



Trabajo de Diploma

Autor: Euler Romero Baldoquin

Tutor: MSc. Nardy Bernal Rubio

Ing. Yaniel Marrero Caine

Santiago de Cuba

2017



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Departamento de Control Automático
Facultad de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Diploma

Título: Estrategia de control para Planta de Tratamiento
de agua en la Refinería Hermanos Díaz

Autor: Euler Romero Baldoquin

Tutor: MSc. Ing Nardy Bernal Rubio
Ing. Yaniel Marrero Caine

Santiago de Cuba

2017

Pensamiento

"Hay hombres que luchan un día y son buenos, hay otros que luchan un año y son mejores, hay quienes luchan muchos años y son muy buenos; pero hay los que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles".

Bertold Brecht

Dedicatoria

A mi madre por su amor sincero, constancia, apoyo y completa dedicación.

A mi abuelo Vicente por su cariño inigualable.

A mi novia Leidis por su amor, comprensión, paciencia, y entrega, por quererme tal y como soy.

Agradecimientos

A mi papá, a Perlenis y a toda mi familia.

A mis hermanos Fan, Farletys y María.

A mis amigos: Emmanuel, Mayra, Noel, Tituka la bella, Reimier, Samuel, Jose, Sandro, Anita, Nana, Trevis, Roxana Daris y Ávila, Suzel, Margarita, las Claudias de tele, Julián, Oscar, Viola, Maidelis, Lisdeiby, Idania, Diana, Daima, Luisi, a los Alejandro, a todos los holguineros de beca y al que se me olvidó que no se moleste pero son demasiados.

A Feizabet Nápoles Sáez por hacer el papel de amiga y salvavidas, por toda su ayuda desinteresada y disposición en todo momento.

A Lizbette Azalia Guzmán Matos por ser conmigo como la hermana que cualquier persona desearía, por estar ahí siempre en los buenos y malos momentos.

A mi tutor Nardy por la confianza y a todos los profesores que contribuyeron a mi formación como ingeniero.

A la familia de Roxana por abrirme las puertas de su casa y por todas las molestias causadas.

A mi suegra Mirtha por quererme como si fuera uno más de la familia.

A todas las personas que de una forma u otra contribuyeron con la realización de este trabajo de diploma. A todos muchas GRACIAS.

Resumen

Este trabajo constituye una propuesta de control de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería 'Hermanos Díaz' en Santiago de Cuba, utilizando tecnología Siemens. Se hace referencia a un proceso secuencial dividido en tres subprocesos: Tratamiento primario, Filtrado y Deaeración, que presenta transmisores de nivel, flujo y células de carga como elementos sensores y como actuadores, motores y electroválvulas. Como elemento controlador se propone al PLC S7-200, con una configuración entrada-salida capaz de sintetizar toda la secuencia de producción. Consta de un sistema de pesaje característico de este tipo de proceso, utilizado para pesar la cal y el sulfato de aluminio según la receta prefijada por el operador. También se implementa un sistema de control en cascada para mantener constante el nivel el deareador.

Abstract

This work constitutes a proposal of control for the Water Treatment Plant of the Refinery Hermanos Díaz in Santiago de Cuba, using Siemens technology. The sequential process is divided in three sub-processes: primary treatment, filtrate and deaeration, which presents level and flow transmitters and charging cells as sensors elements and motors and electrovalves as actuators. The S7-200 PLC is proposed as the control element, with an input/output configuration capable of synthesize all of the sequence of production. It consists of a weigh-in system characteristic of this type of process, used for weigh the lime and the aluminum sulfate according to the recipe prefixed by the operator. Also the deareator implements a cascade control system to maintain the level constantly.

.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Tratamiento del agua. Fundamentación teórica.....	5
1.1. Descripción del proceso de tratamiento de agua.....	5
1.2. Estado actual de la planta.....	8
1.3. Tratamiento del agua.....	9
1.3.1. Tratamiento del agua de alimentación de calderas.....	10
1.3.2. Problemas más frecuentes por el tratamiento incorrecto del agua en calderas.....	12
1.4. Identificación de sistemas.....	14
1.4.1. Métodos para obtención de modelos.....	15
1.4.2. El proceso de identificación.....	16
1.4.3. Métodos de identificación.....	17
1.4.4. Técnicas de identificación.....	18
1.5. Sistemas de control distribuidos.....	20
1.5.1. Niveles de control en un SCD.....	20
1.5.2. Ventajas del control distribuido.....	21
1.6. Automatización industrial.....	21
1.6.1. Controladores lógicos programables (PLC).....	21
1.6.2. Funciones que pueden realizar los PLC.....	22
1.6.3. Campo de aplicación del PLC.....	22
1.6.4. Criterios para la selección del PLC.....	23
1.7. Sistemas automatizados.....	24
1.7.1. Buses de campo.....	24
1.7.2. Redes eléctricas RS-485.....	25
1.8. Estrategias de control.....	27
1.8.1. Configuraciones de control.....	27
Conclusiones del capítulo.....	30
Capítulo 2: Proceso de identificación y desarrollo de estrategias de control en los subprocesos de dosificación y deareación.....	31
2.1. Lazo de control para variar la velocidad de la estera.....	31
2.1.1. Motor prediseñado del Matlab análogo al motor del proceso.....	33
2.1.2. Simulación del funcionamiento del Variador de Velocidad acoplado al motor escogido.....	34
2.1.3. Ajuste del controlador.....	38

2.2.	Lazo de control en el deareador	41
2.2.1.	Estrategias de control en el deareador	43
2.2.2.	Ajuste de los controladores	45
2.3.	Arquitectura propuesta del sistema de control	48
2.4.	Selección de componentes para el diseño del sistema de control.....	48
2.5.	Programación del PLC para cumplir con las estrategias de control ...	59
2.6.	Explicación del diagrama funcional para programación de control	61
	Conclusiones del capítulo	66
	Valoración económica	67
	Impacto Medioambiental	68
	Conclusiones generales.....	69
	Recomendaciones	70
	Bibliografía.....	71
	Anexos	73

Listado de símbolos.

PID: Proporcional Integral Derivativo

ppm: Partes por millón

rpm: Revoluciones por minutos

PLC: Controlador Lógico Programable

SCADA: Supervisorio de Control y Adquisición de Datos

mm: milímetros

Vs: Velocidad de salida

Ve: Velocidad de entrada

Kg: Kilogramos

Kt: Ganancia del transmisor

Kv: Ganancia de la válvula

ΔP : Caída de presión en la válvula

Nd: Nivel del deareador

Fa: Flujo de alimentación

Gv: Función de transferencia de la válvula

ITAE: Integral de tiempo del error absoluto

IAE: Integral del error absoluto

Qmáx: Flujo máximo

Kp: Ganancia proporcional

Ti: Tiempo integrativo

Td: Tiempo derivativo

ms: milisegundos

mg/l: Miligramos por litros

Introducción

El agua es sin duda alguna el elemento más esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El agua cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96,5 % del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1,74 %, los depósitos subterráneos, los glaciares continentales suponen el 1,72 % y el restante 0,04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres humanos. Se estima que aproximadamente el 70 % del agua dulce se destina a la agricultura. El agua en la industria absorbe una media del 20 % del consumo mundial, empleándose en tareas de refrigeración, transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. [1]

La industria precisa el agua para múltiples aplicaciones, para calentar y para enfriar, para producir vapor de agua o como disolvente, como materia prima o para limpiar. La mayor parte, después de su uso, se elimina devolviéndola nuevamente a la naturaleza. Estos vertidos, a veces se tratan, pero otras el agua residual industrial vuelve al ciclo del agua sin tratarla adecuadamente.

La razón fundamental del tratamiento de las aguas en las industrias para la generación de vapor, es evitar los depósitos de lodos e incrustaciones, que dan lugar a la corrosión de las superficies internas. La presencia de condiciones ácidas o gases disueltos dan lugar a la corrosión. La corrosión y los depósitos sólidos están estrechamente relacionados. Esto es debido a que las grandes concentraciones de sólidos a altas temperaturas, crean depósitos y a su vez la corrosión. Algunas reacciones químicas presentan un ataque íntergranular en el metal, que se vuelve quebradizo hasta que sobreviene la fractura. El tratamiento más apropiado económicamente justificado, para una planta determinada, depende de las características del agua disponible, en la cantidad de reposición y el diseño de su generador de vapor y sus accesorios.

En el mundo existen más de 600 refinerías distribuidas por todo el mundo las cuales sin el uso de este vital recurso su funcionamiento y desarrollo sería imposible, estas refinerías procesan diariamente más de 13 millones de metros cúbicos de productos refinados. Cada refinería tiene una economía particular que genera una configuración de plantas instaladas, lo que le da características operativas específicas. La economía en una refinería está determinada principalmente por su ubicación, su antigüedad, la posibilidad de conseguir inversiones, los petróleos crudos de que dispone, la demanda de productos, los requisitos de calidad de los productos, la legislación, los estándares ambientales y los requisitos del mercado.

En territorio cubano existen 4 refinerías, ubicadas en La Habana (Nico López), Cienfuegos (Camilo Cienfuegos), Sancti Spíritus (Sergio Soto) y Santiago de Cuba (Hermanos Díaz) y que tienen como objetivo principal maximizar el abastecimiento de la demanda nacional de derivados del petróleo. La refinería Hermanos Díaz comenzó su explotación en 1957, estaba destinada a procesar crudo venezolano y contaba con una capacidad de diseño de 20 000 barriles por día.

Debido a una serie de observaciones que se llevaron a cabo en la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería Hermanos Díaz se detectaron numerosas insuficiencias, como la falta de instrumentación moderna, ya que en la misma desde sus comienzos no se ha realizado ningún tipo de inversión en aras de mejorar el funcionamiento de la misma, los sistemas de tubería se encuentran en estado deplorable, el sistema de dosificación, el cual es la base del funcionamiento completo de la planta, no se realiza de forma adecuada. El sistema eléctrico de manera general se encuentra en estado deficiente, etc. Por lo que a raíz de todos estos problemas podemos plantear que:

En la Refinería Hermanos Díaz en la provincia Santiago de Cuba no se cuenta con el correcto tratamiento del agua, por lo anterior, se plantea como **problema de la investigación**, la poca calidad del agua que abastece las calderas de la Refinería “Hermanos Díaz”, debido a la antigüedad en el sistema y de la instrumentación empleada.

Se define como **objeto de la investigación**: el sistema de control para el tratamiento de agua que abastece a las calderas de la Refinería “Hermanos Díaz” y como **objetivo de la investigación**: diseñar la correspondiente estrategia para el tratamiento de agua que abastece a las calderas de la Refinería “Hermanos Díaz”. Como **campo de acción**: El diseño de un sistema control con PLC y módulos de comunicación.

De lo antes expuesto se deriva la siguiente **hipótesis**: Si se logra el diseño de una estrategia de control eficiente para el tratamiento del agua, se mejorará la calidad de la misma y aumentará la eficiencia del proceso productivo.

Perfeccionando el índice de explotación de combustible y la demanda de vapor, teniendo en cuenta las normas descritas para instalaciones de este tipo, lo que a su vez mejoraría la generación de vapor y calidad del mismo.

Por lo antes expuesto se formulan las siguientes tareas.

Tareas de investigación a realizar:

- Descripción del flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería “Hermanos Díaz”.
- Realizar las identificaciones correspondientes en el primer subproceso de dosificación y en el subproceso de deareación.
- Diseñar las estrategias de control correspondientes para ambos subprocesos.
- Diseñar sistema de comunicación de campo, incluyendo protocolo de comunicación a utilizar. Selección del PLC.
- Selección de la instrumentación de campo adecuada la cual debe presentar la suficiente seguridad tanto eléctrica como ambiental que posibiliten el trabajo seguro y sin riesgos de explosión, además de un protocolo de comunicación acorde al sistema de control a emplear.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas y métodos empíricos.
3. Métodos históricos-lógicos.

4. Método de análisis y síntesis.
5. Métodos experimentales: modelado y simulación.

El **Aporte la investigación** radica en una propuesta de diseño basado en estrategias de control clásico para el tratamiento de agua a partir de identificaciones experimentales realizadas a los subprocesos de dosificación y deaeración, además se brinda una propuesta de instrumentación de campo y PLC.

Estructura del trabajo:

La presente investigación se encuentra organizada en dos capítulos que constan de introducciones parciales en la cuales se ofrecen las principales motivaciones por las cuales se lleva a cabo el desarrollo de este trabajo.

El Capítulo I: En este capítulo se lleva a cabo la descripción del flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento de agua y se explican los motivos por los cuales se hace fundamental el tratamiento del agua. Se describe brevemente los métodos de identificación existentes, la estructura básica de los sistemas de automatización y protocolos de comunicación empleados en estos sistemas.

El Capítulo II: Se desarrollan las identificaciones correspondientes a los subprocesos de la planta en cuestión. Se diseñan las estrategias de control, conjuntamente con el ajuste de los controladores, necesarios para solucionar los problemas existentes en la planta y seguidamente se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 1: Tratamiento del agua. Fundamentación teórica.

Introducción

Con el objetivo principal de mantener un correcto funcionamiento de las calderas de la Refinería Hermanos Díaz, de asegurar la larga vida de estas y evitar reparaciones de importancia y accidentes, se debe realizar un correcto tratamiento del agua que las abastece, para evitar la acumulación de sustancias en las paredes de las mismas y afectar su rendimiento. Es por ello que se deben cumplir ciertas especificaciones para la obtención del producto final con la calidad requerida.

1.1. Descripción del proceso de tratamiento de agua.

El flujo productivo de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería, como se muestra en la figura 1.1, se divide en tres subprocesos fundamentales los cuales son:

- Dosificación como tratamiento primario.
- Filtrado como tratamiento secundario.
- Deaeración como tratamiento terciario.

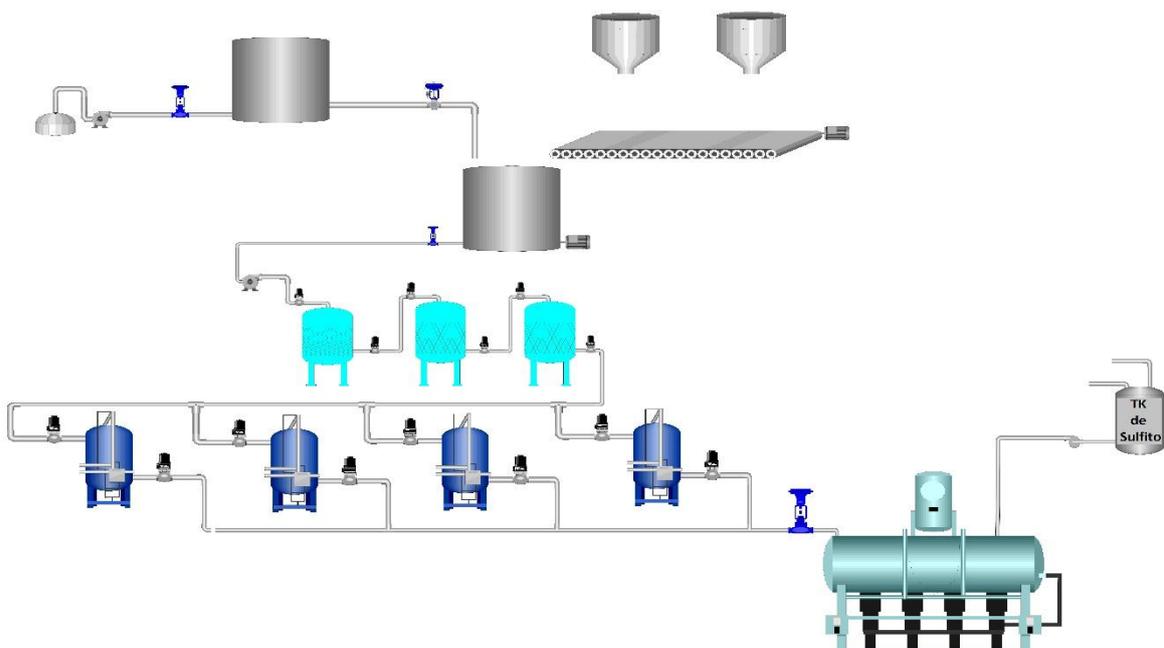


Figura 1.1 Flujo tecnológico de la planta

Dosificación como tratamiento primario.

El proceso comienza con el impulso del agua almacenada en el pozo mediante una bomba la cual es almacenada en el tanque de alimentación que es el de mayor capacidad con $12886 m^3$. Posteriormente esta desciende en caída libre hasta el precipitador a través de una línea de $254 mm$ donde mediante un tratamiento de cal en frío y sulfato de aluminio se reduce la dureza del agua en un 40-50 % aproximadamente.

El tratamiento que recibe el agua en el precipitador como se muestra en la figura 1.2 tiene como finalidad convertir los bicarbonatos de calcio y magnesio en carbonatos neutros insolubles y transforma en hidróxidos insolubles las sales de magnesio. El sulfato de aluminio se emplea como coagulante.

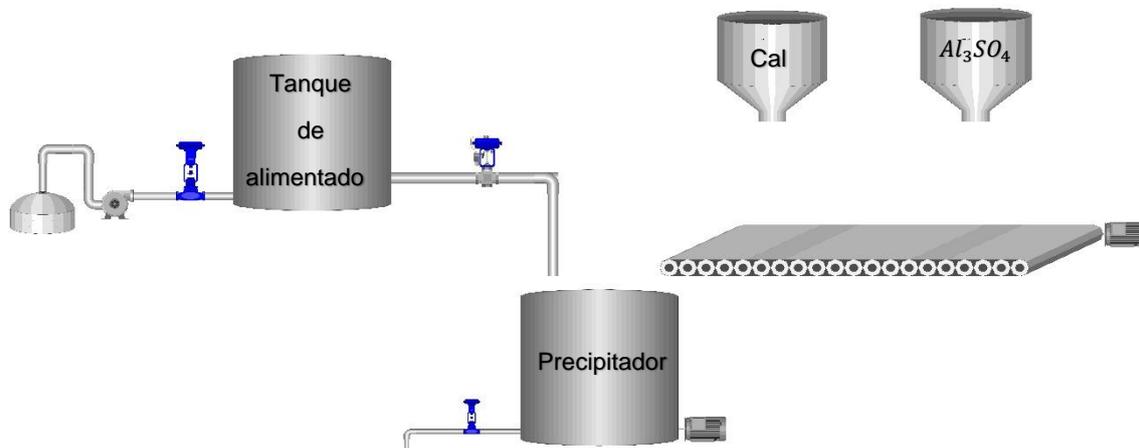


Figura 1.2 Tratamiento primario del agua

La adición de cal y la de sulfato de aluminio es a través de las tolvas que contienen dicha materia prima. En la entrada del tanque precipitador existe un transmisor, que una vez que este cense $100 m^3/h$ de agua, se detendrá la bomba de alimentación, una vez que esto ocurre, son depositados en la cinta transportadora 75 kg de cal y 5 Kg de sulfato de aluminio. Después de puesta en marcha la estera y de haber agregado los ingredientes al tanque precipitador, este a través del motor agitador mezcla los productos. Para finalizar esta agua ya previamente tratada se impulsa por otra bomba hasta que llega a los filtros de antracita.

Filtrado como tratamiento secundario.

Una vez en los filtros se eliminan los posibles vestigios de cal y aluminio que han sido arrastrados así como otras materias en suspensión, saliendo el agua clarificada hacia los intercambiadores de zeolita que están continuos como se muestra en la figura 1.3.

