



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA**

Néstor Obdulio Alejandro Chamalé Chitic

Asesorado por el Ing. José Anibal Silva de los Angeles

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

NÉSTOR OBDULIO ALEJANDRO CHAMALÉ CHITIC
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ANIBAL SILVA DE LOS ANGELES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de Leon Rodriguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. María Magdalena Puente Romero
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de mayo de 2016.

Néstor Obdulio Alejandro Chamalé Chitic

Guatemala, 09 de agosto del 2016

Ing. Francisco González
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero González

Por medio de la presente informo a usted, que como asesor del Trabajo de Graduación del estudiante universitario **NÉSTOR OBDULIO ALEJANDRO CHAMALÉ CHITIC** quien se identifica con carné universitario No. **2008-18848**, procedí a revisar la tesis de cuatro capítulos, cuyo título es: **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA"**. El cual encuentro satisfactorio.

En tal virtud, **LA DOY POR APROBADA**, solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

JOSE ANIBAL SILVA DE LOS ANGELES
ING ELECTROTECNICO
Colegiado No. 5067

Ingeniero Anibal Silva de los Angeles
Colegiado Activo No. 5067



Ref. EIME 63. 2016.

Guatemala, 23 de SEPTIEMBRE 2016.

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL
PROCESO DE LAVADO DE CAÑA, del estudiante **Nestor**
Obdulio Alejandro Chamalé Chitic, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. **Carlos Eduardo Guzmán Salazar**
Coordinador Área Electrónica



STO



REF. EIME 63. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; NÉSTOR OBDULIO ALEJANDRO CHAMALÉ CHITIC titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 24 DE OCTUBRE 2016.

Universidad de San Carlos
De Guatemala

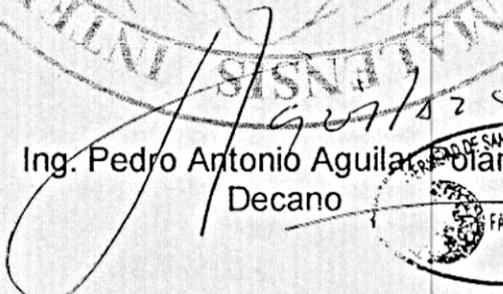


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.082.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICABLE EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CANA**, presentado por el estudiante universitario: **Néstor Obdulio Alejandro Chamalé Chitic**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por acompañarme en mi vida y darme sabiduría ayer, hoy y siempre.
Mis padres	Vicente Chamalé y Sandra Chitic, por su amor y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Luis, Sandra, Byron, Hamilton, Judit y Ana Chamalé, por su apoyo incondicional durante mi carrera.
Mi familia en general	Por su apoyo incondicional durante mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera,
entre otras cosas.

Facultad de Ingeniería

Por su importante formación académica.

Mis amigos

Brayan Obando, Byron Calderón, Evelyn
Monroy y Ernesto Cua, por su apoyo
incondicional durante la carrera.

Mi asesor

Por su apoyo y colaboración durante la
elaboración de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	1
1.1. Planta potabilizadora	2
1.2. Planta de osmosis inversa.....	3
1.3. Planta para agua residual.....	5
1.4. Planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña	7
2. VARIABLES DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	11
2.1. Condiciones actuales	11
2.1.1. Operación	15
2.1.2. Inspección.....	16
2.1.3. Mantenimiento	17
2.2. Variables de control.....	19
2.2.1. Nivel.....	19
2.2.2. Presión	20
2.2.3. Flujo.....	21
2.2.4. Posición	21

2.2.5.	Torque.....	22
2.3.	Normas ISA.....	22
3.	PROPUESTA DE EQUIPO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA.....	25
3.1.	Instrumentación.....	25
3.2.	Especificaciones técnicas	27
3.2.1.	PLC	27
3.2.2.	HMI.....	29
3.2.3.	Sensores	30
3.3.	Cotizaciones.....	34
4.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA	37
4.1.	Presentación de equipo para el sistema de control.....	37
4.1.1.	PLC	42
4.1.2.	HMI.....	44
4.2.	Presentación de diagramas del sistema de control.....	45
4.2.1.	Diagrama de comunicación	45
4.2.2.	Diagramas P&ID.....	47
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Planta de tratamiento potabilizadora de agua	3
2.	Planta potabilizadora de osmosis inversa	4
3.	Planta de tratamiento de aguas residuales industriales	5
4.	Lavado de caña de azúcar	8
5.	Planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña, Ingenio Tululá	9
6.	Vista superior de la planta de tratamiento de agua residual.....	12
7.	Vista lateral de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña	13
8.	Vista trasera de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña	14
9.	Nomenclatura para la identificación de instrumentos	26
10.	Sensor de nivel de radar	31
11.	Sensor de flujo	32
12.	Sensor de torque.....	33
13.	PLC	42
14.	Disposición de PLC	43
15.	HMI XBTGT5330.....	44
16.	Diagrama de comunicación.....	46
17.	Diagrama P&ID, tanque efluentes.....	48
18.	Diagrama P&ID, banda tamiz horizontal	49
19.	Diagrama P&ID, clarificador	50
20.	Diagrama P&ID, agua limpia y condensados	51

21.	Diagrama P&ID, preparación de polímeros	52
22.	Diagrama P&ID, filtro de banda	53
23.	Diagrama P&ID, banda tamiz horizontal	54

TABLAS

I.	Normas ISA	24
II.	Cotización para el sistema de control en \$	34
III.	Cotización para el sistema de control en Q	35
IV.	Elenco tanque de efluentes	38
V.	Elenco del filtro de banda tamiz	38
VI.	Elenco del clarificador.....	38
VII.	Elenco tanque de agua limpia y condensados.....	39
VIII.	Elenco área de polímero	39
IX.	Elenco filtro de banda horizontal.....	40
X.	Elenco tanque de salida.....	40
XI.	Número de módulos I/O.....	41
XII.	Catálogos de PLC.....	43
XIII.	HMI propuesta	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados centígrados
M ³	Metro cúbico
μ	Micro
%	Porcentaje
Q	Quetzal, moneda de Guatemala

GLOSARIO

HMI	Interfaz hombre-máquina. Dispositivo o sistema que permite el interfaz entre una persona y una máquina.
ISA	Sociedad Instrumentistas de América que publica normas para símbolos, términos y diagramas usados en el control de procesos para indicar la aplicación en un proceso.
PLC	Controlador lógico programable.
Posicionador	Elemento de control que se utiliza para controlar la posición de válvulas y actuadores.
P&ID	Diagrama de instrumentos y tuberías.
Sensor	Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas y transformarlas en variables eléctricas para que sean interpretadas por otro dispositivo.
TAG	Etiqueta para identificar elementos del sistema.

RESUMEN

En el proceso de lavado de caña, el volumen de agua residual puede ser reutilizado al instalar una planta de tratamiento de agua, sin embargo, es necesario el diseño de un sistema de control para aumentar su eficiencia y disminuir los recursos empleados en la operación.

El diseño de dicho sistema de control se basa en la identificación de variables de operación que influyen en la eficiencia de la planta de tratamiento de agua: la presión, el flujo y los niveles de agua, así como las posiciones de ciertos elementos o piezas. Estas variables se introducen a un controlador programable que se encarga de procesar los datos de forma que un operador pueda monitorear la planta entera desde una pantalla HMI.

La ingeniería de diseño incluye diagramas de comunicación y de P&ID, los cuales son elaborados de acuerdo a la norma ISA. Además, se incluye la selección de equipos de control: la pantalla HMI, el PLC e instrumentación de campo.

Cualquier falla o anomalía en la operación de la planta puede ser detectada oportunamente desde el sistema de control y detener su funcionamiento en caso se considere necesario gracias al sistema propuesto. Del mismo modo, se reduce la cantidad de personal necesario para su operación, aumenta la eficiencia de la planta y la seguridad en la operación de la misma.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de control aplicable en una planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña.

Específicos

1. Dar a conocer el funcionamiento de los diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua que operan en la industria guatemalteca.
2. Presentar el estudio de las variables de control de una planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña.
3. Realizar una propuesta de equipos para el sistema de control a diseñar.
4. Presentar la propuesta de diseño del sistema de control de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña.

INTRODUCCIÓN

El compromiso de las empresas con el medio ambiente hace que estas implementen proyectos, métodos y sistemas a su alcance que les permita preservar los recursos naturales de su entorno. En el caso de los ingenios, estos pueden reutilizar el agua residual del lavado de caña al instalar una planta de tratamiento de agua.

La planta de tratamiento de agua debe operarse bajo un adecuado sistema de control, el cual permite aumentar su eficiencia y disminuir diversos recursos empleados en su operación.

El sistema de control se diseña con base en la identificación de variables como la presión, el flujo y los niveles de agua que influyen en la eficiencia de una planta de tratamiento de agua. El sistema propuesto permite introducir estas variables a un controlador programable que se encarga de procesar los datos de forma que un operador pueda monitorear la planta entera desde una pantalla HMI; y para que este pueda ser aplicado, se ofrecen los diagramas que facilitan su instalación y los equipos más apropiados al diseño.

La propuesta del sistema de control consta de cuatro capítulos: en el primero se da a conocer el funcionamiento de los diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua que operan en la industria guatemalteca; en el segundo se presenta el estudio de las variables de control; en el tercero se realiza la propuesta de equipos que se adaptan mejor al sistema de control y, por último, en el cuarto capítulo se presenta el diseño final del sistema de control.

1. FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

El tratamiento de aguas se refiere al conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la reducción, o incluso eliminación, de contaminación que le provee características no deseables al agua proveniente de fuentes naturales, de medios de abastecimiento o residual de algún proceso.

El tipo de tratamiento que se le aplique al agua, normalmente varía en función de las propiedades que presente este recurso al ingresar al proceso, así como del destino que se le vaya a dar al agua resultante; de tal manera que al tratar las aguas, estas posean características adecuadas al uso que se les desee dar.

Hay diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua que dependen del proceso que se aplique o de la utilidad que se le desee dar al producto final, entre estas se pueden mencionar las siguientes:

- La planta potabilizadora
- La planta de osmosis inversa
- La planta de agua residual industrial

El funcionamiento y las características de cada una de las plantas mencionadas anteriormente, son descritos a continuación.

1.1. Planta potabilizadora

Es el conjunto de estructuras en las que se trata el agua, con el fin de devolverle las propiedades que le permitan ser apta para el consumo humano con el uso de diferentes tecnologías para potabilizar el agua.

Una planta de tratamiento de este tipo, debe operar continuamente, aún cuando algunos de sus componentes se encuentren en mantenimiento y es por eso que necesita como mínimo dos unidades para cada proceso de la planta. Aunque las partes de la planta pueden variar según el diseño de cada fabricante, se mencionan algunas de sus partes básicas y una breve descripción de cómo funciona cada una:

- Captación: el punto de captación de las aguas generalmente cuenta con una reja para impedir la penetración de elementos de gran tamaño.
- Desarenador: sedimenta arenas que van suspendidas para evitar dañar las bombas.
- Bomba de baja presión: toma el agua directamente del embalse, enviando el agua cruda a la cámara de mezcla.
- Cámara de mezcla: es donde se agrega al agua productos químicos, tales como coagulantes o alcalinizantes.
- Decantador: pileta amplia donde se reposa el agua, permitiendo que se depositen las impurezas en el fondo.

- Filtro: el agua decantada llega hasta un filtro donde pasa a través de sucesivas capas de arena de distinto grosor.
- Depósito: lugar donde se deposita el agua antes de ser distribuida, en el se pueden aplicar cloro para eliminar bacterias residuales.

Figura 1. **Planta de tratamiento potabilizadora de agua**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Planta+de+tratamiento+potabilizadora+de+agua&espv=2&biw=1517&bih=735&source=Inms&tbnm>. Consulta: mayo de 2015.

1.2. **Planta de osmosis inversa**

Los sistemas de osmosis inversa se utilizan para purificar el agua, retirar y eliminar las sales y otras impurezas del agua de la llave y de agua salobre. Este proceso es capaz de eliminar bacterias, azúcares, proteínas, partículas, colorantes y otros constituyentes disueltos.

Hay sistemas grandes de agua salobre y agua de la llave que son ofrecidos con filtros, dosificación de productos químicos y son personalizados de acuerdo a las necesidades de la industria a la cual se aplica.

Figura 2. **Planta potabilizadora de osmosis inversa**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Planta+potabilizadora+de+osmosis+inversa&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved>. Consulta: mayo de 2015.

El proceso de osmosis inversa funciona mediante membranas, en el cual se aplica una presión mayor a la presión osmótica ejercida en el compartimiento que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos. Esta presión obliga al agua a pasar por la membrana semipermeable en dirección contraria al del proceso natural de osmosis, dejando las impurezas detrás. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas, bacterias y virus, son separados del agua; haciendo que este proceso sea bastante efectivo para su utilización en el sector industrial.

1.3. Planta para agua residual

Las aguas residuales pueden provenir de actividades industriales, agrícolas o del uso doméstico. Los tratamientos de aguas industriales son muy variados, según el tipo de contaminación y pueden incluir: precipitación, neutralización, oxidación química y biológica, reducción, filtración, osmosis, etc.

Figura 3. **Planta de tratamiento de aguas residuales industriales**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Planta+de+tratamiento+de+aguas+residuales+industriales&espv=2&biw=1517&bih=735&source=Inms&tbm=isch&sa>. Consulta: junio de 2015.

Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal

y composición, difiriendo las características de los vertidos, no solo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

A veces las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. Las aguas residuales generalmente contienen diferentes tipos de residuos, entre estos se tienen:

- **Sólidos sedimentables:** son partículas gruesas que se encuentran en un volumen determinado de líquido que se depositarán por gravedad. Son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a las fuerzas de arrastre o turbulencias. Cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, estos precipitan en el fondo. Suelen eliminarse fácilmente por cualquier método de filtración.
- **Sólidos en suspensión:** son partículas flotantes o suspendidas en el agua que pueden ser separadas del líquido por medio de la filtración. Se mantienen en el agua debido a su naturaleza coloidal que viene dada por las pequeñas cargas eléctricas que poseen estas partículas que las hacen tener una cierta afinidad por las moléculas de agua. A veces es muy difícil la eliminación de estos; por lo que es necesaria la adición al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la carga eléctrica de éstas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración.
- **Sólidos disueltos:** es una medida grosera de la concentración total de sales inorgánicas en el agua que indica salinidad. Están relacionados con

el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso.

- Arenas: son una serie de tamaño apreciable y que en su mayoría son de naturaleza mineral, aunque pueden llevar adherida materia orgánica. Las arenas enturbian las masas de agua cuando están en movimiento, o bien, forman depósitos de lodos si encuentran condiciones adecuadas para sedimentar.
- Grasas y aceites: son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de agua residual.
- Agentes patógenos: organismos que pueden ir en mayor o menor cantidad en las aguas residuales y que son las que pueden producir o transmitir enfermedades.
- Otros contaminantes: entre estos se incluyen los metales pesados, fenoles, petróleo y pesticidas, entre otros.

1.4. Planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña

El proceso industrial para la fabricación de azúcar está integrado por una cadena de subprocesos que permiten convertir el jugo de caña en cristales y depurarlos de manera natural de impurezas que pueden resultar dañinas para el ser humano. La caña que entra a la planta, como materia prima de un

ingenio, se descarga sobre mesas de alimentación por medio de viradores de caña con diferentes capacidades en toneladas métricas; dando inicio al proceso.

Figura 4. **Lavado de caña de azúcar**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Lavado+de+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnm>. Consulta: junio de 2015.

Tomando en cuenta la cantidad de material indeseable con que llega la caña a la planta y para tener un proceso más limpio, en las mesas se lava la caña. Este proceso consiste en aplicar agua a cierta temperatura, que permita eliminar así, algunos sólidos o materia extraña como tierra, sales, minerales, piedras y otras materias que puedan adherirse a ella.

Las aguas provenientes del lavado de caña en un ingenio, contienen gran cantidad de materia orgánica y residuos sólidos, que se pueden separar fácilmente permitiendo la reutilización de estas aguas, ya que cuando se lava la caña, la generación de aguas residuales es bastante alta.

Figura 5. **Planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña, Ingenio Tutulá**



Fuente: ingenio Tutulá.

En un ingenio estas plantas se utilizan para reciclar el agua utilizada para lavar caña y las cenizas de las calderas durante el tiempo de cosecha, así como otras aguas residuales del proceso productivo. Aunque también se pueden utilizar pozos accionados por motores eléctricos, esta tecnología permite optimizar los recursos, reciclando hasta en un 80 % el agua total utilizada; además, las sedimentaciones y residuos se reutilizan al regresarlos al campo debido a que en su mayoría es tierra que llega al ingenio junto con la caña.

2. VARIABLES DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La planta de tratamiento de agua residual, a la cual se le ha de diseñar el sistema de control, se ha instalado para reciclar el agua que se utiliza para lavar la caña de azúcar y las cenizas de las calderas durante el tiempo de cosecha, así como otras aguas residuales del proceso productivo.

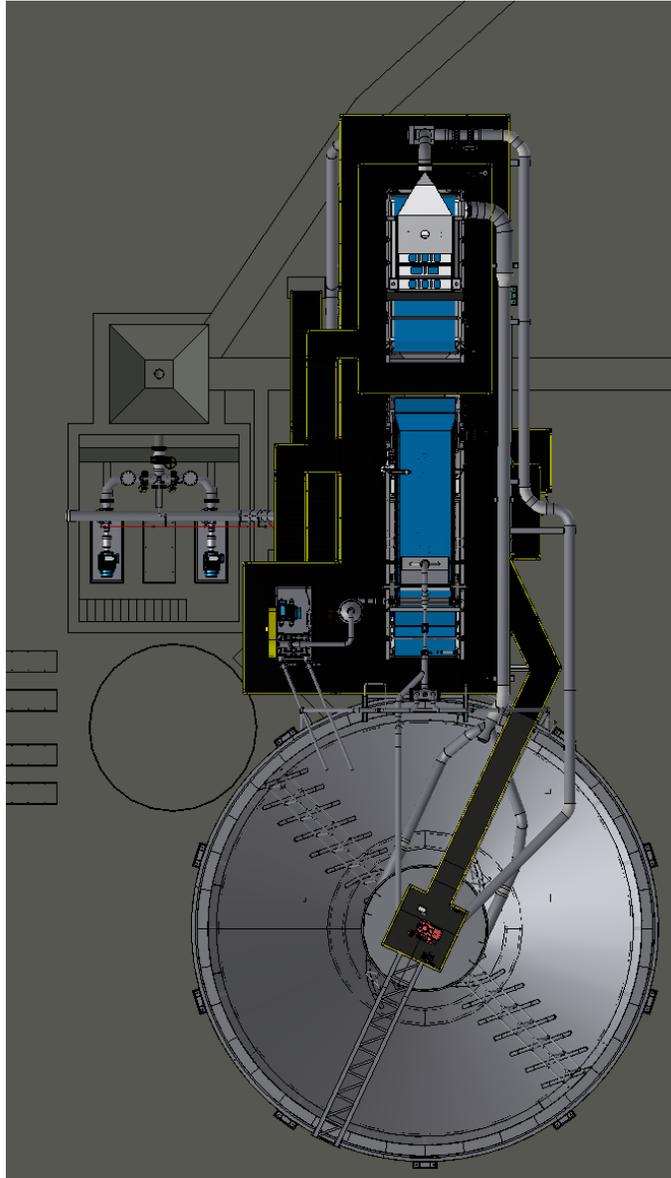
Para poder definir las variables de control, primero se establecen las condiciones actuales con las que opera la planta de tratamiento, el tipo de inspecciones que se realizan, el mantenimiento que se le aplica y se consideran las normas bajo las cuales se ha de diseñar el sistema de control.

2.1. Condiciones actuales

La planta de tratamiento de aguas residuales tiene capacidad para procesar y limpiar cerca de 1 200 m³ de agua por hora, equivalente a 5 300 galones por minuto. La planta es de origen brasileño de marca MAUSA y cuenta con una estimación de vida productiva de 25 años.

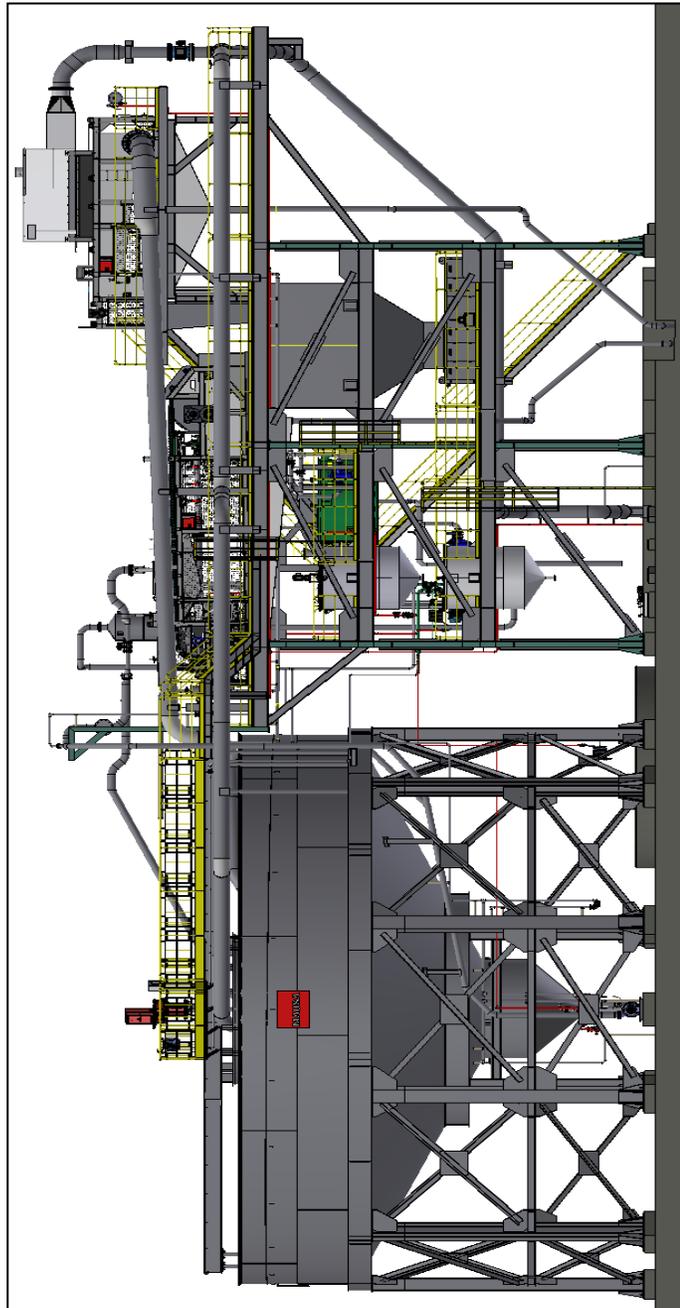
Se dibujó una vista superior, vista lateral y vista trasera de la planta de tratamiento de agua residual, en la cual se puede observar su distribución, diseño y algunos de los elementos que lo conforman.

Figura 6. **Vista superior de la planta de tratamiento de agua residual**



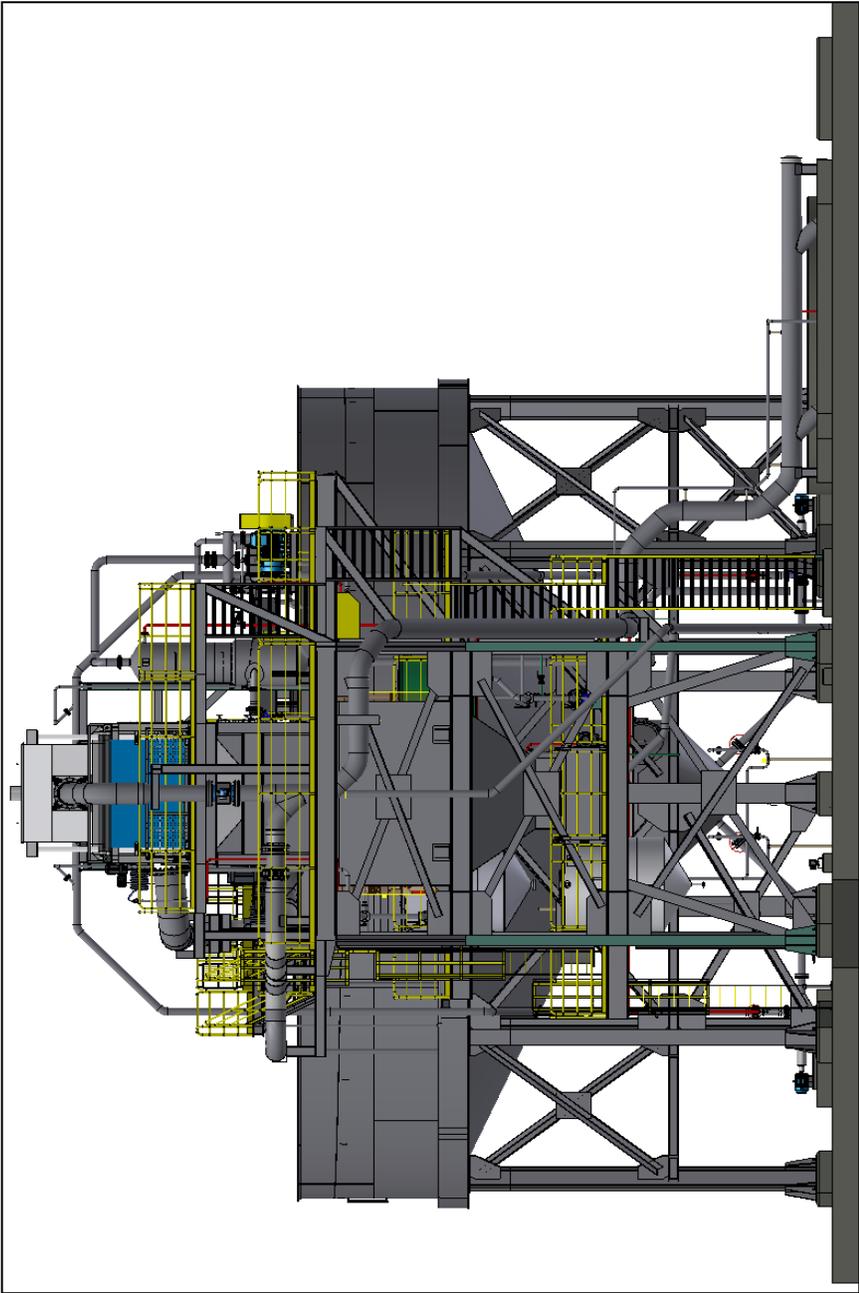
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 7. **Vista lateral de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 8. **Vista trasera de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2.1.1. Operación

La tecnología empleada en la planta permite que esta opere de manera eficiente, reciclando hasta un 80 % del agua utilizada; las sedimentaciones y residuos se van manejando y reutilizando desde el momento de su generación, regresándoles al campo, por lo que, las lagunas de sedimentación no son necesarias.

