

Diseño del control de caudal y presión de una válvula de flujo anular para el llenado de tanques de agua potable.¹

Andres Julian Ariza Ariza²
Teodoro David Rios Garzon³
Hernan Josue Hernandez Lamprea⁴

RESUMEN: Este trabajo tuvo como propósito desarrollar el modelado y control de una válvula de flujo anular que contribuya al llenado de tanques para la estación de suministro de agua del barrio Codito 2 en la ciudad de Bogotá. En este proyecto se diseñó, modeló y comprobó el funcionamiento de la válvula de flujo anular con el objetivo de diseñar diferentes modelos de control que permitirían mejorar el desempeño de la válvula, concretamente el porcentaje de apertura en relación con el flujo que llegaba a la misma. Este trabajo se observó el efecto de flujos de agua entre 13 L/s y 78 L/s (Comprobados a partir de los sensores de la estación), durante una hora de trabajo normal. Igualmente se analizó y registro el porcentaje de apertura de la válvula para el rango de flujos mencionados anteriormente, obteniendo resultados que indicaban un comportamiento proporcional en la válvula, con el que posteriormente se diseñó y comprobó el funcionamiento de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID), un controlador basado en compensación en atraso y adelanto, y finalmente uno basado en los espacios de estado. Para el caso particular de este informe, se centrará más en el desarrollo, análisis y comparativa de cada uno de los tipos de controladores que en el modelo del sistema. Aunque, igualmente se analizó y desarrollaron las ecuaciones necesarias para poder ser modelado en el programa, lo que conlleva a realizar una simulación usando la herramienta que integra el programa; simulink, con la cual se pudo verificar el funcionamiento de cada controlador de forma visual.

PALABRAS CLAVE: Válvula, controlador PID, Caudal y presión.

ABSTRACT: The purpose of this work was to develop the modeling and control of an annular flow valve that contributes to the filling of tank flow for the water supply station in the Codito 2 neighborhood in the city of Bogotá. In this project, the operation of the annular flow valve was designed, model and verified with the aim of designing different control models that would allow to improve the performance of the valve, specifically the opening percentage in relation to the flow reaching it. This work observed the effect of water flows between 13 L / s and 78 L / s (verified from the station sensors), during a normal working hour. Likewise, the valve opening percentage was analyzed and recorded for the range of flows mentioned above, obtaining results that indicated a proportional behavior in the valve, with which the operation of a proportional, integral, and derivative controller was subsequently designed and verified (PID), a controller based on lag and lead compensation, and finally one based on state spaces. For the case of this report, it will focus more on the development, analysis, and comparison of each of the types of controllers than on the system model. Although, the necessary equations were also analyzed and

developed to be able to be modeled in the program, which led to a simulation using the tool that integrates the program; simulink, with which it was possible to verify the operation of each controller visually.

KEYWORDS: Valve, PID controller, Flow and pressure.

I. INTRODUCCIÓN

Los fluidos juegan un papel muy importante en el mundo de la ingeniería, puesto que contribuyen al desarrollo de aplicaciones versátiles que permiten mejorar procesos industriales en nuestra sociedad, particularmente la hidráulica, que en relación con este trabajo se hace hincapié en uno de los temas que abarca esta rama de la ingeniería, como lo es las válvulas, siendo su estudio de gran importancia, dadas las múltiples funciones que cumplen en cualquier circuito hidráulico. [1]

A pesar de ser complicado realizar una clasificación con categorías excluyentes, se puede decir que un tipo de válvulas del sector hidráulico, son las válvulas de control, donde se encuentra las válvulas de flujo anular; [1] en las que se enfocara este proyecto, ya que se implementara por medio de un actuador eléctrico actualizado para manipular la presión de llenado del tanque de succión del bombeo de la estación.

Es dable mencionar en primera instancia que las especificaciones de la válvula de flujo anular, la cual se caracteriza por tener un alto control de flujo y grandes caídas de presión en una sola etapa, además de reducción de daños en el cuerpo de la válvula por cavitación. Además, algunas aplicaciones son estaciones de control de flujo y reducción de presión, bypasses, reservas, recirculación en bombas, control de flujo de descarga y llenado de tanques; [2] en lo que se enfocara este trabajo.

Con base a lo anterior se puede inferir, que un control manual para el manejo de la presión y el flujo de llenado del tanque puede ser particularmente ineficiente, ya que el suministro del líquido para la estación se toma de la línea nororientales de la EAAB (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá), la cual tiene una alta presión (130 mca), y en caso de un error humano en el control o un efecto natural en el flujo, pueden llevar a determinadas condiciones de presión, velocidad, contra flujo o turbulencia, zonas de cavitación en la tubería, causando vibraciones, oscilaciones y bajo ciertas condiciones de operación conllevan daños al material y a la instalación ocasionando desperdicio del líquido lo que generaría repercusiones económicas y ambientales.

