



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS SISTEMAS DE CONTROL UTILIZANDO ALGORITMOS DE CASCADA Y ANTICIPATIVO PARA UNA PLANTA DIDÁCTICA DE NIVEL”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

MARIO ELIAS SINCHIGUANO SUAREZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

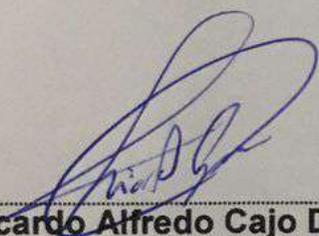
AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres por el apoyo incondicional que me supieron brindar día a día en esta larga trayectoria de formación académica, por ser guías en mi camino y ser ese sustento para seguir en pie.

DEDICATORIA

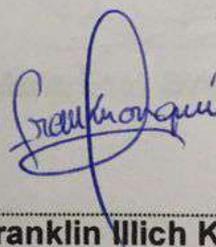
El presente proyecto lo dedico a mis padres que me brindaron la ayuda y comprensión necesaria para realizar las tareas y proyectos con éxito, a mis maestros que fueron indispensables para forjar mis conocimientos y de esta manera alcanzar mi meta propuesta.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Ing. Ricardo Alfredo Cajo Díaz

PROFESOR EVALUADOR

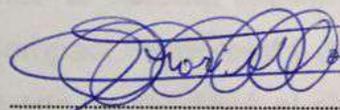


Ing. Franklin Illich Kuonquí Gaínza

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Mario Elías Sinchiguano Suárez

RESUMEN

La planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de la ESPOL, no dispone de un sensor de caudal para poder realizar sistemas de control con algoritmo en cascada y anticipativo, y solo puede realizar un controlador realimentado mediante un sensor de nivel que posee el tanque de esta planta. Para poder diseñar e implementar los controladores con algoritmo en cascada y anticipativo necesariamente se necesita controlar alguna otra variable de la planta como el caudal de entrada para así poder obtener un mejor control ante cambios en la entrada del sistema, con esto se encontró la necesidad de un sensor de caudal que nos brinde el caudal instantáneo que está entrando al sistema mediante un señal de corriente de 4-20 mA para poder leerla en el Compact Field Point y de esta manera poder realizar los dos tipos de controladores, luego se identificó el sistema se definió el punto de operación de planta que es 38cm para el cual se necesita un voltaje al variador de frecuencia de 4.63V y se varió a partir de este punto 0.07V, quedando la identificación entre valores de 4.56V y 4.7V luego de esto se obtuvieron las funciones de transferencias del sistema las cuales resultaron con unos porcentajes de exactitud del 82.66% y 87.47% las funciones de transferencia tanto del variador de frecuencia / bomba así como la del tanque de nivel respectivamente, una vez obtenidas las funciones de transferencia del variador de frecuencia / bomba y del tanque de nivel con exactitudes bastante aceptables ya que la mínima exactitud esperada para trabajar con una función de transferencia era del 80%, se diseñaron e implementaron los algoritmos de control en cascada y anticipativo, el controlador con algoritmo en cascada utiliza dos controladores realimentados en cascada el interior o secundario y el exterior o primario, el secundario es el encargado de corregir los errores en la referencia de caudal y se utilizó un controlador porque en el lazo interior del algoritmo en cascada se necesita rapidez, en el lazo externo se utilizó un controlador pi para corregir los errores en la referencia de nivel, el controlador con algoritmo anticipativo tiene el controlador en la perturbación. Los dos controladores trabajaron correctamente ante perturbaciones en la entrada del sistema con errores de solo 2cm en base a su nivel de referencia.

Palabras claves: Tanque de nivel, controlador en cascada, controlador anticipativo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO 1.....	1
1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Justificación	3
CAPÍTULO 2.....	5
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Marco teórico	6
2.2.1 Sensor de caudal	6
2.2.2 Variador de frecuencia	8
2.2.3 Bomba centrífuga	10
2.2.4 Partes de una bomba centrífuga.....	11
2.2.4.1 Carcasa	11
2.2.4.2 Impulsores.....	11
2.2.4.3 Anillos de desgastes	11
2.2.4.4 Estoperas, empaques y sellos.....	11
2.2.4.5 Eje	11
2.2.4.6 Cojinetes	12

2.2.4.7 Bases	12
2.2.5 Eficiencias en una bomba centrífuga	12
2.2.5.1 Eficiencia mecánica.....	12
2.2.5.2 Eficiencia hidráulica.....	12
2.2.5.3 Eficiencia total	12
2.2.6 Control automático de procesos	13
2.2.7 Sistema de control por realimentación	13
2.2.8 Sistema de control anticipativo	14
2.2.9 Sistema de control en cascada.....	15
2.2.10 Equipos para el control de los procesos	16
2.2.10.1 Compact Field Point CFP-2100.....	16
2.2.10.2 Compact Field Point CFP-1804.....	16
2.2.10.3 Módulos de Entrada/Salida.....	17
CAPÍTULO 3.....	18
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	18
3.1 Diseño	18
3.2 Simulación	31
3.3 Implementación del controlador con algoritmo en cascada	37
3.4 Implementación del controlador con algoritmo anticipativo.....	44
CAPÍTULO 4.....	47
4. RESULTADOS	47
4.1 Planta sin controlador	47
4.2 Planta con controlador con algoritmo en cascada	48
4.3 Planta con controlador con algoritmo anticipativo	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS	57

CAPÍTULO 1

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

1.1 Planteamiento del problema

Los sistemas de control utilizados en el área industrial necesitan cada vez una mejor automatización de la supervisión de los parámetros que entran en juego para producir un bien, y así obtener una alta producción y un producto de excelente calidad, esto lo logran mejorando sus plantas a través de innovaciones en sus equipos de producción y más que todo en los sistemas destinados para el control de estos.

El control automático de procesos permite mantener en un valor determinado las diferentes variables que existen en un proceso, siendo este punto de operación seleccionado por el usuario, teniendo además la opción de en cualquier momento poder modificar dicho punto de operación y así modificar el proceso

Para realizar el control de estos procesos existe una gran cantidad de controladores los cuales dependen de la necesidad y la naturaleza del proceso, además de los equipos y sensores con los que se cuenta, siendo uno de los controles más sencillos de realizar el retroalimentado y el que necesita un menor número de sensores, ya que con uno puede operar, aunque su rapidez de respuesta sea un poco lenta.

Un control en cascada y uno prealimentado necesita de un mayor número de sensores además su diseño es más complejo que un control retroalimentado, aunque al realizarlo se obtienen algunas ventajas operativas, como el control de un mayor número de variables en el sistema, un control más exacto de los puntos de operación de los procesos y en muchos casos una rápida respuesta ante perturbaciones en el sistema.

En el laboratorio de control automático de la facultad de ingeniería eléctrica y computación (FIEC) de la ESPOL, se cuenta con una planta didáctica de nivel a la cual se le puede establecer un valor de altura de columna de agua y que el tanque permanezca siempre en dicho valor. Esta planta al momento cuenta con

un lazo de control retroalimentado que mide el error en la altura de la columna de agua según el valor establecido previamente, este controlador presenta una variación significativa en el tanque cuando existen cambios en la entrada o salida del sistema.

Por ello se necesita implementar un sensor de caudal en la entrada del sistema y así conseguir 2 variables del sistema pudiendo con estas implementar un controlador en cascada y prealimentado para monitorear tanto el nivel del tanque, así como el caudal instantáneo que ingresa al tanque, logrando con esto un control mucho más preciso del punto de operación ante perturbaciones en la entrada del sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Diseñar un sistema de control en cascada y prealimentado para una planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de ESPOL.

1.2.2 Objetivos específicos

- Incorporar un sensor de caudal a una planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de la ESPOL.
- Encontrar la función de transferencia de la planta didáctica de nivel.
- Diseñar un sistema de control tanto en cascada como en prealimentación para obtener una rápida respuesta.
- Evaluar el desempeño de los sistemas de control en cascada y prealimentado ante perturbaciones en la entrada del sistema.

1.3 Alcance

Evaluar la planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de la Espol, ver el correcto funcionamiento de todos los equipos que posee la planta para el control de nivel , analizar el sitio adecuado para colocar un sensor de caudal y con este elaborar una sistema de control de nivel en cascada prealimentado, comprar el sensor de caudal que se ajuste a las necesidades de la planta entre estas tenemos: caudal mínimo, caudal máximo, presión de

trabajo, presión máxima, presión mínima, temperatura mínima, temperatura máxima, porcentaje de sólidos en suspensión, densidad del fluido, viscosidad del fluido, diámetro de la tubería, sentido del flujo, material de la tubería, tipo de conexión al proceso, tipo de transmisor, señal de salida, precisión del equipo y el voltaje de alimentación, instalar el sensor de caudal en la planta de nivel con los materiales adecuados para este proceso.

Verificar el correcto funcionamiento del sensor de caudal en la planta de nivel, modelar el sistema de tanques de nivel con los sensores de caudal y nivel para obtener así el modelo no lineal de la planta de nivel, obtener el modelo lineal y la función de transferencia del sistema, diseñar el controlador en cascada y feedback-feedforward que mejor se ajuste al sistema de tanques de nivel, implementar dicho controlador en el sistema, realizar pruebas para verificar el desempeño del controlador bajo condiciones normales de operación y en condiciones de máxima perturbación en la entrada y en la salida del sistema.

1.4 Justificación

Debido a que la planta de nivel didáctica con la que cuenta el laboratorio de control automático de la Espol, solo posee un sensor de presión en la base del tanque, el cual permite conocer la presión que ejerce la columna de agua sobre este y así al sacar una relación entre su altura obtenemos el nivel del agua en el tanque, únicamente es posible hacer un control prealimentado en este sistema, pero el cual presenta problemas ya que para perturbaciones en la entrada su respuesta es muy lenta.

Para obtener un mejor desempeño de la planta didáctica de nivel se incorpora un sensor de caudal en la entrada del sistema, el cual enviará señales de corriente de 4-20 (mA) con la que posterior a analizar los valores de corriente que llegan del sensor a la computadora y el caudal instantáneo real que está llegando al tanque obtendremos la información exacta del caudal instantáneo que está entrando al sistema en base a la corriente que genera el sensor.

Para optimizar el proceso de la planta didáctica de nivel se utilizara estos 2 sensores para realizar un control en cascada y prealimentado y lograr una rápida respuesta ante perturbaciones en la entrada del sistema, realizaremos

estos 2 tipos de controles para analizar cómo funciona el control en cascada y los beneficios que presenta, tanto en su diseño como en su respuesta ante una diferencia de nivel entre el valor leído por el sensor y el preestablecido por el usuario y comparar estas características con el control prealimentado para cuantificar el rendimiento de estos controladores en el proceso y proceder a establecer cuál de estos tipos de controladores presenta mayores ventajas para la planta didáctica de nivel.

Esto se lo realizara en un tiempo aproximado de 4 meses para alcanzar un total funcionamiento de la planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de Espol, con los 2 sensores implementados y los diferentes tipos de controladores, así como los resultados de las comparaciones a las que se sometieron los 2 controladores que fueron desarrollados para poder controlar el proceso de este sistema.

Al mejorar la planta didáctica de nivel con el sensor de caudal esta servirá para que los alumnos del laboratorio de control automático de la Espol puedan desarrollar nuevas prácticas en este equipo a fin de que puedan controlar procesos realizando diferentes tipos de control.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes

El uso de plantas de tanques con control de nivel es de extrema importancia para las empresas, ya que son muy necesarias para muchos procesos, es por esto que en esta investigación se basó en modelar un control diferente y más eficiente al retroalimentado para mantener el valor de operación de los tanques.

En su estudio Hidalgo (2014), de la universidad central del Ecuador, con su tesis: “desarrollo e implementación de un sistema retroalimentado de control de nivel de líquidos con alimentación continua y variable” en la que busca controlar el nivel de una planta didáctica con un control retroalimentado en la cual usó el software Labview y sus bloques para crear un control PID (proporcional integral derivativo), el sistema cuenta con un sensor ultrasonido en el tanque de esta, la cual envía señales del tiempo que tarda la onda desde que es enviada por el emisor hasta ser recibida por el receptor, pudiendo de esta forma cuantificar el tiempo que demora la onda en ser reflejada por un obstáculo en este caso un líquido, esta información es enviada constantemente a una tarjeta DAQ (adquisición de datos), el actuador del sistema es una electroválvula la cual regula el paso del líquido hacia el tanque, la señal del sensor ultrasónico ingresa al computador por el puerto serial y el control PID creado en LabView enviara una señal la cual la DAQ se encargará de transformar de 4-20 (mA) para regular la apertura de la electroválvula

Con este sistema de control por retroalimentación y un controlador PID, para el agua el tiempo de estabilización del sistema es de 25 segundos, para el alcohol el tiempo de estabilización es de 21 segundos, concluye a su vez que para líquidos de diferente densidad se modifica la función de transferencia y los valores de las constantes del controlador PID, los resultados obtenidos con este controlador presentan un error del 2% en la curva del sistema y la del control PID.

En este trabajo se busca crear un controlador más eficiente, utilizaremos un controlador en cascada y un controlador prealimentado, el cual presenta varias mejoras ya que al necesitar de 2 variables del sistema a controlar permite un control más exacto y rápido del valor de operación del sistema, con esto lograremos disminuir el tiempo de estabilización del sistema cuando se presente algún tipo de perturbación.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Sensor de caudal

El caudal es una medida de la cantidad de volumen que está pasando por una determinada área en un período específico de tiempo. Para realizar esta medición se utilizan los sensores de caudal. El sensor de caudal es un dispositivo que va en línea con la tubería, y permite determinar el caudal que circula por la tubería.

Existen varios tipos de sensores de caudal, uno de los más conocidos es el de turbina como el de la figura 2.1 el cual posee una pequeña turbina en el interior la cual con el paso del agua gira y la velocidad de esta es proporcional al caudal que está pasando por el sensor, y al tener la velocidad y el área la cual se la consigue con el diámetro de la tubería y utilizando la ecuación 2.1, una vez calculada el área encontramos el caudal con la ecuación 2.2.

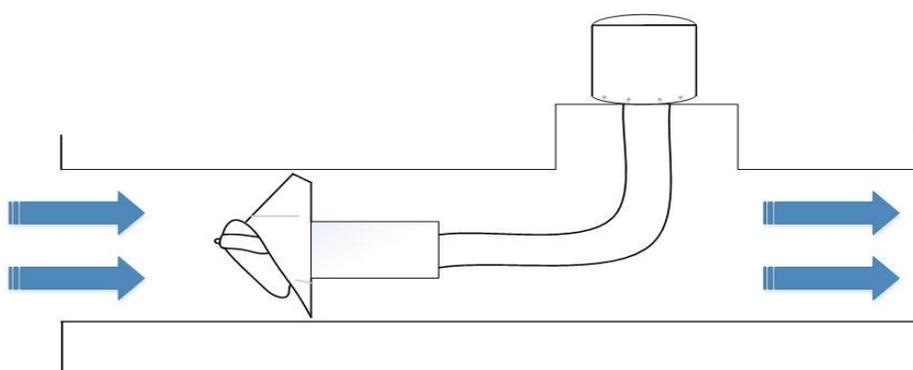


Figura 2.1: Sensor de caudal tipo turbina [1]

$$A = \pi r^2 \quad (2.1)$$

Donde:

A = área (m^2)

r = radio (m)

Al tener estas 2 variables podemos obtener el caudal que fluye por la tubería por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = A * v \quad (2.2)$$

Donde:

Q = caudal (m^3/s)

A = área (m^2)

v = velocidad (m/s)

El sensor de caudal de la figura 2.2 utiliza un principio mecánico para realizar la medición, en su interior posee un tapón el cual es presionado por un resorte el cual al comenzar a fluir el líquido por el sensor ejerce una fuerza hacia la punta del resorte dicha fuerza es proporcional al caudal del líquido que pasa por el sensor.



Figura 2.2 sensor de caudal utilizado

2.2.2 Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es un dispositivo electrónico el cual es utilizado en la industria para controlar la velocidad de un motor de corriente alterna.

El variador de frecuencia de la figura 2.3 de marca Schneider Electric modelo Altiva 312 es utilizado en este proyecto para controlar el motor que gira el eje de la bomba para permitir el paso del fluido hacia los tanques de nivel,



Figura 2.3 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia controla la frecuencia de alimentación, la cual después es suministrada al motor permitiendo de este modo tener un control de la velocidad a la que gira el eje del motor.

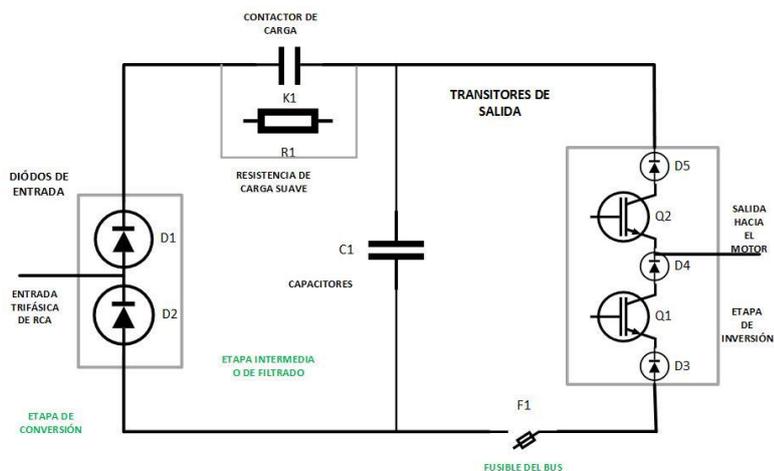


Figura 2.4 Esquema eléctrico de un variador de frecuencia. [2]

El variador de frecuencia para su funcionamiento se alimenta de un voltaje de corriente alterna, la cual es convertida a corriente directa por los diodos de entrada, los cuales pueden ser también un puente rectificador de diodos o scr's, luego viene la etapa de filtrado en la cual se usa un banco de capacitores para reducir el rizado en la señal de la voltaje, la etapa final en la que se encuentran los transistores, IGBT generalmente los cuales se encienden y apagan en determina secuencia dependiendo de la frecuencia establecida en el variador de frecuencia, y genera una forma de onda cuadrada de voltaje, el valor promedio de dicha onda es una forma de onda senoidal de la frecuencia que será aplicada al motor lo cual es detallado en la figura 2.4 [2].