Aunque los elementos que conforman la planta de tratamiento son diversos, con funciones específicas, se logra agruparlos para poder explicar de forma entendible como operan ya en conjunto. De acuerdo al proceso operativo de la planta, se identifican y describen siete áreas importantes, las cuales son:

- Tanque de efluentes: es donde se recibe toda el agua residual del proceso de lavado de caña. Este tanque tiene una capacidad de 1 200 m³ aproximadamente y consta de dos bombas centrífugas.
- Filtro de banda tamiz: área por donde se desplaza el agua proveniente del tanque de efluentes, en la cual se retienen las partículas gruesas que se encuentren en ella. La banda es movida por un motor de corriente alterna.
- Clarificador: tanque en donde se realiza el proceso de sedimentación, que separa el agua de las partículas contaminantes más finas. Este consta de dos puntos de evacuación: en la parte superior es donde sale el agua que está lista para ser reutilizada; y en la parte inferior es donde salen los lodos que son trasladadas a donde corresponde por medio de bombas.
- Filtro de banda: absorbe el agua que forma parte de los lodos provenientes del clarificador por medio de un sistema de vacío.

- Área de polímero: lugar donde se realiza la mezcla del polímero que debe adicionarse en el clarificador para que este cumpla con el proceso de sedimentación correspondiente.
- Área de agua limpia y condensados: consta de dos tanques en los cuales se reserva agua para que el tratamiento de agua se mantenga continuo.
- Tanque de salida: en esta área se encuentra un tanque pulmón para la salida de agua y es donde se conserva hasta que sea requerida nuevamente para el proceso de lavado de caña.

2.1.2. Inspección

Las inspecciones deben programarse para las siete áreas del proceso operativo de la planta, identificadas y descritas anteriormente; y en cada una de ellas se controla lo siguiente:

- Tanque de efluentes: se controla principalmente el nivel del agua y las condiciones físicas del tanque.
- Filtro de banda tamiz: en ella se debe controlar que la tela se mantenga en una determinada posición; de no ser así, se necesita parar el motor por seguridad, se revisa las condiciones físicas de la banda y el funcionamiento del motor.
- Clarificador: se revisan los puntos de evacuación, que no haya obstaculización de ningún tipo y se controla el funcionamiento de las bombas.

- Filtro de banda: en se controla la presión del sistema, el nivel de agua, nivel de lodos y la posición de la banda.
- Área de polímero: en esta área se inspecciona que se tenga el nivel de mezcla apropiado.
- Área de agua limpia y condensada: se inspecciona que no tenga fugas ni filtraciones y que tenga el nivel deseado de reserva.
- Tanque de salida: se revisa que no haya nada que obstaculice la entrada y salida de agua del mismo y que el nivel de agua no sobrepase su capacidad.

2.1.3. Mantenimiento

El mantenimiento que se aplica a la planta, depende básicamente del resultado de las inspecciones, de acuerdo con lo anterior, en el programa de mantenimiento se distinguen las siguientes etapas:

- Revisión del historial de inspecciones: realizado por el encargado del área de mantenimiento, el cual solicita la información al encargado de inspecciones.
- Análisis de los puntos de inspección: generalmente el análisis se realiza inmediatamente después de realizada la inspección, para poder programar los mantenimientos del día posterior. En el análisis se toman en cuenta las fallas detectadas en cada punto y su relación con el mantenimiento preventivo que se realiza por área.

- Generación de órdenes de trabajo: también lo realiza el encargado del área de mantenimiento. Al generar la orden de trabajo, se incluye como mínimo la siguiente información:
 - Número de orden
 - Fecha de ejecución
 - Persona o equipo encargado de realizar el trabajo
 - Descripción del mantenimiento requerido
 - Área de aplicación
 - Material y equipo para mantenimiento

- Ejecución de los trabajos: los trabajos pueden realizarse por una sola persona o por equipo de técnicos dependiendo de la complejidad del mantenimiento. Se inicia con la requisición de la orden de trabajo y luego la solicitud de materiales y equipo, incluyendo el equipo de protección individual. Al ejecutar se nombra a un encargado de realizar el informe.

- Supervisión: hay un supervisor de mantenimientos que verifica la calidad del trabajo realizado, que los trabajadores utilicen los materiales y equipos de la manera correcta y que se cumpla con las especificaciones del trabajo solicitado con base en la orden. El informe de supervisión se hace mensualmente; sin embargo, cuando se encuentra alguna anomalía que requiera de una atención inmediata, se presentan las observaciones por escrito al encargado del área de mantenimiento.

- Documentación de las órdenes de trabajo terminadas: las órdenes de trabajo tienen una sección para realizar las anotaciones del trabajo realizado, el que elabora el informe es quien hace las anotaciones

correspondientes y archiva la orden en la carpeta del mes correspondiente en el archivo del área de mantenimiento.

2.2. Variables de control

Conforme a las necesidades identificadas en el registro de inspecciones y en la observación propia de la planta de tratamiento en funcionamiento, las variables de control establecidas para la elaboración del sistema propuesto son las siguientes.

- Nivel
- Presión
- Flujo
- Posición
- Torque

2.2.1. Nivel

Es necesario medir el nivel en diferentes áreas que forman parte de la planta de tratamiento de agua, especialmente en los tanques, ya que sin ellos se rebalsarían o tendría que estar un operario verificando el nivel para accionar manualmente las bombas.

Específicamente, se requiere de sensores de nivel en el tanque de efluentes, en el clarificador, en el filtro de bandas, en el área de polímero, en el tanque de salida y en los tanques del área de agua limpia y condensada. Estos facilitarán el proceso del control de los niveles en las diferentes áreas de la planta que lo requieren.

Para medir el nivel de agua en los tanques, es preferible el sensor de nivel ultrasónico, porque debido a que la medición no tiene contacto con el agua, la suciedad que esta pueda tener no daña el sensor. El funcionamiento del sensor es bastante sencillo: este emite ondas y por medio del tiempo de retorno de dichas ondas al sensor, este calcula el nivel del agua. Entre sus principales características se tienen las siguientes:

- Máxima fiabilidad
- Sin mantenimiento
- Fácil instalación
- Alta precisión
- Sin piezas móviles en contacto con el líquido
- Especial para tanques por su sensibilidad y procesamiento de señal

2.2.2. Presión

La presión se define como la fuerza aplicada a un área, aunque matemática y generalmente se dice que es igual a la fuerza por unidad de área. Dependiendo del dispositivo de medición que se utilice, este puede calcularse en psi, bar, atm, pascal, entre otras; y sus unidades pueden ser absolutas o diferenciales.

Las mediciones de presión en la planta de tratamiento, actualmente se realizan a través de manómetros, por ser considerados como los dispositivos más prácticos para indicación local. Sin embargo, hay presiones que si deben medirse a través de sensores de presión, que son dispositivos que generan una señal analógica o digital para la interpretación del sistema de control.

Los sensores de presión son efectivos para medir la presión de agua, aceite, líquido de frenos, lodos o cualquier elemento que circule por un sistema bajo determinadas condiciones.

2.2.3. Flujo

El movimiento del agua dentro de la planta de tratamiento también debe ser controlado. Al originarse una obstaculización en las entradas y/o salidas de los tanques, en las tuberías o en otras partes de la planta en la cual circule el agua, se incrementa la probabilidad de tener que interrumpir el funcionamiento. De ser así, no solo se detiene el proceso, sino que puede ocasionar accidentes o dañar otras áreas de la planta.

2.2.4. Posición

Se requiere el control por medio de sensores de posición en el área de filtro de banda tamiz y en el filtro de banda. La función de estos sensores, es la de medir o detectar la posición de un determinado objeto en el espacio y los más simples son como interruptores que se activan o desactivan si entran en contacto con un objeto.

El sensor de final de carrera es el dispositivo electromecánico utilizado más comúnmente en el sector industrial. Este consta de un accionador vinculado mecánicamente a un conjunto de contactos. Cuando un objeto entra en contacto con el accionador, el dispositivo opera los contactos para cerrar o abrir una conexión eléctrica. Tienen distintas aplicaciones debido a su resistencia, operación visible simple, fácil instalación y funcionamiento confiable.

La instalación de este tipo de sensores evita que el agua avance sin ser filtrada, o que la máquina sufra diferentes daños al operar en condiciones no deseadas.

2.2.5. Torque

Para el control de esta variable se requiere de un dispositivo que permita medir y registrar el par de torsión en un sistema de rotación, así como un motor, rotor o cigüeñal. Cuando el par es estático la medición se hace fácilmente; sin embargo, cuando es dinámico generalmente requiere la transferencia de algún efecto eléctrico o magnético del eje que se está midiendo a un sistema estático. Los sensores de par utilizan, por lo general, medidores de tensión aplicados a un eje de rotación o eje; haciendo necesario un medio para alimentar el puente del calibrador de tensión así como un medio para recibir la señal, utilizando anillos de deslizamiento, telemetría inalámbrica o transformadores rotativos.

En la planta de tratamiento se requiere de un sensor de torque para monitorear el extractor de lodos del clarificador, ya que si el torque aumenta más del 100 % del torque nominal, la planta debe iniciar una parada coordinada.

2.3. Normas ISA

En instrumentación y control, se emplea un sistema especial de símbolos que permite transmitir la información de forma fácil y específica, el cual ha sido estandarizado por la ISA, Sociedad de Instrumentistas de América, creando las normas ISA.

Estas normas tienen como objetivo principal representar el funcionamiento de un sistema a partir de un diagrama o plano, que posee un conjunto de símbolos utilizados para la designación de instrumentos de control y medición de señales que representan cada uno de los elementos de dicho sistema, con el fin de que puedan ser comprendidas de forma singular y de manera efectiva.

Las normas ISA ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992) e ISA-5.3-1993 son las guías más aceptables para desarrollar simbolismo para instrumentación y sistemas de control en diferentes industrias. La utilización de esta simbología es de suma importancia para el diseño, selección, operación y mantenimiento de sistemas de control, tal como el que se propone. La siguiente tabla muestra las diferentes reglas para utilizar la norma ISA.

Tabla I. Normas ISA

	PRIMER CARÁCTER		CARACTERES SUSCESIVOS		
	VARIABLE MEDIDA	LETRA DE MODIFICACIÓN	FUNCION DE LECTURA PASIVA	FUNCION DE SALIDA	LETRA DE MODIFICACION
A	Análisis	-----	Alarma	-----	-----
B	Llama	-----	Disponible	Disponible	Disponible
C	Conductividad	-----	-----	Control	-----
D	Densidad	Diferencial	-----	-----	-----
E	Tensión (EMF)	-----	E.P.M.	-----	-----
F	Caudal	Relación	-----	-----	-----
G	Calibre ó Dimensión	-----	Vidrio	-----	-----
H	Manual	-----	-----	-----	Valor Alto
I	Corriente Eléctrica	-----	Indicador	-----	-----
J	Potencia	Exploración	-----	-----	-----
K	Tiempo	-----	-----	Estación de control	-----
L	Nivel	-----	Lampara ó Luz Piloto	-----	Valor Bajo
M	Humedad	-----	-----	-----	V. Intermedio
N	Disponible	-----	Disponible	Disponible	Disponible
O	Disponible	-----	Orificio	-----	-----
P	Presión ó Vacío	-----	Punto de prueba	-----	-----
Q	Cantidad	Totalización	-----	-----	-----
R	Radioactividad	-----	Registro	-----	-----
S	Velocidad ó Frec.	Seguridad	-----	Interruptor	-----
T	Temperatura	-----	-----	Transmisor	Multifunción
U	Multivariable	-----	Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Viscosidad	-----	-----	Válvula	S/C
W	Peso ó Fuerza	-----	Vaina	S/C	-----
X	S/C	-----	S/C	S/C	S/C
Y	Disponible	-----	-----	Relé/Convertidor	-----
Z	Posición	-----	-----	E.F.C. S/Clasificar	-----

Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=normas+isa&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa>. Consulta: junio de 2015.

3. PROPUESTA DE EQUIPO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO DE CAÑA

Al proponer un sistema de control para la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña, se explica cómo funciona, cuáles son sus componentes y algunas de sus especificaciones técnicas. También se presenta una cotización del equipo requerido para tener un estimado de la inversión necesaria para la instalación.

