



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO EN AUTOMATIZACIÓN
Y CONTROL**

**TEMA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
AUTOMATIZACIÓN PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
AGUA ESTRUCTURADA ENVASADA**

AUTOR: RECALDE GÓMEZ, ALEX HORACIO

DIRECTOR: AYALA TACO, JAIME PAÚL

SANGOLQUÍ - ECUADOR

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA ESTRUCTURADA ENVASADA”**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **RECALDE GÓMEZ ALEX HORACIO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 3 de marzo del 2017

Atentamente,

Ing. Paúl Ayala, Msc.
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ALEX HORACIO RECALDE GÓMEZ**, con cédula de identidad N° 1803269412, declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA ESTRUCTURADA ENVASADA**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 3 de marzo del 2017

Alex Horacio Recalde Gómez



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ALEX HORACIO RECALDE GÓMEZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA ESTRUCTURADA ENVASADA”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 3 de marzo del 2017

Alex Horacio Recalde Gómez

*Este trabajo lo dedico a mis padres,
Luis Recalde y Fedelina Gómez*

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi director de proyecto el ingeniero Paúl Ayala por haberme apoyado durante la realización de esta investigación tan interesante.

A mis padres Luis Recalde y Fedelina Gómez por haberme comprendido y apoyado durante el tiempo de realización de este trabajo.

Al los ingenieros Hugo Ortiz y Luis Orozco por haberme apoyado en los procesos previos y posteriores al inicio del proyecto.

Y a todas las personas que de una u otra forma me han apoyado y alentado en este proceso.

Alex Recalde

ÍNDICE GENERAL

Glosario		xiii
1. Ingeniería Conceptual		1
1.1. Introducción		1
1.2. Objetivos		2
1.2.1. Objetivo General		2
1.2.2. Objetivos Específicos		2
1.3. Requerimientos Funcionales del Sistema		2
1.4. Descripción del Proceso		3
1.4.1. Operación de la Instalación		3
1.4.2. Principios de Operación		3
1.4.3. Suministro de Agua		3
1.4.4. Unidad de Purificación Primaria		3
1.4.5. Unidad de Ozonización y Filtración por Multicapa		4
1.4.6. Unidad de Estructuración		4
1.4.7. Unidad de Embotellado		5
1.4.8. Gestión y Supervisión		5
1.4.9. Condiciones de Funcionamiento		5
1.4.10. Condiciones de Mantenimiento y Seguridad		5
1.4.11. Requerimientos de Desempeño		6
1.5. Diagrama de Bloques del Proceso		6
1.6. Diagrama de Flujo del Proceso (PFD)		6
1.7. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)		6
1.7.1. Norma ISA-S5.1		7
1.8. Definición y Especificación de Equipos		8
1.8.1. Filtro de Arena		8
1.8.2. Filtro de Carbón Activado		9

1.8.3.	Filtro Multicapa	9
1.8.4.	Máquina de Ozonización	11
1.8.5.	Máquina de Estructuración	13
1.8.6.	Máquina Embotelladora Automática	14
1.8.7.	Bomba Centrífuga	14
1.8.8.	Tanque de Almacenamiento	15
1.8.9.	Tubería	15
1.8.10.	PLC	15
1.8.11.	Válvula de Control	17
1.8.12.	Sensor de Nivel	19
1.9.	Control del Proceso	20
2.	Diseño del Sistema	22
2.1.	Automatización del Proceso de Purificación	22
2.1.1.	Diseño y Desarrollo	22
2.1.2.	Metodología	22
2.1.3.	Descripción del Modelo de Purificación	23
2.1.4.	Controlador de Nivel	25
2.1.5.	Controlador de Presión	25
2.1.6.	Programación del PLC	26
2.2.	Diseño del Sistema HMI-SCADA	27
2.3.	Cálculos Matemáticos	29
2.3.1.	Pérdida de Presión	29
2.3.2.	Potencia de la Bomba	35
3.	Análisis del Sistema	38
3.1.	Análisis del Proceso de Purificación	38
3.1.1.	Análisis del Proceso Operacional	38
3.1.2.	Análisis de las Propiedades Físico-Químico-Biológicas	39
3.2.	Modelado del Proceso de Purificación	41
3.3.	Análisis de la Estructura Molecular del Agua	43
3.4.	Monitorización de la Calidad de Agua	44
3.5.	Simulación del Sistema de Control	45
3.5.1.	Resultado de la Simulación	47
3.5.2.	Estado de las Alarmas	48
3.6.	Análisis Económico Financiero	49

