

CONTROL Y SUPERVISION DE UN PROCESO HIDRAULICO CON UNA PLATAFORMA SCADA

DANIEL FELIPE CASTAÑEDA MARIN
NATALIE LOPEZ CORREA
CHRISTIAN STID BARRERA ORDOÑEZ

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE TECNOLOGIA ELECTRICA
PEREIRA
2014

CONTROL Y SUPERVISION DE UN PROCESO HIDRAULICO CON UNA
PLATAFORMA SCADA

DANIEL FELIPE CASTAÑEDA MARIN
COD: 1087551760
NATALIE LOPEZ CORREA
COD: 1088292176
CHRISTIAN STID BARRERA ORDOÑEZ
COD: 1088292130

Proyecto de grado presentado para optar el título de
Tecnólogo en Electricidad

Director
SIGILFREDO ARREGOCES C
Docente Programa de Tecnología Eléctrica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2014

Nota de aceptación:

Firma del director del programa

Firma del director del proyecto

Firma del jurado

Pereira, 1 Mayo del 2014

DEDICATORIA

Agradezco y dedico este trabajo a mi madre María Berenice Castañeda Marín, a mi tía Ana María Castañeda Marín. Por preferir para mí una adecuada educación y por el apoyo económico; también por los consejos que me han ayudado a conseguir mis logros y no desertar.

Daniel Felipe Castañeda Marín.

Agradezco infinitamente a mis padres John Jairo López Agudelo y Gloria Inés Correa Sánchez por el gran apoyo educativo, moral y económico que me han brindado. A mis hermanos Christian y Michael López Correa, y en especial Giovanny Lopez correa quien hoy no está conmigo, que a pesar de las complejas situaciones que hemos tenido que vivir; he cumplido una de tantas metas propuestas. A ellos, a mi familia dedico este logro, por la enorme confianza y dedicación depositada en mí.

A mis compañeros de trabajo Daniel F. Castañeda M. y Christian S. Barrera por la compañía y la mutua colaboración.

Natalie López Correa.

Agradezco y dedico este trabajo a mis padres Miriam Ordoñez F. Y Wilson Barrera V. por el apoyo moral y económico que me han brindado de manera incondicional en todos estos años, a pesar de las adversidades.

Christian Stid barrera Ordoñez.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Msc. Ing. Sigifredo C. Arregocés C. por el gran aporte académico y económico que nos ofreció y por su entera dedicación a la Escuela de Tecnología Eléctrica.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	12
GLOSARIO	14
1. MODELADO MATEMATICO DE UN SISTEMA HIDRAULICO PARA NIVEL 16	
1.1 IDENTIFICACION DE RESISTENCIA HIDRAULICA.....	16
1.1.1 clasificacion de flujo	16
1.1.2 Resistencia en el flujo laminar	18
1.1.3 Resistencia hidraulica en el flujo turbulento.....	20
1.1.4 Identificación de resistencia hidráulica del proceso a controlar	20
1.2 MODELO MATEMÁTICO DEL TANQUE	25
1.2.1 Identificación del tanque	25
1.3 MODELO MATEMÁTICO LINEALIZADO DEL TANQUE	27
2. SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL.....	29
2.1 PRUEBA A LAZO ABIERTO	29
2.1.1 Sistema a lazo abierto.....	29
2.2 PRUEBA A LAZO CERRADO	31
2.2.1 sistema a lazo cerrado.....	31
2.3 DETERMINACIÓN DEL ERROR EN ESTADO ESTACIONARIO	34
2.4 OBSERVACIÓN.....	35
3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS ADECUADORES DE SEÑAL PARA LOS TRANSDUCTORES DE NIVEL Y CAUDAL DEL SISTEMA A CONTROLAR	36
3.1 SELECCIÓN DE SENSOR FOTOELECTRICO	36
3.1.1 Características técnicas del sensor fotoeléctrico BR 100-DDT	36

3.1.2	Principio de funcionamiento del sensor BR 100 DDT en configuración difuso reflectivo	37
3.1.3	Integración del sensor BR 100 DDT al proceso	38
3.2	SELECCIÓN DEL MEDIDOR DE CAUDAL DE TURBINA	39
3.2.1	Características técnicas del Medidor de caudal POW 109 D3B	39
3.2.2	Principio de funcionamiento del medidor de caudal de turbina	40
3.2.3	Integración del medidor de caudal de turbina al proceso.....	40
3.3	MEDIDOR DE PRESION DIFERENCIAL	41
3.3.1	Características técnicas del medidor de caudal MPX2010 DP	41
3.3.2	Principio de funcionamiento del medidor de presión diferencial MPX2010DP.....	42
3.3.3	Integración del medidor de presión diferencial MPX2010DP al proceso.	42
4.	APLICAR UNA VÁLVULA DE ACCIÓN PROPORCIONAL DE CAUDAL PARA CONTROLAR EL NIVEL DE LÍQUIDO	44
4.1	VALVULA PROPORCIONAL.....	44
4.2	SELECCIÓN DE VALVULA DE PASO POR RESORTE.....	44
4.2.1	Características técnicas de la válvula de paso por resorte	44
4.2.2	Principio de funcionamiento de la válvula de paso por resorte	45
4.3	SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR	45
4.3.1	Características técnicas del servomotor HS805BB+.....	46
4.3.2	Servomotor	46
4.4	INSTALACION DE LA VALVULA PROPORCIONAL DE CAUDAL	48
4.4.1	funcionamiento de servomotor mediante ondas pwm	48
4.4.2	Mecanismo de engrane cilíndrico recto de la servo válvula	49
4.4.3	Plataforma Arduino Mega 2560	50
4.4.4	Conexión de la válvula proporcional de caudal a plataforma Arduino.....	51
5.	DISEÑAR LA LEY DE CONTROL DE NIVEL PARA EL SISTEMA.....	54

5.1	IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS FISICOS DE REGULACIÓN	54
5.1.1	Componentes de lazo de regulación.....	54
5.2	CONTROLADOR PID.....	55
5.2.1	Acción Proporcional	56
5.2.2	Acción Integral	56
5.2.3	Acción Derivativa	57
5.3	MÉTODO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA	57
5.3.1	Simulación en MATLAB de controlador PID usando el método de respuesta en frecuencia	59
5.4	DEFINICION DE PARAMETROS DEL CONTROLADOR PID PARA EL PLC S7 1200 .	67
6.	IMPLEMENTAR LA LEY DE CONTROL DEL SISTEMA A CONTROLAR EN UN AUTÓMATA PROGRAMABLE S7 1200	69
6.1	ADECUACIÓN DE SEÑAL ANALOGICA	69
6.1.1	Normalización de señal análoga	70
6.1.2	Escalado de la señal análoga	70
6.2	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADOR PID EN EL PLC S7 1200	71
7.	ELABORAR EL SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DEL PROCESO A TRAVÉS DE SCADA.....	74
7.1	DISEÑO DE HMI	74
8.	PRUEBAS	75
8.1	INICIO DEL PROCESO	75
8.2	PRUEBA DE PROCESO INESTABLE.....	76
8.2.1	Prueba de proceso inestable por encima del set point.....	77
8.2.2	Prueba de proceso inestable por debajo del set point	77
	CONCLUSIONES	79
	BIBLIOGRAFIA	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Caudal correspondiente a la altura de nivel de líquido del proceso	21
Figura 2 Relación caudal de salida y altura de nivel de líquido	22
Figura 3 Modelo matemático del tanque	27
Figura 4 Respuesta en el tiempo a lazo abierto	30
Figura 5 Respuesta en frecuencia a lazo abierto	31
Figura 6 Respuesta en frecuencia a lazo cerrado	33
Figura 7 Respuesta en el tiempo a lazo cerrado	34
Figura 8 Configuración difuso reflectivo	36
Figura 9 Configuración difuso reflectiva del BR 100 DDT	36
Figura 10 Sensor BR100 DDT.....	37
Figura 11 Modo de ajuste del sensor fotoeléctrico BR 100 DDT.....	37
Figura 12 Ubicación de sensores fotoeléctricos en el tanque	38
Figura 13 Medidor de caudal de turbina.....	39
Figura 14 Medidor de caudal de turbina.....	40
Figura 15 Ubicación del medidor de caudal de turbina en el tanque.....	40
Figura 16 Medidor de presión diferencial MPX2010 DP.....	41
Figura 17 Ubicación de medidor diferencial de presión.....	42
Figura 18 Amplificador del medidor de presión diferencial.....	43
Figura 19 Válvula de paso por resorte	44
Figura 20 Principio de funcionamiento de válvula de paso por resorte	45
Figura 21 Servomotor hb805 BB+	46
Figura 22 . Componentes de un servo: a) carcasa; b) motor DC; c) potenciómetro; d) circuito de control.....	47
Figura 23. Pulsos PWM para servomotor con rango de 0° a 180°	48

Figura 24 Mecanismo de engrane cilíndrico recto y leva	49
Figura 25 Integración de engranaje cilíndrico recto y leva	50
Figura 26 Servo válvula.....	50
Figura 27 Arduino 2560.....	51
Figura 28 Ubicación de Arduino y amplificador del sensor MPX2010DP	52
Figura 29 Programa para control de servomotor.....	53
Figura 30 Lazo de regulación.....	54
Figura 31 Lazo de regulación del sistema.....	55
Figura 32 PI a lazo abierto	59
Figura 33 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PI a lazo abierto60	
Figura 34 PI a lazo cerrado	61
Figura 35 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PI a lazo cerrado	62
Figura 36 Respuesta en el tiempo del proceso a una entrada escalón con controlador PI a lazo cerrado	62
Figura 37 PID a lazo abierto.....	64
Figura 38 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PID a lazo abierto	65
Figura 39 PID a lazo cerrado.....	65
Figura 40 Respuesta en el tiempo del proceso a una entrada escalón con controlador PID a lazo cerrado.....	66
Figura 41 Bloque NORM_X PLC S7 1200	70
Figura 42 Bloque SCALE_X S7 1200.....	70
Figura 43 Normalización y escalado del proceso.....	71
Figura 44 Bloque PID_Compact.....	71
Figura 45 Definición de parámetros del controlador PID.....	72
Figura 46 Definición de entrada/salida	72

Figura 47 Imagen principal del HMI.....	74
Figura 48 Estado transitorio con error de tierras	75
Figura 49 Respuesta del controlador a proceso estable	76
Figura 50 Respuesta del controlador a proceso inestable	77
Figura 51 Respuesta del controlador a proceso inestable	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Densidad y viscosidad dinámica y cinemática del agua pura a diferentes temperaturas	19
Tabla 2 Caudal correspondiente a la altura de nivel del líquido del proceso.....	21
Tabla 3 medida de nivel en la salida del sensor diferencial de presión.....	43

INTRODUCCION

Una de las principales metas que se proponen las industrias es mejorar la calidad de sus procesos, y así mejorar los niveles de competencia, generando procesos más eficientes. La teoría de control permite obtener mejores parámetros de funcionamiento como lo son, por ejemplo un control de nivel y caudal exactos en los procesos de control de líquidos industriales. Esto se logra gracias a la aplicación de la teoría de control utilizando

- Autómatas programables
- Plataformas de programación con hardware Arduino
- Sensores adecuados a las necesidades del sistema
- Reguladores proporcionales de nivel
- Software para la supervisión de procesos, como Wincc ofrecido por SIEMENS

Este proyecto consiste en conservar constante el nivel de líquido presente en un tanque, sin importar la cantidad de líquido evacuada de dicho tanque. El control sobre el proceso con la finalidad expuesta con anterioridad es logrado mediante la implementación de un controlador PID. Se aplica un interfaz hombre máquina (HMI) con el objeto de supervisar el proceso a través de réplicas gráficas del mismo.

OBJETIVO GENERAL

Controlar y supervisar un proceso hidráulico con una plataforma Scada

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar un sistema hidráulico para el control de nivel
- Simular en MATLAB el sistema de control
- Diseñar y construir los adecuadores de señal para los transductores de nivel y caudal del sistema a controlar
- Aplicar una válvula de acción proporcional de caudal para controlar el nivel de líquido
- Diseñar la ley de control de nivel para el sistema
- Implementar la ley de control del sistema a controlar en un autómata programable S7 1200
- Elaborar el software para supervisión y control del proceso a través de SCADA

PASOS A SEGUIR PARA LA REALIZACIÓN EXITOSA DEL PROCESO

- ✓ Identificar la dinámica del sistema a controlar
- ✓ Identificar la resistencia hidráulica
- ✓ Determinar el modelo matemático en lazo abierto y lazo cerrado del sistema a controlar
- ✓ Determinar los elementos físicos del sistema en lazo cerrado
- ✓ Construir el sistema en lazo cerrado

ANTECEDENTE

Este proyecto tiene como antecedente un proyecto que se ha ido desarrollando paulatinamente a través de los años, en el programa de Tecnología Eléctrica, que tienen como finalidad implementar prácticas de regulación de variables físicas en el laboratorio de control.

Además de lo anteriormente señalado, este proyecto pretende dar continuación al proyecto de grado titulado "Diseño, construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquido de segundo orden". Realizado por los egresados del programa; Oscar Fernando Gil Trejos y David Robayo García, orientado por el Magister Sigilfredo Arregocés [1].

GLOSARIO

Atmosfera: Es la capa de aire que rodea la tierra. El aire está retenido por la tierra y no se difunde por el espacio, por su peso. Las capas más próximas a la superficie soportan el peso de las más alejadas y por tanto son más densas.

Caudal: Es el flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de fluido que circula por una sección determinada del conducto en la unidad de tiempo

Flujo: Expresa el movimiento de un fluido, pero también significa para nosotros la cantidad total de fluido que ha pasado por una sección determinada de un conducto.

Función de transferencia: La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo se define, en términos de Laplace, como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Modelos matemáticos: Cualquier tentativa de diseño de un sistema debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes de que el sistema pueda diseñarse en detalle o construirse físicamente. Tal predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama modelo matemático. Para los sistemas físicos, la mayoría de los modelos matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales. La dinámica de sistemas trata del modelado matemático y el análisis de la respuesta de los sistemas dinámicos.

Pascal: Un pascal equivale a la presión ejercida por una fuerza de 1 N que actúa sobre un área de 1 m².

Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

Presión: La presión es la magnitud que indica cómo se distribuye la fuerza sobre la superficie a la cual está aplicada. La medida de la presión se puede calcular entonces dividiendo la intensidad de la fuerza por el área de la superficie:

Por ser el cociente que resulta de dividir dos magnitudes escalares, la presión es también un escalar.

$$P = \frac{F}{A}$$

Scada: Software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita la retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso

automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo y permite su gestión e intervención.

Sensor: Es un dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica. Además los sensores pueden ser activos o pasivos.

Simulación de procesos: es la representación de un fenómeno o proceso mediante otro más simple, que permite analizar sus características, con ayuda de algún software.

Sistemas de control en lazo abierto: Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Sistemas de control en lazo cerrado: Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Transformada de Laplace: El método de la transformada de Laplace es un método operativo que aporta muchas ventajas cuando se usa para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Mediante el uso de la transformada de Laplace, es posible convertir muchas funciones comunes, tales como las funciones sinusoidales, las funciones sinusoidales amortiguadas y las funciones exponenciales, en funciones algebraicas de una variable S compleja. Las operaciones tales como la diferenciación y la integración se sustituyen mediante operaciones algebraicas en el plano complejo. Por tanto, en una ecuación algebraica, una ecuación diferencial lineal se transforma en una variable compleja S . Si se resuelve la ecuación algebraica en S para la variable dependiente, la solución de la ecuación diferencial (la transformada inversa de Laplace de la variable dependiente) encuentra mediante una tabla de transformadas de Laplace o una técnica de expansión en fracciones parciales.

Una ventaja del método de la transformada de Laplace es que permite el uso de técnicas gráficas para predecir el desempeño del sistema, sin tener que resolver las ecuaciones diferenciales del sistema. Otra ventaja del método de la transformada de Laplace es que, cuando se resuelve la ecuación diferencial, es posible obtener simultáneamente tanto el componente transitorio como el componente de estado estable de la solución.

Transductor: Es un convertidor de un tipo de energía a otra.

1. MODELADO MATEMATICO DE UN SISTEMA HIDRAULICO PARA NIVEL

1.1 IDENTIFICACION DE RESISTENCIA HIDRAULICA.

Una resistencia hidráulica es una pérdida de presión localizada que debe ser correctamente identificada. Una válvula hidráulica presenta una restricción al flujo de un fluido y se puede representar como:

$$\frac{\text{Cambio en la altura diferencial}}{\text{Cambio en la razon de flujo}} = Rh \quad [1.1.1]$$

$$Rh = \frac{dh}{dQ_0} \quad [1.1.2]$$

Donde

Rh	Resistencia en la válvula proporcional.
H	Altura del nivel de líquido máximo, presente en el tanque.
Q ₀	Caudal a la salida del tanque.

La resistencia del flujo líquido depende de las condiciones del flujo, ya sea el flujo laminar o turbulento.

1.1.1 CLASIFICACION DE FLUJO

Cuando entre dos partículas en movimiento existe gradiente de velocidad, o sea que una se mueve más rápido que la otra, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas.

Las fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas se pueden producir diferentes estados de flujo.

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan pero no rotan, o lo hacen pero con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo fue identificado por **O. Reynolds** y se denomina “**laminar**”, queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en forma de capas o láminas.

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto, y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria. Al pasar de unas trayectorias a otras, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Éste tipo de flujo se denomina "turbulento".

El flujo "turbulento" se caracteriza porque:

- Las partículas del fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas.
- La acción de la viscosidad es despreciable.
- Las partículas del fluido poseen energía de rotación apreciable, y se mueven en forma errática chocando unas con otras.
- Al entrar las partículas de fluido a capas de diferente velocidad, su momento lineal aumenta o disminuye, y el de las partículas vecina lo hacen en forma contraria.

Cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento. Osborne Reynolds estableció una relación que permite establecer el tipo de flujo que posee un determinado problema [2].

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad [1.1.1.1]$$

$$Re = \frac{V * \Phi}{\nu} \quad [1.1.1.2]$$

Donde

Re	Numero de Reynolds
V	Velocidad del fluido
Φ	Diámetro de la tubería
ν	Viscosidad cinemática del liquido

$0 < Re < 1$	Movimiento laminar «progresivo» altamente viscoso
$1 < Re < 100$	Laminar, altamente dependiente del número de Reynolds
$100 < Re < 10^3$	Laminar, se usa la teoría de capa límite
$10^3 < Re < 10^4$	Transición a flujo turbulento
$10^4 < Re < 10^6$	Turbulento, moderadamente dependiente del número de Reynolds
$10^6 < Re < \infty$	Turbulento, ligeramente dependiente del número de Reynolds

Se procede a identificar el tipo de fluido del proceso mediante el número de Reynolds.

$$Re = \frac{0.7794 * 0.0127}{0.893} \quad [1.1.1.3]$$

$$Re = 0.011 \quad [1.1.1.4]$$

Como se puede observar en la ecuación 1.1.1.4; $0 < Re < 1$, es decir, el flujo es laminar.

1.1.2 RESISTENCIA EN EL FLUJO LAMINAR

La resistencia del flujo laminar es constante.

Al considerar el flujo laminar a través de un tubo cilíndrico, la relación entre la altura diferencial h [m] y la razón de flujo [m^3/s] está dada por la fórmula de Hagen Poiseuille.

$$h = \frac{128vL}{g\pi D^4} Q \quad [1.1.2.1]$$

Donde

V	Viscosidad cinemática; [m^2/s]
L	Longitud del tubo; [m]
Φ	Diámetro del tubo; [m]

Por lo tanto, la resistencia del flujo laminar R_h para el flujo líquido a través de tubos cilíndricos está dada por

$$R_h = \frac{dh}{dQ} = \frac{128\nu L}{g\pi\phi^4} \left[\frac{s}{m^2} \right] \quad [1.1.2.2]$$

1.1.2.1 Viscosidad del agua.

La viscosidad es una propiedad de los líquidos que se opone al deslizamiento mutuo de dos capas líquidas adyacentes.

En todas las medidas de viscosidad es indispensable una exacta regulación de temperatura [3].

Tabla 1 Densidad y viscosidad dinámica y cinemática del agua pura a diferentes temperaturas

Temperatura °C	Densidad g/cm ³	Viscosidad dinámica centipoise (cP)	Viscosidad cinemática centistokes (cst)
0	0.99984	1.792	1.792
5	0.99996	1.520	1.520
10	0.99970	1.307	1.307
15	0.99910	1.138	1.139
20	0.99820	1.002	1.0038
25	0.99705	0.890	0.893
30	0.99565	0.797	0.801
35	0.99403	0.719	0.724
40	0.99221	0.653	0.658
45	0.99022	0.598	0.604
50	0.98805	0.548	0.554
55	0.98570	0.505	0.512
60	0.98321	0.467	0.475
65	0.98057	0.434	0.443
70	0.97778	0.404	0.413
75	0.97486	0.378	0.388
80	0.97180	0.355	0.365
85	0.96862	0.334	0.345
90	0.96532	0.315	0.326
95	0.96189	0.298	0.310
100	0.95835	0.282	0.295

Tabla tomada de la referencia [4]

1.1.3 RESISTENCIA HIDRAULICA EN EL FLUJO TURBULENTO.

La razón de flujo a través de una restricción se define como

$$Q = Kt\sqrt{h} \quad [1.1.3.1]$$

Donde

Kt	Constante
H	Altura correspondiente al nivel en el tanque
Q	Caudal de salida en el tanque

Puesto que Q y h están relacionadas por una ecuación no lineal, la resistencia del flujo turbulento R_h no es constante.

$$\frac{dh}{dQ} = \frac{2h}{Q} \quad [1.1.3.2]$$

$$R_h = \frac{2h}{Kt\sqrt{h}} \quad [1.1.3.3]$$

El hecho de que la resistencia del flujo turbulento R_h no sea constante, significa que debemos definirla mediante una condición de operación y usar este valor solamente en la vecindad de la condición de operación [3].

1.1.4 IDENTIFICACIÓN DE RESISTENCIA HIDRÁULICA DEL PROCESO A CONTROLAR

Para una adecuada identificación de la resistencia hidráulica del proceso se deben tener en cuenta algunos datos esenciales de las capacidades del proceso como lo son, el volumen, el nivel de líquido y la presión hidrostática. Estos datos se obtuvieron por medio del sensor MPX2010dp. Para mayor facilidad en la identificación de la resistencia hidráulica se realizó una tabla con los datos nombrados con anterioridad, los cuales se emplearon para construir la figura1.

Existe una relación no lineal entre el caudal de salida y el nivel, en otras palabras, si h es la altura del líquido y kt es una constante que depende del tipo de válvula y la densidad del líquido, el caudal de salida será:

$$Q = Kt\sqrt{h} \quad [1.1.4.1]$$

Dicha relación es representada de forma general en la siguiente gráfica. Teniendo en cuenta que Q_m y h_m corresponden a los valores medios del proceso.

Figura 2 Relación caudal de salida y altura de nivel de liquido

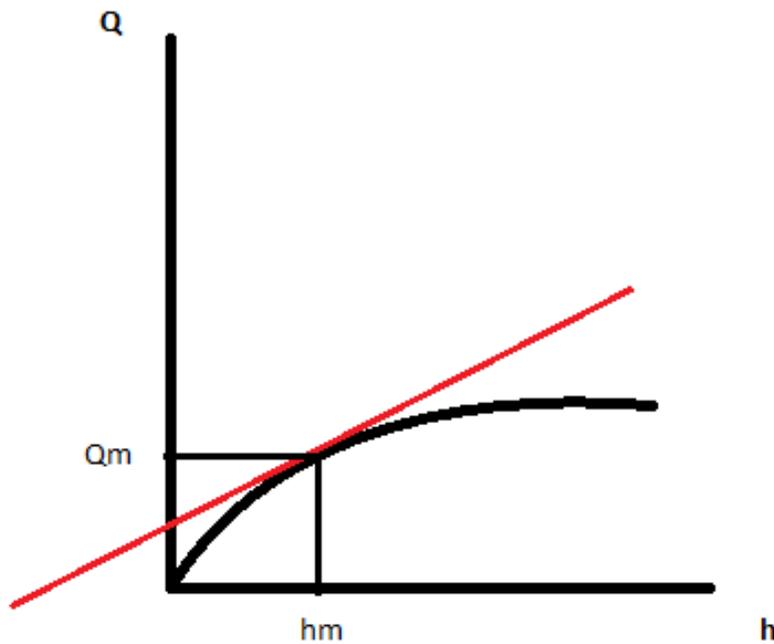


Figura tomada de la referencia [5].

Empleando una regresión mediante el modelo de ecuación de potencia se obtuvo:

$$Q = 1.7779 * h^{0.4678} \quad [1.1.4.2]$$

Donde

$$r^2 = 0.9998 \quad [1.1.4.3]$$

$$0.4678 \approx 0.5 \quad [1.1.4.4]$$

Al realizar una aproximación lineal de la ecuación 1.1.4.1 se obtiene la pendiente de la recta tangente a la relación no lineal entre caudal y nivel.

$$m = \left. \frac{dQ_o}{dh} \right] h = h_m \quad [1.1.4.5]$$

$$m = \frac{1}{2Kt\sqrt{h_m}} \quad [1.1.4.6]$$

El caudal medio en la salida se expresa como:

$$Q_m = Kt\sqrt{h_m} \quad [1.1.4.7]$$

$$Kt = \frac{Q_m}{\sqrt{h_m}} \quad [1.1.4.8]$$

Reemplazando 1.1.4.8 en 1.1.4.6 se tiene que:

$$m = \frac{Q_m}{2\sqrt{h_m}} * \frac{1}{\sqrt{h_m}} \quad [1.1.4.9]$$

$$m = \frac{Q_m}{2h_m} \quad [1.1.4.10]$$

Por lo tanto, la ecuación de la recta queda:

$$y = mx + b \quad [1.1.4.11]$$

$$Q_0(t) = m * h(t) \quad [1.1.4.12]$$

De la expresión anterior se define que:

$$Q_0 = \frac{h}{R_h} \quad [1.1.4.13]$$

Datos tomados de la referencia [5].

Teniendo en cuenta que el caudal depende de una diferencia de presión y del peso específico del líquido, se puede afirmar que, dependiendo del líquido y combinaciones del líquido, que se desea usar en el proceso, varía la resistencia hidráulica, está representada como R_h y definida en la ecuación anterior.

Como el líquido con el cual se realizaron las pruebas fue agua; la densidad específica del agua es igual a 1. $\gamma = 1$

$$R_h = \frac{h}{Q_0} \quad [1.1.4.14]$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2 * g * (P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad [1.1.4.15]$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2 * 9.81 * (9.12)}{1}} \quad [1.1.4.16]$$

$$Q_0 = 13.3766 \frac{m^3}{s} \quad [1.1.4.17]$$

$$R_h = \frac{0.741}{13.3766} \quad [1.1.4.18]$$

$$R_h = 0.055 \quad [1.1.4.19]$$

Donde

Q_0

Caudal de salida

G	Constante de aceleración de la gravedad
P	Presión del líquido
Γ	Densidad específica del líquido

1.2 MODELO MATEMÁTICO DEL TANQUE

1.2.1 IDENTIFICACIÓN DEL TANQUE

Para una adecuada identificación del tanque se debe determinar la función de transferencia del sistema. Donde la función de transferencia debe acoger la función linealizada de caudal con respecto a la altura, presentada en la tabla 2.

Las capacidades físicas del tanque son; base rectangular con un área de 171.61 cm² y altura de aproximadamente 70 cm, abierto y provisto de una válvula de restricción de descarga.

Se toma la ecuación 1.1.4.12 y se reemplaza en la ecuación de balance de masa.

$$Q_i(t) - Q_o(t) = A * \frac{dh(t)}{dt} \quad [1.2.1.1]$$

Donde

Q_i	Caudal en la entrada
Q_o	Caudal en la salida
A	Área del tanque en decímetros
h	Altura correspondiente al nivel del tanque

Se tiene que:

$$Q_i(t) - m * h(t) = A * \frac{dh(t)}{dt} \quad [1.2.1.2]$$

Transformando al dominio de Laplace:

$$Q_i(s) = ASH(s) + mH(s) \quad [1.2.1.3]$$

$$Q_i(s) = H(s)(AS + m) \quad [1.2.1.4]$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{AS + m} \quad [1.2.1.5]$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{\frac{A}{m}S + 1} \quad [1.2.1.6]$$

$$\tau = \frac{A}{m} \quad [1.2.1.7]$$

Donde

T Constante de tiempo equivalente al 63.2%.

La ganancia del sistema está dada por:

$$K = \frac{1}{m} \quad [1.2.1.8]$$

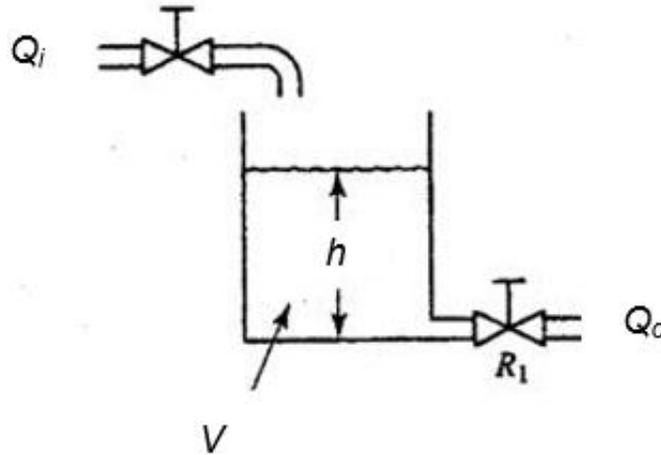
Entonces se puede definir la ganancia como expresión matemática, conocida como el modelo del sistema en forma de función de transferencia.

$$G(s) = \frac{K}{TS + 1} \quad [1.2.1.9]$$

Datos tomados de la referencia [5].

1.3 MODELO MATEMÁTICO LINEALIZADO DEL TANQUE

Figura 3 Modelo matemático del tanque



$$Q_i(t) - Q_o(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad [1.3.1]$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = A * \frac{dh(t)}{dt} \quad [1.3.2]$$

Si se considera la relación del caudal de salida y el nivel de agua evacuado desde el tanque, se tiene que:

$$Q_o(t) = \frac{h(t)}{Rh} \quad [1.3.3]$$

Reemplazo [1.3.3] y [1.3.2] en [1.3.1].

$$A * \frac{dh(t)}{dt} = Q_i(t) - \frac{h(t)}{Rh} \quad [1.3.4]$$

$$Q_i(t) = A * \frac{dh(t)}{dt} + \frac{h(t)}{Rh} \quad [1.3.5]$$

Se obtiene así una ecuación diferencial de primer orden, como la representada en la ecuación [1.3.5].

Con el objetivo de adquirir de forma rápida la función de transferencia, se procede a transformar al dominio de Laplace

$$\mathcal{L} \left\{ Qi(t) = A * \frac{dh(t)}{dt} + \frac{h(t)}{Rh} \right\} \quad [1.3.6]$$

$$Qi(s) = A * h(s) * S + \frac{h(s)}{Rh} \quad [1.3.7]$$

$$Qi(s) = h(s) \left[(A * S) + \frac{1}{Rh} \right] \quad [1.3.8]$$

$$\frac{h(s)}{Qi(s)} = \left[\frac{1}{(A * S) + \frac{1}{Rh}} \right] \quad [1.3.9]$$

$$\frac{h(s)}{Qi(s)} = \frac{Rh}{(A * Rh * S) + 1} \quad [1.3.10]$$

Datos tomados de la referencia [5].

2. SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

2.1 PRUEBA A LAZO ABIERTO

2.1.1 SISTEMA A LAZO ABIERTO

Un sistema a lazo abierto es aquel sistema, donde la salida es independiente de la entrada. En otras palabras la señal de salida del sistema no se compara con la señal de salida deseada. En consecuencia no se evidencia el error.

Función de transferencia a lazo abierto

$$\frac{h(s)}{Qi(s)} = \frac{Rh}{(A * Rh * S) + 1} \quad [2.1.1.1]$$

$$\frac{h(s)}{Qi(s)} = \frac{0.055}{0.943855s + 1} \quad [2.1.1.2]$$

2.1.1.1 Simulación respuesta en el tiempo a lazo abierto

```
Rh = [0.055];  
A = [17.161];  
Num = [ Rh ];  
Den = [ A*Rh 1 ];  
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num,den)  
G = tf(num,den)  
step(G)  
grid on
```

Función de transferencia

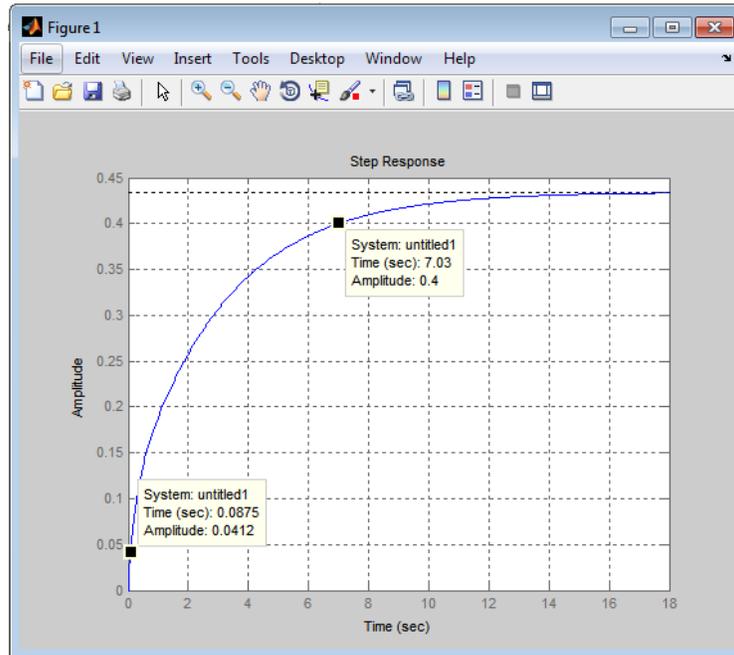
$$\frac{0.055}{0.9439s + 1} \quad [2.1.1.1.1]$$

Tiempo de subida
Tiempo de establecimiento

Tiempo entre 10% y 90% de la amplitud
Tiempo que tarda en estabilizarse el proceso.

Tiempo de subida	6.9425s
Tiempo de establecimiento	16s.

Figura 4 Respuesta en el tiempo a lazo abierto



2.1.1.2 Simulación de respuesta en frecuencia a lazo abierto

```

Rh = [0.048];
A = [17.161];
Num = [ Rh ];
Den = [ A*Rh 1 ];
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num,den)
G =tf(num,den)
bode(G)
grid on

```

Ganancia	Infinito
Fase	Infinito
Corte en frecuencia de ganancia	NaN
Corte en frecuencia de fase	NaN

Donde:

Ganancia

Cambio en la ganancia, necesario para desestabilizar el proceso.

Fase

Cambio en la fase, necesario para desestabilizar el sistema a lazo cerrado.