3.1. Instrumentación

El sistema de control tiene como objetivo medir magnitudes físicas de diferentes áreas de la planta, recabar toda la información relacionada al control de dichas magnitudes y presentarla a un operador. Entre las características que tiene la tecnología electrónica propuesta, se destacan las siguientes:

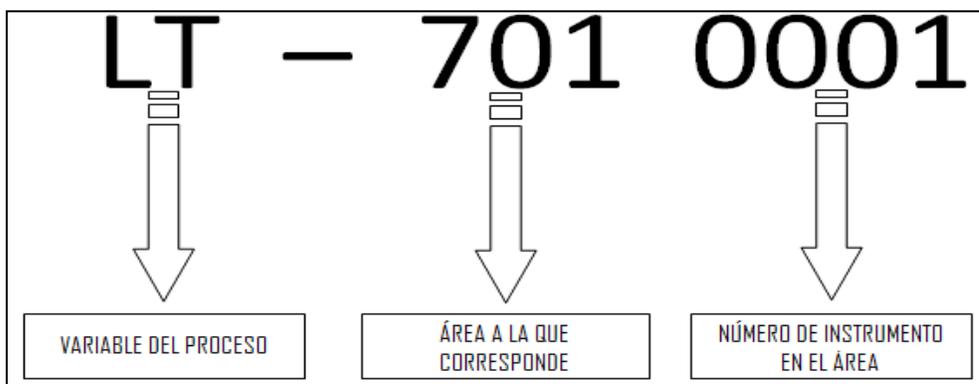
- Las señales eléctricas permiten manejar señales en un rango dinámico de tiempos muy amplio y pueden transmitirse fácilmente a través de cables metálicos, sistemas radiados o fibra óptica.
- Un sistema electrónico permite complejas transformaciones funcionales de las señales eléctricas, las cuales son las más apropiadas para ser introducidas en controladores lógicos, las señales analógicas más comunes son de corriente 4-20 mA, voltaje 0-10 v.

Se colocan sensores en los diferentes puntos de control identificados en la planta de tratamiento, los cuales responden a las variaciones de las magnitudes que miden y emiten una señal física, que por medio de un transductor se transforma en una señal eléctrica.

La señal eléctrica debe ser acondicionada de tal forma que pueda amplificarse, o filtrarse según sea el caso, antes de entrar al controlador lógico programable de la cual sale la información procesada. Esta información se presenta en una pantalla de forma elaborada para su comprensión. El computador permite al operador almacenar la información en la memoria y controlar las operaciones, ingresando valores de consigna que son procesados para convertirse en señales de mando que acciona elementos específicos para ejecutar las acciones que corresponden.

Como parte de la instrumentación, también es necesario darle nombre a los instrumentos a utilizar, definiendo los TAGS que se presentan en el elenco del sistema. La nomenclatura a utilizar se compone de la siguiente forma:

Figura 9. **Nomenclatura para la identificación de instrumentos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Las primeras letras corresponden a la variable del proceso, para este caso serán referentes al nivel, presión, flujo, torque y posición. El primer bloque de números identifica el área a la que corresponde la variable y el segundo bloque de números es el correlativo que le corresponde al instrumento identificado en una determinada área. Con el número de TAGS a utilizar se establece el número de variables con las cuales se trabajará y, por tanto, se puede definir qué tipo de PLC y HMI es el adecuado para el sistema.

3.2. Especificaciones técnicas

Para que el sistema de control de la planta de tratamiento que se propone funcione eficientemente, el equipo debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas, las cuales son descritas para conocer mejor el equipo que se requiere.

3.2.1. PLC

Es indispensable contar con un dispositivo electrónico que pueda ser programado y operado para controlar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento. Los controladores lógicos programables son efectivos y bastante utilizados para sistemas de control y automatización de procesos electromecánicos, debido a que han sido diseñados para cumplir las siguientes especificaciones:

- Capacidad para múltiples señales de entradas y de salidas
- Amplios rangos de temperatura
- Inmunidad al ruido eléctrico
- Resistencia a la vibración y al impacto
- Mantenimiento económico
- Adaptación a diferentes sistemas

- Detección de diversas señales de proceso
- Emisión de reportes al operador
- Recepción de configuraciones variadas
- Mínimo espacio físico de instalación

El algoritmo PID (proporcional, integral y derivado), le permite al PLC un control con retroalimentación, usualmente utilizado para variables de presión, flujo o temperatura. Este tipo de características hacen que estos dispositivos sean favorables para el sistema de control propuesto.

Generalmente los programas de PLC son escritos en una aplicación especial en un computador y para cargarlos, puede utilizarse un cable de conexión directa o a través de una red. El almacenamiento del programa se da por medio de una memoria RAM con respaldo de batería u otro tipo de memoria no volátil. En la actualidad, un solo PLC puede programarse para sustituir miles de relés, haciendo uso de cualquiera de los siguientes cinco lenguajes:

- FBD: diagrama de bloques de función
- LD: diagrama de escalera
- ST: texto estructurado, similar al lenguaje de programación pascal
- IL: lista de instrucciones, similar al lenguaje ensamblador
- SFC: carta de función secuencial

Es importante mencionar que aunque los conceptos fundamentales de la programación de PLC son comunes, hay características que los diferencian y que hacen que estos no sean intercambiables o compatibles, tales como las diferencias de módulos de entradas y salidas en su direccionamiento o la organización de la memoria y los conjuntos de instrucciones, entre otros.

3.2.2. HMI

El sistema de control requiere de un software de monitoreo y para ello se elige una interfaz hombre máquina. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, controladores lógicos programables o DRIVE´s, los cuales deben tener una comunicación que entienda el HMI. Entre las funciones de un software HMI están:

- **Monitoreo:** permite obtener y mostrar datos de la planta en tiempo real. Para una lectura fácil de interpretar, se programa para que los datos sean presentados como números, textos o gráficos.
- **Supervisión:** incrementa la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso, directamente desde la computadora a través de esta función.
- **Alarmas:** capacidad de reconocer y reportar eventos fuera del proceso estándar. Es necesario programar los límites de control preestablecidos, para poder activar las alarmas.
- **Control:** capacidad de ajustar los valores del proceso manteniéndolos dentro de ciertos límites, por medio de la aplicación de algoritmos.
- **Registro:** capacidad de mostrar y almacenar en archivos, datos del proceso a una determinada frecuencia. Este almacenamiento de datos es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

Para el sistema de control propuesto, es necesario que el HMI cumpla ciertas condiciones:

- Permitir al operador el envío de señales al proceso por varios medios
- Facilitar la comunicación con dispositivos de campo
- Actualizar una base de datos dinámica con las variables de proceso
- Visualizar variables mediante pantallas con objetos animados
- Controlar en forma limitada ciertas variables de proceso
- Almacenar valores de determinada variables para su análisis y control

3.2.3. Sensores

Los sensores son dispositivos necesarios para detectar las magnitudes físicas de las variables que deben ser controladas y a la vez puedan ser transformadas en variables eléctricas interpretables por el sistema de control a diseñar. Las especificaciones técnicas de cada uno de los sensores varían en función de la variable a medir.

En el diseño del sistema de control se incluyen diferentes tipos de sensores para la lectura del PLC, entre dichos sensores se tienen los siguientes:

- Sensor de nivel de radar: mide el nivel líquido o sólido mediante señales de radar transmitidas desde la antena en la parte superior de un tanque. Es útil en el tratamiento de aguas limpias y residuales; entre sus características están: máxima fiabilidad, no requiere mantenimiento, fácil instalación, alta precisión sin piezas móviles y sin contacto con el líquido, se adapta a las condiciones difíciles de los tanques por su elevada

sensibilidad y procesamiento de señal, flexibilidad: cabezas transmisoras y antenas intercambiables.

Figura 10. **Sensor de nivel de radar**

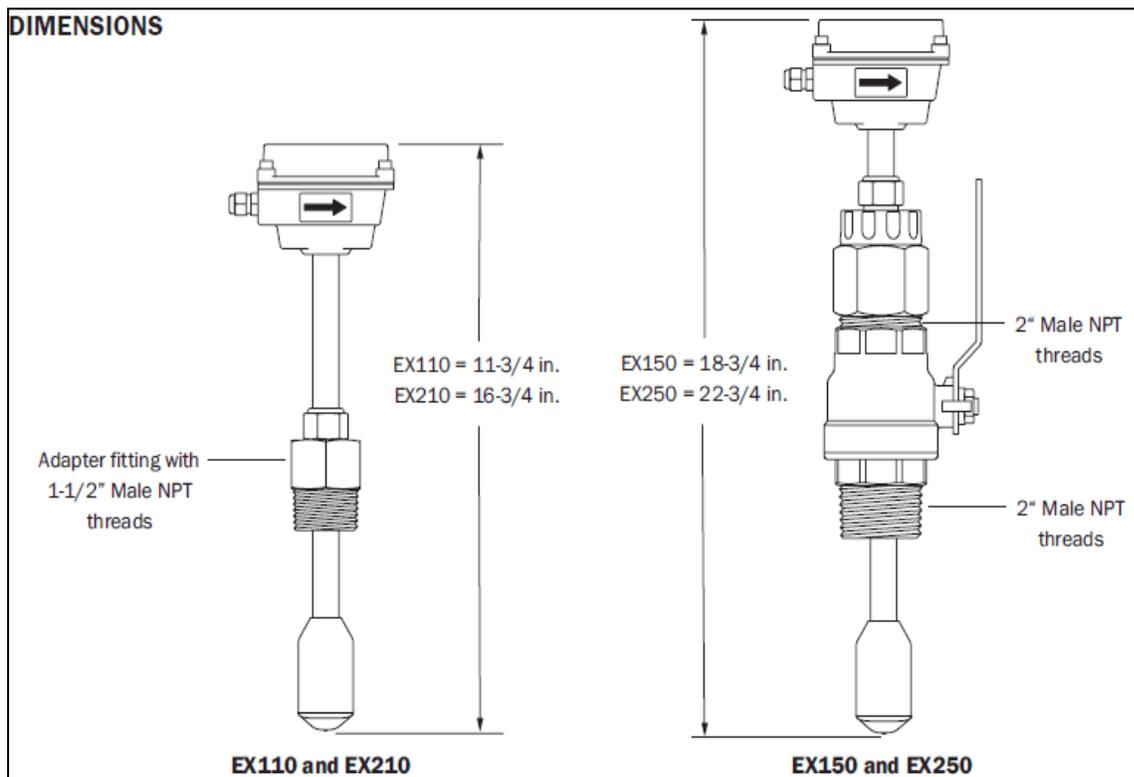


Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Sensor+de+nivel+de+radar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=>. Consulta: julio de 2015.

- **Sensor de posición:** su función es medir la distancia entre la posición ideal, la real y el rango establecido como límite, en palabras sencillas se puede decir que detecta la posición de un determinado objeto en el espacio. Los más simples son como interruptores que se activan o desactivan si se encuentran en contacto con un objeto.
- **Sensor de presión:** transforma una fuerza por unidad de superficie en un voltaje equivalente a esa presión ejercida. Aunque los formatos son diferentes, se destacan por su robustez ya que en procesos industriales están sometidos a todo tipo de líquidos, existiendo así sensores para presión de agua, de aceite, líquido de frenos, etc. Entre estos están los sensores de capacitancia variable, piezo-resistivo, potenciométrico, piezo-eléctrico, reluctancia variable, resonante, óptico.

- Sensor de flujo: el más aconsejable es un sensor de flujo electromagnético de inserción que es un medidor de profundidad ajustable que puede usarse en tuberías desde 3 pulgadas hasta 48 pulgadas. Entre sus ventajas están las siguientes: son durables, fabricados de latón o acero inoxidable y sin partes móviles, ya que no tiene rotor ni rodamientos que se puedan desgastar o que obstaculicen el funcionamiento del dispositivo.

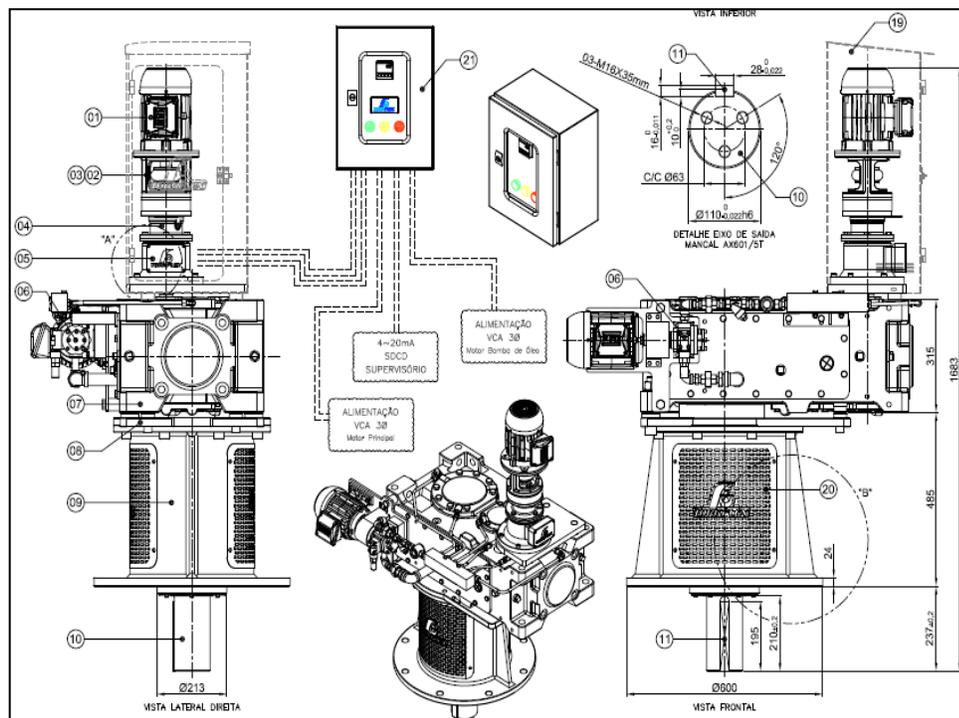
Figura 11. **Sensor de flujo**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Sensor+de+nivel+de+radar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=>. Consulta: julio de 2015.

