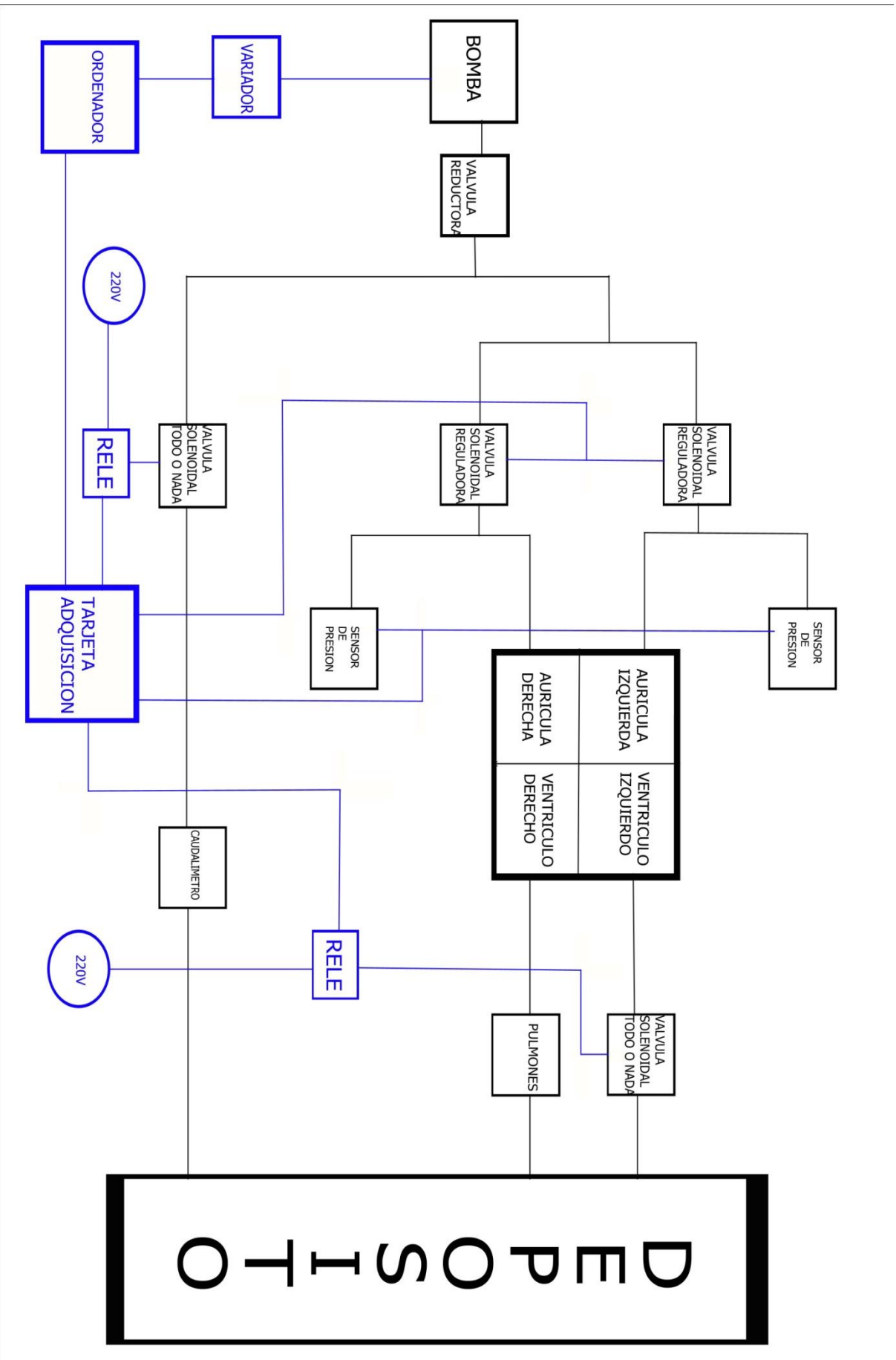
Para lograr el flujo pulsátil que es el objetivo de toda esta parte del circuito de control, se deberá sincronizar correctamente el funcionamiento de las válvulas de tal manera que cuando las válvulas proporcionales comiencen a realizar el perfil de presiones deseado la válvula solenoidal situada en el circuito auxiliar se cierre haciendo que todo el flujo de líquido circule a través de los circuitos de alta y baja presión.

Además para cuando el circuito de alta presión esté trabajando la válvula solenoidal todo o nada debe estar cerrada de manera que se pueda alcanzar la presión adecuada en el circuito. Esta válvula se abrirá evacuando el líquido que ya ha pasado por el grupo cardiorácico en el mismo momento en que las válvulas reguladoras se cierran y se abra la válvula del circuito auxiliar.

Desglose de elementos empleados

- 1 Variador de frecuencia
- 2 Válvulas solenoidales reguladoras
- 2 Válvulas solenoidales todo o nada
- 2 Sensores de presión
- 1 Caudalímetro
- 1 Tarjeta de adquisición de datos
- 1 Ordenador

Con el objetivo de hacer más visible el planteamiento de circuitos realizado se incluye un diagrama con un código de colores que diferencia entre los elementos que forman parte del circuito hidráulico y los que forman parte del circuito de control.



1.3 RECORDATORIO CÁLCULOS

A continuación se realiza un recordatorio de los cálculos realizados en el PFG que resultan interesantes para este PFM.

Cálculos bombeo

En base a la información consultada sobre el funcionamiento del grupo cardiorácico de un humano en situación de reposo, se pueden plantear diversas situaciones con sus respectivos ritmos cardíacos.

Se procede a analizar las diversas situaciones, para obtener los puntos de funcionamiento de la bomba en cuanto a caudal se refiere.

Primeramente se toma el volumen de líquido bombeado en cada pulsación de 70 cm^3 por cada circuito. Al recurrir a una sola bomba entonces el volumen total necesario por pulsación será de 0,14 l.

Caso 1

La primera situación que se va a considerar es la situación de reposo sin ningún tipo de factor que altere el ritmo cardíaco, por lo que es acertado el considerar el valor de pulsaciones por minuto como 70.

Utilizando ese número de pulsaciones por minuto, el tiempo por pulsación es:

$$t_{pul} = \frac{\text{tiempo}}{n^{\circ} \text{pulsaciones}} = \frac{60}{70} = 0,8571 \text{ seg}$$

Recurriendo al Diagrama de Wiggers se aprecia que la duración de la variación de presiones en la aurícula es aproximadamente de un tercio de lo que es la duración total de la pulsación, por lo tanto:

$$t_{var} = \frac{t_{pul}}{3} = 0,2857 \text{ seg}$$

Sabiendo que en ese tiempo se tiene que bombear un volumen de 0,14 l, se puede calcular el caudal total en litros por minuto que habrá de ser bombeado para cumplir con ese requisito.

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{60 \cdot 0,14}{0,2857} = 29,4 \text{ l/min}$$

De todo el caudal solo 9,8 l/min pasarán al grupo cardiorácico.

Para ponerlo en las unidades que suelen aparecer en los catálogos de máquinas hidráulicas:

$$Q = 1,764 \text{ m}^3/\text{h}$$

Caso 2

El segundo caso que se puede presentar es que el paciente presente una taquicardia, por la cual las pulsaciones están por encima de las 100 por minuto. El supuesto que se plantea es el caso de 110 ppm.

En este caso los tiempos por pulsación y de variación serán:

$$t_{pul} = \frac{60}{110} = 0,54$$

$$t_{var} = \frac{0,54}{3} = 0,18$$

Y ahora se puede calcular el caudal igual que anteriormente.

$$Q = \frac{60 \cdot 0,14}{0,18} = 46,205 \text{ l/min}$$

De este caudal total solo pasarán al corazón 14,4 l/min, el resto será evacuado por el circuito auxiliar.

En unidades de m³/h, serán:

$$Q = 2,7723 \text{ m}^3/\text{h}$$

Caso 3

En el caso de que se presente una situación de bradicardia, las pulsaciones serán menos de 60 por minuto. Se supondrá entonces unas 55 por minuto.

Los tiempos por pulsación y de variación serán:

$$t_{pul} = \frac{60}{55} = 1,09 \text{ seg}$$

$$t_{var} = \frac{1,09}{3} = 0,36 \text{ seg}$$

Con estos datos conocidos el caudal total bombeado por minuto será:

$$Q = \frac{60 \cdot 0,14}{0,36} = 23,1 \text{ l/min}$$

En unidades de m^3/h son:

$$Q = 1,386 \text{ m}^3/h$$

A partir de estos valores se puede calcular la velocidad de giro de la bomba para cada uno de ellos.

De acuerdo con el dato facilitado por la compañía de que con variador de frecuencia el modelo de bomba seleccionado bombea 50l/min cuando gira a 1000 rpm se aplicarán reglas de tres.

Caso 1

En este caso el caudal es de 29,4 l/min se puede calcular la velocidad de giro de la siguiente forma.

$$x = \frac{1000 \cdot 29,4}{50} = 588 \text{ rpm}$$

Caso 2

Aplicando el mismo método que en el caso 1.

$$x = \frac{1000 \cdot 46,205}{50} = 924,1 \text{ rpm}$$

Caso 3

En este caso el valor de la velocidad será:

$$x = \frac{1000 \cdot 23,1}{50} = 462 \text{ rpm}$$

Algún factor puede hacer que estas velocidades no sean exactamente las que haya que fijar en el variador de frecuencia, pero si no son estas serán valores cercanos.

Cálculos de pérdidas de carga

Desde el momento en que el líquido comienza a salir de la bomba con una presión que tiene un valor determinado, se empiezan a producir pérdidas de la misma. Para realizar el cálculo de estas pérdidas de carga se distinguirá entre las pérdidas primarias y las secundarias.

Primeramente conocer el diámetro del conducto, en el mercado se ofertan diversas posibilidades de entre las cuales se escoge la que encaja con la salida de la bomba que en este caso tienen un diámetro de 25 mm.

El espesor del tubo empleado será de 2,3 mm, por lo que el diámetro interior del conducto es:

$$d_{int} = d_{ext} - 2 \cdot e = 25 - 2 \cdot 2,3 = 20,4 \text{ mm}$$

Una vez conocido el diámetro interior del conducto, la velocidad de circulación del líquido por su interior, al mantenerse el diámetro constante, dependerá del caudal con el que se trabaje.

Caso 1

El caudal tenía un valor de para 70 ppm:

$$Q = 29,4 \text{ l/min}$$

Con ese caudal, en unidades de metros cúbicos por hora para poder obtener la velocidad en unidades del SI, y el diámetro interior del conducto la velocidad del líquido a través del mismo será:

$$Q = A \cdot v$$

$$A = \pi \cdot \frac{d_{int}^2}{4} = 3,2685 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1,764}{3,2685 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-4}} = 1,499 \text{ m/s}$$

Una vez que se conocen los datos necesarios se puede proceder al cálculo del número de Reynolds que caracterizara el flujo.

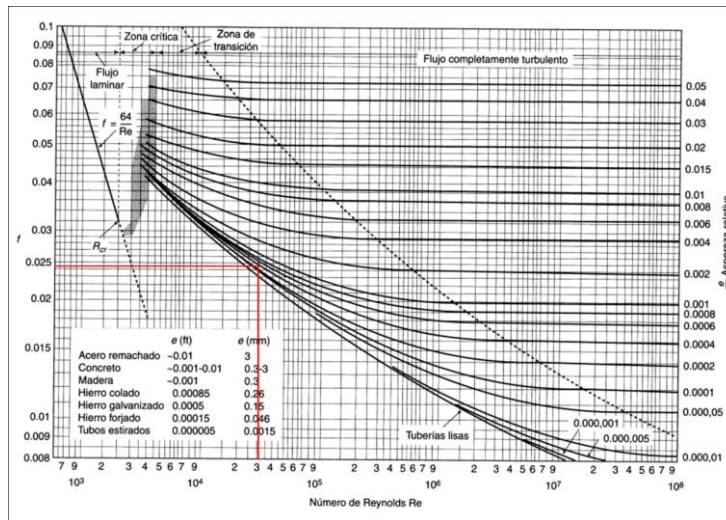
$$Re = \frac{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,499}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 30488,14$$

Esto determina que el flujo es turbulento, por lo que a partir de ahora se utilizarán las expresiones propias del cálculo de pérdidas de carga en flujos turbulentos.

Primeramente se calcula el coeficiente de fricción de Darcy. Conocido el valor de la rugosidad del tubo de PEX, que es un dato que suministra el fabricante y tienen un valor de 0,007 mm.

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{20,4} = 3,43 \cdot 10^{-4}$$

Con el valor de la rugosidad relativa y el del número de Reynolds del flujo, se emplea el diagrama de Moody para obtener el valor de coeficiente de fricción de Darcy.



[1]

El resultado que da el Diagrama de Moody es de un valor de 0,0245 para el coeficiente de fricción de Darcy aproximadamente.

Conocido este valor las pérdidas de carga primarias por metro de conducto, recurriendo a la expresión general de la Ecuación de Darcy-Weisbach, serán:

$$h_f = 0,0245 \cdot \frac{1 \cdot 1,499^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,1377 \text{ m}$$

Poniéndolo en unidades de bares que dan unos datos más aplicables a la hora de trabajar con bombas.

$$h_f = 0,01376 \text{ bar}$$

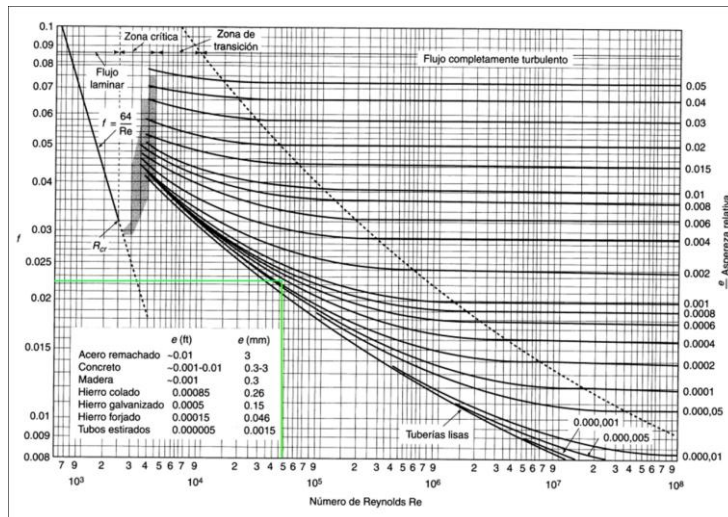
Caso 2

En los siguientes casos se emplea la misma secuencia de pasos.

$$Q = 46,205 \text{ l/min}$$

$$v = \frac{2,7723}{3,2685 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-4}} = 2,356 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,356}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 47918,64$$



[2]

En este caso el coeficiente de fricción de Darcy tiene un valor menor que el anterior, será aproximadamente de 0,0223.

$$h_f = 0,0223 \cdot \frac{1 \cdot 2,356^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,3096 \text{ m}$$

Poniéndolo en bares:

$$h_f = 0,03096 \text{ bar}$$

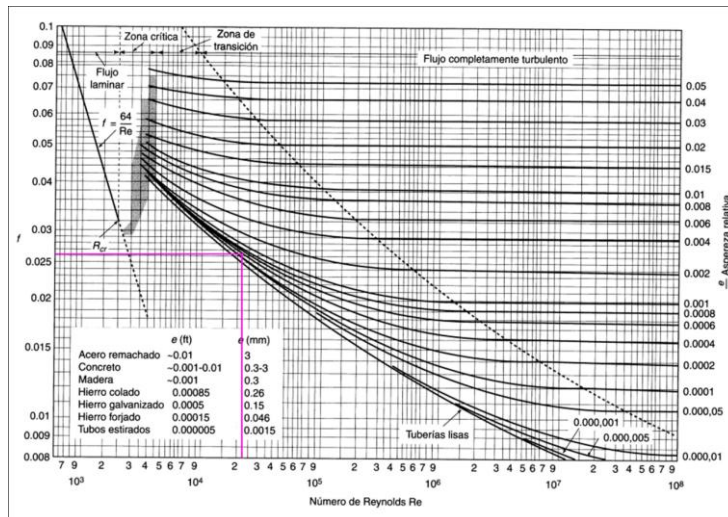
Caso 3

En el caso de 55 ppm.

$$Q = 23,1 \text{ l/min}$$

$$v = \frac{1,386}{3,2685 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-4}} = 1,178 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,178}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 23959,32$$



[3]

El diagrama da un valor al coeficiente de fricción de Darcy de aproximadamente 0,026.

$$h_f = 0,026 \cdot \frac{1 \cdot 1,178^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,090 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,009 \text{ bar}$$

También se han de calcular las pérdidas de carga en los conductos con diámetros nominales diferentes a 20,4 mm. En primer caso se calculará para el conducto de salida de la bomba con un diámetro exterior de 40 mm.

El espesor del mismo será de 3,2 mm, por lo que el diámetro nominal será:

$$d_{int} = 40 - 2 \cdot 3,7 = 32,6 \text{ mm}$$

La sección transversal de este conducto es distinta al ya calculado.

$$A = \pi \cdot \frac{0,04^2}{4} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Caso 1

Para el primer caso la velocidad de circulación se calcula de la siguiente manera:

$$v = \frac{1,764}{60 \cdot 60 \cdot 1,26 \cdot 10^{-3}} = 0,388 \text{ m/s}$$

Con un diámetro mayor la velocidad de circulación de la corriente de líquido es mucho menor para un mismo caudal.

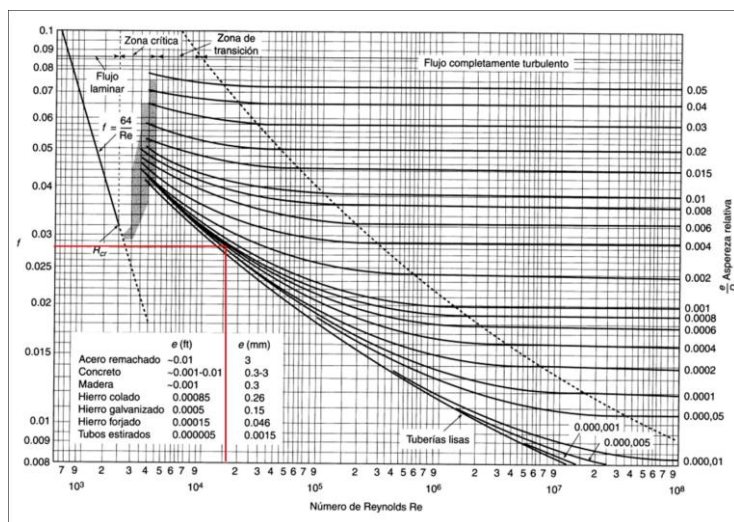
$$Re = \frac{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,388}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 12610,97$$

Esta menor velocidad afectará también directamente al cálculo de las pérdidas de carga.

Pero antes se calculará la nueva rugosidad relativa.

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{32,6} = 2,15 \cdot 10^{-4}$$

Con estos datos se puede emplear el Diagrama de Moody para obtener el nuevo valor del factor de fricción de Darcy.



[4]

El valor de f es de 0,029, que es el que se empleará en el cálculo de las pérdidas.

Con este valor se procede al cálculo de las pérdidas de carga primarias que se producen en el conducto.

$$h_f = 0,029 \cdot \frac{0,388^2}{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 6,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Expresado en bares

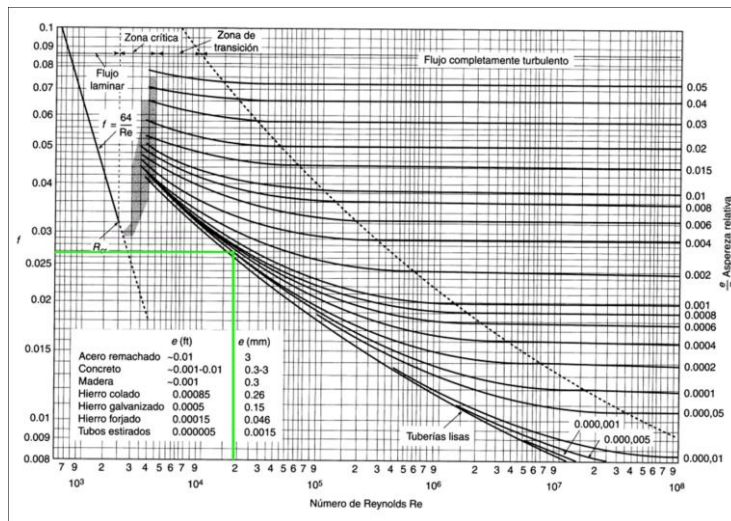
$$h_f = 6,83 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$$

Caso 2

Aplicando el mismo algoritmo para los sucesivos casos.

$$v = \frac{2,7723}{1,26 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-3}} = 0,612 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,612}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 19891,53$$



[5]

El valor aproximado de f es 0,027.

$$h_f = 0,027 \cdot \frac{0,612^2}{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,016 \text{ m}$$

Expresado en bares.

$$h_f = 0,0016 \text{ bar}$$

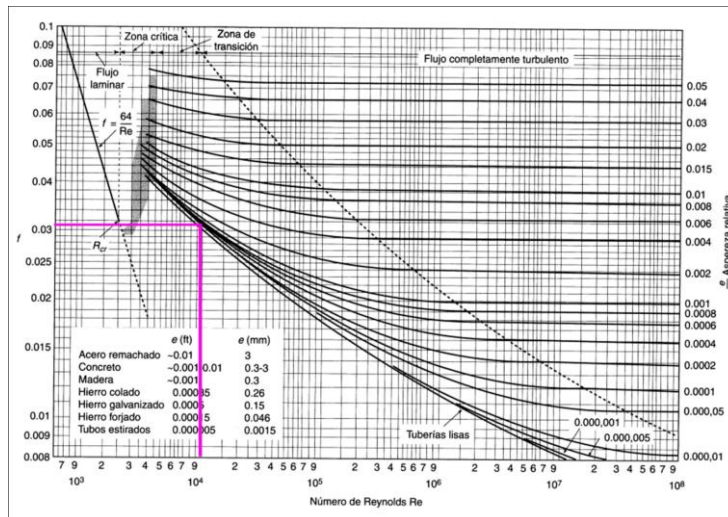
Caso 3

Para el tercer caso.

$$v = \frac{1,386}{1,26 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-3}} = 0,306 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds será:

$$Re = \frac{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,306}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 9945,76$$



[6]

Con el Diagrama de Moody se ve que el valor de f es 0,031.

$$h_f = 0,031 \cdot \frac{0,306^2}{32,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 4,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Expresado en bares.

$$h_f = 4,54 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$$

Otro tipo de conducto que se va a emplear es el de diámetro exterior 16 mm y un espesor de 1,8 mm. Por lo que el diámetro nominal del mismo será:

$$d_{int} = 16 - 2 \cdot 1,8 = 12,4 \text{ mm}$$

Con este nuevo conducto también cambia la sección transversal, que tendrá el siguiente valor y será el mismo en los tres casos:

$$A = \pi \cdot \frac{12,4^2}{4} = 1,208 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Otro valor que será el mismo para los tres casos es el de la rugosidad relativa.

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{12,4} = 5,64 \cdot 10^{-4}$$

Caso 1

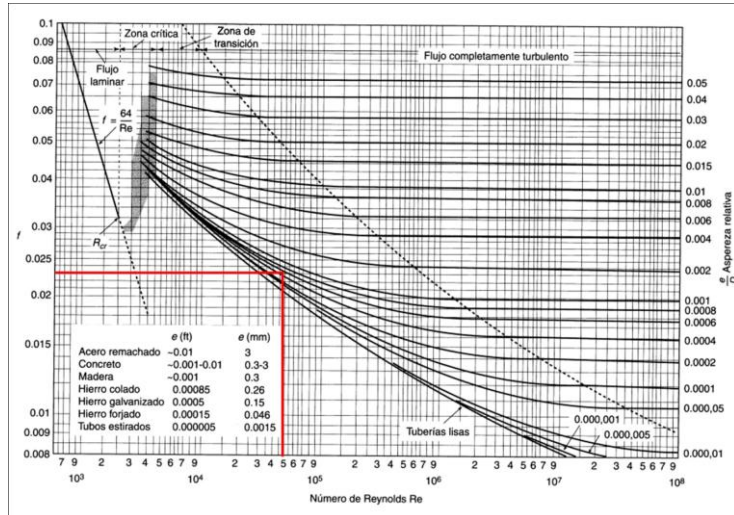
Con el valor de la sección transversal y el del caudal del primer caso, el cálculo de la velocidad de la corriente es el siguiente:

$$v = \frac{1,764}{1,208 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-4}} = 4,06 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds tendrá el valor:

$$Re = \frac{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 4,06}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 50193,42$$

Llevando los valores conocidos al Diagrama de Moody se halla el valor de f .



[7]

El valor de f es 0,023.

Las pérdidas de carga para el caso que se plantea son:

$$h_f = 0,023 \cdot \frac{4,06^2}{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 1,56 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,156 \text{ bar}$$

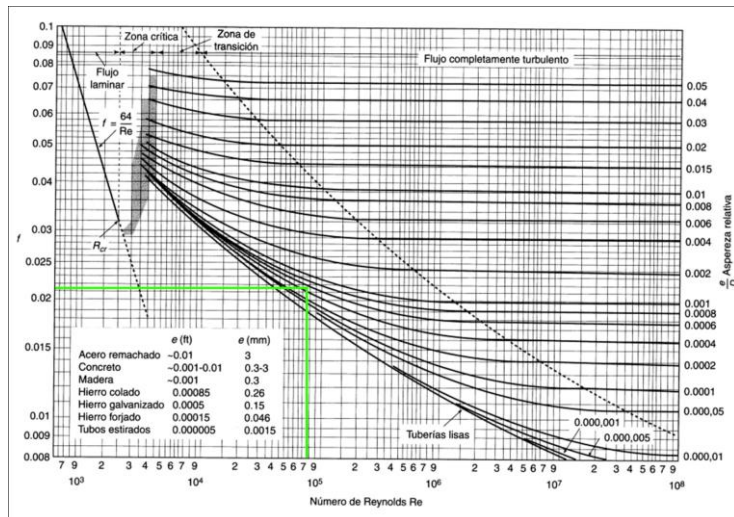
Caso 2

En el segundo de los casos

$$v = \frac{2,7723}{1,208 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 60} = 6,375 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds toma un valor de:

$$Re = \frac{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 6,375}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 78813,56$$



[8]

Tras emplear el Diagrama de Moody el valor del factor de fricción de Darcy es 0,021.

Las pérdidas de carga primarias son:

$$h_f = 0,021 \cdot \frac{6,375^2}{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 3,512 \text{ m}$$

Expresado en bares.

$$h_f = 0,3512 \text{ bar}$$

Caso 3

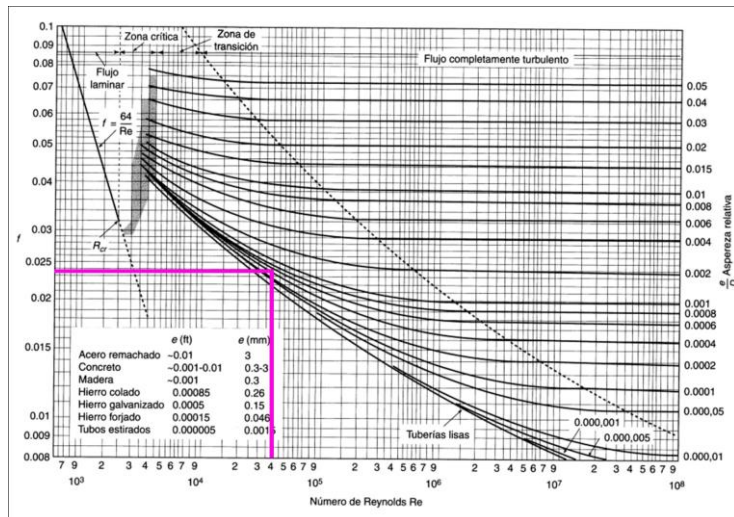
En el tercer caso se procede de la misma manera que anteriormente

La velocidad tienen un valor de:

$$v = \frac{1,386}{1,208 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^{-4}} = 3,187 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds tiene un valor de:

$$Re = \frac{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 3,187}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 39400,6$$



[9]

Empleando el Diagrama de Moody se obtiene un valor de f de 0,024.