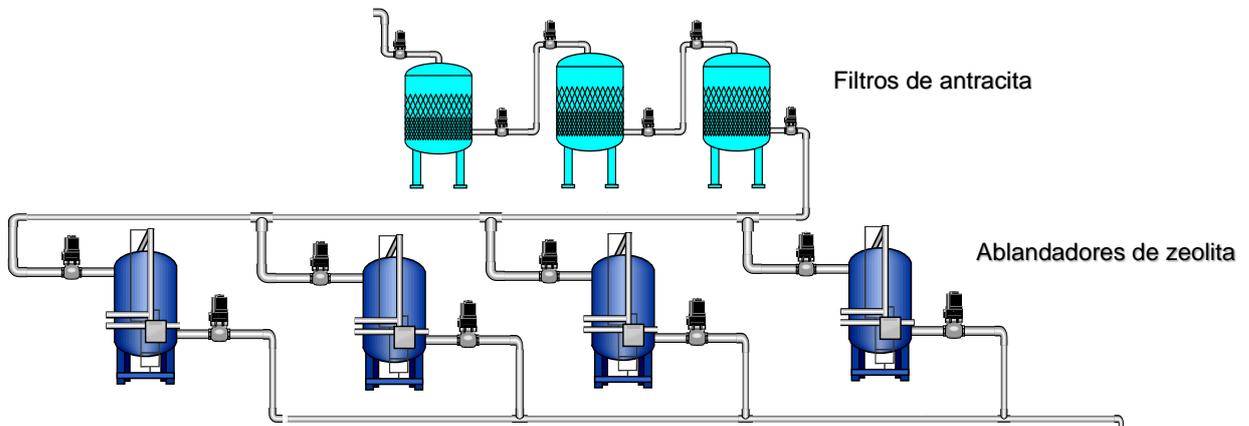


Figura 1.3 Tratamiento secundario del agua.

Cuando los filtros han estado en servicio durante algún tiempo los sólidos acumulados en los pequeños espacios del material filtrante llegan a obstruir el paso del agua reduciendo notablemente el flujo de la misma, esto es observado por la caída de presión a través de cada filtro la cual no puede ser superior a 1 Kgf/cm^2 , en caso que sea superior se debe de activar una alarma.

Una vez en los ablandadores de zeolita de sodio se lleva a cabo la suavización por intercambio iónico, utilizando la zeolita de sodio. Esta resina en contacto con el agua cruda retiene los iones de calcio y magnesio entregando en cambio los iones sodio, cuyas sales son siempre solubles, por lo que no provocan incrustaciones.

El agua después de pasar por el sistema de ablandadores tiene una dureza total hasta 5 partes por millón (*ppm*) y es considerada como una agua buena para la alimentación de las calderas. Luego ésta agua es enviada hacia el deareador.

Deareación como tratamiento terciario.

En la figura 1.4 se puede observar al deareador el cual tiene como función calentar el agua y extraerle aproximadamente entre 90-95 % del oxígeno originalmente disuelto en el agua, además se extrae dióxido de carbono y otros

gases no condensables, antes que sea introducida en las calderas, con el objeto de prevenir la corrosión de estas.

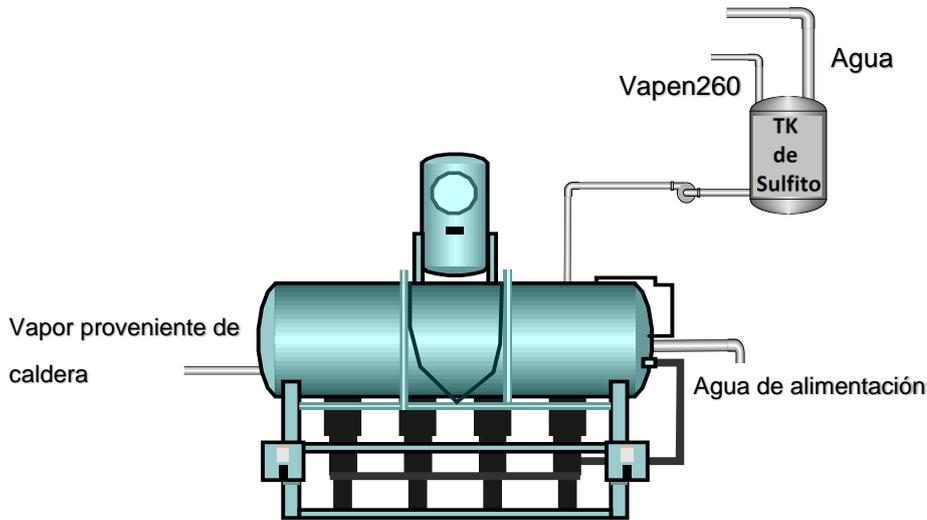


Figura 1.4 Tratamiento terciario del agua en la planta.

En el deaerador el agua es calentada también con vapor de escape, pero en este caso el vapor se inyecta directamente a la masa del líquido por un lateral del cuerpo del deaerador. La temperatura del agua de salida alcanza los 104 °C.

Para eliminar aún más el oxígeno disuelto en el agua se realiza la inyección del sulfito de sodio utilizando la bomba, este producto es inestable y muy ávido de oxígeno, elemento con el cual reacciona para formar el sulfato de sodio.

El sulfito de sodio se disuelve en agua tratada en un tambor, al cual se le suministra vapor para facilitar la disolución y se prepara de acuerdo a una tabla que relaciona la producción de vapor con los kilogramos de sulfito a inyectar de acuerdo a la producción de vapor y manteniendo el valor del residuo de sulfito de sodio en el agua del deaerador según los valores normados.

Esta agua es enviada luego a las calderas por la bomba que se encuentra a la salida del deaerador a una presión de 25 kgf/cm^2

1.2. Estado actual de la planta.

El estado actual de la planta es obsoleto ya que se cuenta con tecnología rusa de los años 80 y la misma nunca ha sido mejorada, ni actualizada.

Actualmente la planta se encuentra trabajando de forma manual, desde hace años, esta situación ha generado determinadas situaciones que serían resueltas con la automatización. Los pocos sistemas de medición que existen en la planta son muy antiguos y no todos están en funcionamiento, sin mencionar de las constantes calibraciones debidas a las mediciones erróneas debido al tiempo de servicio de los mismos. No existen los sistemas automáticos ni sistemas de alarmas. El sistema eléctrico de la planta, está en estado pésimo y no cumplen con las normativas nacionales al respecto. El sistema actual para la medición de las variables del proceso, digitales y analógicas son bastante obsoletos sin contar con la inexistencia de la mayoría de ellos y la documentación en la planta es deficiente, no existen planos en papel, por ejemplo, no existe un esquema del proceso tecnológico y la información eléctrica tiene los mismos problemas de envejecimiento y dispersión. En el último subproceso de la planta existen sensores e instrumentación para la visualización la cual funciona pero no están en estado óptimo. De forma general las válvulas existentes cuentan con un alto nivel de desgaste.

1.3. Tratamiento del agua.

El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental. Cada ciudadano, cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo.

Este vital recurso es imprescindible, no sólo para el desarrollo económico, sino indispensable como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza.

No cabe duda de que la industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. Sin embargo, demasiado a menudo la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye de la planificación de la protección del medio ambiente. [2]

A no haber una conciencia del uso sostenible de este recurso hídrico se hace de suma importancia mantener el ciclo del agua. Los principios fundamentales de la sostenibilidad son la reducción, la reutilización y el reciclado.

El tratamiento de las aguas es una práctica que, si bien se lleva realizando desde la antigüedad, hoy por hoy resulta algo fundamental para mantener nuestra

calidad de vida. Son muchas las técnicas de tratamiento con larga tradición y, evidentemente, se ha mejorado mucho en el conocimiento y diseño de las mismas a lo largo de los años. Pero no por eso han dejado de ser técnicas imprescindibles a la hora de tratar aguas industriales, y son las que, de una forma rápida, se pretenden exponer en el presente capítulo.

El adecuado tratamiento de aguas y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria. Los tratamientos a los que se deben someter los efluentes tienen que garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno.

1.3.1. Tratamiento del agua de alimentación de calderas.

El primer paso para potabilizar agua es determinar la calidad inicial del agua en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario. Es posible que el agua contenga metales, materia orgánica disuelta o particulada, color, sabor y olor desagradables, bacterias, virus, parásitos y otros microorganismos, grandes cantidades de calcio y magnesio, hierro y manganeso, carbonatos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos en exceso, sustancias orgánicas de toxicidad elevada, etc. En la actualidad, los valores máximos los establece el fabricante de acuerdo con las características de la caldera. [3]

Con relación al tratamiento de agua para calderas, se ha estudiado ampliamente en el desarrollo de compuestos inorgánicos tales como: fosfatos, sulfitos, aminos, etc., sin embargo todos estos compuestos se comportan exclusivamente como preventivos, esto significa que cuando una caldera ya se encuentra incrustada, estos productos evitarán que dicha incrustación continúe creciendo, pero la incrustación formada no sufrirá disminución alguna (al contrario, tiende a aumentar cuando existen errores en la dosificación) por tanto la desincrustación se deberá realizar manualmente o por medio de recirculación de ácidos teniendo

este último los riesgos correspondientes y en ambas opciones se tendrá que parar el funcionamiento del equipo.

En la caldera el agua de alimentación es calentada y transformada en vapor. Este vapor está esencialmente libre de sustancias químicas. Todas aquellas sustancias contenidas en el agua de alimentación permanecen en la caldera. Si no se toman medidas adecuadas, estas sustancias van aumentando su concentración hasta que precipitan o producen una serie de inconvenientes de mayor o menor gravedad. Para evitar o minimizar esto existen dos metodologías: tratar el agua para minimizar los aportes, y purgar el fondo de la caldera para eliminar sales. [4]

De forma general al agua con que se alimenta la caldera debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe ser clara, con la turbidez inferior a 10 ppm. Cuando esta turbidez es superior, debe ser sometida a filtración.
- Debe estar totalmente exenta de dureza no carbónica.
- La dureza total no debe exceder de 35 ppm.
- Debe estar prácticamente exenta de aceites.
- Debe estar prácticamente exenta de oxígeno.
- Debe tener un bajo contenido de sílice.
- Otros parámetros (ver anexo 1).

Existen tratamientos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de ellos para la potabilización. Los productos químicos utilizados generalmente en calderas son los secuestrantes de oxígeno, dispersantes, anti-incrustantes, protectores y neutralizantes para las líneas de retorno de condensado.

La dosificación de los productos químicos debe ser realizada al estanque de almacenamiento de agua, en el caso de los secuestrantes de oxígeno, que son más efectivos mientras mayor es su tiempo de residencia en el agua antes de llegar a la caldera y a la línea de alimentación de agua en el caso de los dispersantes, anti-incrustantes y tratamiento para las líneas de retorno de condensado.

Entre los productos químicos empleados en la planta de la refinería se encuentran: la cal, el sulfato de aluminio, el sulfito de sodio, la zeolita, etc. Todos

los tratamientos tienen limitaciones y tanto sus ventajas como sus limitaciones son los que definen sus campos de aplicación.

1.3.2. Problemas más frecuentes por el tratamiento incorrecto del agua en calderas

A continuación se describen los problemas, asociados al tratamiento de agua, encontrados con mayor frecuencia en las calderas.

- **Corrosión por Oxígeno o “Pitting”:** La corrosión por oxígeno como se muestra en la figura 1.5, consiste en la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (en contacto con el agua), provocando su disolución o conversión en óxidos insolubles. Los resultados de este tipo de corrosión son tubérculos de color negro, los que se forman sobre la zona de corrosión esta puede producirse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio e ingresa aire (oxígeno). La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y la mantención de un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera. [4]



Figura 1.5 Corrosión por Oxígeno o “Pitting”

- **Corrosión Cáustica:** La corrosión cáustica se produce por una sobreconcentración local en zonas de elevadas cargas térmicas (fogón, cámara trasera, etc.) de sales alcalinas como la soda cáustica. En la figura 1.6 se muestra este tipo de corrosión que se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes al “pitting” por oxígeno, rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica (fogón, placa trasera y cámara trasera) de una caldera.

La corrosión cáustica puede ser prevenida manteniendo la alcalinidad, OH libre y pH del agua de la caldera dentro de los límites recomendados.



Figura 1.6 Corrosión Cáustica

- **Corrosión Líneas Retorno Condensado:** Las líneas de retorno de condensado, lógicamente no forman parte de una caldera, sin embargo, su corrosión tiene efectos sobre las calderas y puede ser prevenida con el tratamiento de agua. La corrosión de las líneas de retorno de condensado tiene efectos sobre una caldera, ya que, los óxidos producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación. La corrosión en las líneas de retorno de condensado se produce por la acción del ácido carbónico que en éstas se forma. La prevención de la corrosión en las líneas de retorno de condensado, puede ser conseguida mediante aminas neutralizantes que neutralizan la acción del ácido carbónica y aminas fílmicas que protegen las líneas.
- **Incrustaciones:** Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes. La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión. En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas (ver figura 1.7), se corre el riesgo de embancar la caldera y obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aún más grave. La

presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico, provocando problemas de refrigeración de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento. La formación de incrustaciones en una caldera puede ser prevenida, satisfaciendo los requerimientos del agua de alimentación y agua de la caldera, tratando el agua de alimentación y manteniendo adecuados regímenes de purga.



Figura 1.7 Incrustaciones en tubos.

- **Arrastre de condensado:** El arrastre de condensado en una caldera tiene relación con el suministro de vapor húmedo (con gotas de agua). El suministro de vapor húmedo puede tener relación con deficiencias mecánicas y químicas. Las deficiencias mecánicas tienen relación con la operación con elevados niveles de agua, deficiencias de los separadores de gota, sobrecargas térmicas, variaciones bruscas en los consumos, etc. Por otro lado las deficiencias químicas tienen relación con el tratamiento de agua de la caldera, específicamente con excesivos contenidos de alcalinidad, sólidos totales (disueltos y en suspensión) y sílice, que favorecen la formación de espuma. Para prevenir el arrastre debido a deficiencias en el tratamiento de agua, se recomienda mantener los ciertos límites de los contenidos de alcalinidad, sólidos totales y sílice.

1.4. Identificación de sistemas.

La identificación de sistemas quedó establecida como un campo de investigación reconocido dentro del área de control automático.

En la ingeniería de control, el campo de identificación de sistemas usa métodos estadísticos para crear modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de valores medidos. La identificación de sistemas también abarca el diseño óptimo de los experimentos para generar eficientemente información útil para aproximar dichos modelos.

Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se desarrollaron los métodos de identificación de sistemas. A partir de la década de los 80, se hizo énfasis en la identificación de sistemas de múltiples entradas y salidas, y en los 90, en la identificación con fines de control de procesos industriales, donde se abrieron nuevas áreas de interés tales como: diseño del experimento, identificación a lazo cerrado, identificación en el dominio de la frecuencia, y análisis y diseño de control robusto basado en datos experimentales. [5]

La identificación de sistemas se ha extendido en la actualidad al análisis de dinámicas más complejas, a través de la utilización de técnicas novedosas. Dentro de las técnicas más investigadas recientemente se encuentran las basadas en los sistemas biológicos y la inteligencia humana, que agrupan las redes neuronales artificiales, la lógica difusa y los algoritmos evolutivos. [6]

1.4.1. Métodos para obtención de modelos.

La utilización de una metodología u otra para la construcción de modelos responde a las necesidades concretas, siempre teniendo en cuenta que un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, por lo tanto, es una representación parcial de la realidad. Un modelo se contruye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin. Este tiene que ser un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Partiendo de estas premisas, existen dos enfoques diferentes para la obtención de los modelos, estos son:

- **Por la vía analítica:** determinar las ecuaciones y parámetros que intervienen siguiendo exclusivamente las leyes generales de la física.

- **Por la vía experimental:** en la cual se considera al sistema como una caja negra, con determinadas entradas y salidas. En esta situación se realizaría un conjunto de experimentos que proporcionarían pares de medidas de las entradas y salidas durante la evolución del sistema hacia el estado estacionario, a partir de los cuales se trataría de determinar el modelo del sistema.

El modelo por la vía analítica tiene un campo de aplicación restringido a procesos muy sencillos de modelar, o a aplicaciones en que no se requiere gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, además, la estructura del modelo obtenido a partir del conocimiento físico de la planta posee un conjunto de parámetros desconocidos y que solo se pueden determinar experimentando sobre el sistema real. De ahí la necesidad de recurrir a los métodos de indentificación por la vía experimental.[7]

Los modelos obtenidos mediante técnicas de identificación tienen, sin embargo, las siguientes desventajas:

1. Su rango de validez suele ser limitado (sólo son apreciables a un determinado punto de trabajo, un determinado tipo de entrada o un proceso concreto).
2. En muchos casos es difícil dar significado físico al modelo obtenido, puesto que los parámetros identificados no tienen relación directa con ninguna magnitud física . Estos parámetros se utilizan sólo para dar una descripción aceptable del comportamiento conjunto del sistema.

En la práctica, lo ideal es recurrir a la mezcla de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a este una gran exactitud, pero el proceso de indentificación se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes de la física que rigen el proceso.

1.4.2. El proceso de indentificación

En términos generales, el proceso de indentificación se comprende de los siguientes pasos.[7]

1. Obtención de los datos de entrada-salida: para ello se debe excitar al sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. Tratamiento previo de los datos registrados: Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata por tanto "preparar" los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
3. Elección de la estructura del modelo: Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer caso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
4. Obtención de los parámetros del modelo: A continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. Validación del modelo: El último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
 - El conjunto de datos de entrada-salida no proporcionan suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del proceso.
 - El criterio de ajuste de parámetros seleccionados no es el más adecuado.

1.4.3. Métodos de identificación

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios:

1. Dependiendo de la aplicación

- Métodos de identificación off-line, utilizados en aquellas aplicaciones en que no se requiera un ajuste continuo del modelo.

En estos casos, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros obtenidos no se verá alterada con el paso del tiempo.

- Métodos de identificación on-line, en los que los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso.

2. Dependiendo del tipo de modelo

- Métodos no paramétricos, permiten obtener modelos no paramétricos del sistema bajo estudio. Algunos de estos métodos son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.
- Métodos paramétricos, permiten obtener modelos paramétricos. Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

3. Dependiendo del criterio de ajuste de parámetros

- Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de Mínimos Cuadrados y el método de las Variables Instrumentales. [8]

1.4.4. Técnicas de identificación

En la actualidad el desarrollo de las ciencias en el marco de la computación, ha permitido crear herramientas de software para la identificación de sistemas, entre estas se encuentra el MATLAB, con esta herramienta es posible procesar modelos no paramétricos y paramétricos.

En la figura 1.8 se muestran los principales modelos como ARX (Auto-Regresivo Xogen), ARMAX (Auto Regresivo Moving Averagee Xogen), Modelo OE (Output-Error), Análisis de Correlación, Estimación Directa de Respuesta a Impulso entre otros.

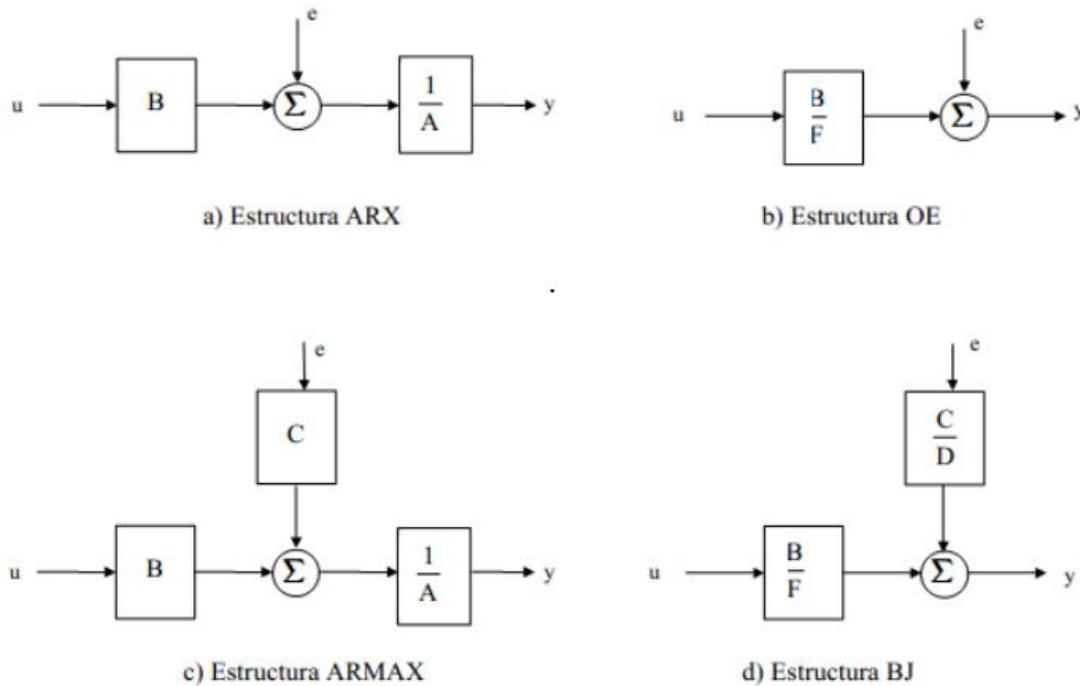


Figura 1.8 Diagrama en bloques de las estructuras de modelos paramétricos.