¹ Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Especialista en Automatización industrial.

² Ariza Ariza Andres Julian: Ingeniero mecatrónico de la fundación universitaria agraria de Colombia, Correo electrónico: andres.ariza@ustabuca.edu.co

³ Rios Garzon Teodoro David: Ingeniero mecatrónico de la universidad santo tomas.

⁴ Hernández Lamprea Hernan Josue: Ingeniero mecatrónico de la universidad santo tomas con maestría en dirección y gestión de proyectos.

Para ampliar esta idea, se puede concluir que el tiempo de respuesta de un control manual, on-off, puede ser ligeramente largo, la precisión del sistema puede no ser la mejor, las posibilidades de error pueden ser particularmente altas; por lo que la implementación de un control automático del llenado del tanque con una válvula de flujo anular permite manejar de forma eficiente la manipulación del agua y prevenir daños a futuro en la tubería e instalaciones.

El control de una válvula anular de flujo para el llenado de un tanque es un proceso importante para el desarrollo hidráulico en la industria ya que este se encarga de regular el flujo de agua entre el llenado y descarga de los tanques a los que está vinculado, ahora bien, un sistema de control en este tipo de sistemas es muy bien recibido, puesto que permite mejorar la respuesta del sistema y a su vez podría mejorar el tiempo de respuesta. Es importante aclarar que este tipo de sistemas intentan responder de forma positiva ante posibles situaciones, pero bajo teoría son incapaces de predecir las condiciones a las que se vería expuesto, pero son capaces de actuar o tomar medidas ante cambios gracias a la composición mecánica de la válvula.

Es dable decir que, el control PID es uno de los más utilizados en la industria, debido a lo simple que resultan al momento de trabajarlos en procesos industriales, para el desarrollo de este proyecto en particular se trabajara con un control PID, uno basado en compensadores de atraso y adelanto, pero a su vez se diseñaron y verificaron dos sistemas más basados en los espacios de estados. Es importante destacar que este trabajo solo busca analizar y realizar los sistemas de control, puesto que el análisis dinámico del sistema no es prioridad de este trabajo, tampoco su desarrollo practico.

De esa manera, siguiendo los argumentos planteados; el objetivo principal del proyecto es diseñar, desarrollar y comprobar el funcionamiento de los diferentes tipos de sistemas de control, los cuales estarán desarrollados en el entorno del programa Matlab, usando la herramienta de simulink para llevar estos mismos planteamientos matemáticos a un entorno un poco más interactivo, visual y real.

II. VALVULA DE FLUJO ANULAR

La red de tuberías ha ganado una importancia cada vez mayor tratando de conciliar las reservas de agua disponibles y la demanda cada vez mayor de agua. Por lo general, la capacidad de la red es siempre mayor que la solicitud efectiva; esto ocasiona que haya una necesidad de utilizar dispositivos capaces de controlar la distribución del agua sin desperdiciarla. La válvula de aguja está especialmente diseñada para realizar la función de regular el flujo de agua, como podemos apreciar en la figura 1 en donde podemos ver un plano de su diseño interior, por lo que puede lograr mantener un fácil manejo de si misma incluso en circunstancias que conllevan cargas hidrostáticas pesadas en su boca y una presión de ejercicio muy diferente. [3]

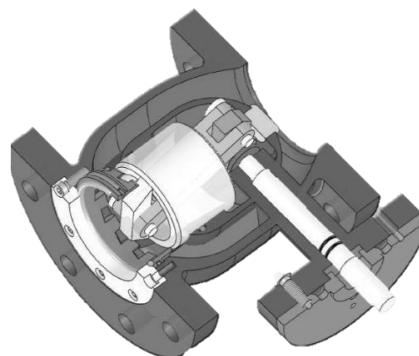


FIGURA 1. Plano de la válvula de flujo anular [3]

El uso de la válvula con la ayuda de actuadores permite utilizarla en sistemas de control con funciones muy diferentes, lo anterior lo podemos apreciar en la figura 2, en donde al frente podemos ver la válvula de flujo anular, y detrás justo en la rueda de manivela; el actuador. La regulación del caudal de agua accionada por válvula de aguja se realiza mediante el deslizamiento horizontal de un obturador, accionado mecánicamente por un mango con movimiento de biela. [3]

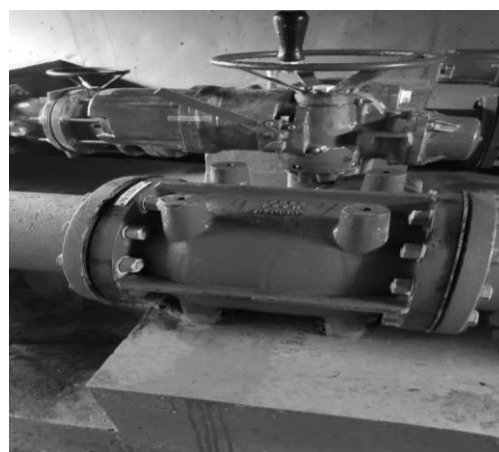


FIGURA 2. Válvula de flujo anular y actuador. Autor.