Las pérdidas de carga primarias son:

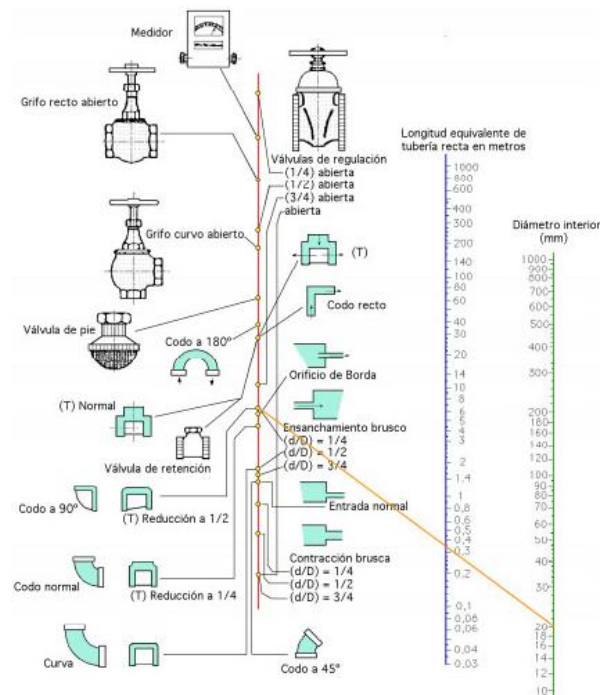
$$h_f = 0,024 \cdot \frac{3,187^2}{12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 1,003 \text{ m}$$

Expresado en bares.

$$h_f = 0,1 \text{ bar}$$

Pérdidas de carga secundarias

Empezando por los codos de 90° se empleará el Diagrama de Crane.



[10]

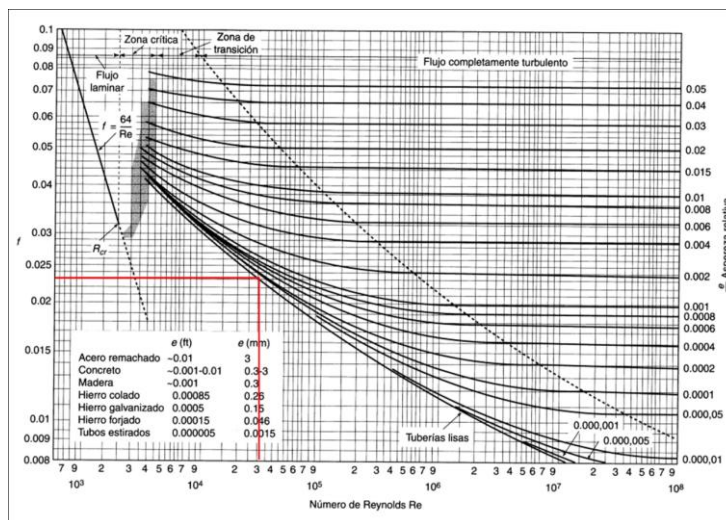
Cada codo de 90° es equivalente a un tramo de 0,35 m de longitud de tubería recta.

También se ha de calcular la rugosidad relativa del PVC. La rugosidad absoluta tiene un valor 0,0015 mm.

$$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{20,4} = 7,35 \cdot 10^{-5}$$

Caso 1

Con este valor de rugosidad relativa y el número de Reynolds calculado para el primero de los supuestos, se utiliza el Diagrama de Moody y se tienen el factor de fricción de Darcy.



[11]

El valor aproximado de la f de Darcy es de 0,023.

Por lo tanto las pérdidas de carga que se producen en un codo 90° para el primer supuesto serán.

$$h_f = 0,023 \cdot \frac{0,35 \cdot 1,499^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,045 \text{ m}$$

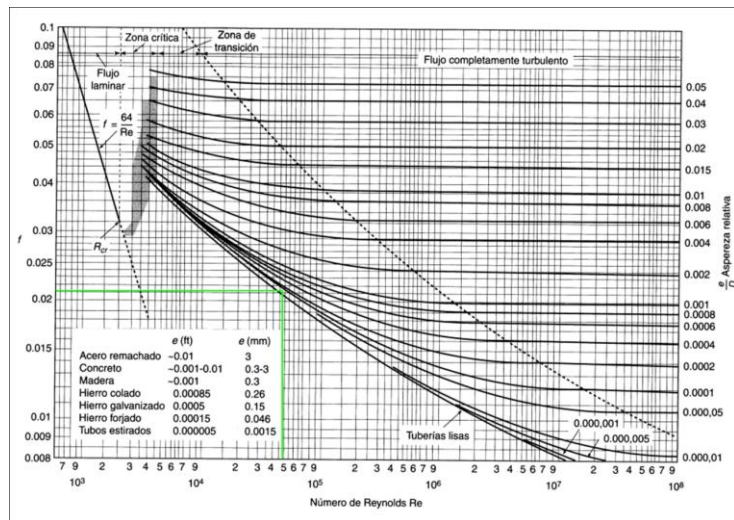
Expresado en bares.

$$h_f = 0,0045 \text{ bar}$$

Este es el valor de las pérdidas de carga que se producen en caso de estar trabajando con una frecuencia cardiaca de 70 ppm.

Caso 2

Ahora se realizará el proceso análogo para el caso de una taquicardia.



[12]

El valor del factor de fricción de Darcy es de 0,021, siendo un poco menor que el que se obtenía en la primera situación analizada.

$$h_f = 0,021 \cdot \frac{0,35 \cdot 2,356^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,102 \text{ m}$$

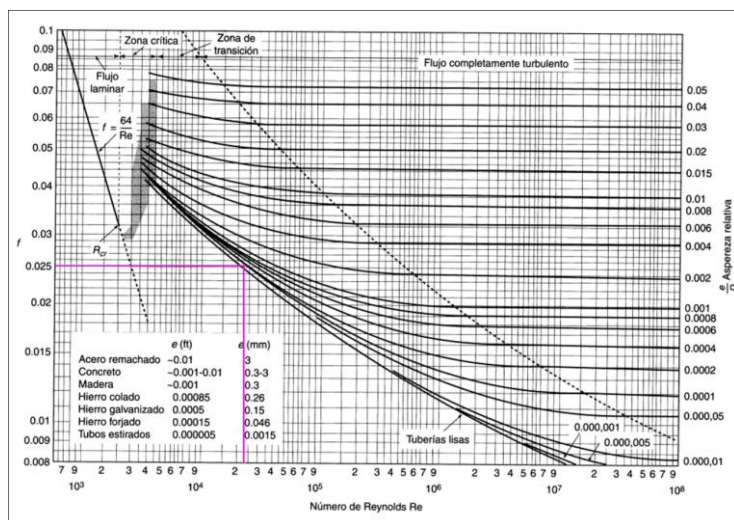
Expresado en bares

$$h_f = 0,0102 \text{ bar}$$

Caso 3

Por último para la situación en la que se presente una bradicardia.

Para obtener el nuevo valor de f.



[13]

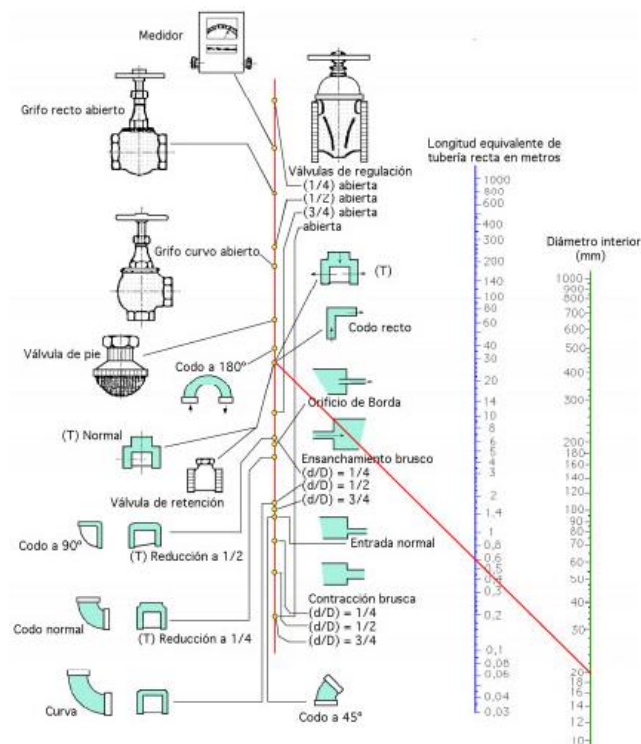
El valor de f es aproximadamente 0,025. Con este valor se calculan las pérdidas de carga.

$$h_f = 0,025 \cdot \frac{0,35 \cdot 1,178^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,03 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,003 \text{ bar}$$

Ahora se van a realizar los cálculos de pérdidas de carga para los conectores T, de la misma forma que se hizo con los codos.



La equivalencia es igual a 0,6 m de conducto.

Caso 1

El valor de f continúa siendo el mismo que se ha obtenido para el cálculo de las pérdidas de carga en los codos 90°.

$$h_f = 0,023 \cdot \frac{0,6 \cdot 1,499^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,078 \text{ m}$$

Expresándolo en bares

$$h_f = 0,0078 \text{ bar}$$

Caso 2

También se puede conservar el valor de f calculado anteriormente y aplicarlo en el cálculo de las pérdidas de carga.

$$h_f = 0,021 \cdot \frac{0,6 \cdot 2,356^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,175 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,0175 \text{ bar}$$

Caso 3

Se emplea un método análogo al empleado en los casos anteriores.

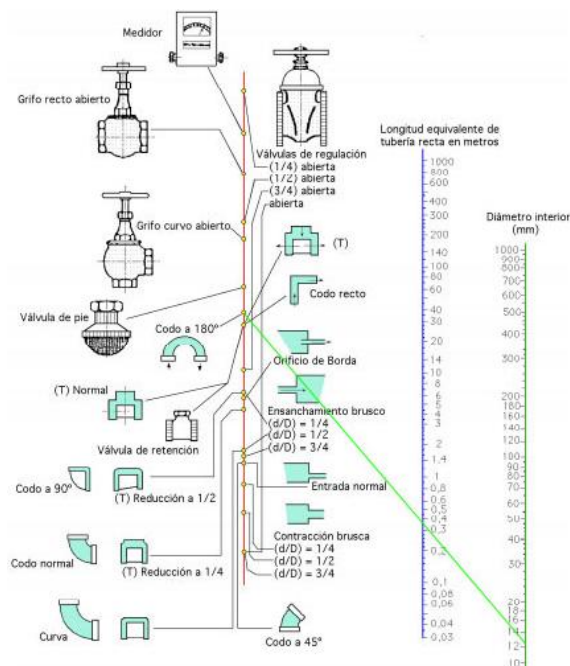
$$h_f = 0,025 \cdot \frac{0,6 \cdot 1,178^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,052 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,0052 \text{ bar}$$

Existe un caso especial de conector T que presenta un diámetro nominal diferente al de los otros dos conductos, en una de sus salidas por lo que hay que hacer un cálculo específico de este caso.

Aplicando esta nueva medida al Diagrama de Crane se obtiene una longitud equivalente de 0,38 m, como se aprecia en la imagen.



[15]

Caso 1

Conociendo este valor de longitud equivalente y todos los demás datos necesarios.

$$h_f = 0,023 \cdot \frac{0,38 \cdot 1,499^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,049 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,0049 \text{ bar}$$

Caso 2

Cambia el valor de la velocidad y de la f.

$$h_f = 0,025 \cdot \frac{0,38 \cdot 2,356^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,131 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,0131 \text{ bar}$$

Caso 3

Con otros valores.

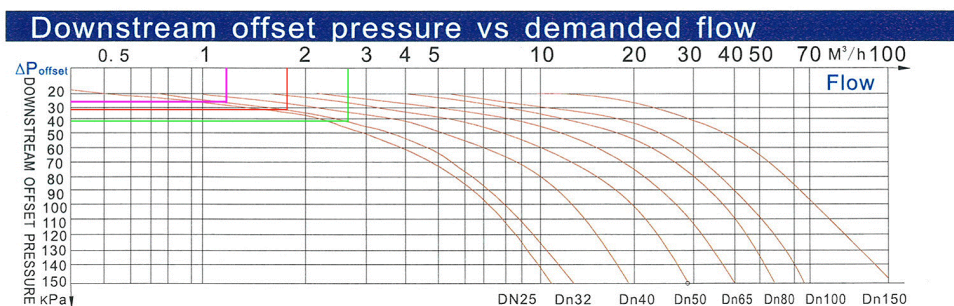
$$h_f = 0,021 \cdot \frac{0,38 \cdot 1,178^2}{20,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,028 \text{ m}$$

Expresado en bares

$$h_f = 0,0028 \text{ bar}$$

Válvula reductora

Para este cálculo se recurre a la gráfica facilitada por el fabricante.



[16]

El código de colores empleado es el mismo que en los cálculos anteriores, el rojo corresponde al caso 1, el verde al 2 y el rosa al 3.

Se observa que las pérdidas de carga que se van a producir son 30, 40 y 25 kPa respectivamente. Expresándolo en bares serán 0,306, 0,408 y 0,255.

Perfiles de presiones

En el circuito de circulación mayor el perfil de curva que proporciona el Diagrama de Wiggers será aproximado por una ecuación de segundo grado, situando el vértice de la curva en el punto en que se alcanza el máximo de presión y a la mitad de tiempo de duración de la variación de presión en la aurícula izquierda.

Para obtener la expresión analítica de la curva se recurre a la expresión genérica de una ecuación de segundo grado, que es la siguiente.

$$p(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \quad [1.3-1]$$

Habrà una curva diferente para cada uno de los casos que se han estudiado, ya que la duración aproximada de la variación de presión en la aurícula izquierda es 1/3 del tiempo total de la pulsación y la duración de la pulsación no es la misma para los tres casos.

Caso 1

La duración de la pulsación en esta situación es de 0,8571seg, por lo que la duración de la variación de presión es de 0,2857seg. Estos valores repercutirán directamente en los valores de x en las condiciones de contorno que se apliquen para hallar el valor de las constantes que den la expresión analítica del perfil de la curva de presiones. Los valores de presiones que se emplean en las condiciones de contorno están en unidades de bares.

Observando el Diagrama de Wiggers se plantean las condiciones de contorno, de la siguiente manera.

$$\begin{array}{l} t = 0; \quad p = 0 \quad \mapsto \quad c = 0 \\ \left. \begin{array}{l} t = 0,2857; \quad p = 0 \\ t = 0,14285; \quad p = 0,16 \end{array} \right\} \begin{array}{|l|} \hline a=-7,8407 \quad b=2,2401 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Por lo tanto la expresión analítica del perfil de presiones para el primero de los casos es:

$$p(t) = -7,8407 \cdot t^2 + 2,2401 \cdot t \quad [1.3-2]$$

Caso 2

En este caso se plantea una frecuencia cardiaca de 110 ppm, lo cual afecta a la duración de cada pulsación y por lo tanto también a la duración de la variación de presiones en el perfil.

La duración de cada pulsación, ya calculada anteriormente es de $0,54$ seg, por lo que la duración de la variación es de $0,18$ seg.

En relación con estos datos, las condiciones de contorno a aplicar son:

$$\left. \begin{array}{l} t = 0; \quad p = 0 \mapsto c = 0 \\ t = 0,18; \quad p = 0 \\ t = 0,09; \quad p = 0,16 \end{array} \right\} \begin{array}{|c|} \hline a=-19,7531 \quad b=3,5556 \\ \hline \end{array}$$

En función de los datos conocidos y del procedimiento aplicado anteriormente en el caso 1, la expresión analítica que se obtiene es:

$$p(t) = -19,7531 \cdot t^2 + 3,5556 \cdot t \quad [1.3-3]$$

Caso 3

En el tercero de los casos la frecuencia cardiaca es de 55 ppm.

La duración de cada pulsación es de 1,09seg, lo cual da una duración de la variación de presiones de $0,36$ seg. En función de esto las condiciones de contorno aplicadas son:

$$\left. \begin{array}{l} t = 0; \quad p = 0 \mapsto c = 0 \\ t = 0,36; \quad p = 0 \\ t = 0,18; \quad p = 0,16 \end{array} \right\} \begin{array}{|c|} \hline a=-4,9383 \quad b=1,7778 \\ \hline \end{array}$$

Por lo tanto la expresión analítica obtenida es la siguiente.

$$p(t) = -4,9383 \cdot t^2 + 1,7778 \cdot t \quad [1.3-4]$$

Ahora se va a estudiar la expresión analítica de la variación de presiones en el circuito de baja presión, el cual va a distar notablemente de lo calculado para el de alta presión.

Primeramente la modelización se va a hacer con un tramo lineal y otro caracterizado por una ecuación de segundo grado.

Caso 1

La ecuación característica de una recta es la siguiente:

$$y = a \cdot x + b \quad [1.3-5]$$

Observando el diagrama las condiciones de contorno que se establecen son las siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0 \quad x = 0 \\ y = 0,0163 \text{ bar} \quad x = 0,0476 \text{ s} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0,3424 \quad b=0 \end{array}$$

Conocidos los resultados la expresión del tramo recto inicial es la siguiente:

$$p(t) = 0,3424 \cdot t \quad [1.3-6]$$

Este tramo modeliza el perfil de presiones para tiempos de pulsación entre el comienzo y el valor de $t=0,0476 \text{ s}$.

A partir de ese momento de tiempo el perfil se modeliza con la expresión de segundo grado.

Para el cálculo de las constantes se plantearán tres condiciones de contorno.

$$\left. \begin{array}{l} y = 0,0163 \text{ bar} \quad x = 0,0476 \text{ s} \\ y = 0,00816 \text{ bar} \quad x = 0,11905 \text{ s} \\ y = 0,0272 \text{ bar} \quad x = 0,2857 \text{ s} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0,958325 \quad b=-0,2736 \\ c=0,02715 \end{array}$$

Por lo que la expresión de la curva de segundo grado será la siguiente:

$$p(t) = 0,958325 \cdot t^2 - 0,2736 \cdot t + 0,02715 \quad [1.3-7]$$

Caso 2

En este segundo caso se va a recurrir a un procedimiento análogo al anterior.

Empezando por el tramo lineal, las condiciones de contorno que se van a emplear son las siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0 \quad x = 0 \\ y = 0,0163 \text{ bar} \quad x = 0,0303 \text{ s} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0,5379 \end{array}$$

Con este resultado la expresión del tramo recto es:

$$p(t) = 0,5379 \cdot t \quad [1.3-8]$$

Siendo válida esta expresión para cualquier valor de t desde el comienzo de la pulsación hasta 0,0303 s desde que esta comenzó.

El siguiente tramo es el de la ecuación de segundo grado en el que se van a emplear las siguientes condiciones:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0,0163 \text{ bar } x = 0,0303s \\ y = 0,00816 \text{ bar } x = 0,07575s \\ y = 0,0272 \text{ bar } x = 0,1818s \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=2,3672 \text{ } b=-0,4301 \\ c=0,02716 \end{array}$$

Por lo tanto la expresión del tramo de segundo grado es la siguiente:

$$p(t) = 2,3672 \cdot t^2 - 0,4301 \cdot t + 0,02716 \quad [1.3-9]$$

Caso 3

En el caso 3 se va a proceder de la misma forma que en los dos anteriores, por lo que las condiciones para el tramo recto son:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0 \quad x = 0 \\ y = 0,0163 \text{ bar } x = 0,0606s \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0,26895 \end{array}$$

Con los resultados calculados la expresión queda de la siguiente manera:

$$p(t) = 0,26895 \cdot t \quad [1.3-10]$$

Para el segundo tramo de la curva las condiciones de contorno serán:

$$\left. \begin{array}{l} y = 0,0163 \text{ bar } x = 0,0606s \\ y = 0,00816 \text{ bar } x = 0,1515s \\ y = 0,0272 \text{ bar } x = 0,3636s \end{array} \right\} \begin{array}{l} a=0,5918 \text{ } b=-0,21507 \\ c=0,02716 \end{array}$$

La expresión final del segundo tramo del perfil de presiones será:

$$p(t) = 0,5918 \cdot t^2 - 0,21507 \cdot t + 0,02716 \quad [1.3-11]$$

1.4 SIMHYDRAULICS

Simhydraulics es un conjunto de bibliotecas que proveen de componentes para la modelización y simulación de sistemas hidráulicos que a su vez forman parte de Simscape donde se pueden encontrar otras bibliotecas con aplicaciones relacionadas con ámbitos como la ingeniería mecánica, neumática, eléctrica...

Esos componentes están clasificados en las siguientes categorías:

- Acumuladores
- Cilindros hidráulicos
- Útiles hidráulicos
- Resistencias hidráulicas localizadas
- Bloques de baja presión
- Orificios
- Conductos
- Bombas y motores
- Válvulas

Simscape permite integrar los componentes de diversos tipos, ya nombrados, en un solo modelo para funcionar de manera conjunta y poder analizar el comportamiento del sistema a partir de los resultados de la simulación.

Simhydraulics también puede ejecutar modelos realizados en otro software de simulación y además puede trabajar con código en lenguaje C.

A continuación se van a describir todos los componentes que se pueden encontrar en las librerías que forman parte de simhydraulics, haciendo un mayor hincapié en los elementos que se han utilizado en la construcción de la versión virtual del simulador.

1.4.1 Acumuladores

En esta biblioteca solo se encuentran dos elementos, que tal y como indica el nombre de la biblioteca son dos acumuladores.

Gas-Charged Accumulator

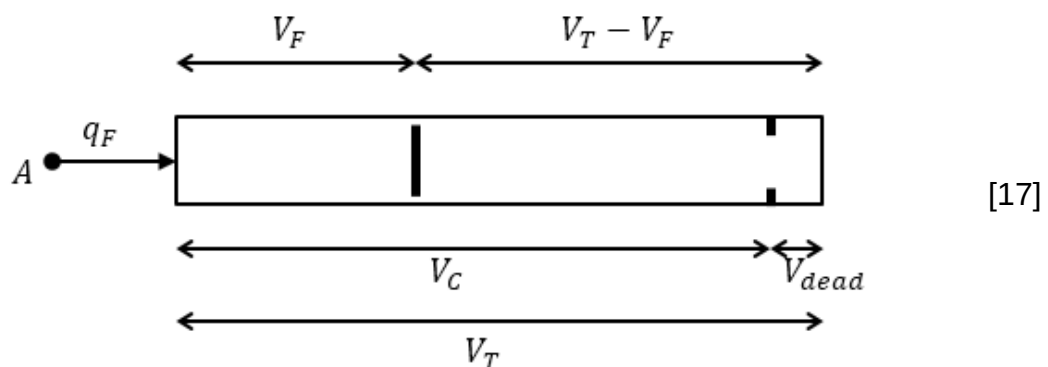
Modeliza un acumulador consistente en dos cámaras una cámara precargada con gas y otra cámara destinada al fluido, ambas cámaras se separan por un diafragma, un pistón o algún otro artilingio similar.

El funcionamiento del acumulador consiste en la acumulación de energía a partir de la presurización del gas. Durante el tiempo en que la presión del fluido que entra en la cámara correspondiente en el acumulador, es mayor que la presión que tiene como precarga el gas de la otra cámara lo que se consigue es una reducción del volumen de la cámara de gas y el de esta segunda cámara con el consiguiente aumento de su presión.

Por el contrario cuando la presión en el fluido decae entonces, esa energía almacenada en el gas en forma de presión por encima del nivel de precarga se transmite al fluido que está entrando en la otra cámara. El proceso es el inverso al descrito antes, en este caso el diafragma, pistón o similar se mueve en el sentido contrario.

Funcionando de forma convencional la presión en la cámara de gas y en la de fluido normalmente es la misma. En el caso de que la presión baje por debajo de la del gas entonces, deja de entrar fluido en el acumulador hasta que esta presión se recupera y alcanza niveles iguales o superiores a la precarga.

El movimiento del artilingio separador, sea este el que sea, está limitado por dos paradas bruscas, estando una relacionada con el aumento y otra con el decremento del volumen de la cámara de fluido. Estando estos límites en los puntos en los que la cámara está totalmente llena o completamente vacía.



En la imagen se incluyen indicaciones de magnitudes que se corresponden con:

- V_T : Volumen total

- V_F : Volumen de fluido
- V_C : Volumen máximo de fluido posible
- $V_T - V_F$: Volumen de gas
- V_{dead} : Volumen mínimo de gas posible cuando el fluido está al máximo

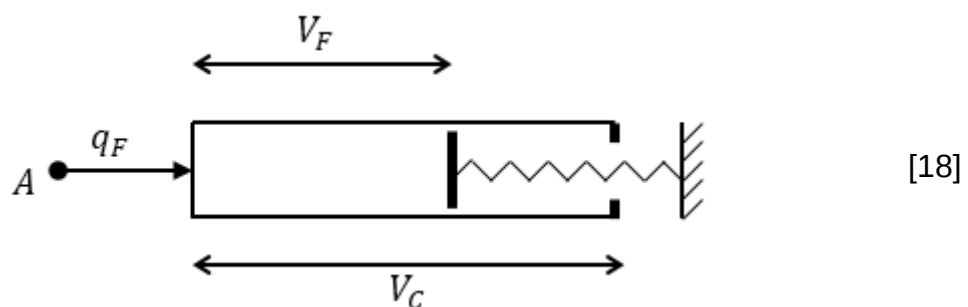
Spring-Loaded Accumulator

Un elemento semejante al que se ha explicado anteriormente pero con la diferencia de que emplea un sistema diferente para realizar la misma función.

En este caso el acumulador está formado igualmente por dos cámaras siendo una de ellas para fluido y conteniendo la otra un muelle con una tensión previamente fijada.

El proceso que tiene lugar dentro de este acumulador es análogo al anterior, estando la diferencia en el sistema acumulador de energía. En el primer caso era un gas contenido en una cámara que cambia de volumen, en este otro caso es un muelle el que se comprime si la presión del fluido supera su valor de tensión de precarga. El resto del comportamiento es el mismo que en el caso del que utiliza gas. Incluyendo también dos paradas bruscas en los mismos momentos que en el otro.

A continuación se incluye un diagrama del acumulador donde se aprecian las semejanzas.



En este caso solo se aprecian los volúmenes de fluido y el volumen máximo posible de fluido

1.4.2 Cilindros hidráulicos

Centrifugal Force in Rotating Cylinder

Es un bloque que se utiliza en el caso de modelos de cilindros hidráulicos en los que sea interesante tener en cuenta las fuerzas centrífugas ejercidas por el

fluido sobre un pistón, en el caso de que el cilindro tenga una rotación sobre su eje de simetría, siendo este axial. Estos cilindros se pueden encontrar en mecanismos de control de frenos y embragues entre otros. En el funcionamiento de este bloque no se contempla una posible variación notable de la velocidad angular, por lo que no se incluye la consideración de la inercia.

Cylinder Friction

Este bloque se utiliza cuando se quiere añadir al comportamiento de un cilindro hidráulico los efectos de la fricción entre las partes móviles que lo componen. Se puede conectar al cilindro hidráulico de simple acción y de doble acción.

La fuerza de fricción se simula a partir de la velocidad relativa entre las piezas y la presión, siendo el resultado del valor de la fuerza como la suma de Stribeck, Coulomb y la fuerza viscosa.

Cylinder Cushion

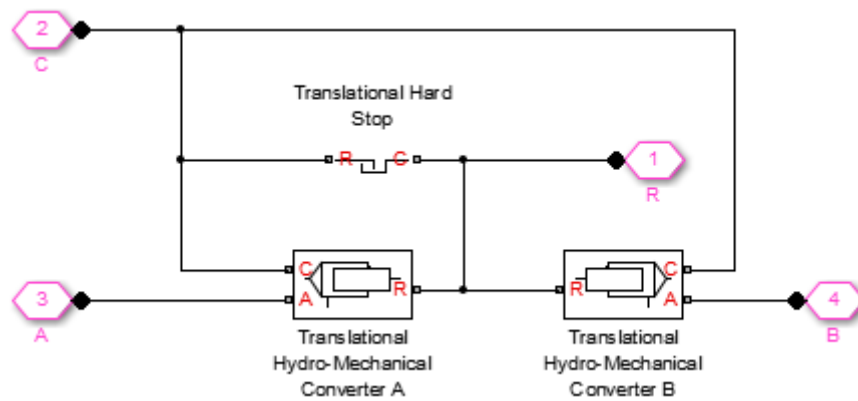
Como su nombre indica, modeliza el amortiguador de un cilindro hidráulico que decelera el eje de dicho cilindro cerca del final de la carrera, restringiendo el caudal saliente de la cámara.

El bloque es implementado como una estructura que recrea un dispositivo amortiguador.

Double-Acting Hydraulic Cylinder

Consiste en un sistema que convierte la energía hidráulica en movimiento traslacional de un vástago. Más concretamente el fluido bombeado se introduce por un orificio y ejerce una fuerza sobre el pistón que se mueve como resultado de la acción de esa fuerza.

En la siguiente imagen se puede ver el diagrama de los componentes que forman parte de este cilindro y como están conectados.



[19]

Como se puede apreciar contiene dos sistemas de conversión de la energía hidráulica en movimiento dado que es un cilindro de doble acción. Además también incluye un componente que establece los límites. Esos límites están unidos con las conexiones R y C que están unidos al pistón del cilindro y al soporte del cilindro respectivamente.