Una vez elegida la estructura del modelo, tanto el tipo (ARX, ARMAX, OE, BJ,...) como los órdenes de cada polinomio, es necesario determinar el valor de los parámetros del mismo que ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada – salida experimentales. El software profesional MATLAB posee un “Toolbox” para la Identificación de sistemas, el cual constituye una poderosa herramienta para esta etapa del proceso de identificación, proporcionando diferentes algoritmos para el ajuste de parámetros. Uno de los métodos o criterios para realizar este ajuste de parámetros, es el método de mínimos cuadrados.

La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica Ident, la cual facilita construir los modelos. Otra forma es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión “.m”, utilizando los comandos de este “Toolbox”. Esta herramienta posee la ventaja de proveer varios métodos y estructuras para obtener un modelo que se aproxime al sistema real. Además nos permite analizar y validar los modelos utilizando respuestas frecuenciales y temporales, así como el análisis de los residuos.

1.5. Sistemas de control distribuidos

Un Sistema de Control Distribuido o SCD, más conocido por sus siglas en inglés DCS (Distributed Control System), es un sistema de control aplicado a procesos industriales complejos en las grandes industrias como petroquímicas, papeleras, metalúrgicas, centrales de generación, plantas de tratamiento de aguas, incineradoras o la industria farmacéutica. Las capacidades actuales de un SCD pueden llegar hasta las 250.000 señales. [9]

Características

Los SCD trabajan con una sola Base de Datos integrada para todas las señales, variables, objetos gráficos, alarmas y eventos del sistema. En los SCD la herramienta de ingeniería para programar el sistema es sólo una y opera de forma centralizada para desarrollar la lógica de sus controladores o los objetos gráficos de la monitorización. Desde este puesto de ingeniería se cargan los programas de forma transparente a los equipos del sistema.

1.5.1. Niveles de control en un SCD

- **Nivel de operación:** Este nivel es el de interacción del sistema con los operadores de la planta y es donde se encuentran los sistemas informáticos para la monitorización del proceso y adquisición de la información en tiempo real.
- **Nivel de control:** En un SCD la responsabilidad del control de las diferentes partes funcionales del proceso, se asignan a varios controladores locales distribuidos por la instalación.
- **Nivel módulos de Entrada/Salida:** Los módulos de entradas/salidas para señales cableadas, se distribuyen por la instalación, es lo que se denomina "periferia descentralizada", esto ahorra tiradas de cables de señal aproximando la electrónica del control hasta los elementos de campo.
- **Nivel de elementos de campo:** Desde el año 2000, ha ido creciendo la necesidad de integrar directamente los instrumentos y los actuadores en

los buses de campo del SCD, de forma que estos equipos son en realidad una extensión natural del nivel anterior.

1.5.2. Ventajas del control distribuido

- Cada procesador puede atender un reducido número de funciones localizadas en una parte del proceso. Con ello se obtiene mayor capacidad de procesamiento y, por tanto, una mejor respuesta temporal.
- Se reduce la complejidad, ya que las tareas están más distribuidas, lo cual facilita su instalación, operación, mantenimiento y reparación.
- Se mejora la fiabilidad y, con ello, la disponibilidad del sistema automático, porque un fallo de una estación afectará solamente una parte del proceso. Además, con las técnicas de tolerancia a fallos, puede permitir el funcionamiento del sistema, aún con una disminución de las prestaciones.
- Los datos se procesan y usan en el mismo lugar donde se generan, lo cual contribuye a disminuir los errores.
- Menor cantidad de cables a tender por la planta, lo que representa más facilidad de montaje y menor costo de instalación y mantenimiento.
- Además, mayor seguridad del sistema, ya que hay menos probabilidad de deterioro de los cables y menos alteraciones de las mediciones debido al ruido. [9]

1.6. Automatización industrial

Debido a que el objetivo principal de esta investigación es lograr una estrategia de control que permita mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de tratamiento de agua en la Refinería Hermanos Díaz se hace el estudio relacionado con los equipos de automatización necesarios para la implementación de dicha estrategia de control.

1.6.1. Controladores lógicos programables (PLC)

Un controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller) o por autómeta programable, es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial,

para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas. [10]

El PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real, donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.

1.6.2. Funciones que pueden realizar los PLC

- Gobierno de sistemas de medición para valores límites de variables del proceso, finales de carrera, detectores de proximidad u otros sensores binarios.
- Control secuencial y de trabajo de distintos procesos.
- Control de señales analógicas (reguladores ON - OFF, PID, etc.).
- Facilidades de modificación y perfeccionamiento del sistema de automatización del proceso.
- Gobierno de sistemas de señalización y protecciones automáticas de distintos tipos.
- Control de regímenes de arranque y parada del proceso y funcionamiento en condiciones de alarma o avería.
- Medición, conversión, filtraje y validación de señales analógicas del proceso para indicación, registro y/o control.
- Control económico y optimización del proceso.

1.6.3. Campo de aplicación del PLC

El PLC por sus especiales características de diseño tiene un campo de aplicación muy extenso. La constante evolución del hardware y software amplía constantemente este campo para poder satisfacer las necesidades que se detectan en el espectro de sus posibilidades reales. Su utilización se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso

de maniobra, control o señalización, por tanto, su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a transformaciones industriales hasta control de instalaciones. [11]

Sus reducidas dimensiones, la facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, hace que su eficacia se aprecie fundamentalmente en procesos en que se producen necesidades tales como:

- Espacio reducido
- Procesos de producción periódicamente cambiantes
- Procesos secuenciales

1.6.4. Criterios para la selección del PLC

Para seleccionar un PLC es necesario considerar ciertos requerimientos que se debe cumplir desde el punto de vista de software y hardware.

- Número de entradas y salidas. La cantidad de entradas y salidas, dependerá del esquema para el circuito a controlar, es decir depende del número de sensores y actuadores que el diseño disponga.
- Protocolos. Esto se refiere a los diferentes tipos de protocolos necesarios para la comunicación con los dispositivos a interactuar.
- Tipo de entradas y salidas. En el caso de las entradas, adaptan las señales de sensores para que la CPU las reconozca. En el caso de las salidas, activan un circuito de conexión (transistor, triac o relé) ante una orden de la CPU.
- Fuente de alimentación. Se debe verificar los niveles de voltaje necesario el cual puede variar desde 220, 110, 24, 12 voltios.
- Capacidad de memoria. Es importante definir al momento de realizar el programa, debido a que según el número de instrucciones o extensión del programa será la capacidad de memoria a utilizar.
- Programa fácil de editar. La visualización del programa debe ser editada en una pantalla en forma simple, y en cualquier lenguaje de programación.

- Poseer una memoria no volátil y de respaldo. Esta memoria de respaldo es importante ya que permite almacenar el programa necesario.

1.7. Sistemas automatizados

En el mundo industrial, ocurre con frecuencia que el PLC para el control está colocado a una distancia tal que, el llevar todos los cables de las entradas y salidas hasta las distintas partes del sistema, exigirían un mazo de cables de grandes proporciones, con los consiguientes problemas de tendido de los mismos, espacio, pérdidas de señal, costo económico de material y colocación. Para evitar estos problemas lo mejor es la utilización de un bus de campo, el cual con sólo dos o cuatro hilos, transmite la información de forma rápida y eficaz.

1.7.1. Buses de campo

Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de procesos, reciben la denominación genérica de buses de campo. Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción. El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional lazo de corriente de 4 -20 mA o 0-10 V DC, según corresponda. Generalmente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLCs, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión. Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un bus de campo universal. [12]

Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

- **HART** es un protocolo para bus de campo soportado por la HART Communication Foundation y la FIELDBUS Foundation. Su campo de aplicación básico es la comunicación digital sobre las líneas analógicas

clásicas de los sistemas de instrumentación, manteniendo éstas en servicio. Sus prestaciones como bus de campo son reducidas.

- **PROFIBUS** se desarrolló bajo un proyecto financiado por el gobierno alemán. Las distancias potenciales de bus van de 100 m a 24 Km (con repetidores y fibra óptica). La velocidad de comunicación puede ir de 9600 bps a 12 Mbps. Utiliza mensajes de hasta 244 bytes de datos.
- **FIELD BUS FOUNDATION** es un bus orientado sobre todo a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Presta especial atención a las versiones que cumplen normas de seguridad intrínseca para industrias de proceso en ambientes combustibles o explosivos

Ventajas de los buses de campo

- aumento de precisión
- ahorro
- facilita el diseño
- mantenimiento

Además, los buses de campo permiten a los operadores monitorizar todos los dispositivos que integran el sistema e interpretar fácilmente las interacciones entre ellos. De esta forma, la detección de las fuentes de problemas en la planta y su corrección resulta mucho más sencilla, reduciendo los costos de mantenimiento y el tiempo de parada de la planta. [13]

1.7.2. Redes eléctricas RS-485

Es la transmisión más frecuentemente utilizada por PROFIBUS. Su área de aplicación incluye todas las áreas en las que se requieren alta velocidad de transmisión y una instalación sencilla. Tiene la ventaja de que posibles ampliaciones no influyen en las estaciones que se encuentran ya en operación.

Características de las redes eléctricas RS-485

- Longitud máxima del cable dependiente de la velocidad de transmisión.
- Velocidad de transmisión de 9.6 Kbit/s a 12 Mbit/s. Se seleccionará una para todos los dispositivos.

- Conexión máxima de 32 estaciones sin repetidor (127 con repetidor).
- La estructura de la red es linear, con par trenzado.

En la conexión, es conveniente tener en cuenta algunas precauciones, de las que son destacables:

- Hay que asegurarse de no torcer las líneas de datos.
- Se recomienda el uso de líneas de datos escudadas para mejorar la compatibilidad electromagnética.
- Se recomienda mantener las líneas de datos separadas de los cables de alto voltaje [14].

Construcción de las redes eléctricas RS-485

Cable bifilar apantallado y trenzado con sección circular (figura 1.9) .Para todos los cables de bus para PROFIBUS es aplicable:

- Gracias a doble apantallado, particularmente aptos para tendido en entornos industriales con interferencias electromagnéticas.
- Concepto de puesta a tierra homogéneo realizable a través de la pantalla exterior del cable de bus y los bornes de puesta a tierra de los terminales de bus
- Marcas impresas cada metro.

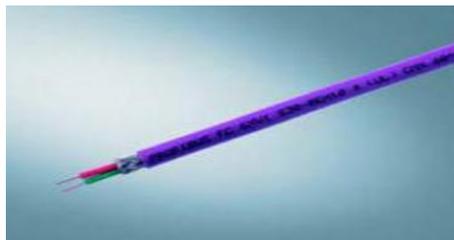


Figura 1.9 Cable empleado en PROFIBUS

Ventajas de las redes eléctricas RS-485

- Versátiles posibilidades de aplicación gracias a toda una gama de cables de bus especiales.
- Red inmune a interferencias gracias a cables con pantalla doble y posibilidad de puesta a tierra de extremo a extremo.

- Ahorro de tiempo gracias al montaje de conectores rápido y simple con cables FastConnect.
- Un sólo cable (ECOFAST Hybrid Cable) compartido para la transferencia de datos y la alimentación de tensión.

1.8. Estrategias de control

Cuando hablamos de estrategia determinamos una distribución de piezas o componentes, las cuales tienen ciertas tareas que efectuar y en algún orden, para alcanzar un objetivo. En el mundo de los sistemas de control automático también existe este concepto, en este caso se denomina estrategia de control y está relacionado con la distribución de los dispositivos o equipos bajo los cuales funciona un proceso o máquina. Las estrategias de control determinan la estructura o circuito que sigue la información o señales en el lazo. Dependiendo de la aplicación (entorno de trabajo, máquina) a gobernar se debe definir el actuar de las variables de proceso (nivel, humedad, presión, flujo, temperatura, etc.). En función de esta información se incorporarán determinados instrumentos y/o equipos con los cuales se debe lograr la estabilidad en la aplicación o sistema. Estos instrumentos y/o equipos podrán estar en cantidades (varios sensores, varios controladores, etc.) y dispuestos en una jerarquía o circuito específico determinado por el ingeniero del proceso. [15]

Las perturbaciones causan que la variable controlada se desvíe del valor deseado, por tanto, la acción de control tiene que ser cambiada para mantener la variable de salida a régimen estacionario en el referido valor. Lo anterior se puede lograr mediante varias vías o estrategias de control.

La estrategia de control es un conjunto de ecuaciones, reglas (algoritmos) con las cuales se determinan las acciones de control necesario que especifican un comportamiento dado en la variable controlada.

1.8.1. Configuraciones de control.

Es la forma en que se encuentra estructurada la información que conectan o enlazan las variables medidas (controladas) con las variables manipuladas para poder satisfacer los objetivos operacionales de la planta.

Dentro de otras configuraciones se pueden mencionar: el simple lazo realimentado, el control en cascada, el control anticipatorio realimentado, control de relación, control subastador, control selectivo, etc.

Simple Lazo Realimentado

El sistema de control realimentado se basa en la medición de la variable controlada y en el error (entre la variable controlada y el valor deseado), que la perturbación origina. Este sistema de control, modifica el valor de la variable manipulada después que la variable controlada se ha desviado del valor deseado. [16]

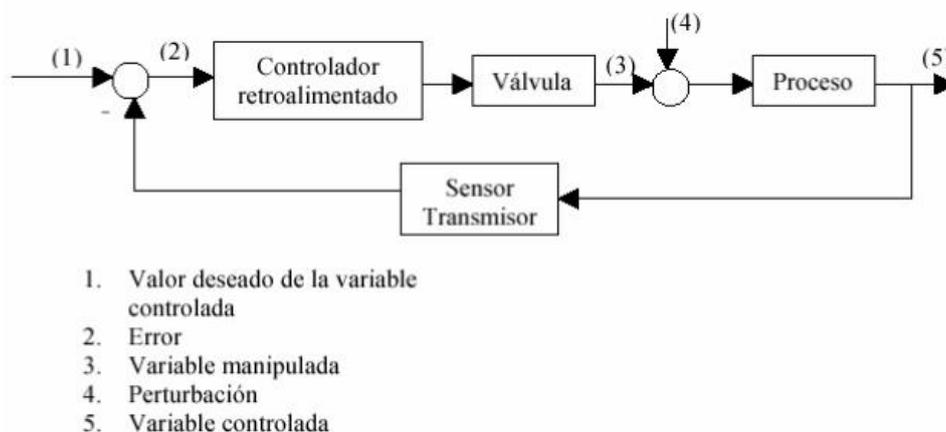


Figura 1.10 Diagrama de un lazo de control realimentado.

Control en Cascada

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación. El control en cascada involucra sistemas de control de realimentación o circuitos que están ordenados uno dentro de otros.

Existen dos propósitos para usar el control en cascada:

- Eliminar el efecto de algunas perturbaciones haciendo la respuesta de regulación del sistema más estable y más rápido.
- Mejorar la dinámica del lazo de control.

Estructura

La estructura de control en cascada tiene dos lazos, un lazo primario con un controlador primario también llamado maestro y un lazo secundario con un controlador secundario denominado esclavo, siendo la salida del primario el

punto de consigna del secundario. La salida del control secundario es la que actúa sobre el proceso.

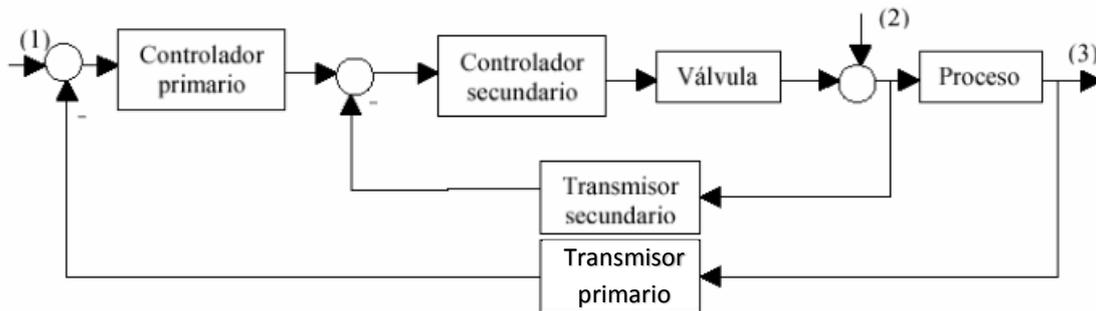


Figura 1.11 Diagrama de un lazo de control en cascada.

Ventajas del Control en Cascada

- Produce estabilidad en operación.
- Las perturbaciones del lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- Es menos sensible a errores de modelado
- Incremento de la capacidad de producción

Limitaciones de aplicación del Control en Cascada

- Es aplicable solo cuando pueden obtenerse mediciones de variables adicionales de proceso.
- Requiere medir las perturbaciones de forma explícita y además es necesario un modelo para la salida del controlador.
- En algunas aplicaciones la variable controlada no puede medirse y la realimentación no puede realizarse. [17]

Implementación del Control en Cascada

Una cuestión importante en la implementación de control en cascada es cómo encontrar la variable secundaria controlada más ventajosa, es decir, determinar cómo el proceso puede ser mejor dividido. La selección de la variable controlada secundaria es tan importante en un sistema de control en cascada que es muy útil formalizar algunas reglas que ayuden a la selección.

- **Regla#1.** Diseñar el lazo secundario de manera que contenga las perturbaciones más serias.

- **Regla#2.** Hacer el lazo secundario tan rápido como sea posible incluyendo solamente los menores retrasos del sistema completo de control.
- **Regla#3.** Seleccionar una variable secundaria cuyos valores estén definitivamente y fácilmente relacionados a los valores de la variable primaria.
- **Regla#4.** Incluir en el lazo secundario tantas perturbaciones como sea posible, manteniéndolo al mismo tiempo, relativamente rápido.
- **Regla#5.** Escoger una variable secundaria de control que permita al controlador secundario operar a la ganancia más alta posible.

Conclusiones del capítulo.

Luego de desarrollar este capítulo se puede concluir que:

- Se llevó a cabo la caracterización del flujo productivo de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería y se mostró la importancia que tiene el tratamiento de esta en las industrias y fundamentalmente en la generación de vapor.
- Se profundizó en los fundamentos teóricos de la identificación de sistemas y de las teorías de control los cuales servirán como base para el desarrollo de nuevas estrategias en los subprocesos de tratamiento y deaeración.
- Se realizó una búsqueda bibliográfica respecto a la evolución de la automatización industrial plasmando las ventajas que esta brinda así como el estudio de los elementos necesarios para un sistema automatizado.

Capítulo 2: Proceso de identificación y desarrollo de estrategias de control en los subprocesos de dosificación y deaeración.

Introducción

En el siguiente capítulo se realiza la identificación experimental en los subprocesos de dosificación y deaeración. Después de obtenidos los modelos de los sistemas en cuestión, se definen las estrategias de control con todos sus elementos. Una vez que estos quedan conformados se realizará un análisis de los resultados obtenidos.