- Sensor de torque: dispositivo para medir y registrar el par de torsión en un sistema de rotación, así como un motor, rotor o cigüeñal. Cuando el par es estático la medición se hace fácilmente; sin embargo, cuando es dinámico generalmente requiere la transferencia de algún efecto eléctrico o magnético del eje que se está midiendo a un sistema estático. Los sensores de par utilizan, por lo general, medidores de tensión aplicados a un eje de rotación o eje; haciendo necesario un medio para alimentar el puente del calibrador de tensión así como un medio para recibir la señal, utilizando anillos de deslizamiento, telemetría inalámbrica o transformadores rotativos.

Figura 12. Sensor de torque



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Sensor+de+nivel+de+radar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=> Consulta: julio de 2015.

3.3. Cotizaciones

Se presenta la cotización realizada para el equipo del sistema de control completo. La primera tabla muestra la cotización con su estimación en dólares y la segunda ya con el total en quetzales a un tipo de cambio de Q 7,62.

Tabla II. **Cotización para el sistema de control en \$**

Hardware para el sistema de control				
Cantidad	Catalogo	Descripcion	P/U	Sub Total
		PLC Premiun		
1	BMXXBP1200	Rack para PREMIUN 12 slot	\$ 188.50	\$ 188.50
1	TSX PSY 2600M	Fuente de alimentacion 24VDC	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00
1	TSX P 57 2634M	CPU con puerto ethernet integrado ETY PORT	\$ 4,230.67	\$ 4,230.67
1	TSX PBY 100	Modulo de comunicación profibus DP	\$ 1,320.30	\$ 1,320.30
2	TSX AEY 800	Modulos de entradas analogicas 4-20mA, 0-10V.	\$ 1,300.99	\$ 2,601.98
3	TSX DEY 16D2	Modulo de entradas Digitales	\$ 267.04	\$ 801.12
1	TSX DSY 16T2	Modulo de salidas digitales	\$ 345.48	\$ 345.48
		HMI		
1	HMI 5330	Pantalla tactil para la operación	\$ 2,580.20	\$ 2,580.20
		Total		\$ 13,068.25

Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Sensor+de+nivel+de+radar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=>. Consulta: Agosto de 2015.

Tabla III. Cotización para el sistema de control en Q

Hardware para el sistema de control				
Cantidad	Catalogo	Descripcion	P/U	Sub Total
		PLC Premiun		
1	BMXXBP1200	Rack para PREMIUN 12 slot	Q 1,436.37	Q 1,436.37
1	TSX PSY 2600M	Fuente de alimentacion 24VDC	Q 7,620.00	Q 7,620.00
1	TSX P 57 2634M	CPU con puerto ethernet integrado ETY PORT	Q 32,237.71	Q 32,237.71
1	TSX PBY 100	Modulo de comunicación profibus DP	Q 10,060.69	Q 10,060.69
2	TSX AEY 800	Modulos de entradas analogicas 4-20mA, 0-10V.	Q 9,913.54	Q 19,827.09
3	TSX DEY 16D2	Modulo de entradas Digitales	Q 2,034.84	Q 6,104.53
1	TSX DSY 16T2	Modulo de salidas digitales	Q 2,632.56	Q 2,632.56
		HMI		
1	HMI 5330	Pantalla tactil para la operación	Q 19,661.12	Q 19,661.12
		Total		Q 99,580.07

Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Sensor+de+nivel+de+radar&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=>. Consulta: Agosto de 2015.

4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Al realizar el diseño del sistema de control de la planta de tratamiento de agua resultante del proceso de lavado de caña, se presenta el equipo a utilizar, el diagrama de comunicación y los diagramas P&ID.

Se hace necesario mencionar que el sistema de control se diseña con cuatro elementos esenciales: los sensores, con los cuales se ingresa la información al sistema; el PLC con el cual se procesa la información recibida de los sensores y de la HMI; la HMI con la cual el operador puede controlar la planta de tratamiento, recibiendo, almacenando e ingresando información; y los actuadores que son los que ejecutan las acciones a tomar conforme la información u orden que ingrese el operador a través de la interfaz.

4.1. Presentación de equipo para el sistema de control

El diseño toma en consideración las siete áreas, en que se ha seccionado la planta de tratamiento para la presentación del elenco del sistema. Por lo consiguiente, se crea una tabla por área, en donde se agrupan los instrumentos empleados en cada una de ellas.

Tabla IV. Elenco tanque de efluentes

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus			
	Tanque de efluentes								
LT-7010001	Nivel receptor Efluentes PE-Y01A	1							
FT-7010001	Flujo de efluentes al filtro horizontal PHF-Y03A	1							
VFD-7010001	Variador de frecuencia de bomba A de efluente					1			
VFD-7010002	Variador de frecuencia de bomba B de efluente					1			
	Total	2	0	0	0	2			

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Elenco del filtro de banda tamiz

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus			
	Filtro de banda tamiz								
KV_7020001	Vlv paso a filtro horizontal PHF-Y03A comando OPEN/CLOSE					1			
KV_7020001_ZSO	Vlv paso a filtro horizontal PHF-Y03A confirmación OPEN				1				
KV_7020001_ZSC	Vlv paso a filtro horizontal PHF-Y03A confirmación CLOSE				1				
PSL_7020001	Presión baja aire comprimido				1				
PE_7020001	Paro de emergencia en tamiz horizontal				1				
ZS_7020001	Switch de posición final de carrera de banda				1				
VFD_7020001	Variador de frecuencia de motor de banda de tamiz horizontal								1
	Total				5	1			1

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Elenco del clarificador

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus			
	Clarificador								
WT_7030001	Medición de torque agitador clarificador	1							
KV_7030001	Válvula de agua bruta al clarificador COMANDO OPEN/CLOSE					1			
KV_7030001_ZSO	Válvula de agua bruta al clarificador CONFIRMACIÓN OPEN				1				
KV_7030001_ZSC	Válvula de agua bruta al clarificador CONFIRMACIÓN CLOSE				1				
KV_7030002_O	Válvula de lodos COMANDO OPEN/CLOSE					1			
KV_7030002_ZSO	Válvula de lodos CONFIRMACIÓN OPEN				1				
KV_7030002_ZSC	Válvula de lodos CONFIRMACIÓN CLOSE				1				
VFD_7030001	Variador de frecuencia del agitador de clarificador								1
VFD_7030002A	Variador de frecuencia de bomba de lodo A								1
VFD_7030002B	Variador de frecuencia de bomba de lodo B								1
	Total	1		4	2				3

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Elenco tanque de agua limpia y condensados

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AC	DI	DO	Profibus
	Tanque de agua limpia y condensados					
LSH_7040001	Nivel alto de tanque de condensados			1		
LSM_7040001	Nivel medio de tanque de condensados			1		
LSL_7040001	Nivel bajo de tanque de condensados			1		
LSH_7040002	Nivel alto de tanque de agua limpia			1		
LSM_7040002	Nivel medio de tanque de agua limpia			1		
LSL_7040002	Nivel bajo de tanque de agua limpia			1		
FT_7040001	Flujo de agua de condensados en la salida	1				
FT_7040002	Flujo de agua limpia en la salida	1				
KV_7040001	Válvula de entrada agua de condensados COMANDO OPEN/CLOSE				1	
KV_7040001_ZSO	Válvula de entrada agua de condensados CONFIRMACIÓN OPEN			1		
KV_7040001_ZSC	Válvula de entrada agua de condensados CONFIRMACIÓN CLOSE			1		
KV_7040002	Válvula de entrada agua limpia COMANDO OPEN/CLOSE				1	
KV_7040002_ZSO	Válvula de entrada agua limpia CONFIRMACIÓN OPEN			1		
KV_7040002_ZSC	Válvula de entrada agua limpia CONFIRMACIÓN CLOSE			1		
FVSS_7040001	Arrancador suave de bomba agua de condensados					1
FVSS_7040002	Arrancador suave de bomba agua limpia					1
	Total	2		10	2	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Elenco área de polímero

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus
	Tanque de polímero					
LSH_7050001	Nivel alto del tanque dosificación polímero			1		
LSL_7050001	Nivel bajo del tanque dosificación polímero			1		
LSH_7050002	Switch de nivel alto de tanque agitador polímero			1		
KV_7050001	Válvula entrada de agua a tanque agitador polímero COMANDO OPEN/CLOSE				1	
KV_7050001_ZSO	Válvula entrada de agua a tanque agitador polímero CONFIRMACION OPEN			1		
KV_7050001_ZSC	Válvula entrada de agua a tanque agitador polímero CONFIRMACION CLOSE			1		
KV_7050002	Válvula descarga tanque agitador polímero COMANDO OPEN/CLOSE				1	
KV_7050002_ZSO	Válvula descarga tanque agitador polímero CONFIRMACION OPEN			1		
KV_7050002_ZSC	Válvula descarga tanque agitador polímero CONFIRMACION CLOSE			1		
PSH_7050001	Switch de alta presión dosificación polímero			1		
MM_7050001	Motor de agitador polímero				1	
VFD_7050001	Variador de frecuencia bomba dosificadora de polímero					1
	Total	0	0	8	3	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Elenco filtro de banda horizontal**

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus
	Filtro de banda horizontal					
LT_7060001	Nivel filtro banda	1				
FT_7060001	Flujo de efluentes al filtro de banda horizontal	1				
ZSX_7060001	Switch de posición lado izquierdo de banda			1		
ZSY_7060001	Switch de posición lado derecho de banda			1		
ZS_7060001	Switch de posición de tolva MO Y19A					
PSL_7060001	Switch de presión baja en el aire comprimido en filtro de banda			1		
PE_7060001	Paro de emergencia en filtro de banda horizontal			1		
KV_7060001_O	Válvula lodo ceniza y arena a filtro de banda horizontal COMANDO OPEN				1	
KV_7060001_C	Válvula lodo ceniza y arena a filtro de banda horizontal COMANDO CLOSE				1	
KV_7060001_ZSO	Válvula lodo ceniza y arena a filtro de banda horizontal CONFIRMACION OPEN			1		
KV_7060001_ZSC	Válvula lodo ceniza y arena a filtro de banda horizontal CONFIRMACION CLOSE			1		
VFD_7060001	Variador de frecuencia de filtro de banda horizontal					1
FVSS_7060001	Arrancador suave de bomba de vacío					1
PE_7060002	Para de emergencia en tolva MO Y19A			1		
	Total	0	0	7	2	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Elenco tanque de salida**

TAG	DESCRIPCIÓN	AI	AO	DI	DO	Profibus
	Tanque pulmón de salida					
LT_7070001	Nivel tanque pulmón agua reuso	1				
FT_7070001	Flujo agua reuso lavado caña	1				
FT_7070002	Flujo agua reuso lavado gases	1				
	Total de señales por área	3	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Número de módulos I/O

Requerimiento total de I/O	
Entradas analógicas por módulo	8
Entradas analógicas requeridas	8
Módulos requeridos	1,0
Módulos a utilizar	2,0
Canales disponibles	8
Salidas analógicas por módulo	8
Salidas analógicas requeridas	0
Módulos requeridos	0,0
Módulos a utilizar	0
Canales disponibles	0
Entradas discretas por módulo	16
Entradas discretas requeridas	34
Módulos requeridos	2,1
Módulos a utilizar	3
Canales disponibles	14
Salidas discretas por módulo	16
Salidas discretas requeridas	10
Módulos Requeridos	0,6
Módulos a Utilizar	1,0
Canales disponibles	6
Entradas de RTD por módulo	8
Entradas RTD requeridas	0
Módulos Requeridos	0
Módulos a Utilizar	0
Canales disponibles	0
Motores en Profibus DP	11
Módulos de Comunicación profibus DP	1
Total de módulos requeridos I/O	6,0
Espacio requerido por fuente de alimentación	1,0
Espacio requerido por CPU	2,0
Espacio de módulo profibus DP	1,0
Espacio total en Rack	12,0
Espacios disponibles	2

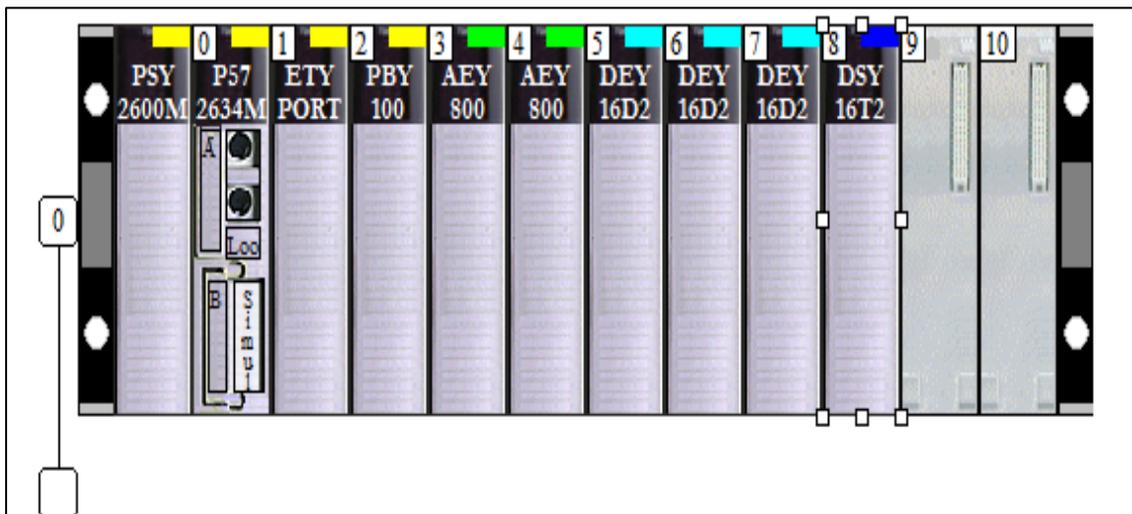
Fuente: elaboración propia.