Por los puertos A y B entra la energía hidráulica que es la que provoca el movimiento, esta energía se hace circular hacia el sistema conversor adecuado según la información que se tiene de las tomas R y C. Con el funcionamiento conjunto de todos estos componentes y tomas el cilindro actúa en ambos sentidos en la misma dirección.

Double-Acting Hydraulic Cylinder (Simple)

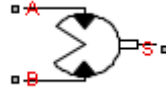
Es una versión simplificada del cilindro anterior, cuya razón de existencia son aquellas aplicaciones donde solo se reproducen las bases del funcionamiento del cilindro, consiguiendo con ellos una mayor eficiencia numérica. Se desprecian (suponiendo que son insignificantes) algunas consideraciones como: la compresibilidad del fluido, la fricción, las fugas... Además se considera que los límites son inelásticos para que no haya oscilaciones en el final de la carrera del pistón.

Double-Acting Rotary Actuator

Este bloque modeliza un sistema que convierte la energía hidráulica en un movimiento de rotación sin necesidad de utilizar elementos intermedios. El fluido se bombea en una de las cámaras de los dos actuadores y estos generan una fuerza que hace moverse rotatoriamente a un eje y genera un par.

Además al ser de doble acción se puede dar este fenómeno en los dos sentidos de giro.

El aspecto del bloque el que se ve en la figura a continuación.



[20]

Como se puede observar tiene tres puertos A, B y S. Los puertos A y B están conectados a las cámaras respectivas donde la energía se convierte en movimiento y mientras que el puerto S saca la energía mecánica del eje, para poder emplearla en el funcionamiento de otros bloques.

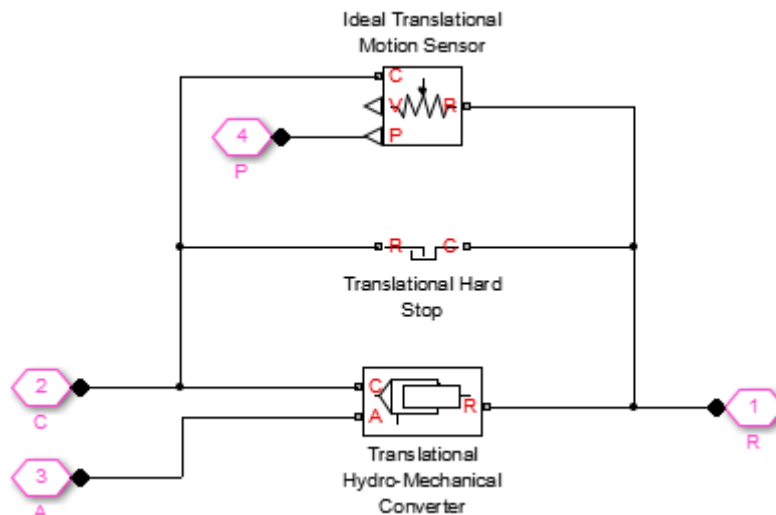
Pneumo-Hydraulic Actuator

Es un bloque cuyo objetivo es recrear el funcionamiento de un actuador neumo-hidráulico como un cilindro de doble acción, estando cada uno de los extremos del mismo conectadas a una fuente neumática e hidráulica respectivamente.

El consumo de fluido por parte del extremo hidráulico del actuador está relacionado con la velocidad que alcanza el pistón. La parte neumática utiliza los principios de funcionamiento de los sistemas que utilizan gases ideales. Los límites del pistón están incluidos en el bloque y el área del pistón se supone constante.

Single-Acting Hydraulic Cylinder

Es un bloque análogo al Double-Acting Hydraulic Cylinder pero sin incluir la posibilidad de actuar en los dos sentidos, como se puede apreciar en el diagrama siguiente.



A diferencia del cilindro de doble acción, en este se puede ver como solo hay un sistema de conversión de la energía hidráulica en movimiento (energía mecánica)

Single-Acting Hydraulic Cylinder

Este bloque incluye las mismas simplificaciones que el Double-Acting Hydraulic Cylinder (Simple) para aumentar la eficiencia numérica.

Además al ser de acción simple como el anterior solo actúa en un sentido.

Single-Acting Rotary Actuator

De la misma manera que todos los anteriores bloques que suponen la versión de acción simple de otros con acción doble, este bloque tiene el mismo funcionamiento que el de doble acción pero no puede realizarlo en los dos sentidos de rotación sino solo en uno de ellos.

1.4.3 Útiles hidráulicos

Hydraulic Fluid

Bloque que da la posibilidad de especificar el fluido que circula por un circuito cerrado de un sistema hidráulico. Permite especificar las principales propiedades del fluido empleado en la simulación, las cuales se mantendrán constantes a lo largo de la simulación.

El valor del módulo de compresibilidad que aparece en el cuadro de dialogo asociado al bloque es el coeficiente de compresibilidad del líquido puro y está determinado por la relación entre el tipo de fluido y la temperatura a la que se

encuentra. Se puede añadir a la mezcla de fluido una parte de gas sin disolver si se añaden otros componentes como Constant Volume Hydraulic Chamber o Variable Hydraulic Chamber, en este caso el coeficiente de compresibilidad se calcula de la siguiente manera.

$$E = E_l \cdot \frac{1 + \alpha \cdot \left(\frac{p_a}{p_a + p} \right)^{1/n}}{1 + \alpha \cdot \frac{p_a^{1/n}}{n \cdot (p_a + p)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot E_l} \quad [1.4-1]$$

El objetivo de la inclusión de una parte gaseosa en el fluido que circula por el sistema radica en la representación de la posible cavitación que se produce en el interior del mismo cuando la presión baja por debajo de la presión de saturación de vapor del fluido con el que se está trabajando y a la temperatura en que se encuentra. En el caso que la presión de trabajo este muy por encima de ese valor, un pequeño contenido de gas no disuelto no tiene efectos notables en el sistema.

La cavitación en detalle, considerando el fluido en varias fases, las transferencias de calor relacionadas y otros fenómenos que se dan, no pueden simulados por Simscape de manera precisa pero con la opción antes comentada si se alcanza un nivel de realismo más que aceptable y se evitan problemas derivados.

Intrínsecamente el bloque incluye una selección de posibles fluidos a escoger, con el nombre del fluido y los cuales ya tienen introducidos los valores característicos de sus parámetros aunque en caso que se desee, estos se pueden modificar.

La conexión del bloque se realiza a través de su único puerto, el cual se conectará al circuito cerrado hidráulico donde se desee trabajar con el fluido especificado solo con unir una rama del sistema al puerto que tiene el bloque.

Para cada circuito cerrado independiente habrá que conectar un bloque Hydraulic Fluid y especificar las propiedades del fluido que trabaja en él.

Reservoir

Como su nombre indica este bloque consiste en una réplica de un depósito presurizado, donde el fluido se almacena a una presión que puede ser

especificada. Independientemente de los cambios de volumen de fluido contenidos en el depósito la presión permanecerá constante en todo momento.

Se pueden incluir pérdidas de presión debidas a la disposición de filtros, resistencias localizadas o algún otro elemento. Estas pérdidas se introducirán en el bloque del depósito a través de coeficiente de pérdidas de presión.

El bloque incorpora tres puertos, siendo dos de ellos P y R para la entrada y salida del fluido y el tercero de ellos V una salida de señal que dará la medida del nivel de fluido en el interior del depósito.

El hecho de que el nivel de fluido en el interior del depósito alcance valores inferiores a cero no supondrá una limitación para la simulación, ya que esta seguirá funcionando. Simplemente en las medidas del nivel aparecerán valores negativos que indicarán que la cantidad de fluido especificada para este modelo no es suficiente.

1.4.4 Resistencias hidráulicas localizadas

Elbow

Es un bloque que representa la pérdida de carga debida a un codo en un sistema hidráulico. Otorga la posibilidad de diferenciar entre dos tipos de codos, de curva suave y de bordes afilados. Considera geometrías con de 5-100 mm de diámetro interno y con ángulos de giro de 0-90°.

Gradual Area Change

Supone una resistencia localizada debida al cambio de sección que se produce en ella. Se puede emplear para recrear un aumento o decremento gradual indistintamente, simplemente cambiando el sentido en el que circula el fluido, sin que esto afecte al buen funcionamiento del bloque.

Está fundamentado en el bloque Local Resistance que se verá a continuación. Su funcionamiento consiste en la determinación del coeficiente de pérdida de presión e introducir este valor en el bloque Local Resistance.

Además de los diámetros con los que se trabaja y el ángulo del cono también se pueden introducir otros datos necesarios como el método de parametrización, el factor de corrección y el límite del número de Reynolds.

Para calcular las pérdidas se emplean fórmulas semiempíricas que utilizan los valores geométricos que se han introducido. Las fórmulas que se utilizan en caso de ensanchamiento o estrechamiento son las siguientes:

$$K_{GE} = \begin{cases} K_{cor} \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_L}\right)^2 \cdot 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); & 0 < \alpha \leq 45^\circ \\ K_{cor} \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_L}\right)^2; & 45^\circ < \alpha < 180^\circ \end{cases} \quad [1.4-2]$$

$$K_{GC} = \begin{cases} K_{cor} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_L}\right)^{0,75} \cdot 1,6 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); & 0 < \alpha \leq 45^\circ \\ K_{cor} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_L}\right)^{0,75} \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}; & 45^\circ < \alpha < 180^\circ \end{cases} \quad [1.4-3]$$

Estas fórmulas se utilizan en el caso de que se escoja la parametrización mediante fórmulas semiempíricas, si lo que se escoge es introducir los coeficientes de pérdidas a partir de tablas entonces se tendrá que añadir una tabla donde se relacione el coeficiente de pérdidas con el valor del número de Reynolds para el cual se debe utilizar ese coeficiente. Los valores que quedan entre esos dados se podrán determinar mediante tres diferentes métodos de interpolación y dos de extrapolación.

La pérdida real de presión se determina como la diferencia de presión entre la entrada y la salida del bloque.

Local Resistance

Se emplea para incluir en los modelos una resistencia hidráulica localizada genérica, que podría representar un codo, un filtro... La pérdida de presión al igual que en los anteriores elementos de esta librería se especifica con el coeficiente de pérdida de presión. Este coeficiente se puede encontrar en hojas de datos, tabulado o en textos sobre hidráulica.

La pérdida de presión se calcula con la utilización de las siguientes fórmulas, se debe recordar que los elementos anteriormente comentados también basan el cálculo de sus pérdidas en un bloque de este tipo, por lo que estas son aplicables a todos ellos.

$$q = A \cdot \sqrt{\frac{2}{K \cdot p}} \cdot \frac{p}{(p^2 + p_{cr}^2)^{1/4}} \quad [1.4-4]$$

$$p = p_A - p_B \quad [1.4-5]$$

$$p_{cr} = K \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Re_{cr} \cdot v}{D_H} \right)^2 \quad [1.4-6]$$

$$K = \begin{cases} const \\ K(Re) \end{cases} \quad [1.4-7]$$

$$Re = \frac{q \cdot D_H}{A \cdot v} \quad [1.4-8]$$

$$D_H = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad [1.4-9]$$

Al igual que en los bloques anteriores, se ofrecen dos opciones de parametrización diferentes: fórmulas semiempíricas y tabla $K=f(Re)$.

El valor del coeficiente se puede considerar como constante (fórmulas semiempíricas) o introducirse como una tabla en la cual el valor del coeficiente varía con el valor de número de Reynolds.

También se puede incluir una especificación más que consiste en fijar la pérdida como simétrica o asimétrica. En el caso de que se considere simétrica las pérdidas que se produzcan en la corriente de fluido serán iguales en los dos sentidos de circulación a través del bloque. Si se considera asimétrica entonces se fijaran dos coeficientes diferentes cada uno para cada sentido de circulación del flujo.

Pipe Bend

Es un bloque que simula la pérdida que se produce en un conducto como una suma entre la pérdida por la circulación a través de un conducto más la pérdida por la curvatura que ese conducto puede tener.

De esta forma el bloque se compone de dos uno que representa esa primera pérdida el Hydraulic Resistive Tube y otro de Local Resistance que incluye el efecto de la curvatura.

Sudden Area Change

Recrea la pérdida de carga que tiene lugar cuando en un sistema hidráulico se produce un cambio de sección brusco. El bloque se puede utilizar para simular tanto un estrechamiento como un ensanchamiento brusco, tan solo con cambiar el orden de conexión de los puertos es decir convirtiendo la entrada en la salida y viceversa.

Este bloque también incluye dos posibilidades de parametrización siendo: fórmulas semiempíricas o valores tabulados.

En el caso de las fórmulas semiempíricas, como ya se vio en el caso del cambio de área gradual, a partir de los datos geométricos introducidos se emplean fórmulas que los relacionan y dan el valor del coeficiente de pérdidas de presión.

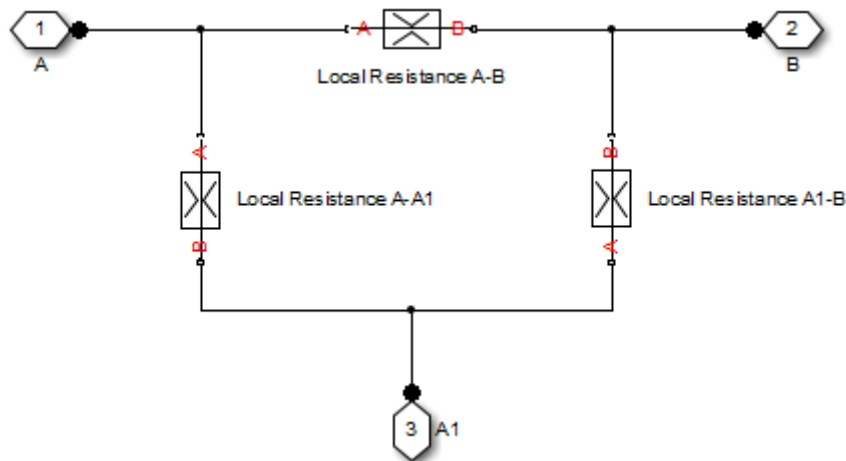
En el caso de escoger el método tabulado, al igual que en otros bloques se deben introducir valores del coeficiente en función del valor del número de Reynolds.

T-junction

Como su nombre indica este bloque representa una intersección en T. Es un bloque que se puede emplear para unir dos caminos en otro que lleve el caudal de los dos o para bifurcar en dos una conducción principal.

Para el cálculo de las pérdidas que se producen en él se deben especificar 6 coeficientes, uno para cada par de conductos que están conectados, teniendo en cuenta que en este caso también se puede dar que las pérdidas sean asimétricas y por lo tanto el coeficiente de pérdidas en un sentido sea diferente que en el otro.

A continuación se incluye el diagrama esquemático del bloque, donde se aprecia la conexión entre los puertos y como el bloque está formado solo por bloques Local Resistance.



[22]

El sentido positivo del bloque es de A a B y de A1 a B por lo que en condiciones normales sirve para unir dos corrientes en una.

1.4.5 Bloques de baja presión

Constant Head Tank

Al igual que el bloque Reservoir este bloque representa un contenedor de fluido presurizado. Se asume que el tamaño del depósito es lo suficientemente grande para que no haya un cambio de presión ni del nivel de fluido debido al cambio de volumen de fluido contenido.

El bloque tiene en cuenta el nivel de fluido tomando como referencia de nivel cero el fondo del tanque, además también contempla las pérdidas de carga que se pueden producir en los conductos por la presencia de alguna resistencia localizada. Las pérdidas se especifican con el coeficiente de pérdidas al igual que en otros muchos bloques.

De la misma manera que en el bloque Reservoir el bloque se introduce para que aporte información, no supone ningún tipo de limitación para la simulación ya que está preparado para poder trabajar con volúmenes negativos indicando de tal forma que el volumen introducido no es suficiente para el modelo de trabajo.

Hydraulic Pipe LP

Modeliza los conductos de sección circular y no circular. El bloque tiene en cuenta las pérdidas por fricción con el conducto además de las debidas a la compresibilidad del fluido. Sin embargo, no tiene en cuenta la inercia del fluido

y no se puede emplear para predecir efectos del golpe de ariete o cambio en la presión debidos a una aceleración del fluido.

Hydraulic Pipe LP with Variable Elevation

Este modelo añade al Hydraulic Pipe LP la posibilidad de tener en cuenta que el principio y fin del conducto no estén en el mismo plano. La elevación de uno de los extremos se introduce como una señal física en el puerto de entrada para una señal de ese tipo con que cuenta el bloque en cada uno de los extremos.

Partially Filled Vertical Pipe LP

Este bloque se emplea para recrear un conducto que une dos depósitos ofreciendo la posibilidad de que uno de los depósitos se vacíe por completo y como consecuencia el extremo de conducto conectado a él quede expuesto. Además cuando esto ocurre el fluido se quedará estabilizado en algún punto intermedio del conducto donde el nivel en el depósito tenga la misma altura que en la tubería.

Resistive Pipe LP

Este bloque supone una simplificación del bloque Hydraulic Pipe LP, donde se deja de considerar la posible compresibilidad del fluido para pasar a tener en cuenta solo la pérdida por fricción en conductos de sección circular o no circular.

Para tener en cuenta los efectos de la compresibilidad, la inercia etc. Se tendrían que añadir otros bloques a este.

Resistive Pipe LP with Variable Elevation

Al igual que el anterior era una simplificación del bloque Hydraulic Pipe LP, este supone la misma simplificación pero para el bloque Hydraulic Pipe LP with Elevation, por lo que al anterior le añade la posibilidad del cambio de plano de alguno de los extremos del conducto.

Segmented Pipe

Se utiliza para modelos con conductos de sección circular. Está formado por bloque de parámetros concentrados idénticos conectados en serie. Cuantos

más bloques de parámetros concentrados más se asemejara el modelo a uno de parámetros distribuidos. Además tiene que tener una cámara hidráulica por cada bloque de parámetros concentrados.

Variable Head Tank

Es un depósito presurizado en donde se almacena fluido a la presión fijada. Este no variará como resultado del cambio de volumen de fluido.

El bloque tiene en cuenta el cambio del nivel en el depósito debido a la variación de volumen. También se contemplan las pérdidas debidas a las resistencias hidráulicas localizadas en los conductos, a través del coeficiente de pérdidas de presión.

Se puede escoger entre tres métodos de interpolación y dos de extrapolación en caso de que la relación entre el volumen almacenado en el tanque y el nivel fluido no sea lineal. Será necesario introducir una tabla de datos a partir de los que se pueda interpolar o extrapolar.

Variable Head Three-Arm Tank

Representa un tanque de almacenamiento de fluido, con tres salidas. Las asunciones que se hacían en el caso del bloque Variable Head Tank son aplicables a este caso también. Este bloque incluye más ramas de salida por lo que habrá que considerar tres coeficientes de pérdidas de presión, variando estos según lo que haya conectado en cada una de las salidas.

En este caso también se puede dar una relación no lineal entre el nivel y el volumen, por lo que haya que introducir una tabla de valores y emplear alguno de los métodos de interpolación o extrapolación que se ponen a disposición.

Variable Head Two-Arm Tank

Es un bloque análogo al Variable Head Three-Arm Tank pero en lugar de tres salidas solo incorpora dos, por lo que solo habrá que considerar dos coeficientes de pérdida de presión. Por lo demás su funcionamiento es el mismo.

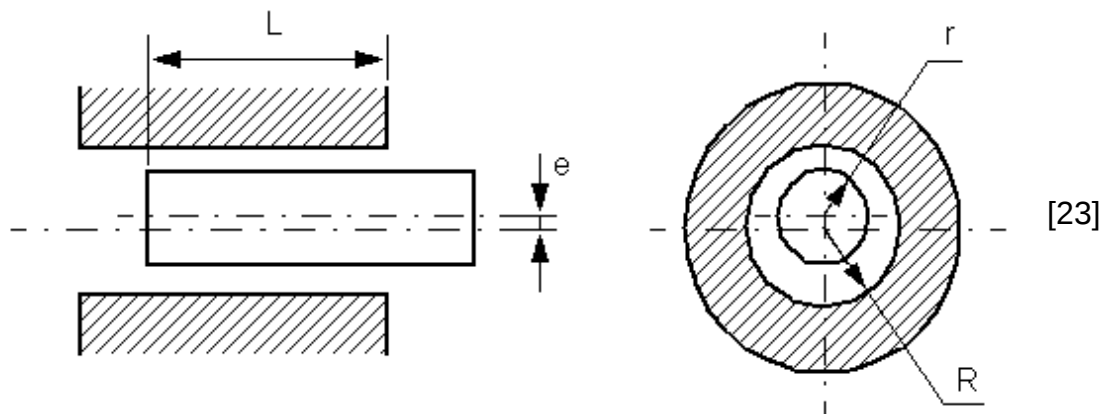
1.4.6 Orificios

Annular Orifice

Recrea un orificio creado por un tubo circular y un elemento cilíndrico en el centro del conducto por lo que queda un espacio anular entre el elemento cilíndrico y el conducto.

Se asume que la longitud axial del orificio es menor que la del conducto por lo que se puede tomar la consideración de que el flujo estará siempre en régimen laminar.

La siguiente imagen ilustra mejor lo explicado.



Fixed Orifice

Es el modelo virtual de un orificio de área transversal constante que no tiene los extremos redondeados. El caudal a través del orificio es proporcional a la presión diferencial a través del mismo.

Fixed Orifice Empirical

Es una variante del anterior que da la posibilidad de modelizar un orificio que ha sido testado empíricamente. En este caso se deben introducir tabulados los datos empíricos del caudal en relación con la presión diferencial. A partir de esa tabla se pueden emplear tres métodos de interpolación y dos de extrapolación para poder trabajar con ellos.

Fixed Orifice with Fluid Inertia

Como añadido al bloque Fixed Orifice este tiene en cuenta la inercia del fluido.

La inercia del fluido tiene un papel importante en los orificios donde la relación entre la longitud del orificio y el diámetro tiene un valor elevado y en los orificios cortos de bordes afilados donde el flujo se acelera considerablemente.

Orifice with Variable Area Round Holes

Este bloque asemeja un elemento compuesto por una camisa y un cilindro interior que se mueve en dirección axial a lo largo de la camisa. En la camisa se encuentran perforados una serie de orificios a lo largo del perímetro, todos ellos en el mismo plano.

Cuando el cilindro avanza o retrocede varía el área de paso del fluido a través de los orificios. El caudal es proporcional a la apertura de los orificios y a la presión diferencial en el bloque.

Orifice with Variable Area Slot

Es un bloque que recrea un elemento semejante al Orifice with Variable Area Round Hole. En este caso la camisa es rectangular y en lugar de orificios dispone de una ranura la cual es tapada y destapada por un cilindro que está en el interior de la camisa.

El caudal es proporcional al grado de apertura de la ranura y a la presión diferencial del elemento.

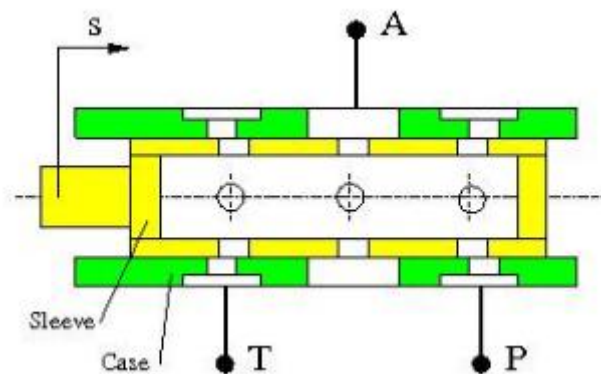
Variable Orifice

Con este bloque se puede recrear cualquier tipo de orificio a partir de una hoja de datos. A partir de esos datos introducidos se puede trabajar con ellos con tres modelos de parametrización diferentes: Área máximo y apertura, Área frente a la apertura y presión-caudal.

Variable Orifice Between Round Holes

Es un bloque consistente en el funcionamiento conjunto de dos orificios, el primero de ellos perforado en el vástago y el otro en la cámara contenedora. Ambos orificios pueden tener diferentes diámetros. A diferencia de Orifice with Variable Área Round Hole en este caso puede haber orificios en diferentes planos.

La siguiente figura ilustra la disposición de los elementos en el componente físico.



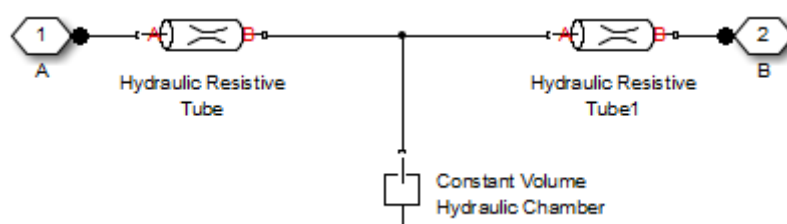
[24]

1.4.7 Conductos

Hydraulic Pipeline

Bloque que recrea las características de conductos hidráulicos con sección circular o no circular indistintamente y que tiene en cuenta los efectos derivados de la fricción entre el fluido circulante y las paredes del conducto además de la compresibilidad del fluido. Por otra parte no considera la inercia del fluido y no se puede utilizar para fenómenos como el golpe de ariete o cambios en la presión del fluido generados por aceleraciones en el flujo.

El diagrama de bloques interior del bloque es el que aparece en la siguiente figura.



[25]

Los bloques Hydraulic Resistive Tube tienen en cuenta los efectos de la fricción en la corriente que atraviesa el conducto y el bloque Constant Volume Hydraulic Chamber es el que se encarga de la compresibilidad del fluido.

Este bloque además ofrece la posibilidad de especificar si los conductos que se quieren utilizar en la simulación tienen las paredes elásticas o rígidas, en caso de escoger que sean elásticas se requieren algunos datos más relacionados con el grado de elasticidad son requeridos.

Segmented Pipeline

Elemento que se emplea para incluir en el modelo de simulación un bloque que recrea conductos de sección circular, formado por la unión en serie de un número de bloques idénticos con parámetros concentrados. Sabiendo que cuantos más bloques se pongan más se asemejará el modelo de parámetros concentrados al de parámetros distribuidos.

1.4.8 Bombas y Motores

Angle Sensor

Representa un medidor ideal de ángulos en un rango de 0-360°. Se emplea para la medida del ángulo girado por un elemento que tiene un movimiento rotacional, encontrándose ambos unidos por un puerto mecánico rotacional.

No añade carga al elemento rotatorio del que está midiendo el giro, intrínsecamente está ajustado para que la medición se mantenga en el rango 0-360° aún dándose el caso de que el elemento giratorio de más de una vuelta.

Al ser ideal el sensor no tiene en cuenta inercia, fricción etc.

Centrifugal Pump

Bloque recreación de una bomba centrífuga de cualquier tipo de acuerdo con los datos de la hoja facilitada por el fabricante que se introduzcan. En función de los datos de que se disponga se puede escoger entre varios modelos de parametrización:

- Por aproximación polinómica
- Mediante dos relaciones 1D (P-Q y N-Q)
- Mediante dos relaciones 2D (P-Q-W y N-Q-W)

Fixed-Displacement Motor (External Efficiencies)

Este bloque representa un motor de desplazamiento positivo donde las eficiencias mecánicas e hidráulicas se introducen en forma de señal a través de los puertos de que dispone el bloque. Las pérdidas hidráulicas se modelizan como fugas entre los puertos de entrada y salida del fluido y las pérdidas mecánicas como fricción de las partes móviles del motor. Tanto las fugas como la fricción se determinan a partir de los valores de eficiencia que se introducen.

Fixed-Displacement Pump

Al igual que el bloque Centrifugal Pump este sirve para representar cualquier bomba de desplazamiento positivo de acuerdo con los datos facilitados por el fabricante, que son los que se introducen como parámetros del bloque. Los parámetros clave son el caudal (en diversas unidades), las eficiencias volumétrica y total, la presión nominal y la velocidad angular.