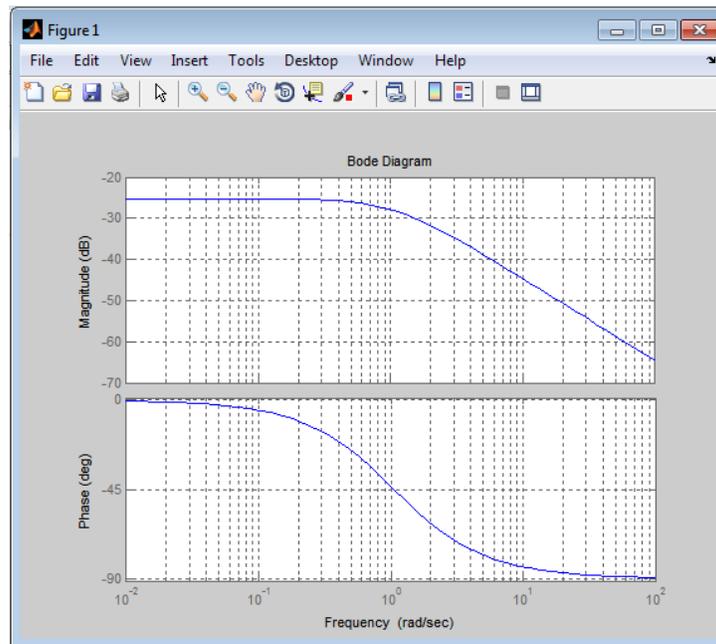
Corte en frecuencia de ganancia

Frecuencia correspondiente a ganancia igual a 0.

Corte en frecuencia de fase

Frecuencia correspondiente a fase igual a -180° .

Figura 5 Respuesta en frecuencia a lazo abierto



2.2 PRUEBA A LAZO CERRADO

2.2.1 SISTEMA A LAZO CERRADO

El sistema a lazo cerrado es aquel sistema, donde la señal de salida tiene efecto sobre la señal de entrada. En otras palabras se compara la señal de salida obtenida con respecto a la señal de salida deseada, y a esta diferencia se le denomina como el error en estado estacionario del proceso.

Para cerrar el lazo se aplica el teorema Gaussiano de lazo directo expresado en la ecuación 2.2.1.1

Teorema Gaussiano de lazo directo

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G(S)}{G(S) * H(S) + 1} \quad [2.2.1.1]$$

Ecuación tomada de la referencia (5)

Donde

G(S) Función de transferencia a lazo abierto
H(S) Realimentación en lazo cerrado

En el caso particular de este proyecto la realimentación H(S) es unitaria.

$$\frac{G(S)}{G(S) * H(S) + 1} = \frac{\frac{Rh}{(A * Rh * S) + 1}}{\frac{Rh}{(A * Rh * S) + 1} * (1) + 1} \quad [2.2.1.2]$$

$$\frac{G(S)}{G(S) * H(S) + 1} = \frac{Rh}{(A * Rh * S) + Rh + 1} \quad [2.2.1.3]$$

$$\frac{G(S)}{G(S) * H(S) + 1} = \frac{0.055}{0.943855s + 0.055 + 1} \quad [2.2.1.4]$$

Función de transferencia a lazo cerrado

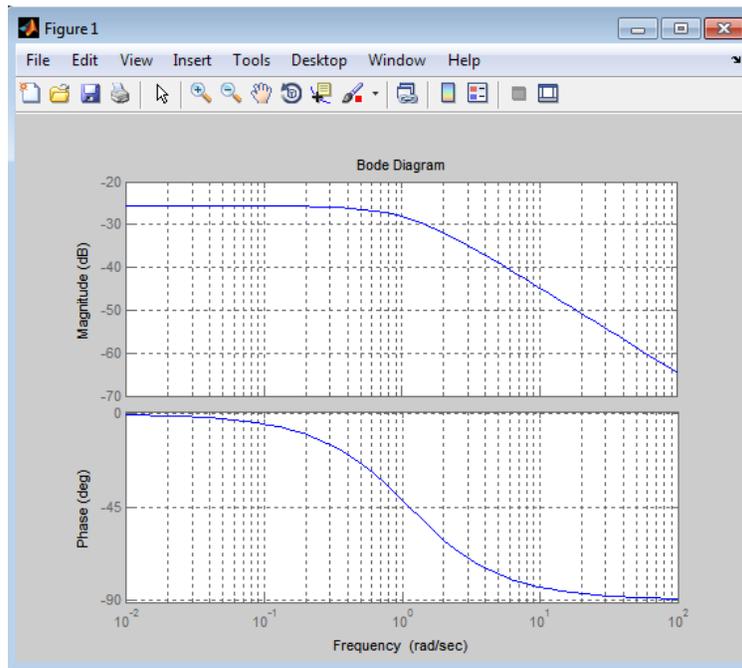
$$\frac{G(S)}{G(S) * H(S) + 1} = \frac{0.048}{0.943855s + 1.055} \quad [2.2.1.5]$$

2.2.1.1 Simulación de respuesta en frecuencia a lazo cerrado

```
Rh = [0.029];  
A = [17.161];  
Num = [ Rh ];  
Den = [ A*Rh 1 ];  
[num3,den3] = feedback(num,den,1,1);  
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num3,den3)
```

```
G = tf(num3,den3)
bode(G)
grid on
```

Figura 6 Respuesta en frecuencia a lazo cerrado



2.2.1.2 Simulación de respuesta en el tiempo a lazo cerrado

Función de transferencia

$$\frac{0.055}{0.9437s + 1.055} \quad [2.2.1.1]$$

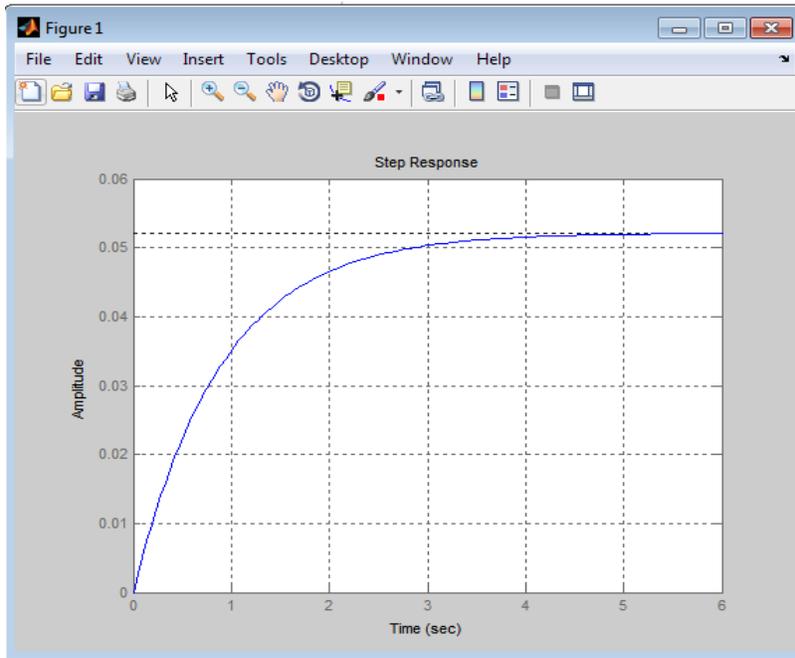
Tiempo de subida
Tiempo de establecimiento

Tiempo entre 10% y 90% de la amplitud
Tiempo que tarda en estabilizarse el proceso.

Tiempo de subida
Tiempo de establecimiento

2.354s
4.5s.

Figura 7 Respuesta en el tiempo a lazo cerrado



2.3 DETERMINACIÓN DEL ERROR EN ESTADO ESTACIONARIO

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + k} \quad [2.3.1]$$

$$k = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad [2.3.2]$$

$$k = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad [2.3.3]$$

$$k = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.048}{0.823728s + 1} = 0.055 \quad [2.3.4]$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + 0.055} \quad [2.3.5]$$

$$\%e_{ss} = 0.94786 \quad [2.3.6]$$

El error en estado estacionario es la diferencia entre la respuesta deseada a la salida del sistema y la respuesta obtenida (5). Como se puede apreciar en la figura anterior el error en estado estacionario es del 95%. Dicho error es de un valor

elevado y debe ser compensado con una ley de control, tal como se indica en el capítulo 5.

2.4 OBSERVACIÓN

- ✓ Un margen de ganancia infinita significa que el proceso tolera grandes cambios en los parámetros del proceso antes de hacerse inestable a lazo cerrado.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS ADECUADORES DE SEÑAL PARA LOS TRANSDUCTORES DE NIVEL Y CAUDAL DEL SISTEMA A CONTROLAR

3.1 SELECCIÓN DE SENSOR FOTOELECTRICO

El sensor fotoeléctrico permite detectar la presencia de líquido en puntos específicos del tanque. Este sensor puede detectar la presencia de líquido transparente en configuración difuso reflectivo; y posee una zona muerta muy pequeña, lo cual hace que sea más utilizado para medición en espacios estrechos. Es por ello que ha sido escogido para cumplir con una de las funciones principales de este proyecto, la medición de límites de nivel.

Figura 8 Configuración difuso reflectivo



Figura tomada de la referencia [6].

3.1.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR FOTOELÉCTRICO BR 100-DDT

Figura 9 Configuración difusa reflectiva del BR 100 DDT

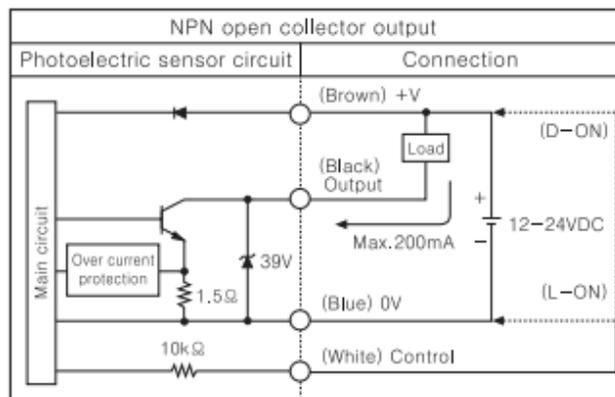


Figura tomada de la referencia [6].

Figura 10 Sensor BR100 DDT



Figura tomada de la referencia [6].

Tensión de alimentación	24 V DC
Corriente de consumo	Max 45 mA
Tensión de salida a presencia de liquido	24V DC
Tensión de salida a ausencia de liquido	0V DC

Datos tomados de la referencia [6]

3.1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR BR 100 DDT EN CONFIGURACIÓN DIFUSO REFLECTIVO

Figura 11 Modo de ajuste del sensor fotoeléctrico BR 100 DDT

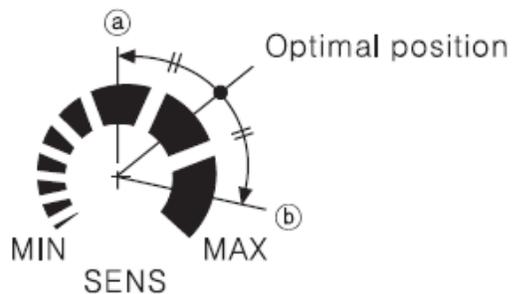


Figura tomada de la referencia [6].

3.1.2.1 Ajuste de sensibilidad del sensor fotoeléctrico BR 100 DDT

- La sensibilidad del sensor debe ser ajustada dependiendo del lugar de instalación y del tipo de elemento a detectar.

- Colocar el reflector catadióptrico en tal posición que sea detectada por el rayo que emite el sensor, luego ajustar el sensor en medio del rango de operación requerido.
- Colocar un elemento a detectar en medio del sensor y el objetivo catadióptrico. Ajustar hasta obtener el resultado requerido e instalar [6].

3.1.2.2 Reflector catadióptrico

Un elemento catadióptrico es aquel con la propiedad de reflejar y reflectar la luz a una distancia focal. El reflector catadióptrico contiene en su interior una combinación de pequeños espejos y lentes curvos que reflejan y reflectan la luz cuando el haz del rayo golpea la curvatura de los espejos. A la longitud de este rayo se le llama distancia focal.

3.1.3 INTEGRACIÓN DEL SENSOR BR 100 DDT AL PROCESO

La sensibilidad de los sensores ha sido ajustada para detectar líquido transparente. Los sensores fueron ubicados en dos puntos críticos del tanque elegidos de manera arbitraria; paralelamente a los reflectores catadióptricos. Donde el sensor inferior indica que el nivel de líquido es mínimo y el sensor superior indica que el nivel de líquido es máximo. De esto se deduce que el nivel siempre debe conservarse en una región limitada por los dos sensores. La figura 12 es una fotografía de los sensores y su relación con el tanque.

Figura 12 Ubicación de sensores fotoeléctricos en el tanque



A cada sensor se le asignó una entrada al PLC SIMATIC S7-1200. Debido a una gran caída de tensión en la señal de los sensores fotoeléctricos, se conectó a su salida un buffer; cuya salida a su vez se conectó directamente al PLC. De esta manera se asegura una tensión de 0V o 24V a la entrada del PLC.

3.2 SELECCIÓN DEL MEDIDOR DE CAUDAL DE TURBINA

La medida de caudal en la salida del tanque a controlar es importante; el valor de esta medida debe ser enviado al PLC en parámetro de tensión, además de cumplir con la condición mencionada anteriormente el medidor de caudal de turbina es de tamaño pequeño, lo que hizo que fuera más conveniente para acoplarlo al tanque. Por tales motivos se eligió el medidor de caudal de turbina POW 109D3B.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MEDIDOR DE CAUDAL POW 109 D3B

Tensión máxima de salida	3.6V
Corriente de salida	300mA
Presión de trabajo	0-1.75 MPa
Rango de flujo recomendado	1.5-20L /min

Datos tomados de la fuente [7].

Figura 13 Medidor de caudal de turbina



Figura tomada de la referencia [7]

3.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MEDIDOR DE CAUDAL DE TURBINA

El medidor de caudal de turbina consiste de múltiples aspas frente a una tubería, perpendicular al movimiento del líquido. El paso del líquido a través de las aspas ejerce una fuerza de rotación que hace girar al rotor a una velocidad que resulta directamente proporcional al caudal. La velocidad de rotación de la turbina es censada por un transductor magnético, cuya señal de salida es un tren de pulsos, los cuales pueden ser contados y totalizados. El número de pulsos contados en un período de tiempo dado, es directamente proporcional al caudal volumétrico [8]

Figura 14 Medidor de caudal de turbina

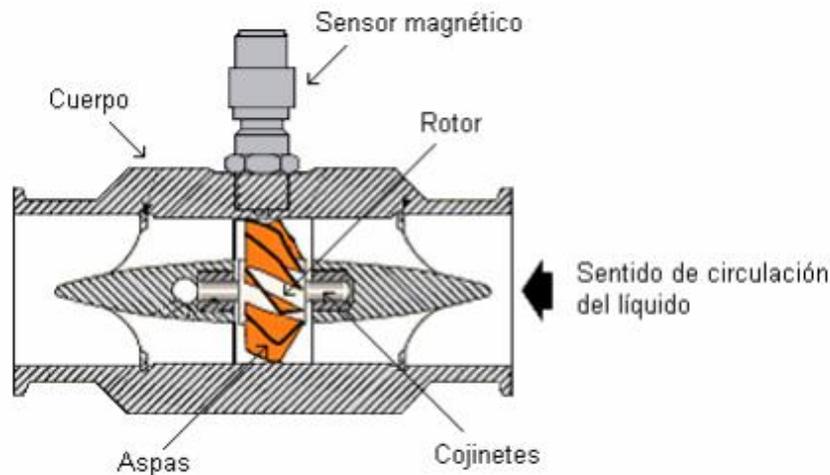


Figura tomada de la referencia [8].

3.2.3 INTEGRACIÓN DEL MEDIDOR DE CAUDAL DE TURBINA AL PROCESO

Figura 15 Ubicación del medidor de caudal de turbina en el tanque



Se conectó una reducción 1" a 1/2" al tubo de entrada del medidor de caudal y al tubo de salida del tanque, pues el orificio de salida del tanque mide 1" de diámetro mientras que el orificio de entrada del medidor de caudal mide 1/2" de diámetro.

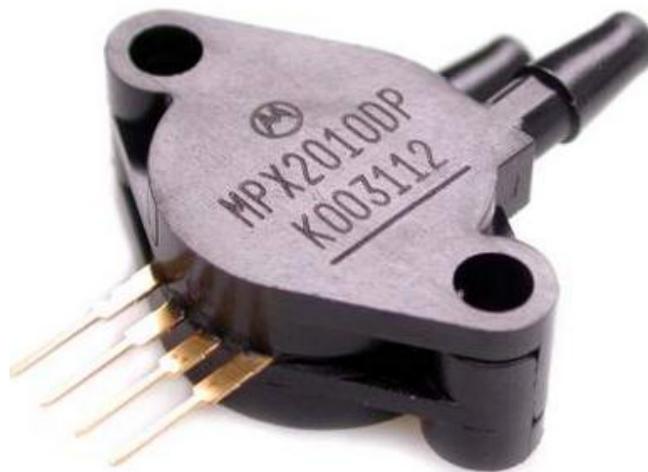
3.3 MEDIDOR DE PRESION DIFERENCIAL

El medidor diferencial de presión nos permite medir el nivel del proceso continuamente en el tiempo. Ya que posee una salida análoga, resultado de una resta entre la presión atmosférica y la presión hidrostática, dicha cualidad es aprovechada por el controlador PID. Debido a que la entrada análoga del PLC S7 1200 recibe de 0V a 10 V, se hizo óptimo para este proceso el medidor de presión diferencial MPX2010 DP.