Al poseer el control de la frecuencia de la onda de corriente se logró controlar a su vez la velocidad del motor según la ecuación 2.3.

$$Nm = \frac{120 * f}{p} (1 - s) \quad (2.3)$$

Donde:

Nm = velocidad mecánica (rpm)

f = frecuencia (Hz)

s = deslizamiento (adimensional)

p = número de polos

2.2.3 Bomba centrífuga

Las bombas son equipos los cuales poseen unas paletas rotatorias encerradas en una carcasa generalmente hecha de hierro fundido. Debe su nombre debido a que la presión que crea es gracias a la acción centrífuga que esta produce.

El recuadro amarillo de la figura 2.5 muestra la bomba centrífuga de $\frac{1}{2}hp$ utilizada para transportar el agua desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque de nivel de la planta.

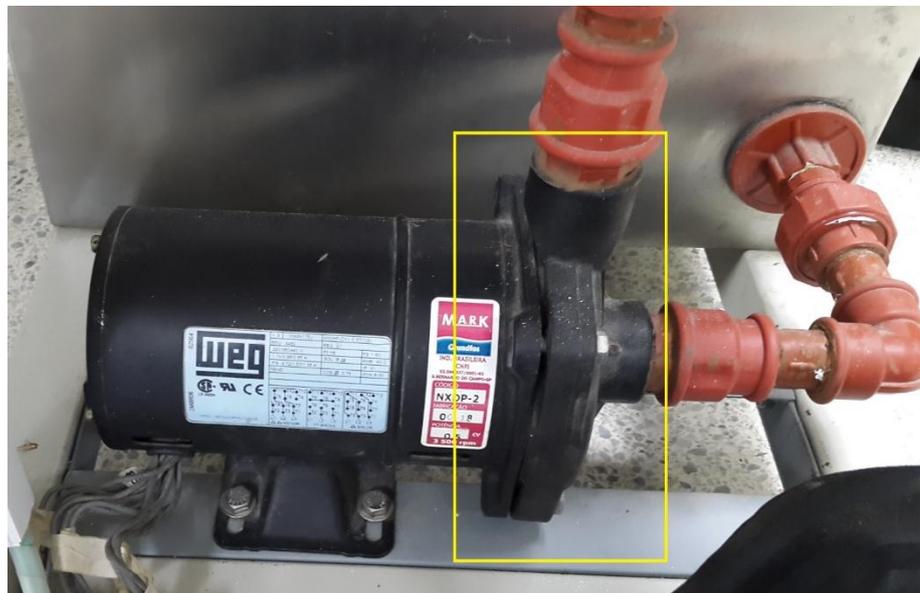


Figura 2.5 Bomba centrífuga del sistema.

El fluido ingresa a la bomba por el centro de esta, el fluido va ganando energía a lo que las paletas lo van guiando hacia afuera de bomba la parte superior de la bomba.

La aceleración con la que es llevado el fluido genera un incremento de energía, la cual debido a la forma de la bomba como una especie de caracol genera un aumento gradual en el área de flujo de esta manera la energía cinética a la salida de la bomba se convierte en presión.

2.2.4 Partes de una bomba centrífuga

2.2.4.1 Carcasa

La carcasa es la parte exterior de la bomba y esta convierte la energía cinética del fluido en presión para este, esto lo realiza al reducir la velocidad por un incremento gradual del área que se produce en esta.

2.2.4.2 Impulsores

Es la parte principal de la bomba centrífuga, esta recibe el fluido que llega a la bomba y le proporciona una velocidad la cual dependerá de la carga que produce la bomba.

2.2.4.3 Anillos de desgastes

Estos elementos son usados para prevenir el desgaste entre los impulsores y la carcasa, ya que existen secciones donde debido a lo cerca que se encuentran estas partes comienza a producirse el desgaste, con estos anillos se evita la necesidad de renovar estos elementos, los únicos elementos que hay que cambiar en un mantenimiento son los anillos de desgaste los cuales son muy fáciles de remover y reemplazar además de ser muy baratos.

2.2.4.4 Estoperas, empaques y sellos

Son utilizados para prevenir la fuga del fluido, a través del orificio donde ingresa el eje de la bomba y también por donde ingresa el flujo de aire hacia la bomba.

2.2.4.5 Eje

Es el eje donde giran todos los elementos de la bomba centrífuga, este además transmite el movimiento que es generado por el motor.

2.2.4.6 Cojinetes

Estos son un soporte al eje de todo el rotor en una alineación correcta con todas las partes estacionarias de la bomba centrífuga.

2.2.4.7 Bases

La base sirve para dar el soporte a la bomba, es la que sostiene el peso de la bomba centrífuga [3].

2.2.5 Eficiencias en una bomba centrífuga

2.2.5.1 Eficiencia mecánica

Esta eficiencia está relacionada con las pérdidas que se generan en la bomba centrífuga por el rozamiento en el cojinete y del fluido en sí, y esta relación se encuentra en la ecuación 2.4:

$$N_{mec} = \frac{W_{requerida}}{W_{mecánica}} \quad (2.4)$$

Donde:

N_{mec} = eficiencia mecánica (adimensional)

$W_{requerida}$ = Energía requerida para mover la bomba (W)

$W_{mecánica}$ = Energía que genera la salida de la bomba (W)

2.2.5.2 Eficiencia hidráulica

Es la relación que existe entre el trabajo específico ideal de la bomba y la real que se genera en el rodete, el trabajo específico ideal es calculado en condiciones estáticas.

2.2.5.3 Eficiencia total

Esta eficiencia es la relación entre la potencia eléctrica que es suministrada a la bomba centrífuga y la potencia hidráulica que entrega esta.

2.2.6 Control automático de procesos

El control automático de procesos tiene como objetivo mantener en un determinado valor de operación las variables de los distintos procesos, las cuales pueden ser: temperaturas, presiones, caudales, niveles, etc.

Estos parámetros son variables y al realizar acciones sobre estas se puede perder la calidad del producto, así como bajar la producción de esta [4].

2.2.7 Sistema de control por realimentación

Estos sistemas de control también denominados de lazo cerrado se basan en la medición directa de la variable en cuestión que necesita ser controlada para de esta manera tener una información veraz del sistema para de esta manera configurar la variable manipulada para de esta manera mantener en el punto de control la variable controlada.

Este método de control fue utilizado por primera vez por James Watt hace más de 200 años para controlar un proceso industrial de una máquina de vapor la cual presentaba una carga variable.

El diagrama de bloques de un sistema de control por retroalimentación es explicado en la figura 2.6, la entrada del sistema se compara con la señal que viene de un sensor en la salida del sistema luego esta llega al controlador el cual emite una señal hacia el actuador de la planta y luego de esto el sensor envía una nueva señal de la salida del sistema.

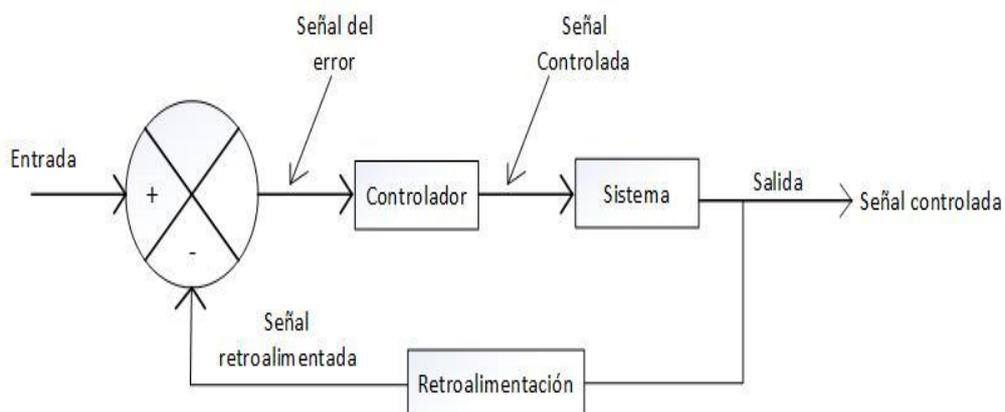


Figura 2.6 Diagrama de bloques de control por retroalimentación

2.2.8 Sistema de control anticipativo

El sistema de control por retroalimentación es una de las estrategias para el control de procesos más comunes que se encuentran en las empresas esto es debido a su simplicidad, pero en determinados procesos un sistema de control por retroalimentación no nos proporciona un control adecuado de la variable controlada.

Para dichos procesos existen otros sistemas de control los cuales han demostrado ser de gran utilidad, una de estos es el sistema de control anticipativo, ya que esta mide las perturbaciones que ingresan al sistema y lograr compensarlas antes de que se vea afectada o varíe el punto de control de la variable controlada, este control si es realizado correctamente la variable controlada no va a variar su punto de control.

En la figura 2.7 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control anticipativo en él se observa claramente como la señal que recibe el primer comparador no es de la salida si no del controlador al cual le llego la señal de una perturbación que entró al sistema. Luego del comparador la señal llega al actuador de la planta y después a la salida del sistema.

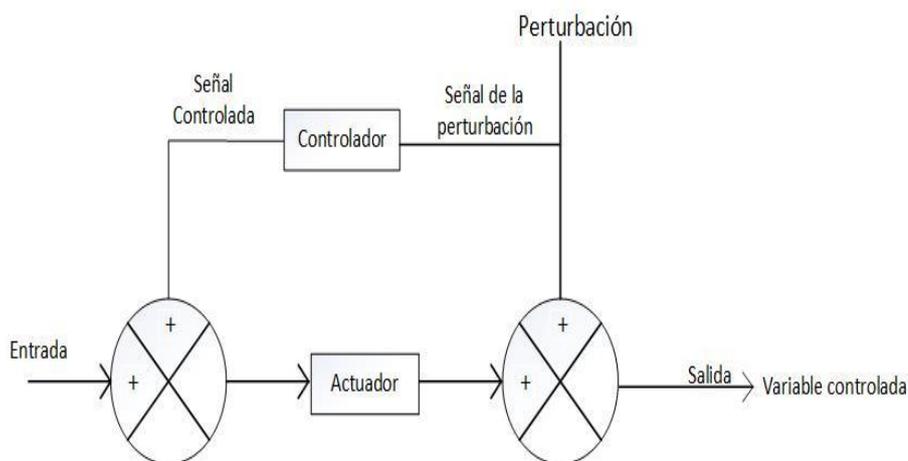


Figura 2.7 Diagrama de bloques de control anticipativo

Una de las principales ventajas de un sistema de control anticipativo es que se anticipa a las perturbaciones que ingresan al sistema evitando que

estas afecten el punto de control de la variable controlada, otra ventaja es que este sistema no produce una respuesta inestable.

Entre las desventajas se encuentran que para poder realizar un sistema de control anticipativo se necesita haber identificado todas las perturbaciones que pueden ingresar al sistema, requiere de un total conocimiento del modelo del sistema, y que no le es posible anular las perturbaciones no medidas [5].

2.2.9 Sistema de control en cascada

En la figura 2.8 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de control en cascada se muestra como la salida de un controlador retroalimentado primario o “maestro” es la señal que recibe otro controlador retroalimentado secundario o “esclavo”, ya que el control en cascada posee sistemas de control retroalimentados que están ordenados uno dentro del otro.

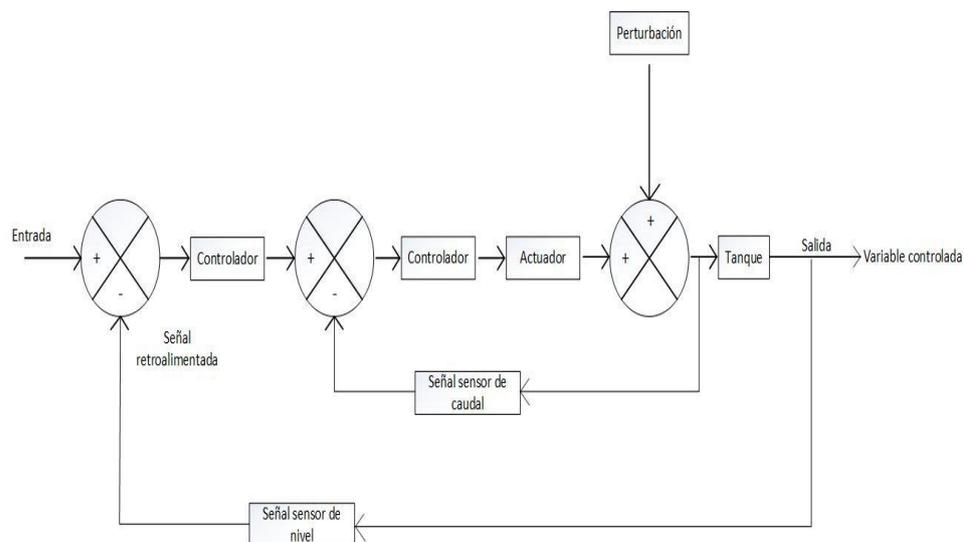


Figura 2.8 Diagrama de bloques de un control en cascada

El sistema de control en cascada se lo utiliza cuando un sistema de control retroalimentado no puede controlar efectivamente el punto de control de la variable controlada, cuando se posee una variable controlada y 2 o más variables medidas, o cuando las perturbaciones que ingresan al sistema.

Entre las principales ventajas de este sistema de control en cascada es que reduce las consecuencias que produce una perturbación en la variable secundaria sobre la primaria, a su vez disminuye los efectos que se producen de los retardos de tiempo, y un requisito para que se de este sistema es que el lazo secundario o interno tiene que ser más rápido que el lazo primario o externo.

2.2.10 Equipos para el control de los procesos

Los equipos que existen en el laboratorio de control automático de la Espol para adquirir las señales del sensor de caudal y nivel y que a su vez enviar la señal que controla el variador de frecuencia son los Compact Field Points (CFPs), debido a que su manejo y configuración son relativamente fáciles.

El Compact Field Point es un controlador de automatización programable que posee varias características como el poder ampliar su uso agregando módulos de E/S, la flexibilidad de una computadora, la seguridad que puede ofrecer un PLC y además de la disponibilidad de su fácil integración con Labview.

2.2.10.1 Compact Field Point CFP-2100

El CFP-2100 es un equipo muy versátil al cual se encuentra embebido para trabajar con Labview, así como para establecer comunicación con otros programas de similares características. Posee un puerto serial y una interfaz Ethernet con la cual nos podemos conectar a una red de computadoras, el controlador puede manejar hasta 8 módulos de E/S.

2.2.10.2 Compact Field Point CFP-1804

El CFP-1804 es un módulo de interfaz de red a este se le puede conectar hasta cuatro módulos de E/S y posee comunicación Ethernet. Posee funciones para facilitar su uso y mantenimiento, así como su instalación, también puede accederse a este equipo mediante el protocolo de comunicación OPC.

2.2.10.3 Módulos de Entrada/Salida

Los módulos de entrada/salida son los que reciben y envían las señales que procesa el Compact Field Point las cuales pueden ser digitales y analógicas tanto de voltaje como de corriente, Los módulos que posee el laboratorio de control automático de la Espol tienen características de protección para sobre-voltajes transitorios, pueden ser manipulados con energía para disminuir el tiempo de paro del sistema, además de un amplio rango de temperatura de trabajo.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente trabajo fue dividido en 3 fases para un desarrollo más eficiente estas son: diseño, simulación e implementación.

3.1. Diseño

Para dar inicio al diseño de nuestra planta se realizó la curva característica de los sensores utilizados para el proyecto a continuación se muestra la tabla 1. Que muestra los valores de la corriente de salida del sensor de nivel [mA] vs el nivel de agua en el tanque [cm].

# Dato	Nivel (cm)	Nivel medido con sensor (mA)	# Dato	Nivel (cm)	Nivel medido con sensor (mA)
1	54	7.47	39	30.5	5.978
2	53	7.39	40	30	5.938
3	52	7.334	41	29.5	5.908
4	51	7.27	42	29	5.878
5	50	7.21	43	28.5	5.848
6	49	7.144	44	28	5.818
7	48	7.079	45	27.5	5.788
8	47	7.019	46	27	5.753
9	46	6.954	47	26.5	5.723
10	45	6.889	48	26	5.687
11	44.5	6.864	49	25.5	5.657
12	44	6.834	50	25	5.627
13	43.5	6.804	51	24	5.567

14	43	6.764	52	23	5.507
15	42.5	6.744	53	22	5.437
16	42	6.704	54	21	5.377
17	41.5	6.674	55	20	5.317
18	41	6.644	56	19	5.252
19	40.5	6.609	57	18	5.192
20	40	6.564	58	17	5.127
21	39.5	6.529	59	16	5.067
22	39	6.504	60	15	4.997
23	38.5	6.469	61	14	4.937
24	38	6.444	62	13	4.877
25	37.5	6.414	63	12	4.807
26	37	6.378	64	11	4.746
27	36.5	6.348	65	10	4.686
28	36	6.313	66	9	4.621
29	35.5	6.283	67	8	4.556
30	35	6.253	68	7	4.496
31	34.5	6.228	69	6	4.431
32	34	6.188	70	5	4.376
33	33.5	6.163	71	4	4.306
34	33	6.138	72	3	4.246
35	32.5	6.098	73	2	4.173
36	32	6.068	74	1	4.08
37	31.5	6.038	75	0	4

38	31	6.008			
----	----	-------	--	--	--

Tabla 1: Corriente de salida del sensor de nivel vs nivel de agua en el tanque

A partir de esta tabla se encontró la curva característica del sensor de nivel como se muestra en la figura 3.1 la cual incluye a su vez la ecuación característica.