Las ecuaciones internas que maneja el bloque son las siguientes:

$$q = D \cdot \omega - k_{leak} \cdot p \quad [1.4-10]$$

$$T = D \cdot \frac{p}{\eta_{mec}} \quad [1.4-11]$$

$$k_{leak} = \frac{k_{HP}}{v \cdot \rho} \quad [1.4-12]$$

$$k_{HP} = \frac{D \cdot \omega_{nom} \cdot (1 - \eta_V) \cdot v_{nom} \cdot \rho_{nom}}{p_{nom}} \quad [1.4-13]$$

$$p = p_P - p_T \quad [1.4-14]$$

Las fugas se determinan a partir de la asunción de que hay una proporción lineal entre ellas y la presión diferencial y se calculan a partir de la expresión de Hagen-Poiseuille.

$$p = \frac{128 \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot d^4} \cdot q_{leak} = \frac{\mu}{k_{HP}} \cdot q_{leak} \quad [1.4-15]$$

Cuando el sistema se encuentra en las condiciones nominales, entonces el caudal fugado será:

$$q_{leak} = D \cdot \omega_{nom} \cdot (1 - \eta_V) \quad [1.4-16]$$

La eficiencia mecánica se calcula a partir de los valores introducidos de las eficiencias total y volumétrica.

$$\eta_{mec} = \frac{\eta_{total}}{\eta_V} \quad [1.4-17]$$

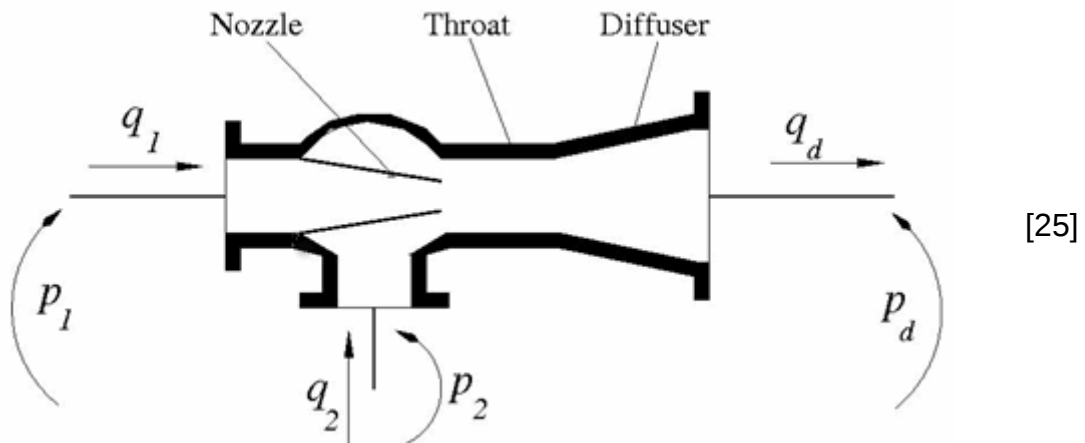
Hydraulic Motor

Se comporta como un motor de desplazamiento positivo con unas características fijadas por los datos introducidos, facilitados por el fabricante.

Los parámetros clave son los mismos que los del bloque Fixed-Displacement Pump.

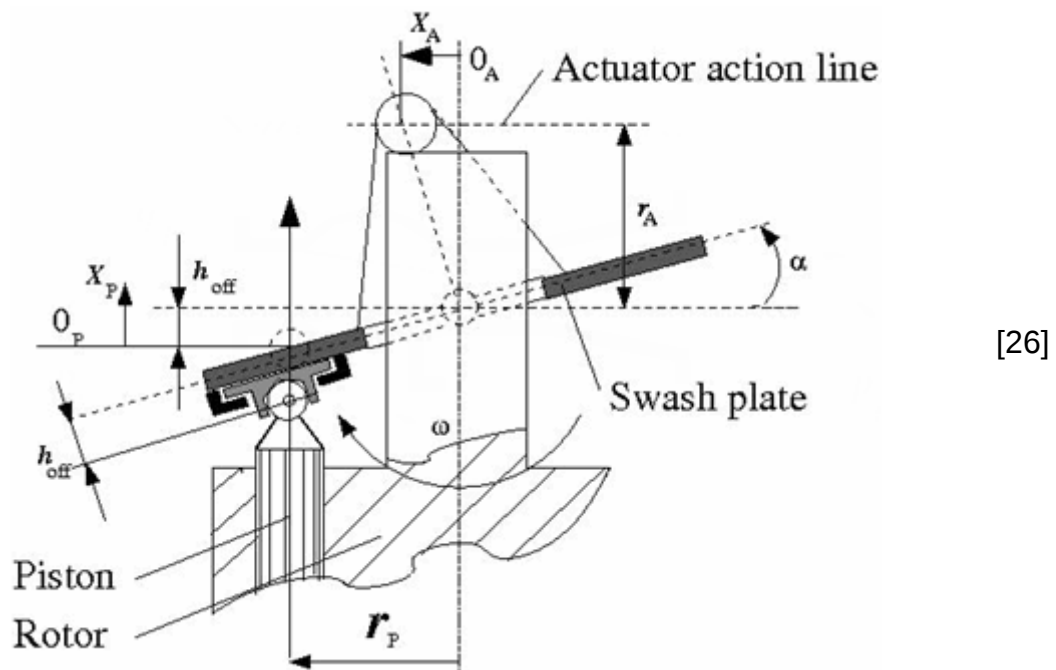
Jet Pump

Es la representación de un jet líquido-líquido compuesto por una boquilla, garganta y difusor como se puede apreciar en el dibujo adjunto.



Swash Plate

Bloque que convierte el movimiento lineal de un pistón en un cilindro en el movimiento giratorio de un eje. El mecanismo es una combinación de un rotor con el pistón en su interior y una placa inclinada en un ángulo. Se incorpora la siguiente imagen para ver la disposición de los elementos.



Variable-Displacement Hydraulic Machine

Modeliza una máquina hidráulica de desplazamiento variable acorde con los parámetros introducidos a partir de los datos del fabricante. Sirve para actuar como motor y bomba indistintamente ya que tiene en cuenta el sentido de la corriente. La eficiencia se puede fijar a partir de datos empíricos, siendo esta recreada a partir de fugas y fricción entre las partes móviles.

Se puede controlar el caudal a partir de una señal que se introduce en el bloque a través de uno de sus puertos.

Con la señal de control y su relación con el caudal se pueden emplear dos métodos de parametrización, el de máximo caudal y carrera o introducir una tabla en que se relacione la posición del elemento móvil y el caudal.

Variable-Displacement Hydraulic Machine (External Efficiencies)

Este bloque añade al anterior dos puertos por los cuales se introduce en forma de señal las eficiencias mecánica y volumétrica. Por lo demás su funcionamiento es el mismo.

Variable-Displacement Motor

Simplificación del bloque Variable-Displacement Hydraulic Machine ya que este no puede actuar como bomba, solo lo hace como motor. Por lo demás el comportamiento, parametrizaciones... son iguales pero siempre como motor.

Variable-Displacement Pressure-Compensated Pump

Este bloque recrea un sistema de bombeo con desplazamiento variable y presión compensada que se ajusta a los datos dados por el fabricante a partir de los parámetros que se introducen al bloque. Los parámetros principales son el caudal máximo, el rango de regulación, las eficiencias volumétrica y total, la presión nominal y la velocidad angular.

El bloque trata de mantener la presión ajustada lo máximo posible al valor prefijado mediante el ajuste del caudal según los requerimientos.

Variable-Displacement Pump

Este bloque hace las funciones de una bomba de desplazamiento variable bidireccional. El caudal de la bomba es proporcional a la señal que se introduce

por el puerto C. La eficiencia de la bomba se halla a partir de la volumétrica y la total, la presión nominal y la velocidad angular. Se pueden emplear dos parametrizaciones a partir del máximo caudal y carrera o a partir de una tabla de relación entre la posición del elemento móvil y el caudal.

1.4.9 Válvulas

2-Way Directional Valve

Representación de una válvula de 2 vías y dos posiciones. El bloque incorpora tres puertos, uno donde se puede introducir una señal física que gobierne el cambio de posición de la válvula y, los otros dos que son la entrada y salida del fluido.

Una de las posiciones de la válvula permite la circulación del fluido a través de ella y la otra corta la corriente. Se puede especificar el grado de apertura inicial y en base a eso se establecerá, conjuntamente con el actuador que se utilice, como se abre o cierra la válvula.

La ecuación de apertura de la válvula es la siguiente:

$$h = x_0 + x \quad [1.4-20]$$

En el caso de que la apertura sea máxima al inicio, se puede establecer que el movimiento del actuador sea negativo por lo que se conseguiría que la válvula se fuese cerrando. Se verá con más detalle en el apartado de los actuadores.

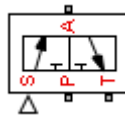
La parametrización se puede hacer con tres modelos diferentes como son el de máximo área y apertura, tabulación área-apertura y la curva característica presión-caudal.

En el primero de los casos se supone que la relación es totalmente lineal. En el segundo de ellos se emplea la interpolación lineal a partir de los datos tabulados y en el tercero se emplea una interpolación de dos dimensiones en lugar de una.

3-Way Directional Valve

Consiste en una válvula formada por 3 vías y 2 posiciones. En una de las posiciones permite la circulación de la corriente entre dos de las vías en un

sentido y en la otra entre otras dos vías y en el sentido opuesto. Se incluye el diagrama de la válvula.



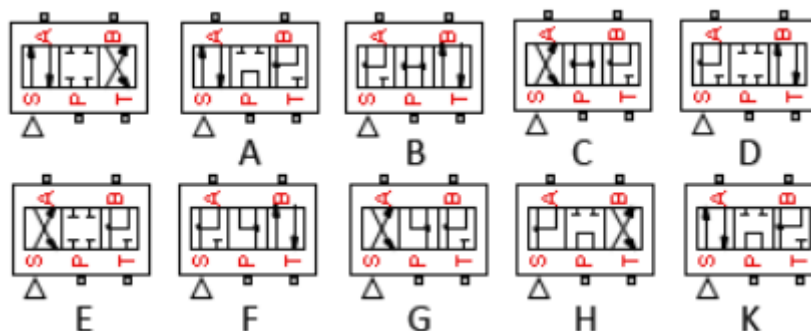
[27]

Al igual que en el bloque 2-Way Directional Valve se puede utilizar una señal física para controlar el paso de una posición a otra de la válvula.

4-Way Directional Valve

Esta biblioteca incluye una gama extensa de válvulas de 4 vías cuyos bloques tienen los siguientes nombres: 4-Way Directional Valve, 4-Way Directional Valve A, 4-Way Directional Valve B, 4-Way Directional Valve C, 4-Way Directional Valve D, 4-Way Directional Valve E, 4-Way Directional Valve F, 4-Way Directional Valve G, 4-Way Directional Valve H, 4-Way Directional Valve K.

Todas ellas son válvulas de 4 vías y 3 posiciones con un puerto para la señal física de control de posición. Se incluyen a continuación los diagramas de todas ellas.



[28]

Los modelos de parametrización que estas ofrecen son los mismos que los que ofrece el bloque 2-Way Directional Valve.

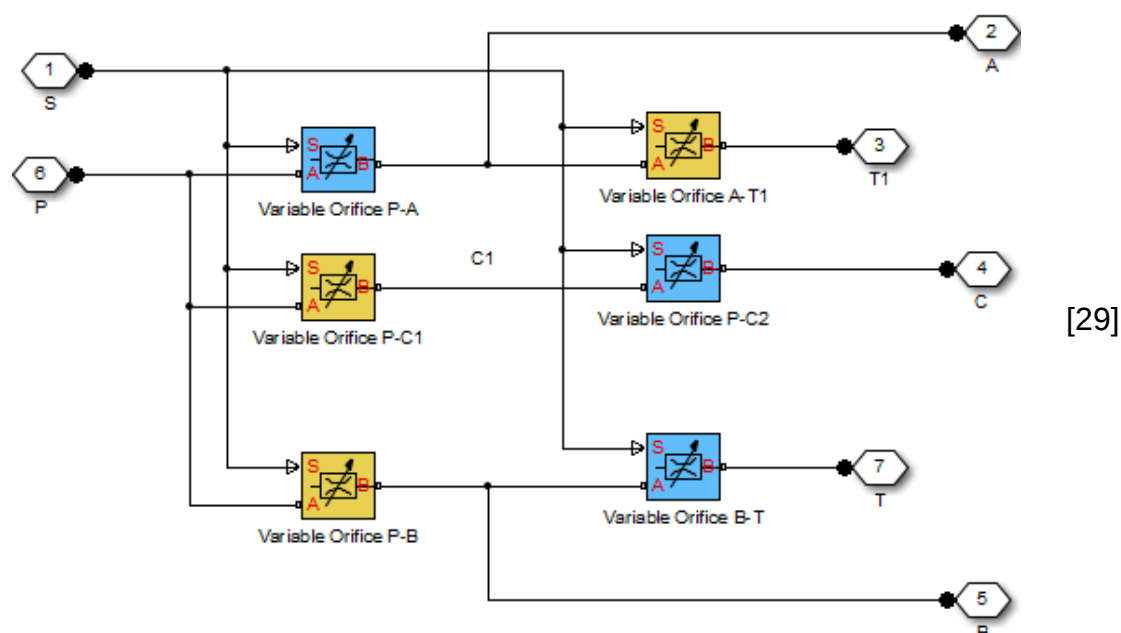
4-Way Ideal Valve

Este bloque supone una simplificación de los anteriores en donde el grado de apertura inicial de todos los orificios es igual a cero. Igual que las anteriores es una válvula de 4 vías y 3 posiciones.

6-Way Directional Valve A

Consistente en una válvula de 6 vías y 3 posiciones. Cuenta con un puerto de control de la posición, 2 puertos de retorno, un puerto de bombeo y tres puertos de actuación. En la posición neutral el puerto de bombeo esta descargado, pero si la válvula se desliza hacia alguna de las otras posiciones, entonces empieza a bombear a la presión nominal.

Con el diagrama de bloques que se puede ver a continuación se hacen más visibles las conexiones entre los puertos.



Se puede ver como la señal de control de posición entra en los orificios variables afectando a su grado de apertura.

Cartridge Valve Insert

Representación de una válvula de cartucho formada por un pistón, un muelle y el cartucho cerrado. La posición del pistón depende de la presión en los puertos de entrada y salida del fluido y de la fuerza del muelle.

La presión en los puertos A y B (del fluido) tiende a abrir la válvula mientras que el puerto X (del muelle) actúa para cerrarla.

El modelo no contempla caudales ni tampoco inercia o fricción en el pistón. Obviamente la válvula permanecerá cerrada mientras la presión no venza la precarga del muelle.

Cartridge Valve Insert with Conical Seat

Es un modelo análogo al anterior pero con una forma cónica para la pieza de asiento del pistón, algo que en el anterior bloque no se especifica.

Check Valve

Consistente en una válvula antirretorno que cumple con las especificación de la hoja de datos del fabricante. Este tipo de válvulas permiten la circulación del fluido a través en un sentido pero no en el otro, gracias a un sistema formado por un elemento de cierre y otro que le hace recuperar su posición inicial cuando la corriente no viene en el sentido permitido.

Incluso en el sentido permitido la válvula permanecerá cerrada hasta que se venza la presión de cierre de la misma. El área de paso normalmente aumentará cuanto más se aleje el elemento de cierre de su asiento.

Pilot-Operated Check Valve

Bloque que recrea una válvula antirretorno operada por una señal exterior. Este añadido permite que la válvula sea abierta por la presión de la corriente en el sentido deseado, por una presión ejercida internamente a partir de la señal piloto o por ambas.

Hydraulically Operated Remote Control Valve

Es un bloque que consiste en una válvula controlada hidráulicamente en el cual se introducen los datos del fabricante para tener las características deseadas. Funcionan gobernadas hidráulicamente, dependiendo de si está configurada como normalmente abierta o cerrada se pueden emplear para diversas aplicaciones como válvula de alivio, válvula reductora de presión...

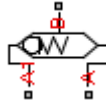
De la misma manera que en otras válvulas era una señal física entrando por un puerto la que gobernaba la posición de las válvulas, en este caso es hidráulica.

Shuttle Valve

Representa una válvula con 2 puertos de entrada y 1 de salida. El sistema solo permite la conexión de una de las entradas con la salida en cada momento. Inicialmente uno de los caminos está abierto y para abrir el otro habrá que

vencer la presión diferencial, es decir que haya más presión en el camino que se quiere abrir que en el que ya está abierto.

Se incluye el diagrama de la válvula que muestra lo explicado.



[30]

Ball Valve

La válvula de bola es un bloque que actúa como un orificio variable a partir de una bola con un agujero pasante. Dependiendo del grado de giro de la bola el área transversal del orificio alineado con la corriente será mayor o menor. De lo que se deduce que el caudal es proporcional al grado de apertura de la válvula y a la presión diferencial en la misma.

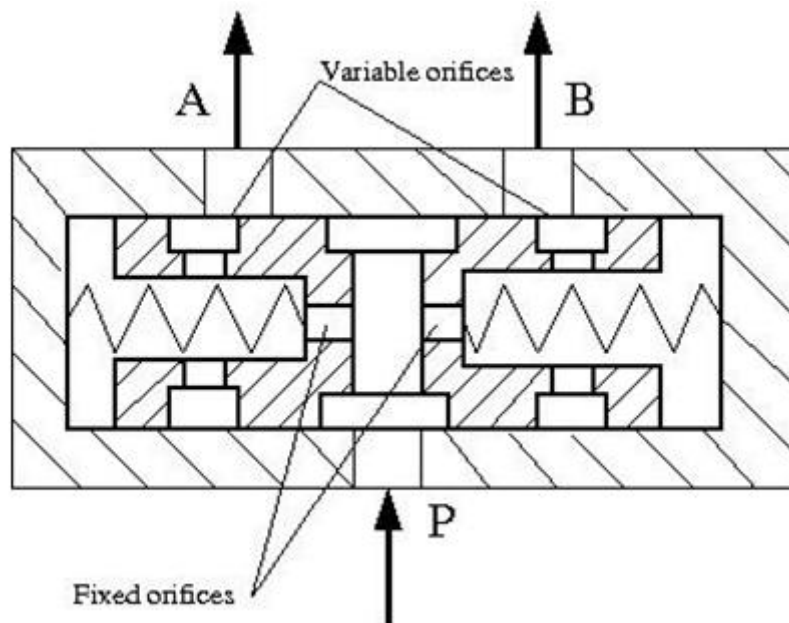
Además de los puertos de entrada y salida del fluido el bloque incorpora un puerto que se encarga de gobernar la apertura y cierre del orificio.

Ball Valve with Conical Seat

Bloque con la misma función que el anterior, la única diferencia entre ambos es que en este caso la bola está asentada en una pieza de forma cónica en lugar de prismática, esto tiene efectos únicamente en el flujo.

Flow Divider

Como su nombre indica es un bloque que realiza la división de una corriente en dos a partir de un sistema de conductos centrado por muelles. Se incluye la imagen del sistema.



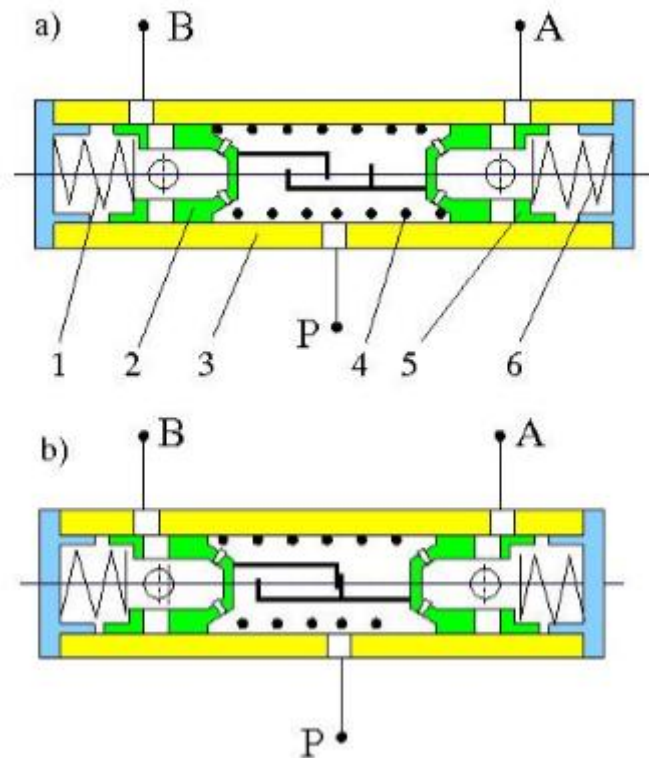
[31]

Las presiones y los muelles varían las posiciones relativas de los orificios de la pieza móvil con respecto a los orificios con que cuenta el soporte inmóvil.

Los parámetros del bloque permiten establecer diferencias que hacen que la división de la corriente no sea igualitaria entre las dos ramas y que se mantenga una proporción deseada.

Flow Divider-Combiner

Este bloque añade al anterior la posibilidad de actuar como unión de flujos de retorno y no solo dividir flujos de entrada. Esta reversibilidad se consigue con la disposición de una pieza que abre o cierra caminos. En la figura se aprecia la pieza



[32]

En el modo a) el equipo está funcionando como separador, en el b) esa funcionando como unión, simplemente comprimiendo los muelles laterales.

Gate Valve

Consiste en un bloque que recrea una válvula de puerta, que tiene un orificio pasante en su interior y otro del mismo tamaño hay en la puerta. El bloque consta de 2 puertos, uno para el fluido de entrada y otro para el de salida y otro para controlar el movimiento de la puerta. El caudal a través de la válvula depende del alineamiento de los dos orificios, es decir el grado de apertura de la válvula y de la presión diferencial a través de la válvula.

Needle Valve

Es un bloque que representa una válvula semejante a algunas de las ya comentadas pero con otro mecanismo de apertura y cierre del orificio. En este caso ese mecanismo consiste en una punta cónica que encaja en dicho orificio. El bloque consta de 1 puerto para una señal de control y de 2 puertos para la circulación del fluido.

Poppet Valve

Es una válvula de características similares a la anterior pero en este caso el elemento que cubre el orificio es un pistón.

Pressure Compensator

Consiste en un bloque que realiza la función de una válvula compensadora de presión o de un compensador de presión. Dicha función es la de mantener la presión diferencial a través del bloque en el valor prefijado. Esto minimiza la influencia de la variación de presión en el caudal que atraviesa.

En el bloque se pueden introducir los datos del fabricante para que cumpla con las características del elemento real.

Normalmente es una válvula abierta, cuyo grado de apertura depende de la diferencia de presión que haya en el sistema que se encarga de compensarla.

Pressure Reducing 3-Way Valve

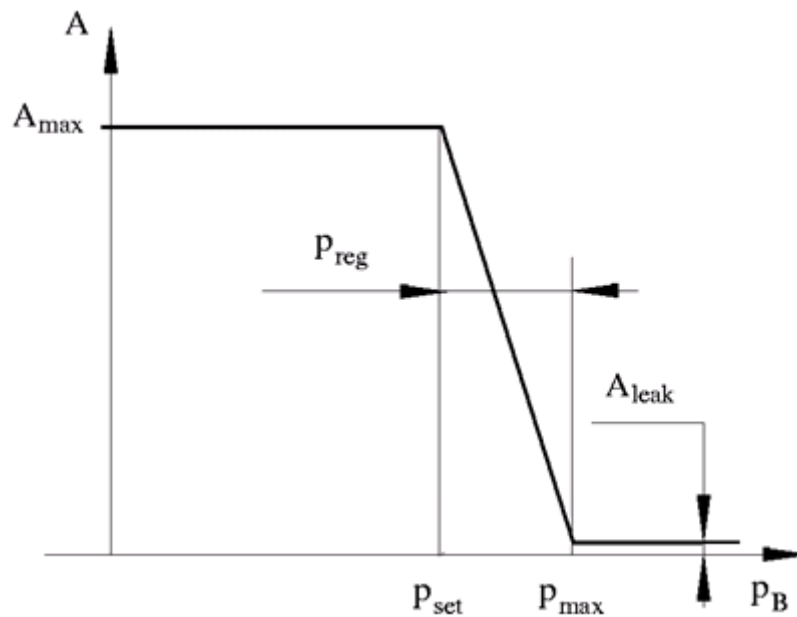
Es un bloque que representa una válvula de 3 vías y 2 posiciones que puede actuar como válvula reductora de presión y como válvula de alivio. La válvula comienza reduciendo la presión de entrada a un valor prefijado, pero si esta presión sigue aumentando entonces es cuando la válvula también actúa aliviando esa presión extra.

Inicialmente el camino de circulación está completamente abierto, mientras la presión de salida no supere el valor prefijado. En el momento que esto se produce el elemento regulador comienza a estrangular el camino de paso para conseguir la reducción de la presión al valor máximo permitido. Si la presión sigue aumentando el orificio continúa siendo cerrado, hasta que es cerrado por completo. La válvula también incorpora una ruta anexa para aliviar parte del fluido a un depósito paralelo a través de la ruta de alivio.

Pressure Reducing Valve

A diferencia del anterior este, bloque solo actúa como una válvula reductora de presión con las características marcadas por los datos introducidos a partir de los facilitados por el fabricante.

La siguiente gráfica relaciona el área de paso con la presión a la salida de la válvula.



[33]

Es una válvula normalmente abierta que permanece abierta mientras la presión a la salida es menor que el valor prefijado. Cuando ese valor se supera entonces el elemento que se encarga del control comienza a cerrar el paso del fluido para generar la reducción de la presión al valor prefijado. Si la presión se incrementa más se continúa cerrando el paso hasta que este está completamente cerrado.

Los parámetros principales a introducir en el bloque son el rango de regulación y el área máximo de la válvula. También se debe especificar el área de fuga que tiene una importancia más numérica que las fugas reales que se provocan.

Pressure Relief Valve

Bloque que sirve para introducir en el modelo una válvula de alivio de presión acorde con los datos del fabricante.

La válvula permanecerá cerrada mientras la presión en el puerto de entrada permanezca por debajo del valor límite prefijado. Si la presión supera ese valor entonces la válvula se abre para aliviar el exceso de presión.

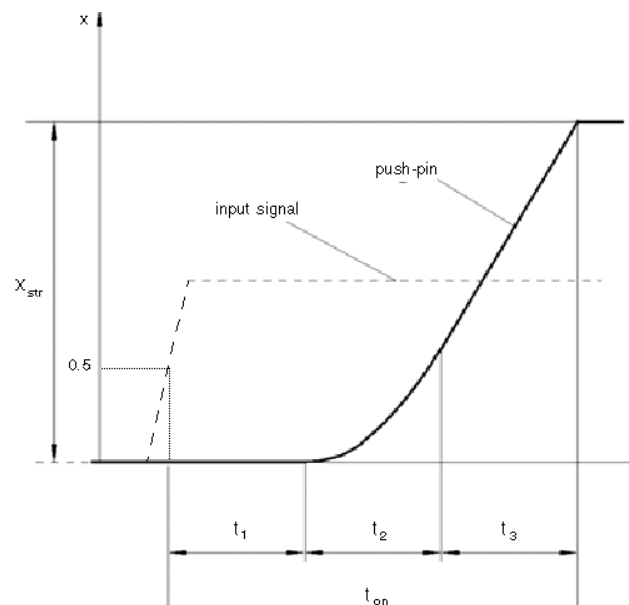
2-Position Valve Actuator

Representación en un bloque de un actuador de dos posiciones que se emplea para controlar la posición de las válvulas direccionales. El comportamiento del actuador responderá a las características que se le hayan dado de acuerdo con los datos del fabricante. Los factores clave son la carrera, y los tiempos de apertura y cierre.

Al bloque se le introduce una señal física siendo la señal de salida también física. El puerto de salida física del actuador se conecta al puerto de gobierno de la válvula que va a controlar.

El actuador se considera ideal por lo que la señal que este comunica a la válvula no influye en la fuerza ejercida por el elemento móvil de la válvula y el perfil de señal que se esté comunicando no se ve afectado por la carga que se haya de aplicar.

El proceso de avance del actuador sigue el siguiente perfil.



[34]

En cuanto la señal de entrada supera el 50% del valor nominal, el actuador comienza a moverse estando este proceso dividido en tres tiempos, que a su vez son tres partes del tiempo de apertura que se ha especificado en los parámetros del bloque.

Este perfil es aplicable de la misma manera al tiempo de cierre. El movimiento de apertura o cierre puede ser interrumpido en cualquier momento.

3-Position Valve Actuator

Es un bloque que cumple con la función de actuador para válvulas de 3 posiciones. En cuanto a las características y consideraciones es análogo al anterior pero específico para válvulas de 3 posiciones.

Double-Acting Servo Cylinder

Representación en un bloque de un servocilindro hidráulico de doble acción. Se emplea como elemento de control y se consigue que el elemento móvil salga de la posición centrada de equilibrio mediante la variación de las presiones en los puertos destinados a ello, en el caso del bloque A y B.

Hydraulic 4-Port Cartridge Valve Actuator

Se emplea como actuador para las válvulas de cartucho, válvulas de control, válvulas operadas por piloto y similares.

La posición del elemento móvil dentro del cartucho depende de la presión en 4 puertos diferentes. Los puertos A y B tienden a abrir la válvula mientras que los puertos X e Y con la ayuda del muelle interno de que dispone el cartucho tienden a intentar lo contrario. El modelo no tiene en cuenta caudales ni fuerzas excepto la presión y la fuerza del muelle.

Hydraulic Double-Acting Valve Actuator

Un bloque que hace de actuador para válvulas de control de caudal, presión o direccionales. Se obvian las fuerzas excepto la de los muelles interiores y el caudal. Consiste en un montaje donde dos actuadores sencillos se disponen uno frente al otro y al aplicar presión en ellos uno empujara la pieza móvil mientras que el otro muelle simplemente se comprimirá contra el cuerpo de la válvula.

Este bloque permite que cada actuador tenga un muelle diferente, una precarga diferente y también un área transversal del pistón diferente.