Gracias a una cámara especial equilibrada se elimina todo tipo de vibraciones o cargas oleodinámicas anómalas, además su forma interna está especialmente realizada para evitar la cavitación. El obturador se mueve en posición para cerrar la válvula siguiendo la dirección del flujo y permitiendo controlar el cambio del flujo de agua sin esfuerzos. [3]

III. ACTUADOR LIMTORQUE MX

Limitorque MX es un actuador inteligente de múltiples vueltas que ofrece control, facilidad de uso y con la facilidad de trabajar "sin necesidad de baterías". La compañía en la que se adquirió el producto; flowserve Limitorque presentó el actuador electrónico MX en 1997 como el primer actuador inteligente que proporcionó confiabilidad y rendimiento sin concesiones en un diseño que era fácil de usar. Se han mejorado las innovaciones MX que fueron las primeras en el mercado: codificador absoluto único que no requiere batería de respaldo, tecnología Limigard, menús fáciles de usar en seis idiomas, el uso de

Adicionalmente como la línea presurizada de los Cerros Nororientales tiene la presión suficiente para llevar el agua directamente a las estaciones Codito 2 y Codito 3, en la estación Codito 2 se tiene un Bypass para el envío del agua a la estación de Codito 3 sin necesidad de utilizar el bombeo. Este Bypass está manejado por una válvula de control de flujo anular con actuador eléctrico el cual mediante las mediciones de flujo y presión que se realizan en la estación se manipula para mantener un suministro constante y seguro del líquido a la estación Codito 3.

Como se muestra en la arquitectura de control El PLC se comunica con el actuador eléctrico de la válvula FCV-06901 (quien regula el caudal por la línea de Bypass que sale a Codito 3), mediante comunicación Modbus RTU, y Modbus TCP/IP, y utiliza esta comunicación para adquirir la información de estado de la válvula (porcentaje de apertura, alarmas, fallos), y dar comandos de apertura y cierre según sea el caso.

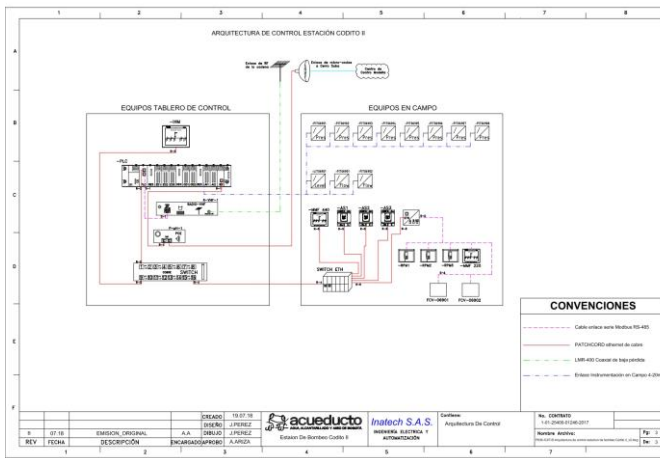


FIGURA 6. Arquitectura de control.

Mediante la integración del PLC a una IHM maestra se logra definir el modo de operación de la Válvula de control de flujo hacia Codito 3, de los cuales se tienen dos modos de operación, manual y automático.

V. INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO

La interfaz gráfica fue desarrollada en un PLC marca Flexem en programación orientada a objetos, tal como se muestra en la figura 7, donde podemos apreciar un esquema mas sintetizado del P&ID de la figura 5.

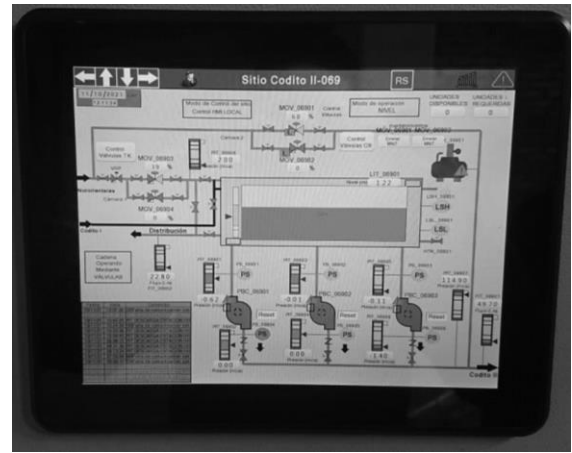


FIGURA 7. Interfaz Gráfica para el control y monitoreo de las bobinas y los grupos de plantas.