3.3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MEDIDOR DE CAUDAL MPX2010 DP

Tensión de entrada	10 - 16V
Tensión de salida	0 25 mV
Presión de trabajo	0 10 KPa
Datos tomados de la fuente [1]	

Figura 16 Medidor de presión diferencial MPX2010 DP



3.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MEDIDOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL MPX2010DP

El medidor diferencial de presión tiene dos entradas por tubería. Por tales entradas ingresan la presión atmosférica y el líquido, haciendo contacto con un diafragma de silicio, el cual contiene un elemento piezoresistivo que varía su resistencia dependiendo exclusivamente de la fuerza mecánica ejercida por la presión atmosférica y la presión hidrostática. Consiguiendo así que la presión atmosférica sea la referencia y la presión hidrostática proporcional a la altura del líquido. Lo que permite la medición de nivel.

3.3.3 INTEGRACIÓN DEL MEDIDOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL MPX2010DP AL PROCESO

Teniendo en cuenta que el valor de la tensión de salida entregada por el sensor es del orden de mili voltios [mV], se hizo necesaria la implementación de un amplificador de instrumentación en su salida para garantizar la tensión en la entrada analógica del PLC S7 1200 (0-10V); además de evitar errores en la medida de nivel, los valores análogos obtenidos por el sensor de presión diferencial se presentan en la tabla 3.

Figura 17 Ubicación de medidor diferencial de presión

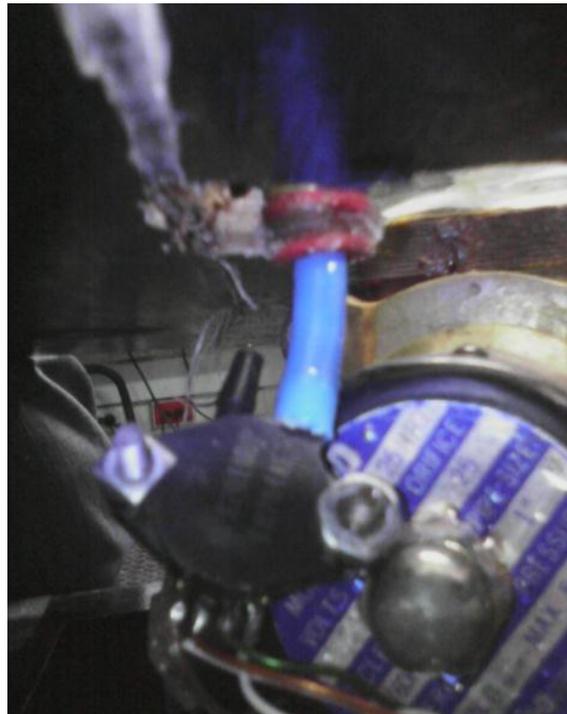


Figura 18 Amplificador del medidor de presión diferencial

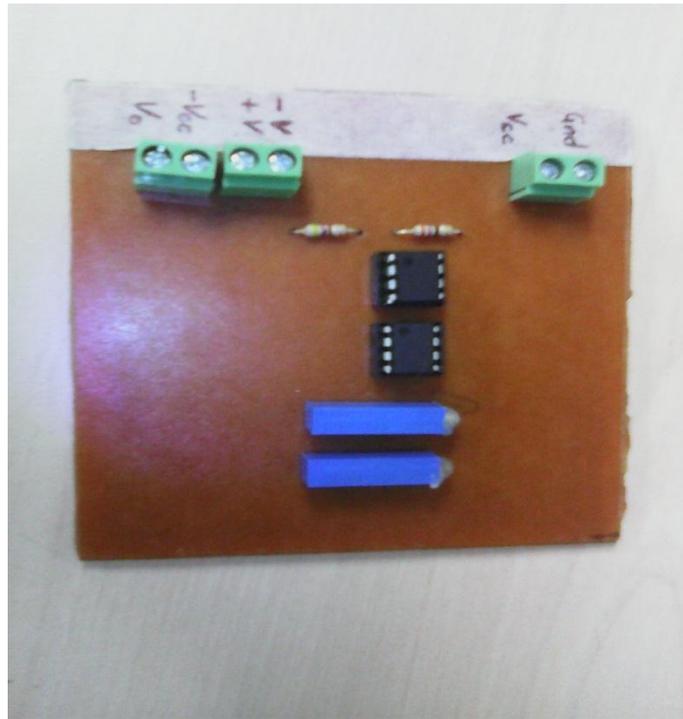


Tabla 3 medida de nivel en la salida del sensor diferencial de presión

NIVEL (L)	TENSION (V)
0	0.31
1	0.99
2	1.68
3	2.47
4	3.15
5	3.98
6	4.74
7	5.48
8	6.23
9	6.97
10	7.72
11	8.48
12	9.22
13	10

4. APLICAR UNA VÁLVULA DE ACCIÓN PROPORCIONAL DE CAUDAL PARA CONTROLAR EL NIVEL DE LÍQUIDO

Con la finalidad de controlar el caudal en la tubería de entrada del tanque se procede a diseñar e implementar una válvula proporcional de caudal. Dicha válvula proporcional consta de una válvula de paso que restringe el flujo del líquido y un servomotor que se encarga de posicionar la válvula. Logrando así controlar el caudal mediante la válvula proporcional.

4.1 VALVULA PROPORCIONAL

Una válvula proporcional regula la presión y el caudal que fluye por un conducto, en una señal eléctrica; bien sea de corriente o tensión. Su principal aplicación es el control de posición y de fuerza, haciendo que los movimientos sean precisos y proporcionales a la señal eléctrica.

4.2 SELECCIÓN DE VALVULA DE PASO POR RESORTE

La válvula debe posicionarse gradualmente según lo haga el servomotor, requisito que cumple a cabalidad la válvula de paso por resorte. Puesto que el resorte dentro de la válvula también puede ser posicionado gradualmente hasta que la válvula sea abierta o cerrada por completo. A base de lo explicado se eligió la válvula de paso por resorte para dar seguridad al proceso.

4.2.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA VÁLVULA DE PASO POR RESORTE

Figura 19 Válvula de paso por resorte



Cuerpo	Hierro
Presión de trabajo	16 bares
Presión diferencial	2 bares
Temperatura de trabajo	2°C - 95°C

Datos tomados de la referencia [1].

4.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE PASO POR RESORTE

La válvula de paso por resorte tiene por objetivo cerrar por completo el paso de un fluido en circulación -bien sea gaseoso o líquido- en un sentido y dejar paso libre en el contrario. Tiene la ventaja de un recorrido mínimo del disco u obturador a la posición de apertura total.

Se utilizan cuando se pretende mantener a presión una tubería en servicio y poner en descarga la alimentación. El flujo del fluido que se dirige desde el orificio de entrada hacia el de utilización tiene el paso libre, mientras que en el sentido opuesto se encuentra bloqueado [9].

Figura 20 Principio de funcionamiento de válvula de paso por resorte

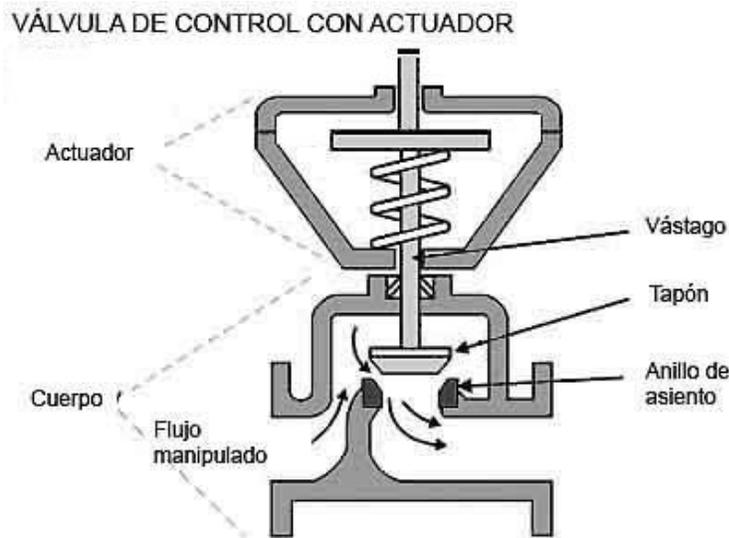


Figura tomada de la referencia [9].

4.3 SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR

La variable fundamental de este proyecto es el nivel por eso se debe ser muy exigente en la elección del motor que controla la válvula de entrada del proceso. Se

necesita un motor que pueda posicionarse en un punto preciso, adicional a ello debe tener un gran torque. Por tales motivos se eligió el servomotor HS805BB+.

4.3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SERVOMOTOR HS805BB+

Rotación	0° a 180°
Piñones	Carbonita
Sistema de control	PWM
Tensión	4.8V
Torque	19.8kg.cm
Velocidad de operación sin carga	0.19sec/60°
Tensión	6V
Torque	24.7 kg.cm
Velocidad de operación sin carga	0.19sec/60°

Datos tomados de la referencia [10].

Figura 21 Servomotor hb805 BB+



Figura tomada de la referencia [10].

4.3.2 SERVOMOTOR

El servomotor es un motor D.C. que tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación y mantenerse estable. Es muy usado en automatización debido a su alta precisión.

5.2.2.1 Partes principales del servomotor:

- ❖ **Motor de corriente continua DC:** Cuando se aplica un potencial a sus terminales el motor gira en un sentido a su máxima velocidad. Debe invertirse el potencial en sus terminales para invertir el sentido de giro.
- ❖ **Engranajes reductores:** tren de engranajes que se encarga de la alta velocidad de giro del motor para acrecentar su capacidad de torque.
- ❖ **Sensor de desplazamiento:** potenciómetro colocado en el eje de salida del servomotor utilizado para conocer la posición angular del motor.
- ❖ **Circuito de control:** es una placa electrónica que implementa una estrategia de control de la posición por realimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada) con la posición actual medida por el potenciómetro. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la posición necesaria para reducir el error [11].

Figura 22 . Componentes de un servo: a) carcasa; b) motor DC; c) potenciómetro; d) circuito de control

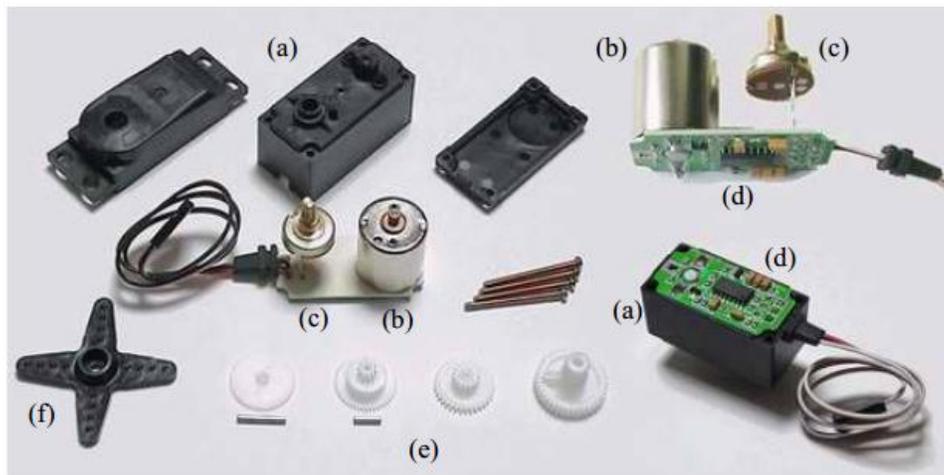


Figura tomada de la referencia [11].

5.2.2.2 Principio de funcionamiento del servomotor

Los servomotores disponen de tres cables: dos cables de alimentación y un único cable de control que indica la posición deseada mediante señales PWM.

5.2.2.2.1 Modulación por ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulso consiste en producir una onda periódica y cuadrada positiva con el fin de variar su ciclo útil y a su vez variar la cantidad de

energía transmitida a la carga. El valor de duración de la onda positiva es equivalente a la posición deseada.

$$\frac{t_{pos}}{T} = K\% \quad [5.2.2.1.1]$$

Donde:

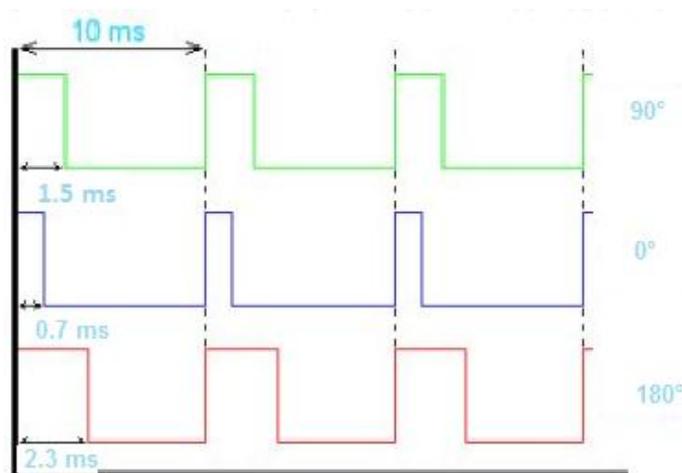
t_{pos}	Tiempo positivo (ancho de pulso); [s]
T	Longitud del tubo; [1/s]
K%	Ciclo útil; [s ²]

4.4 INSTALACION DE LA VALVULA PROPORCIONAL DE CAUDAL

Luego de seleccionar los elementos adecuados para la válvula proporcional, se procedió a la unión de ellos. El servomotor se acopló a la válvula mediante un engranaje cilíndrico de acero encargado de hacer presión sobre el mecanismo que acciona el resorte de la válvula. A dicha unión se le ha asignado el nombre de servo válvula. La servo válvula es controlada por una plataforma Arduino a su vez conectada al PLC maestro del sistema.

4.4.1 FUNCIONAMIENTO DE SERVOMOTOR MEDIANTE ONDAS PWM

Figura 23. Pulsos PWM para servomotor con rango de 0° a 180°



El control del servomotor se lleva a cabo por medio de una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servomotor tiene su rango de operación, que corresponde con el ancho de pulso máximo y mínimo recibido por el mecanismo. El servomotor utilizado en este proyecto tiene como margen de operación mínimo es de 700 μ s y el margen máximo de operación es de 2300 μ s, equivalente a 0° y 180° respectivamente.

Si se desea mantener el servo mecanismo en la misma posición durante un tiempo prolongado, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe una fuerza externa que intente mover el mecanismo de posición, el mecanismo opondrá la resistencia equivalente a la fuerza del servomotor.

4.4.2 MECANISMO DE ENGRANE CILÍNDRICO RECTO DE LA SERVO VÁLVULA

El mecanismo cilíndrico recto es bastante benéfico si se quiere disminuir la velocidad de movimiento del motor. Cuando el servomotor inicia su giro en un movimiento circular, mueve la rueda dentada ubicada en su eje de rotación e inicia a su vez el movimiento de la leva dentada mecánica, que con su lado recto ejerce una presión proporcional a la posición angular del servomotor sobre el mecanismo que desplaza linealmente el resorte de la válvula, haciendo menor la velocidad del motor. De esta manera se logra controlar el caudal que fluye a través de la servo válvula.

Figura 24 Mecanismo de engrane cilíndrico recto y leva



Figura 25 Integración de engranaje cilíndrico recto y leva

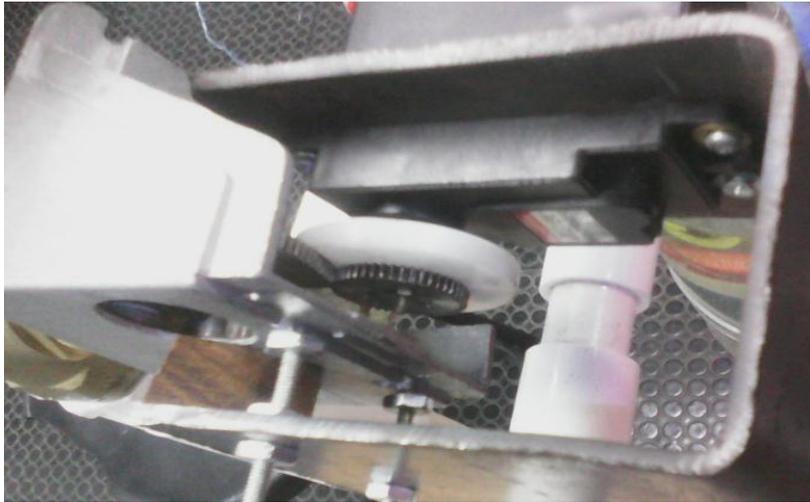


Figura 26 Servo válvula



4.4.3 PLATAFORMA ARDUINO MEGA 2560

La plataforma Arduino Mega es controlada por un micro controlador ATMEGA 2560. La plataforma Arduino es solo una extensión de las funciones del micro controlador ATMEGA 2560 en una placa integrada con elementos complementarios para el adecuado funcionamiento de la plataforma. La plataforma posee 54 puertos de entradas y salidas digitales, de los cuales 14 salidas son en señales PWM.

4.4.3.1 Características técnicas de la plataforma Arduino

Micro controlador	ATMEGA 2560
Tensión de operación	5V
Memoria Flash	256 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Figura 27 Arduino 2560

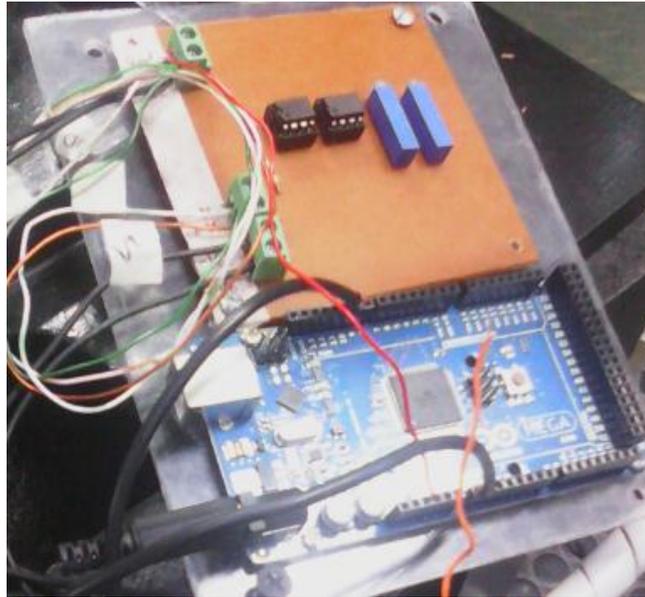


4.4.4 CONEXIÓN DE LA VÁLVULA PROPORCIONAL DE CAUDAL A PLATAFORMA ARDUINO

Los cables de alimentación del servomotor fueron conectados a las entradas de alimentación de la plataforma Arduino, el cable de control del servomotor fue conectado a una de las salidas PWM que posee la plataforma Arduino.