2.1. Lazo de control para variar la velocidad de la estera.

Debido a que en la planta no se cuenta con el sistema correcto para la dosificación de los productos químicos que se deben agregar al agua que se encuentra previamente almacenada en el precipitador se implementa una estrategia de control como la que se muestra en la figura 2.1 la cual debe responder con la necesidad que existe de llevar un correcto tratamiento de este tipo de agua. Es preciso conocer que el agua procedente del pozo tiene una dureza entre 150 y 180 mg/l , lo cual afecta seriamente el interior de las calderas por lo que se hace preciso tratarla previamente añadiendo cada 100 m^3 de agua en el precipitador, 75 Kg de cal y 5 Kg de sulfato de aluminio, estas materias primas son depositadas en la estera transportadora a través de las electroválvulas que tiene cada tolva. Estos productos tienen como función de reducir la dureza en un 50 % y ajustar otros parámetros como el pH . El objetivo de controlar la velocidad de la estera radica en que la misma solo se accionará una vez que el nivel del precipitador esté en su nivel máximo y entonces se procederá a la dosificación de los ingredientes, como la dosificación de cal es mayor la cinta se desplazará más lenta debido a que un aumento de la carga disminuirá la velocidad del motor. Cuando se dosifica el sulfato de aluminio ocurre todo lo contrario.

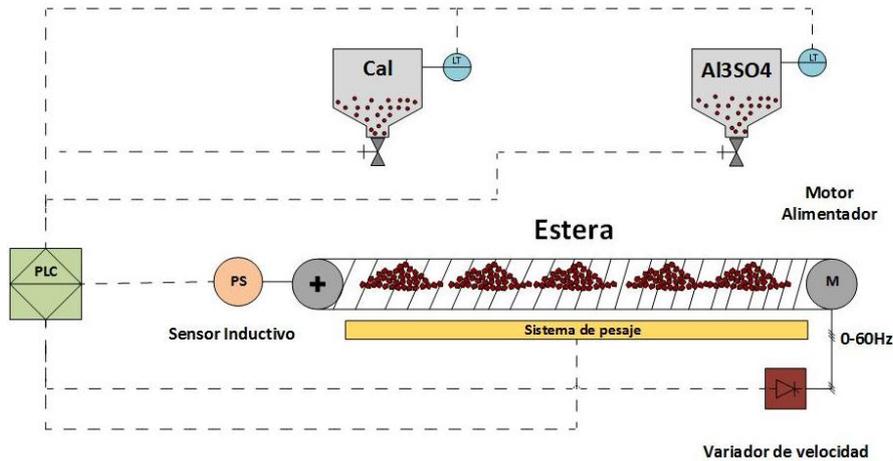


Figura 2.1 Diagrama del lazo de control de velocidad

En la figura 2.2 se presenta el esquema de control en bloques propuesto para variar la velocidad de la estera alimentadora en dependencia del peso de la materia prima que este transportando. El mismo está compuesto por un controlador PID, un variador de velocidad, un motor asincrónico trifásico acoplado a la estera y un sensor de velocidad para realizar la realimentación del lazo de control. La variable controlada es la velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto [rpm] y como referencia se establece el valor de la velocidad de acuerdo al tipo de materia prima que se desea agregar. Se considera como proceso o planta al conjunto variador de frecuencias-motor asincrónico trifásico.

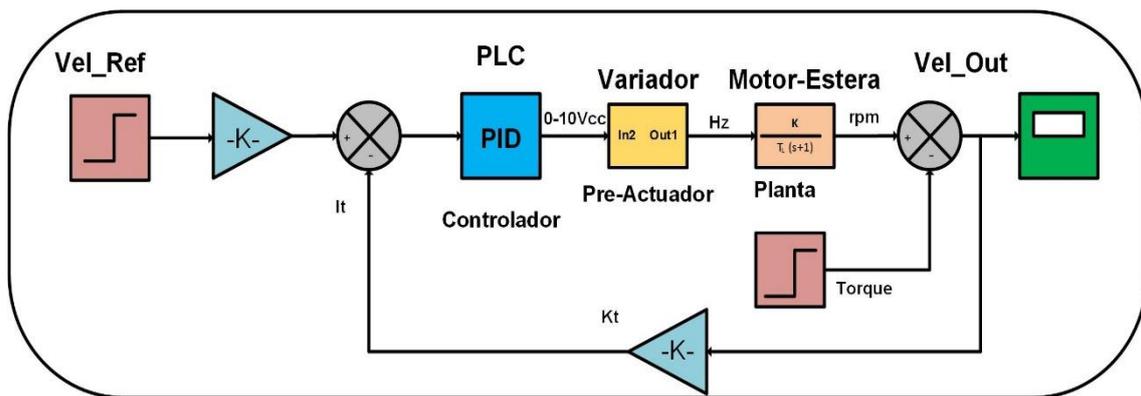


Figura 2.2 Esquema del lazo de control realimentado

Para realizar las simulaciones del lazo de control realimentado, se empleará el software Matlab 2014, además es necesario conocer las expresiones matemáticas de cada uno de sus elementos, las que se obtienen siguiendo los siguientes pasos:

1. Escoger un Motor Prediseñado del Matlab análogo al motor real del proceso.
2. Simular el funcionamiento del Variador de Velocidad acoplando el Motor escogido.
3. Obtener el Set de Datos de Entrada y de Salida para realizar la identificación experimental de la Planta.
4. Obtener la FT de la Planta mediante el Toolbox Ident del MatLab.
5. Ajustar el Controlador mediante el Toolbox PID Tuner del MatLab.
6. Simular el lazo de control realimentado.

2.1.1. Motor prediseñado del Matlab análogo al motor del proceso

Para poder simular un motor asincrónico trifásico Squirrel-cage (jaula de ardilla) en el Simulink es necesario obtener los parámetros internos del mismo, los cuales son:

- La resistencia del estator R_s (Ω).
- La inductancia del estator L_{ls} (H).
- Las resistencias del rotor R_{r1} (Ω) y R_{r2} (Ω).
- Las inductancias del rotor L_{lr1} (H) y L_{lr2} (H).
- La inductancia mutua L_m (H).

Estos son los parámetros eléctricos internos del motor y se obtuvieron con la ayuda del comando del área de trabajo de Matlab: `power_AynchronousMachineParams` que se muestra en la figura 2.3.

Nominal line-to-line rms voltage	V_n (V)	220
Nominal frequency	f_n (Hz)	60
Nominal (full load) line current	I_n (A)	8.3
Nominal (full load) mechanical torque	T_n (N.m)	12.27
Synchronous speed	N_s (rpm)	1800
Nominal (full load) mechanical speed	N_n (rpm)	1725
Starting current to nominal current ratio	I_{st}/I_n	8.01
Starting torque to full load torque ratio	T_{st}/T_n	3.53
Breakdown torque to full load torque ratio	T_{br}/T_n	3.89
Nominal power factor	pf (%)	87

Compute Block Parameters

Figura 2.3 Herramienta utilizada para obtener los parámetros eléctricos del motor, de acuerdo a sus datos de chapa.

Esta herramienta cuenta con una librería interna de motores prediseñados con sus respectivos datos de chapa, de la cual se escogió el motor correspondiente al existente en la planta (ver anexo 2) por su analogía con los datos de chapa del mismo.

2.1.2. Simulación del funcionamiento del Variador de Velocidad acoplado al motor escogido.

Para realizar esta simulación se utilizó el ejemplo “power_pwm” del Matlab que se muestra en la figura 2.4., que está constituido por el bloque del motor y un conjunto de bloques que realizan la operación del variador de frecuencias a lazo abierto.

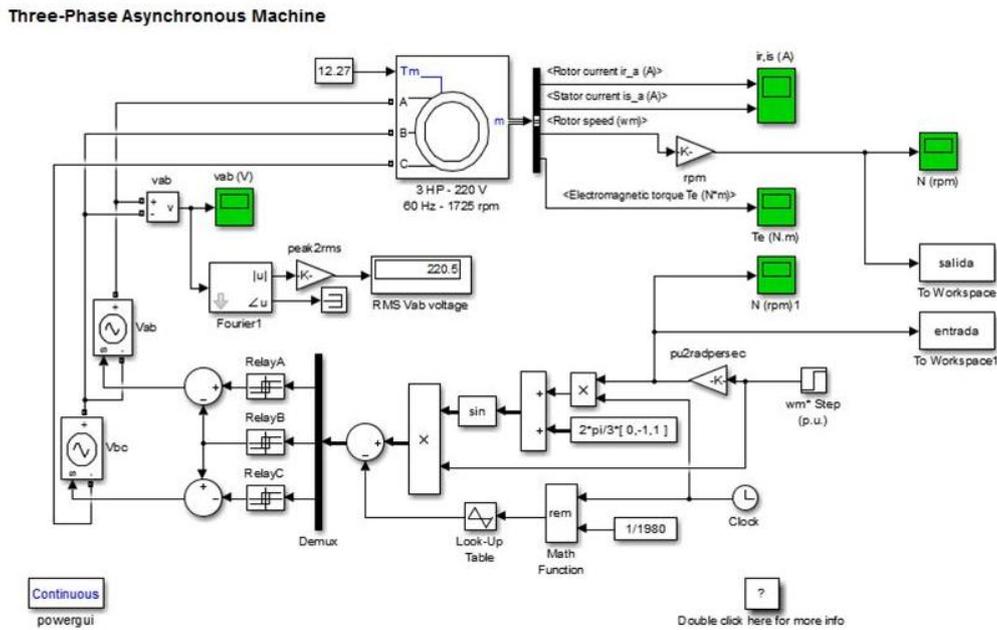


Figura 2.4 Esquema del ejemplo “power_pwm”.

Para el variador de velocidad, la frecuencia base de la onda sinusoidal de referencia es de 60 Hz, mientras que la frecuencia de la onda portadora triangular se establece a 1980 Hz. La salida del variador de frecuencias pasa por bloques controlados de fuentes de voltaje antes de ser aplicada al bloque de bobinados del estator de la máquina asincrónica. El torque de entrada aplicado a la máquina es constante fijado en su valor nominal de 12.27Nm. El motor arranca desde cero hasta alcanzar su velocidad nominal que es de 1725 rpm a los 0.9 s después de ser excitada la referencia de velocidad del variador de frecuencias con un escalón de 377 rpm la cual constituye la referencia necesaria para alcanzar la velocidad nominal del motor. [18]

La figura 2.5 muestra los parámetros del motor una vez cargados en el ejemplo de la figura 2.4.

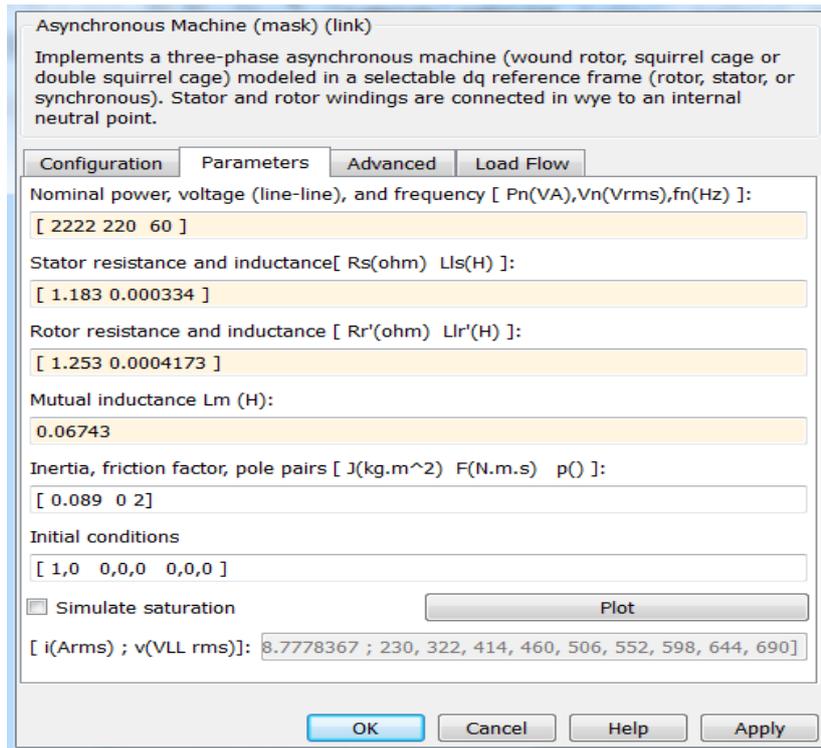


Figura 2.5 Configuración de los parámetros del motor.

En la figura 2.6 se muestra la salida del sistema donde la línea roja es la referencia de 377 rpm para alcanzar los 1725 rpm de velocidad nominal. Variando la referencia se obtiene la velocidad nominal.

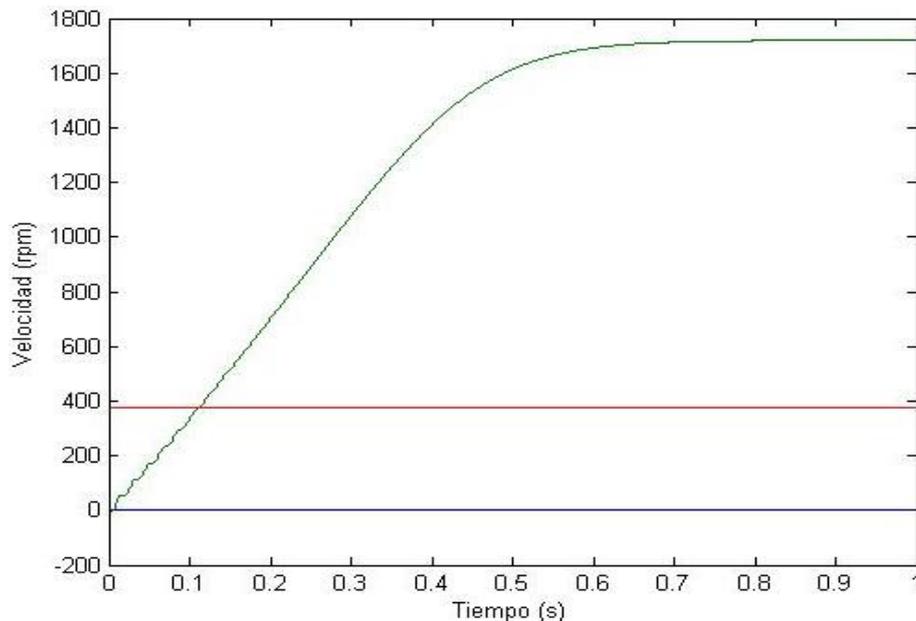


Figura 2.6 Salida de velocidad del motor [Vs (rpm)] en verde contra escalón en la referencia [Vr (rpm)] en rojo al cabo de 1s.

Proceso de identificación

En el ejemplo que se muestra en la figura 2.4 se emplean dos bloques del Toolbox Simulink (to work space) los cuales exportan hacia el área de trabajo de Matlab los datos que posteriormente serán empleados para realizar la identificación (ver anexo 3).

Luego de tener el set de datos en el área de trabajo se procede a realizar su identificación para obtener la función de transferencia del proceso, utilizando el Toolbox de identificación Ident del Matlab, al cual se le introducen los datos de los cuales se utilizan la mitad de la muestra para estimar y la otra mitad para validar.

Se realizó la estimación del sistema como si fuera de primer orden (una ganancia en el numerador y un polo en el denominador), para el cual se obtuvo un ajuste del 36.82 %, la que es considerada pobre, después se estimó suponiendo un sistema también de primer orden, 1 polo en el denominador, con 1 cero en el numerador, para el cual se obtuvo un mejor ajuste del 39.48 %, lo que es considerada pobre porque es inferior al 50 %. Seguidamente se realizó el ajuste considerando al sistema de segundo orden con 2 polos y 1 cero para el que se obtuvo un ajuste de 85.96%, con 2 polos y 2 ceros el ajuste fue de un 85.31%. Por lo que se tomó el ajuste más alto el cual describe mejor la dinámica del proceso.

En la figura 2.7 se muestran 5 curvas, la curva de color marrón representa la función de transferencia de segundo orden estimada que presenta mejor ajuste por lo cual es la más representativa del proceso y se muestra a continuación:

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = \frac{10.55s + 0.0113}{s^2 + 2.387s + 0.000247}$$

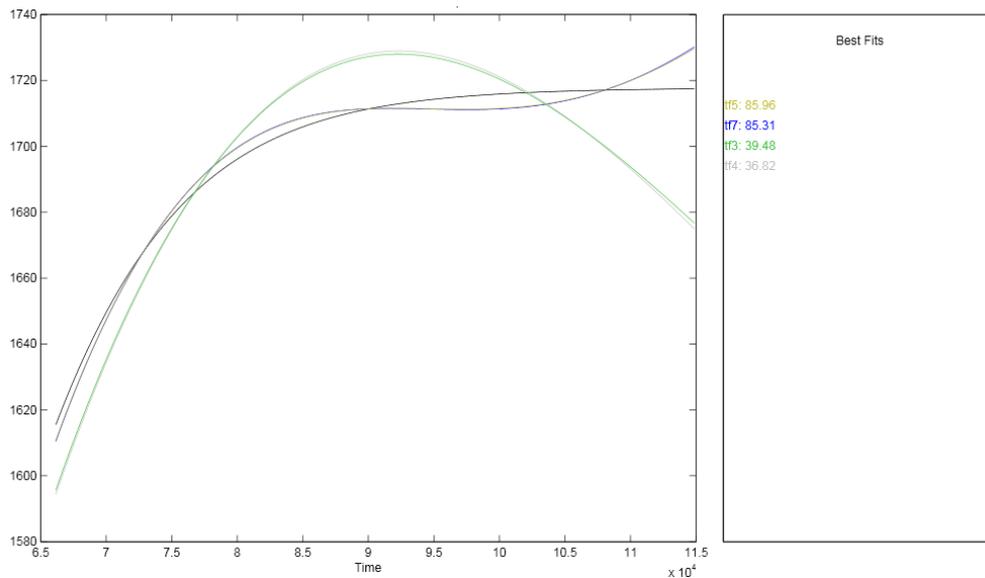


Figura 2.7 Ajuste obtenido del procesamiento de datos del motor

2.1.3. Ajuste del controlador

Para este paso se empleó el Toolbox del MatLab PID Tuner. Esta herramienta permite obtener los parámetros de ajuste para un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) completo o sus diferentes variantes: P, PD y PI, introduciéndole la FT de la planta a la que se desea controlar.

Se realizó el ajuste para un controlador proporcional con ganancia $K_p=0.7431$ como se muestra en la figura 2.8, pero este tipo de controlador presenta error a estado estacionario ante una referencia tipo escalón unitario.

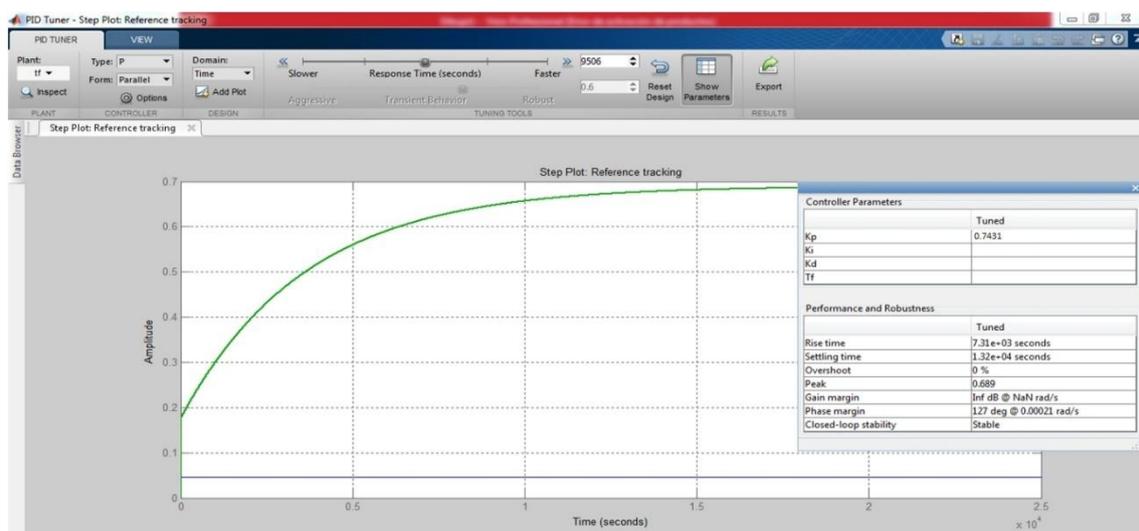


Figura 2.8 Ajuste del controlador con acción P

Para eliminar este error se realizó el ajuste de un controlador PI obteniéndose los parámetros de ajuste $K_p = 0.4741$ y $K_i = 4.1310$ s como se muestra en la figura 2.9.