Es importante mencionar que, cuando se trabaja en modo manual, se puede ingresar el valor en porcentaje de la apertura deseada para la válvula y está se mantendrá hasta que se le ingrese un nuevo valor. Sin embargo, cuando se trabaja en modo automático, se debe ingresar el SetPoint del valor de flujo deseado que se quiere suministrar a la estación Codito 3, para esto en el PLC se implementó un PID, al cual se le hizo sintonización y adecuado para que responda de manera óptima para manejar la apertura y cierre de la válvula dependiendo de la lectura del flujo a la salida de la estación.

Cabe resaltar que durante la sintonización del PID se tuvo en cuenta que la respuesta de la válvula debería ser lenta para garantizar que durante la maniobra de apertura y cierre de esta no se generen cambios súbitos de presión que lleven a afectar la tubería de impulsión.

VI. MODELO DE LA VALVULA DE FLUJO ANULAR

Para modelar la válvula de flujo anular fue necesario registrar valores de flujo, presión y rango de apertura generados en el interior de la válvula y en las tuberías conectadas a ellas, a través de sensores de flujo, presión y el actuador de la válvula que mide y regula la apertura de la misma; se tomaron muestras del funcionamiento de la válvula en jornadas de trabajo regular, en donde podemos ver rangos de apertura ligeramente lentos en relación a la cantidad de muestras adquiridas, con esto se registraron valores de apertura entre 30 y 80 en porcentaje (%) para diferentes cambios en el flujo. El montaje para esas mediciones se aprecia en la figura 8.



Figura 8. Toma de datos de la válvula de flujo anular.

Los datos obtenidos se registraron en una tabla de Excel que se puede observar en la Tabla 1, en donde las tres columnas de la izquierda tienen los registros de la fecha y la hora en que se obtuvo la muestra de la válvula, mientras que la columna de la derecha se registraron los datos obtenidos del sensor ultrasónico de flujo, del sensor de presión y finalmente del actuador. De los datos podemos obtener que tienen una respuesta lineal y lenta tanto de ascenso como de descenso.

DATE, TIME, CH	Fecha	Hora	Presión MCA	Flujo L/s	% Apertura
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:14:59	116.19	46.29	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:01	116.00	45.59	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:02	116.09	45.70	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:03	116.19	45.90	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:03	116.19	45.70	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:04	116.09	45.59	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:06	115.90	45.40	44.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:06	115.90	45.40	43.00
2021-08-27, 10	27/08/2021	10:15:08	116.00	45.50	43.00

Tabla 1. Datos medidos con el sensor ultrasónico de flujo y el actuador.

Una vez obtenido los datos de la válvula de flujo anular se pueden llevar al System identification, una herramienta de Matlab que permite modelar los sistemas a través de los valores de entrada y de salida del sistema tal como se observa en la figura 9, mientras que en la figura 10 se aprecia la salida de la válvula en la gráfica superior donde las unidades del eje Y son en porcentaje, mientras que la gráfica inferior es la entrada del germinado en términos del flujo en unidades de L/s en el eje Y, además los tiempos de muestreo se establecieron en 1 segundo.

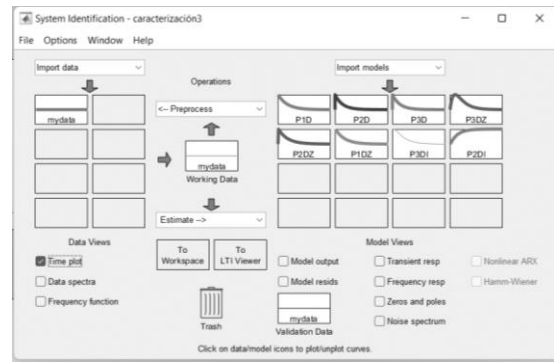


Figura 9. System identification.

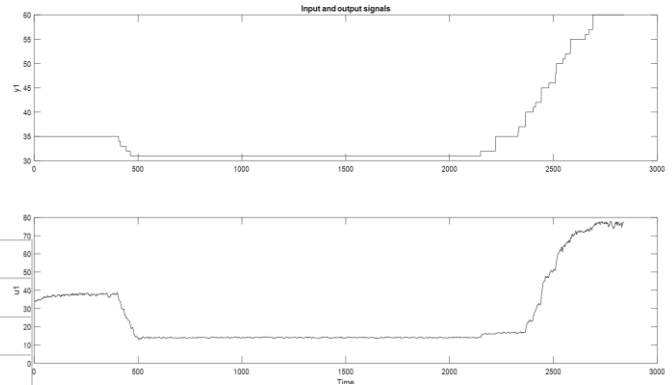


Figura 10. Entradas y salidas de la válvula de flujo anular.