El entorno de programación de la plataforma Arduino ofrece el control de servomotores a través de una librería. La librería Servo del Arduino Mega permite controlar hasta 12 servomotores juntos y suministra señales PWM en algunos de sus pines de salida. Para el caso particular de este proyecto la señal de control para el servomotor es recibida desde la única salida analógica del PLC S7 1200. De esta manera la plataforma Arduino procesa la señal según las restricciones determinadas en su programación y modula el ancho de pulso en la salida. En otras palabras, el pulso es más ancho cuanto más alta sea la tensión suministrada por el Arduino.

Figura 28 Ubicación de Arduino y amplificador del sensor MPX2010DP



4.4.4.1 Programa para control de Servomotor

Servo: Es una librería perteneciente a la plataforma Arduino. Se pueden utilizar hasta 12 servomotores sin interferir en la funcionalidad de salidas PWM. Pero si se usa más de 12 servomotores se deshabilita la funcionalidad de salida PWM en los pines 11 y 12 de la plataforma Arduino.

Int: Variable de entrada entera de la señal analógica convertida a una resolución de 10 bits. Esta variable permite almacenar variables de máximo 16 bits.

Void setup(): Dentro de los paréntesis de void setup se le indica a la plataforma los pines definidos como entradas y salidas. Las entradas analógicas no deben definirse dentro de void setup.

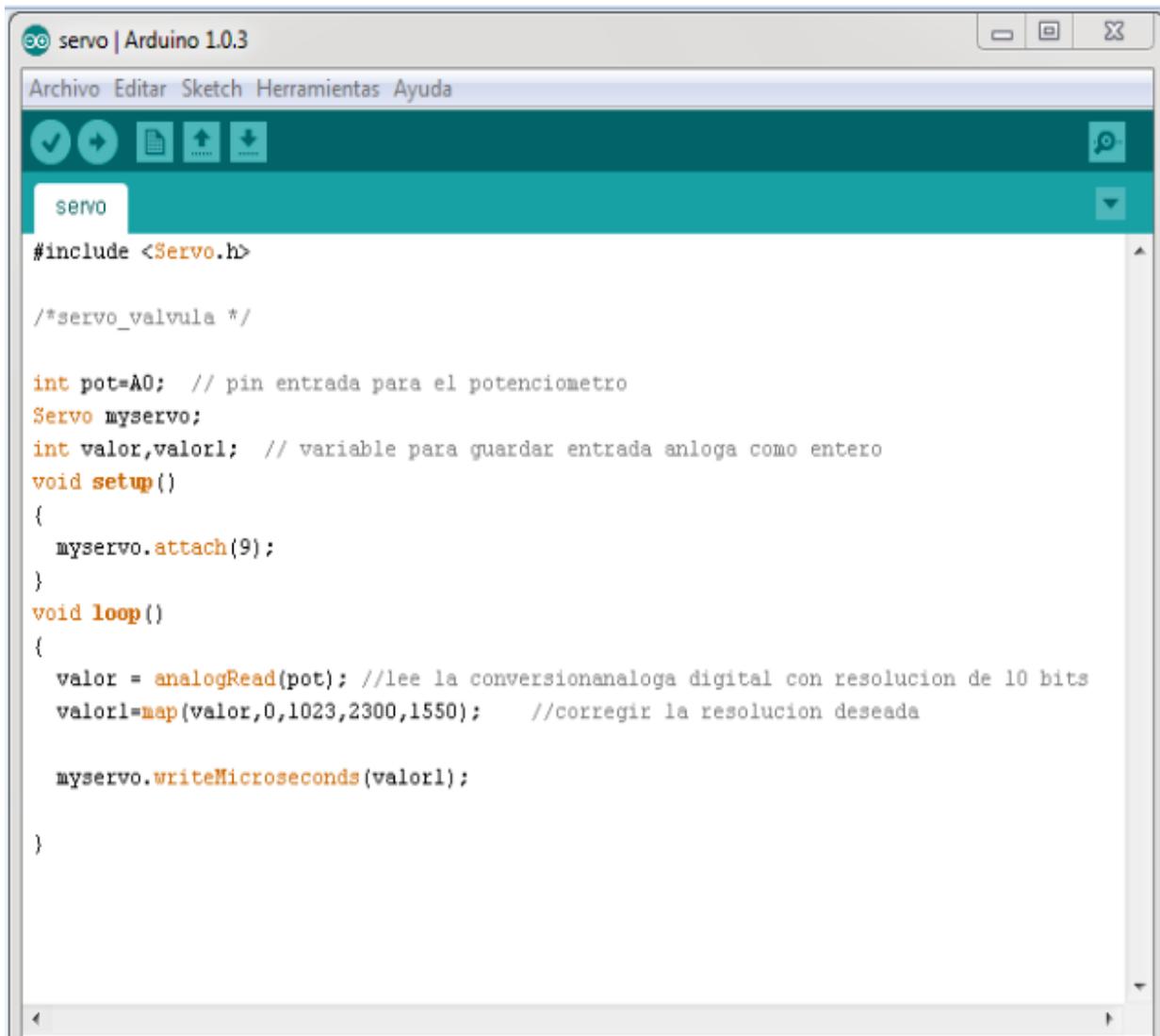
Void loop: Dentro de los paréntesis de void loop se elabora el programa principal.

analogread: Lee la señal analógica de entrada.

map: Este comando permite definir el rango de posición donde se desea mantener y variar el servo. En el ejemplo presentado en la figura 27, se adecua la señal de salida de manera que, el servomotor varíe entre 0° y 45°.

writeMicroseconds: Lee el valor guardado en la memoria llamada valor1 y la convierte en microsegundos, luego este valor en la salida digital definida anteriormente.

Figura 29 Programa para control de servomotor



```
servo | Arduino 1.0.3
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
servo
#include <Servo.h>

/*servo_valvula */

int pot=A0; // pin entrada para el potencio metro
Servo myservo;
int valor,valor1; // variable para guardar entrada analoga como entero
void setup()
{
  myservo.attach(9);
}
void loop()
{
  valor = analogRead(pot); //lee la conversionanaloga digital con resolucion de 10 bits
  valor1=map(valor,0,1023,2300,1550); //corregir la resolucion deseada

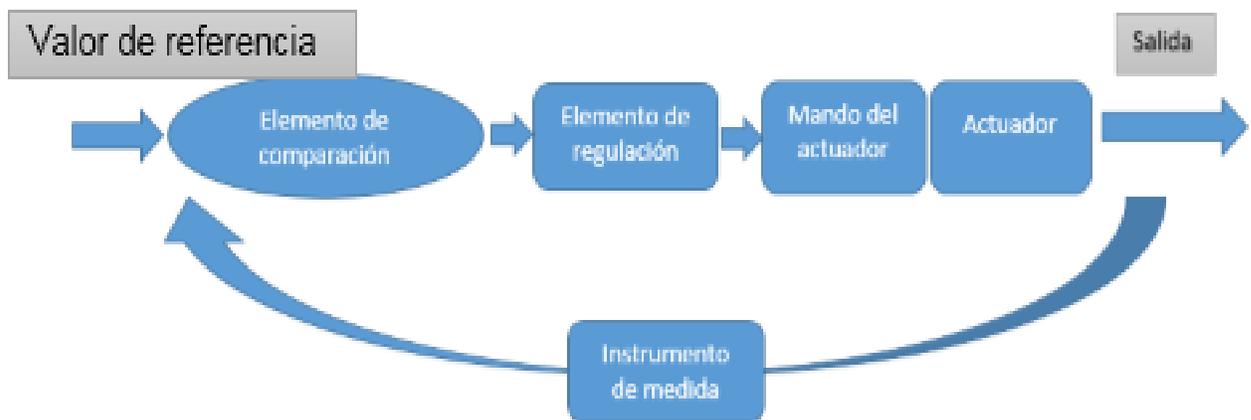
  myservo.writeMicroseconds(valor1);
}
```

5. DISEÑAR LA LEY DE CONTROL DE NIVEL PARA EL SISTEMA

5.1 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS FISICOS DE REGULACIÓN

La regulación consiste en desarrollar el control continuo a lazo cerrado de una variable. En otras palabras la variable a regular se mide continuamente y se compara con otra variable definida llamada valor de referencia. La función del sistema de regulación debe igualar a la variable regulada, a la variable definida como valor de referencia.

Figura 30 Lazo de regulación



5.1.1 COMPONENTES DE LAZO DE REGULACIÓN

5.1.1.1 Elemento de comparación

Es la variable que debe ser regulada en el proceso. En este proyecto la variable a regular es el nivel.

5.1.1.2 Elemento de regulación

Se encarga de evaluar el error de regulación, esto es, la diferencia entre la magnitud de la variable regulada y la variable definida. Esta diferencia es el error. Y a partir de este se obtiene la magnitud de salida del controlador. En este proyecto es el PLC.

5.1.1.3 Mando del actuador

El actuador en algunos casos necesita ser dirigido por un dispositivo externo, adecuado al mismo. Este comunica al actuador como debe modificarse la variable a regular. En este caso se hizo necesario debido a que el servomotor necesita regulación por medio de señal PWM.

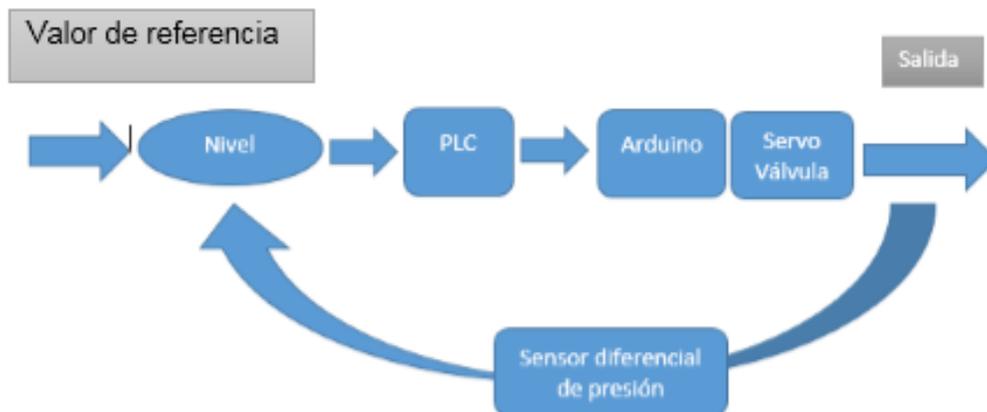
5.1.1.4 Actuador

Órgano ejecutor de la regulación, como lo indica su nombre es el elemento encargado de actuar sobre el proceso para lograr que la variable alcance la magnitud definida en el valor de referencia.

5.1.1.5 Instrumento de medida

El instrumento de medida usualmente es un sensor, el cual mide la variable a regular en tiempo real. Esta medida comparada con el valor de referencia entrega la magnitud real de la salida.

Figura 31 Lazo de regulación del sistema



5.2 CONTROLADOR PID

Por seguridad en la determinación de valores que se deben ingresar al controlador PID se decidió usar un método práctico. Con el fin de hacer de este proyecto algo profesional, se escogió un método experimental el cual determina los valores de ganancia de acción proporcional, ganancia de acción integral y ganancia de acción derivativa; requeridos por el PLC para implementar el control PID. El desarrollo del método ya mencionado será explicado en detalle a continuación.

5.2.1 ACCIÓN PROPORCIONAL

La acción proporcional se caracteriza por la necesidad del error dentro del proceso. Al multiplicar la ganancia de acción proporcional por la función de transferencia se minimiza el error. El error será más pequeño cuanto mayor sea la ganancia de acción proporcional [5].

$$C(t) = K_p * e(t) \quad [5.2.1.1]$$

$$K_p = \frac{C(t)}{e(t)} \quad [5.2.1.2]$$

Donde:

C(t)
K_p
e(t)

Salida del controlador
Ganancia de acción proporcional.
Error en estado estacionario

5.2.2 ACCIÓN INTEGRAL

El inconveniente principal de un controlador con sólo una acción proporcional, es que siempre se hace presente un error por corregir. La acción proporcional fuerza el proceso a llegar al 100%, pero ese 100% no es constante es solo un límite donde puede oscilar en pequeño equilibrio si se exagera el valor de la ganancia proporcional; por ello se dice que se hace presente un error por corregir. La acción integral permite anular este error residual, haciendo que la salida del controlador crezca proporcionalmente al resultado del producto entre el error y el tiempo. Se concluye pues, que un controlador con acción integral anula el error [5].

$$C(t) = K_i * \int_0^{\infty} e(t) dt \quad [5.2.2.1]$$

$$C(t) = K_i \frac{e(s)}{s} \quad [5.2.2.2]$$

$$T_i = \frac{1}{K_i} \quad [5.2.2.3]$$

Donde:

C(t)	Salida del controlador
K _i	Ganancia de acción integral.
e(t)	Error residual en estado estacionario
T _i	Constante de tiempo integral

5.2.3 ACCIÓN DERIVATIVA

La acción derivativa ayuda a obtener un tiempo de establecimiento más rápido. La acción integral; a pesar de anular el error residual de la acción proporcional, puede causar inestabilidad o un tiempo establecimiento muy lento. Es por esto que existe una acción derivativa, para complementarlas puesto que ayuda a estabilizar el proceso y obtener un tiempo de establecimiento más corto [5].

$$C(t) = K_d * \frac{d}{dt} e(t) \quad [5.2.3.1]$$

$$C(t) = K_d * Se(s) \quad [5.2.3.2]$$

$$K_d = \frac{C(t)}{Se(s)} \quad [5.2.3.3]$$

$$C(t) = T_d * \frac{d}{dt} e(t) \quad [5.2.3.4]$$

$$T_d = K_d \quad [5.2.3.5]$$

Donde:

C(t)	Salida del controlador
K _d	Ganancia de acción derivativa.
e(t)	Error en estado estacionario
T _d	Constante de tiempo derivativa

5.3 MÉTODO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

El método de respuesta en frecuencia consiste en modificar los parámetros a lazo abierto basándose en el diagrama de Bode para que el sistema no se desestabilice

al cerrar el lazo. El diagrama de Bode consiste en una representación de la respuesta del sistema a entradas sinusoidales a frecuencia variable. La salida de un sistema lineal a una entrada sinusoidal es igualmente una señal sinusoidal de la misma frecuencia pero con distinta magnitud y fase. La respuesta en frecuencia se define como esta diferencia entre la magnitud y fase.

El PLC S7-1200 sólo implementa control PI y control PID, por tal motivo en este documento solo se explica el diseño de estos dos controladores [5].

Condiciones iniciales

Error en estado estacionario	0%
Sobrepaso máximo	3%
Tiempo de establecimiento máximo	3s.

Valor de ζ en función de un sobrepaso del 10%.

$$\zeta = -\frac{\ln \frac{\%OS}{100}}{\sqrt{\ln^2 \left(\frac{\%OS}{100}\right) + \pi^2}} \quad [5.3.1]$$

$$\zeta = -\frac{\ln \frac{3}{100}}{\sqrt{\ln^2 \left(\frac{3}{100}\right) + \pi^2}} \quad [5.3.2]$$

$$\zeta = 0.7448 \quad [5.3.3]$$

Margen de fase en función del ζ definido.

$$\zeta = \frac{Pm}{100} \quad [5.3.4]$$

$$\zeta * 100 = 74.48^\circ \quad [5.3.5]$$

Ancho de banda en función de tiempo de subida y ζ .

$$W_{bw} = \frac{4}{t_r * \zeta} \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{(\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2)}} \quad [5.3.6]$$

$$W_{bw} = \frac{4}{3 * 0.7448} \sqrt{(1 - 2 * 0.7448^2) + \sqrt{(0.7848)^4 - 4 * 0.7448^2 + 2}} \quad [5.3.7]$$

$$W_{bw} = 0.773 \text{ Rad/s} \quad [5.3.8]$$

Teniendo como objetivo final de diseño aproximar el proceso a los valores de zeta y ancho de banda ideales para que el sistema sea estable y tolerante a perturbaciones, se procede a diseñar un controlador óptimo en base a los valores de ζ y W_{bw} definidos anteriormente.

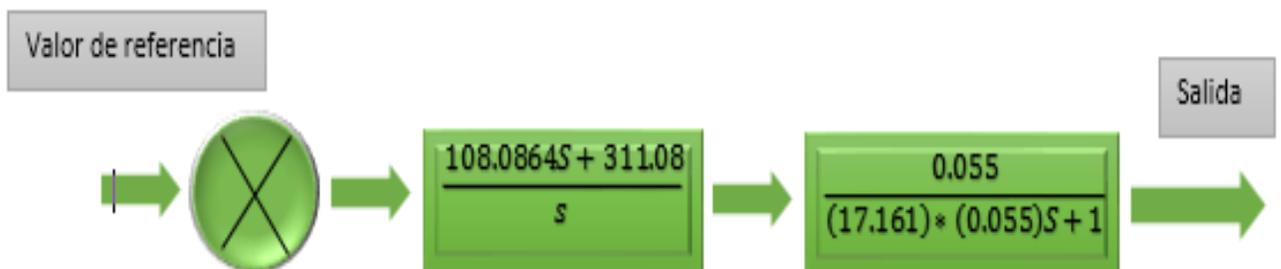
5.3.1 SIMULACIÓN EN MATLAB DE CONTROLADOR PID USANDO EL MÉTODO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

5.3.1.1 Prueba control proporcional integral

Se realizó un control proporcional-integral para eliminar el error y mejorar el tiempo de subida. El control proporcional integral consta de multiplicar a la función de transferencia un polinomio; el cual agrega un cero y un polo en la función de transferencia, logrando así que el sistema elimine el error. A dichos factores de ganancia se les llama factor proporcional y factor integral. El factor proporcional fuerza al sistema a converger al 100% en lazo cerrado y el factor integral anula la oscilación causada por la acción proporcional haciendo el error igual a 0%.