Aunque todos los elementos del sistema de control son importantes, a continuación se presentan más detalles de las características y funciones del PLC y la HMI a utilizar.

4.1.1. PLC

Todas las señales analógicas serán introducidas a los diferentes módulos del PLC para que éste, interprete y realice la lógica para determinar si es necesario que la planta de tratamiento se detenga por falta de garantías de seguridad. Para el diseño se ha de utilizar un PLC de la marca *Schneider Electric Premium* con sus respectivos módulos de I/O como se observa en la siguiente imagen:

Figura 13. PLC



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

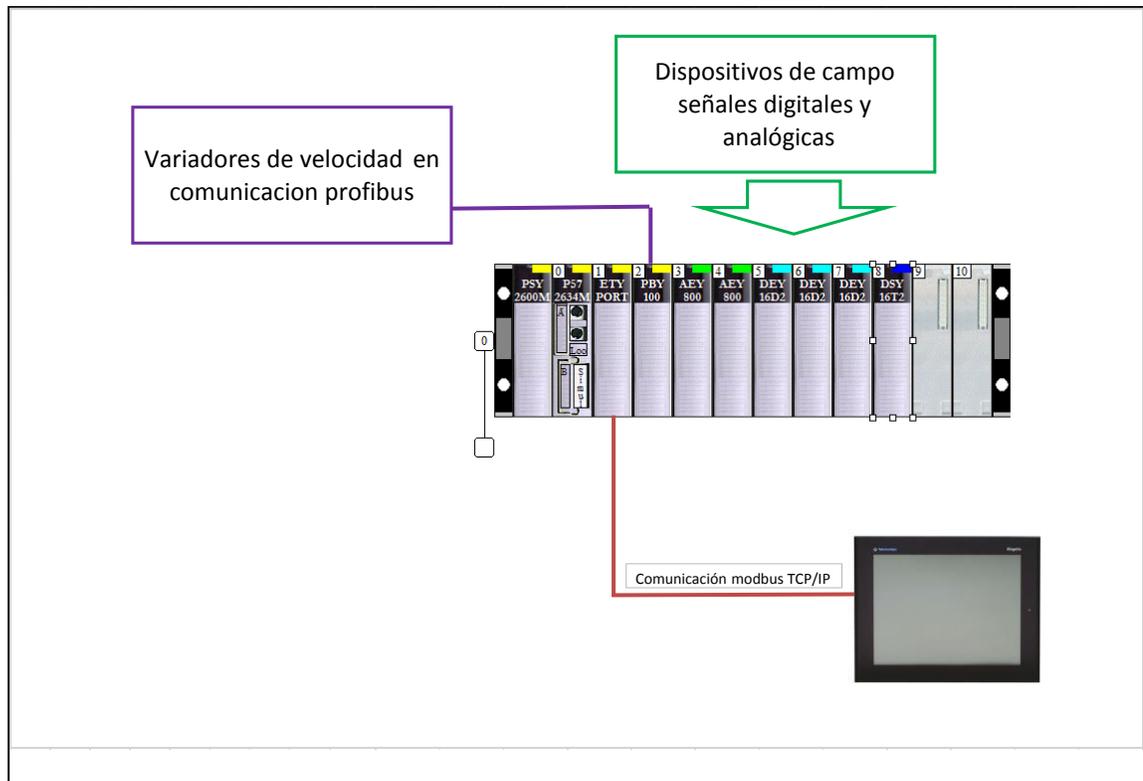
En la siguiente tabla se detallan los catálogos del PLC marca *Schneider Electric Premium* a utilizar:

Tabla XII. Catálogos de PLC

Cantidad	Descripción	Catálogo
1	Rack para PLC Premium para 12 slot	BMXXBP1200
1	Fuente de alimentación para PLC Premium	TSX PSY 2600M
1	CPU Premium con puerto Ethernet con modbus TCP/IP integrado	TSX P57 2634M
1	Módulo de comunicación Profibus DP	TSX PBY 100
2	Módulo de entradas analógicas configurables para 4-20mA, 0-20mA, 0-10 y 0-5 V	TSX AEY 800
3	Módulo de entradas digitales de 24VDC, 16 DI	TSX DEY 16D2
1	Módulo de salidas digitales de 24VDC, 16DI	TSX DSY 16T2

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Disposición de PLC



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. HMI

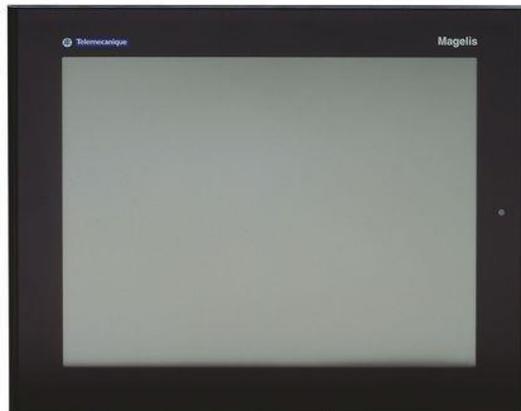
En ella se puede visualizar las siete áreas en las que se divide la planta y se realizan dibujos de la planta de tratamiento para que esta sea representada en la HMI y así facilitar la operación al operador. La pantalla HMI debe desplegar alarmas, advertencias, registro de eventos y causas, entre otras funciones. La HMI propuesta es la siguiente:

Tabla XIII. **HMI propuesta**

Cantidad	Descripción	Catálogo
1	Pantalla HMI de 10,7" TFT 640 x 480 pixeles	HMI XBTGT5330

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **HMI XBTGT5330**



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=HMI+XBTGT5330&espv=2&biw=1517&bih=735&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=>. Consulta: Agosto de 2015.

4.2. Presentación de diagramas del sistema de control

Una parte esencial para el diseño del sistema de control para la planta de tratamiento, son los diagramas de comunicación y de P&ID, ya que son herramientas para saber cómo se comunican los elementos del sistema y cómo funciona.

4.2.1. Diagrama de comunicación

Este diagrama se utiliza para explicar gráficamente como se comunica el sistema con la HMI y con los variadores de campo.

4.2.2. Diagramas P&ID

En estos diagramas se presentan los elementos que integran el sistema de control, incluyendo las tuberías, los instrumentos y las estrategias de control. En la propuesta, este conjunto de diagramas se dibujan para:

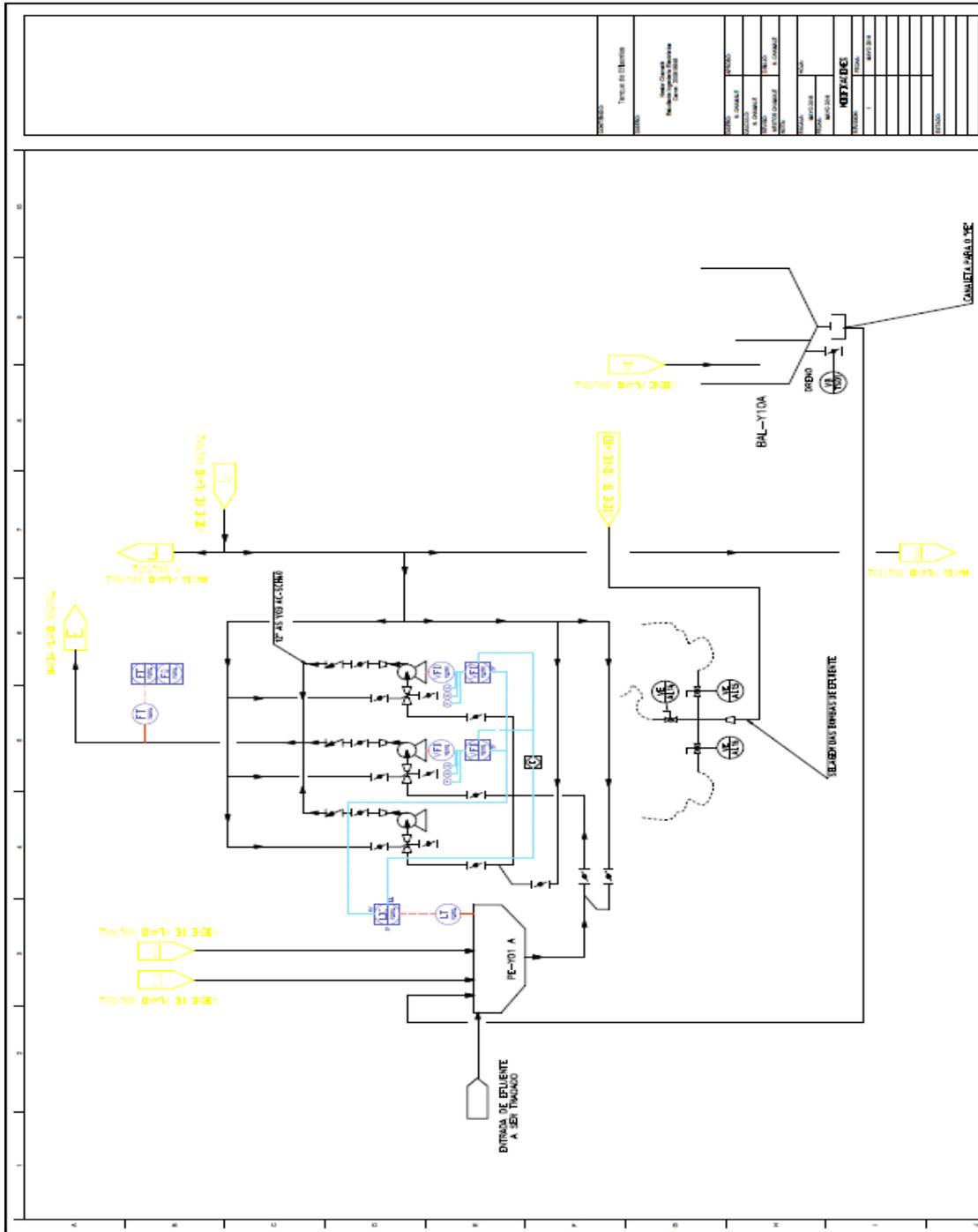
- Definir y organizar el proyecto
- Representar gráficamente cómo funciona el sistema de control
- Aportar una herramienta de control sobre el ejecutor del proyecto
- Registrar los términos bajo los cuales se construye el sistema de control
- Dejar una guía para mantenimientos o actualizaciones del sistema

Un ingeniero enfocado en el área de instrumentación, el encargado de supervisión del sistema de control o una persona visitante con conocimientos sobre la simbología empleada, puede leer en los diagramas, el funcionamiento de la planta sin necesidad de ver el programa dentro del PLC.

Para empezar a programar, es necesario contar con los diagramas P&ID por ser la guía de la programación del sistema de control propuesto. Por tanto, se dibuja un diagrama para cada una de las áreas en las que se seccionó la planta de tratamiento, debiendo ser consultados para poder implementar el sistema de control.

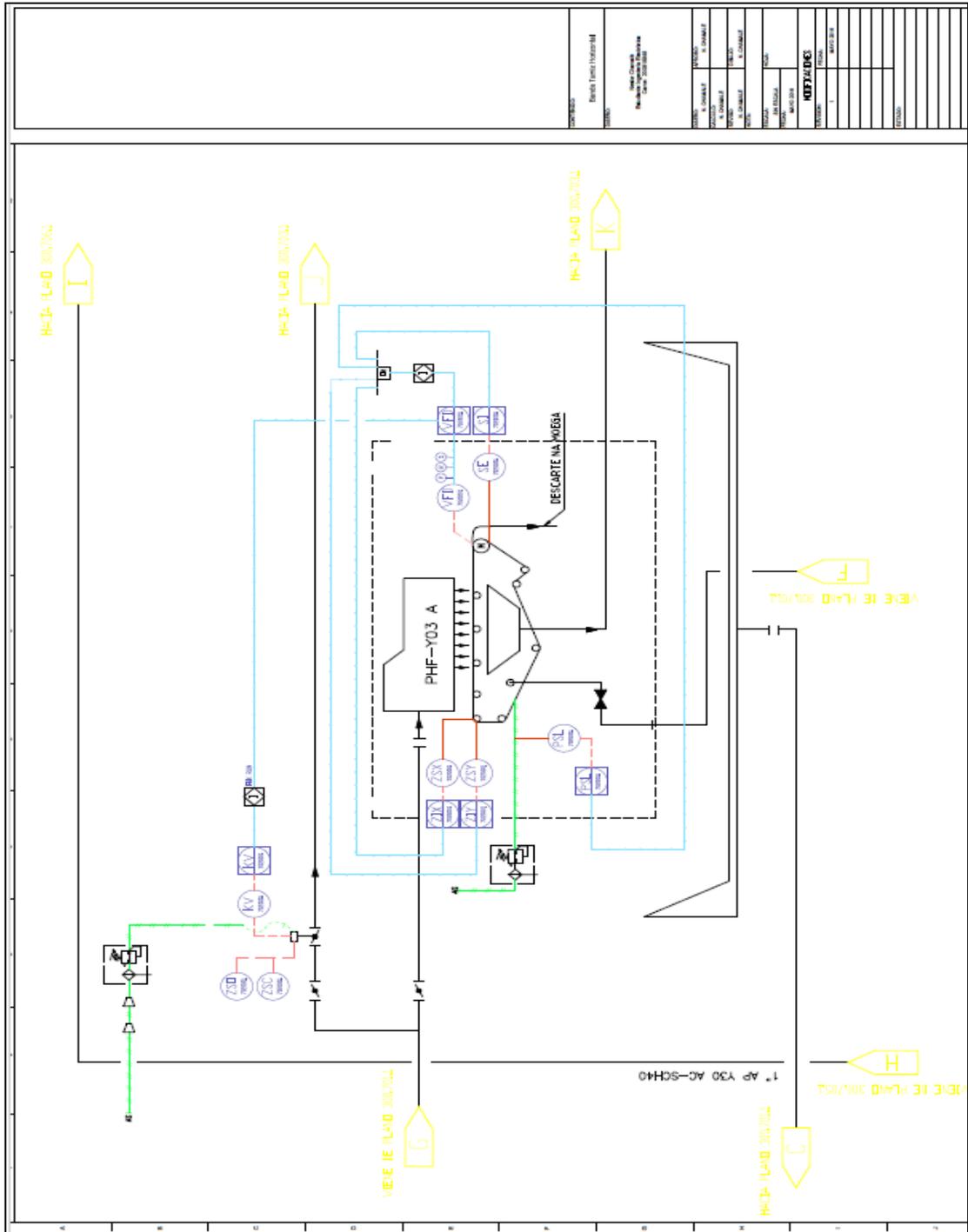
Estos diagramas se presentan a continuación aunque, debido al formato y los márgenes de la tesis, algunos detalles deben ampliarse.