Con la misma herramienta podemos estimar el modelo de la planta con los datos previamente suministrados, este se pudo conseguir a través de función de transferencia, espacio de estados, modelo del proceso, entre otros, para este caso en particular se decidió usar modelo del proceso, porque es más práctico para estimar el modelo de las plantas con respuestas lineales. Una vez decidido el método, debemos estimar la planta en base al número de polos, zeros, delay o integradores que esta pueda tener con el objetivo de comprobar cual combinación de esas cuatro se ajusta mejor a la planta que corresponde a la válvula de flujo anular. En la figura 11, podemos ver los resultados obtenidos con cada combinación, en donde P simboliza polos, el número a su derecha el número de estos, el D, el delay, y la Z los zeros; para este proceso se implementó un delay en todas, porque las respuestas sin el mismo directamente eran alejadas de lo deseado.

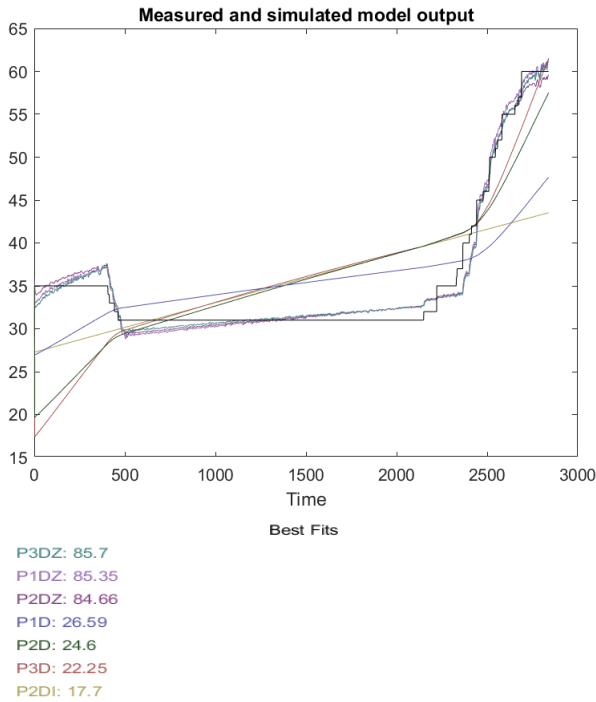


Figura 11. Estimación del modelo de la válvula de flujo.

De la imagen anterior podemos obtener que el modelo con 3 polo, 1 delay, y 1 zero es la que más se acerca al modelo real del germinador, ya que, tiene una similitud con la respuesta original de 85.7%, y a su vez, es la más acertada de las demás interacciones, por lo que, este es el escogido para este proyecto.

Al exportar el modelo escogido al entorno de trabajo de Matlab, se aprecia en la figura 13 la función de transferencia que corresponde al modelo junto a los valores de las variables que corresponden a la función de la figura 12, mientras que la figura 14 es respuesta del sistema modelado ante una entrada de escalón, que nos indica que el sistema tiene una respuesta lineal y estable. Una vez asignado los valores, obtenemos la función de transferencia en termino de las misma; esta representación se presenta en la figura 15, en la que podemos apreciar los polos polo en el lado izquierda y el zero en el origen, por lo que, se puede establecer que el sistema es estable, lo que se puede comprobar visualmente en la figura 15.

```

Process model with transfer function:
      1+Tz*s
G(s) = Kp * ----- * exp(-Td*s)
      (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)(1+Tp3*s)

      Kp = 3.5944
      Tp1 = 11328
      Tp2 = 0.34949
      Tp3 = 0.16174
      Td = 0
      Tz = 1049.2

Name: P3DZ
Parameterization:
{'P3DZ'}
Number of free coefficients: 6
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncerta

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 85.7%
FPE: 1.412, MSE: 1.403

```

Figura 12. Adquisición de la función de transferencia.

Tf =

From input "u1" to output "y1":
 $3771 s + 3.594$

 $640.3 s^3 + 5791 s^2 + 1.133e04 s + 1$

Name: P3DZ
 Continuous-time transfer function.

Figura 13. Función de transferencia.

Para sustentar lo anteriormente planteado se graficó la función de transferencia ante una entrada escalón para verificar el comportamiento del sistema como lo podemos apreciar en la figura 14; la respuesta no tiene sobre picos, ni oscilaciones, tiene un tiempo de establecimiento de aproximadamente 700.000 segundos, lo que es demasiado lento. Aun así, tiene un offset de 0.5, por lo que en la siguiente sección (control), se buscara eliminar este offset del sistema y mejor el tiempo de establecimiento, sin perjudicar la robustez de esta.