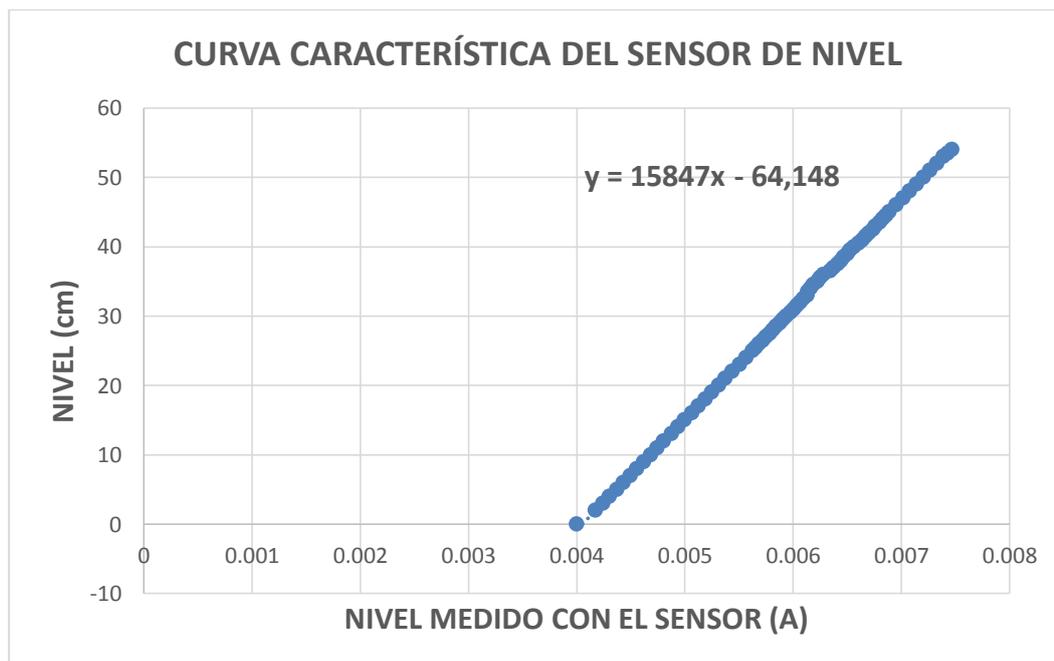


Figura 3.1: Curva característica del sensor de nivel

Luego se realizó la misma operación para el sensor de caudal los cuales se muestran en la tabla 2. Que indica la corriente de salida del sensor de caudal [mA] vs el caudal que ingresa al tanque de nivel [Lts/min]

# Dato	Caudal (Lt/min)	Caudal medido con sensor (mA)	# Dato	Caudal (Lt/min)	Caudal medido con sensor (mA)
1	0	4	43	22.5	7.610
2	2	4.336	44	23	7.675
3	2.5	4.376	45	23.5	7.760

4	3	4.461	46	24	7.845
5	3.5	4.526	47	24.5	7.915
6	4	4.626	48	25	7.990
7	4.5	4.736	49	25.5	8.070
8	5	4.776	50	26	8.136
9	5.5	4.842	51	26.5	8.216
10	6	4.937	52	27	8.296
11	6.5	5.067	53	27.5	8.381
12	7	5.137	54	28	8.461
13	7.5	5.212	55	28.5	8.541
14	8	5.297	56	29	8.616
15	8.5	5.377	57	29.5	8.681
16	9	5.442	58	30	8.781
17	9.5	5.542	59	30.5	8.852
18	10	5.602	60	31	8.967
19	10.5	5.687	61	31.5	9.027
20	11	5.768	62	32	9.102
21	11.5	5.858	63	32.5	9.197
22	12	5.928	64	33	9.277
23	12.5	6.023	65	33.5	9.347
24	13	6.093	66	34	9.442
25	13.5	6.168	67	34.5	9.507
26	14	6.258	68	35	9.587
27	14.5	6.338	69	35.5	9.652

28	15	6.383	70	36	9.782
29	15.5	6.479	71	36.5	9.833
30	16	6.594	72	37	9.928
31	16.5	6.644	73	37.5	10.013
32	17	6.729	74	38	10.083
33	17.5	6.789	75	38.5	10.128
34	18	6.894	76	39	10.213
35	18.5	6.974	77	40	10.313
36	19	7.044	78	40.5	10.463
37	19.5	7.109	79	41	10.534
38	20	7.184	80	41.5	10.664
39	20.5	7.269	81	42	10.724
40	21	7.329	82	42.5	10.789
41	21.5	7.420	83	43	10869
42	22	7.500			

Tabla 2: Corriente de salida del sensor de caudal vs caudal de entrada al tanque de nivel

Después de obtener los valores de corriente de salida del sensor de caudal se continuó con el proceso para encontrar la curva característica del sensor de caudal junto a su respectiva ecuación característica como lo muestra la figura 3.2.

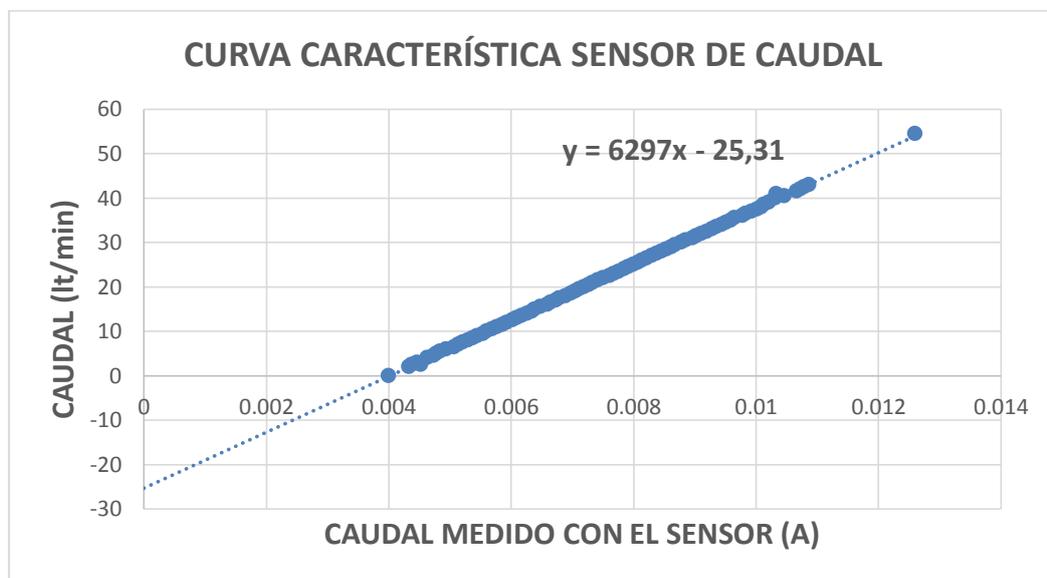


Figura 3.2: Curva característica del sensor de caudal

Una vez encontrada las curvas características de nuestros sensores se procede a localizar el punto de operación de nuestra planta por medio del programa de National Instrument el cual permite conectar el computador con el compact Field point en la figura 3.3 se muestra el entorno del programa y los valores de los sensores, el punto de operación que se asignó para la planta fue de 35cm y el voltaje que requiere el variador de frecuencia para conseguirlo es de 4.63v con un tiempo de estabilización de 20 minutos.

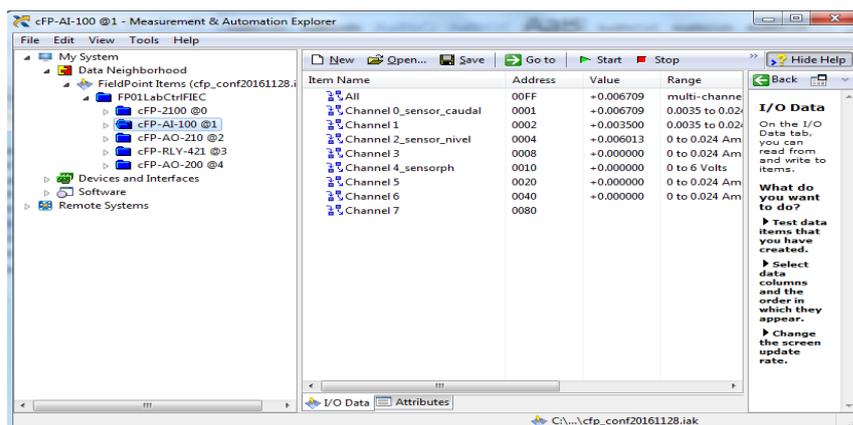


Figura 3.3: Programa de National Instrument para comunicación del compact Field point con el computador

Al encontrar el punto de operación se diseñó un programa en Simulink para evaluar la manera en que reacciona el sistema ante una entrada de pulsos en la figura 3.4 se observa el programa diseñado.

El programa esta comunicado a la vez con el compact Field point por medio del estándar opc, en la figura 3.5 se muestra la configuración para lograr la comunicación con el bloque OPC configuration.

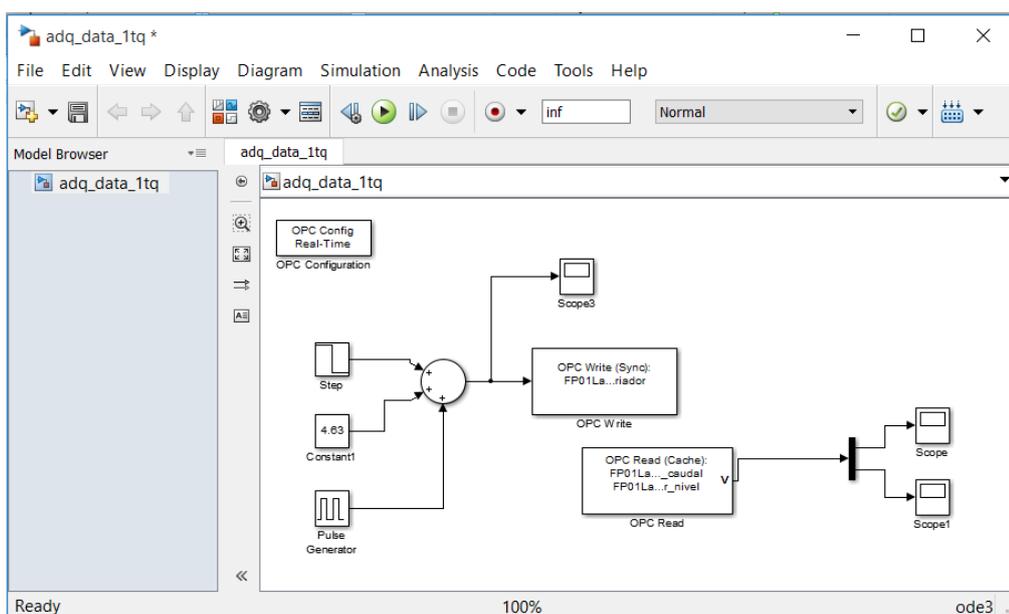


Figura 3.4: Programa en Simulink para evaluar el sistema

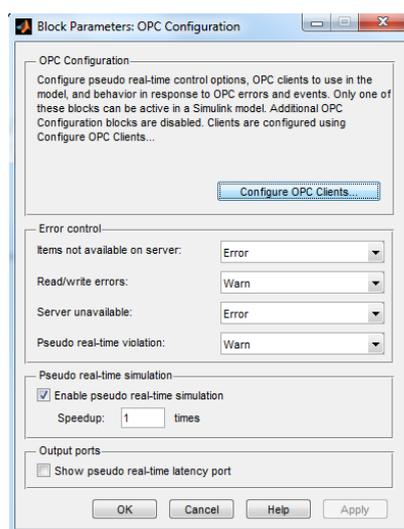


Figura 3.5 Bloque OPC configuration

Una vez en la configuración del bloque se selecciona “configure OPC clients” y nos mostrara la ventana de la figura 3.6

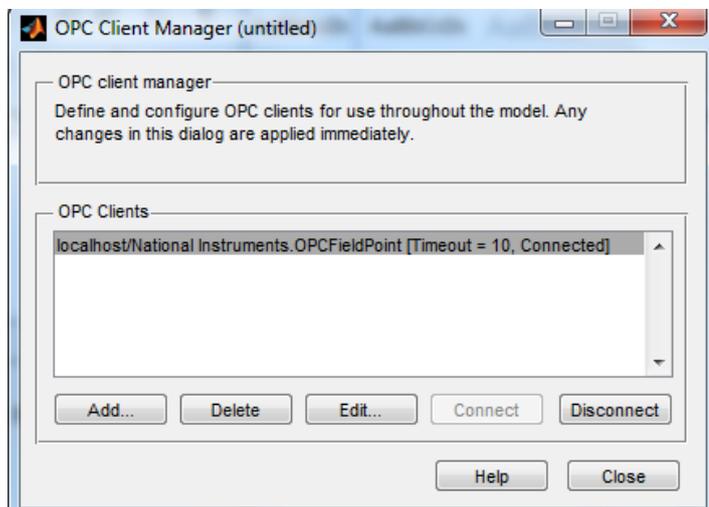


Figura 3.6: OPC client manager

En el OPC client manager se selecciona la opción add con la cual se activará la ventana de la figura 3.7 en la cual podremos seleccionar los clientes que dispongan de una comunicación OPC y al dar clic en ok y ya se tiene configurado la comunicación OPC con el compact Field point.

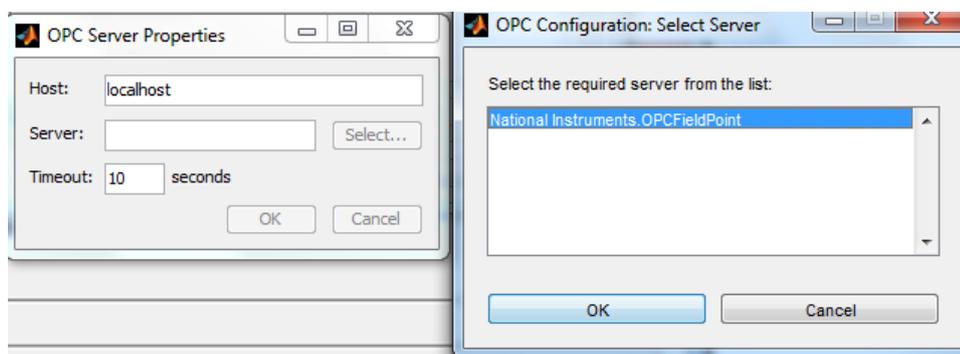


Figura 3.7: OPC clients disponibles

Al ya disponer de la comunicación se necesita configurar los bloques de escritura como en la figura 3.8 para escribir al variador de frecuencia los voltajes que deseemos

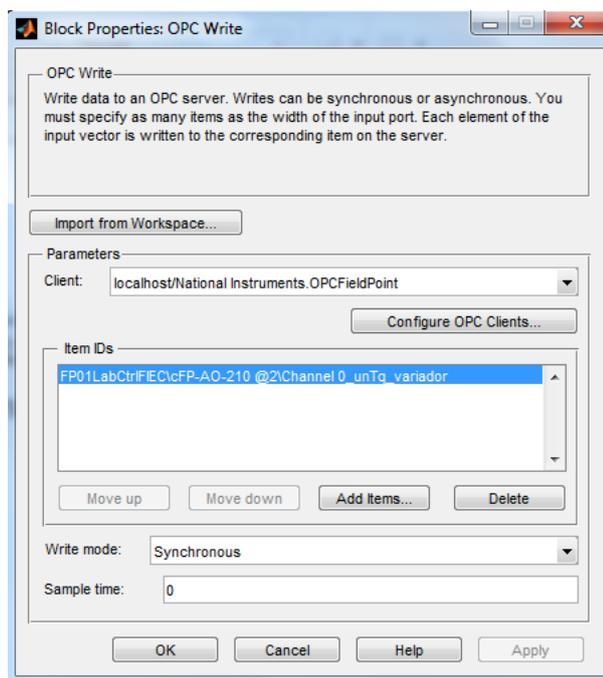


Figura 3.8: OPC write

Una vez en el bloque de OPC write se selecciona el botón de Add ítems para que se muestre la ventana de la figura 3.9 en la cual buscaremos el variador de frecuencia que se encuentra en los dispositivos conectados al compact Field point.

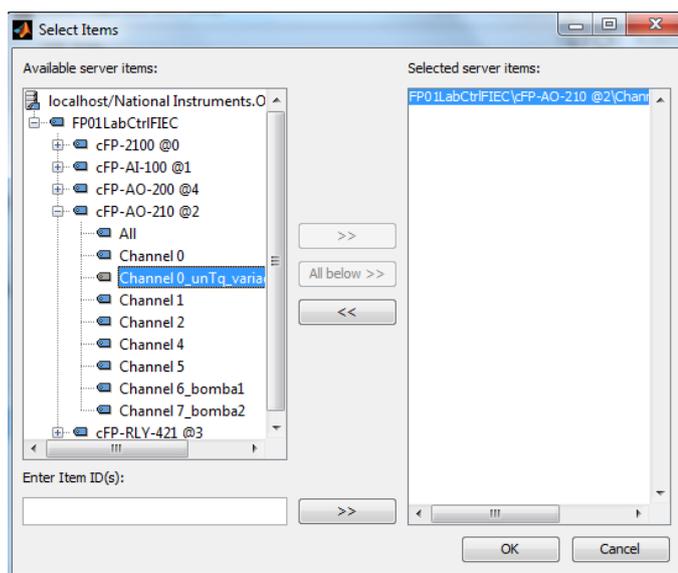


Figura 3.9: Select ítems OPC write

Luego de configurar el bloque de OPC write se configura el bloque de OPC read el cual como muestra la figura 3.10 sirve para configurar los dispositivos de lectura del compact Field point.