Hydraulic Single-Acting Valve Actuator

En este caso el bloque supone una simplificación del anterior donde ya no se confrontan dos actuadores sino que solo se tiene uno con un muelle y un pistón. El muelle con su precarga tiende a mantener el pistón en su posición

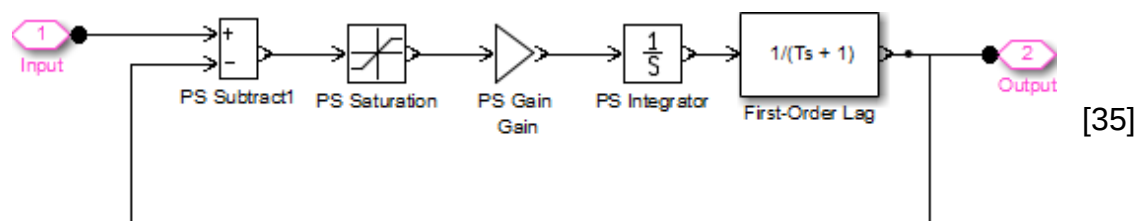
hasta que la presión aplicada la vence y entonces es cuando el pistón se mueve hasta su máxima carrera.

Este efecto es el que en el de doble acción se puede producir en ambos sentidos.

Proportional and Servo-Valve Actuator

Consiste en un actuador electromagnético que se usa con servoválvulas y válvulas proporcionales. El bloque se configura con los datos del fabricante.

Se le introduce una señal física y también se obtiene una señal física tras pasar por los siguientes bloques.

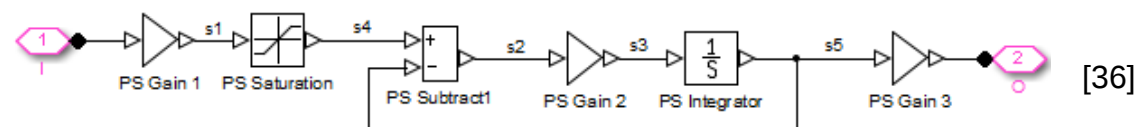


Se observa que tiene una función de transferencia del retraso, donde T es la constante de tiempo que se introduce como un parámetro del bloque.

Según el valor de saturación que se establezca cómo parámetro, la respuesta transitoria tendrá un mejor o peor comportamiento en términos de tiempo de subida, sobreimpulso...

Valve Actuator

Es un bloque que es muy semejante a los bloques 2-Position Valve Actuator y 3-Position Valve Actuator pero necesita de la introducción de menos parámetros porque en su construcción el bloque emplea muchos elementos que funcionan linealmente. Se incluye el diagrama de bloques para que se vean esos bloques.



Spool Orifice Hydraulic Force

Recreación de la fuerza axial de origen hidráulico que un fluido ejerce sobre un conducto cuando fluye a través de un orificio- El tramo de conducto se asume que tiene bordes afilados.

Se ofrecen dos parametrizaciones posibles una ranura rectangular o un agujero circular. El primero de los casos se usará con el bloque Variable Área Slot y el segundo se usará con el bloque Variable Área Round Holes.

La anchura de la ranura o el diámetro de los agujeros debe ser considerablemente mayor que el espacio entre el conducto y el elemento móvil.

Valve Hydraulic Force

Simulación de la fuerza axial ejercida por el fluido sobre la válvula a través de la que fluye la corriente. Se introduce una tabla de relación entre la caída de la presión, el grado de apertura de la válvula y la fuerza.

1.5 OTROS BLOQUES NECESARIOS

Simulink-PS Converter

Este bloque convierte las señales que salen de las fuentes de Simulink en señales físicas. Además permite especificar las unidades con las que va a trabajar la señal que es convertida, incluyendo la posibilidad de que la señal sea adimensional.

Cuando se trabaje con variables del campo de la termodinámica se tendrá que decidir si aplicar las conversiones afines. Esta opción permite trabajar de manera adecuada con temperaturas absolutas en las que 273 es una constante que se ha de sumar y por lo tanto no debe sufrir la transformación lineal o de otro tipo que se le ha de realizar al dato de temperatura.

PS-Simulink Converter

Con un funcionamiento similar al bloque Simulink-PS Converter, este bloque convierte una señal de entrada física en una salida de tipo Simulink. Las consideraciones que tiene este bloque son las mismas que en el anterior bloque comentado. Es necesario emplear este bloque antes de un bloque Scope para poder leer algunas señales.

Scope

Es un bloque que muestra en un display las señales que se están monitorizando y cuál es su comportamiento a lo largo del tiempo.

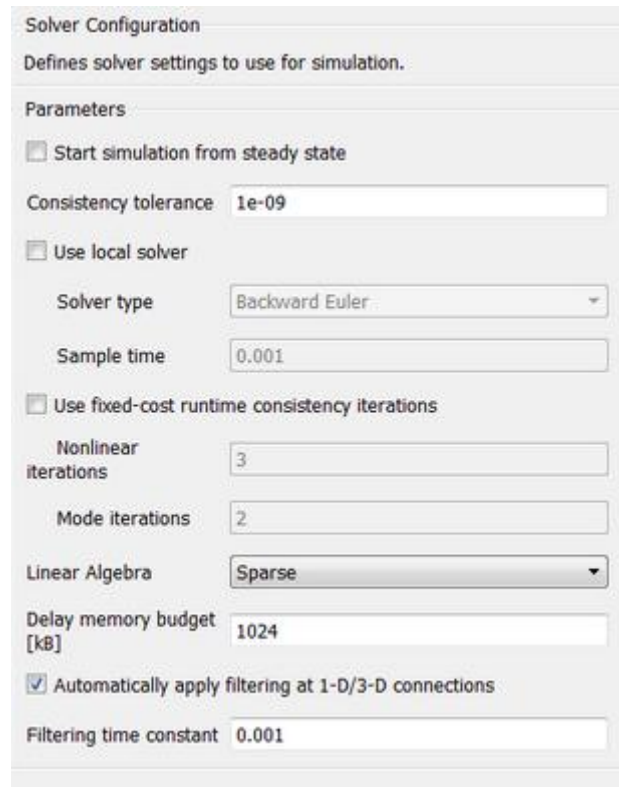
Puede trabajar con señales tanto continuas como discretas, además de poder leer datos reales, complejos, decimales... La señal que el bloque Scope puede leer no tiene porque ser unidimensional, en el caso de trabajar con más de una dimensión permite seleccionar diversos canales donde se ve cada una de las dimensiones de la señal.

Solver Configuration

Es un bloque necesario en todas las redes formadas por la unión de bloques de Simscape. Se utiliza para especificar parámetros necesarios para el solucionador del modelo que son necesarios antes del inicio de la simulación.

Se debe conectar uno en cada circuito independiente.

En la imagen que se incluye a continuación se puede ver los parámetros que este bloque permite introducir.



[37]

Signal Builder

Bloque que se emplea para poder crear cualquier tipo de señal en función del tiempo, a partir de la introducción de los valores de la magnitud que varía con el tiempo en una serie de momentos. El bloque incorpora formas de señal modelo a las cuales se les puede realizar modificaciones.

Gain

Este bloque multiplica la señal de entrada ya sea esta una señal unidimensional, un vector o incluso una matriz.

El valor por el que se multiplica la señal puede ser un escalar o una matriz. Da la posibilidad de especificar qué tipo se escoge el escalar o la matriz.

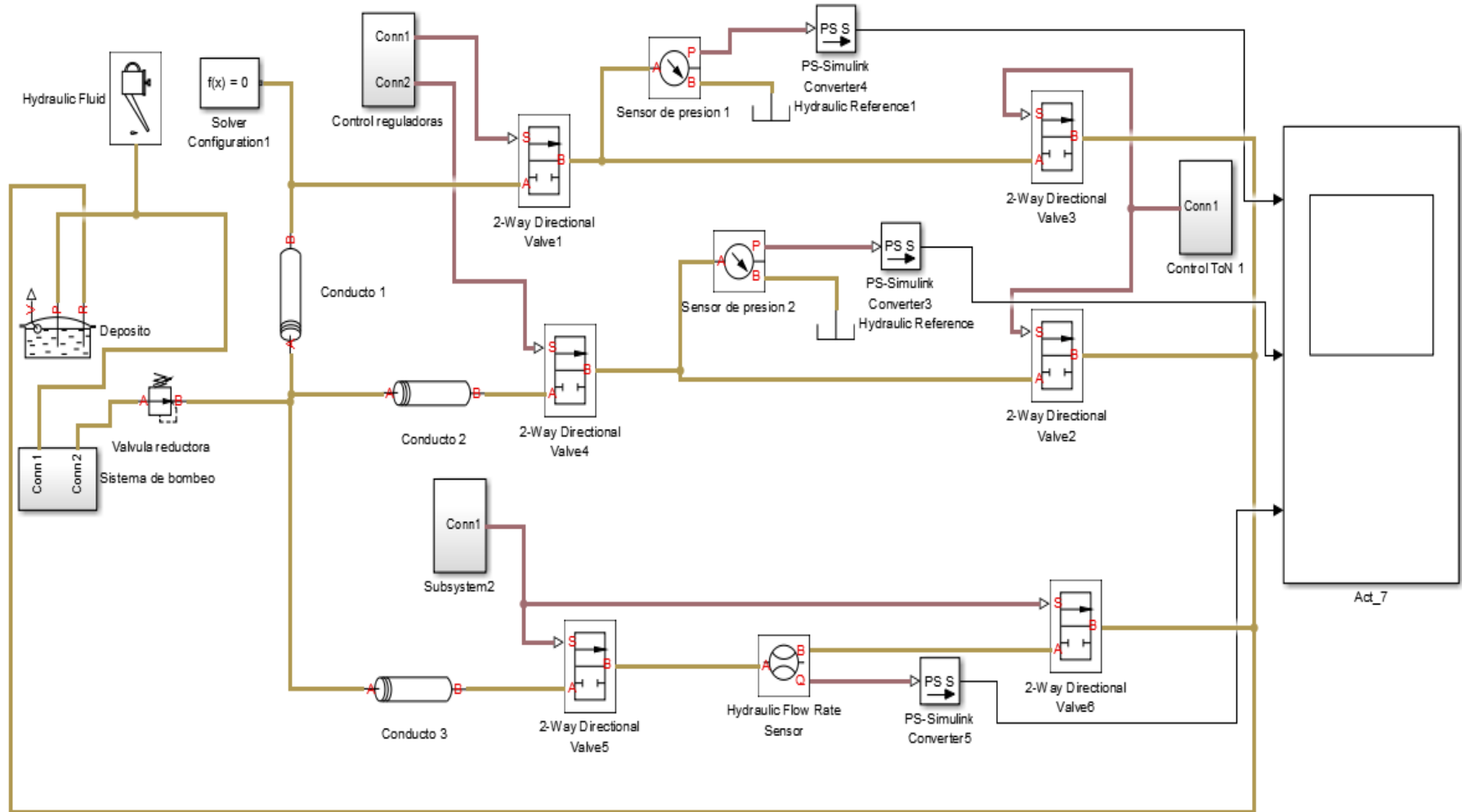
1.6 MODELO VIRTUAL

A continuación, se van a explicar todos los aspectos concernientes al modelo virtual que se ha utilizado para llevar a cabo las simulaciones del comportamiento del simulador en diversos escenarios, apoyando las explicaciones con imágenes del modelo. Tanto los elementos que forman parte de él, como la disposición de los mismos dentro del conjunto del simulador y cuál es el papel que juega cada uno de ellos en la obtención de los resultados.

Como añadido se incluirán al final de esta sección los cambios que se han llevado a cabo con respecto de la arquitectura previamente planteada y cuáles son las mejoras que se consiguen con ellos.

Primeramente se han de comentar algunos aspectos iniciales como introducción para la comprensión del modelo. En primer lugar, se ha pretendido que la disposición de los bloques se asemejase a la que se puede observar en el diagrama que se incluye en el recordatorio. Algunos de los accesorios que suponían pérdidas de carga secundarias en las conducciones del líquido, se han omitido y se han tenido en cuenta en las conducciones principales. Otros elementos se han agrupado juntando todos los elementos relacionados con un cometido concreto como es el caso de los sistemas de gobierno de las válvulas.

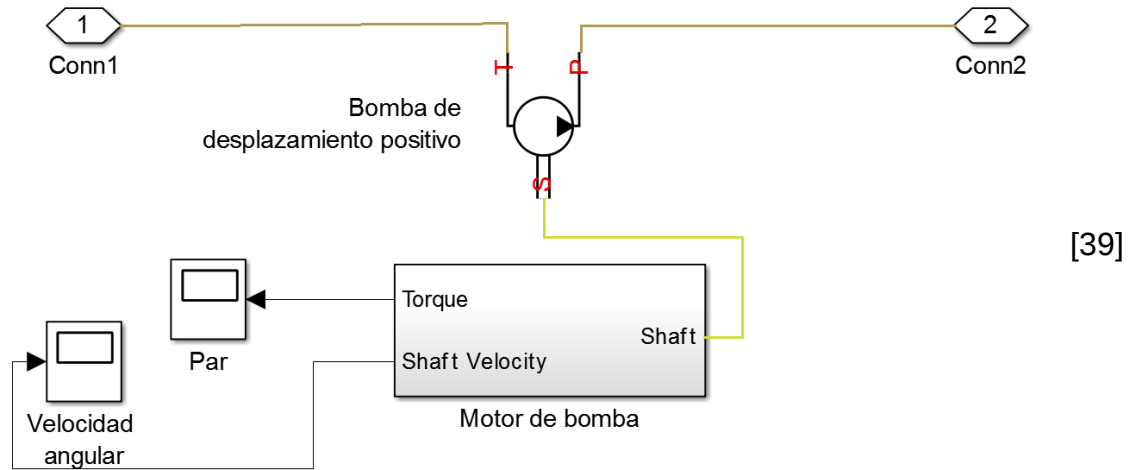
Como una introducción a la explicación se presenta en la siguiente página una visión global del modelo, de la cual se irán ampliando las diferentes partes que realizan las diversas funciones del simulador conjuntamente y consiguiendo un funcionamiento como un todo.



[38]

1.6.1 Sistema de bombeo

Empezando por el sistema de bombeo de líquido, que es una configuración compuesta por los bloques que se aprecian en la siguiente imagen.



Primeramente se estudia la bomba, la cual es un modelo de desplazamiento fijo que es la que tiene unas características de comportamiento semejantes a la bomba volumétrica que se escogió en el PFG como se recordaba anteriormente en esta memoria. El bloque de la bomba como se ve en el apartado 1.4.8 consta solo de 3 puertos, dos de ellos relacionados con la circulación del líquido siendo uno de entrada y el otro de salida de la bomba y mientras que el tercero de ellos recibe un movimiento rotacional que provoque el movimiento del eje. Además para poder conseguir el comportamiento fidedigno de la bomba se introducen los siguientes parámetros a partir de los datos que facilita el fabricante en la documentación específica del modelo escogido.

Fixed-Displacement Pump

This block represents a fixed-displacement pump of any type as a data sheet-based model. The key parameters required to parameterize the block are the pump displacement, volumetric and total efficiencies, nominal pressure, viscosity, and angular velocity.

Connections P and T are hydraulic conserving ports associated with the pump outlet and inlet, respectively. Connection S is a mechanical rotational conserving port associated with the pump driving shaft. The block positive direction is from port T to port P. This means that the pump transfers fluid from T to P if shaft S rotates in positive direction.

Settings

Parameters

Pump displacement:	0.05	l/rev
Volumetric efficiency:	0.92	
Total efficiency:	0.8	
Nominal pressure:	2	bar
Nominal angular velocity:	588	rad/s
Nominal kinematic viscosity:	1	cSt
Nominal fluid density:	998.2	kg/m ³

[40]

Estos parámetros caracterizarán el comportamiento de la bomba en régimen nominal. Para las eficiencias se han utilizado los valores por defecto al no disponer de los reales y ser verosímiles los que incorpora el bloque.

El caudal por revolución está calculado de tal manera que se obtenga el valor de caudal hallado en el PFG y que se puede observar en el apartado 1.3 de la memoria. De la misma manera se ha fijado la velocidad angular nominal de la bomba, después se habrá de hacer coincidir este valor con los parámetros de otro componente que se comentará a continuación.

También se puede ver que conectado al puerto relacionado con el eje de giro de la bomba hay un bloque con tres salidas. Consiste en un subsistema que tiene el siguiente diagrama de bloques en su interior.

El bloque Hydraulic Fluid es el que provee al sistema del fluido deseado. Al introducir los parámetros en este bloque se puede especificar qué tipo de líquido es o incluso emplear alguno de los que el bloque incorpora.

Hydraulic Fluid

The block assigns working fluid for all components assembled in a particular loop. The loop detection is performed automatically and the block is considered as part of the loop if it is hydraulically connected to at least one of the loop components. The block offers wide selection of fluids to choose from. The custom fluid is assigned with the Custom Hydraulic Fluid block from the Simscape foundation library. If neither Hydraulic Fluid nor Custom Hydraulic Fluid block is connected to the loop, the default properties of the Custom Hydraulic Fluid block are assigned.

Parameters

Hydraulic fluid:

Relative amount of trapped air:

System temperature (C):

Viscosity derating factor:

Pressure below absolute zero:

Fluid Properties:

Density (kg/m³):

Viscosity (cSt):

Bulk modulus (Pa) at atm. pressure and no gas:

[42]

Además como es visible en la imagen [42], permite introducir la cantidad de aire que hay retenido en el líquido y fijar la temperatura de trabajo. En la temperatura de trabajo se ha recurrido a las condiciones normalizadas ya que no se va a trabajar en ningún entorno de condiciones exigentes. En cuanto al aire atrapado en el líquido se recurre al valor que proporciona el bloque ya que no se ha realizado un estudio de susodicha característica en el líquido que se empleará en el simulador real.

1.6.2 Reductor de presión

A partir del sistema de bombeo siguiendo las conducciones hacia la derecha, se pueden apreciar los siguientes elementos.



[43]

El reductor está dispuesto en el conducto de salida de la bomba y por lo tanto es común para todos los circuitos de los que se hablaba en el apartado 1.2.

El componente es una válvula reductora de presión, la cual proveerá al sistema hidráulico conectado a ella con una corriente de líquido a una presión que puede ser considerada constante y fijada en un valor determinado en los parámetros del bloque.

Pressure Reducing Valve

This block represents a hydraulic pressure-reducing valve as a data sheet-based model. The valve controls downstream pressure and remains fully opened as long as the pressure is lower than the preset level. When the preset pressure is reached, the valve control member is forced off the stop, thus reducing the passage between the inlet and outlet. The block is built as a structural model based of the Pressure Compensator block. Connections A and B are hydraulic conserving ports associated with the valve inlet and outlet. The block positive direction is from port A to port B.

Settings

Parameters

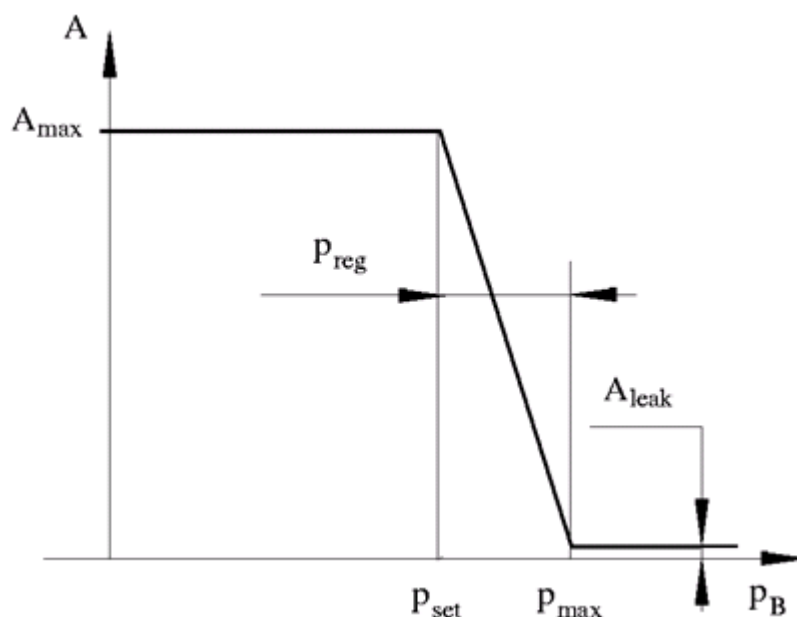
Maximum passage area:	326.85	mm ²
Valve pressure setting:	1.5	bar
Valve regulation range:	0.3	bar
Flow discharge coefficient:	3	
Critical Reynolds number:	12	
Leakage area:	1e-12	m ²

[44]

El máximo área de paso se ha calculado como el área transversal del círculo de diámetro 20,4 mm, suponiendo que no hay ningún obstáculo de tamaño considerable que reduzca el mismo en estado de máxima apertura.

También se fijan la presión de salida de la válvula reguladora y el intervalo en el que se va a regular. El intervalo está limitado por el valor de la presión de salida a un 20% de ese valor. El intervalo marca el valor de presión a partir del cual la válvula se cierra del todo.

El comportamiento de la válvula sigue esta gráfica, que ya se incluía en el apartado 1.4.9.



[45]

A continuación de la válvula reductora de presión, la conducción se bifurca en tres caminos correspondiéndose cada uno de ellos con los circuitos ya comentados en el apartado 1.3.

Al comienzo de cada una de estas bifurcaciones se colocará un bloque Hydraulic Pipe LP, con el objetivo de concentrar todas las pérdidas de carga que se producirán en los conductos y accesorios hidráulicos dispuestos en los circuitos.

Se emplearán estos bloques porque como se comento en el apartado 1.4.5 permiten incluir una diferencia de cotas entre los extremos del conducto. Esta diferencia de cotas será el factor que se utilice para introducir las pérdidas de carga que se producen por la fricción, es necesario considerar estas pérdidas de esta manera porque los bloques no cuentan con la opción de tener en cuenta las pérdidas por fricción en flujos que son acelerados. Estas pérdidas de carga indirectas se explican con mayor detalle en el apartado 2.1.

En esta tabla se incluyen los parámetros relevantes introducidos en estos conductos para que se produzcan esas pérdidas de carga.

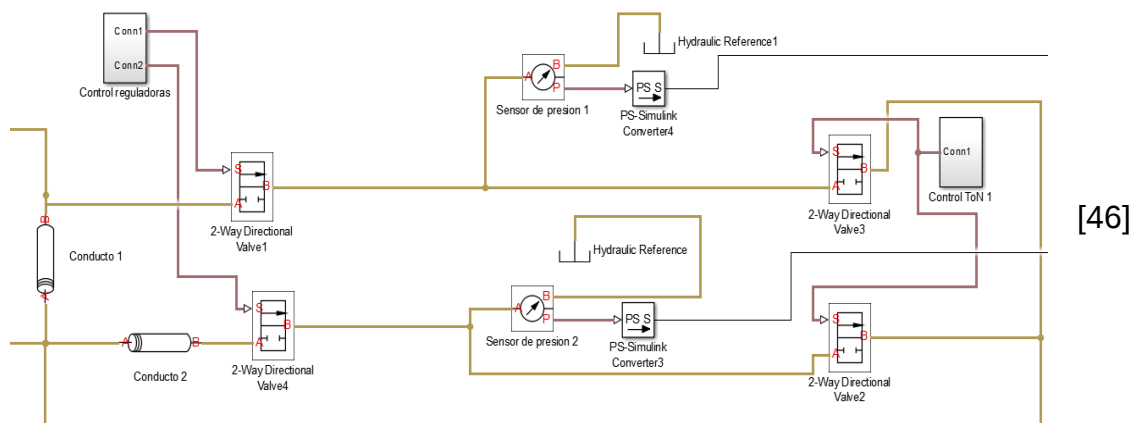
Nombre	Δz (m)
Conducto 1	4,5
Conducto 2	6,5
Conducto 3	5,7

Las longitudes de los tres conductos son diferentes debido a que los tres circuitos tienen que tener comportamientos diferentes. La longitud del Conducto 3 engloba la de todo el circuito de desagüe, mientras que los otros dos la longitud anterior al sensor de presión.

Estos datos se emplearán para poder plantear diferentes disposiciones de los circuitos cumpliendo con las especificaciones. Parte de estas longitudes se pueden incluir en la conducción común a continuación de la válvula reductora de presión.

1.6.3 Circuitos de alta y baja presión

Primeramente en la siguiente imagen se observa el diagrama de bloques que componen ambos circuitos, siendo el de alta presión el situado en la parte superior y el de baja presión el inferior. Los bloques empleados en ambos son los mismos, donde radican las diferencias entre ellos es en el sistema control y en las características de algunos de los bloques.



Para continuar con estos caminos se va a proceder a la explicación del cometido de cada bloque así como de sus características.

Omitiendo explicar los conductos de los cuales se ha especificado sus características en una tabla resumen, lo primero que se encuentra en ambas ramas es una válvula de 2 vías con 2 posiciones. Estas válvulas son las que van a funcionar como reguladoras.

2-Way Directional Valve

The block simulates a 2-way directional valve as a data sheet-based model. To parameterize the block, 3 options are available: (1) by maximum area and control member stroke, (2) by the table of valve area vs. control member displacement, and (3) by the pressure-flow rate characteristics. The lookup table block is used in the second and third cases for interpolation and extrapolation. 3 methods of interpolation and 2 methods of extrapolation are provided to choose from.

Connections A and B are hydraulic conserving ports associated with the valve inlet and outlet, respectively. Connection S is a physical signal port. The block positive direction is from port A to port B. Positive signal at port S opens the valve.

Settings

Parameters

Model parameterization:	By maximum area and opening	
Valve passage maximum area:	32.7e-5	m ²
Valve maximum opening:	0.0204	mm
Flow discharge coefficient:	0.1	
Initial opening:	0	cm
Critical Reynolds number:	12	
Leakage area:	1e-12	m ²

[47]

En la imagen se pueden ver las características de ambas válvulas, donde se diferenciará el comportamiento entre ambas será en el sistema de control.

Con las características que se emplean y haciendo referencia a la información que se puede consultar en el apartado 1.4.7, se le asigna el máximo área transversal a la máxima apertura especificada.

El coeficiente de flujo de descarga es necesario para considerar las pérdidas por la imperfección de la construcción de las válvulas y además se ha de evitar el valor nulo para que no provoque errores computacionales, por lo que al no conocer el dato del fabricante se emplea un valor reducido pero no nulo.

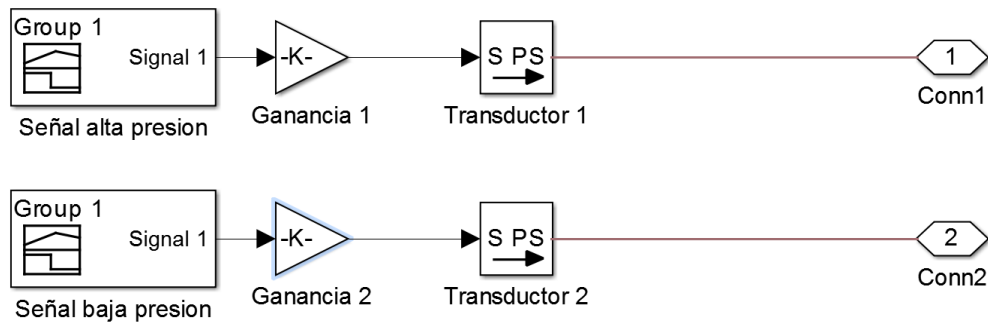
La apertura inicial se fija como nula, este es un dato que funciona en conjunto con el sistema de control de las válvulas como se verá repetidas veces en esta exposición.

El área de fugas, al igual que el coeficiente de flujo de descarga es necesario fijarlo de un valor no nulo, pero que sea un valor no muy significativo porque entonces se estaría alejando de la realidad.

1.6.4 Control de las válvulas reguladoras

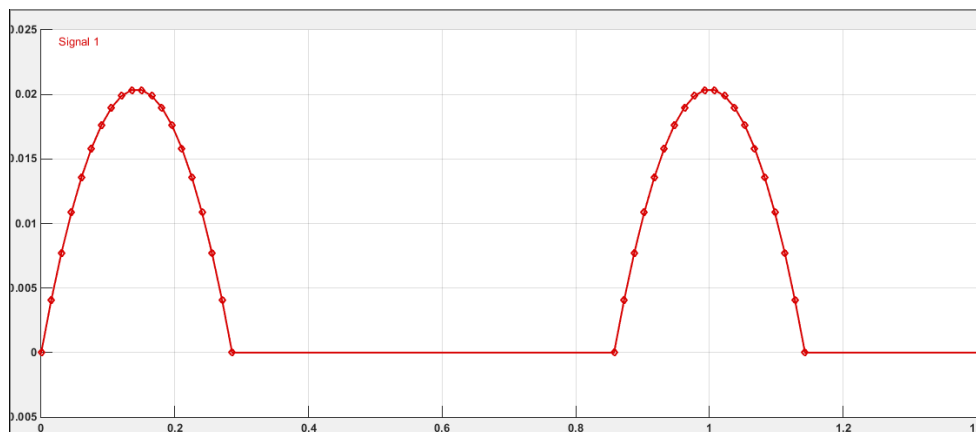
Tras lo explicado hasta ahora de los caminos de alta y baja presión, es oportuno hablar sobre el control de las válvulas comentadas antes.