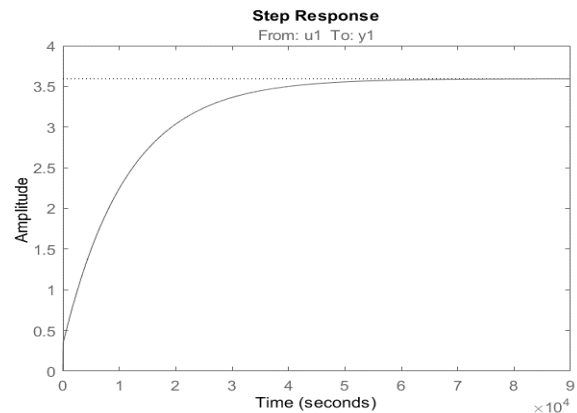


Figura 14. Respuesta del sistema ante una entrada escalón.

Como se había sustentado al obtener la función de transferencia, el sistema es estable, pero es más fácil validar esta información con el lugar geométrico de las raíces de la figura 15, donde vemos a detalle la ubicación de los polos y zeros del sistema presentes en el lado izquierdo de la gráfica, lo que indica que el sistema es estable.

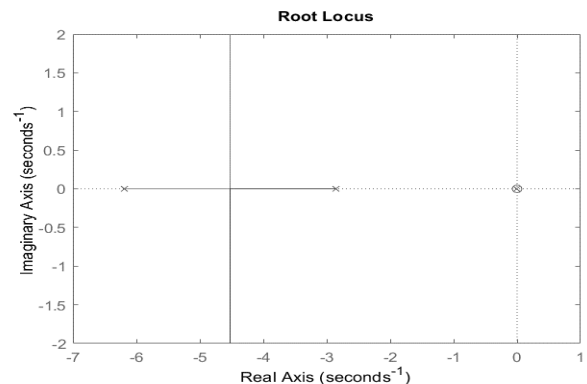


Figura 15. Lugar geométrico de las raíces del sistema.

VII. CONTROL DE LA VALVULA DE FLUJO ANULAR

Se decidió partir de un compensador en adelante y atraso, ya que es el más fácil de elaborar en términos matemáticos, puesto que se necesita definir los parámetros que permitirán el desarrollo de ambos compensadores, estos se escogieron en base a la definición aprendida en clase que establece que el tiempo de establecimiento es inversamente proporcional al producto de la relación de amortiguamiento y la frecuencia natural no amortiguada. Dado que el valor de la relación de amortiguamiento está determinado generalmente por el requerimiento del sobre impulso máximo permisible, el tiempo de establecimiento pasa a ser dependiente de la frecuencia natural con no amortiguada. Esto significa que la duración del período transitorio puede variarse, sin cambiar el sobre impulso máximo, ajustando la frecuencia natural no amortiguada ω_n .

Del análisis anterior, es evidente que, para tener una respuesta rápida, esta debe ser grande. Ahora, para limitar el sobre impulso máximo M_p y hacer pequeño el tiempo de establecimiento, la relación de amortiguamiento no debe ser muy pequeña. Por lo que, si la relación de sobre impulso solo puede obtener valores entre 0 y 1, entonces se asumirá un valor lo suficiente cercano a uno para realizar el análisis, mientras que al mismo tiempo se establece un tiempo de establecimiento corto. Con esto podemos hallar el valor del sobre impulso máximo, y a su vez el valor de las constantes de la ecuación de compensadores, con el que intentaremos encontrar los valores que deben tener el polo y el cero de la función; esto se puede conseguir con la definición de que los ángulos del sistema junto con el compensador deben sumar 180 grados. Finalmente, el valor del compensador es la inversa de la magnitud del sistema, lo que nos arroja un valor de K_c . El valor del Beta utilizado en para la ecuación de atraso se puede hallar al evaluar el compensador en adelante con el sistema a condiciones de rampa, por lo que, el sistema se vería multiplicado por una constante de 1 puesto que al ser multiplicado por un rango mayor de "s" este tendería a infinito. Al igual a cero los valores de "s" y evaluar el límite se puede encontrar esta beta asumiendo que el nuevo valor de la constante del error en estado estacionario, la respuesta la podemos apreciar en la figura 16, de la que podemos obtener oscilaciones y problemas para alcanzar una respuesta, pero tiempos de establecimiento muchos más cortos.

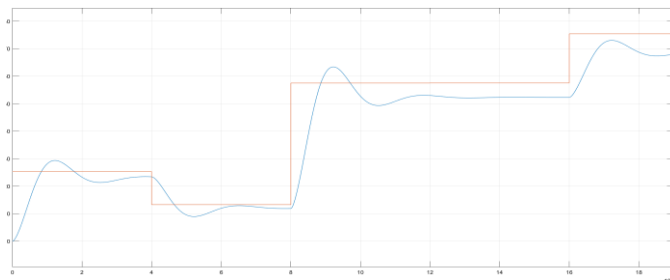


Figura 16. Respuesta de un compensador en adelante y atraso.