4. Conclusiones y Recomendaciones	52
4.1. Conclusiones	52
4.1.1. Sistema de Purificación	52
4.1.2. Sistema de Automatización	52
4.2. Recomendaciones	53
4.2.1. Sistema de Purificación	53
4.2.2. Sistema de Automatización	53
Anexos	56
A. Diagrama P&ID	57
B. Hoja de Datos	58
B.1. Filtro de arena	58
B.2. Filtro de carbón activado	59
B.3. Filtro multicapa	59
B.4. Máquina de ozonización	60
B.5. Máquina de estructuración	61
B.6. Máquina embotelladora automática	61
B.7. Bomba centrífuga	62
B.8. Tanque de almacenamiento	63
B.9. Tubería	63
B.10. PLC	63
B.11. Válvula solenoide	64
B.12. Sensor de nivel	65
C. Programa del PLC	66
D. Variables de enlace PLC HMI	68

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Condiciones de funcionamiento de los actuadores	24
2.	Variables de entrada del PLC	27
3.	Variables de salida del PLC	27
4.	Pérdida de presión en tuberías	32
5.	Pérdida de presión en componentes	34
6.	Pérdida de presión en filtros	35
7.	Pérdida de presión total por elemento	35
8.	Pérdida de presión total por área	35
9.	Carga dinámica total	36
10.	Potencia de la bomba	37
11.	Resumen final del análisis de las propiedades del Agua	45
12.	Hoja de datos filtro de arena	58
13.	Hoja de datos filtro de carbón activado	59
14.	Hoja de datos filtro multicapa	60
15.	Hoja de datos máquina de ozonización	60
16.	Hoja de datos máquina de estructuración	61
17.	Hoja de datos máquina embotelladora automática	62
18.	Hoja de datos bomba centrífuga	62
19.	Hoja de datos tanque de almacenamiento	63
20.	Hoja de datos tubería	63
21.	Hoja de datos PLC	64
22.	Hoja de datos válvula solenoide	65
23.	Hoja de datos sensor de nivel tipo flotador	65
24.	Variables de enlace entre el PLC y el HMI	68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Diagrama de bloques	6
2.	Diagrama de flujo de proceso	7
3.	Filtro de arena Pure Aqua MF-450 70F1855MM-SS	8
4.	Filtro de carbón activado Pure Aqua MF-450 70F24100AC-SS	9
5.	Filtro multicapa Naturally Filtered MG-30	10
6.	Máquina de ozonización Norland SSOZ-30A	12
7.	Funcionamiento del sistema de ozono de flujo lateral.	12
8.	Máquina de estructuración BCX Ultra Rife Machine	13
9.	Máquina embotelladora automática Norland Triumph 12000	14
10.	Bomba centrífuga higiénica Sudmo Pentair SP Series	15
11.	Tanque de almacenamiento Pentair	16
12.	Tubería Pentair	16
13.	Controlador programable de automatización AB CompactLogix 5370	17
14.	Operación de la válvula solenoide	18
15.	Válvula solenoide STC 2S400	18
16.	Mecanismo interruptor de boya	19
17.	Sensor de nivel tipo boya Bulletin 840-D1	20
18.	Diagrama de bloques con los elementos de un lazo de control de procesos	21
19.	Diagrama de bloques del proceso de purificación	23
20.	Diagrama del modelo del sistema de purificación	24
21.	Diagrama de bloques del control de nivel	25
22.	Diagrama de bloques del control de presión	25
23.	Diagrama de flujo del control de nivel	26
24.	Jerarquía para pantallas HMI	28
25.	HMI de la planta	29
26.	Modelamiento del proceso de purificación del agua	42