Figura 17. Diagrama P&ID, tanque efluentes



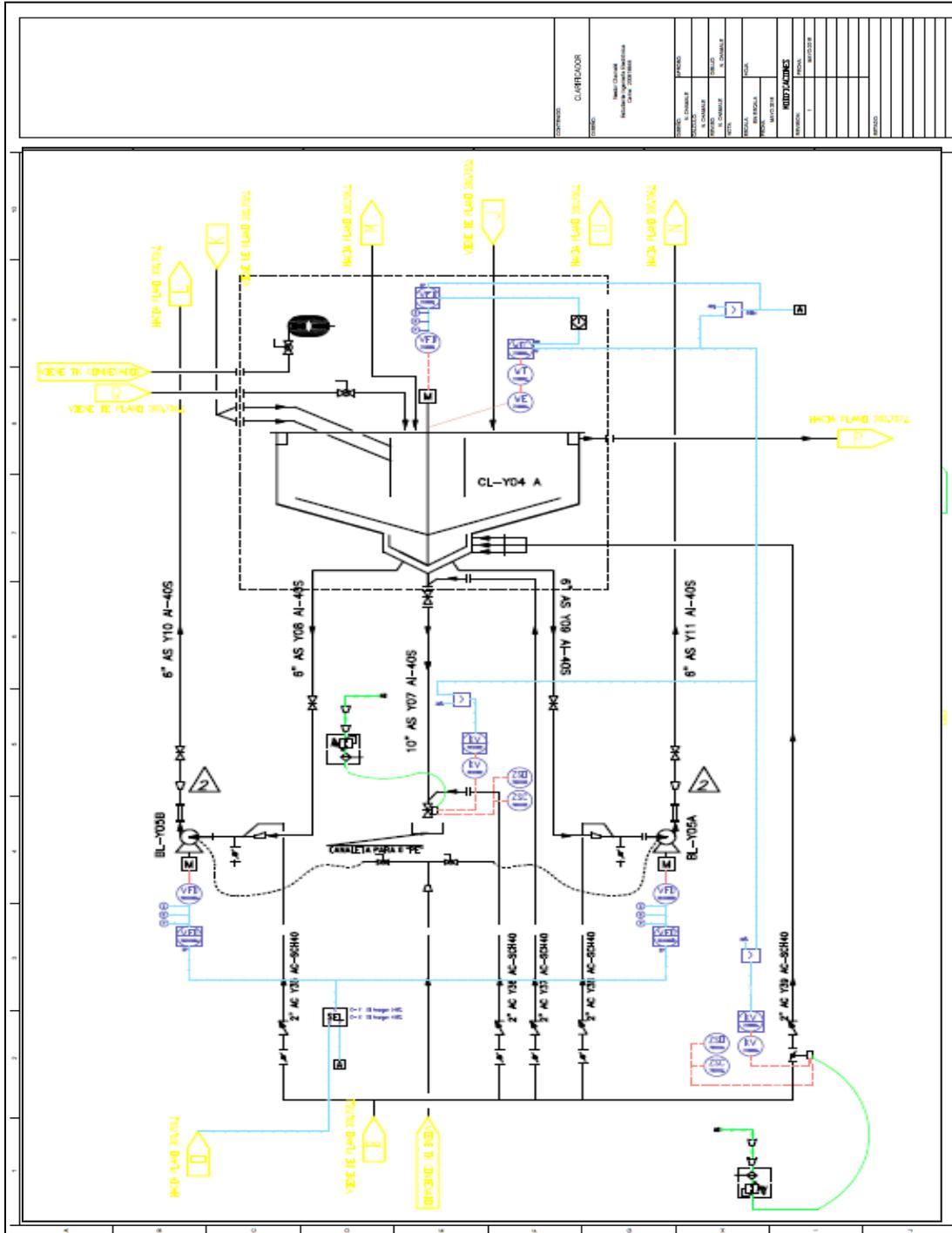
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 18. Diagrama P&ID, banda tamiz horizontal



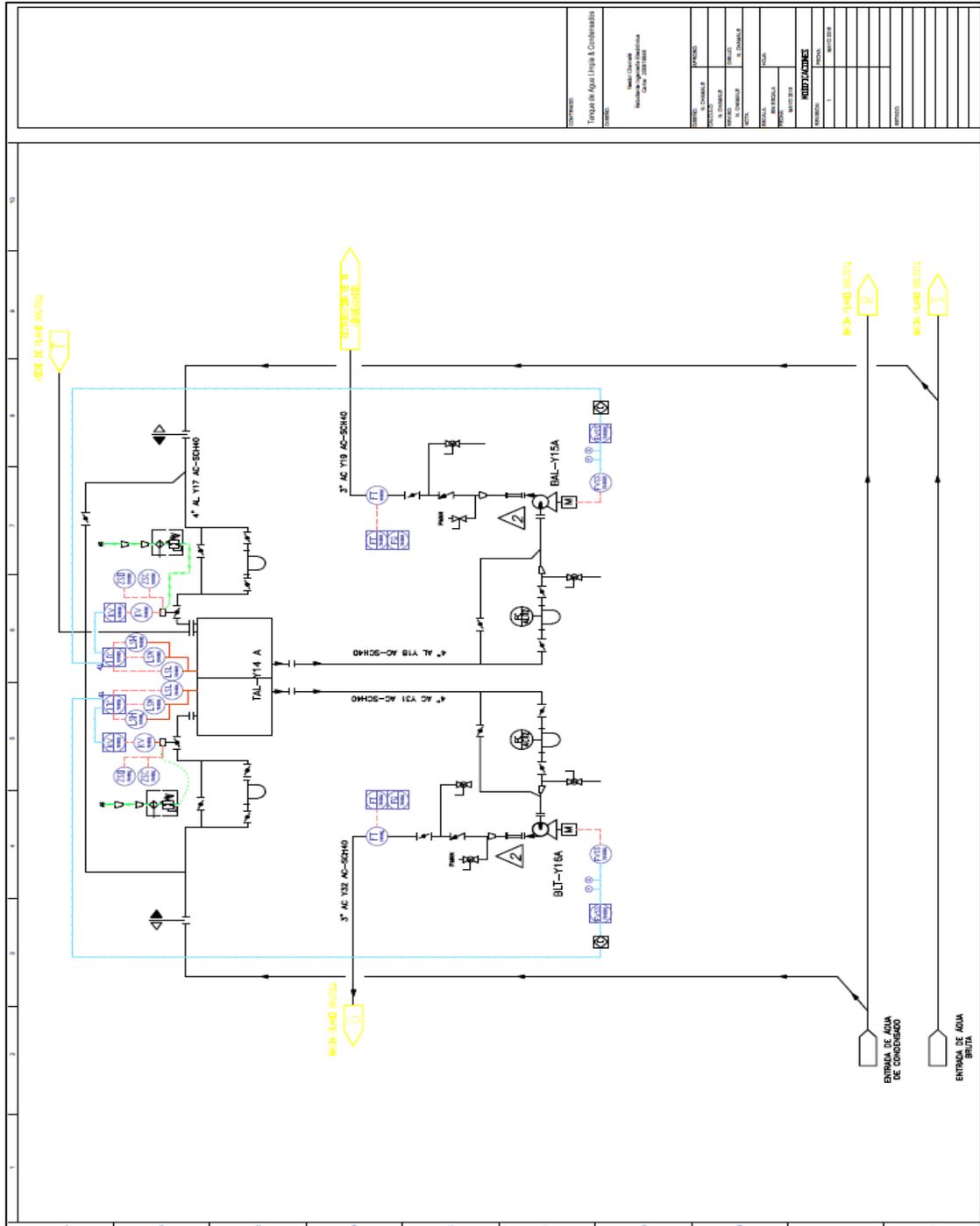
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 19. Diagrama P&ID, clarificador



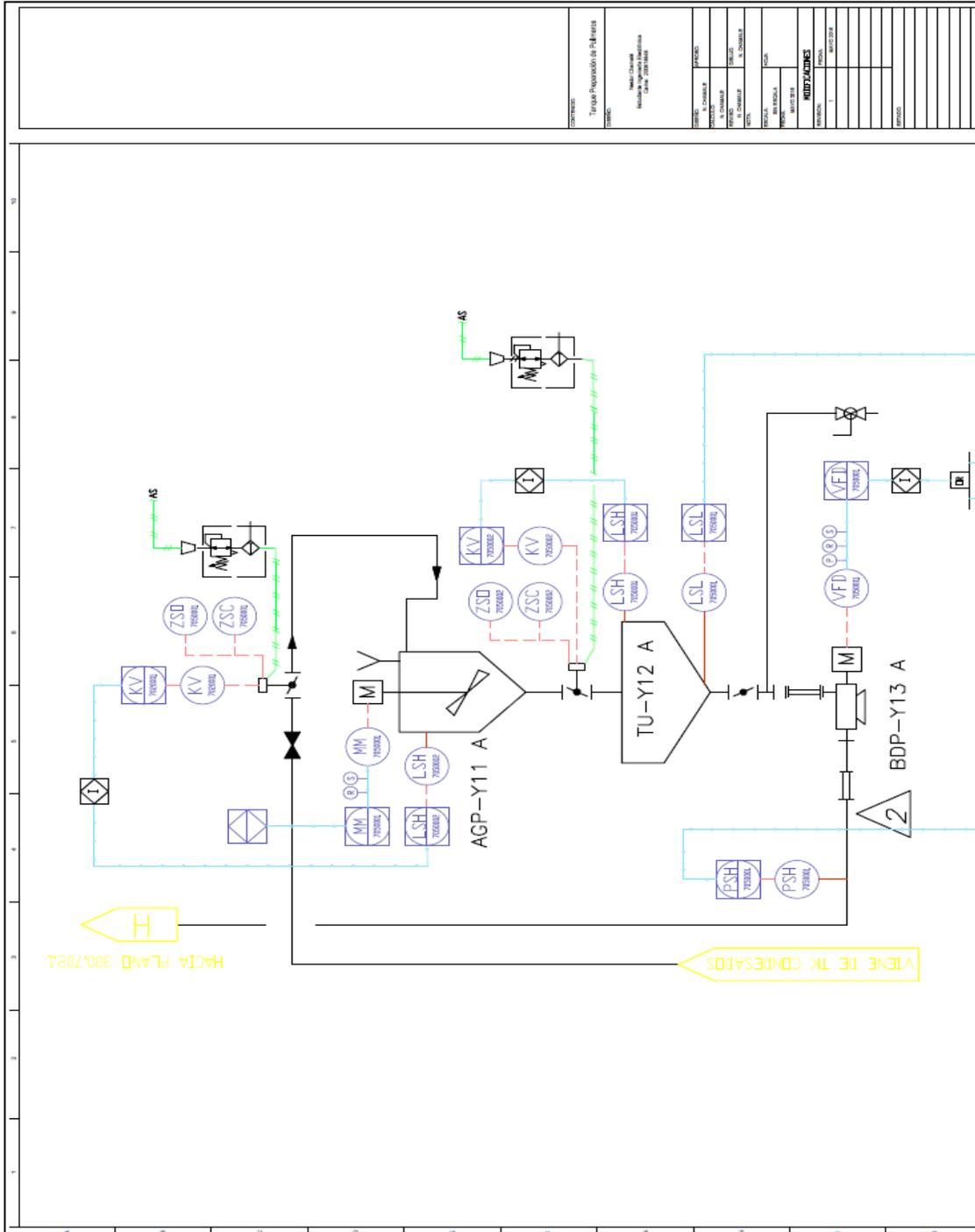
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 20. Diagrama P&ID, agua limpia y condensados