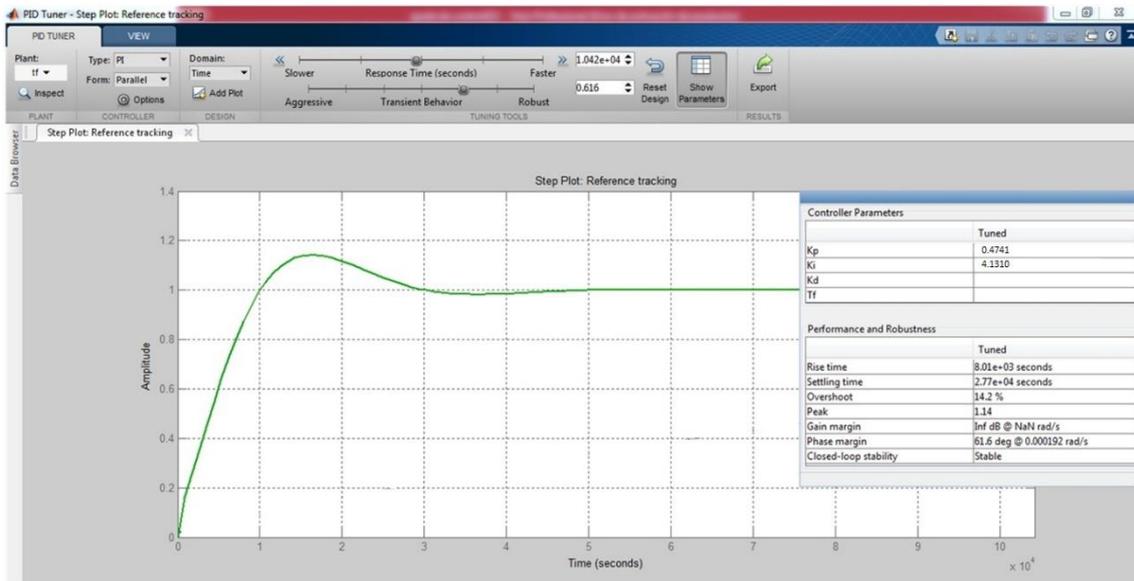


Figura 2.9 Ajuste del controlador con acción PI

Simulación del lazo de control realimentado

Después de obtener la FT de la planta y haber ajustado el controlador estamos en condiciones de simular el lazo de control realimentado que se muestra en la figura 2.10.

Se establecieron 2 velocidades de referencias (ver anexo 5):

1. La velocidad RPM1 equivalente a un escalón de 1376 rpm representativa para el producto A (cal) y constituye la velocidad de referencia con que se inicia la simulación.
2. La velocidad RPM2 equivalente a un escalón de 1725 rpm representativa para el producto B (sulfato de aluminio). Esta es nueva velocidad de referencia a 5s de iniciada la simulación.

Seguidamente se añadieron 2 perturbaciones para verificar que el controlador es capaz de eliminarlas:

1. La perturbación P1 que se activa a los 2s después de iniciada la simulación provocando un aumento en la velocidad, que puede

considerarse como el efecto de la disminución brusca de la materia prima sobre la estera transportadora en un instante de tiempo.

2. La perturbación P2 que se activa a los 7s después de iniciada la simulación provocando una disminución en la velocidad, que puede considerarse como el efecto del aumento brusco de la materia prima sobre la estera transportadora en un instante de tiempo.

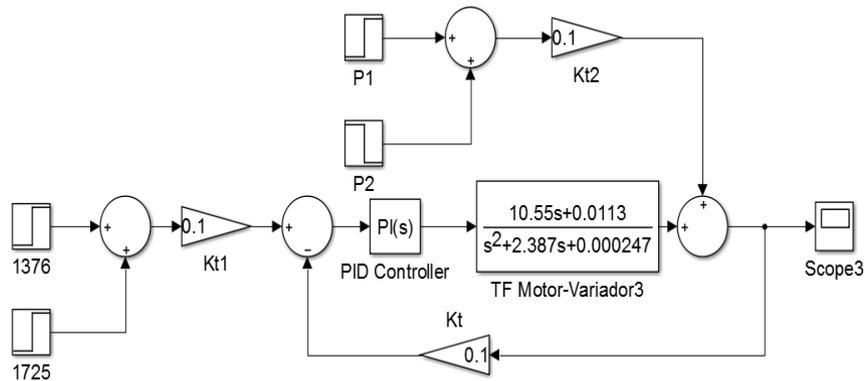


Figura 2.10 Esquema Simulink del sistema de control realimentado.

La ganancia del Sensor Pick up se calcula teniendo en cuenta la señal de salida y de entrada del mismo, es decir, los pulsos a la salida según la velocidad del motor. A continuación se muestra el valor de (K_t), ganancia del sensor necesaria para la realimentación la cual es descrita por la ecuación 2.1.

$$K_t = \frac{Puls_Max - Puls_Min}{Vel_Max - Vel_Min} \quad (2.1)$$

$$K_t = \frac{180 - 0}{1725 - 0} = 0.1 \text{ pulsos/rmp} \quad (2.2)$$

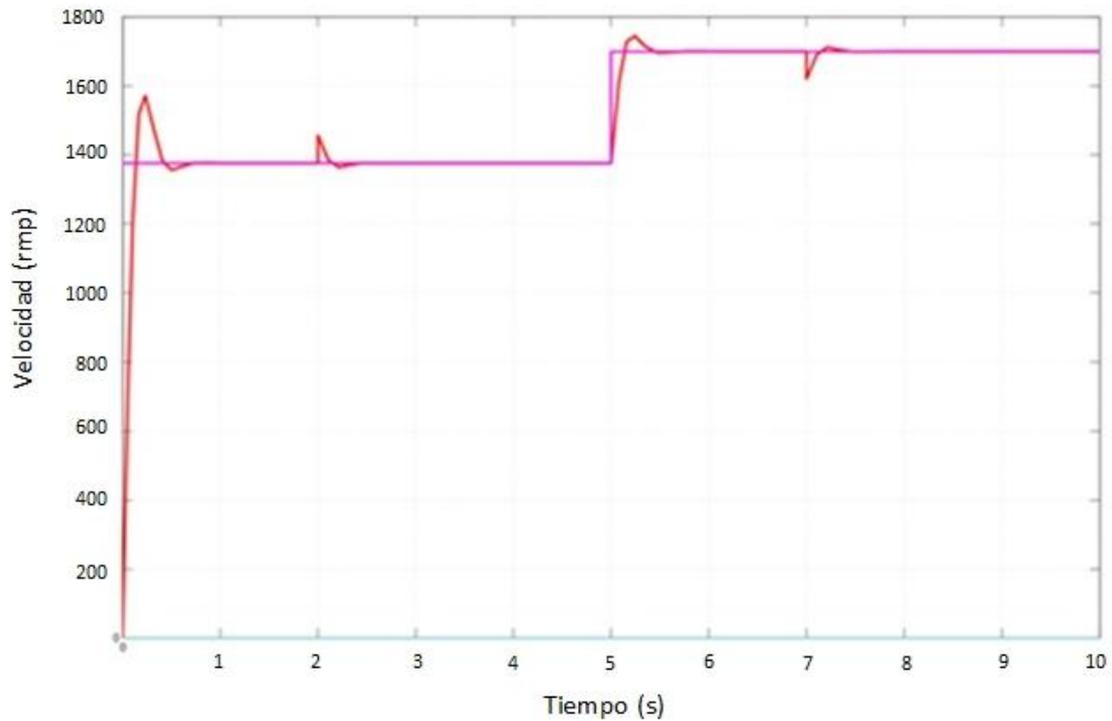


Figura 2.11 Respuesta del sistema ante cambios en la velocidad de referencia y en las perturbaciones.

2.2. Lazo de control en el deareador

Debido a la inexistencia de lazos de control en el deareador, se implementa un lazo en cascada para controlar el nivel y mantenerlo constante como se muestra la figura 2.12. El objetivo de este tipo de control está en que se hace indispensable mantener el nivel constante debido a que un aumento o disminución del mismo crea una especie de cavitación en la bomba lo que afecta el flujo de alimentación a las calderas, además también influye en el consumo de vapor para desairear el agua que se encuentra en el interior del mismo.

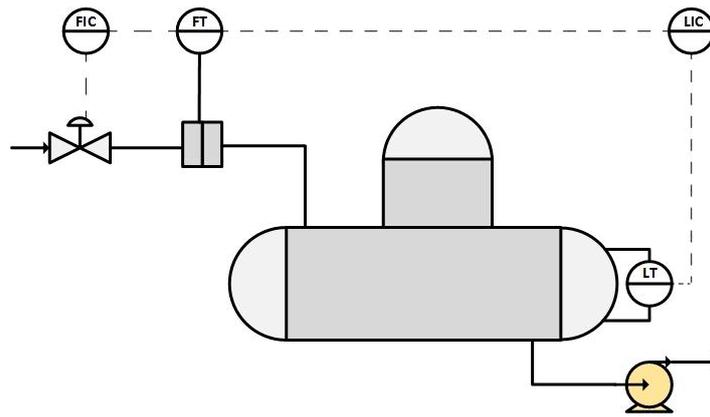


Figura 2.12 Lazo de control en cascada en el deareador

Identificación experimental en el deareador

En la figura 2.13 se puede observar el ajuste obtenido, teniendo en cuenta que en el deareador existen instrumentos de campo como sensores de nivel, flujo y temperatura los cuales tiene la única función de mostrarle al operador las condiciones de trabajo en las que se encuentra el deareador. Los mismos no forman parte de ningún lazo de control pero con los cuales se realizó la toma de datos para realizar la identificación experimental, para la que se tuvo en cuenta el flujómetro y la válvula de control a la entrada del deareador, el cambio en el nivel se puede observar en el cuarto de control de calderas donde existe un SCADA. La toma de datos se realizó cada 40 segundos, accionado la válvula se puede apreciar los cambios en el flujo de alimentación y en el panel de control el cambio de nivel en el deareador.

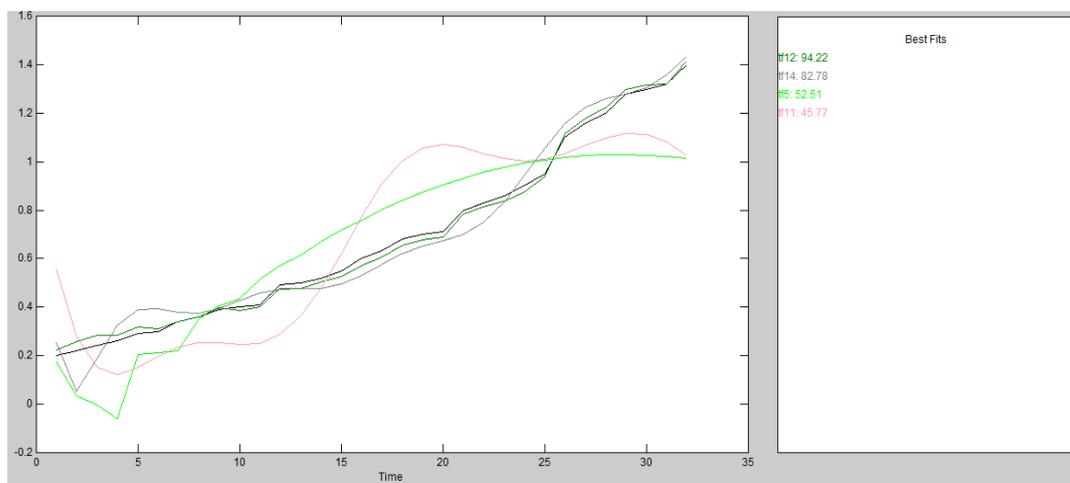


Figura 2.13 Ajuste obtenido del procesamiento de datos del deareador

Se realizó la estimación del sistema como si fuera de primer orden una ganancia en el numerador y un polo en el denominador, para el cual se obtuvo un ajuste del 45.77 %, que se considerada muy pobre, después se estimó suponiendo un sistema también de primer orden, 1 polos en el denominador, con 1 cero en el numerador, para el cual se obtuvo un mejor ajuste del 52.51 %, lo que es considerada pobre porque es inferior al 50 %. Seguidamente se realizó el ajuste considerando al sistema de segundo orden con 2 polos y una ganancia en el numerador para el que se obtuvo un ajuste de 94.22%, con 3 polos y 2 ceros el ajuste fue de un 82.78% (ver anexo 4). Por lo que se tomó el ajuste más alto el cual describe mejor la dinámica del proceso tomando como entrada el flujo de alimentación y como variable controlada el nivel en el deareador:

$$\frac{Nd(s)}{Fa(s)} = \frac{0.021}{54.28s^2 + 10.67s + 0.83}$$

2.2.1. Estrategias de control en el deareador

Transmisor de nivel

La ecuación 2.3 describe la función de transferencia del transmisor de nivel, el mismo tiene un rango de entrada de 0.3 – 20 m y el de salida es de 4 – 20 mA. La ganancia de transmisor es una relación entre las variaciones de corriente de salida y las variaciones de nivel en la entrada como se observa en la ecuación 2.5

$$G_{TN}(s) = \frac{K_n}{T_n s + 1} \quad (2.3)$$

$$\Delta I = K_n * \Delta H \quad (2.4)$$

$$K_n = \frac{\Delta I}{\Delta H} = \frac{I_f - I_i}{H_f - H_i} = \frac{20mA - 4mA}{20m - 0.3m} = 0.8 \frac{mA}{m} \quad (2.5)$$

Transmisor de flujo

La ecuación 2.7 describe la función de transferencia del transmisor de flujo, el mismo tiene un rango de entrada de 0 – 200 m^3/h y el de salida es de 4 – 20 mA . La ganancia de transmisor es una relación entre las variaciones de corriente de salida y las variaciones de flujo en la entrada como se observa en la ecuación 2.9

$$G_{TF}(s) = \frac{K_f}{T_f s + 1} \quad (2.7)$$

$$\Delta I = K_f * \Delta F \quad (2.8)$$

$$K_f = \frac{\Delta I}{\Delta F} = \frac{I_f - I_i}{F_f - F_i} = \frac{20mA - 4mA}{200m^3/h} = 0.08 \frac{mA}{m^3/h} \quad (2.9)$$

Función de transferencia de la válvula

La ecuación 2.11 describe la función de transferencia de la válvula del lazo interno, donde K_v es la ganancia de la válvula, la cual depende del flujo máximo que puede circular por la misma y de la variación de las caídas de presión.

$$G_v = \frac{K_v}{T_v s + 1}, \quad T_v = 543 \text{ ms por datos del fabricante} \quad (2.11)$$

$$K_v = \frac{Q_{max}}{\Delta P} = \frac{0.02m^3/h}{1Kgf/cm^2 - 0.2Kgf/cm^2} = 0.025 \frac{m^3/h}{Kgf/cm^2} \quad (2.12)$$

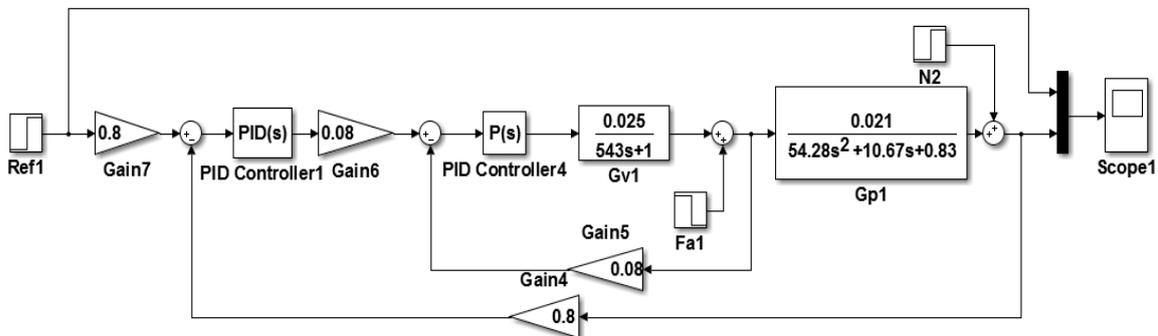


Figura 2.14 Control en cascada propuesto en el deareador

2.2.2. Ajuste de los controladores

Lo primero que se hizo fue definir el modelo del elemento de acción final y del proceso, es decir su función de transferencia en el espacio de trabajo del MATLAB. Una vez que se tiene el modelo matemático del proceso y del elemento de acción final en el espacio de trabajo se comienza a utilizar el sisotool.

Una vez abierto el mismo se selecciona la ventana de control y estimación, luego se selecciona la pestaña arquitectura, desde aquí se puede acceder al cuadro de diálogo Control Architecture (ver figura 2.15), donde se elige la estructura correspondiente al control en cascada, seguidamente se importan los modelos matemáticos del elemento de acción final y del proceso hacia el sistema, a continuación se selecciona la pestaña Automated Tuning (Sintonización automática), en esta se escoge el método de diseño PID Tuning(Sintonización PID).

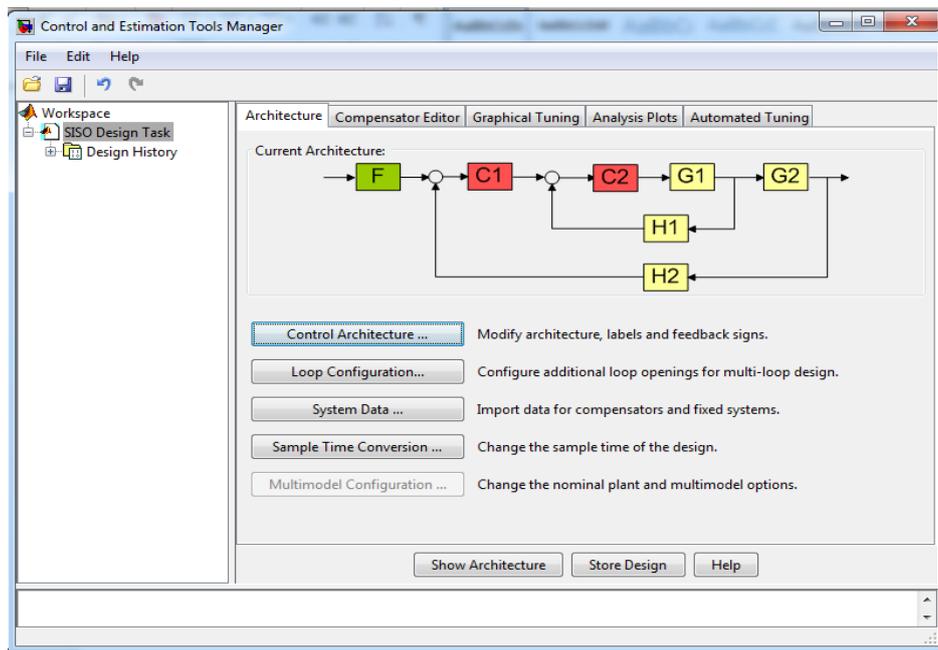


Figura 2.15 Toolbox de MatLab Sisotool

Una vez creado en el espacio de trabajo las funciones de transferencia se procede a escoger los métodos de ajuste de los controladores (ver figura 2.16) partiendo de que el lazo interno está formado por un controlador P y el externo por un controlador PID.