27.	Resultado del modelamiento del proceso de purificación	42
28.	Diferencia entre agua estructurada y agua común	43
29.	Emulación del PLC	46
30.	Simulación de la planta con sensor de nivel activado	47
31.	Simulación de la planta con sensor de nivel desactivado	48
32.	Procedimiento en caso de activación de alarmas de nivel	49
33.	Flujo de caja proyectado a 4 años	50
34.	Diagrama P&ID del sistema	57
35.	Programa del PLC	67

GLOSARIO

A

Agua Estructurada Es aquella cuyas moléculas guardan su estructura natural original, poseyendo un ángulo entre hidrógenos de exactamente 104.5° , además de ser microbiológicamente pura, alcalina y sus moléculas capaces de formar una estructura óptima [1] [2]., p. 1.

B

Batch Es un proceso que conduce a la producción de cantidades finitas de material, sometiendo a las cantidades de materiales de entrada a un conjunto ordenado de actividades de procesamiento durante un período finito de tiempo, usando una o más piezas de equipo. Ejemplo: Una línea de embotellado automático., p. 2.

D

DHC Dirt Holding Capacity, Capacidad de Retención de Suciedad, es la cantidad de contaminante que un elemento filtrante puede atrapar y retener antes de que se alcance la presión máxima admisible., p. 8.

F

FRS Functional Requeriments Specification, Especificaciones de Requerimientos Funcionales, definen de forma detallada cómo la planta debe trabajar, esto incluye

pasos operativos, acciones del operador, manipulación y procesamiento de datos, etc. Unos FRS's bien escritos pueden ser implementados en cualquiera de los muchos sistemas de control disponibles en el mercado [3]., p. 2.

H

HMI Human Machine Interface, Interfaz Humano Máquina, es la interfaz a través de la cual el usuario interactúa con el sistema. El usuario también puede activar o desactivar diversas funciones desde la interfaz., p. 5.

P

P&ID Piping & Instrumentation Diagram, Diagrama de Tuberías e Instrumentación, es un diagrama que da una representación gráfica del proceso, que incluye hardware como tuberías y equipos, y software como los sistemas de control; esta información se utiliza para la construcción de diseño y operación de las instalaciones [4]., p. 2.

PLC Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable, es una computadora digital utilizada para la automatización de procesos electromecánicos típicamente industriales [5], tales como en el control de maquinaria en líneas de ensamblaje, control de procesos de manufactura, control de iluminarias etc., p. 15.

S

SCADA Supervisory Control And Data Acquisition, Supervisión Control y Adquisición de Datos, como su nombre indica, no es un sistema de control completo, sino que se centra en el nivel de supervisión; como tal, es puramente un paquete de software que se coloca en la parte superior del hardware al que está interconectado, en general a través de PLCs, u otros módulos de hardware comerciales [6]., p. 5.

RESUMEN

Los problemas de contaminación del agua disponible para consumo humano junto con las preocupaciones de salud, están conduciendo al incremento en el consumo de agua purificada envasada. La causa principal de estos problemas es el escaso control de los diferentes parámetros de calidad de agua potable producida por las entidades gubernamentales. El presente proyecto consiste en diseñar y simular un sistema de automatización para el proceso de producción de agua estructurada embotellada. El sistema recibirá agua desde una fuente externa para almacenarlo en un tanque primario. Luego un primer grupo de filtros, compuesto por arena y carbón, eliminará los primeros contaminantes del agua y el generador de ozono junto con un segundo grupo de filtros removerá los contaminantes restantes. Mediante una máquina de estructuración se obtendrá agua estructurada, apta para el consumo humano. Finalmente la máquina embotelladora automática se encargará de lavar, llenar, taponar, etiquetar y empaquetar las botellas, listas para su entrega. Los métodos de purificación utilizados en el sistema serán naturales y no agresivos, de la misma forma se utilizará equipos fabricados en acero inoxidable para los elementos que están en contacto con el líquido. El medelado del proceso de tratamiento del agua se lo realizará mediante el software Watpro, y la simulación del proceso de producción se lo realizará mediante el software Factory talk view.