El subsistema que gobierna las válvulas reguladoras que recrean los perfiles de presión tiene el siguiente aspecto.

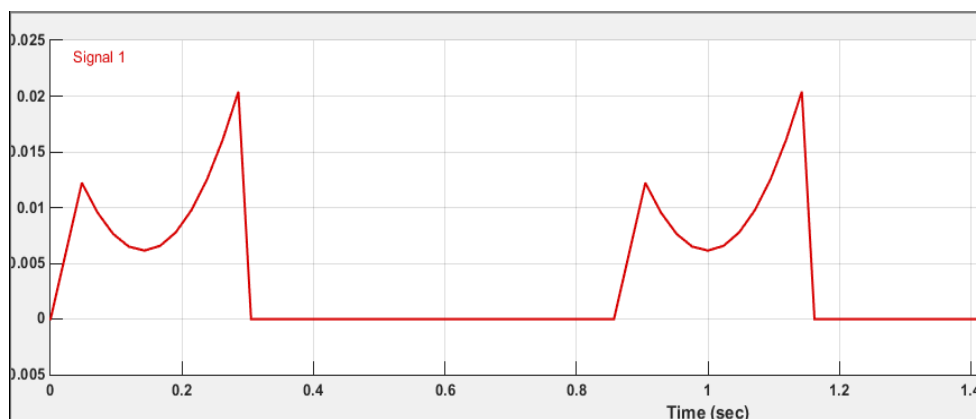


[48]

Ambas ramas de control se componen de los mismos elementos y realizan una función semejante pero con perfiles diferentes para cada una de ellas. Empezando por un generador de señales que permite introducir cualquier perfil que se desee. Estos perfiles se introducen por puntos dando valores de cualquier magnitud en función del tiempo. En estas imágenes se pueden ver los dos perfiles introducidos.



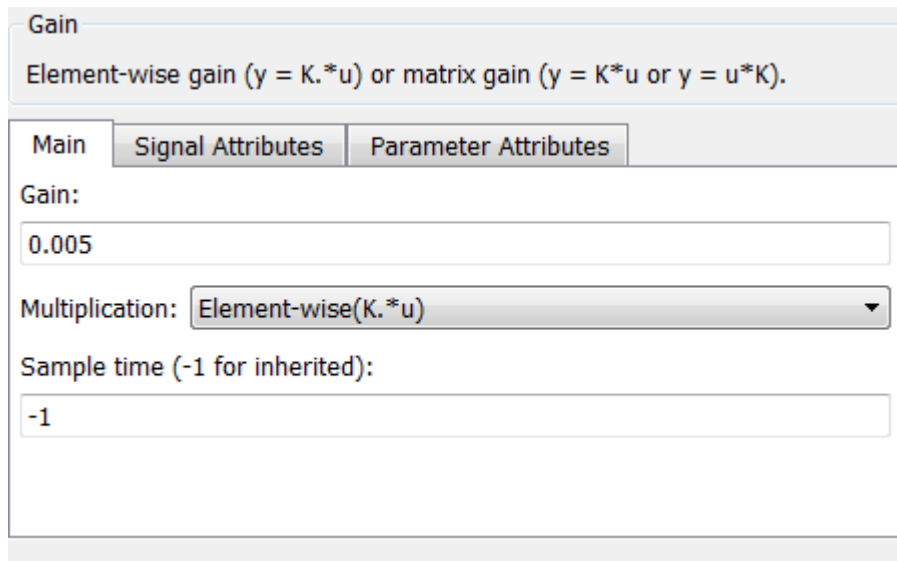
[49]



[50]

Los puntos de ambos perfiles están calculados a partir de las expresiones analíticas que se obtienen en el apartado 2.2.

El siguiente es un bloque Gain que multiplica la señal por la ganancia deseada. La configuración del bloque es la siguiente.



Gain

Element-wise gain ($y = K.*u$) or matrix gain ($y = K*u$ or $y = u*K$).

Main Signal Attributes Parameter Attributes

Gain:

0.005

Multiplication: Element-wise($K.*u$)

Sample time (-1 for inherited):

-1

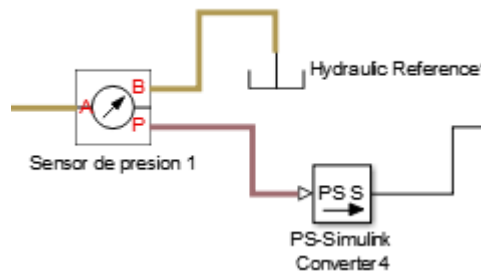
[51]

Lo que hará el bloque Gain será reducir notablemente la amplitud de la señal enviada a las válvulas reguladoras. Al reducir la amplitud de la apertura de la válvula, se está observando que en la escala del modelo simulado, una pequeña variación en la apertura de las válvulas desencadena una gran variación de la presión de la corriente. Además lo que se pretende al introducir esas formas de señal es que la misma se reproduzca en los perfiles de presiones de ambos circuitos.

Para terminar las líneas de control de las válvulas reguladoras se disponen unos bloques Simulink PS Converter, que cumplen con la función de sistema transductor convirtiendo la señal eléctrica que les llega, ya multiplicada por la ganancia, en metros de apertura de la válvula.

1.6.5 Medición de presión

Para realizar la lectura de presión y obtener el valor de la presión absoluta que se tendrá aproximadamente en las aurículas, se ha dispuesto el sensor de la siguiente forma.



[52]

Por el puerto A llega el fluido proveniente de la bifurcación ya nombrada, en el puerto B se ha situado un bloque Hydraulic Reference, que es un bloque que conecta un punto a presión nula. Este bloque no estará afectando a la lectura y es necesario para el correcto funcionamiento del sensor ya que es obligatorio conectar algo en el puerto B del sensor para que este funcione.

Además se incluye en la imagen [52] el bloque transductor que a partir de la señal física que sale del sensor por el puerto P, la convierte en una señal eléctrica que puede ser leída por un bloque Scope.

1.6.6 Válvulas todo o nada

Al final de las ramas de alta y baja presión se observa que hay una válvula de 2 vías y 2 posiciones. Esta válvula es la que se va a emplear para oponer resistencia a la circulación del fluido y como resultado conseguir un movimiento en el corazón debido a la acumulación de fluido a presión superior a la atmosférica. Una vez que la variación de presión provocada por la apertura gradual de la válvula proporcional termine, esta válvula que tiene un funcionamiento todo o nada se abrirá y dejará circular el líquido de vuelta al depósito donde se almacena todo el líquido que alimenta el circuito.

Las características de esta válvula se presentan en la imagen que se ve a continuación.

2-Way Directional Valve

The block simulates a 2-way directional valve as a data sheet-based model. To parameterize the block, 3 options are available: (1) by maximum area and control member stroke, (2) by the table of valve area vs. control member displacement, and (3) by the pressure-flow rate characteristics. The lookup table block is used in the second and third cases for interpolation and extrapolation. 3 methods of interpolation and 2 methods of extrapolation are provided to choose from.

Connections A and B are hydraulic conserving ports associated with the valve inlet and outlet, respectively. Connection S is a physical signal port. The block positive direction is from port A to port B. Positive signal at port S opens the valve.

Settings

Parameters

Model parameterization:	By maximum area and opening	
Valve passage maximum area:	32.7e-5	m ²
Valve maximum opening:	0.0204	m
Flow discharge coefficient:	0.7	
Initial opening:	1e-5	m
Critical Reynolds number:	12	
Leakage area:	1e-9	m ²

[53]

El área transversal es el mismo que en las válvulas reguladoras, ya que todos los tubos que se van a emplear en este circuito son de 20,4 mm de diámetro interno.

La máxima apertura de la válvula se corresponde con su diámetro interno, al funcionar como una todo o nada pasará de la apertura inicial a la máxima sin aperturas intermedias posibles excepto, claro está, las que se producen durante el proceso de apertura, el cual no es instantáneo.

Al igual que en otras anteriores, el coeficiente de descarga de flujo se mantiene con el valor por defecto al no disponer del valor del fabricante.

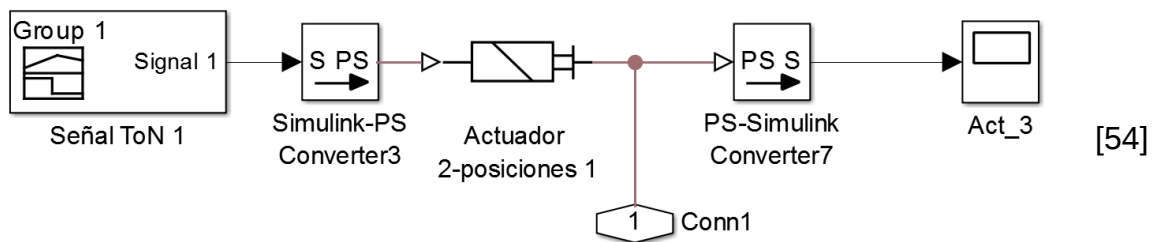
La apertura inicial se fija en ese valor, para tener en cuenta el hecho de que los cierres no son perfectos y además para añadir robustez a los cálculos; porque si se fija un valor nulo se modifican notablemente los resultados y se produce un error en la simulación, como suele ocurrir cuando se tiene un 0 en algún parámetro.

El número de Reynolds crítico se deja con el valor por defecto, una vez que se ha observado que variaciones en su valor no repercuten notablemente en la simulación y, además como se aprecia en el apartado 1.3 los números de Reynolds con los que se trabajan están muy por encima de la zona de cambio del flujo de laminar a turbulento. En otras circunstancias este parámetro tendría mucha más relevancia pero no es el caso en este modelo.

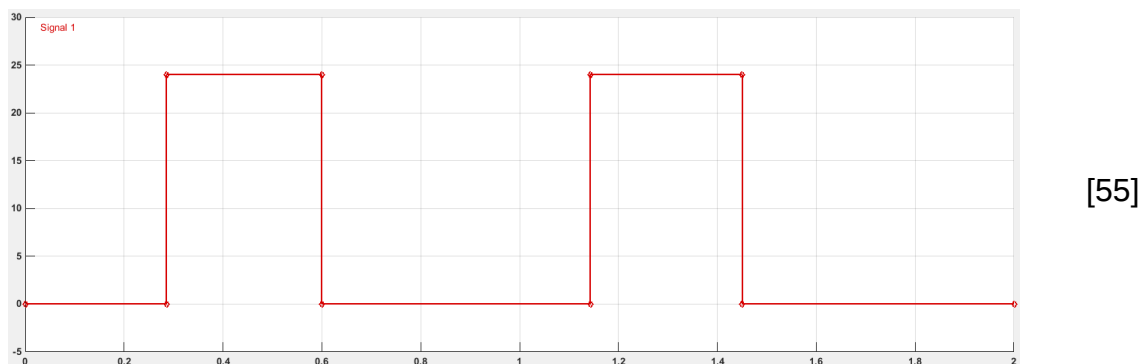
Al igual que ocurría con la apertura inicial, el área de fuga se fija en un valor muy bajo pero distinto de cero para contemplar la imperfección de la fabricación de las válvulas y además evitar los problemas de cálculo derivados de tener un parámetro con valor nulo.

1.6.7 Control todo o nada 1

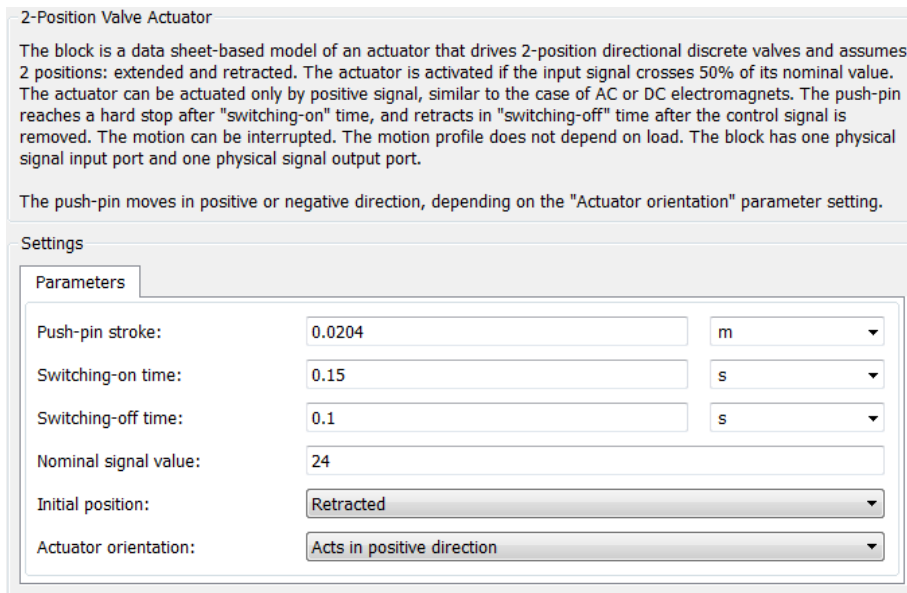
El control de las válvulas todo o nada estará formado por los siguientes bloques.



Será común para las dos válvulas al final de las ramas de alta y baja presión, ya que ambas se han de comportar de la misma manera en tanto en cuanto su cometido es el mismo. La forma de onda que se emplea tendrá la siguiente forma



Esta forma se debe a que los ajustes del actuador, que son los siguientes.



[56]

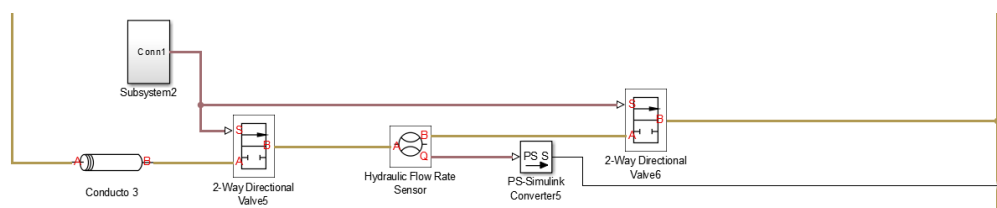
Como se aprecia y como debe ser para cumplir con su cometido las dos válvulas empezarán el ciclo completamente cerradas, ya que el actuador está retraído y como se podía ver en la imagen [53] la apertura de las válvulas es mínima, simplemente para evitar problemas computacionales y tener en cuenta las imperfecciones de la construcción de la válvula.

Los tiempos tanto de apertura como de cierre de la válvula son facilitados por el fabricante. El valor nominal de la señal que gobierna el actuador se puede fijar en cualquiera, siempre teniendo en cuenta el hecho de que si esta señal no llega a la mitad de ese valor nominal el actuador permanecerá inalterable.

Al comenzar el actuador retraído, se ha escogido que cuando actúe sea en la dirección positiva con el objetivo de aumentar la apertura. La apertura aumenta según la Ecuación [1.4-20] que se presentaba en el apartado 1.4.9.

1.6.8 Circuito auxiliar

Tras la bifurcación que hay a continuación de la válvula reductora de presión la tercera de las ramas salientes de esa bifurcación conduce el fluido al circuito auxiliar de desagüe. Esta rama está formada por la siguiente concatenación de bloques



[57]

El par de válvulas que lo componen, tendrán un funcionamiento todo o nada al igual que otras ya comentadas anteriormente. En este caso los ajustes de ambas válvulas serán los siguientes, siendo iguales para ambas.

2-Way Directional Valve

The block simulates a 2-way directional valve as a data sheet-based model. To parameterize the block, 3 options are available: (1) by maximum area and control member stroke, (2) by the table of valve area vs. control member displacement, and (3) by the pressure-flow rate characteristics. The lookup table block is used in the second and third cases for interpolation and extrapolation. 3 methods of interpolation and 2 methods of extrapolation are provided to choose from.

Connections A and B are hydraulic conserving ports associated with the valve inlet and outlet, respectively. Connection S is a physical signal port. The block positive direction is from port A to port B. Positive signal at port S opens the valve.

Settings

Parameters

Model parameterization:	By maximum area and opening	
Valve passage maximum area:	32.7e-5	m ²
Valve maximum opening:	0.0204	m
Flow discharge coefficient:	0.7	
Initial opening:	0.0204	m
Critical Reynolds number:	12	
Leakage area:	1e-9	m ²

[58]

Existe una principal diferencia entre estas válvulas y las otras todo o nada de que, la apertura inicial de este par es igual al diámetro interior de la válvula, por lo que esta empezaría abierta. Para evitar que empiece en dicha posición, algo que no sería deseado, se utiliza el control común a ambas válvulas.

Dicho control está compuesto por los mismos bloques que el control de las válvulas todo o nada anteriores, pero con lo que se logra la diferencia de comportamiento del conjunto control-válvula es con los ajustes del actuador y la forma de onda que gobierna la apertura y cierre.

2-Position Valve Actuator

The block is a data sheet-based model of an actuator that drives 2-position directional discrete valves and assumes 2 positions: extended and retracted. The actuator is activated if the input signal crosses 50% of its nominal value. The actuator can be actuated only by positive signal, similar to the case of AC or DC electromagnets. The push-pin reaches a hard stop after "switching-on" time, and retracts in "switching-off" time after the control signal is removed. The motion can be interrupted. The motion profile does not depend on load. The block has one physical signal input port and one physical signal output port.

The push-pin moves in positive or negative direction, depending on the "Actuator orientation" parameter setting.

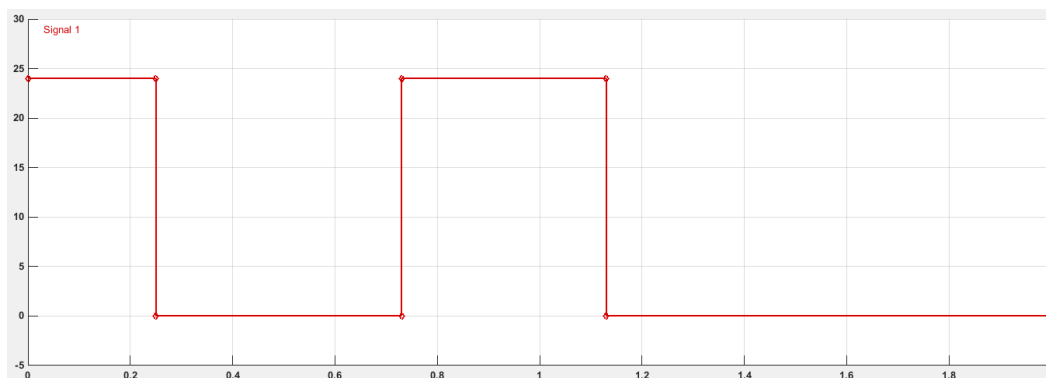
Settings

Parameters

Push-pin stroke:	0.0204	m
Switching-on time:	0.15	s
Switching-off time:	0.1	s
Nominal signal value:	24	
Initial position:	Extended	
Actuator orientation:	Acts in negative direction	

[59]

Para evitar que la válvula este abierta se configura el actuador de manera que empiece extendido y actúe en sentido negativo; logrando como resultado, en base a la ecuación [1.4-20], que la válvula comience cerrada y se abra en el momento en que la señal se lo ordene. Dicha señal tiene el siguiente aspecto.



[60]

Los tiempos de la señal están ajustados a los retrasos de apertura y cierre para que las lecturas de presión se vean afectadas en el menor grado posible.

Entre ambas válvulas se sitúa un caudalímetro con el que se medirá el flujo de líquido que circulará por el camino auxiliar. Este es un cometido añadido al camino de desagüe, siendo el primordial sin lugar a dudas el de permitir que la bomba funcione en régimen estacionario y la reducción de incertidumbre debida a ello.

Por último, se introduce un bloque Scope donde llegan las lecturas de los parámetros que marcan el funcionamiento del simulador como son las presiones del circuito de alta y baja y además el caudal circulante por el tercero de los circuitos.

Con estas lecturas entre otras, se sacan conclusiones sobre el comportamiento del modelo virtual y la aplicación de estos resultados a la realidad.

1.7 CAMBIOS INTRODUCIDOS

Con respecto al diseño planteado en el PFG, se han introducido una serie de cambios que se van a comentar en este apartado.

El primero de ellos consiste en la colocación de una válvula con un funcionamiento todo o nada al final del circuito de baja presión. Esta inclusión se ha realizado simplemente para mejorar el comportamiento del modelo, en cuanto al hecho de conseguir una resistencia al paso de la corriente a través de los conductos y con esto lograr recrear el perfil de presiones que se desea. El hecho de añadir esta válvula no significa que en el simulador real se tenga que utilizar una válvula en esa posición, solo está justificada su utilización por la dificultad de trabajar con unos diámetros tan pequeños como los de los capilares.

Otra variación ha sido la incorporación de una segunda válvula todo o nada en el camino auxiliar. Este cambio se debe a una mejora notable en el funcionamiento del caudalímetro dispuesto en el mismo camino, al incluir esta segunda válvula. Con estas dos válvulas es posible aislar el caudalímetro durante el tiempo que el líquido está fluyendo por las otras dos rutas de circulación y después con la ayuda del sistema de control, abrir ambas válvulas a la vez, mientras las de los otros caminos se cierran, y que el caudalímetro de una lectura lo más precisa posible del caudal que circula a través de él en ese periodo de tiempo en el que se está dirigiendo el líquido al depósito sin pasar por el corazón.

Con esta segunda válvula situada tras el caudalímetro lo que se evita es la circulación del flujo de salida de los caminos de alta y baja presión a través del caudalímetro en el sentido opuesto al normal, que provoca una lectura durante el periodo en que el valor leído por el caudalímetro debería ser próximo a cero.

Con estos dos cambios y los ajustes del sistema de control, que no se especificaban en el PFG además de la arquitectura hardware resultado del trabajo ya realizado se obtiene el modelo explicado anteriormente y cuyos resultados se verán más adelante.

1.8 SOFTWARE DE CONTROL

En este apartado de la memoria se va a explicar el funcionamiento de cada uno de los programas que forman parte del software de control, cuyo código se adjunta en el Anexo I.

El primer de ellos, siguiendo el orden en que aparecen en el anexo, es el que se empleará para el control de la válvula reguladora del circuito de alta presión.

En primer lugar se encuentra el comando `clear all` que se emplea para borrar el contenido almacenado anteriormente en las variables de trabajo. Este comando es recomendable para evitar errores derivados de la utilización más de una vez del mismo nombre de variable sin percibirlo.

A continuación aparece un comando que aparece al comienzo de los 4 programas. Este comando es `global` que hace común el valor de una variable a todos los programas que tengan este comando en su encabezamiento.

Tras estos dos comandos que son necesarios para el correcto funcionamiento del software así como para evitar que se obtengan resultados pero sean erróneos debido a un error con las variables.

En este primer programa se preguntará al usuario cual es la frecuencia cardiaca con la que desea trabajar, el valor proporcionado será el que se utilice para realizar los cálculos necesarios a partir de la variable correspondiente.

Al igual que se ha hecho en los perfiles utilizados en el modelo virtual, se emplearán 20 momentos en el tiempo dentro del intervalo de tiempo de variación de la presión con sus correspondientes tensiones. Para calcular la expresión analítica que determinará el valor de la tensión en cada momento de tiempo se ha definido un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas, a partir de las 3 condiciones de contorno necesarias para calcular una parábola.

Una vez conocidos los coeficientes de la parábola se emplea un bucle que calcula los valores de tensión para cada valor de t . Como añadido en este bucle se ha incluido el comando `pause` que permite que la ejecución del programa se realice en tiempo real al incluir un tiempo de espera entre las iteraciones del bucle.

Por último al salir del bucle se le manda al programa que dibuje el perfil de señal que enviará. Esta grafica se ha incluido para visualizar el resultado del programa

dada la falta de la tarjeta de adquisición de datos que formará parte de la arquitectura hardware

El segundo código que se presenta es el que se encargará del control de la válvula reguladora dispuesta en el circuito de baja presión. Al incluir el comando `global` en su cabecera se sabe que este programa utilizará el valor introducido previamente por el usuario.

Tras este comienzo, se establecen unas referencias de tiempo que marcaran las zonas de desarrollo de cada una de las partes del perfil. También se vacía el vector `V` para evitar problemas con los valores calculados en el programa anterior.

En este programa el trabajo se divide en dos ramas diferentes, la primera vinculada al tramo lineal y la segunda al parabólico.

En el tramo lineal el sistema a resolver será de 2 ecuaciones con 2 incógnitas al ser una recta. Sin embargo en el parabólico habrá que resolver uno de 3 ecuaciones con 3 incógnitas como se hacía en el primer código y además el tramo parabólico tiene que empezar en el punto donde termina la recta.

Una vez conocidos los coeficientes de ambas funciones, se trabajará con un bucle que además incluye condiciones para realizar una u otra operación según en qué valor del vector `t` este.

Con los primeros 11 valores de tiempo se ejecutará la recta inicial. Se han incluido tantos puntos en la recta, a pesar de que no sean necesarios, para que la apertura sea gradual.

Los siguientes 10 valores de `t` serán los que conformen la parábola a partir del final de la recta.

Al igual que en el modelo virtual se ha incluido un último valor que aunque no pertenezca al perfil es necesario para volver a cerrar la válvula.

Para terminar este segundo programa se añaden instrucciones para abrir una nueva grafica y mostrar el perfil saliente del programa.

Los últimos 2 programas son los que abrirán y cerraran las válvulas todo o nada. Estos programas son muy sencillos dado el funcionamiento todo o nada, simplemente tienen el valor nominal de trabajo en unos momentos y en otros un valor 0.

Una peculiaridad incluida en este par de programas son los puntos dobles donde en un mismo momento de tiempo se tienen una señal nula y otra nominal.

En estos códigos también se empleará el valor de frecuencia cardiaca que se introdujo ya en la ejecución del primero de los algoritmos.