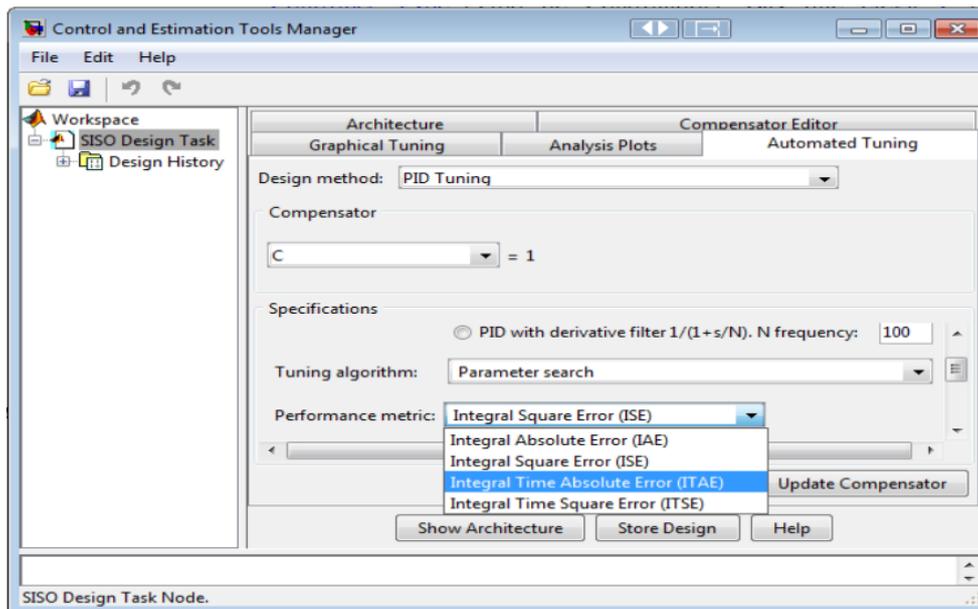


Figura 2.16 Criterios de ajuste para el controlador

Métodos seleccionados para el ajuste de los controladores

Los parámetros del controlador en su forma características son mostrados una vez ajustado este, en la ventana del Sisotool en la forma:

$$G_c(s) = K_p(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s})$$

Tabla 1. Parámetros de los controladores.

Tipo de Ajuste	Controlador Primario	Controlador Secundario
IAE	K _p =35.03537147939 T _i (s)= 0.106732165 T _d (s)= 42.24414534	K _p =543.4256256
ITAE	K _p =57.03537147939 T _i (s)= 0.104288795235 T _d (s)= 34.585898	K _p =876.0997968

Una vez que se ajustan los controladores por los métodos ITAE (línea azul) e IAE (línea roja) como se puede observar en la figura 2.17, se puede apreciar que el controlador que mejor responde es el que se ajustó por el método ITAE el cual

presenta menor máximo de sobrepaso y alcanza la estabilidad más rápida con respecto al que se ajustó por IAE.

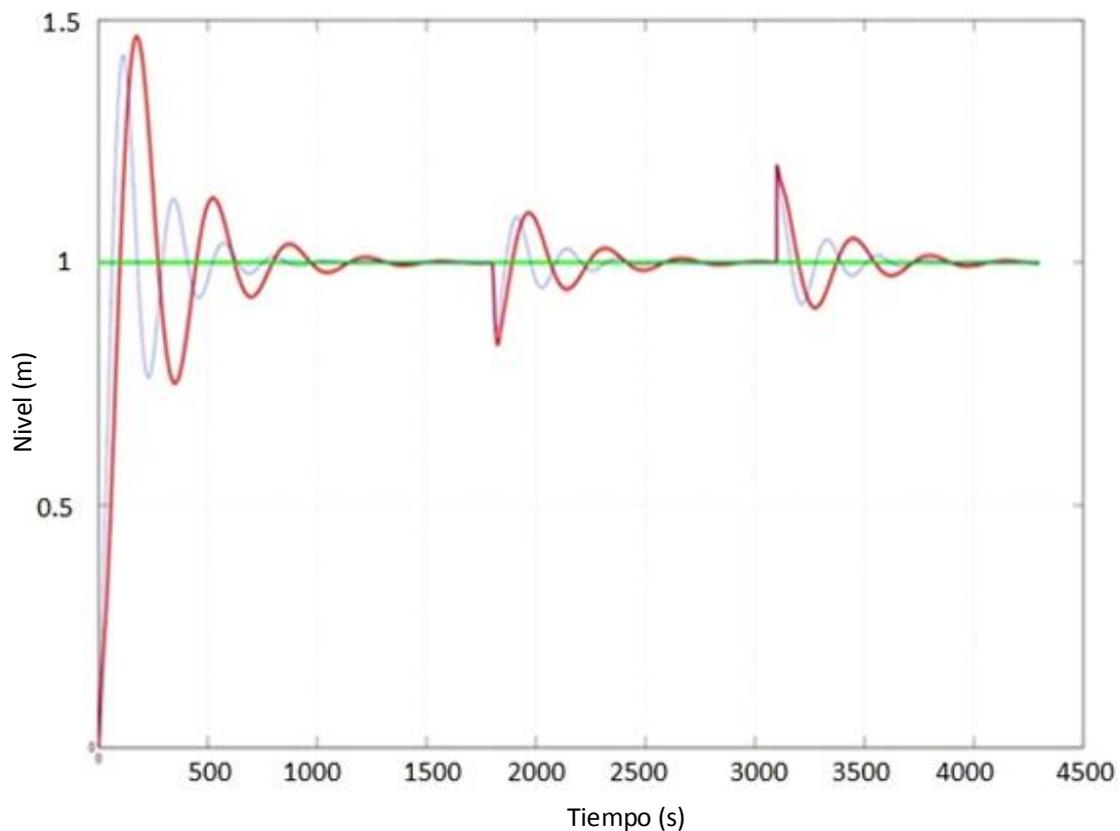


Figura 2.17 Respuesta del sistema ante perturbaciones en el flujo y en el nivel

En la figura se muestra la respuesta del sistema ante perturbaciones (y sin perturbaciones, ver anexo 6) debido a cambios en el flujo de entrada, el cual afecta directamente al nivel, debido a caídas de presión en la válvula que alimenta al deareador por posibles obstrucciones por incrustaciones en el cuerpo de la misma, la perturbación a los 1800 segundos muestra como es afectado el nivel el cual tiende a disminuir pero después de 1200 segundos este alcanza la referencia que con anterioridad fue fijada.

A continuación a los 3100 segundos se produce otra perturbación la cual puede interpretarse como un aumento del nivel del deareador debido a un posible fallo en la bomba a la salida del deareador, el nivel tiende a aumentar pero al cabo de los 4300 este se estabiliza y alcanza la referencia de nivel que fue fijada.

2.3. Arquitectura propuesta del sistema de control

En la figura 2.18 se muestra la pirámide de automatización hasta nivel de control en la que seguidamente se describirá la instrumentación a emplear.

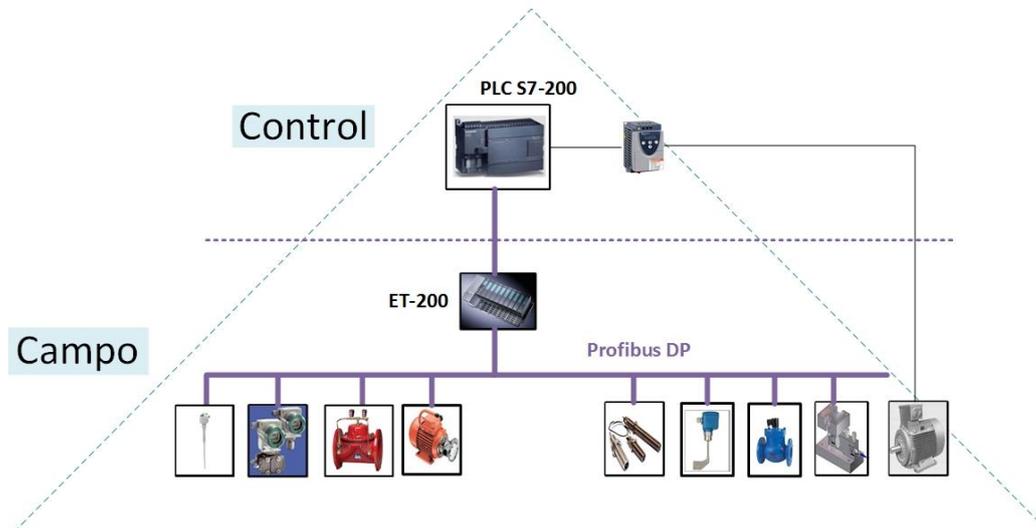


Figura 2.18 Arquitectura de control propuesta

2.4. Selección de componentes para el diseño del sistema de control

El sistema de medición y control automático de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería debe tener una alta disponibilidad para trabajar durante las 24 horas de los 365 días del año de forma ininterrumpida, por lo que la arquitectura de control debe presentar características tales como:

- Escalabilidad: Implica la posibilidad de ampliarlo sin dificultades sin que esto signifique algún perjuicio para la estructura preinstalada.
- Apertura: Software y hardware que permitan interconexiones de distintos proveedores.
- Concurrencia: Básicamente que se pueda realizar rutinas de control simultáneamente en toda la planta.
- Tolerancia a fallos, con la inclusión de redundancia de comunicación y operativo de modo que ni el control ni la comunicación entre equipos fallen o reduciendo al mínimo esta posibilidad.

Para el diseño del sistema de instrumentación se utilizará el sistema PROFIBUS-DP como bus de campo y en particular la estación de periferia descentralizada ET 200S. También serán utilizados módulos de interfaz IM 151-1 para la conexión entre el bus y la estación y un módulo de interfaz IM 151-7 CPU.

PROFIBUS DP

PROFIBUS DP (Decentralized Periphery): Este bus está diseñado para la comunicación de datos a alta velocidad a nivel de dispositivo. Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCs) o terminales. Los controladores centrales (PLCs/PCs) se comunican con los dispositivos de campo distribuidos por medio de un enlace serie de alta velocidad. Profibus tiene, conforme al estándar, varias tecnologías de transmisión, que son identificadas como: el medio físico RS – 485 o fibra óptica. Requiere menos de 2 ms para transmitir 1 Kbyte de entrada y salida y es muy usado en controles con tiempo crítico [] y la RS-485 IS. Las versiones IS son intrínsecamente seguras, utilizadas en zonas peligrosas (explosivas). Tiene una distancia de alcance máximo de 1.2 Km con una velocidad de 9.6 Kbit/s. [12]

Unas de sus ventajas que da la posibilidad de conexiones sencillas y baratas.

Controladores Lógicos Programables. S7-200

El autómata que se emplea es el SIMATIC S7-200 de Siemens (ver figura 2.19), ya que es un PLC compacto y potente, rápido, y que ofrece una conectividad extraordinaria y todo tipo de facilidades en el manejo del software y del hardware. Éste trabaja a su vez en tres lenguajes: el FUP (FBD), KOP (LD) y AWL (IL), por su sencillez y familiaridad el lenguaje más utilizado es el KOP (LD) o lenguaje de contacto. [10]

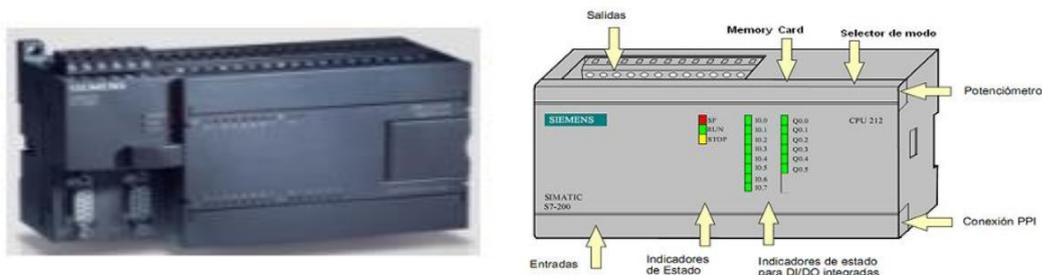


Figura 2.19 PLC S7-200

Comunicación:

- Puerto estándar RS-485 con velocidad de transferencia de datos comprendida entre 1.2 y 187.5 *kbits/s*
- Protocolo PPI en calidad de bus del sistema para interconexión sin problemas.
- Modo libremente programable con protocolos personalizados para comunicación con cualquier equipo

Estación de periferia descentralizada SIMATIC ET 200-S

Es el sistema de periferia multifuncional y modular al bit en grado de protección IP20 (ver figura 2.20) que es exactamente adaptable a la tarea de automatización. Gracias a su robusto diseño puede aplicarse también en presencia de esfuerzos mecánicos elevados. La conexión a los sistemas de bus PROFIBUS y/o PROFINET se realiza a través de módulos de interfaz al efecto. Los módulos de interfaz con CPU integrada trasladan la potencia de cálculo de una CPU directamente a la estación de E/S distribuidas. Con ello se descarga al PLC central y son posibles reacciones más rápidas a señales de tiempo crítico. [19]

Las soluciones de automatización descentralizadas no sólo comprenden con frecuencia señales digitales y analógicas sino también funciones tecnológicas, arrancadores de motor, convertidores de frecuencia o elementos neumáticos.



Figura 2.20 SIMATIC ET-200S

CPU 6ES7151-0AB0 7AA11

La CPU utilizada de la estación PROFIBUS ET-200S es 6ES7151-0AB0 7AA11 la cual requiere de una tarjeta de memoria para el micro: 6ES7953 de 64kb-4Mb. Esta permite la interfaz con la CPU IM 151-7, además posee una memoria de trabajo 64kB, tiene 244 bytes de entradas y 244 bytes de salidas, se le puede conectar 63 módulos electrónicos, además es compatible con PROFIBUS-DP.

Módulo de interfaz para la conexión a bus: IM 151-1

El módulo de interfaz sirve para conectar la ET 200S al sistema de bus, bien al probado bus de campo PROFIBUS o a PROFINET, estándar abierto Industrial Ethernet. Se encarga por completo del intercambio de datos con el maestro PROFIBUS DP.

Medición de nivel con Sitrans LR-200.

Este un instrumento de capacitancia de 2 hilos para medición continua de niveles que emplea una tecnología avanzada de pulsos de radar a una frecuencia de 5.8 GHz. El instrumento (ver figura 2.21) consiste en un componente electrónico acoplado a una antena la cual va conectada al proceso. La comunicación es a través de profibus DP y está disponible en dos versiones: de propósito general y de zonas intrínsecamente seguras. Este tipo de transmisor es empleado en numerosas aplicaciones en la que la medición de nivel es fundamental siendo una de ellas la medición de masas liquidas almacenadas [20].



Figura 2.21 Transmisor de nivel LR-200

Especificaciones técnicas:

- Rango de medición: 0.3m – 20m (1ft – 65ft)
- Fuente: batería de litio de 3V.
- Consumo: 10.5 mA (Propósito general o intrínsecamente segura)
- Temperatura ambiente: -40 – 120°C
- Precisión: 0.3m (1ft) $\pm 0.1\%$ del rango, o 10mm (4 in)
- Influencia de la temperatura ambiental: 0.006% / K
- Repetitividad: $\pm 5\text{mm}$ (2 in)
- Tiempo de respuesta: 1 segundo

Medición de flujo con SITRANS P, Serie DS III

El transmisor SITRANS P, Serie DS III (ver figura 2.22), mide de acuerdo a la variante la presión, la presión diferencial, la presión absoluta o el nivel de llenado de gases, vapores y líquidos agresivos y no agresivos, como también peligrosos. Otras magnitudes de medición como volumen, masa, caudal volumétrico y caudal de masa pueden deducirse de la magnitud "presión" a través de especificaciones de parámetros. La señal de salida es una corriente continua, independiente de la carga, de 4 hasta 20 mA. [21]



Figura 2.22 Transmisor SITRANS P

Características

Señal de salida: 4-20 mA

Alimentación: 24 V

Límite inferior (ajustable sin escalones): 3,55 mA, ajustado en fábrica a 3,84 mA

Límite superior (ajustable sin escalones): 23 mA, ajustado en fábrica a 20.5 mA u opcionalmente a 22.0 mA.

Sensor de peso SWB505 MultiMount.

Las células de carga son transductores que convierten una magnitud mecánica en este caso el peso en una señal eléctrica. El elemento básico es un cuerpo elástico especial, instrumentado con galgas extensométricas. Estas están hechas con un material aislante fino que lleva integrada una capa resistiva. Bajo el efecto del peso F , el cuerpo elástico y, por lo tanto, también la galga extensométrica sufren una deformación. Al modificarse la forma exterior de la galga, también se modifica la resistividad óhmica de su conductor. [22]

El sensor de peso SWB505 MultiMount, ofrecen una estructura robusta y numerosas características para una instalación fácil y un pesaje en depósito fiable.

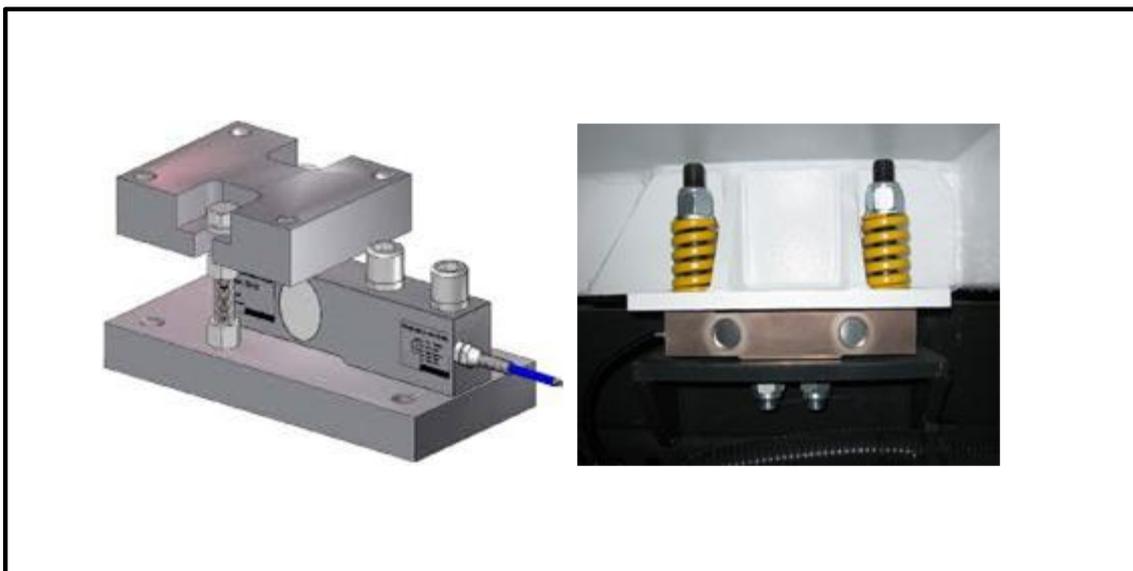


Figura 2.23 Sensor de peso SWB505 MultiMount.

Características de SWB505:

- Protección integrada contra levantamiento
- Tope de seguridad contra caídas verticales
- Comprobación completa integrada de 360°
- Rango de capacidad: 5 kg – 4.4 t

Sensor de paletas giratorias SST

El Sensor Interruptor de Posición (figura 2.24) para medición de nivel On/Off en Silos de almacenamiento para indicarle al PLC el estado de los Silos (Con o Sin material). Detecta la presencia o ausencia de sólidos secos a granel. Este dispositivo se utiliza para monitorizar productos como grano, alimentos, cemento, gránulos de plástico y virutas de madera. Estos tipos de sensores son utilizados para el control de nivel en depósitos que contienen materiales en polvo o granulados. [22]



Figura 2.24 Sensor de paleta giratoria

Funcionamiento:

Un pequeño motor síncrono, que gira a baja velocidad, arrastra una hélice instalada dentro del depósito a controlar. En ausencia de material el motorcito está bajo tensión y la hélice gira. La presencia de material alrededor de la hélice frena la rotación provocando el intercambio de los contactos de mando; un segundo microinterruptor desconecta la alimentación del motorcito. La abertura o el cierre del circuito eléctrico determinan el nivel específico dentro del depósito.

Características generales:

- Cuerpo de aluminio: ejecución hermética para su funcionamiento aún al aire libre.
- Protección contra polvo del depósito.