Palabras Clave:

AGUA ESTRUCTURADA

PURIFICACIÓN

AUTOMATIZACIÓN

CONTROL

PLC

HMI

SCADA

ABSTRACT

The contamination problems of water available for human consumption along with health concerns are leading to increased consumption of bottled purified water. The main cause of these problems is the poor control of the different quality parameters of drinking water produced by government entities. The present project is to design and simulate an automation system for the process of production of bottled structured water. The system will receive water from an external source to store it in a primary tank. Then a first group of filters, composed of sand and coal, will remove the first contaminants from the water and the ozone generator along with a second group of filters will remove the remaining contaminates. A structuring machine will provide structured water, suitable for human consumption. Finally the automatic bottling machine will wash, fill, plug, label and pack the bottles, ready for delivery. The purification methods used in the system will be natural and non-aggressive, in the same way equipment will be made of stainless steel for the elements that are in contact with the liquid. The water treatment process will be monitored using Watpro software, and the simulation of the production process will be done using the Factory talk view software.

Keywords:

STRUCTURED WATER

PURIFICATION

AUTOMATION

CONTROL

PLC

HMI

SCADA

CAPÍTULO 1

INGENIERÍA CONCEPTUAL

1.1. Introducción

En la última década, el consumo de agua embotellada ha crecido en más del 200 por ciento [7], lo que supera a todas las otras categorías de bebidas. Expertos analistas de esta industria dicen que las tendencias que impulsan las ventas de agua embotellada no solo continuarán, sino que aumentará su influencia en los hábitos de compra de los consumidores.

Por un lado las preocupaciones de salud están conduciendo al incremento en el consumo de agua embotellada, por lo que este producto se ha convertido en el líder de bebidas de elección para los consumidores que están evitando la carbonatación, el azúcar, el alcohol y la cafeína en sus bebidas. Muchas personas tienen miedo de beber agua de la llave porque hay cierto riesgo de exposición a enfermedades o de consumir sustancias tóxicas [8], [7]. Es así que la mayoría de industrias de pequeña escala utilizan métodos convencionales para la fabricación de agua envasada, su proceso de llenado y taponado es manual, lo que crea condiciones antihigiénicas que contaminan el producto final.

Por otro lado existe mucha competitividad entre las empresas de agua envasada, por lo que es indispensable estar a la vanguardia en lo que se refiere a tecnología, eficiencia, responsabilidad ambiental [9], procesos naturales de purificación [10], y productos de calidad que ofrezcan un valor agregado; valor que está dado precisamente al ser un producto definido como Agua Estructurada.

Finalmente, la automatización se define como un sistema de control y tecnologías que reduce el trabajo humano en el campo de la producción. Un sistema de automatización y control es aquel que controla un proceso automáticamente y reduce el factor humano. Tiene la capacidad de iniciar, ajustar el proceso automáticamente y detenerlo cuando se obtiene la salida deseada [11]. El objetivo principal de la automatización es aumentar la productividad

y la calidad de los productos y reducir el costo de producción. Los procesos de manufactura están divididos en 3 tipos: continuos, discretos, y Batch o por lotes; estos últimos tienen características tanto de procesos continuos como de discretos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y simular un sistema de automatización para el proceso de producción de agua estructurada envasada.

1.2.2. Objetivos Específicos

Desarrollar la ingeniería conceptual del sistema.

Diseñar un sistema de control para el proceso de purificación.

Modelar el proceso de purificación.

Simular el sistema de control.

Analizar los resultados obtenidos en el modelado y simulación del proceso.

1.3. Requerimientos Funcionales del Sistema

El éxito de un proyecto radica en la definición de los requerimientos del sistema de control. Esta definición generalmente está contenida dentro de varios documentos, como diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), lista de entradas y salidas I/O y descripción del proceso [3]. Estos documentos se consolidan, en general, en las especificaciones de requerimientos funcionales (FRS), que deben ser completas, consistentes y precisas. Las FRS definen de forma detallada como la planta debe trabajar, esto incluye pasos operativos, acciones del operador, manipulación y procesamiento de datos, etc. Unos FRS's bien escritos pueden ser implementados en cualquiera de los muchos sistemas de control disponibles en el mercado [3].