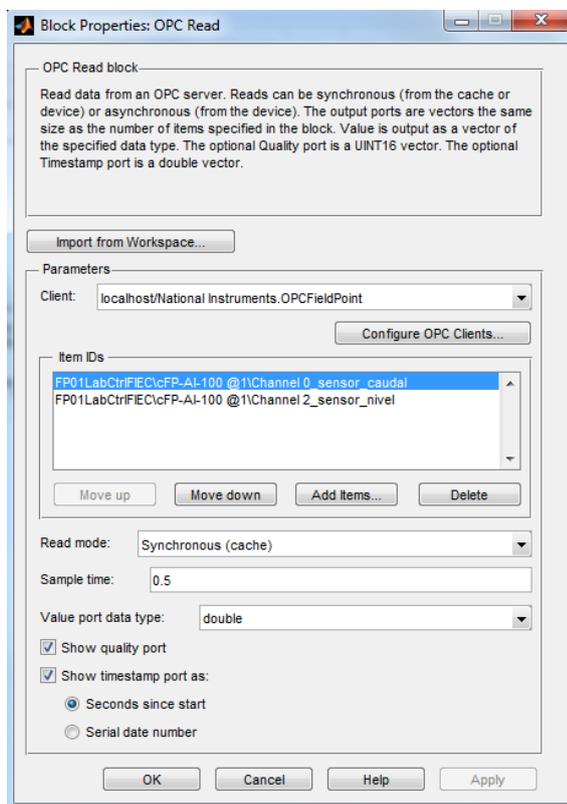


Figura 3.10 OPC read

Se selecciona la opción add ítems para agregar los dispositivos que se necesita y nos aparecerá la ventana de la figura 3.11 en la cual se deben agregar los dispositivos que se necesita leer en este caso el sensor de caudal y el sensor de nivel de nuestro compact field point.

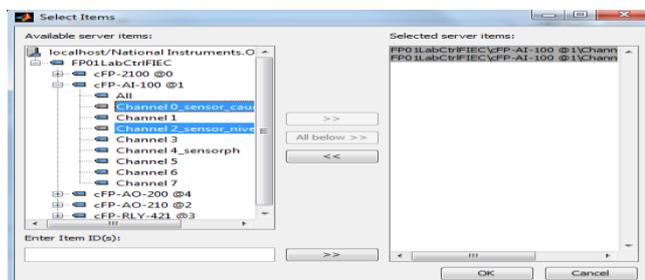


Figura 3.11: Select ítems OPC read

Con estas configuraciones ya se tiene una comunicación con el compact field point tanto de escritura hacia el variador de frecuencia como de lectura de los sensores de la planta.

Ahora tenemos que configurar los bloques de la señal de entrada del OPC write en el cual se cuenta con un bloque constante el cual se configuró en 4.63 como se ve en la figura 3.12.

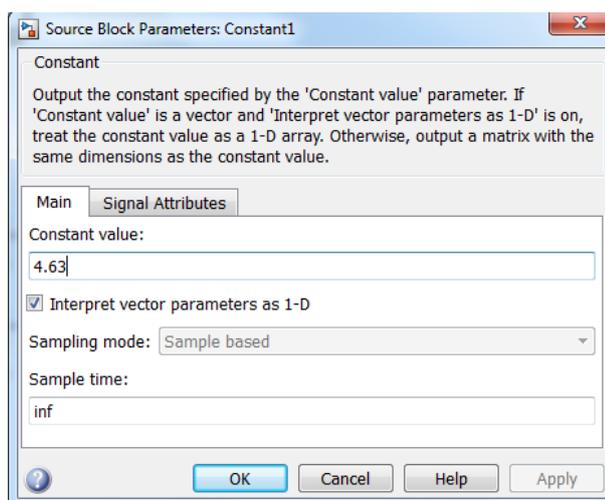


Figura 3.12: Bloque de la constante

A esta constante le añadimos un bloque generador de pulso como en la figura 3.13 este tiene un desfase de 1500 segundos que es el tiempo que necesita el sistema para estabilizarse al comienzo y luego de esto tiene una amplitud 0.14v con un periodo de 1800 segundos y un porcentaje del periodo de 50% ya que por medio de pruebas anteriores el sistema ante este tipo de cambios se estabiliza a los 720 segundos por eso se estableció un tiempo de 900 segundos para cada cambio.

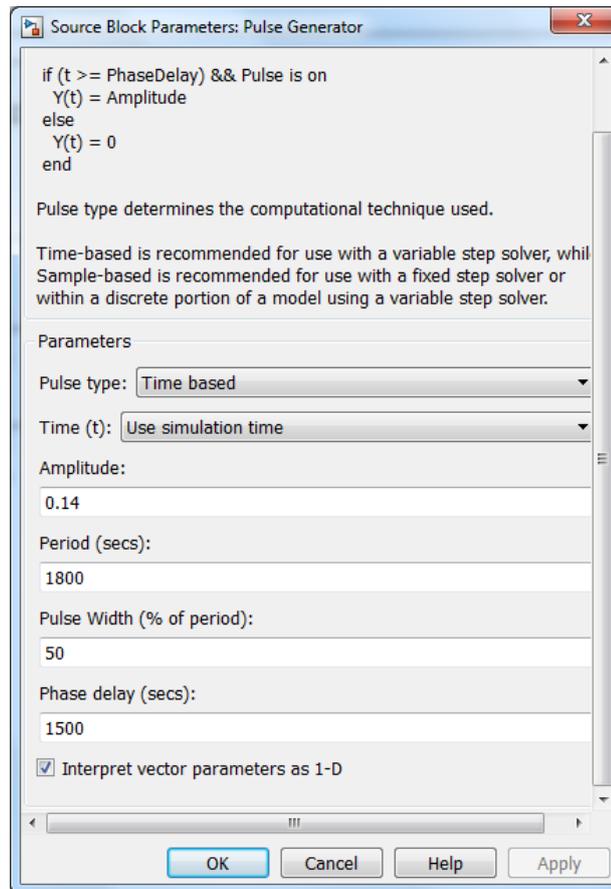


Figura 3.13: Bloque generador de pulsos

Con el bloque generador de pulsos se necesita un bloque escalón con un valor de -0.07 y con un tiempo para su activación de 1500 segundos como muestra la figura 3.14 este bloque es necesario para desfasar -0.07 el bloque generador de pulsos y el valor del punto de operación del sistema quede como el valor promedio.

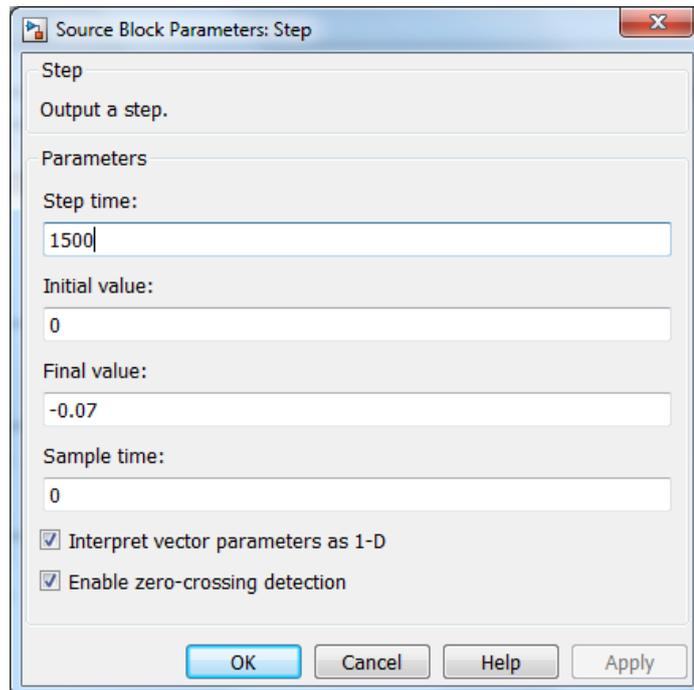


Figura 3.14: Bloque escalón

Después de configurar todos estos bloques se unen por medio de un sumador y este es el valor de entrada que se envía al OPC write y por ende al variador de frecuencia.

En el bloque del OPC read solo se necesita configurar los scopes para la salida de este bloque, uno para el sensor de caudal y otro para el sensor de nivel, la configuración es muy similar, en la figura 3.15 podemos observar la configuración, en la ventana del scope se selecciona parameters y se abre la ventana scope parameters en la viñeta de history se desactiva el cuadro de limit data points to last ya que se va a necesitar muchos datos no es conveniente que se comiencen a borrar los datos del comienzo como pasaría si no se desactiva este cuadro, luego se activa el cuadro de save data to workspace le se le agrega un nombre en este caso sensor_caudalnuevo y en el formato array para que nos muestre una matriz en el workspace al final de Matlab.

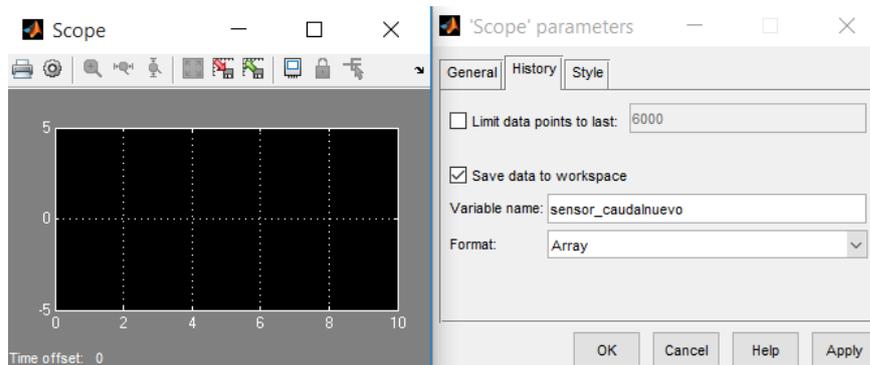


Figura 3.15: Configuración del scope

3.2. Simulación

Al finalizar el programa en Simulink se dio inicio a las pruebas para observar el funcionamiento del sistema con las variaciones del punto de operación realizadas anteriormente, en la figura 3.16 se puede reflejar la actividad del sensor de caudal para un tiempo de 7000 segundos con 1 periodo de estabilización del punto de operación de 1500 segundos y 3 periodos del generador de pulsos de 1800 segundos cada uno.

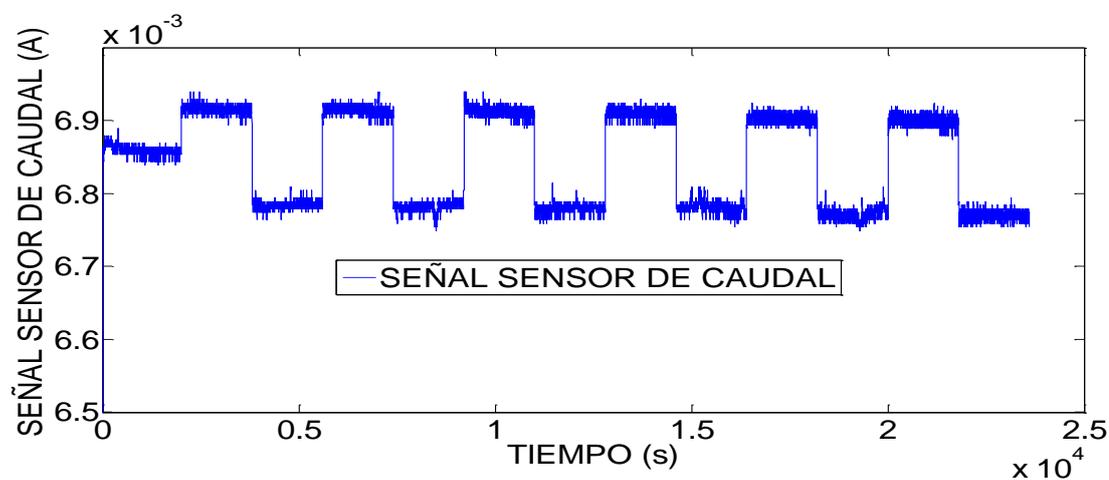


Figura 3.16: Actividad del sensor de caudal

La prueba antes mencionada dio como resultado a su vez la actividad del sensor de nivel como muestra la figura 3.17.

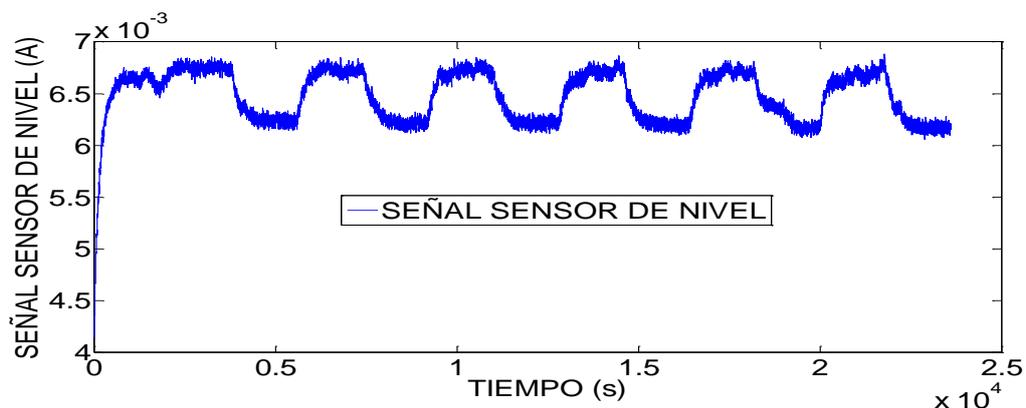


Figura 3.17: Actividad del sensor de nivel

Con los datos ya obtenidos podemos hallar la función de transferencia, no obstante, se debe realizar un filtro para los valores del sensor de nivel y caudal para esto debemos buscar el tiempo de estabilización del sistema que lo encontramos con la ecuación 3.1 y así obtener el Tao con la ecuación 3.2:

$$t_{estabilización} = t_{final} - t_{inicial} \quad (3.1)$$

$$T = t_{estabilización} / 4 \quad (3.2)$$

$$T = tao$$

Para de esta manera proceder a encontrar la frecuencia natural del sistema con la ecuación 3.3, con la frecuencia natural del sistema podemos obtener la frecuencia del filtro el cual tiene que ser por lo menos 5 veces mayor que la frecuencia natural del sistema como lo indica la ecuación 3.4.

$$\omega_n = 1/T \quad (3.3)$$

$$\omega_n = \text{frecuencia} - \text{natural} - \text{del} - \text{sistema}$$

$$\omega_f > 5\omega_n \quad (3.4)$$

$$\omega_f = \text{frecuencia} - \text{del} - \text{filtro}$$

Con la frecuencia del filtro se procede a realizar la función de transferencia de este, para obtener una nueva matriz "yf" tanto del sensor de caudal como el de nivel se realiza una simulación de la función de transferencia de cada uno de

estos con los valores que nos proporcionaron estos sensores, pero con la frecuencia del filtro.

Para encontrar el punto de operación del sistema “yop” se necesita la media entre los valores en donde la planta llega al punto de operación del sistema, luego se busca “y” con la ecuación 3.5:

$$Y = yf - yop \quad (3.5)$$

Por último, se encuentra la entrada del sistema centrada en el origen con la ecuación 3.6.

$$u = u - 4.63 \quad (3.6)$$

A continuación, se escribe el comando `ident` en Matlab para proceder a hacer la identificación del sistema, al dar enter se abre una ventana de system identification tool como muestra la figura 3.18

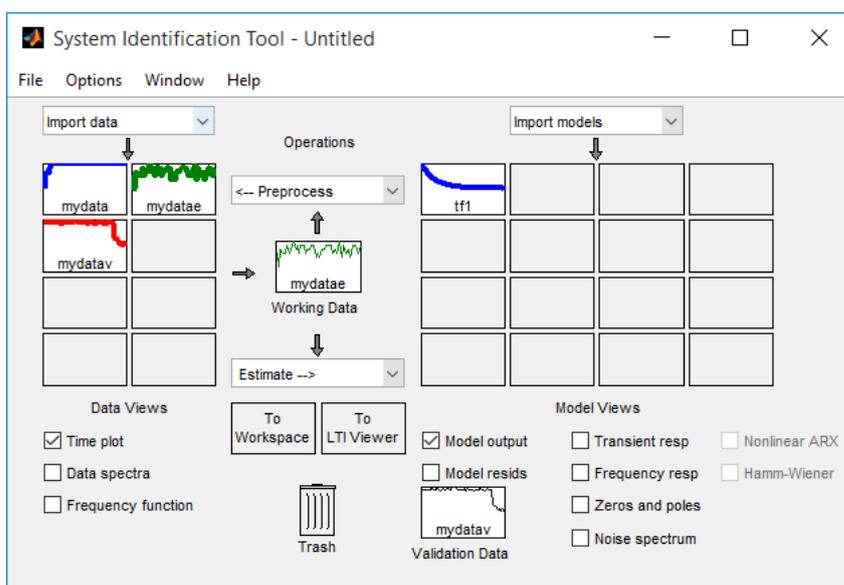


Figura 3.18: System identification tool

Al dar clic en import data y luego time domain data nos aparecerá una ventana donde podremos seleccionar el la entrada y la salida del sistema como se observa en la figura 3.19 y se da clic en import.