5.3.1.1.1 Programa en MATLAB PI a lazo abierto

Figura 32 PI a lazo abierto



```
Rh = [0.055];
A = [17.161];
Ki = [311.08];
Kp = [108.0864];
Num = [ Rh ];
```

```

num1 = [Kp Ki];
num2 = conv(num,num1);
den = [ A*Rh 1 ];
den1 = [1 0];
den2 = conv(den,den1);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num2,den2)
G = tf(num2,den2)
bode(G)
grid on

```

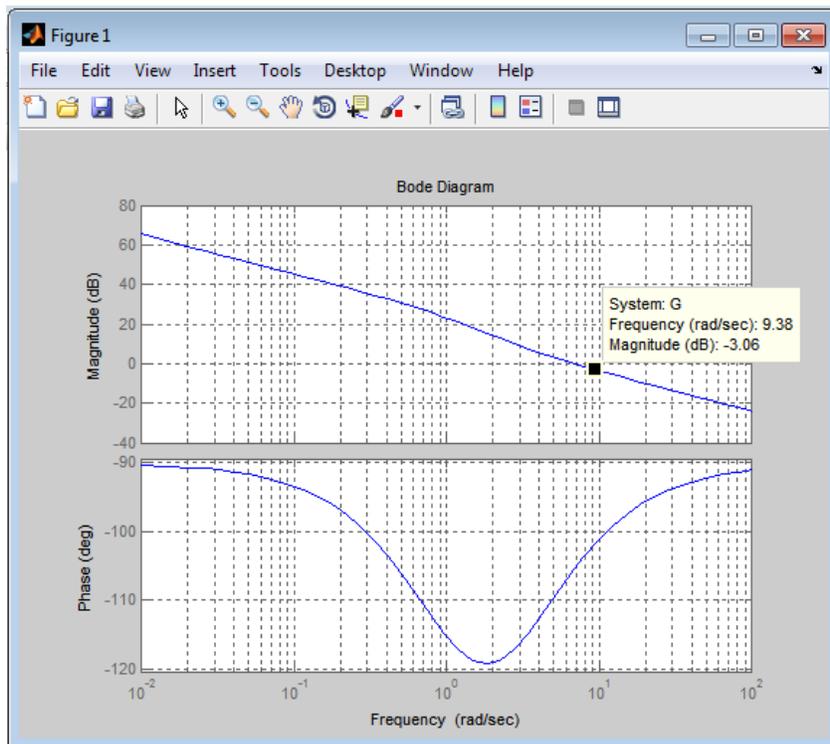
Ganancia	Infinito
Fase	74.55°
Corte en frecuencia de ganancia	NaN
Corte en frecuencia de fase	6.8270Rad/s

Función de transferencia

$$\frac{5.945S + 18.3}{0.9439S^2 + S}$$

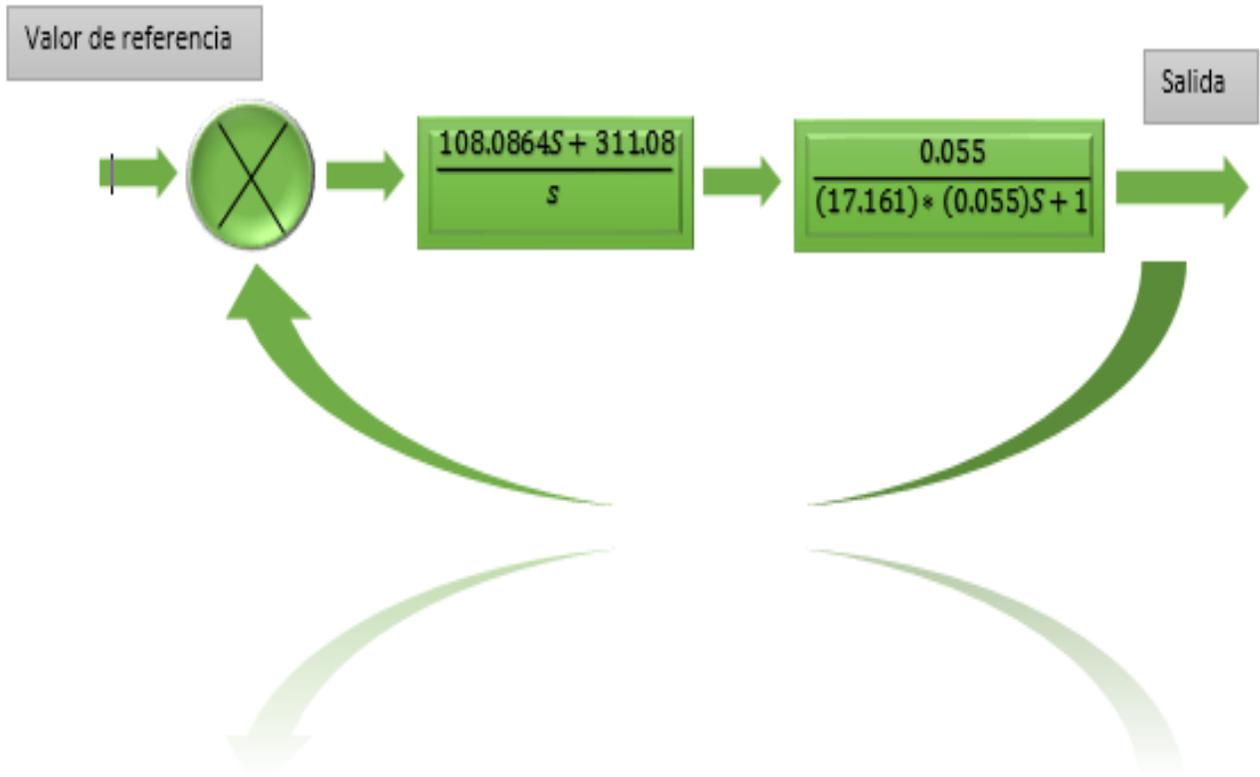
[5.3.1.1.1.1]

Figura 33 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PI a lazo abierto



5.3.1.1.2 Programa en MATLAB PI a lazo cerrado

Figura 34 PI a lazo cerrado



```
Rh = [0.055];  
A = [17.161];  
Ki = [311.08];  
Kp = [108.0864];  
Num = [ Rh ];  
num1 = [Kp Ki];  
num2 = conv(num,num1);  
den = [ A*Rh 1 ];  
den1 = [1 0];  
den2 = conv(den,den1);  
[num3,den3] = feedback(num2,den2,1,1)  
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num3,den3)  
G = tf(num3,den3)  
step(G)  
grid on
```

Figura 35 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PI a lazo cerrado

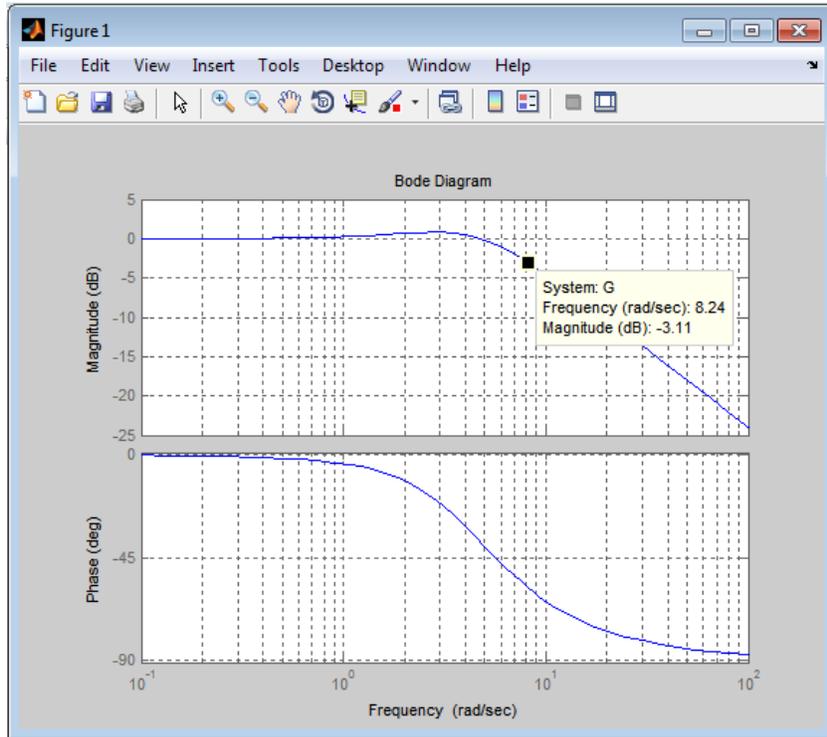
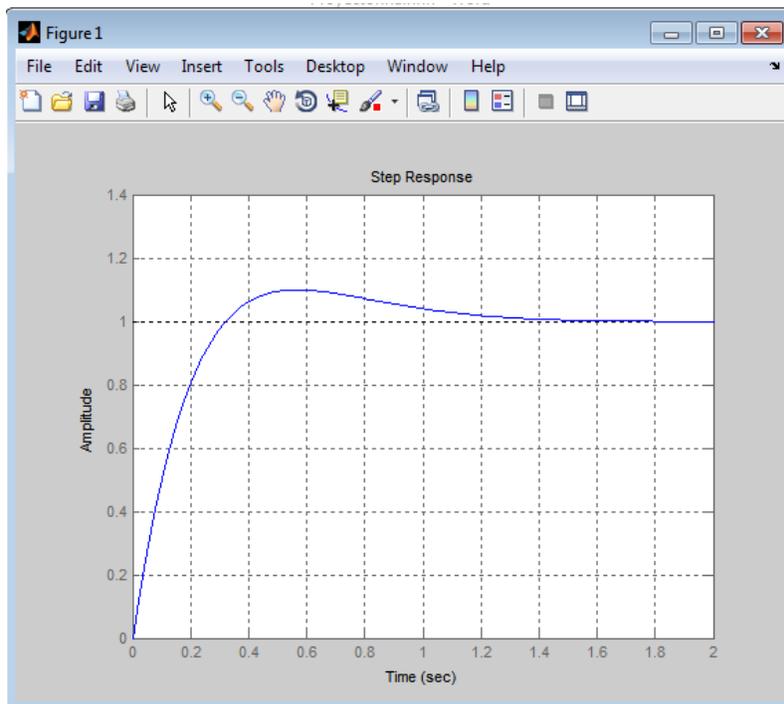


Figura 36 Respuesta en el tiempo del proceso a una entrada escalón con controlador PI a lazo cerrado



Ganancia	Infinito
Fase	142.2657°
Corte en frecuencia de ganancia	NaN
Corte en frecuencia de fase	4.6669Rad/s

Función de transferencia

$$\frac{5.945S + 17.11}{0.9439S^2 + 6.945S + 17.11} \quad [5.3.1.1.2.1]$$

5.2.1.1.3 Observaciones

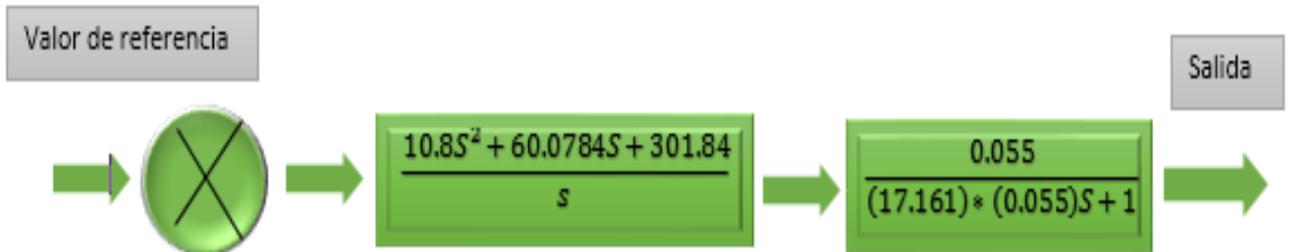
- Como se pudo observar en la respuesta en frecuencia a lazo abierto, el valor de ancho de banda obtenido con el valor de la relación de $\frac{K_i}{K_p}$ es de aproximadamente 9.38 Rad/s mayor que 0.773 Rad/s obtenido en el diseño ideal. Lo anterior demuestra que el controlador cumple con el ancho de banda requerido en el diseño.
- El margen de fase obtenido a lazo abierto es de 74.55° aproximadamente igual al margen de fase ideal. Lo anterior demuestra que el controlador cumple con el margen de fase requerido en el diseño.
- Los parámetros determinados para el desarrollo del controlador PI también son cumplidos por este.

5.3.1.2 Controlador proporcional integral derivativo

Se realizó un control proporcional-integral-derivativo para eliminar el error, mejorar el tiempo de subida, el sobre paso y el tiempo de establecimiento. El controlador PID consta de multiplicar a la función de transferencia un polinomio; el cual agrega 2 ceros y un polo en la función de transferencia, logrando así que el sistema elimine el error y aumente el sobre pico a lazo cerrado. A dichos factores de ganancia se les llama factor proporcional, factor integral y factor derivativo. El factor proporcional fuerza el sistema a converger al 100% en lazo cerrado, el factor integral anula la oscilación causada por la acción proporcional haciendo el error igual a 0% y el factor derivativo debe reducir el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento.

5.3.1.2.1 Programa en MATLAB PID a lazo abierto

Figura 37 PID a lazo abierto



```

Rh = [0.055];
A = [17.161];
Ki = [301.84];
Kp= [60.0784];
Kd = [10.8];
Num = [ Rh ];
num1 = [Kd Kp Ki];
num2 = conv(num,num1);
den = [ A*Rh 1 ];
den1 = [1 0];
den2 = conv(den,den1);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num2,den2)
G = tf(num2,den2)
bode(G)
grid on

```

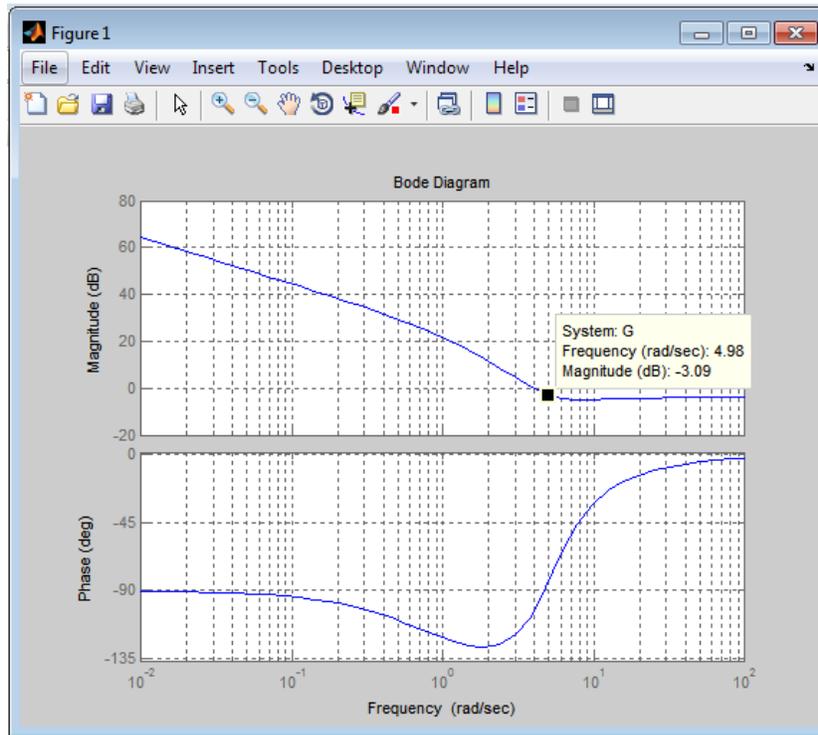
Ganancia	Infinito
Fase	74.9606°
Corte en frecuencia de ganancia	NaN
Corte en frecuencia de fase	3.9101Rad/s