- Vástago de acero inoxidable, montado sobre cojinetes herméticos.
- Hélice de aluminio.
- Largo del vástago estándar: 500 y 1000mm.
- Alimentación: 24VAC, 110VAC, 230VAC.

Sensor de proximidad inductivo PICK UP

Los sensores de proximidad inductivos son equipos electrónicos capaces de detectar la aproximación de algún elemento metálico (figura 2.25). La detección ocurre sin contacto físico entre accionador y sensor, aumentando la vida útil del sensor por no poseer piezas móviles sujetas a desgastes mecánicos. Sin embargo, su alcance es del orden de milímetros. Este sensor fue escogido porque es más económico que un tacómetro y su principio de funcionamiento es similar al de un encoders. [22]



Figura 2.25 Sensor de proximidad PICK UP

Principio de funcionamiento: Su funcionamiento se basa en una bobina que genera un campo electromagnético de alta frecuencia que se altera en presencia de un metal, modificando el estado de la salida de 0 para 1 encendiendo un LED (Diodo Emisor de Luz) indicador.

Distancia de accionamiento (mm): Es la distancia entre el metal y el sensor para que haya cambio de estado de la salida. Esta distancia no debe rebasar los 5mm.

Elementos de acción final

Válvula Solenoide:

Este tipo de válvulas son controladas variando la corriente que circula a través de un solenoide (conductor ubicado alrededor de un émbolo, en forma de bobina). Esta corriente, al circular por el solenoide, genera un campo magnético que atrae un émbolo móvil (figura 2.26). Por lo general estas válvulas operan de forma completamente abierta o completamente cerrada. Al finalizar el efecto del campo magnético, el émbolo vuelve a su posición por efecto de la gravedad, un resorte o por presión del fluido a controlar. El solenoide, bajo el efecto de la corriente circulante, se comporta como un electroimán. [22]



Figura 2.26 Válvula solenoide.

Válvulas controladas por PLC de la serie 100 de Dorot

La válvula es controlada por un controlador PLC (figura 2.27) que permite el control local o a distancia de las distintas funciones, por ejemplo, tiempo de cada operación, caudal y/o distintos parámetros de control condicionados (automáticamente modificados) en varias aplicaciones. [23]



Figura 2.27 Válvula de la serie 100 de Dorot

Características

- Puede ejecutar cualquier función de control
- Control electrónico sumamente exacto y confiable
- Actuación a baja corriente
- Diseño simple y confiable

Especificaciones

La válvula será hidráulica de cierre directo por diafragma, la cual permite mantenimiento en línea. No habrá ejes, juntas o cojinetes situados en el paso del agua. La válvula es activada por la presión en la línea o por una presión externa hidráulica o neumática. La posición de la válvula estará determinada por un juego de dos válvulas solenoides controladas a su vez por un Controlador PLC. La válvula y los accesorios serán de la Serie 100 de Dorot o similares a ésta en todos sus aspectos

Ventajas

- Ligera de peso, compacta, bajo costo.
- Requiere poco mantenimiento.
- Número mínimo de piezas móviles.
- No tiene bolas o cavidades, posee alta capacidad.
- Circulación en línea recta, se limpia por si sola.

Variador de velocidad ATV 31

El Variador de Velocidad es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores (figura 2.28). Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua también puede ser designada como variador de velocidad.

Motivos para emplear variadores de velocidad

El control de procesos y el ahorro de la energía son dos de las principales razones para el empleo de variadores de velocidad. Históricamente, los variadores de velocidad fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero.



Figura 2.28 Variador de velocidad ATV

Para la selección de variadores de velocidad solo hay que tener en cuenta los parámetros del motor y en dependencia de estos existen catálogos para los que se le corresponden el variador correspondiente o uno que mejor se ajuste al motor.

Características del variador de velocidad

- Entrada analógica 0 + 10 V (tensión segura máxima 30 V)
- Resolución 0,01 V, conversor de 10 bits.
- Precisión $\pm 4,3\%$, linealidad $\pm 0,2\%$, de valor máximo.
- Entrada analógica bipolar 0 \pm 10 V (tensión segura máxima ± 30 V).
- Salida analógica de 0 a 10 V, impedancia de carga mínima 470 Ω o salida analógica X - Y mA, X e Y pueden programarse de 0 a 20 mA, impedancia de carga máxima 800 Ω .
- Alimentación para entrada lógica: + 24 V protegido contra cortocircuitos y sobrecargas, mínimo 19 V, máximo 30 V.

2.5. Programación del PLC para cumplir con las estrategias de control

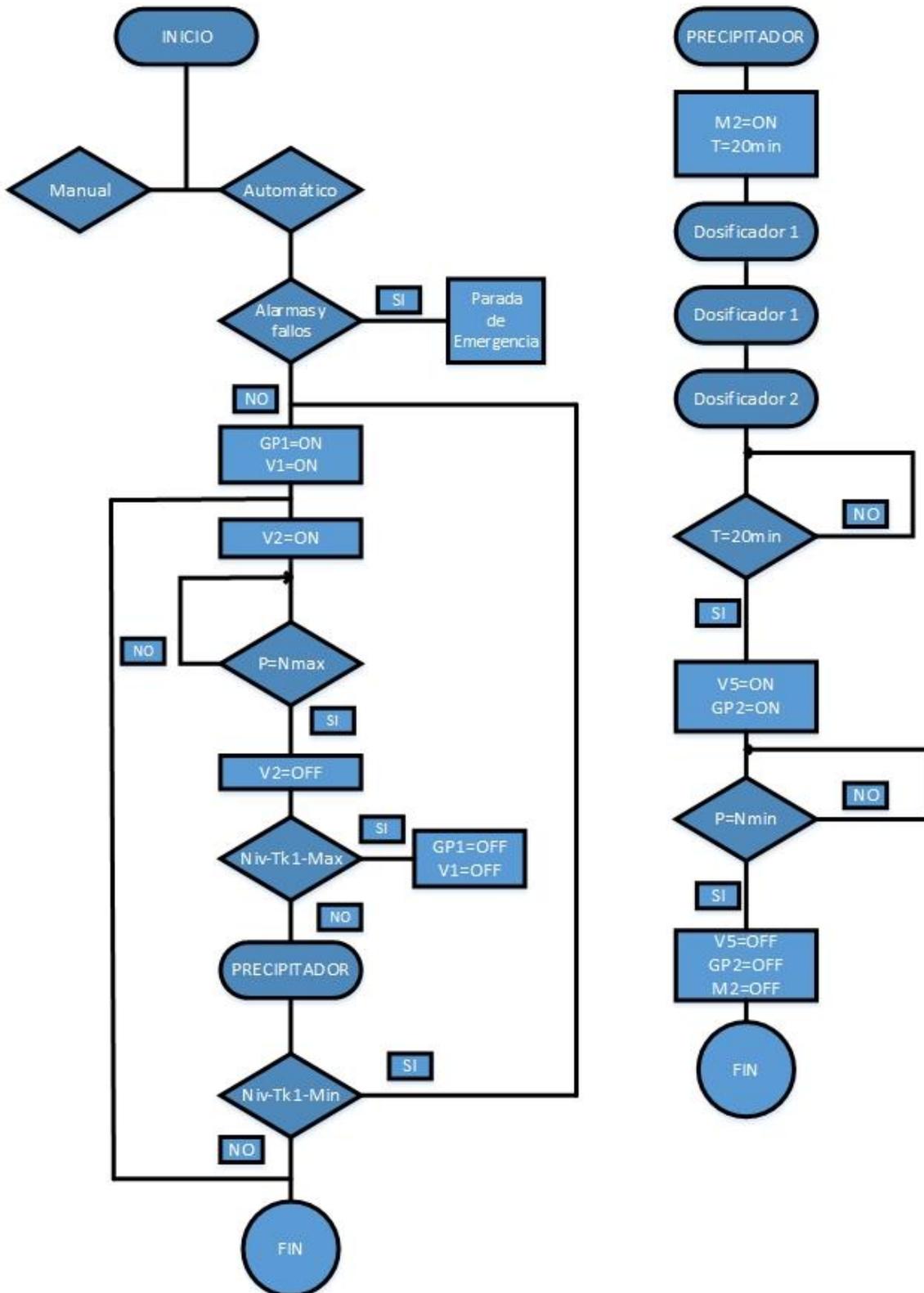


Figura 2.29 Algoritmo de programación del PLC

El proceso de dosificación queda resumido en el siguiente diagrama de flujo, recordar que existe una segunda dosificación (ver anexo 7).

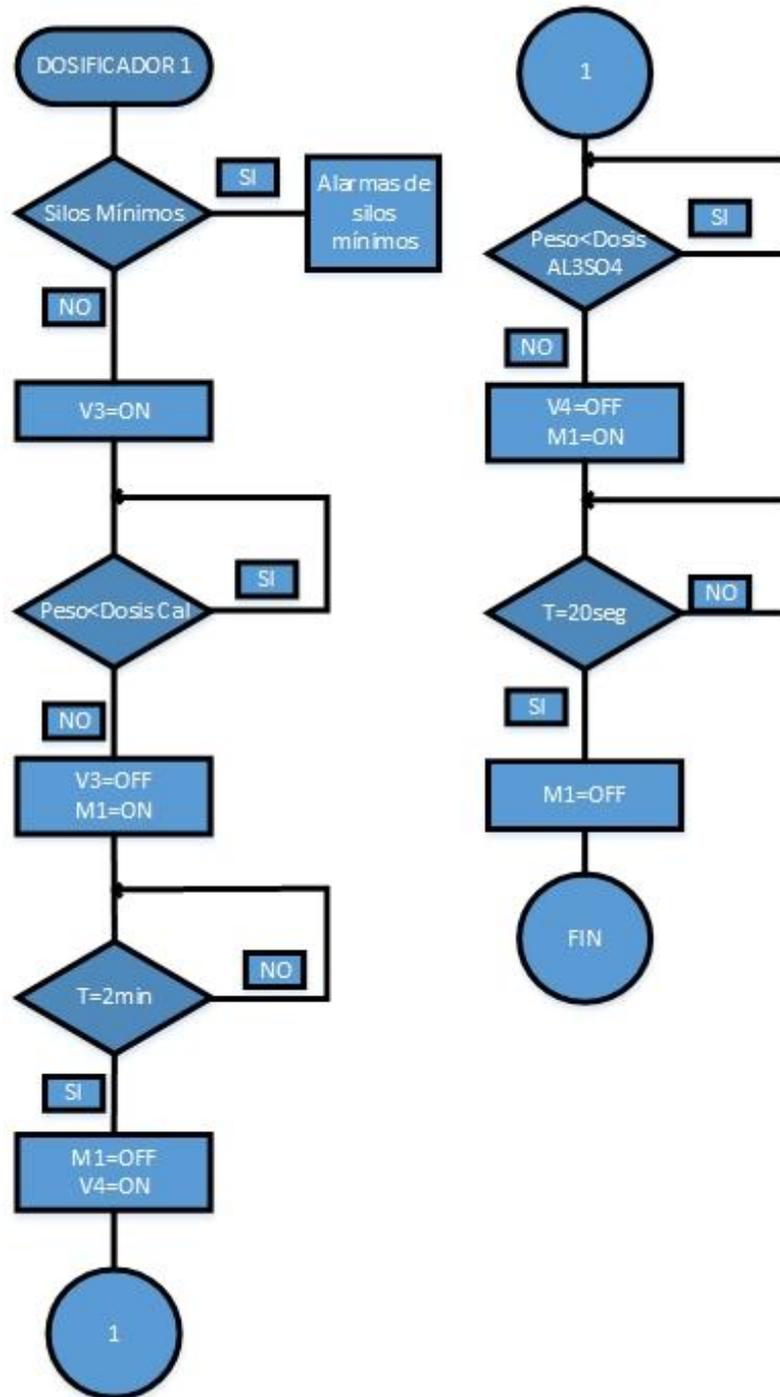


Figura 2.30 Algoritmo de programación del PLC. Continuación

2.6. Explicación del diagrama funcional para programación de control

La programación del PLC debe ser implementada en el software correspondiente al mismo siguiendo una lógica secuencial, la misma debe contener varias secciones de trabajo que funcionan de la siguiente forma:

- Describir todas las principales acciones que se deben de realizar ante una parada de emergencia, por ejemplo, apagar todas las bombas en funcionamiento, cerrar las válvulas instaladas.
- Indicar la ocurrencia de fallo de comunicación entra cada canal de los módulos de entradas y salidas, y los dispositivos de campo asociados.
- Mostrar las alarmas, comparando las mediciones tomadas del proceso con los umbrales de alarmas fijados.
- En la parte de control se describe el funcionamiento de los lazos de control de velocidad y nivel.

A continuación se muestra la lógica a seguir por el programador para dar cumplimiento al control automático según el modo de operación de la planta, teniendo en cuenta los lazos de control, como el accionamiento de las bombas, el agitador, y las válvulas.

En el flujo productivo la primera observación que hay que hacer es determinar en qué modo se operará la planta, el modo manual o el automático. Si se opera en modo manual los operadores serán encargados de controlar el flujo productivo. En caso que se seleccione el modo automático, partiendo de la figura 1.1, inicialmente se comprobará que los actuadores estén apagados, luego se fijan las referencias de nivel máximo y mínimo correspondiente al tanque de alimentación, el precipitador y el deareador, se fijan las velocidades de la estera, que deposita en el precipitador las materias primas para el tratamiento de agua, en dependencia del peso que sea depositado en la misma.

La primera acción que se realiza después de comprobar estos requisitos es poner en marcha la bomba GP1, las válvulas V1 y V2 inicialmente se encuentran abiertas. La válvula V2 se encontrará depositando el agua en el precipitador en caída libre hasta que en el precipitador se active la alarma de nivel alto, una vez que esto ocurra, esta se cerrará automáticamente.

Seguidamente se cuestionará por el nivel en el tanque de alimentación ya que V2 está cerrada, que una vez que esté en el nivel máximo se apagará la bomba y se cerrará V1. Después de ocurrida estas acciones ya el precipitador está en su nivel máximo y se procederá a la etapa de dosificación. La primera acción que se realiza es poner en marcha el agitador M2 durante 20 minutos, el cual debe mezclar los productos que serán agregados al precipitador a una velocidad constante para evitar un aumento de la turbidez del agua.

Para el proceso de dosificación lo primero que se comprueba es que las tolvas que almacenan la cal y el sulfato de aluminio no esten vacías, esta acción se realiza preguntando por el estado de S5, si las tolvas están en el mínimo de almacenamiento se activará la alarma correspondiente. Si todo está en orden se accionará la válvula V3 la cual deposita 75 Kg de cal que son censados por S4 y comparados con una referencia que previamente fue fijada. Cuando el peso alcance los 75 Kg, V3 se cierra y se accionará el motor M1 que mueve la estera a una velocidad de 1376 rpm durante 2 minutos, una vez depositada la cal en el precipitador, M1 es apagado para entonces accionar V4 que deposita 5 Kg de sulfato de aluminio que una vez censado el peso y comparado con la referencia V4 se cierra y M1 se activa a una velocidad de 1725 rpm, como la carga es menor se desplazará la estera más rápido, todo esto ocurre en tan solo 20 segundos que una vez transcurridos, M1 se apaga. La dosificación de cal y sulfato es cada 100 m³ de agua en el precipitador, como la capacidad de este es de 250 m³ se dosifica dos veces y una tercera (ver anexo 7), lo que la dosis es de 37.5 Kg de cal y 2.5 de sulfato, los tiempos de accionamiento del motor varían en 1 minuto y 10 segundos respectivamente.

Ya con los productos en el mezclador estos se disuelven casi en su totalidad con la puesta en marcha de M2 durante un periodo de 20 minutos, transcurrido este tiempo V5 y todas las válvulas correspondientes al proceso de filtrado y ablandamiento desde V6 hasta V19 son accionadas las cuales están normalmente abiertas y GP2 comienza a bombear el agua tratada hacia los filtros y los ablandadores. Considerar que en el caso de que ocurra una caída de presión a la salida de los filtro, censadas por S7, S8, S9, debe de activarse una alarma, que le indique al operador de los filtro necesitan ser atendidos.

Cuando el precipitador este en el nivel mínimo, V2 se accionará para llenar otra vez el precipitador, en caso de que el tanque de alimentación estuviese en el mínimo GP1, V1, y V2 se accionarían.

Seguidamente es accionada V20 (ver anexo 8) que se encuentra a la entrada del deareador la cual también esta normalmente abierta, el deareador cuenta con un sistema de alarma de nivel máximo y mínimo en caso de que este aumente o disminuya bruscamente. La bomba GP3 y la V21 a la salida son activadas una vez que se alcance la referencia de nivel fijada.

Actuadores:

GP1: Bomba de alimentación.

GP2: Bomba de alimentación hacia el proceso de filtrado.

GP3: Bomba de alimentación de calderas.

M1: Motor de la estera.

M2: Motor agitador del precipitador.

V1: Válvula a la entrada del tanque de alimentado de la serie Dorot.

V2: Válvula a la salida del tanque de alimentado de la serie Dorot.

V3: Electroválvula en la tolva de cal

V4: Electroválvula en la tolva de sulfato de aluminio.

V5: Válvula de salida del precipitador de la serie Dorot.

V6, V8, V10: Válvulas de entrada a los filtros de la serie Dorot.

V7, V9, V11: Válvulas de salida a los filtros de la serie Dorot.

V12, V13, V14, V15: Válvula de entrada a los ablandadores de la serie Dorot.

V16, V17, V17, V19: Válvula de salida de los ablandadores de la serie Dorot.

V20: Válvula de entrada al deareador de la serie Dorot.

V21: Válvula de salida al deareador de la serie Dorot.

Sensores

S1: Sensor de nivel del tanque de alimentado LR-200.

S2: Sensor transmisor de flujo a la salida del tanque de alimentado SITRANS P.

S3: Sensor de velocidad de la estera Pick Up.

S4: Sensor de peso SWB505 MultiMount

S5: Sensor de nivel en las tolvas SST

S6: Sensor de nivel del precipitador LR-200

S7, S8, S9: Sensor transmisor de presión a la salida de los filtros SITRANS P.

S10: Sensor transmisor de flujo a la entrada del deareador SITRANS P.