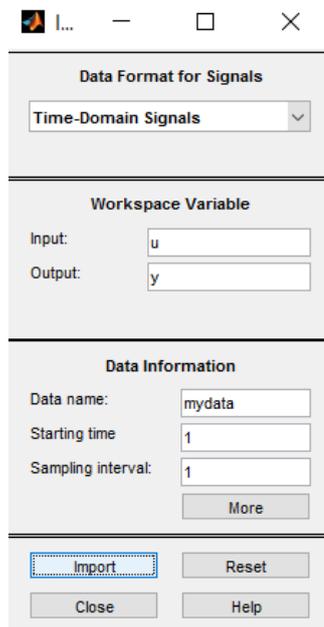


Figura 3.19: import data

Como siguiente paso se va a operations, se da clic preprocess y se selecciona Select range el cual nos abrirá una nueva ventana como muestra la figura 3.20 donde se debe seleccionar el rango de estimación y el de validación de los datos y dar clic en insert cuando se los seleccione, estos rangos deben de ser por lo menos un periodo de la entrada del sistema.

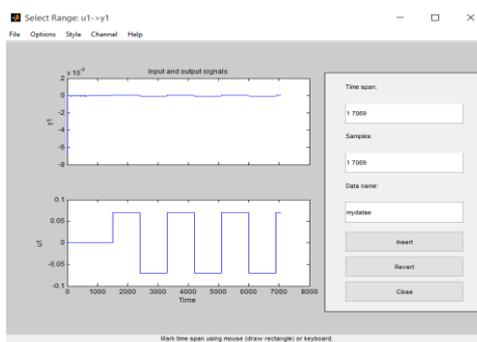


Figura 3.20: Select range

En la ventana de system identification tool se arrastra el rango de estimación al espacio de working data y el rango de validación al espacio de validation data, se procede a dar clic en estimate y se selecciona transfer function models que como la figura 3.21 nos mostrara una ventana donde se puede seleccionar el

número de polos y zeros que se desea estimar al escoger se da clic en estimate

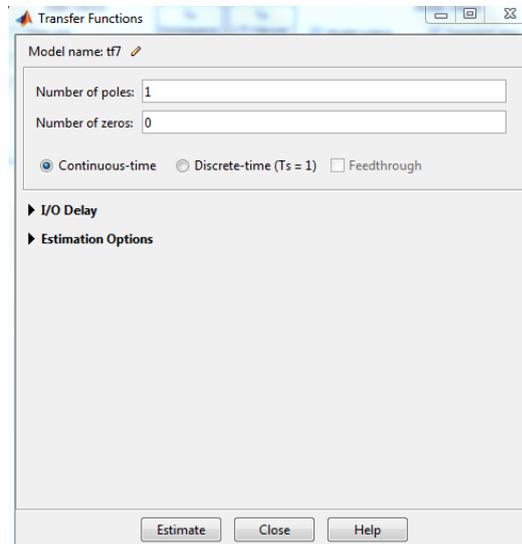


Figura 3.21: Transfer funtion

Luego se abre una ventana donde nos muestra el modelo de la salida del sensor de caudal como la figura 3.22 en la cual podemos ver el porcentaje de aproximación el cual con un valor del 80% es considerado aceptable.

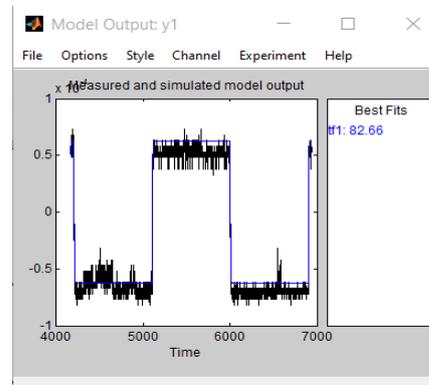


Figura 3.22: Modelo de la salida sensor de caudal

El modelo de la salida del sensor de nivel es mostrado en la figura 3.23. así mismo se buscó un porcentaje de aproximación de por lo menos el 80%.

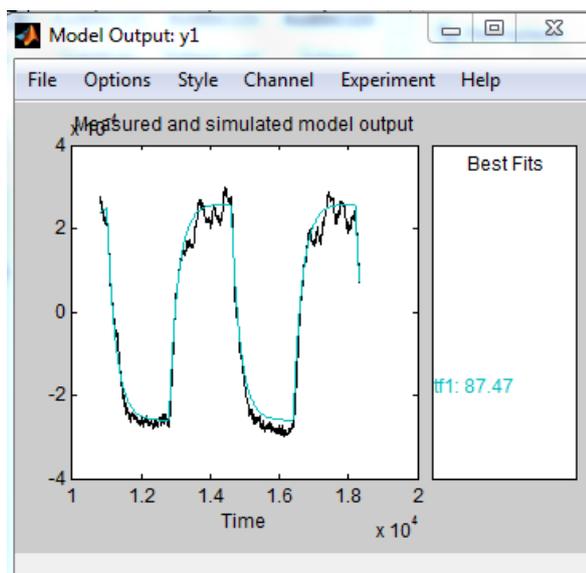


Figura 3.23: Modelo de la salida sensor de nivel

Al obtener un porcentaje de aproximación aceptable en la ventana de system identification tool en el área de import models en la ventana que se realizó se da clic derecho para abrir la ventana model info en la figura 3.24 se muestra la función de transferencia del tanque de nivel la cual se obtuvo con los valores del sensor de nivel.

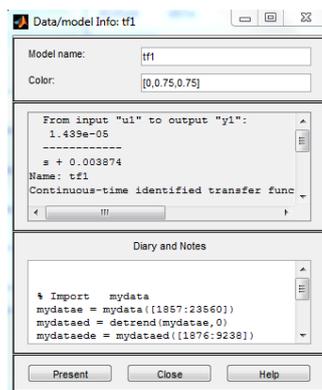


Figura 3.24: Función de transferencia del tanque de nivel

En la figura 3.25 se muestra la función de transferencia de la bomba la cual se la realizo con los valores del sensor de caudal.

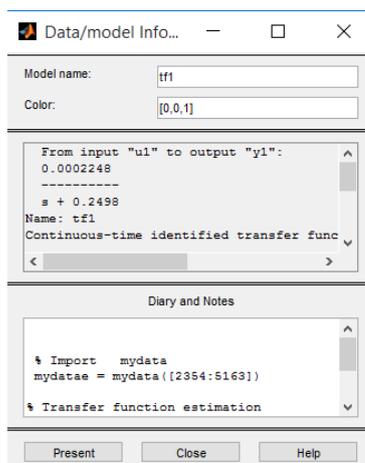


Figura 3.25: Función de transferencia de la bomba

3.3. Implementación del controlador con algoritmo en cascada

Una vez obtenida la función de transferencia de la bomba debemos pasarla a una función de transferencia con la curva característica de los sensores y con las unidades de cm y segundos para así obtener una nueva función de transferencia la cual es la ecuación 3.7, y lo mismo con la función de transferencia del tanque de nivel que es la ecuación 3.8.

$$G_{bomba} = \frac{0.0002248}{s + 0.2498} \quad (3.7)$$

$$G_{tanque} = \frac{1.439e-05}{s + 0.003874} \quad (3.8)$$

Con esta función de transferencia se necesita pasarla a las unidades correctas, la función de transferencia del tanque solo se necesita multiplicarla por la pendiente de su curva característica “15847” y nos da como resultado la ecuación 3.9, pero la función de transferencia aparte de multiplicarse por la pendiente de su curva característica “6297” se necesita transformar las unidades que están en Lts/min a cm³/s para esto se multiplica a su vez por “16.67” lo cual es la ecuación 3.10

$$G_{bomba} = \frac{23.59}{s + 0.2498} \quad (3.9)$$

$$G_{\text{tanque}} = \frac{0.228}{s + 0.003874} \quad (3.10)$$

Para hallar la función de transferencia del tanque que se necesita para este controlador se necesita tener la función de transferencia en base al caudal que le ingresa a la función de transferencia para esto se tiene que multiplicar la función de transferencia del tanque anterior por el inverso de la función de transferencia de la bomba lo cual esta expresado en la ecuación 3.11.

$$G_{\text{tanque}} = \frac{0.228s + 0.05695}{23.59s + 0.09139} \quad (3.11)$$

Con la función de transferencia en Matlab procedemos a escribir el comando sisotool el cual nos abrirá una ventana como muestra la figura 3.26.

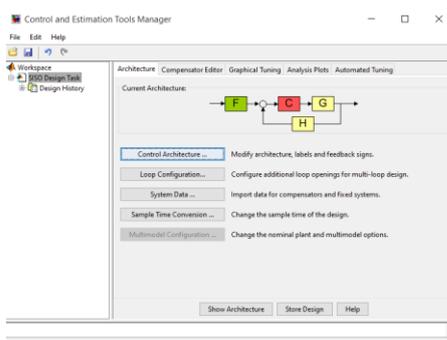


Figura 3.26: Sisotool

En la ventana de Sisotool se da clic en system data y se muestra una ventana como la figura 3.27 en la cual están las partes de la arquitectura.

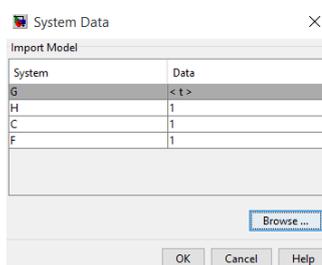


Figura 3.27: system data

Una vez allí se selecciona la G de la función de transferencia y se da clic en browse y como muestra la figura 3.28 se selecciona la función de transferencia del sistema y se da clic en import.

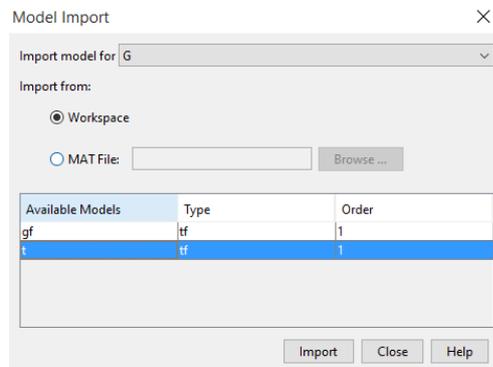


Figura 3.28: Model import

En la parte de analysis plot como la figura 3.29 se selecciona la entrada escalón y damos clic en show analysis plot

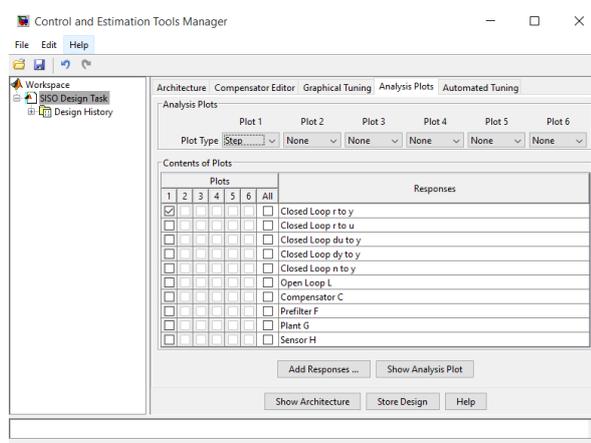


Figura 3.29: Analysis plot

En la parte de graphical tuning como la figura 3.30 se selecciona root locus y se da clic en show design plot

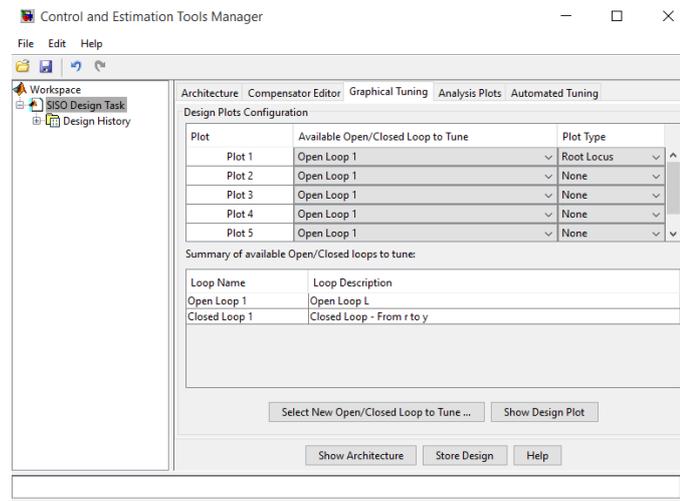


Figura 3.30: Graphical tuning

En el gráfico de la trayectoria de las raíces movemos el polo de lazo cerrado como se puede observar en la figura 3.31 para obtener en el gráfico de analysis plot un tiempo de estabilización de 3.99 segundos el cual se muestra en la figura 3.32 ya que sin el controlador el tiempo de estabilización era de 5 segundos

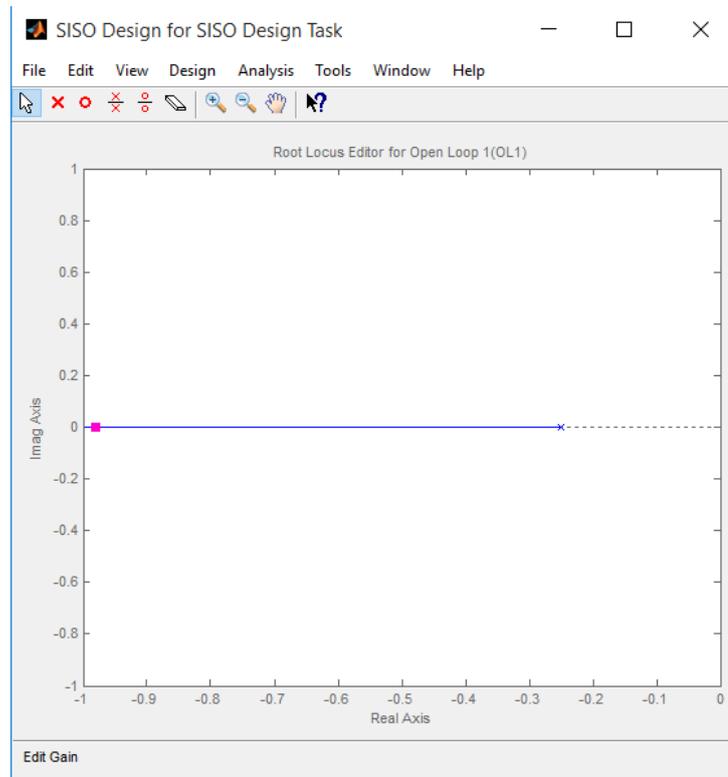


Figura 3.31: Trayectoria de las raíces controlador secundario

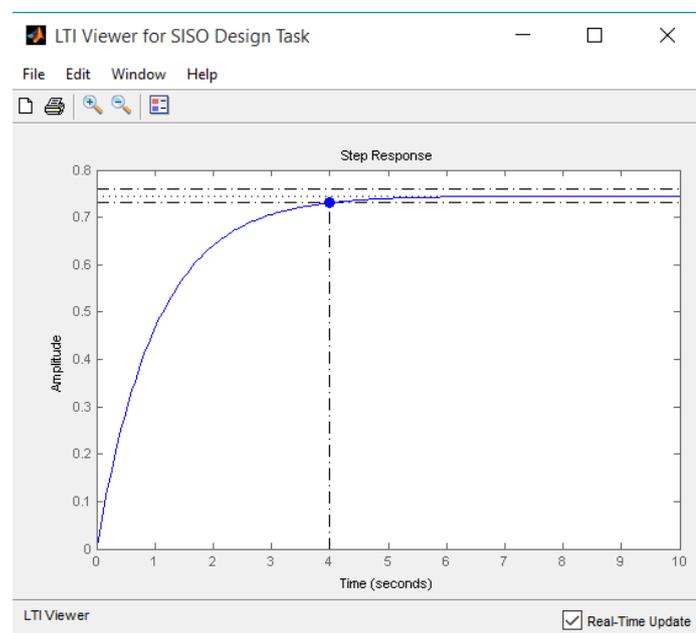


Figura 3.32: Análisis grafico controlador secundario

En la ventana principal de sisotool en la viñeta de compensador editor se puede observar como en la figura 3.33 la ganancia del controlador

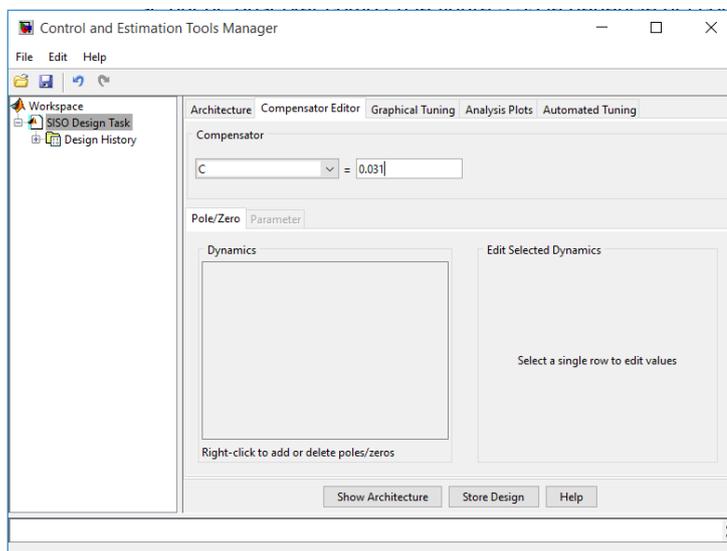


Figura 3.33: Controlador secundario

Con el controlador secundario obtenido previamente el cual tiene una ganancia de 0.031 ahora tenemos que reducir el lazo cerrado interno para esto se multiplica el controlador interno con la función de transferencia de la bomba y luego la fórmula de retroalimentación esto nos da como resultado la ecuación 3.12.