Función de transferencia

$$\frac{0.594s^2 + 3.304s + 16.6}{0.9439s^2 + s}$$

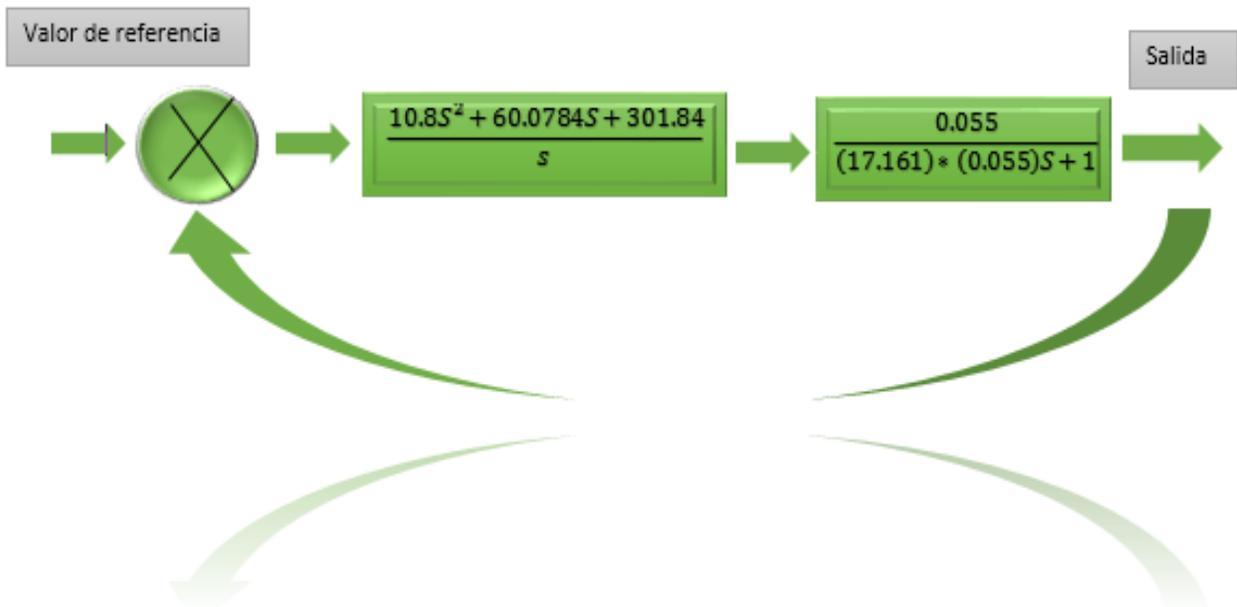
[5.3.1.2.1.1]

Figura 38 Respuesta en frecuencia del proceso con controlador PID a lazo abierto



5.3.1.2.2 Programa en MATLAB PID a lazo cerrado

Figura 39 PID a lazo cerrado

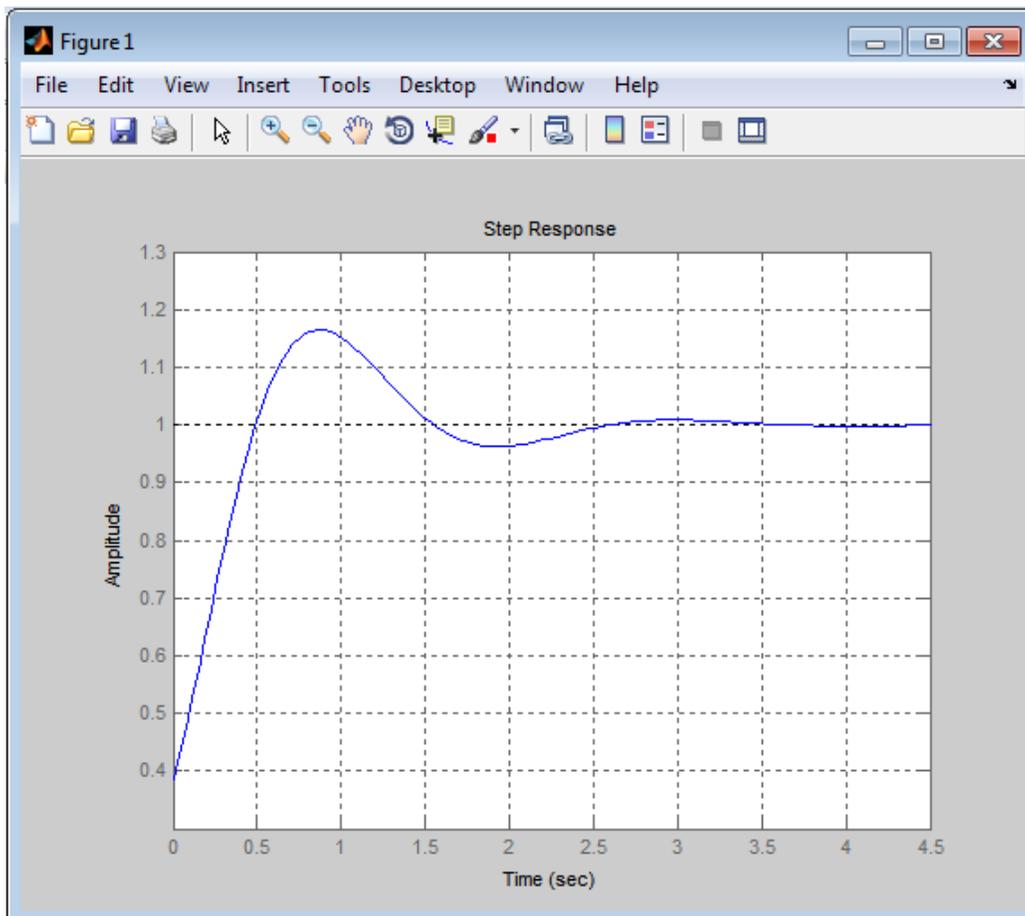


```

Rh = [0.029];
A = [17.161];
Ki = [301.84];
Kp = [60.0784];
Kd = [10.8];
Num = [ Rh ];
num1 = [Kd Kp Ki];
num2 = conv(num,num1);
den = [ A*Rh 1 ];
den1 = [1 0];
den2 = conv(den,den1);
[num3,den3] = feedback(num2,den2,1,1)
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(num3,den3)
G = tf(num3,den3)
step(G)
grid on

```

Figura 40 Respuesta en el tiempo del proceso a una entrada escalón con controlador PID a lazo cerrado



Ganancia	Infinito
Fase	133.8571°
Corte en frecuencia de ganancia	NaN
Corte en frecuencia de fase	3.4338Rad/s

Función de transferencia

$$\frac{0.594S^2 + 3.304S + 16.6}{1.538S^2 + 4.304S + 16.6} \quad [5.3.1.2.2.1]$$

5.3.1.2.3 Observaciones

- Como se pudo observar en la respuesta en frecuencia a lazo abierto, el valor de ancho de banda obtenido con el valor de la relación de K_i/K_p es de aproximadamente 4.98 Rad/s mayor que 0.776 Rad/s obtenido en el diseño ideal. Lo anterior demuestra que el controlador cumple con el ancho de banda requerido en el diseño.
- El margen de fase obtenido es de 74.9606° mayor al margen de fase ideal. Lo anterior demuestro que el controlador cumple con el margen de fase requerido en el diseño.
- El tiempo de establecimiento en el controlador PID es de 3 segundos, lo que cumple con el tiempo definido para el diseño.
- El tiempo de subida mejoro visiblemente aplicando el controlador PID
- El sobre paso se hizo mayor aplicando el controlador PID, lo que permite que el sistema sea más tolerante a perturbaciones.
- El proceso funciona de manera satisfactoria.

5.4 DEFINICION DE PARAMETROS DEL CONTROLADOR PID PARA EL PLC S7 1200

Acción Proporcional

$$K_p = 60.0784 \quad [5.4.1]$$

Acción Integral

$$T_i = \frac{1}{K_i} \quad [5.4.2]$$

$$T_i = \frac{1}{301.84} \quad [5.4.3]$$

$$T_i = 0.003313s \quad [5.4.4]$$

Acción Derivativa

$$T_d = K_d \quad [5.4.5]$$

$$T_d = 10.8s \quad [5.4.6]$$

6. IMPLEMENTAR LA LEY DE CONTROL DEL SISTEMA A CONTROLAR EN UN AUTÓMATA PROGRAMABLE S7 1200

STEP 7 Professional y el SIMATIC WinCC Basic son herramientas de ingeniería moderna para la configuración y programación de todos los controladores SIMATIC.

STEP 7 permite:

- ❖ *Reducir el tiempo invertido en ingeniería*
- ❖ *Puesta en marcha rápida*
- ❖ *Menor tiempo de parada*
- ❖ *Seguridad de las inversiones*

Lenguajes de programación IEC - Potentes editores y compiladores de rendimiento

- ❖ *Texto estructurado (SCL)*
- ❖ *Esquema de contactos (KOP)*
- ❖ *Diagrama de funciones (FUP)*
- ❖ *Lista de instrucciones (AWL)*
- ❖ *Programación de secuencia (GRAPH)*

El controlador lógico programable (PLC) S7-1200 es un equipo que ofrece la flexibilidad y capacidad de controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas tareas de automatización. El PLC está compuesto principalmente por una CPU y por módulos adicionales que cumplen con tareas específicas.

La CPU Simatic S7 12000 dispone de una serie de registros que se emplean durante la ejecución del programa de usuario. La dirección física de las posiciones de memoria se asigna teniendo en cuenta la posición del módulo con respecto a la posición de la CPU del sistema.

6.1 ADECUACIÓN DE SEÑAL ANALÓGICA

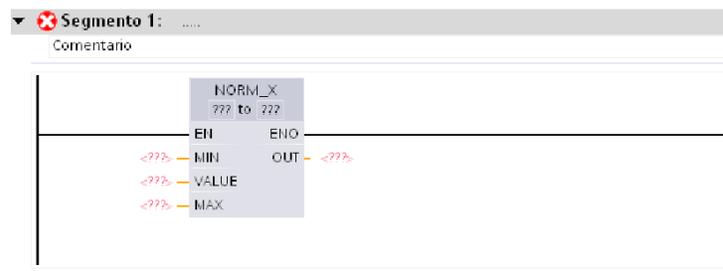
Se desea trabajar con un número real que varíe entre 0 y 100. Motivo que hace necesaria la adecuación de la señal análoga; puesto que el PLC S7 1200 recibe en su entrada análoga un número entre 0 y 27 648, esta adecuación consiste en normalizar y escalar la señal, consiguiendo así un número que se encuentre en el rango de salida deseado.

6.1.1 NORMALIZACIÓN DE SEÑAL ANÁLOGA

La normalización de señales es el proceso a través del cual una señal analógica es dividida por un número determinado, que debe corresponder al número máximo de la resolución del dispositivo. El proceso de normalización debe ser equitativo para toda la señal, es decir, tanto las medidas más altas como las medias y las más altas deben ser elevadas en la misma proporción.

El PLC S7 1200 permite realizar este proceso de normalización, en un bloque de funciones básicas llamado NORM_X. Donde NORM_X normaliza el parámetro VALUE dentro del rango de valores especificados en sus entradas MIN y MAX.

Figura 41 Bloque NORM_X PLC S7 1200



6.1.2 ESCALADO DE LA SEÑAL ANÁLOGA

El escalado de señales es el proceso a través del cual una señal analógica es multiplicada por un número determinado, que debe corresponder al número máximo del rango deseado la salida.

El PLC S7 1200 permite realizar este proceso de escalado, en un bloque de funciones básicas llamado SCALE_X. Donde SCALE_X escala el parámetro VALUE normalizado, dentro del rango de valores especificados en sus entradas MIN y MAX.

Figura 42 Bloque SCALE_X S7 1200

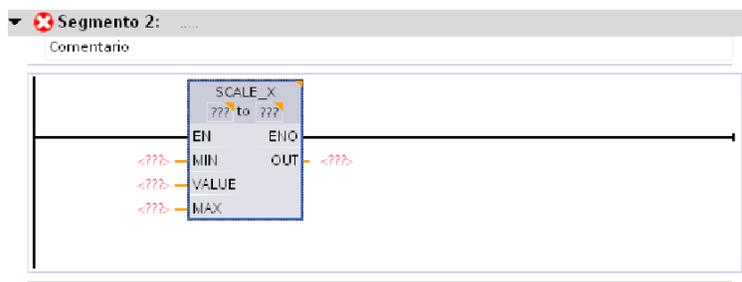
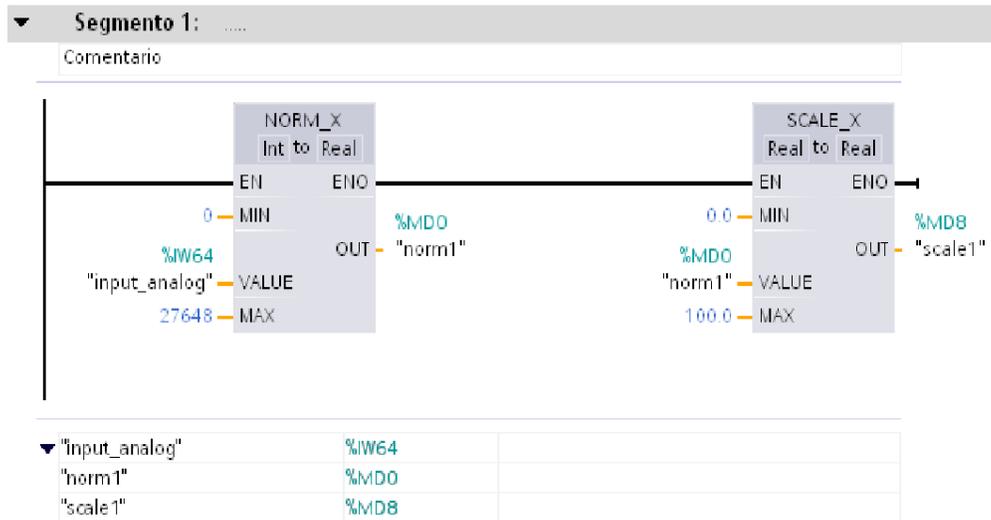


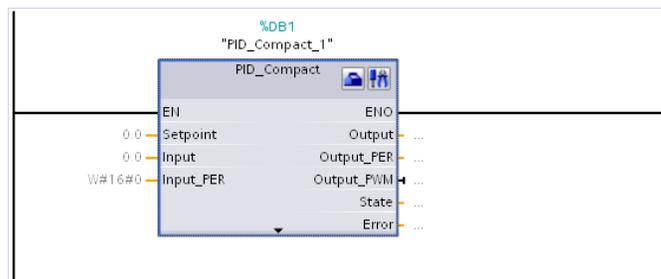
Figura 43 Normalización y escalado del proceso



6.2 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADOR PID EN EL PLC S7 1200

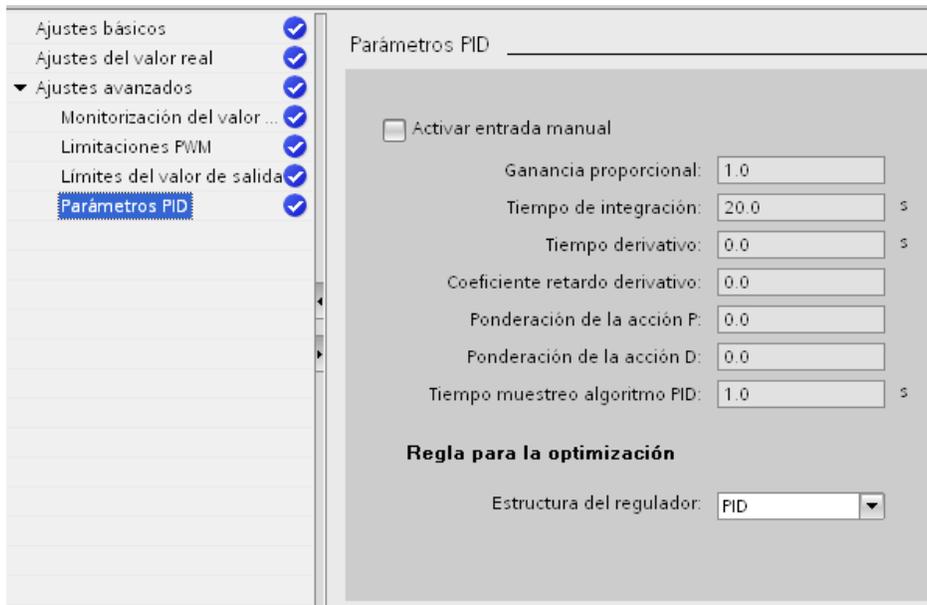
El PLC S7 1200 permite implementar control PID, en un bloque de funciones básicas llamado PID_Compact. Donde al ingresar los valores definidos para el control PID, se puede observar en la interfaz gráfica del PLC, 3 curvas de comportamiento; entrada análoga, setpoint y salida análoga. Setpoint corresponde al valor de estabilización del sistema, y su unidad de medida depende de la variable a controlar.

Figura 44 Bloque PID_Compact



En la sección de ajustes avanzados del bloque PID_Compact se debe ingresar los valores definidos; en el capítulo 5 del actual proyecto, para el control PID.

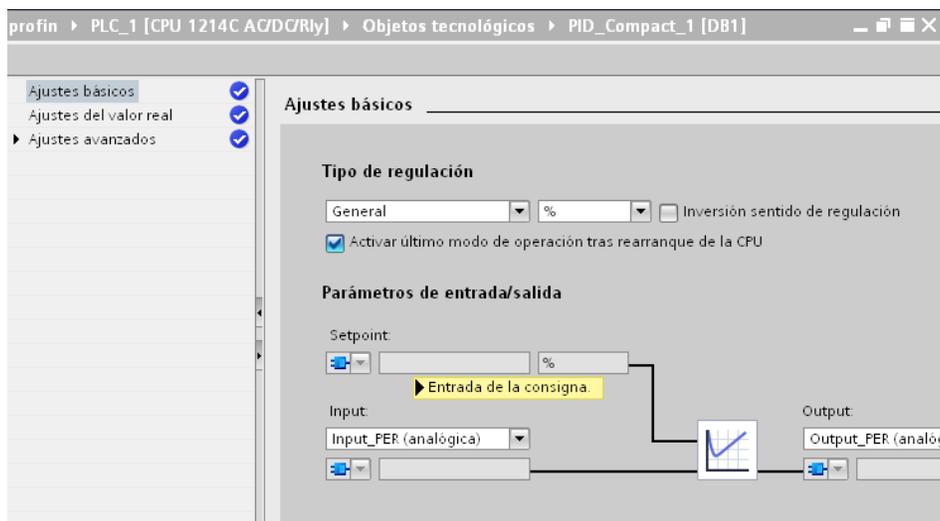
Figura 45 Definición de parámetros del controlador PID



Luego se define, el modo de entrada salida; análoga o digital, además del valor del setpoint y su respectiva unidad de medida. El setpoint puede ser ajustado por el usuario según su necesidad, los límites del proceso son establecidos por la capacidad del recipiente donde se almacena el líquido.