Seguido del compensador, se decidió diseñar un controlador PD, ya que es el práctico y útil al momento de empezar a probar controladores; para ello se variaron las constantes de K_p y K_d de forma interactiva hasta encontrar una respuesta aceptable del sistema. Sin embargo, no se consiguió, como se puede verificar en la figura 17, en donde la respuesta del sistema que es la señal azul no es capaz de seguir la referencia, incluso entre tiende a alejarse más de la referencia más crece la variable K_d y a ser más inestable para valores superiores a al

elegido, al mismo tiempo, interactuar con los valores de la variable K_p , no afectan de forma positiva a la respuesta, por lo que, un controlador PD no es ideal para este sistema.

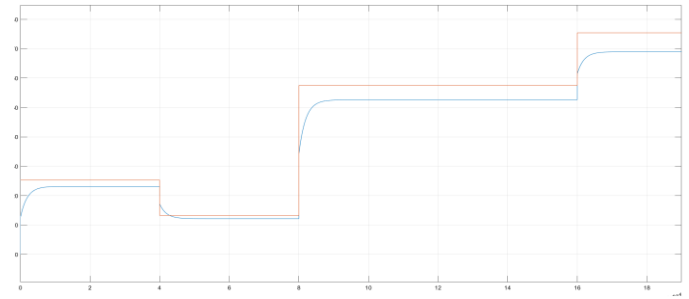


Figura 17. Respuesta del controlador PD, para un $K_p=2.97$ y $K_d=0.1$.

Como la variable K_d debe ser pequeña se asumió que partería en cero, por lo que, un controlador PI, sería posiblemente el que mejor encaje con el sistema ya que no posee un componente derivativo. La respuesta obtenida fue mucho mejor que la obtenida en el PD, tal como se puede observar en la figura 18, en la que nuevamente la señal naranja es la referencia y la azul la respuesta del sistema con el controlador. De esta figura se puede extraer que tiene un leve sobre pico. Al ser tan pequeño, el sistema no se vería afectado, ya que como también se puede apreciar tiene un tiempo de establecimiento demasiado pequeño, por lo que la señal se estabiliza y llega a la referencia con mucha rapidez y sin oscilaciones. Cabe mencionar que entre más pequeña fuera la constante K_p de cero, mejor era la respuesta, puesto que el sobre impulso era mucho menor, al mismo tiempo la variable K_i respondía de la misma forma, en términos de la velocidad y la estabilidad del sistema, ya que la componente integral está estrechamente relacionada con estas variables y el error en estado estacionario.

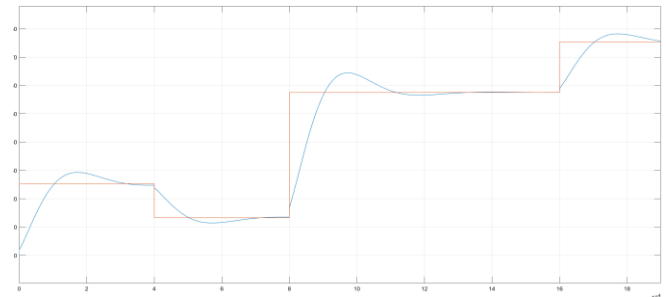


Figura 18. Respuesta del controlador PI, para un $K_p: 0.3$ y $K_i=0.001$

Ahora bien, implementar un controlador PID no era necesario para el caso particular de esta válvula de flujo anular, puesto que la variable derivativa sería idóneamente cero, lo que en efectos prácticos lo convertiría en un PI, incluso la respuesta de este con las variables utilizadas en el controlador PI, nos devuelve la misma respuesta de la figura 18 en la figura 19.

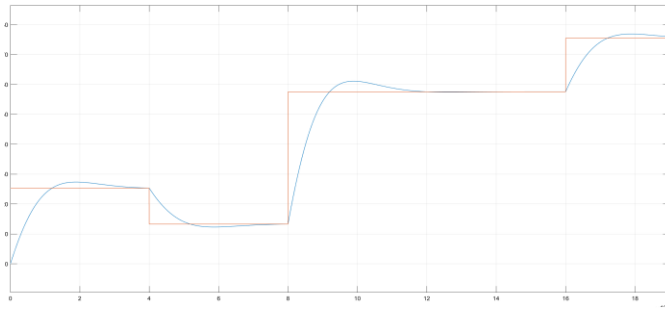


Figura 19. Respuesta del controlador PID, para un $K_p=0.3$, $K_i=0.01$ y un $K_d=0$

Luego de implementar los controladores antes mencionados, se vio viable utilizar un controlador por espacios de estado para el germinador magnético que sea más robusto. Para ello es necesario convertir la función de transferencia de la figura 13 en espacio de estado, como podemos apreciar en la figura 20.

```
EE =
A =
      x1      x2      x3
x1  -9.0444  -4.423  -0.02499
x2      4      0      0
x3      0      0.01563  0

B =
      u1
x1      1
x2      0
x3      0

C =
      x1      x2      x3
y1      0      1.472  0.08981

D =
      u1
y1      0

Name: P3DZ
Continuous-time state-space model.
```

Figura 20. Representación de espacios de estado de la válvula de flujo anular.