$$T_l = \frac{0.7313}{s + 0.9811} \quad (3.12)$$

Este valor tiene que ser multiplicado con la función de transferencia del tanque de nivel para de esta forma poder encontrar el controlador principal el cual es la ecuación 3.13.

$$T_2 = \frac{0.1667s + 0.04165}{23.59s^2 + 23.24s + 0.08966} \quad (3.13)$$

Al abrir Sisotool para calcular el controlador principal se obtienen la trayectoria de las raíces del controlador principal como se muestra en la figura 3.34 y el analysis plot como lo muestra la figura 3.35

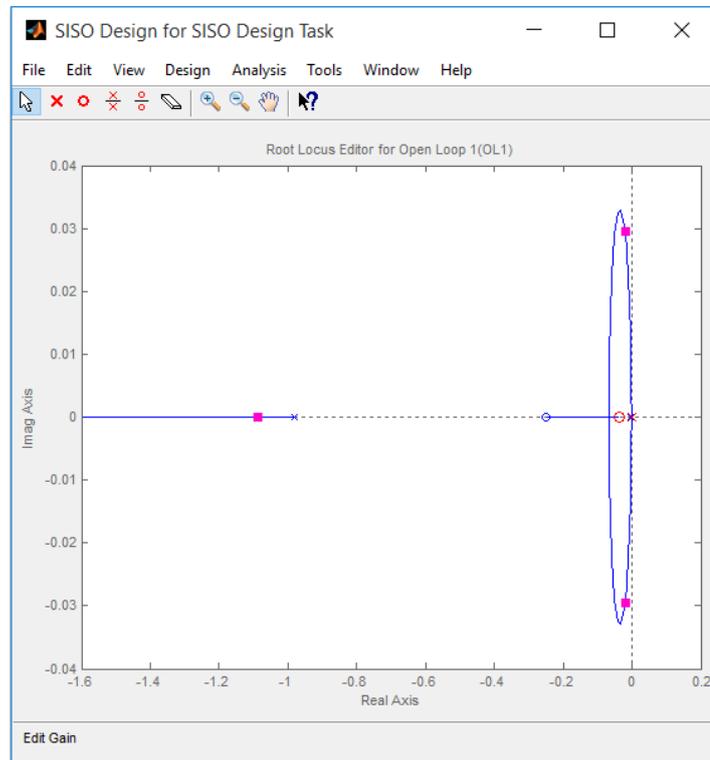


Figura 3.34: Trayectoria de las raíces controlador principal

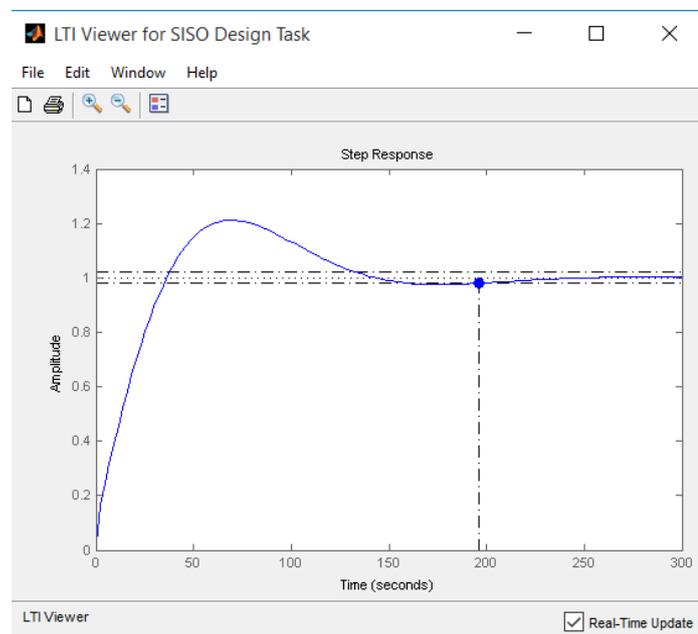


Figura 3.35: Análisis del controlador principal

En la ventana principal del Sisotool se puede observar el controlador principal que se ha encontrado como lo muestra la figura 3.36

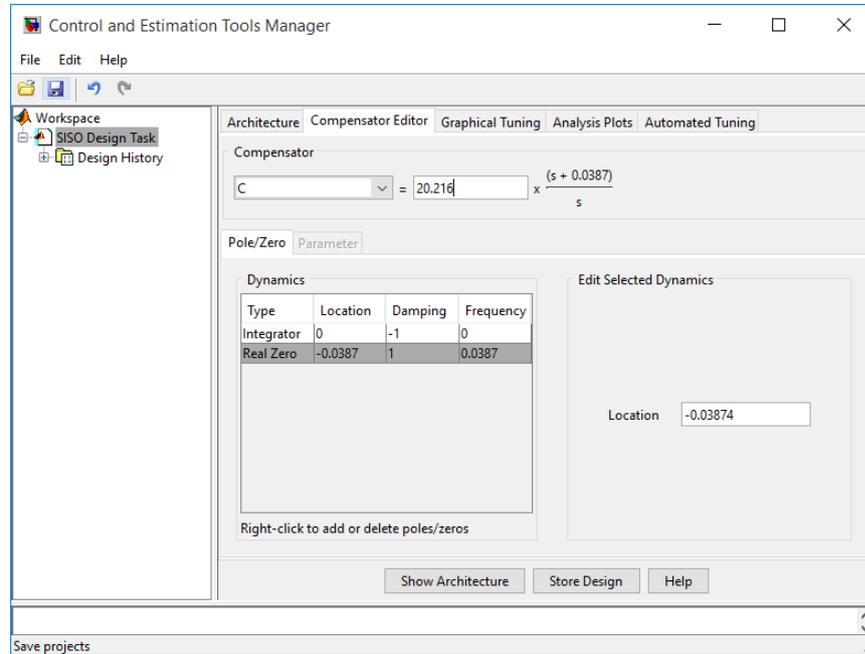


Figura 3.36: Controlador principal

Al obtener el controlador principal el cual es un controlador pi con una $p=20.216$ e un $i=0.07823592$ se ha ya encontrado todos los controladores del controlador con algoritmo tipo cascada

3.4. Implementación del controlador con algoritmo anticipativo

Ahora se va a encontrar el controlador con algoritmo anticipativo para esto primero se debe encontrar el controlador con lazo realimentado normal como se no existiera perturbación alguna y para esto usamos la herramienta Sisotool como lo muestra la figura 3.37 de la trayectoria de las raíces y la figura 3.38 del analysis plot para ver el tiempo de estabilización que esta vez usamos un tiempo de estabilización de 200 segundos

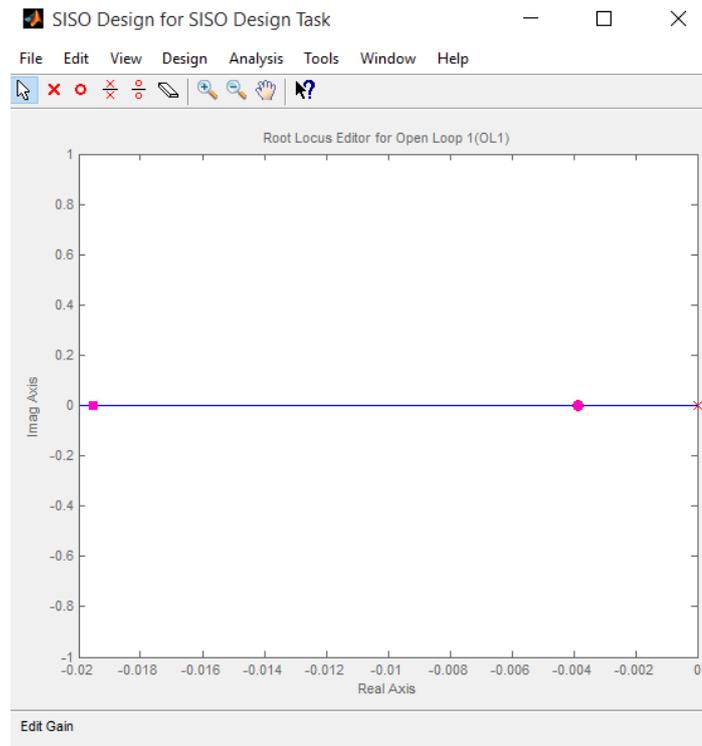


Figura 3.37 trayectoria de las raíces del controlador anticipativo

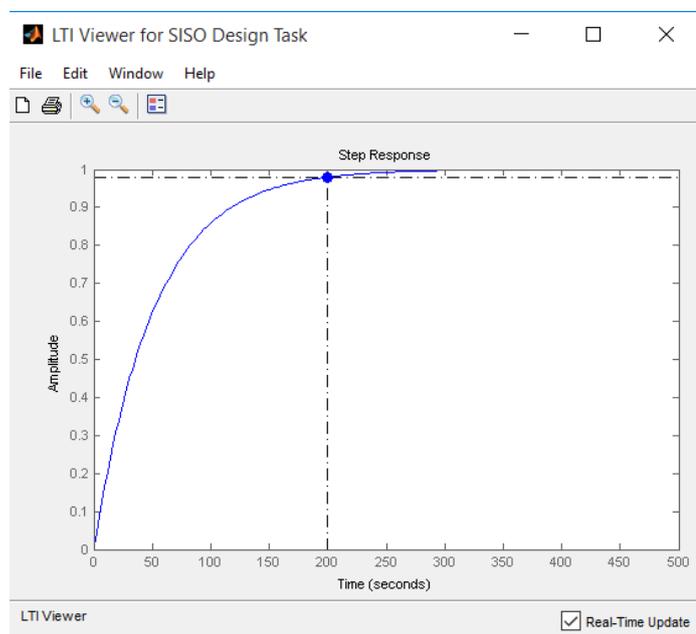


Figura 3.38: Análisis del controlador anticipativo

En la ventana principal del Sisotool se puede observar el controlador que se encontró como lo muestra la figura 3.39

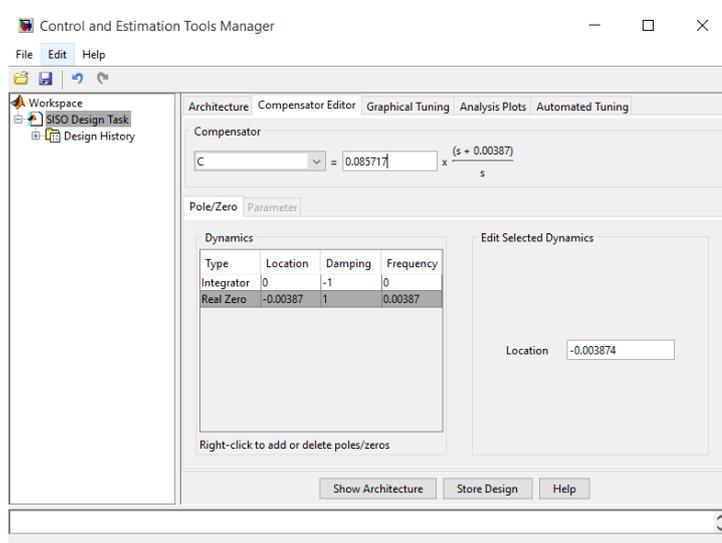


Figura 3.39: Controlador realimentado para anticipativo

Al obtener el controlador realimentado el cual es un controlador pi con una $p=0.085717$ e un $i=0.0003321$ se ha ya encontrado una parte del algoritmo anticipativo para esto debemos hacer cero la entrada al sistema y quedarnos solo con la entrada de la perturbación y la función de transferencia del tanque y se toma solo las ganancias de la función de transferencia de este, pero inversa esto da como resultado la ecuación 3.14.

$$C_{anticipativo} = \frac{0.09139}{0.005923} = 15.4297 \quad (3.14)$$

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1 Planta sin controlador

Al inicio en esta planta se realizaron unas pruebas para determinar su estado y pudo observar que no disponía de ningún tipo de control en el cual se pueda determinar una referencia.

Se procedió a desarrollar el programa en Simulink de la figura 4.1 el cual su propósito era enviar un voltaje al variador y determinar el nivel del tanque y el caudal que ingresa a este.

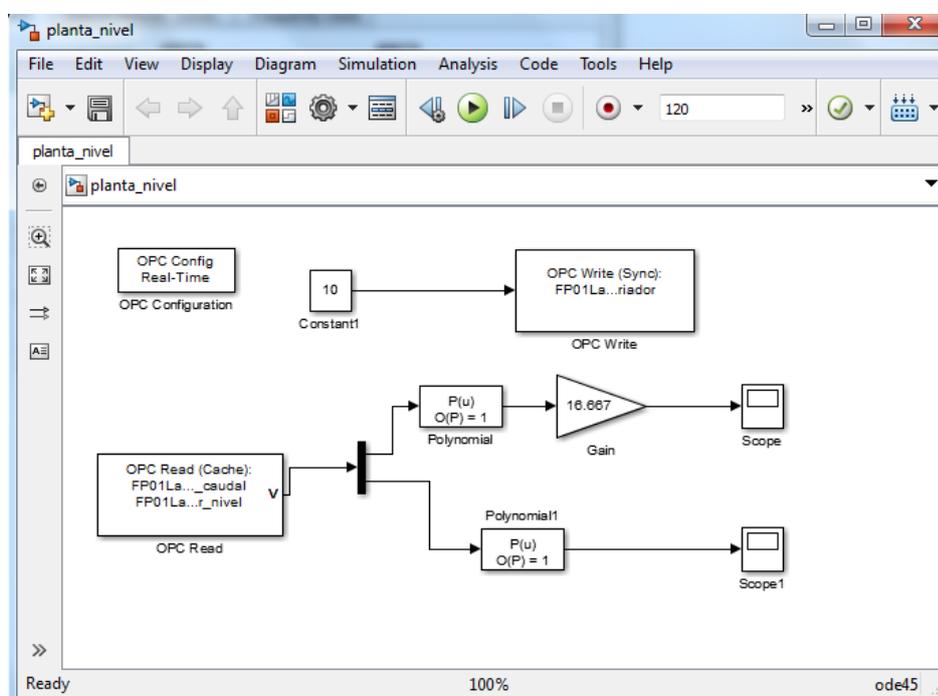


Figura 4.1: Programa en Simulink sin controlador.

Este programa en el cual se le enviaba un voltaje de 10 voltios al variador dio como resultado que el tanque se llenó en menos de 50 segundos, al observar la reacción de la planta ante este voltaje se decidió ajustarlo a 5 voltios para poder apreciar cómo funciona el sistema ante esta entrada de voltaje esta prueba tuvo un tiempo de duración de 1600 segundos el resultado del sensor de nivel lo podemos ver en la figura 4.2

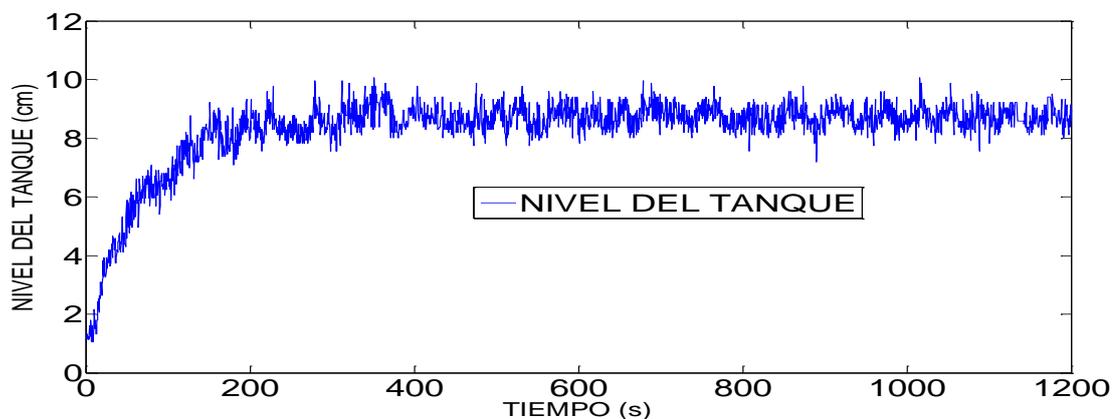


Figura 4.2: Resultado del sensor de nivel a 5 voltios.

Con este programa se determinó que se necesita un controlador para poder setear una altura de columna de agua para el tanque de nivel y que este se mantenga en este punto de operación.

4.2 Planta con controlador con algoritmo en cascada

A continuación, se muestran los resultados de la planta de nivel con controlador con algoritmo en cascada el programa en simulink de este controlador se muestra en la figura 4.3.

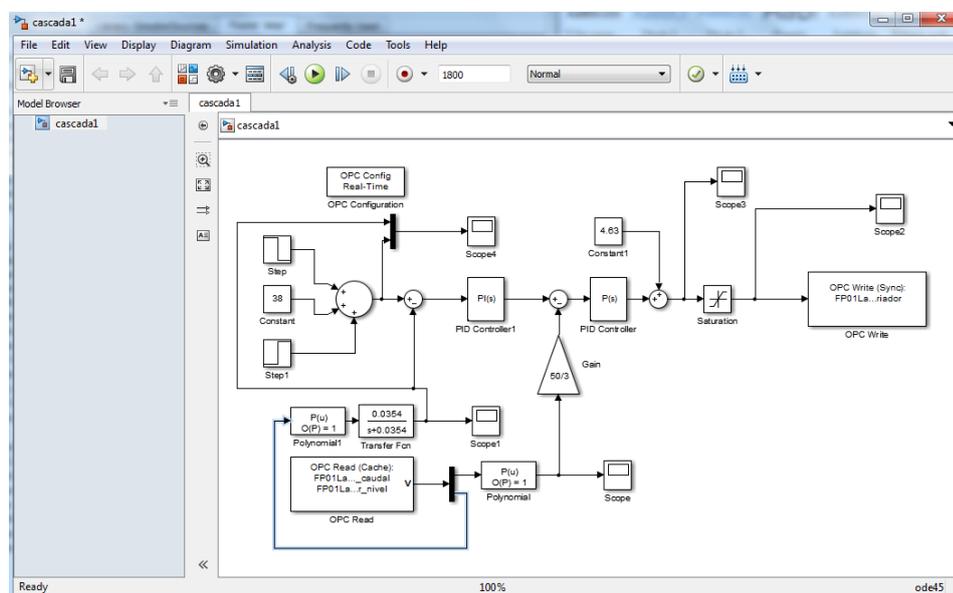


Figura 4.3: Programa en Simulink del controlador con algoritmo en cascada.