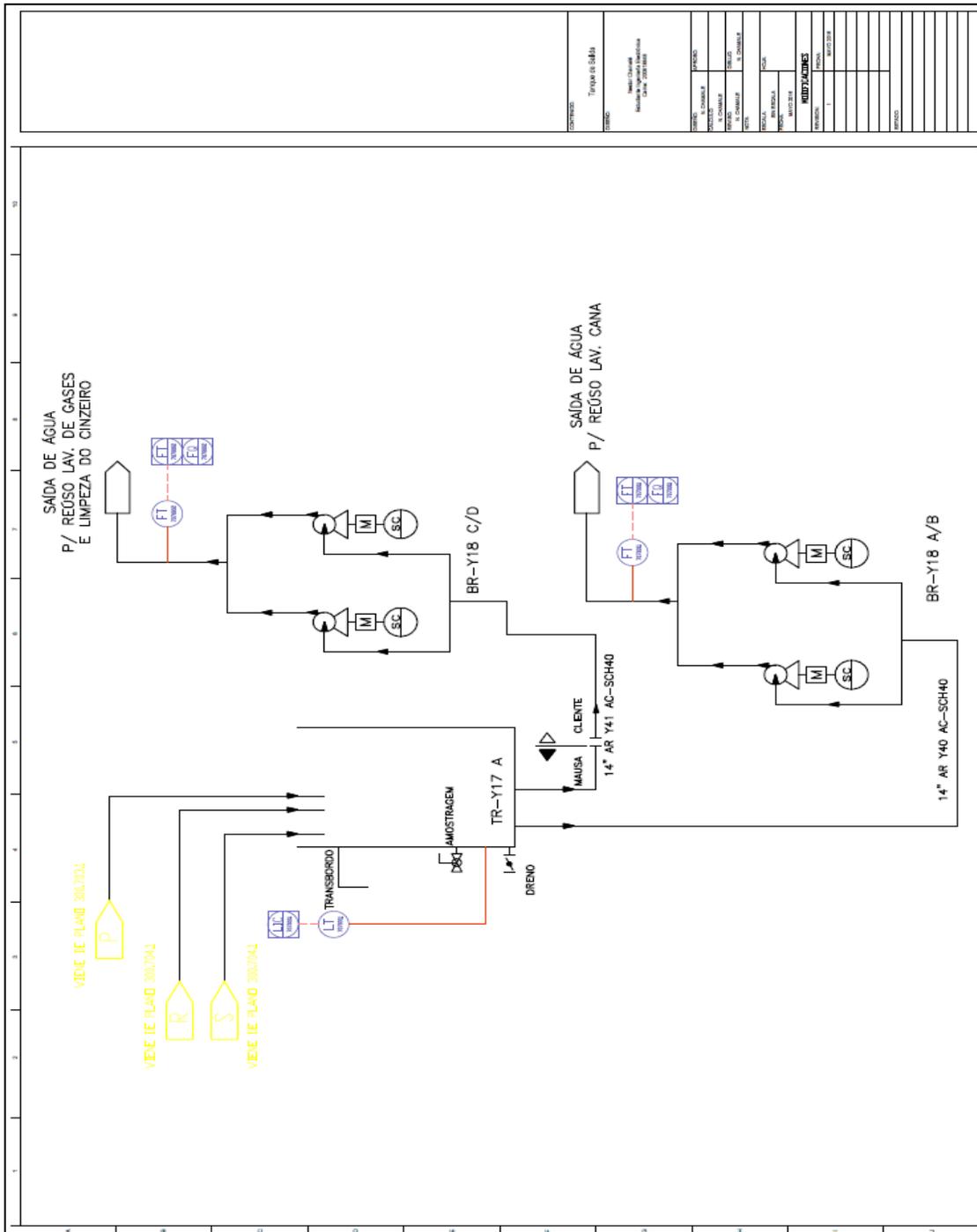
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 21. Diagrama P&ID, preparación de polímeros



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 23. Diagrama P&ID, banda tamiz horizontal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

CONCLUSIONES

1. Hay diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua que operan en Guatemala, las cuales dependen del proceso que se aplique o de la utilidad que se le desee dar al resultado de su operación. Para obtener agua apta para el consumo humano se utilizan plantas potabilizadoras; mientras que a nivel industrial generalmente se busca reutilizar el agua resultante de sus procesos productivos utilizando para ello plantas de tratamiento de agua residual. De acuerdo al proceso, la planta de más uso es la de osmosis inversa.
2. El estudio de las variables de control de una planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña inicia con la observación directa del funcionamiento de la planta, seccionándola en siete áreas: el tanque de efluentes, el filtro de banda tamiz, clarificador, filtro de banda, área de polímero, área de agua limpia y condensados y el tanque de salida. En cada área se identifican variables que permiten optimizar la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento: nivel, presión, flujo, posición y torque.
3. El equipo básico que se propone para el sistema de control está integrado por: sensores, PLC, HMI y actuadores. Para medir las magnitudes físicas de las variables identificadas se utilizan sensores, tales como: un sensor de nivel de radar para el tanque de efluentes, un sensor final de carrera en el filtro de banda y sensores de presión en diferentes puntos de la planta, entre otros. La información proporcionada por los sensores es recibida y transformada por el PLC marca Schneider

Electric; para visualizar las áreas de la planta y sus respectivas variables de control se utiliza una pantalla HMI marca Siemens por ser confiables y altamente recomendados en la industria a nivel mundial. Por último, se tienen los actuadores que son los que han de ejecutar la información u orden que ingrese el operador a través de la interfaz.

4. El sistema de control de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña diseñado, se presenta en el capítulo 4 del presente trabajo de graduación. Dicho capítulo incluye el elenco del sistema, las características del PLC y el HMI recomendado y sus respectivos diagramas de comunicación y P&ID.

RECOMENDACIONES

1. Para conocer el funcionamiento de una planta de tratamiento se pueden utilizar sus respectivos diagramas mecánicos, planos de la instalación o su manual de operación; aunque la observación directa de cada área al visitar la planta, proporciona una mejor perspectiva de su funcionamiento. Para escoger cualquiera de las opciones anteriores, debe tomar en consideración los recursos con los que se cuenta y la disponibilidad de la información.
2. Es necesario saber que aunque las plantas de tratamiento de agua residual trabajan bajo el mismo concepto, las variables de control serán distintas en cada una debido al tipo de proceso que se aplica para tratar el agua, el tipo de proceso de donde proviene el agua a tratar y la finalidad con la que se trata el agua.
3. Para poder proponer equipos para el sistema de control, no hay que olvidar que primero se define qué es lo que se quiere conocer y cómo se desea hacerlo; es decir, se establecen las necesidades para buscar con que satisfacerlas.
4. Si se quiere implementar el diseño del sistema de control de la planta de tratamiento de agua residual del proceso de lavado de caña que se presenta como propuesta, es necesario dibujar los diagramas Loops y eléctricos para poder construir el panel de control; programar el PLC y la HMI; al tener todo instalado, se realiza el comisionamiento; y si todo está en orden, se pone en marcha.

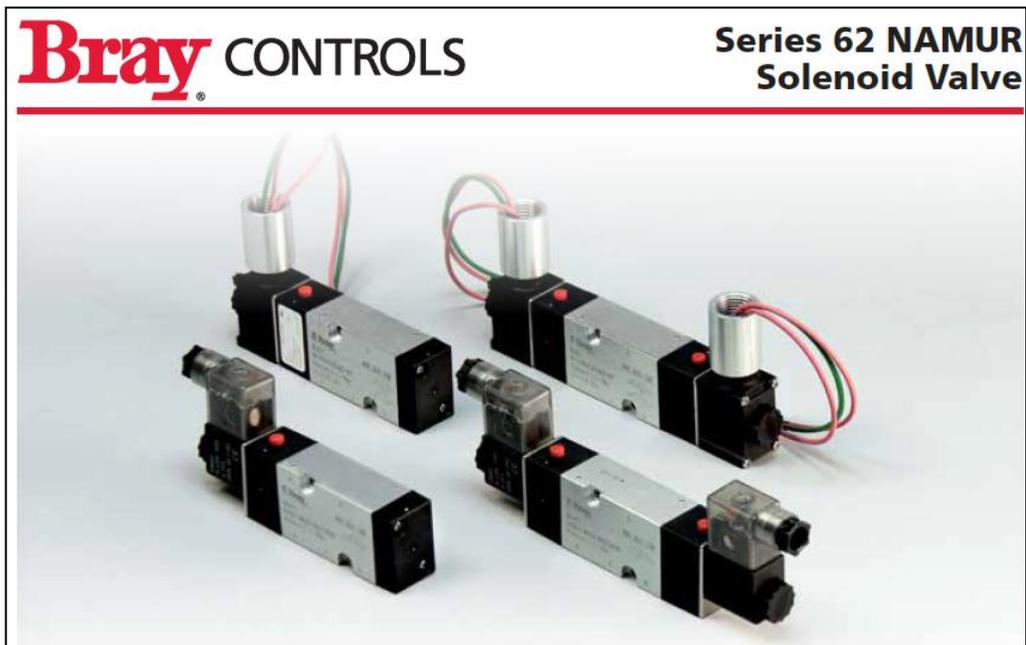
BIBLIOGRAFÍA

1. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*. México: Limusa, 2008. 292 p.
2. HERNÁNDEZ PADILLA, Selvin Estuardo. *Estudio e implementación de sistema de control de una planta de tratamiento de agua, para uso en calderas de alta presión, en generación de energía eléctrica*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 138 p.
3. ISA-5. 1-1984 (R1992). *The instrumentation system and automation society Instrumentation symbol and identification*. Norma ISA 1992.
4. RODRÍGUEZ ALARCÓN, Gustavo Adolfo. *Diseño de la automatización del equipo de tratamiento de agua de una fábrica de dulces*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 103 p.

ANEXOS

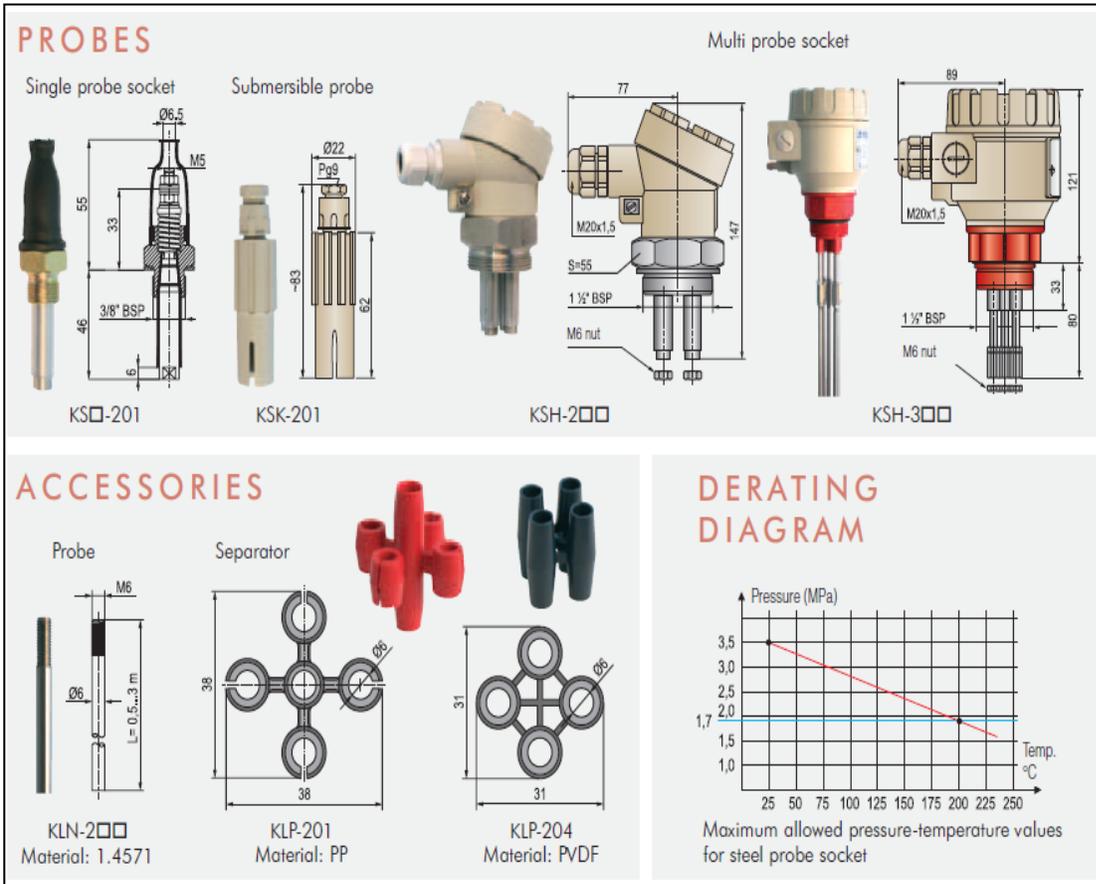
Entre los elementos que también integran el sistema de control se pueden mencionar las electroválvulas para los actuadores y los *switch* de nivel para el tanque de condensados y agua limpia. Los cuales se presentan en las siguientes figuras.

Anexo 1. Electroválvulas



Fuente: [https://www.google.com.gt/search?q=Electrov%C3%A1lvulas+baby+control&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=.](https://www.google.com.gt/search?q=Electrov%C3%A1lvulas+baby+control&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=) Consulta: Agosto de 2015.

Anexo 2. Switch de nivel



Fuente: <https://www.google.com.gt/search?q=Electrov%C3%A1lvulas+baby+control&espv=2&biw=1517&bih=735&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=>. Consulta: Agosto de 2015.