1.9 BIBLIOGRAFIA

RECURSOS EN PAPEL

Mott, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. Prentice-Hall Hispanoamérica, 4º ed, México [1996]

Mott, Robert L. *Machine elements in mechanical design*. Prentice Hall, 3º ed, Upper Saddle River [2001]

Moreno Saiz, Víctor Manuel. Estébanez Amigo, Emilio. Pigazo López, Alberto. *Monitorización y control con tarjeta de adquisición de datos*. Publican, Santander [2009]

Danfoss. Catálogo EV250B

Danfoss. Catálogo EV260B

CRANE, División d. i. *Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill [1989]

Mataix, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Oxford, 2º ed, México [2001]

Chaturvedi, Devendra K. *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC Press, Florida [2010]

National Instruments. Guía para construir un sistema de adquisición de datos

National Instruments. Catálogo NI USB-6001

DOCUMENTOS DIGITALES Y ENLACES WEB

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/>

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/features.html#key-features>

<http://es.mathworks.com/products/simhydraulics/features.html#modeling-hydraulic-and-hydromechanical-networks>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/gaschargedaccumulator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/springloadedaccumulator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/centrifugalforceinrotatingcylinder.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/cylindercushion.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/cylinderfriction.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/doubleactinghydrauliccylinder.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/doubleactinghydrauliccylindersimple.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/doubleactingrotaryactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pneumohydraulicactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/singleactinghydrauliccylinder.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/singleactinghydrauliccylindersimple.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/singleactingrotaryactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicfluid.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/reservoir.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/elbow.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/gradualareachange.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/localresistance.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pipebend.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/suddenareachange.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/tjunction.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/constantheadtank.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicpipelp.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicpipelpwithvariableelevation.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/partiallyfilledverticalpipelp.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/resistivepipelp.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/resistivepipelpwithvariableelevation.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/segmentedpipelp.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableheadtank.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableheadthreearmtank.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableheadtwoarmtank.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/annularorifice.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/fixedorifice.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/fixedorificeempirical.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/fixedorificewithfluidinertia.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/journalbearingpressurefed.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/orificewithvariablearearoundholes.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/orificewithvariableareaslot.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableorifice.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variableorificebetweenroundholes.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicpipeline.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/rotatingpipe.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/segmentedpipeline.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/anglesensor.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/centrifugalpump.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/fixeddisplacementmotorexternalefficiencies.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/fixeddisplacementpump.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicmotor.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/jetpump.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/portingplatevariableorifice.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/swashplate.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variabledisplacementhydraulicmachine.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variabledisplacementhydraulicmachineexternalefficiencies.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variabledisplacementmotor.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variabledisplacementpressurecompensatedpump.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/variabledisplacementpump.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/2waydirectionalvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/3waydirectionalvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/4waydirectionalvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/4wayidealvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/6waydirectionalvalvea.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/cartridgevalveinsert.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/cartridgevalveinsertwithconicalseat.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/checkvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pilotoperatedcheckvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicallyoperatedremotecontrolvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/shuttlevalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/ballvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/ballvalvewithconicalseat.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/counterbalancevalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/flowdivider.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/flowdividercombiner.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/gatevalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/needlevalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/poppetvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurecompensated3wayflowcontrolvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurecompensatedflowcontrolvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurecompensator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurereducing3wayvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurereducingvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/pressurereliefvalve.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/2positionvalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/3positionvalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/doubleactingservocylinder.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulic4portcartridgevalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydrauliccartridgevalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicdoubleactingvalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/hydraulicsingleactingvalveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/proportionalandservoactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/valveactuator.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/spoolorificehydraulicforce.html>

<http://es.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/valvehydraulicforce.html>

<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/leyes-de-newton/principio-de-bernoulli>

http://ricuti.com.ar/No_me_salen/FLUIDOS/FT_bernouille.html

https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/fquiros/Numerico2_03_04/capitulo2.pdf

http://www.modeloingenieria.edu.ar/mei/repositorio/catedras/msa/apuntes/Resolutores_EDOs_MATLAB_MSA.pdf

ANEXO I: SOFTWARE

I.1 Programa perfiles de alta presión

```
clear all;

global frec

%Programa generador de perfiles de alta presión

frec=input('Por favor introduzca la frecuencia cardiaca con la que desea
trabajar(ppm): ')

d1=60/frec;

d2=d1/3;

t=linspace(0,d2,20);

n=length(t);

A=[0 0 1; (d2/2)^2 d2/2 1; d2^2 d2 1];

b=[0 10 0]';

x=A\b;

for i=1:n

    V(i)=x(1)*t(i)^2+x(2)*t(i)+x(3);

    pause(0.015036842105263)

end

plot(t,V)
```

I.2 Programa de perfiles de baja presión

```
global frec

%Calculador de perfiles de baja presión

d1=60/frec;

d2=d1/3;

d3=d2/6;

d4=d2*0.41662542;

t1=linspace(0,d3,11);

t2=linspace(d3,d2,11);

t2(1)=[];

t=[t1 t2 t2(10)+0.0193];

n=length(t);
```

```

V=[];

%parte lineal
A1=[0 1;d3 1];
b1=[0 5.99068627]';
x1=A1\b1;

%parte parabólica
A2=[d3^2 d3 1;d4^2 d4 1;d2^2 d2 1];
b2=[5.99068627 3.17044679 10]';
x2=A2\b2;

for i=1:n
    if i<=length(t1)
        V(i)=x1(1)*t1(i)+x1(2);
    else if i==22
        break
    else
        V(i)=x2(1)*t(i)^2+x2(2)*t(i)+x2(3);
    end
end

end

figure
V=[V 0];
plot(t,V)

```

I.3 Programa todo o nada 1

```

global frec
%Perfil todo o nada 1
d1=60/frec;
d2=d1/3;
V=[0 0 24 24 0 0];
t=[0 d2 d2 d2+0.3667*d1 d2+0.3667*d1 d1];
figure

```

```
plot(t,V)
```

I.4 Programa todo o nada 2

```
global frec
```

```
%Perfil todo o nada 2
```

```
d1=60/frec;
```

```
d2=d1/3;
```

```
V=[24 24 0 0];
```

```
t=[0 d2 d2 d1-0.12];
```

```
figure
```

```
plot(t,V)
```

2. CÁLCULOS

INDICE CÁLCULOS

2.1 ECUACION DE BERNOULLI	1178
2.2 CALCULOS MODELO VIRTUAL	12020
2.2.1 Transformación de los perfiles de presión.....	12020
2.2.2 Equivalencia diferencia de cotas – perdidas por fricción	1266
2.3 CÁLCULOS SOFTWARE	1299
2.3.1 Valores de tensión en función de la relación V-X	1299

2.1 ECUACION DE BERNOULLI

Es la ecuación fundamental de la hidrodinámica y está fundamentada en el principio de conservación de la energía mecánica. Esta energía se considera en 3 formas diferentes: energía cinética, energía de presión y energía potencial gravitatoria.

La expresión analítica del caso ideal de la ecuación es la siguiente.

$$\frac{p_i}{\rho \cdot g} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + z = cte \quad [2.1-1]$$

Esta ecuación expresa analíticamente la transformación que sufre la energía en su paso por los circuitos hidráulicos.

El primer término, energía de presión, representa el trabajo realizado por la masa del fluido que empuja el fluido que le precede.

En el segundo término se expresa la energía cinética, es un término que depende de la velocidad de la corriente de fluido.

Por último el tercer término considera la energía potencial gravitatoria, representada solo con la cota a la que se encuentra el fluido. La energía en sí sería el resultado de multiplicar esta cota por la densidad del fluido y la gravedad.

Es necesario considerar las pérdidas que se producen en las conducciones, ya que siempre existirán en mayor o menor medida, con lo que el no tenerlas en cuenta significaría disminuir la precisión de los cálculos realizados.

Incluyendo las pérdidas la expresión toma esta forma.

$$\frac{p_i}{\rho \cdot g} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + z_i - H = \frac{p_e}{\rho \cdot g} + \frac{v_e^2}{2 \cdot g} + z_e \quad [2.1-2]$$

En este caso las pérdidas hacen que entre dos puntos de un circuito se pierda parte de la energía como consecuencia de diversas causas como puede ser la fricción de las partículas del fluido entre ellas y con las paredes de los conductos.

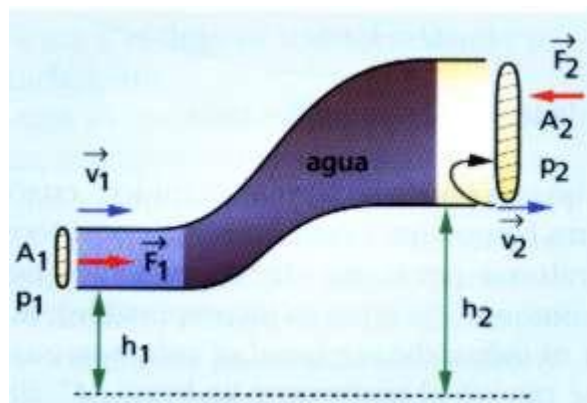
Aplicación a los cambios de sección

Es el caso concreto en que se basa parte del funcionamiento del simulador diseñado.

Si se consideran cambios de sección en una altura de cota que no varía, entonces la transformación de la energía se producirá solo de energía de presión a energía cinética y viceversa.

Cuando el cambio de sección se produce de un área mayor a uno menor, entonces se observará un aumento de la velocidad de paso por lo que aumentará la energía cinética en detrimento de la energía de presión.

En caso de que se pase de una sección más pequeña a una mayor entonces la transformación de energía será contraria a la anterior.



[61]

2.2 CALCULOS MODELO VIRTUAL

2.2.1 Transformación de los perfiles de presión

En este apartado se va a explicar el procedimiento aplicado para convertir los perfiles de presión que se conocen que son funciones $p(t)$, es decir donde la presión depende del tiempo en funciones $x(t)$. En las cuales x es el grado de apertura de las válvulas reguladoras que son las que a partir de esa mayor o menor apertura se van a emplear para recrear esas formas de onda deseadas.

Caso 1

Empezando por el caso de ritmo cardiaco normal, 70 ppm. Haciendo referencia al apartado del recordatorio de PFG donde se presentan los cálculos hechos en dicho proyecto para la obtención de la expresión analítica $p(t)$.

Comenzando por el circuito de circulación mayor, donde como se recordaba anteriormente la presión tiene un perfil parabólico.

La expresión que se obtenía entonces en la ecuación [1.3-2] era la siguiente:

$$p(t) = -7,8407 \cdot t^2 + 2,2401 \cdot t \quad [2.2-1]$$

Para conseguir llevar a cabo la conversión deseada hay que tener en cuenta la relación entre la apertura de la válvula y la presión. Conociendo la expresión de Bernoulli [2.1-2] se sabe que cuanto más estrecho es el paso, a un mismo caudal lo que se tiene es una mayor velocidad y una menor presión teniendo en cuenta que no haya variación de altura entre los extremos del tramo de conducción analizado.

Por lo tanto para conseguir las presiones que se quieren, se han de utilizar unas condiciones de contorno diferentes a las utilizadas con la presión pero una expresión analítica del mismo tipo es decir una parábola.

$$x(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \quad [2.2-2]$$

Se asumirá que en el momento de máxima apertura de la válvula, dicha apertura coincidirá con el diámetro interno del conducto y que además este momento coincidirá con aquel en el que se alcanza la máxima presión.

Las condiciones de contorno que se utilizan son las siguientes.

$$\begin{cases} t = 0 & x = 0 \\ t = 0,14285 & x = 0,204 \\ t = 0,2857 & x = 0 \end{cases}$$

Con estas condiciones de contorno, a partir de la resolución de un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, los valores de los coeficientes de la parábola son:

$$a = -0,9997; b = 0,2856$$

Por lo que la expresión es la siguiente:

$$x(t) = -0,9997 \cdot t^2 + 0,2856 \cdot t \quad [2.2-3]$$

Caso 2

En este segundo caso la frecuencia cardiaca con la que se trabajaba era de 110 ppm, por lo que los tiempos por pulsación y de duración de la variación de presiones durante la misma son diferentes a los anteriores. Por lo demás el proceso de cálculo es similar teniendo en cuenta que el fundamento de la transformación es el mismo y que el perfil en este caso también tendrá forma parabólica.

Las condiciones de contorno en este caso manteniendo la asunción comentada en el caso 1, serán:

$$\begin{cases} t = 0 & x = 0 \\ t = 0,090909s & x = 0,204 m \\ t = 0,181818s & x = 0 \end{cases}$$

Con estas condiciones de contorno, los valores de los coeficientes que se obtienen son:

$$a = -2,4684; b = 0,4488$$

A partir de estos coeficientes la expresión de x (t) será.

$$x(t) = -2,4684 \cdot t^2 + 0,4488 \cdot t \quad [2.2-4]$$

Es una parábola que como se puede apreciar por los valores de sus constantes tendrá una pendiente más acusada como es lógico por otra parte puesto que la apertura máxima es la misma que en el caso 1 y ha de alcanzarla en un tiempo menor.

Caso 3

En este último caso se trabajará con una frecuencia cardiaca de 55 ppm. Como anteriormente el número de pulsaciones por minuto afecta al tiempo por pulsación y al tiempo en el que la presión varía.

Con estos tiempos y las demás consideraciones que se tienen que tener en cuenta, las condiciones de contorno que se aplican en el cálculo son las siguientes.

$$\begin{cases} t = 0 & x = 0 \\ t = 0,181818s & x = 0,0204 m \\ t = 0,363636s & x = 0 \end{cases}$$

Resolviendo el sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas, los valores de las constantes de la expresión son.

$$a = -0,6171; b = 0,2244$$

Por lo tanto la expresión de $x(t)$ es:

$$x(t) = -0,6171 \cdot t^2 + 0,2244 \cdot t \quad [2.2-5]$$

Al contrario que en el caso 2 en este la pendiente será menos marcada al haber aumentado el intervalo de tiempo para alcanzar la apertura máxima.

A continuación se empleará un proceso similar para los perfiles de los tres casos diferentes, en el circuito de circulación menor.

Como se mencionaba en la sección de recordatorio en la memoria, estos perfiles son una combinación de un tramo lineal con un tramo parabólico.

Basándose, al igual que en el caso de los de alta presión en la ecuación de Bernoulli [2.1-2] el grado de apertura de la válvula afecta directamente a la presión. Por lo tanto el perfil que se obtendrá de la transformación tendrá un aspecto semejante al de $p(t)$ pero con unos valores diferentes.

La asunción de que la máxima apertura de la válvula coincidirá con el valor del diámetro interior del conducto y que además el punto con mayor presión se corresponderá con el momento en que la válvula este completamente abierta, también se aplicará en estos casos.

Caso 1

Tramo lineal

Con una frecuencia cardiaca de 70 ppm, las condiciones de contorno que se toman para este primer tramo, sabiendo que este solo se desarrolla durante una pequeña parte del periodo de variación de la presión en el corazón, serán las siguientes.

$$\begin{cases} t = 0s & x = 0m \\ t = 0,0476s & x = 0,01222m \end{cases}$$

Habiendo obtenido el valor de la apertura en el momento final del tramo lineal como resultado de mantener la proporción que había entre la presión que se alcanza en ese momento y la presión máxima que se alcanza en el momento de máxima apertura. Esa proporción ha de ser igual entre la apertura en ese momento y la máxima apertura posible.

La expresión analítica a hallar será la de una recta, como la siguiente:

$$y = a \cdot x + b \quad [2.2-6]$$

Como se ve es una expresión que necesita solo de dos condiciones de contorno, al ser una ecuación de primer grado. Como resultado de la resolución de sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas el valor del coeficiente de la recta será.

$$a = 0,2568$$

La ecuación de la recta como consecuencia será

$$x(t) = 0,2568 \cdot t \quad [2.2-7]$$

Una ecuación propia de una recta con origen en el origen de coordenadas, como es el caso.

Tramo Parabólico

Este segundo tramo se modeliza como una parábola, que corta a la recta en el momento en que el comportamiento de la presión pasa de ser lineal a asemejarse a una parábola.

Las condiciones de contorno de este segundo tramo serán las siguientes. Observándose que el punto de inicio del mismo ha de ser la intersección que se produce con la recta anteriormente determinada.

$$\begin{cases} t = 0,0476s & x = 0,01222m \\ t = 0,11903s & x = 0,006498m \\ t = 0,2857s & x = 0,0204m \end{cases}$$

A partir de estas condiciones de contorno los coeficientes de la parábola serán los siguientes.

$$a = 0,6895; b = -0,1955; c = 0,02$$

Por lo que la ecuación es la de una parábola con la siguiente expresión analítica.

$$x(t) = 0,6895 \cdot t^2 - 0,1955 \cdot t + 0,02 \quad [2.2-8]$$

Caso 2

En esta segunda situación el perfil tendrá una forma similar al del primer caso pero se desarrolla durante un lapso de tiempo más corto debido al aumento de la frecuencia cardiaca considerada.

Tramo lineal

Las condiciones de contorno de este tramo están afectadas por la duración del mismo.

$$\begin{cases} t = 0 & x = 0 \\ t = 0,0303s & x = 0,12221m \end{cases}$$

Como resultado de la resolución con estas condiciones de contorno, la pendiente de la recta será.

$$a = 4,0333$$

Evidentemente es una recta con una pendiente mucho mayor que la del tramo lineal del caso 1, hasta 8 veces la que se tenía en ese caso.

Tramo parabólico

Al igual que en el caso 1 la parábola cortará a la recta en su punto final, que será el comienzo del tramo parabólico.

Las condiciones de contorno, partiendo de ese punto de intersección serán.

$$\begin{cases} t = 0,0303s & x = 0,01222m \\ t = 0,07575s & x = 0,006498m \\ t = 0,181818s & x = 0,0204m \end{cases}$$

Una vez realizados los cálculos pertinentes, las constantes de la parábola serán.

$$a = 1,6961; b = -0,3058; c = 0,0199$$

Por lo que la ecuación de la parábola será la siguiente.

$$x(t) = 1,6961 \cdot t^2 - 0,3058 \cdot t + 0,0199 \quad [2.2-9]$$

En la parábola también se aprecia un aumento en las constantes que hacen que las pendientes sean más pronunciadas, tanto la de descenso como la de ascenso. El que se mantiene con el mismo valor es el término independiente, que indica que el vértice de la parábola está desplazada en el plano respecto al origen de coordenadas.

Caso 3

En este último caso el perfil es semejante, pero el lapso de tiempo el doble que en el caso 2 en tanto en cuanto la frecuencia cardíaca es la mitad que en aquel caso.

Tramo lineal

Las condiciones de contorno solo varían por la variación en el tiempo, lo que hace que el momento en que se alcanza el grado de apertura deseado sea el doble que en el caso 2.

$$\begin{cases} t = 0 & x = 0 \\ t = 0,0606s & x = 0,12221m \end{cases}$$

La pendiente de la recta que representa este tramo lineal será.

$$a = 0,2017$$

Esta pendiente es algo menor que la que se tenía en el caso 1, esto viene dado por el aumento de tiempo para alcanzar el mismo grado de apertura.

Tramo parabólico

Comenzando en la intersección como los casos anteriores, la parábola representará un aumento cuadrático de la apertura en el momento en que este empieza a ascender.

Las condiciones de contorno al igual que anteriormente solo varían en función del momento del tiempo en que se producen.

$$\begin{cases} t = 0,0606s & x = 0,01222m \\ t = 0,151515s & x = 0,006498m \\ t = 0,363636s & x = 0,0204m \end{cases}$$

Siendo por lo tanto los coeficientes de la curva, los siguientes.

$$a = 0,424; b = -0,1529; c = 0,0199$$

Y por consiguiente la ecuación del tramo parabólico.

$$x(t) = 0,424 \cdot t^2 - 0,1529 \cdot t + 0,0199 \quad [2.2-10]$$

Es el caso que presenta las pendientes de ascenso y descenso más suaves, siendo esto provocado por el hecho de extenderse durante un periodo más largo de tiempo lo cual aumenta el espacio recorrido en el eje X de la representación cartesiana del perfil calculado.

2.2.2 Equivalencia diferencia de cotas – pérdidas por fricción

En el apartado 1.3 se pueden ver los cálculos que se realizaron en su momento de las pérdidas de carga por metro de conducto. En esos cálculos había parámetros geométricos que adquirirían relevancia y marcaban diferencias entre los 3 casos que se planteaban. Por otra parte al emplear diferencias de cotas para modelizar esas pérdidas de carga, esa geometría y la velocidad del flujo no tienen relevancia.

Con esta equivalencia, lo que se plantea es trabajar con otro término de la Ecuación de Bernoulli, ya que las pérdidas de carga se pueden producir por diferentes factores.

La justificación de emplear esta equivalencia viene producida por la incapacidad de los bloques de Simulink de tener en cuenta las pérdidas cuando se producen aceleraciones en la corriente fluida. Al estar basado el funcionamiento del simulador en esas transformaciones de energía cinética en energía de presión y viceversa dichas aceleraciones se están produciendo.

Las equivalencias de las pérdidas debidas a las diferencias de cotas en los Conductos 1, 2 y 3 en metros de longitud de conductos con los diámetros internos especificados en el apartado 1.3.

Caso 1

Las diferencias de cotas de los conductos son las mostradas.

Nombre	Δz (bar)
Conducto 1	0,45
Conducto 2	0,65
Conducto 3	0,57

Y en este caso 1, las pérdidas de carga en los distintos tipos de conducciones serán.

Diámetro interno (mm)	Perdidas (bar)
20,4	0,01376
32,6	$6,83 \cdot 10^{-4}$
12,6	0,156

Estos datos serán orientativos, puesto que en los cálculos realizados en el PFG se empleaba un valor de velocidad constante en los tramos de conducto, donde se veía influenciada por el cambio de sección pero no se consideraban los estrechamientos en las válvulas.

Además para incluir todas las pérdidas de carga que representan los cambios de cota en los conductos, también se tienen que tener en cuenta las pérdidas de carga secundarias debidas a los accesorios que se incluirán en las conducciones.

Caso 2

En este segundo caso las pérdidas de carga en los tramos de conducto son las debidas a la fricción por metro lineal de tubo. Estas pérdidas de carga son mayores que en el caso 1 al aumentar la velocidad que se considera en los tramos.

Diámetro interno (mm)	Perdidas (bar)
20,4	0,03096
32,6	0,016
12,6	0,3512

Caso 3

La velocidad será mucho menor que en el caso 2, por lo que en este caso las pérdidas de carga serán menores por cada metro de conducción.

Diámetro interno (mm)	Perdidas (bar)
20,4	0,009
32,6	$4,54 \cdot 10^{-4}$

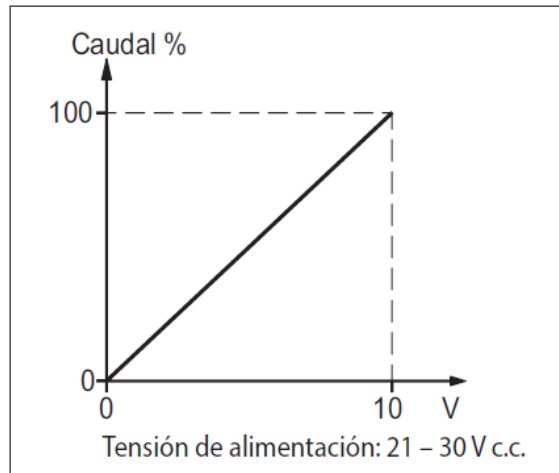
12,6	0,1
------	-----

Para que sea posible trabajar en los 3 casos presentados se tendrá que ajustar la válvula reductora de presión para poder, a partir de los tramos de conducto utilizados en el montaje, calibrar las pérdidas de carga para seguir trabajando con las presiones deseadas.

2.3 CÁLCULOS SOFTWARE

2.3.1 Valores de tensión en función de la relación V-X

Al igual que se ha hecho en el caso del modelo virtual los perfiles de presión necesitan ser transformados para emplearlos en el software de control. Conociendo la relación lineal que hay entre el grado de apertura de las válvulas reguladoras y la señal tensión que se le está transmitiendo.



[62]

Mediante la proporción mostrada se transformarían los valores de la apertura de las válvulas en valores de tensión a comunicar a las mismas.

Las válvulas reguladoras irán conectadas a las salidas de la tarjeta de adquisición de datos.

Conociendo esta relación lineal, se van a establecer las relaciones siguientes:

$$\begin{cases} V = 0; x = 0 \\ V = 10; x = 0,0204m \end{cases}$$

Caso 1

Por lo tanto, partiendo de estos valores se puede obtener los valores de tensión de los demás puntos que componen la polilínea que recrea el perfil de presiones parabólico a partir de la relación de proporcionalidad entre la máxima apertura y los demás grados de apertura, aplicando reglas de tres aprovechando la linealidad del funcionamiento de la apertura de la válvula respecto de la señal de tensión que se le comunica.

Los valores se presentan en la siguiente tabla.

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0,015	0.004059	1,99
0,0301	0.007691	3,77
0,0451	0.010847	5,32
0,0601	0.013554	6,64
0,0751	0.015810	7,75
0,0902	0.017628	8,64
0,1053	0.018989	9,31
0,1203	0.019890	9,75
0,1353	0.020341	9,97
0,1504	0.020341	9,97
0,1654	0.019889	9,75
0,1804	0.018988	9,31
0,1955	0.017626	8,64
0,2105	0.015822	7,76
0,2256	0.013551	6,64
0,2406	0.010844	5,32
0,2556	0.007688	3,77
0,2707	0.004055	1,99
0,2857	0	0

A esta señal de tensión se le añadirá una ganancia que se calibrará una vez se implemente el sistema de control en el modelo físico del simulador y pudiendo ser el valor de la ganancia diferente del valor que se emplea en el modelo virtual.

De la misma manera se controlará la apertura y el cierre en el circuito de baja presión, partiendo de las relaciones anteriormente establecidas.

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0.00476	0.001222	0.6
0.00952	0.002445	1.2
0.01428	0.00367	1.8
0.01904	0.004889	2.4
0.0238	0.006112	3
0.02856	0.007334	3.6
0.03332	0.008557	4.19
0.03808	0.009779	4.79
0.04284	0.011001	5.39
0.0476	0.012221	5.99
0.07141	0.009555	4.68
0.09522	0.007636	3.74
0.11903	0.006499	3.19
0.14284	0.006142	3.01
0.16665	0.006569	3.22
0.19046	0.007777	3.81
0.21427	0.009766	4.79
0.23808	0.012538	6.15
0.26189	0.016091	7.89
0,2857	0.0204	10
0,303	0	0

Al igual que ocurría con el perfil parabólico, a esta señal se le incluirá una ganancia de un valor por determinar al realizar el montaje del modelo físico.

Se observa como en el tramo lineal del perfil de presiones la señal de tensión aumenta en un valor constante entre puntos sucesivos.

Caso 2

En los casos sucesivos se va a aplicar un procedimiento análogo al que se empleó en el primero de ellos. Además habrá una relación entre el caso 2 y el 3. Ya que los puntos utilizados en ambos serán los mismos, lo único que cambiará será durante el cual varía la presión.

Los valores de tensión en los diferentes puntos para el perfil de alta presión serán:

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0.00909091	0.003876	1.9
0.01818182	0.007344	3.6
0.02727273	0.010404	5.1
0.03636364	0.013056	6.4
0.04545455	0.0153	7.5
0.05454545	0.017136	8.4
0.06363636	0.018564	9.1
0.07272727	0.019584	9.6
0.08181818	0.020196	9.9
0.09090909	0.0204	10
0.1	0.020196	9.9
0.10909091	0.019584	9.6
0.11818182	0.018564	9.1
0.12727273	0.017136	8.4
0.13636364	0.0153	7.5
0.14545455	0.013056	6.4

0.15454545	0.010404	5.1
0.16363636	0.007344	3.6
0.18181818	0	0

Con el perfil de baja presión se incluyen dos puntos más que en el de alta, uno en la unión entre el tramo lineal y el parabólico y uno al final para hacer bajar el perfil de la máxima apertura a estar completamente cerrado.

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0.00303	0.0012221	0.6
0.00606	0.0024442	1.2
0.00909	0.0036663	1.8
0.01212	0.0048884	2.4
0.01515	0.0061105	3
0.01818	0.0073326	3.6
0.02121	0.0085547	4.2
0.02424	0.0097768	4.8
0.02727	0.0109989	5.4
0.0303	0.012221	6
0.04545182	0.00950475	4.66
0.06060364	0.00759685	3.72
0.07575545	0.00646771	3.17
0.09090727	0.00611735	3
0.10605909	0.00654576	3.21
0.12121091	0.00775295	3.80
0.13636273	0.00973891	4.77
0.15151455	0.01250364	6.13

0.16666636	0.01604714	7.87
0.18181818	0.02036942	10
0	0	0

Caso 3

En este tercer caso como se ha comentado anteriormente al estar trabajado con una frecuencia cardiaca la mitad del caso 2, los valores de tensión serán los mismos aumentando simplemente la duración del periodo de tiempo.

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0.01818182	0.003876	1.9
0.03636364	0.007344	3.6
0.05454545	0.010404	5.1
0.07272727	0.013056	6.4
0.09090909	0.0153	7.5
0.10909091	0.017136	8.4
0.12727273	0.018564	9.1
0.14545454	0.019584	9.6
0.16363636	0.020196	9.9
0.18181818	0.0204	10
0.2	0.020196	9.9
0.21818182	0.019584	9.6
0.23636363	0.018564	9.1
0.25454545	0.017136	8.4
0.27272727	0.0153	7.5
0.29090909	0.013056	6.4
0.30909091	0.010404	5.1

0.32727272	0.007344	3.6
0.36363636	0	0

Con el perfil de baja presión ocurre lo mismo que en con la alta presión, teniendo los mismos valores de tensión que en el caso 2.

Tiempo (s)	Apertura (m)	Tensión (V)
0	0	0
0.00606	0.0012221	0.6
0.01212	0.0024442	1.2
0.01818	0.0036663	1.8
0.02424	0.0048884	2.4
0.0303	0.0061105	3
0.03636	0.0073326	3.6
0.04242	0.0085547	4.2
0.04848	0.0097768	4.8
0.05454	0.0109989	5.4
0.0606	0.012221	6
0.09090364	0.00950475	4.66
0.12120727	0.00759685	3.72
0.15151091	0.00646771	3.17
0.18181455	0.00611735	3
0.21211818	0.00654576	3.21
0.24242182	0.00775295	3.80
0.27272545	0.00973891	4.77
0.30302909	0.01250364	6.13
0.33333273	0.01604714	7.87

0.36363636	0.02036942	10
0	0	0

5.

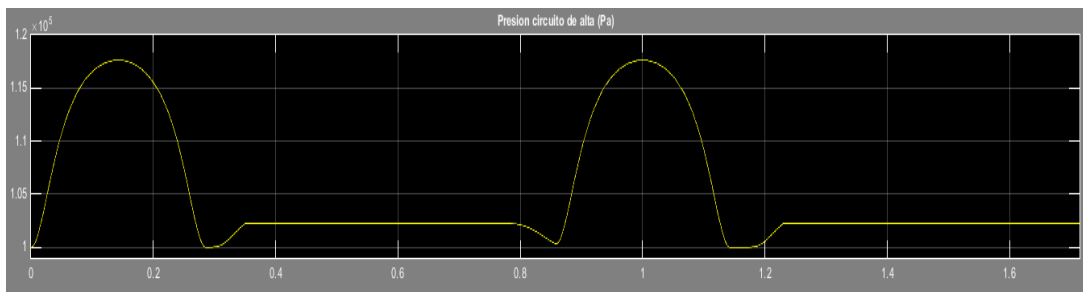
CONCLUSIONES

5.1 COMPORTAMIENTO DEL MODELO VIRTUAL

Los resultados que se han obtenido de la construcción de un modelo virtual de la arquitectura hardware que se había escogido en el PFG, son satisfactorios. A continuación se van a presentar y analizar esos resultados.