En este programa se pueden ver todas las entradas y salidas tanto de los sensores como de las referencias tomadas para este, el tiempo de adquisición de datos fue de 1800 segundos en los cuales la entrada o referencia de nivel para el sistema cambia en distintos puntos, se comienza con una referencia de 38cm durante 900 segundos, luego se estableció una nueva referencia de nivel de 36cm hasta un tiempo de 1200 segundos, para luego cambiar la referencia a 40cm hasta el fin de la adquisición de datos es decir hasta los 1800 segundos.

En la figura 4.4 se muestra la adquisición de datos del sensor de nivel durante la prueba del programa con el controlador.

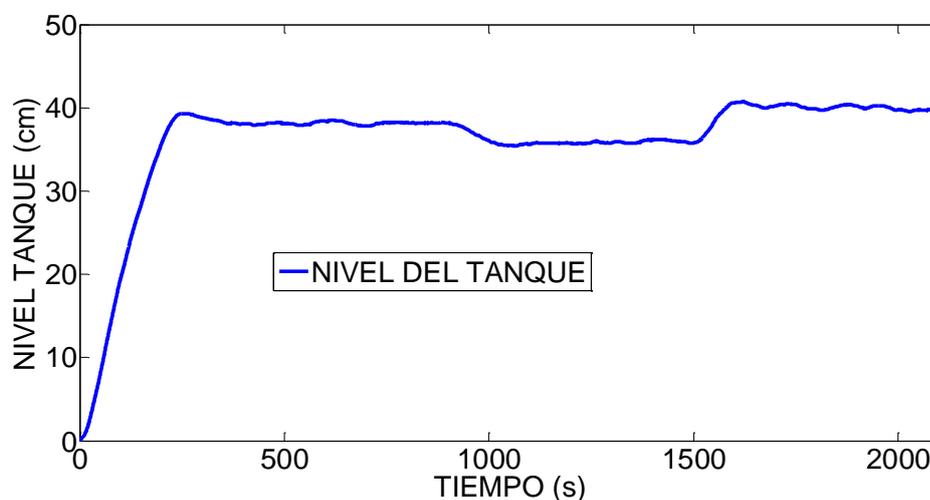


Figura 4.4: Resultados del sensor de nivel con controlador.

La adquisición de datos del sensor de caudal también se muestra en la figura en 4.5.

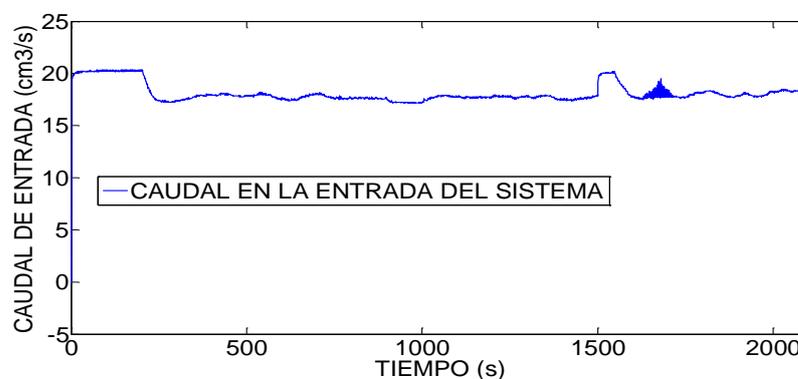


Figura 4.5: Resultados del sensor de caudal con controlador.

A su vez se pudo adquirir la salida del controlador esta grafica se la puede observar en la figura 4.6 la cual es el voltaje que debería ir al variador de frecuencia, pero se colocó un saturador que no permita voltajes por encima de los 5 voltios y menores a 4.5 voltios.

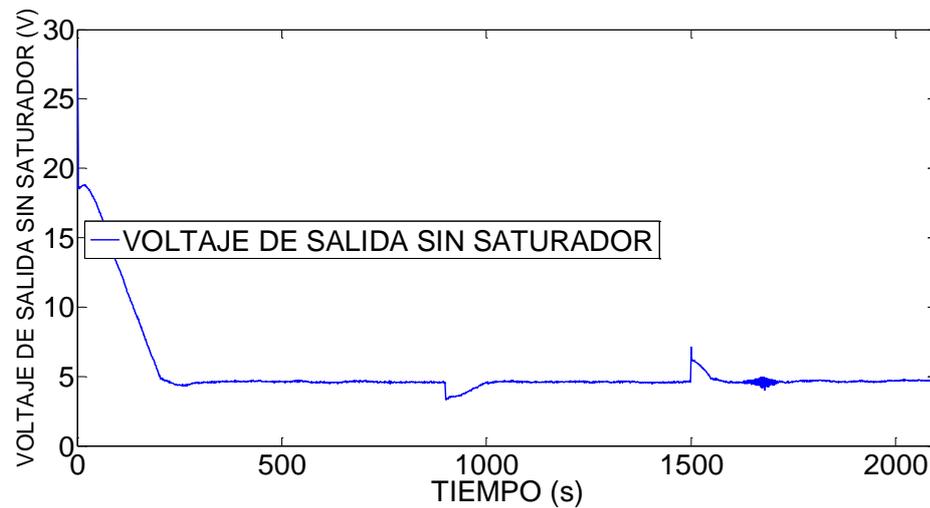


Figura 4.6: Salida al variador de frecuencia sin saturador.

En la figura 4.7 se muestra la salida del saturador esta señal es la que se envía al variador de frecuencia.

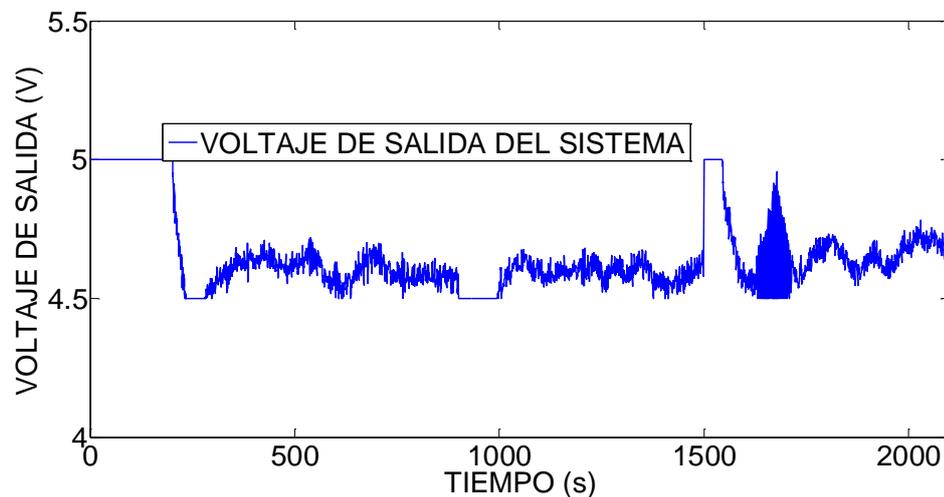


Figura 4.7: Salida al variador de frecuencia con saturador

A continuación, se muestra la figura 4.8 en la cual se muestra la gráfica del sensor de nivel con la referencia de nivel en esta se puede diferenciar el

En este programa con el algoritmo anticipativo se pueden ver todas las entradas y salidas tanto de los sensores como de las referencias tomadas para este, el tiempo de adquisición de datos fue de 3100 segundos en los cuales la entrada o referencia de nivel para el sistema se mantiene en 38cm, pero sufre una perturbación en la entrada del sistema en el segundo 1180 y en el segundo 2180

En la figura 4.10 se muestra la adquisición de datos del sensor de nivel durante la prueba del programa con el controlador con algoritmo anticipativo.

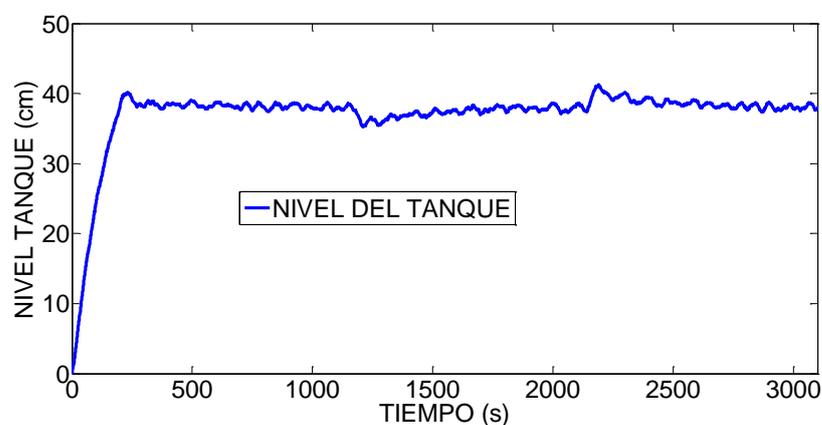


Figura 4.10 Resultado sensor de nivel controlador anticipativo

En la figura 4.11 se muestra los resultados del sensor de caudal

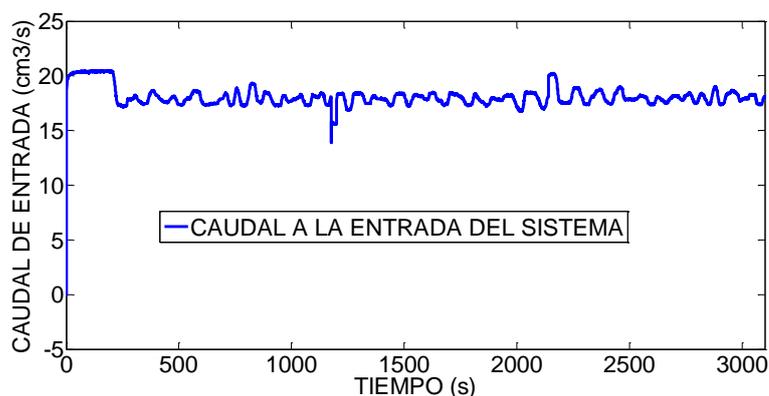


Figura 4.11: Resultado del sensor de caudal controlador anticipativo

A su vez se pudo adquirir la salida del controlador esta grafica se la puede observar en la figura 4.12 la cual es el voltaje que en un principio va al variador de frecuencia, pero se colocó un saturador que no permita voltajes por encima de los 5 voltios y menores a 4.5 voltios

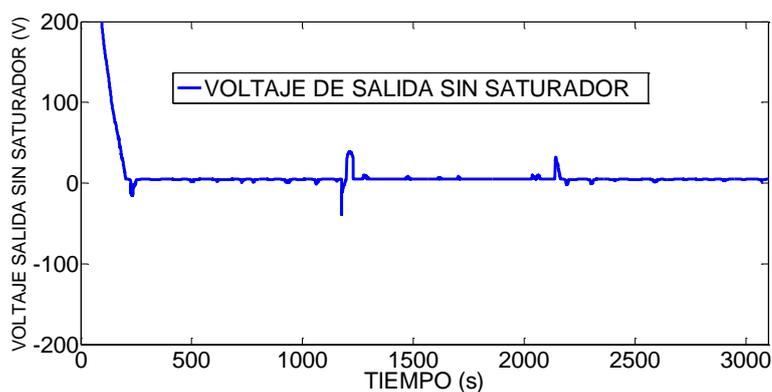


Figura 4.12: Salida al variador de frecuencia sin saturador anticipativo

El saturador que se colocó no permite voltajes mayores a 5 voltios ni menores a 4.5 su grafica la muestra la figura 4.13

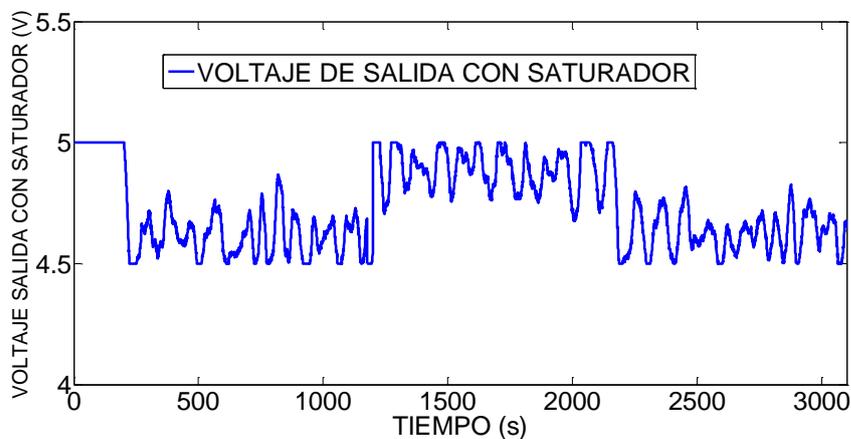


Figura 4.13: Salida al variador de frecuencia con saturador anticipativo

A continuación, se muestra la figura 4.14 en la cual se muestra la gráfica del sensor de nivel con la referencia de nivel en esta se puede cómo reacciona el sistema ante cambios en la entrada y como vuelve al mismo punto de la referencia aun con estas perturbaciones.

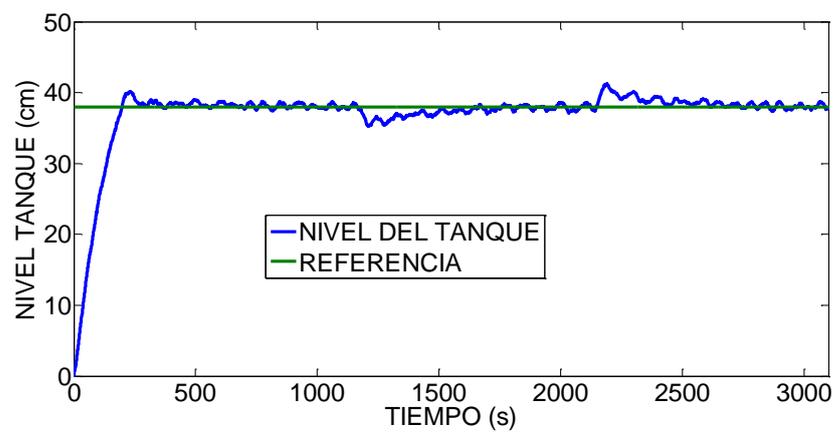


Figura 4.14: Nivel del tanque con referencia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se adquirió e incorporó un sensor de caudal a la planta didáctica de nivel del laboratorio de control automático de ESPOOL satisfactoriamente el cual nos permitió medir el caudal instantáneo que ingresa al sistema del tanque de nivel para de esta manera poder realizar los controladores con algoritmo en cascada y anticipativo ya que para realizarlos se necesita más de 1 variable del sistema.
2. Se encontró las funciones de transferencia de la planta didáctica de nivel, al realizar primero la identificación del sistema para el cual tuvimos un tiempo de unas 6 seis horas de toma de datos, para luego obtener las funciones de transferencia de la bomba y del tanque de nivel respectivamente con una aproximación de cerca del 90%, lo cual supera nuestra base propuesta para obtener nuestras funciones de transferencia de mínimo 80%
3. Se diseñó e implementó 2 sistemas de control, uno con algoritmo en cascada el cual tiene una rápida respuesta ante cambios en la entrada del sistema, así como un sistema de control con algoritmo anticipativo con el cual también logramos atenuar rápidamente las perturbaciones que ocurren en la entrada del sistema, ya que al abrir hasta la mitad la llave que desvía el caudal de agua de entrada al tanque de nivel este logra equilibrarse rápidamente y solo se mueve de su señal de referencia 2cm

Recomendaciones

1. Se recomienda hacer una buena toma de datos con el tiempo suficiente para cada cambio en la referencia ya que esto es lo primordial en el sistema ya que este es nuestro punto de partida para diseñar los controladores, porque al principio habíamos obtenido una mala función de transferencia lo cual nos imposibilitaba de lograr un correcto control en la planta de nivel
2. Se recomienda implementar una válvula con la cual se pueda ingresar un voltaje medible en el Compact Field Point y así obtener las perturbaciones del sistema en los gráficos de Matlab, ya que al momento con la válvula manual no es posible conseguir esta gráfica.