S11: Sensor de nivel en el deareador LR-200

Flujo tecnológico de la planta con la instrumentación propuesta

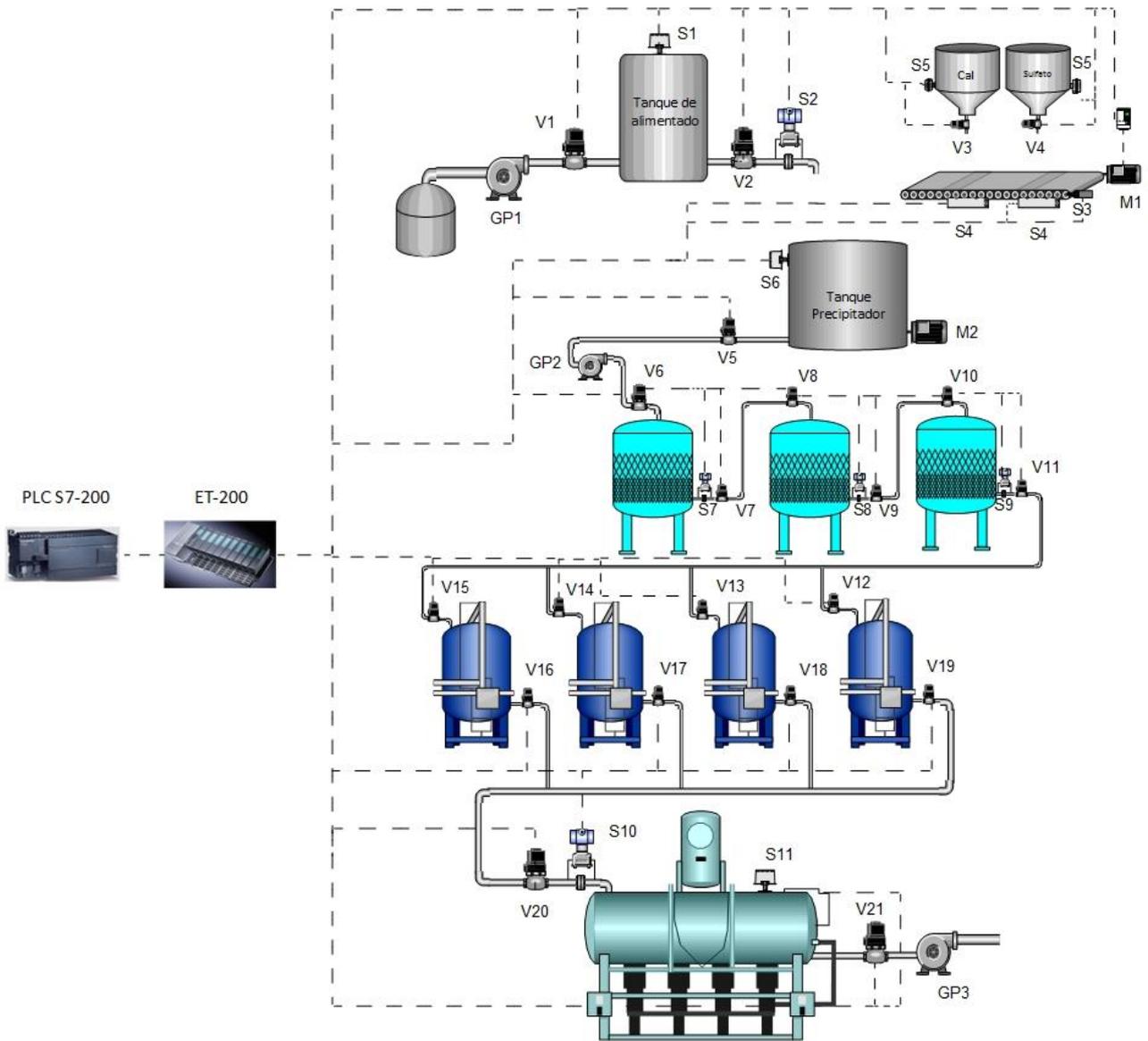


Figura 2.31 Flujo tecnológico de la planta con la instrumentación propuesta

Conclusiones del capítulo

- En este capítulo se describen las estrategias de control desarrolladas para la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería Hermanos Díaz.
- Se desarrollan los lazos de control correspondientes en los procesos de dosificación y deaeración con el fin de resolver las deficiencias de control que actualmente existen en la planta.
- Mediante el método de identificación experimental se obtuvieron los modelos correspondientes de los procesos en cuestión.
- Con el empleo del software Matlab 2014 y algunas de sus herramientas como el PID Tuning y el Sisotool se ajustaron los controladores.
- Se realiza además una propuesta de instrumentación la cual debe responder con las especificaciones técnicas del lugar. Finalmente se diseñó un algoritmo de programación general del autómeta propuesto para el control.

Valoración económica

La rentabilidad de la Planta de Tratamiento de agua está basada en los gastos de producción dentro de los que se encuentran: los productos químicos, gastos por mantenimiento, pago del personal, e imprevistos.

La implementación de este proyecto representaría para la refinería una gran ventaja en cuanto a seguridad y ahorro, ya que se llevaría un control eficiente del tratamiento del agua. Las acciones de control aumentarían considerablemente su precisión, lo que significa una mejor productividad de la planta.

Tabla 2. Listado de precio de los instrumentos propuestos

Denominación	Cantidad	Precio(USD)	Total(USD)
PLC S7-200	1	4127.00	4127.00
SIMATIC ET-200S (Siemens)	1	1250.00	1250.00
Transmisor SITRANS P	2	923	1846
Válvula controlada por PLC	18	450	8100
Sensor inductivo Pick Up	1	358	358
Transmisor de nivel (líquido)	2	687	1374
Sensor de paletas giratorias	2	390	780
Variador de velocidad ATV31	1	932	932
Electroválvulas	2	128	256
Galgas	2	438	876
Platillo orificio	5	107	535
Total	37		20434.00

Esta inversión que se propone desarrollar es costosa, debido a la tecnología tan moderna que se desea implementar, contando con las ventajas que promete y

teniendo en cuenta que la refinería es una empresa de altos ingresos, este gasto se recuperará en un periodo corto de tiempo.

Esta propuesta es factible ya que realizando una valoración económica de esta inversión contra la situación actual, se evidencia que los valores de la misma serían amortizados fundamentalmente con la reducción del consumo de energía, aumento de la productividad y eficiencia del proceso; y con la mejora de la calidad del producto elaborado.

Impacto Medioambiental

La Planta de Tratamiento de agua de la refinería, de forma general no constituye una amenaza para el medio ambiente, pero hay que tener en cuenta que en alguno de los subprocesos se emplean sustancias químicas las cuales son perjudiciales para los obreros que trabajan en la planta. Dentro de estos productos se encuentran:

- Sulfato de aluminio: Este producto se hidroliza fácilmente y forma ácido sulfúrico el cual actúa en los tejidos irritándolos, particularmente los pulmones.
- Hidróxido de calcio: Tiene una reacción cáustica y por eso es irritante a la piel y vías respiratorias. Puede causar dermatitis, irritación de los ojos, membranas mucosas. Es contaminante del aire.
- Dióxido de carbono: Se considera un simple asfixiante. Los síntomas resultan sólo a altas concentraciones y cuando hay insuficiente oxígeno en la atmósfera. Los síntomas que proceden a la asfixia son dolor de cabeza, mareos, falta de aire, debilidad muscular, somnolencia y zumbido en los oídos.
- Sulfito de sodio: Tanto sólido como en solución tiene un peligro de acción corrosiva en todos los tejidos del cuerpo. Los síntomas de irritación son evidentes inmediatamente su acción corrosiva en los tejidos causa quemaduras frecuentemente o profunda ulceración dejando cicatrices.

Por lo antes señalado se hace de vital importancia tomar las medidas necesarias y contar con el material para tratar estos productos, para así evitar que ocurran accidentes por el incorrecto manejo de estas sustancias.

Conclusiones generales

- Mediante el contacto directo con los operadores de la planta se obtuvo una visión real del proceso, lo que permitió una mejor comprensión del mismo.
- Se realizó la identificación experimental para obtener los modelos dinámicos de los subprocesos de dosificación y deaeración de la Planta de Tratamiento de agua de la Refinería.
- Se proponen estrategias de control clásico para dar solución a las insuficiencias encontradas en los subprocesos.
- Con la simulación de las estrategias de control se obtienen resultados satisfactorios, lo que implica la factibilidad de su empleo en la planta.
- Se propone un nuevo equipamiento (debido al deterioro de los ya existentes) acorde a las exigencias de la planta con el propósito de mejorar la eficiencia productiva.
- Se propuso una arquitectura piramidal con periferia descentralizada basada en las tendencias actuales de automatización utilizando el bus de campo PROFIBUS DP, estación de periferia descentralizada y PLC, para lograr un sistema de medición y control de alta velocidad, fácil ampliación y mantenimiento.

Recomendaciones

1. Aplicar la estrategia de control propuesta junto con el montaje de la nueva instrumentación con el fin de mejorar el funcionamiento de la planta.
2. Realizar una modernización general, en medida de las posibilidades técnicas y económicas.
3. Desarrollar una estrategia de control para el control de temperatura en el deareador.
4. Implementar un sistema supervisorio para el proceso de tratamiento de agua.

Bibliografía

- [1] Ascencio, M. T. (2015). Tecnologías convecionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. Morelos, Mexico.
- [2] Gimenez, P. (2007). Tratamiento de agua para calderas. México DF.
- [3] Smith, L.J (2011). Manual de análisis de agua. Loveland, Colorado, Estados Unidos .
- [4] Reina, R. L. (2016). Problemas y tratamiento de agua de calderas. Bogotá, Colombia.
- [5] Aguedo, A. (2000). Temas de Identificación y Control Adaptable. Instituto de Cibernética, Matemática y Física. La Habana, Cuba.
- [6] Arafet, P. y. (2004). Monografía sobre identificación de sistemas. Santiago de Cuba.
- [7] Mendoza, M. R. (2014). Identificación de sistemas. Santiago de Cuba.
- [8] Ljung, L. (1987). System Identification: Theory for the user. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- [9] J.L., J. P. (2005). Sistemas de control distribuido. Rosario, Argentina.
- [10] Siemens. (10 de enero de 2017). PLC SIMATIC S7-200. Obtenido de <http://electricidadserrano.com>
- [11] Warne, M. L. (2003). Electrical Engineer's Reference book, Programmable Controller.
- [12] Pinto, H. K. (2015). Análisis del estado del arte de los buses de campo. Santiago de Chile.
- [13] Buses de campo. (2004). Universidad de Oviedo.
- [14] Zimmermann, Hubert (1980). Modelo OSI para sistemas abiertos con interconexión.
- [15] Cosco, J. G. (2007). Estrategias de control. Lima, Perú.
- [16] Smith, C. y. (1991). Control Automático de Procesos teoría y práctica. Primera Edición.
- [17] Stephanopoulos, G. (1983). Chemical Process Control. Prentice Hall.
- [18] Champagne, L.-A. D. (1994). Three-Phase Asynchronous Machine. Ecole de Technologie Superieure, Montreal.
- [19] Siemens. (2007). Estación de Periferia Descentralizada. Illinois, Estados Unidos.

- [20] Siemens. (junio de 2017). Transmisores de nivel LR-200. Obtenido de <http://www.siemens.com/processinstrumentation>
- [21] Siemens. (marzo de 2017). Transmisores de presión SITRANS P. Obtenido de <http://www.siemens.com/processinstrumentation>
- [22] Siemens. (junio de 2017). Sensores e Instrumentación de campo. Obtenido de <http://www.siemens.com/processinstrumentation>
- [23] Miya Company. (2010). Dorot control valves.

Anexos

Anexo 1. Parámetros del agua de alimentación

Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25 °C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

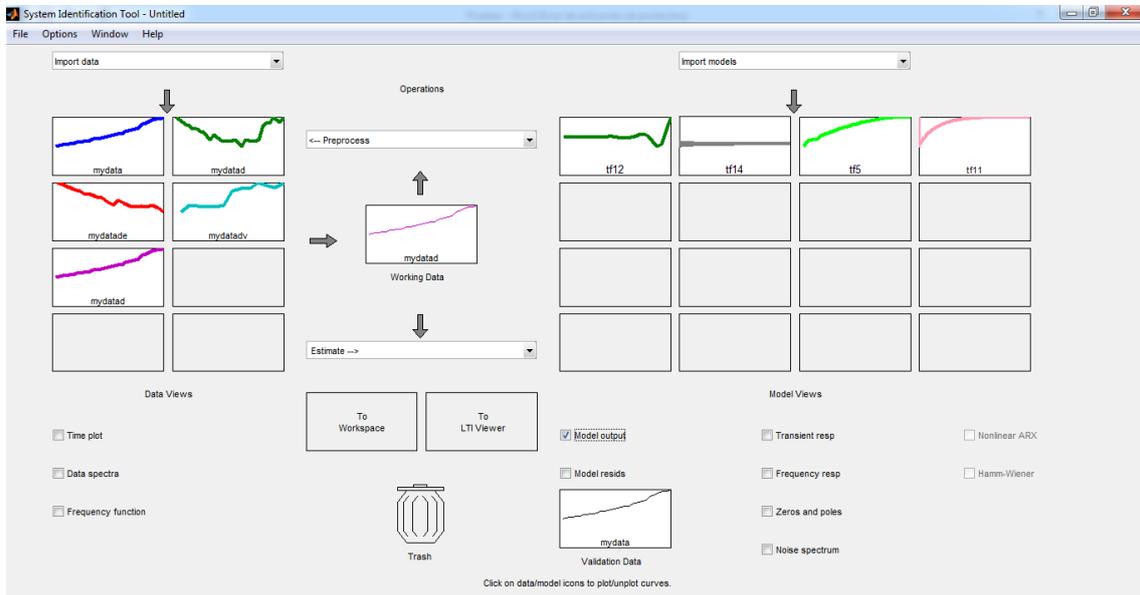
Anexo 2. Datos de chapa del motor que mueve la estera.

No.	Parámetros del motor	Valores
1	Alimentación trifásica	220 Vac
2	Potencia	1.8 kW
3	Velocidad nominal	1725 rpm
4	Corriente	8.3 A
5	Frecuencia de trabajo	60 Hz
6	Torque	12.27 N/m
7	Factor de potencia	87 %
8	Número de polos	2

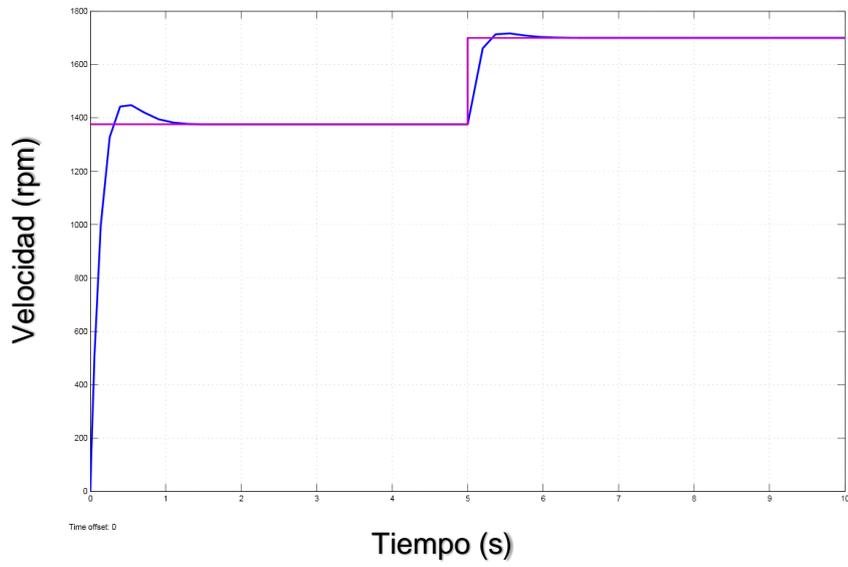
Anexo 3. Identificación en el subproceso de dosificación.



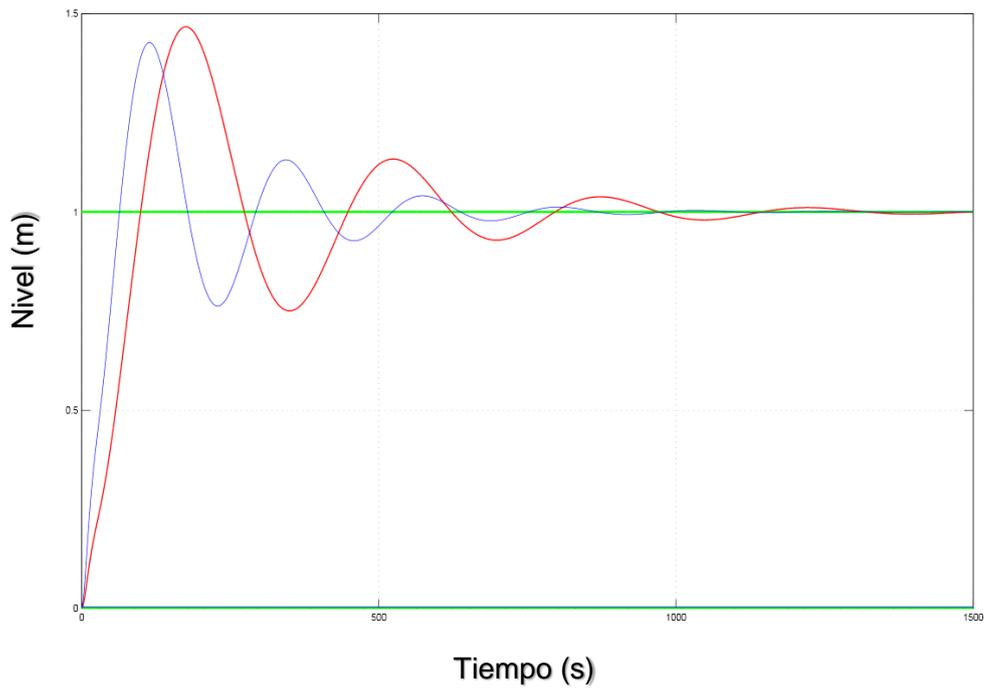
Anexo 4. Identificación en el subproceso del deareador.



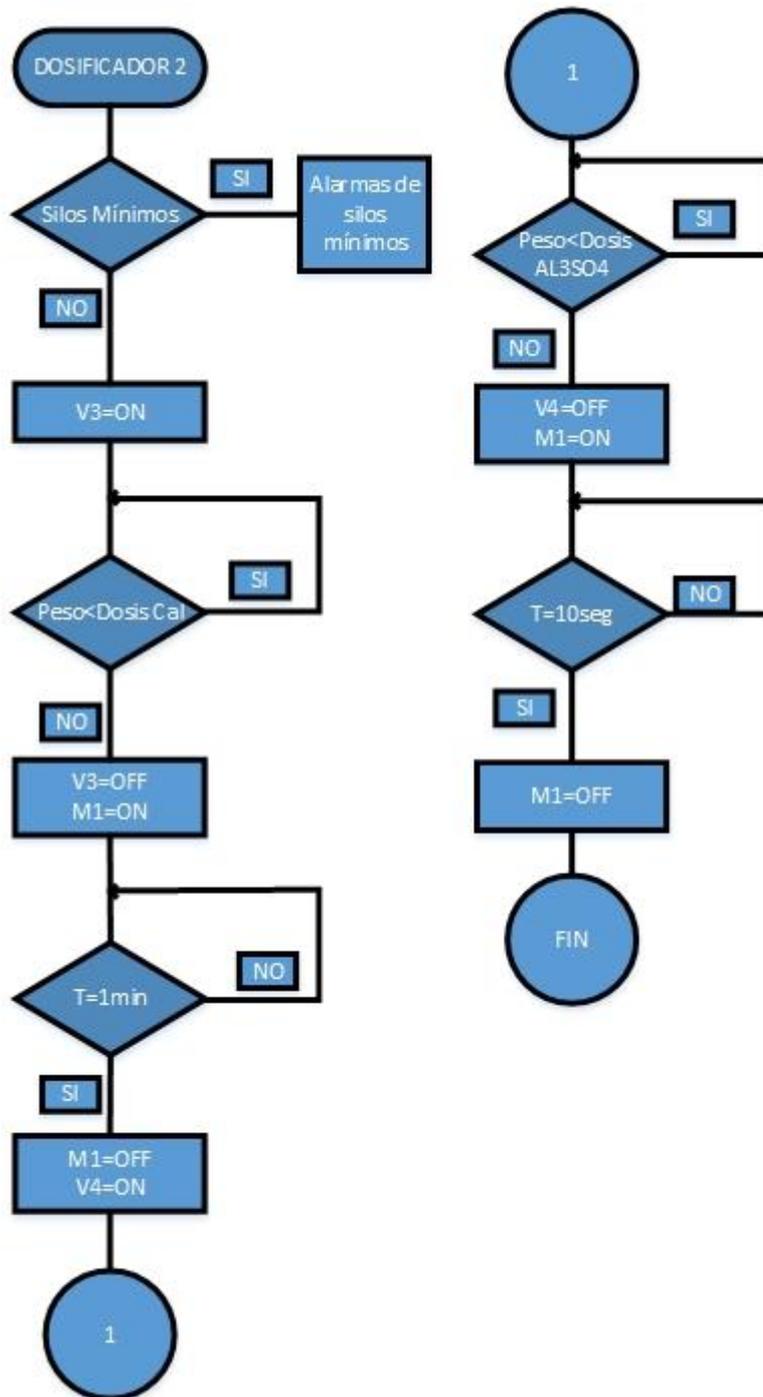
Anexo 5. Respuesta del sistema sin perturbación, subproceso de dosificación



Anexo 6. Respuesta del sistema sin perturbación, subproceso de deaeración por ITAE e IAE.



Anexo 7. Dosificación número dos al precipitador.



Anexo 8. Filtrado y deareación