Recordando que las variables que marcan el buen o mal funcionamiento del simulador serán: la presión del circuito de alta, la presión del circuito de baja y el caudal por el circuito auxiliar.

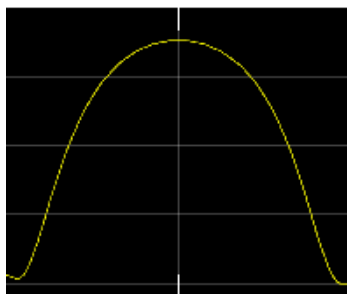
Comenzando por la presión de circuito de alta, se puede ver el comportamiento de este parámetro en la siguiente imagen.



[63]

El primer detalle que se aprecia a simple vista es que en los periodos de tiempo de variación de la presión se cumple el hecho de que el perfil de presiones es una parábola. Una parábola que parte de un valor de 1 bar aproximadamente, dado que este es el nivel de presurización que tenía el líquido en el interior del depósito donde se almacena el fluido y del cual parte.

Si se amplía una de las dos parábolas que realiza el modelo durante la simulación, se observa que partiendo de ese valor de 1 bar y con una diferencia de 0,5 bar por cada división en el fondo de la imagen, el valor máximo que alcanza la presión en el punto más alto de la parábola es de aproximadamente 1,17 bar.



[64]

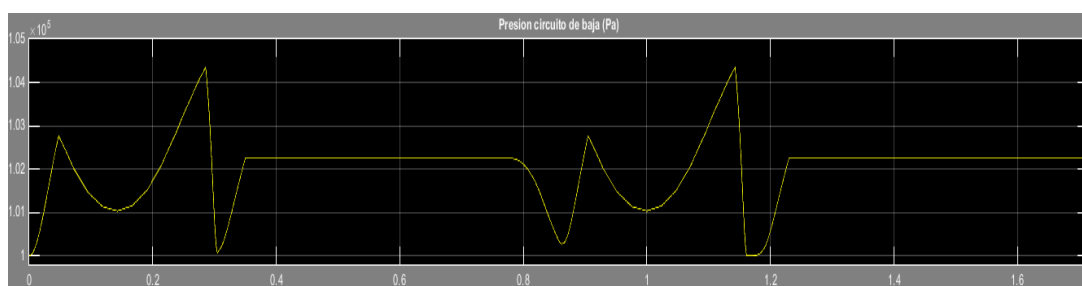
Ese valor es casi exacto el valor que se tiene en el lado izquierdo de un corazón humano cuando esta bombeando normalmente como parte del circuito de alta presión que lleva sangre al resto del cuerpo.

En la imagen [63] también se aprecian unos escalones en los tiempos en que la presión debería ser la atmosférica. Estos escalones de presión se deben a las fugas que se producen en las válvulas y también al hecho de que hay un espacio de tiempo en que la válvula todo o nada que se sitúa al final del circuito de alta está abierta, al mismo tiempo que se está haciendo circular el fluido por el circuito de desagüe, por lo que parte de la presión que circula por este le llega al sensor situado en el circuito de alta.

A pesar de no ser algo deseado, forma parte de la inclusión de detalles reales en el modelo virtual. Entre estos detalles se incluye el hecho de que las válvulas no son completamente estancas sino que dada la más que probable imperfección de su construcción como se indicaba en el apartado 1.6.3 se debe tener en cuenta el hecho de que se produzcan fugas.

Otro de los detalles es que las subidas y bajadas de esos escalones no son verticales, esto se debe a los parámetros de tiempo de apertura y cierre especificados para las válvulas todo o nada. Con esta consideración se aumenta el grado de realismo, ya que a pesar de que los tiempos nombrados en el caso de las válvulas escogidas son de los más cortos que se han podido encontrar, no son instantáneos, de hecho es algo que es imposible si se considerase como instantáneo se estaría idealizando el movimiento de la válvula.

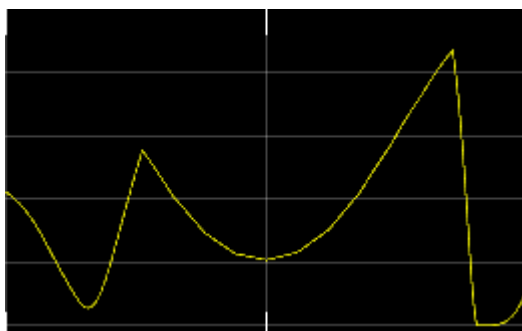
En el circuito de baja presión el resultado se considera igualmente satisfactorio a pesar de haber tenido que realizar algún ajuste necesario y además existir alguna inexactitud debida al alto grado de realismo de la simulación.



[65]

Al igual que con la presión del circuito de alta, al primer vistazo se puede ver que el perfil de presión en los periodos de tiempo deseados recrean la forma de perfil deseada.

Si se amplía uno de esos perfiles, se ve que se ha decidido trabajar con un valor de presión algo mayor que el real. El valor se ha aumentado de 0,027 bar de presión relativa a 0,042 bar aproximadamente, ya que en la imagen ampliada cada división se corresponde con 1 centésima de bar.



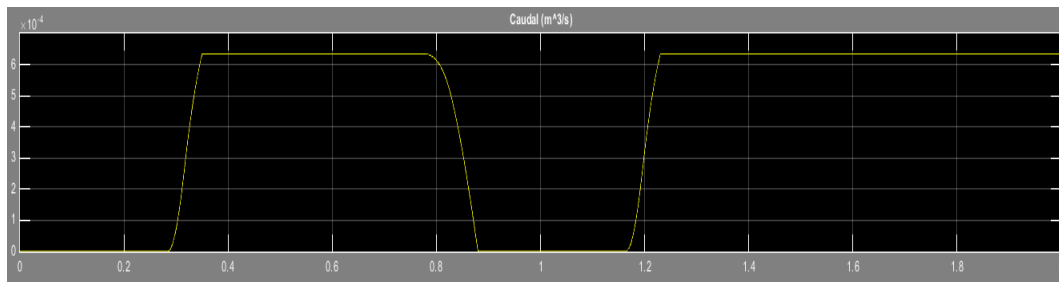
[66]

La justificación del aumento de este valor, viene por la necesidad de distinguir este golpe de presión que se produce por la apertura y cierre de las válvulas reguladoras de la presión debida a las fugas y la circulación a través del circuito auxiliar cuando la válvula todo o nada está abierta al mismo tiempo. Es decir se está produciendo una entrada de parte de la presión circulante por el circuito auxiliar en los circuitos de alta y de baja presión.

Aunque se ha tratado de reducir al máximo tanto la influencia de estas fugas como la de esa circulación auxiliar, no se han podido reducir a 0 de hecho no se debían reducir a 0. En el caso que se hubiesen eliminado como ya se ha comentado anteriormente se reduciría considerablemente el grado de realismo de la simulación y por lo tanto la incertidumbre con respecto al funcionamiento del modelo físico.

Para tomar la decisión de aumentar en más de un 50% la presión máxima con la que va a trabajar el circuito de baja presión, se contaba con la certeza de la consistencia de las paredes de las cavidades cardiacas que permiten aumentar este valor sin que el órgano sufra daños de ningún tipo.

El último de estos parámetros que marcan el funcionamiento del simulador es el caudal. En la siguiente imagen se puede apreciar el comportamiento del caudal que circula por el circuito auxiliar.



[67]

La medición de este caudal permite un conocimiento indirecto del caudal que se está haciendo circular por el resto del sistema hidráulico.

Se observa cómo el cambio comentado en el apartado 1.7, permite que la señal que se obtiene del caudalímetro solo tenga un valor considerable en el momento que los caminos de alta y baja presión están cerrados y el auxiliar está abierto.

Además, como ya se comentaba anteriormente, las válvulas todo o nada con tiempos de apertura y cierre añaden mucho realismo. Estos tiempos se aprecian en las subidas y bajadas del caudal las cuales no tienen pendiente infinita sino que se aprecia la apertura gradual de la válvula a lo largo del tiempo correspondiente y la bajada respectiva cuando esta se cierra.

El valor que alcanza el caudal es el deseado para el modo de funcionamiento del simulador con una frecuencia cardiaca de 70 ppm. El valor leído por el caudalímetro ronda los $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ que transformado suponen $2,16 \text{ m}^3/\text{h}$.

Este valor es un poco mayor del que se pretendía, pero esto se produce por el hecho de que la apertura que se provoca en las válvulas reguladoras de los circuitos de alta y baja presión al poner un bloque de ganancia con un valor tan pequeño, son muy pequeñas y por lo tanto el caudal a través de ellas es muy pequeño.

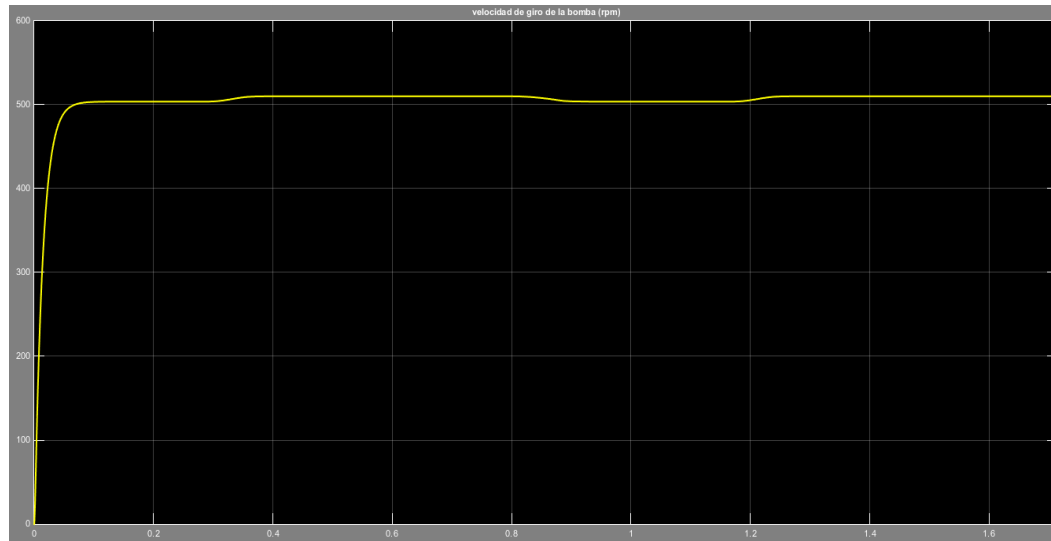
Ese caudal muy pequeño por los otros circuitos hace que en el auxiliar el caudal sea mayor del esperado.

Se aprecia una sincronía entre las subidas y bajadas del caudal y los escalones presentes en las presiones. Esto marca la relación directa que se comentaba anteriormente entre la circulación auxiliar y esa presión fugada que se cuela en los circuitos principales y provoca esos escalones.

Aparte de las lecturas ya presentadas y comentadas, las cuales son las más importantes y necesarias para poder conocer el comportamiento del equipo, se han

realizado monitorizaciones de otros parámetros menos importantes pero que también afectan al comportamiento del conjunto.

La primera de estas lecturas añadidas es la de la velocidad de giro de la bomba.



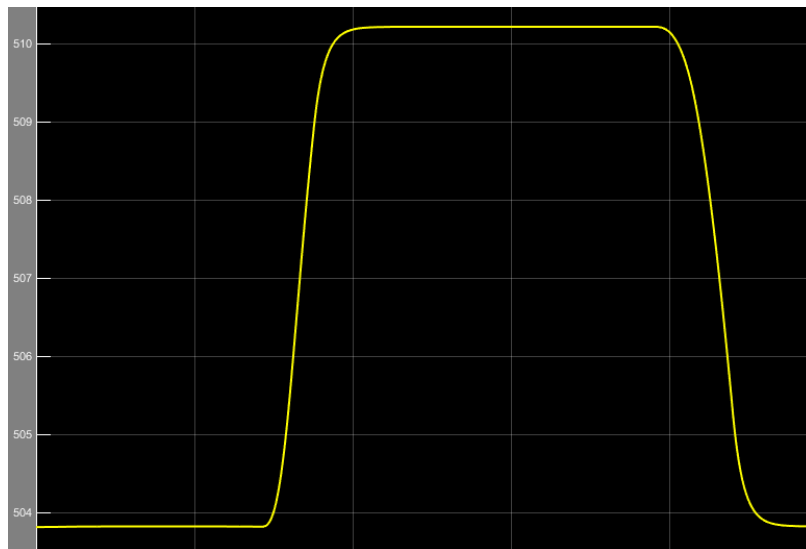
[68]

Como se puede apreciar la bomba tiene un primer tiempo de aceleración hasta que alcanza un valor algo inferior que el marcado a la fuente de valor constante.

El hecho de que gire a una velocidad algo menor se debe a la no idealidad de la recreación de la bomba, es un bloque que incorpora pérdidas y fricciones entre otros factores.

Este hecho habla a favor del realismo de la simulación y de lo próxima que estará al funcionamiento del equipo físico.

Ampliando la parte donde el perfil se vuelve horizontal pero no de valor constante, se puede ver lo siguiente.



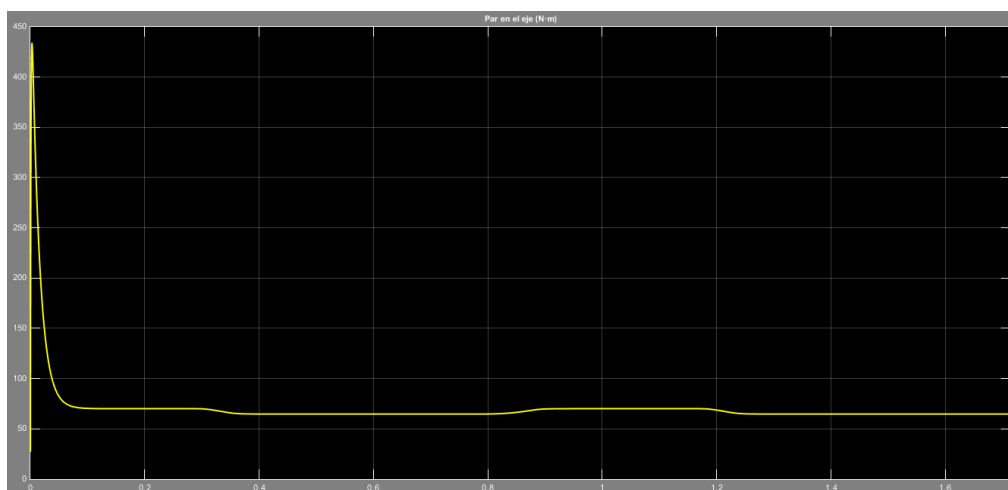
[69]

Los tramos más bajos se corresponden con los momentos de tiempo en los que se están accionando las válvulas reguladoras. Por lo tanto los tramos más elevados coinciden con los momentos de circulación por el camino auxiliar.

La diferencia cuantitativa entre ambos niveles no es muy significativa, apenas 6 rpm. Pero lo que demuestra es que es más sencillo moverse para la bomba en los momentos en que tiene el circuito de desagüe completamente abierto.

Al ser esa diferencia cuantitativa tan pequeña se puede afirmar que la influencia en el caudal que circula es nula y por lo tanto considerar el caudal saliente de la bomba como constante durante toda la simulación con motivo de la relación directa entre la velocidad de giro y el caudal.

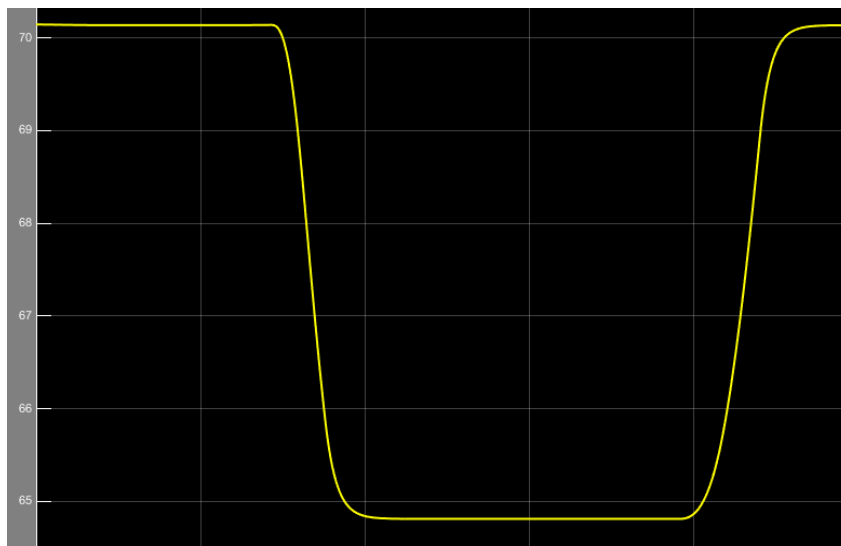
Otra característica observada es el par en el eje de la bomba que tendrá relación con la velocidad de giro.



[70]

En la imagen aparece primeramente el par de arranque, muy elevado con respecto al nivel en el que se estabiliza durante el resto de la simulación, necesario para vencer la inercia de la bomba parada y una vez arrancada y alcanzada la velocidad nominal aproximadamente, el par decrece considerablemente hasta un estado estacionario.

Al igual que en la velocidad de giro, se observa que la parte horizontal del perfil no tiene un valor constante sino que está formada por niveles superiores e inferiores.



[71]

En la ampliación se puede ver como en este caso los niveles superiores se corresponden con los periodos de tiempo de funcionamiento de los circuitos principales y los inferiores con los periodos del circuito auxiliar.

Esta relación es comprensible porque como se decía en el caso de la velocidad en los momentos de funcionamiento de los circuitos de alta y baja presión la resistencia

a la circulación del líquido es mayor por lo que la bomba ha de ejercer una mayor fuerza y gira a una menor velocidad. Y en los otros tramos se produce lo contrario.

La potencia de motor necesaria será de unos 3500 W con esas velocidades de giro y esos pares.

En conclusión, como ya se ha dicho anteriormente, el comportamiento del modelo virtual cumple sobradamente con las exigencias. Incluye un grado de realidad elevado lo cual también es necesario para poder afrontar esas situaciones en las cuales el funcionamiento no es ideal y ver cuál es el grado de incidencia de esa realidad. Podría haberse dado el caso de que el paso del planteamiento teórico al práctico necesitase de cambios radicales para poder conseguir un funcionamiento tan bueno como el que se ha logrado.

Además hay que reseñar el control de las variables en todo momento, que era una de las premisas que se planteaban desde un primer momento en este proyecto. Ese control reduce la incertidumbre que se tiene sobre lo que ocurre dentro del simulador y eso es primordial cuando se quiere trabajar con una maquina de precisión como esta y además poder plantear diferentes escenarios de trabajo.

Por último pero no por eso menos importante, hay que contemplar el hecho de que aun a pesar de tener estos buenos resultados, cuando se implemente el simulador físicamente con todos los sistemas funcionando en conjunto y con un fluido de verdad habrá que realizar ajustes incluso a los valores que han dado resultados satisfactorios en las simulaciones debida a esa, pequeña, incertidumbre.

5.2 EJECUCIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL

Lo más importante que se ha incluido en los algoritmos que conforman el software de control es la versatilidad de su funcionamiento, otorgando la posibilidad al usuario de fijar la frecuencia cardiaca con la que quiera trabajar en cada momento.

A partir de esta frecuencia cardiaca se derivan las instrucciones necesarias para poder calcular los perfiles de señal con los que se va a trabajar en cada uno de los casos.

La potencia de cálculo de MATLAB favorece la programación de un software tan versátil ya que no supone un retraso en la ejecución de los programas el hecho de tener que calcular previamente el perfil de la función $V(t)$ según la cual se emitirán valores de V en diferentes momentos de tiempo.

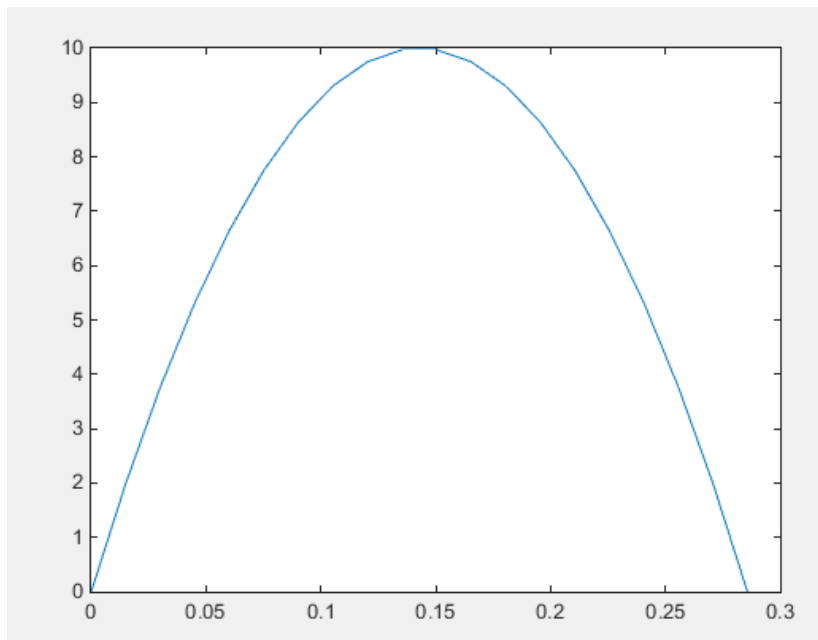
Además comparando los valores de tensión que se presentan en el apartado 2.3.1 y las graficas que se presentan al final de este apartado se puede ver que la precisión de los cálculos es muy elevada.

Otra ventaja de los programas diseñados es el hecho de que solo introduciendo una vez el valor de la frecuencia cardiaca este se utilizará en los cuatro algoritmos que forman parte del software.

Al no disponer de la tarjeta de adquisición de datos que se especificaba en el PFG, se ha recurrido a la visualización de los perfiles de salida resultado de los cálculos que lleva a cabo el programa.

Un inconveniente que se puede producir es el trabajo por parte de la tarjeta de adquisición de datos con los puntos dobles en los programas todo o nada ya que en el mismo momento de tiempo se estará mandando la señal nominal y una señal nula. Al incorporar todos los elementos del simulador y realizar los ajustes para la puesta en marcha será uno de los principales focos de atención.

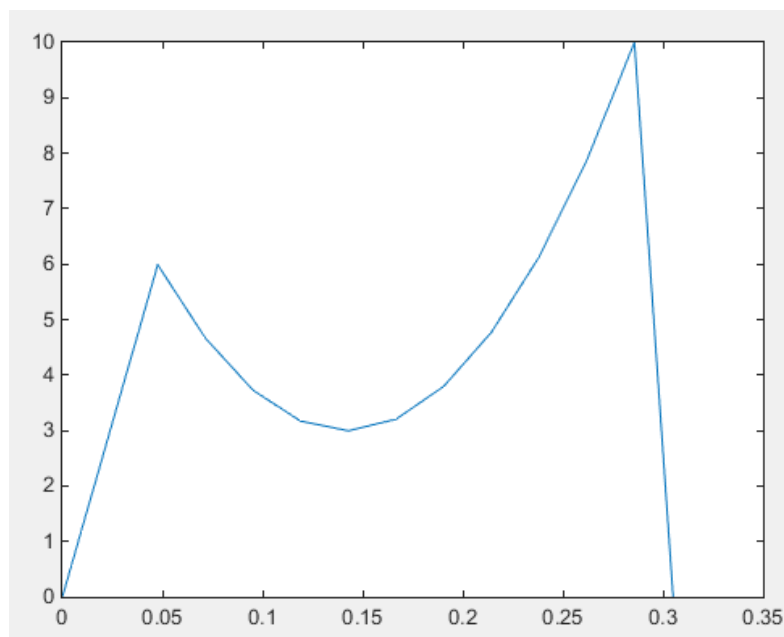
A continuación se muestran las imágenes de los cuatro perfiles para una frecuencia cardiaca de 70 ppm que es la situación con la que se ha trabajado en el modelo virtual.



[72]

Como se pretendía la salida del primero de los programa es una parábola con un valor máximo de tensión en el vértice de la misma de 10 V.

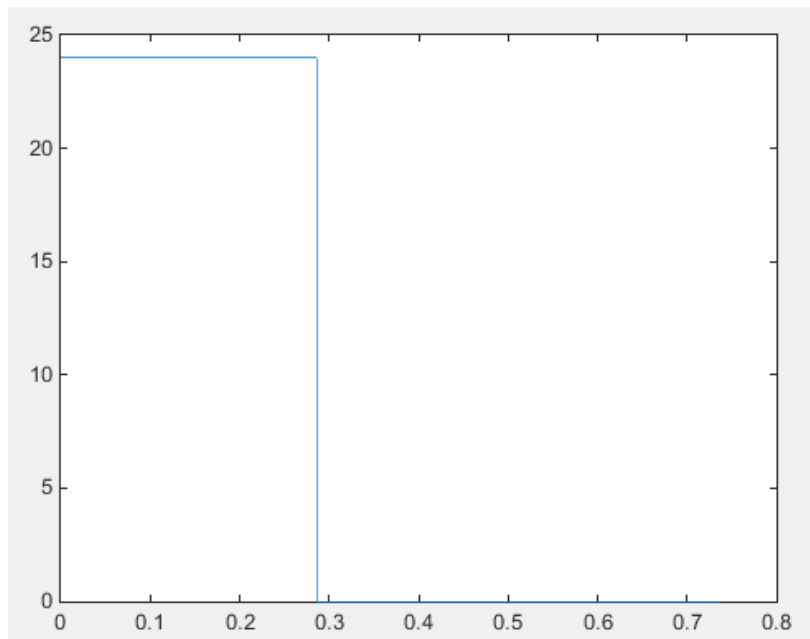
Cuando se trabaje con frecuencias cardiacas diferentes la pendiente de la parábola será mayor o menor pero el valor máximo se mantendrá.



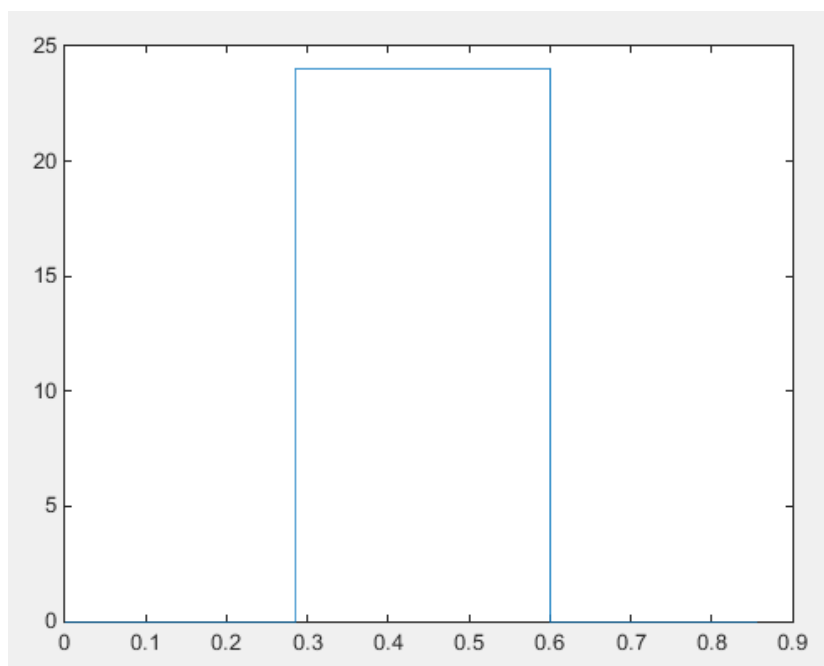
[73]

En este segundo perfil se distinguen los 2 tramos que forman parte del conjunto. También se incluyó un punto más con un tiempo un poco mayor que cuando se acaba la variación de presión y en el que se vuelve a cerrar la válvula. Este punto es necesario porque sino la válvula quedaría abierta.

Este punto es el responsable de que se produzca un cruce más acentuado entre la bajada de la válvula reguladora y la subida de la todo o nada.



[74]



[75]

Por último estos dos perfiles se corresponden con funcionamientos todo o nada. Dependiendo de la configuración de la válvula, es decir si esta es una válvula normalmente cerrada o abierta, el comunicar la tensión nominal significará la apertura o el cierre del paso.

Para ese funcionamiento todo o nada se han incluido los puntos dobles comentados anteriormente en este apartado. Una posible solución a un problema derivado de su

existencia podría ser incluir una pequeña diferencia de tiempo entre ellos que mantenga la pendiente de la recta de subida o de bajada siendo muy elevada y que aproveche la velocidad de trabajo de la tarjeta.