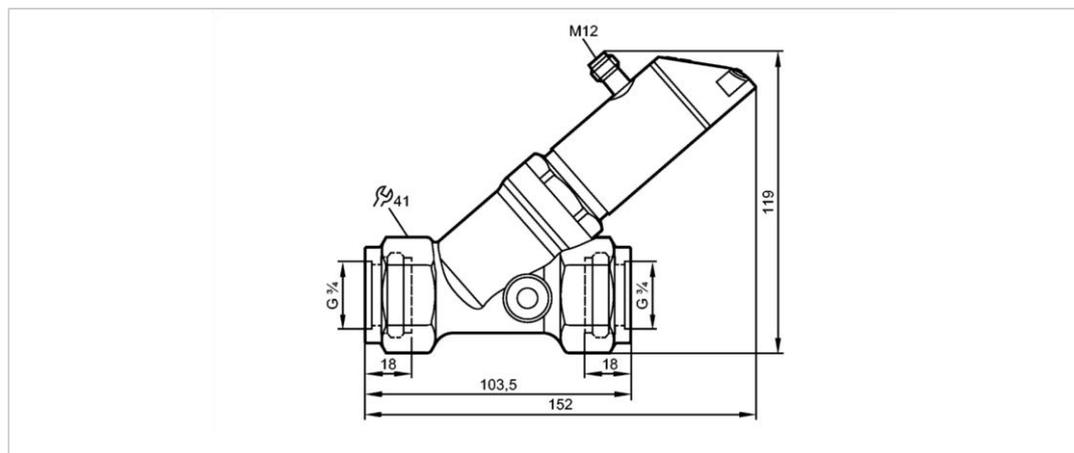
BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Sanhueza, (2009, Mayo). Sensores de caudal, medidores de turbina (1st ed.) [Online]. Disponible en: <http://sensoresdecaudal.blogspot.com/2009/05/medidores-de-turbina.html>
- [2] No disponible (2011, junio 16). ¿Qué es un variador de frecuencia y cómo es que funciona? (1st ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-variador-de-frecuencia-y-como-es-que-funciona-60877.htm>
- [3] D. Chanaluisa (No disponible). Bombas de presión (1st ed.) [Online]. Disponible en: http://www.academia.edu/12087630/BOMBAS_DE_PRESION
- [4] C. Smith and A. Corripio, "Introducción" en Control automático de procesos teoría y práctica, 1st ed. México D.F.: Limusa, 1991, pp. 17
- [5] M. A. Rodrigo. (No disponible). Control anticipativo (1st ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.uclm.es/profesorado/marodrigo/pdf/cap/cap3.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1

Datasheet del sensor de caudal IFM SBG246



CE  US  IO-Link

Caudalímetro mecatrónico
con válvula de retención
Conexión de proceso: G ¾
Con pantalla (giratoria 360°), IO-Link, medición de temperatura

Aplicación

Aplicación	Fluidos líquidos: agua, soluciones de glicol, líquidos refrigerantes, aceite (aceite 1 con viscosidad de 10 mm ² /s a 40°C; aceite 2 con viscosidad de 46 mm ² /s a 40°C)
Resistencia a la presión [bar]	25
Temperatura del fluido [°C]	-10...100

Datos eléctricos

Alimentación	DC
Tensión de alimentación [V]	18...30 DC; según DIN EN 50178, MBTS, MBTP
Consumo [mA]	< 50
Clase de protección	III
Protección contra inversiones de polaridad	sí

Salidas

Función de salida	OUT1: NA / NC programable de frecuencia IO-Link OUT2: NA / NC programable analógica
Corriente de salida [mA]	2 x 150; 2 x 200 (...60 °C); 2 x 250 (...40 °C)
Caída de tensión [V]	< 2
Protección contra cortocircuitos	sí
Resistente a sobrecargas	sí
Salida analógica	4...20 mA
Carga máx. [Ω]	500
Rango de frecuencia [Hz]	0...10000

Control de caudal

Rango de medición	2...100 [l/min]	0,12...6 [m ³ /h]
Rango de visualización	0...120 [l/min]	0...7,2 [m ³ /h]

Resolución	0,5 [l/min]	0,05 [m³/h]
Punto de consigna alto, SP	1...100 [l/min]	0,05...6 [m³/h]
Punto de consigna bajo, rP	0...99 [l/min]	0...5,95 [m³/h]
Punto final de frecuencia, FEP	6,5...100 [l/min]	0,4...6 [m³/h]
en intervalos de	0,5 [l/min]	0,05 [m³/h]
Frecuencia en el punto final, FrP[Hz]	10...10000	
en intervalos de	10 Hz	
Dinámica de medición	1:50	
Supervisión de temperatura		
Rango de medición [°C]	-10...100	
Rango de visualización [°C]	-32...122	
Resolución [°C]	1	
Punto de consigna alto, SP [°C]	-9...100	
Punto de consigna bajo, rP [°C]	-10...99	
Punto inicial de frecuencia, FSP [°C]	-10...78	
Punto final de frecuencia, FEP [°C]	12...100	
en intervalos de [°C]	1	
Frecuencia en el punto final, FrP[Hz]	10...10000	

Supervisión de temperatura

Software / programación

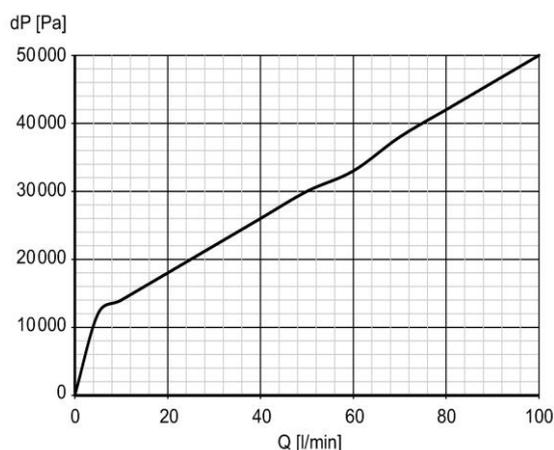
Tiempo de respuesta [s]	T09 = 120 (Q > 1 l/min)
Posibilidades de programación	Histéresis/ventana, normalmente abierto/normalmente cerrado, lógica de conmutación, salida de corriente/frecuencia, selección del fluido, amortiguamiento

Interfaces

Control de caudal

Exactitud [% del valor final]	$\pm (4\% \text{ MW} + 1\% \text{ MEW});$ Q > 2l/min, temperatura ambiente y del fluido +22°C $\pm 4 \text{ K}$
Repetibilidad	$\pm 1\% \text{ MEW}$

Pérdida de presión (dP) /volumen del caudal (Q)



Supervisión de temperatura

Exactitud [K]	3 K (25°C; Q > 1 l/min)
Deriva de temperatura	0,029 °C / K

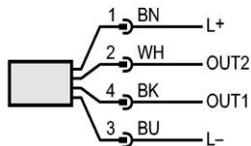
Tiempos de reacción

Retardo a la disponibilidad [s]	< 3
Control de caudal	
Tiempo de respuesta [s]	0,01
Amortiguamiento para la salida de conmutación (dAP) [s]	0...5
Amortiguamiento para la salida analógica (dAA) [s]	0...5
Equipo IO-Link en intervalos de	0,1 s
Tipo de transmisión	COM2 (38,4 kBaud)
Revisión IO-Link	1.1
Norma SDCI	IEC 61131-9 CDV

Conexionado

Colores de los hilos

BK negro
 BN marrón
 BU azul
 WH blanco

**OUT1:**

- Salida digital para supervisión de caudal
- Salida digital para supervisión de temperatura
- Salida de frecuencia para supervisión de caudal
- Salida de frecuencia para supervisión de temperatura
- IO-Link

OUT2:

- Salida digital para supervisión de caudal
- Salida digital para supervisión de temperatura
- Salida analógica para caudal
- Salida analógica para temperatura

 Identificación de colores según DIN EN 60947-5-2

Notas

Notas

Se recomienda utilizar un filtro de 200 micrómetros.
 Todos los datos valen para agua (20 °C).
 MW= valor de medición
 MEW= valor límite del rango de medición

Cantidad por pack [Pieza]

1

Anexo 2

Datasheet sensor de presión danfoss pressure transmitter MBS4510 (para nivel)

Pressure transmitter for industrial applications



The high accuracy flush diaphragm pressure transmitter MBS 4510 is designed for use in non-uniform, high viscous or crystallizing media within industrial applications, and offers a reliable pressure measurement, even under harsh environmental conditions.

The flexible pressure transmitter programme covers a 4 – 20 mA output signal, absolute or gauge (relative) versions, measuring ranges from 0 – 0.25 to 0 – 25 bar zero and span adjustment. A rotatable plug connection and a G1A conic pressure connection with flush mounted diaphragm.

Excellent vibration stability, robust construction, and a high degree of EMC/EMI protection equip the pressure transmitter to meet the most stringent industrial requirements.

Features

- Designed for use in severe industrial environments
- Temperature compensated and laser calibrated
- Accuracy 0.5% FS
- Enclosure and wetted parts of acid-resistant stainless steel (AISI 316L)
- Zero and span adjustment
- Pressure ranges in relative (gauge) or absolute
- For use in Zone 2 explosive atmosphere up to 25 bar
- Output signal: 4 – 20 mA
- USDA-H1 approved oil filling

Technical data *Performance (EN 60770)*

Accuracy (incl. non-linearity, hysteresis and repeatability)			$\leq \pm 0.2\%$ FS (typ.)
			$\leq \pm 0.5\%$ FS (max.)
Non-linearity BFSL (conformity)			$\leq \pm 0.2\%$ FS
Hysteresis and repeatability			$\leq \pm 0.1\%$ FS
Thermal zero point shift	Measuring range:	0 – 250 mbar	$\leq \pm 0.4\%$ FS / 10K
		0 – 400 mbar	$\leq \pm 0.3\%$ FS / 10K
		≥ 0 – 600 mbar	$\leq \pm 0.2\%$ FS / 10K
Thermal sensitivity (span) shift	Measuring range:	0 – 250 mbar	$\leq \pm 0.4\%$ FS / 10K
		0 – 400 mbar	$\leq \pm 0.35\%$ FS / 10K
		≥ 0 – 600 mbar	$\leq \pm 0.2\%$ FS / 10K
Response time			< 4 ms
Durability, P: 10 – 90% FS			> 10×10^6 cycles
Zero point adjustment	Measuring range:	0 – 0.25 to 0 – 10 bar	-5 – 20% FS
		0 – 16 to 0 – 25 bar	-5 – 10% FS
Span adjustment	Measuring range:	0 – 0.25 to 0 – 25 bar	-5 – 5% FS

Available measuring ranges

Pressure range [bar]	Max. Overload pressure [bar]	Burst pressure [bar]
-0.25 – 0.50	2	50
0.00 – 0.25	2	50
0.00 – 0.40	2	50
0.00 – 0.60	2	50
0.00 – 1.00	2	50
0.00 – 1.60	8	50
0.00 – 2.50	8	50
0.00 – 4.00	8	50
0.00 – 6.00	20	50
0.00 – 10.00	20	50
0.00 – 16.00	100	100
0.00 – 25.00	100	100

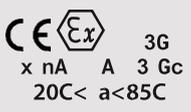
Electrical specifications

Nom. output signal (short-circuit protected)	4 – 20 mA
Supply voltage [U_B], polarity protected	10 – 30 V DC
Supply voltage dependency	$\leq \pm 0.1\%$ FS / 10 V
Current limitation (linear output signal up to 1.5 × rated range)	28 mA (typ.)
Load [R_L] (load connected to 0 V)	$R_L \leq (U_B - 10 \text{ V}) / 0.02 \text{ A } [\Omega]$

Technical data *Environmental conditions**(continued)*

Sensor temperature range	Normal	-40 – 85 °C
	ATEX Zone 2	-10 – 85 °C
Media temperature	115 - (0.35 × ambient temperature)	
Ambient temperature range	-10 – 85 °C	
Compensated temperature range	0 – 80 °C	
Transport / Storage temperature range	-25 – 85 °C	
EMC – Emission	EN 61000-6-3	
EMC – Immunity	EN 61000-6-2	
Insulation resistance	> 100 MΩ at 100 V	
Mains frequency test	Based on SEN 361503	
Vibration stability	Sinusoidal	15.9 mm-pp, 5 Hz – 25 Hz
		20 g, 25 Hz – 2 kHz
	Random	7.5 g _{rms} , 5 Hz – 1 kHz
	Shock	500 g / 1 ms
Shock resistance	Free fall	1 m
Enclosure (depending on electrical connection)	IP65	

Explosive atmospheres

Zone 2 applications		EN60079-0; EN60079-15
---------------------	---	-----------------------

When used in ATEX Zone 2 areas at temperatures <-10 °C the cable and plug must be protected against impact

Mechanical characteristics

Materials	Wetted parts	EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L)
	Enclosure	EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L)
	Electrical connections	Glass filled polyamid PA 6.6
Gasket (above thread)	DIN 3869-33-NBR	
Net weight (depending on pressure connection and electrical connection)	0.4 kg	

Ordering standard

MBS 4510

Measuring range	
0.25 – 0.5 bar	A 4
0 – 0.25 bar	0 4
0 – 0.4 bar	0 6
0 – 0.6 bar	0 8
0 – 1.0 bar	1 0
0 – 1.6 bar	1 2
0 – 2.5 bar	1 4
0 – 4.0 bar	1 6
0 – 6.0 bar	1 8
0 – 10 bar	2 0
0 – 16 bar	2 2
0 – 25 bar	2 4

Pressure reference

Gauge (relative)	1
Absolute	2

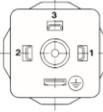
Pressure connection
G1A, ISO 228-1, Flush male

Electrical connection
Plug Pg 9 (EN 175301-803-A)

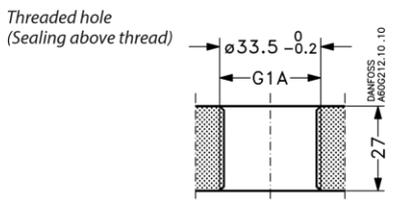
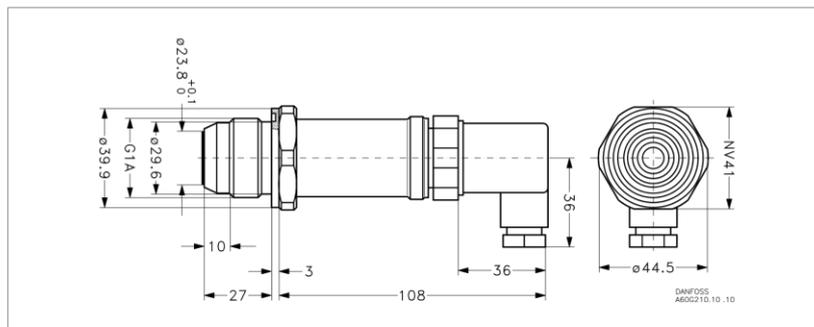
Output signal
4 – 20 mA

■ Preferred version

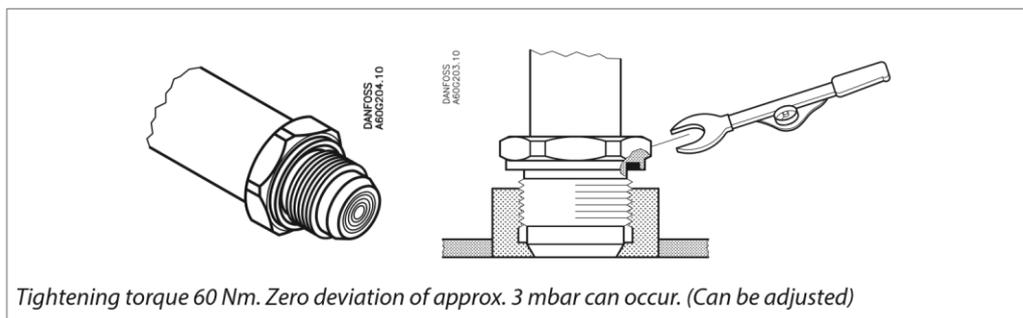
Electrical connections

Electrical connection	4 – 20 mA output (2 wire)
 <p>EN 175301-803-A, Pg 9</p>	<p>Pin 1: + supply Pin 2: - supply Pin 3: Not used</p>  <p>Earth: Connected to MBS enclosure</p>

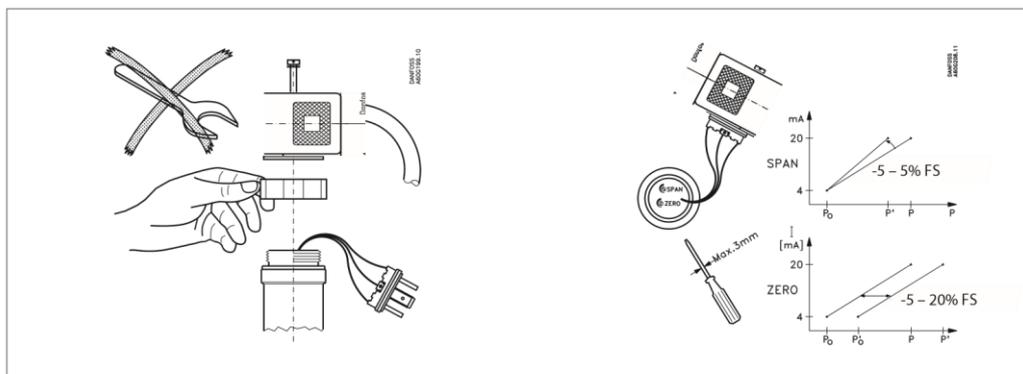
Dimensions



Installation



Adjustment



Accessories

<p>Welding nipple for conic metal/metal seal Code no.: 060G2501</p>	<p>DIN 11851 (dairy connection), DN40 Code no.: 060G2505</p>
<p>DIN 11851 (dairy connection), DN50 Code no.: 060G2506</p>	<p>Clamp, ISO 2852, 1½ in. Code no.: 060G2502</p>
<p>Clamp, ISO 2852, 2 in. Code no.: 060G2510</p>	<p>SMS 1145 connection, 1½ in. Code no.: 060G2503</p>

Danfoss can accept no responsibility for possible errors in catalogues, brochures and other printed material. Danfoss reserves the right to alter its products without notice. This also applies to products already on order provided that such alterations can be made without subsequential changes being necessary in specifications already agreed. All trademarks in this material are property of the respective companies. Danfoss and the Danfoss logotype are trademarks of Danfoss A/S. All rights reserved.