Una vez obtenido la representación de espacios de estado del modelo se decidió el tipo de control para hallar las K del sistema, para el caso particular de este proyecto se decidió usar el control LQR, ya que permite encontrar las K del sistema de forma práctica, basado en un sistema de compensación y sacrificio. Para ello se requiere una matriz hermética positiva del mismo tamaño de la matriz A del sistema, por lo que solo sería una matriz de $[3 \times 3]$, donde se le asignó a esa matriz los valores de: $[1 \ 0 \ 0; 0 \ 10000 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$; ya que si el valor de $[2,2]$ crecía mucho más, se volvía más inestable y si disminuía la respuesta era muy brusca; al mismo tiempo el LQR, requiere de una constante que determina la importancia relativa del error y el coste de esta energía, en este caso se asignó un valor de 0.04, porque entre más pequeño la respuesta era más precisa, pero demasiado brusca, mientras que un valor grande generaba oscilaciones en el sistema. Al tener estas dos variables, se llevan al comando de LQR de Matlab que devuelve un vector con estas K , pero al tener tres estados, el valor de K es un vector de tres posiciones $[1 \times 3]$ y corresponde, $[54.7648; 495.5991; 4.9751]$; este vector permitirá realizar el control de espacio de estado que se puede evidenciar en la figura 21.

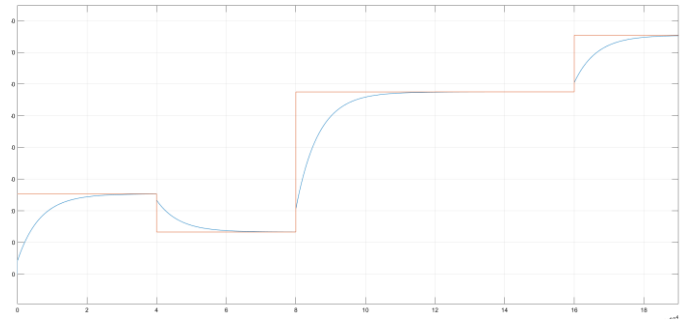


Figura 21. Respuesta del controlador de espacios de estado LQR, para una K de $[54.7648; 495.5991; 4.9751]$.

De la imagen anterior podemos destacar que la respuesta es muy parecida a la de referencia, siguiendo el juego de colores de la figura 16 y 17. En esta ocasión no hay sobre picos como se tenía en el controlador PI, pero al mismo tiempo tenemos ligeramente el mismo tiempo de establecimiento, incluso parcialmente más rápido que este último. Finalmente se puede establecer que el controlador de espacios de estado tiene un mejor desempeño y respuesta para la válvula de flujo anular.

VIII. RESULTADOS

Con la obtención teórica del diseño y sintonía del controlador para la óptima manipulación de la válvula de flujo anular en la estación Codito 2 de la EAAB, se procede a realizar la implementación de dicho controlador en el sistema de control de la estación (PLC a IHM). La mayoría de programación del PLC se realiza bajo lenguaje Ladder, pero existen también un tipo de programación un poco más avanzada que usa bloques funcionales o FBD, que nos sirven para programar algoritmos o funciones especiales, ya que estas vienen desarrolladas desde fábrica y encapsuladas en unidades lógicas.

Al implementar estos tipos de funciones especiales debemos asignar puntualmente las constantes y variables con las cuales el sistema se va a desenvolver y por las cuales se va a regir su funcionamiento y respuesta, ya que los algoritmos programados desde fábrica se proyectan para uso general y no específico para determinado tipo de sistema.

Para poder tener una respuesta óptima de la válvula de flujo anular se programa en el PLC una sección lógica donde llamamos un bloque FBD que contiene el funcionamiento típico de un PID, en este bloque asignamos las constantes halladas anteriormente de forma teórica, además de las variables que se usan dentro del programa para realizar la comunicación entre el PLC y la válvula como, por ejemplo, la variable que lleva el porcentaje de apertura y cierre. Esta variable será la salida del controlador PID que de acuerdo con los estudios de funcionamiento de la estación Codito 2 se le asignan ciertos límites para que la apertura y cierre de la válvula no llegue a generar daños o mal funcionamiento que afecte la operación.

20954/u246032.pdf?sequence=1. [Último acceso: 20 11 2021].

[Talis, «Belgicast,» [En línea]. Available:

2 https://www.belgicast.eu/fileadmin/user_upload/BELGIC

] AST_ERHARD_Valvula_anular.pdf. [Último acceso: 11 20 2021].

[D. Nicola, «Di Nicola Valves,» 2008. [En línea].

3 Available: www.dinicolavalves.com. [Último acceso: 2021 11 24].