En el caso particular de este proyecto la capacidad del tanque es de 13 litros, siendo este su 100%. El valor del setpoint es una medida porcentual; de nivel, y puede ser ajustado en cualquier valor real existente entre 0 y 100%.

Figura 46 Definición de entrada/salida



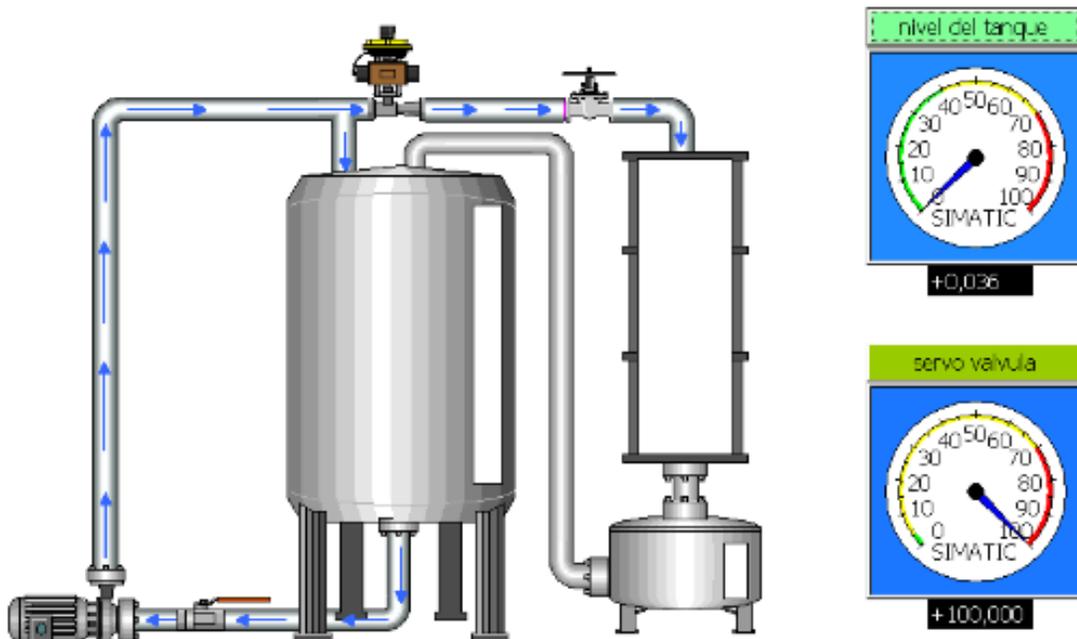
7. ELABORAR EL SOFTWARE PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DEL PROCESO A TRAVÉS DE SCADA

La plataforma Scada se utiliza para supervisar y controlar procesos físicos. Esto puede ser efectuado desde una interfaz gráfica; llamada HMI (Human Machine Interface), que además puede poseer una base de datos, donde se registre la evolución del proceso. La plataforma Scada ofrecida por el PLC S7 1200, es Wincc.

7.1 DISEÑO DE HMI

La interfaz hombre máquina, diseñada consta de una figura de todo el proceso. Se puede observar en la figura 43, el comportamiento del proceso; guiado por flechas que indican la dirección del líquido, además de la ubicación exacta de cada uno de los elementos pertenecientes al proceso.

Figura 47 Imagen principal del HMI



8. PRUEBAS

Se realizaron 2 pruebas previas al proyecto con respecto al controlador PID. La primera prueba fue realizada en base a los parámetros definidos en el diseño del controlador PID especificado en el capítulo 5. La segunda prueba se realizó utilizando la opción PID en ajuste fino, interno en el PLC S7 1200. Del resultado obtenido para cada prueba, se concluyó que, el controlador optimizado por el PLC es menos eficiente que el controlador diseñado.

8.1 INICIO DEL PROCESO

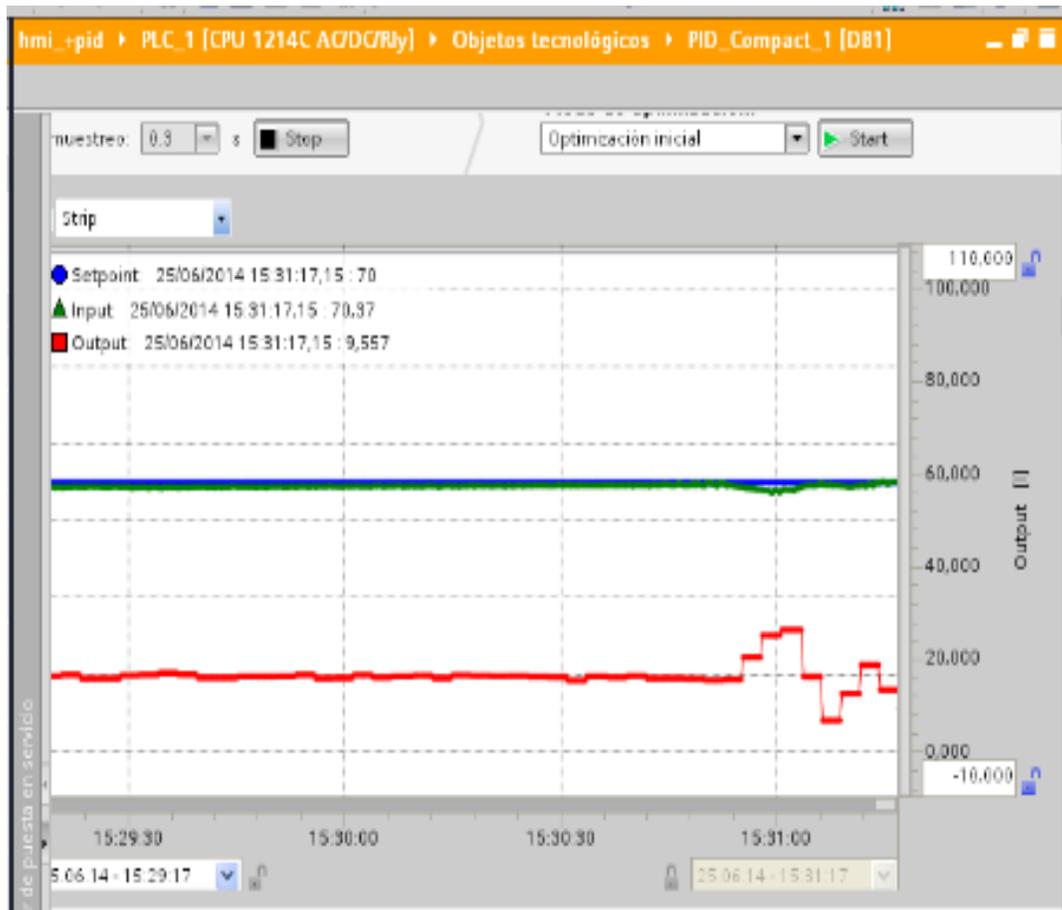
El proceso inicia con el tanque vacío. En el instante en que comienza a llenarse, lo hace en un estado transitorio, presente en todos los procesos dinámicos. Luego de este estado transitorio; tiempo de respuesta, continua en un estado estable, condicionado a la no perturbación del proceso.

Se observa en la figura 48 que, el controlador actúa sobre el estado transitorio. Pero, si el valor de la entrada análoga es igual al valor de referencia, la salida del controlador es 0.

Figura 48 Estado transitorio con error de tierras



Figura 49 Respuesta del controlador a proceso estable

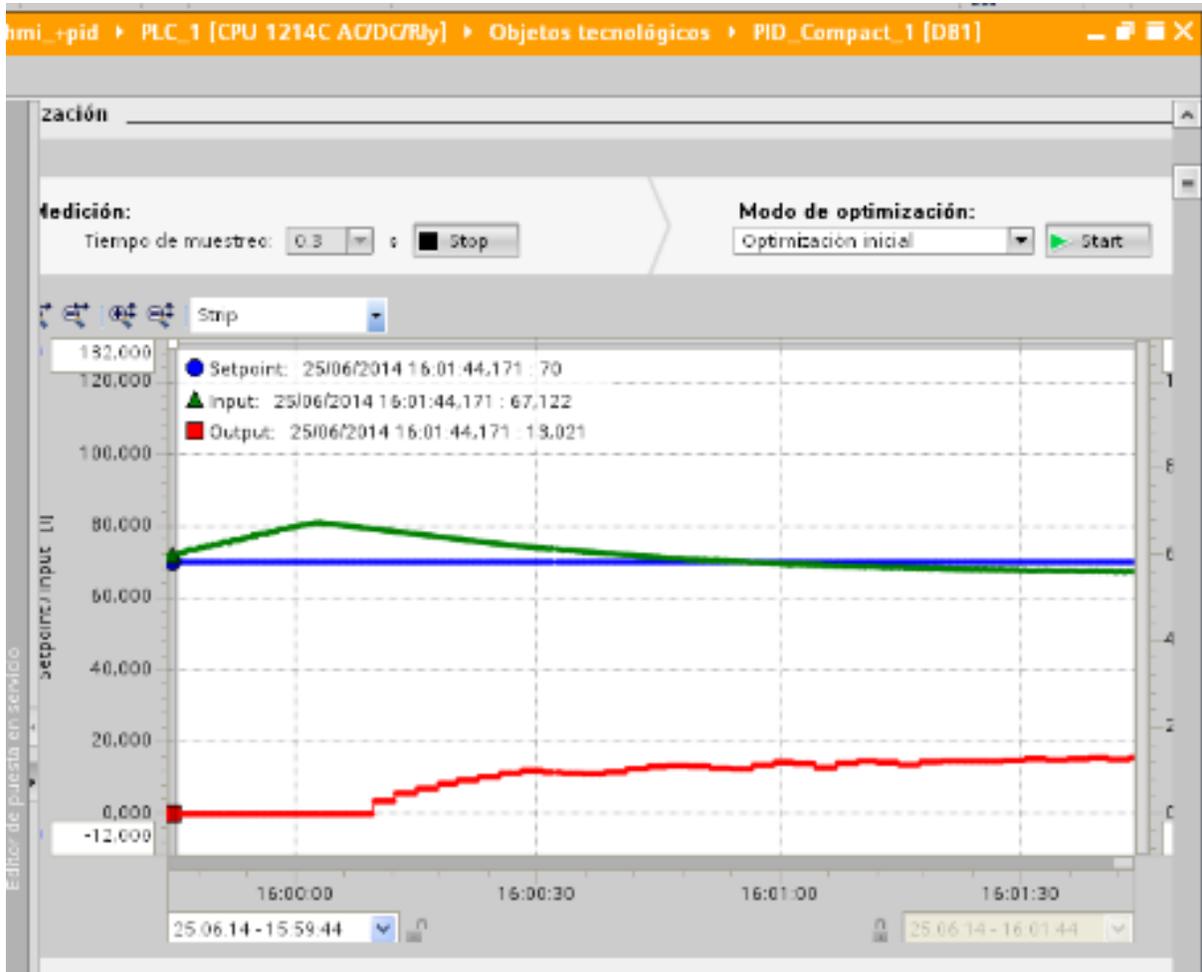


8.2 PRUEBA DE PROCESO INESTABLE

Las perturbaciones son bastante comunes en los procesos físicos, es por ello que los controladores deben ser tolerantes a dichas perturbaciones; teniendo en cuenta que las perturbaciones pueden encontrarse, por encima o por debajo del setpoint, esta tolerancia se logra con un sobrepaso en la curva de la función de transferencia del proceso.

8.2.1 PRUEBA DE PROCESO INESTABLE POR ENCIMA DEL SET POINT

Figura 50 Respuesta del controlador a proceso inestable

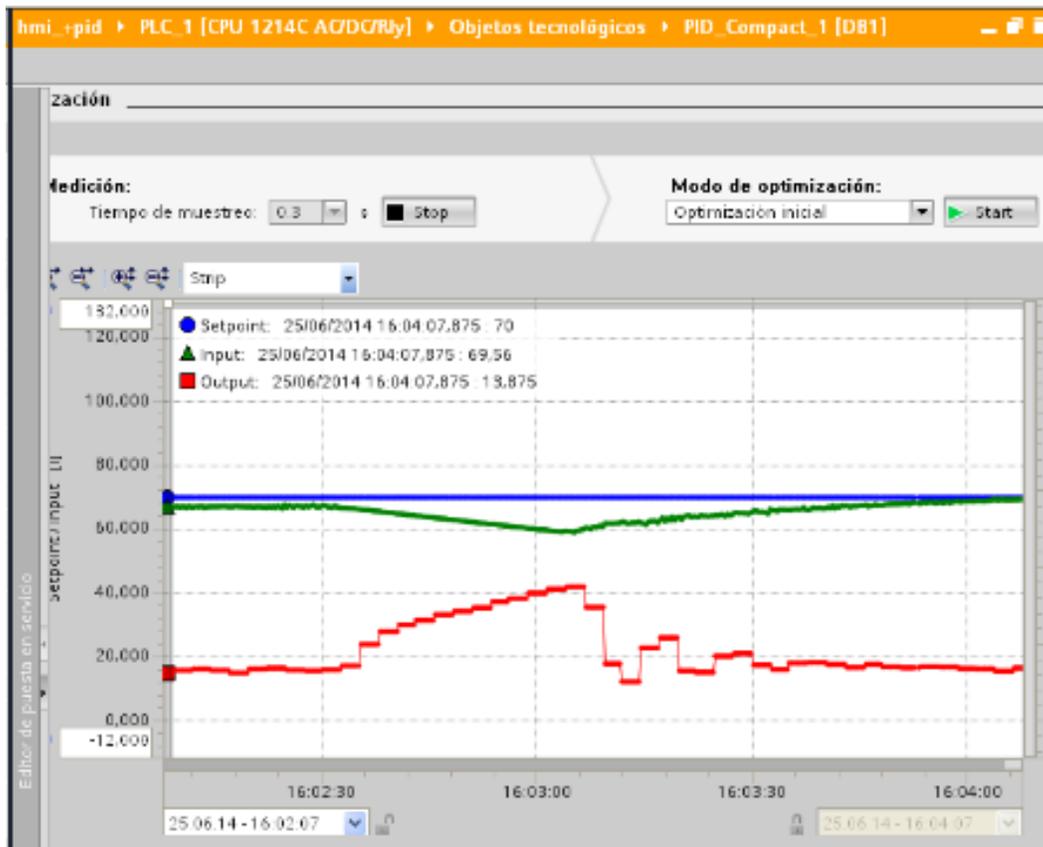


Para hacer el proceso inestable, se llenó el tanque por encima del valor definido de valor de referencia. Y se observó el comportamiento del controlador, expuesto en la figura 50.

8.2.2 PRUEBA DE PROCESO INESTABLE POR DEBAJO DEL SET POINT

Para hacer el proceso inestable, se llenó el tanque por debajo del valor definido de valor de referencia. Y se observó el comportamiento del controlador, expuesto en la figura 51.

Figura 51 Respuesta del controlador a proceso inestable



CONCLUSIONES

- ✓ Los procesos físicos en la industria, requieren de controladores. El controlador PID implementado en un autómata programable s7 1200 resulta ser muy eficiente para resolver los problemas de este proyecto, funcionando de manera adecuada en las pruebas realizadas, dando un tiempo de respuesta satisfactorio a las condiciones del proceso.
- ✓ Una plataforma Scada es bastante útil, ya que se puede supervisar el proceso de forma didáctica, y el usuario no requiere amplios conocimientos en el campo de control, para entenderlo. Además de la posibilidad de definir los parámetros en base a las necesidades del usuario y del proceso.
- ✓ Aunque el entorno de programación de la plataforma Arduino resulta sencillo y agradecido con el usuario, es una herramienta de gran provecho y bajo costo en la industria. Adecuado para lugares estrechos y como extensión de otros entornos de programación, es decir, un excelente esclavo.
- ✓ La aplicación de la servo válvula fue un éxito. Se consiguió emplear la servo válvula como un dispositivo confiable, sin vibraciones y resistente a pequeñas perturbaciones.
- ✓ Una parte fundamental en cualquier proyecto es la adecuación óptima de cada uno de los sensores integrados al proceso, ya que de ello depende la confiabilidad del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gil Trejos, Oscar Fernando y Robayo Garcia, David Fabian. *Diseño Construcción y Control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
- [2] <http://fluidos.eia.edu.co/>. <http://fluidos.eia.edu.co/>. [En línea] http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm.
- [3] *Elaboración de modelos matemáticos de sistemas hidráulicos*.
- [4] Helbing, W. y Burkart, A. *Tablas químicas para laboratorio e industria*. Barcelona : reverté, S.A., 1985.
- [5] Campo, Sigilfredo C. Arregoces. *Notas de clase*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
- [6] Upgraded cylindrical photoelectric sensor. *DC cylindrical housing type*. s.l. : Autotonics, 2007.
- [7] Seed Studio Work. *Seed Studio Work*. [En línea] 27 de Mayo de 2010. [Citado el: 26 de marzo de 2012.] <http://www.seedstudio.com/depot/datasheet/micro%20hydro%20generator%20datasheet-1.pdf>.
- [8] Lopez Garcia , M. y Ramon , M. Medición de caudal y transductores de caudal de fluidos. *Instrumentación y comunicaciones industriales*. 2007.
- [9] Wikipedia. *Wikipedia*. [En línea] 8 de Agosto de 2013. [Citado el: 02 de diciembre de 2013.] http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_antirretorno.
- [10] Robotics. *Robotics*. [En línea] 2013. [Citado el: 28 de marzo de 2014.] <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Robotics/hs805.pdf>.
- [11] Candelas, Herias Francisco A. y Corrales , Ramon Juan A. *Servomotores*. San vicente de aspeig : Universitat d'Alacant , 2007.