1.4. Descripción del Proceso

1.4.1. Operación de la Instalación

La instalación será capaz de producir agua estructurada embotellada en tamaños de 300.00 ml hasta 2,000.00 ml, para el desarrollo del análisis económico se centrará específicamente en el tamaño de 500.00 ml, con una producción máxima de 12,000 unidades por hora.

1.4.2. Principios de Operación

El proceso de producción de agua estructurada embotellada inicia con la captación de agua cruda desde una fuente externa hacia el tanque de almacenamiento primario, conforme se presenta en la figura 1 y figura 2. El primer grupo de filtros, compuesto por arena y carbón, eliminará los primeros contaminantes del agua. El generador de ozono junto con el segundo grupo de filtros removerá los contaminates restantes. A través de la máquina de estructuración se obtendrá agua con una estructura molecular óptima, ideal para el consumo humano. Y la máquina embotelladora automática se encargará de lavar, llenar, taponar, etiquetar y empacar las botellas. La capacidad máxima de la planta será de 144,000.00 litros por día o 12,000 unidades de 500 ml por hora, valores obtenidos de un estudio de mercado realizado previamente para este propósito.

1.4.3. Suministro de Agua

Desde una fuente externa se suministrará al sistema agua prefiltrada a temperatura ambiente, esta será enviada hacia el tanque de almacenamiento primario. El caudal aproximado de ingreso debe ser de al menos 30.00 galones por minuto (gpm). La capacidad máxima del tanque será de 7,500.00 litros.

1.4.4. Unidad de Purificación Primaria

Como se muestra en el diagrama de flujo de proceso PFD, figura 2, el proceso empieza con el ingreso de agua hacia el tanque de almacenamiento primario, posteriormente con el uso de una bomba el agua pasa a través del filtro de arena y filtro de carbón hacia el segun-

do tanque de almacenamiento. Estos filtros mejoran el sabor y el olor del agua, reducen la turbidez y remueven los químicos orgánicos, pesticidas, herbicidas e insecticidas. Este proceso permite remover los primeros contaminantes y reacondicionar el agua para la siguiente etapa.

1.4.5. Unidad de Ozonización y Filtración por Multicapa

En esta etapa, el agua entra en un ciclo de desinfección, oxigenación y filtración. Mediante la bomba de la máquina de ozonización, el agua es succionada del tanque de almacenamiento primario y enviada hacia el sistema de ozonificación 1.8.4, en donde recibe una carga regulada de ozono. Luego pasa a través del filtro multicapa, para finalmente llegar al tanque de estructuración.

Este doble proceso permite remover los sólidos suspendidos, parásitos, y bacterias. Tiene la capacidad de remover contaminantes orgánicos e inorgánicos, eliminar olores y sabores, y otros minerales pesados. El recorrido que debe efectuar el agua en el interior de un filtro multicapa se asemeja al proceso de purificación que ocurre en la naturaleza.

1.4.6. Unidad de Estructuración

Es el proceso de purificación final, mediante el cual se obtendrá Agua Estructurada. El agua producto del proceso anterior y almacenada en el tanque de estructuración, se somete a un proceso de reestructuración molecular a través de electrodos de plata, los cuales transmitirán frecuencias de energía electromagnética, lo que otorga al agua una estructura geométrica óptima [1] [2].

La tecnología frecuencial utilizada en el proceso transmite la información vibratoria a las moléculas del líquido, logra su organización, recupera su orientación, vibración, y geometría natural, al transformar de esta manera al agua con las mejores características para un buen metabolismo [2] [12]. Esta tecnología de reestructurar electrónicamente las moléculas del agua, conduce a una tasa de absorción más alta y permite al agua penetrar profundamente en los tejidos y en las células del cuerpo, hidratándolas óptimamente y limpiándolas [1] [2].

1.4.7. Unidad de Embotellado

Este proceso será ejecutado por una máquina embotelladora automática rotatoria de alta velocidad con capacidad máxima de 12,000.00 botellas por hora. Las botellas serán colocadas por el operador en el alimentador rotativo de la máquina y posteriormente atravesarán las estaciones de lavado, llenado, tapado, etiquetado y empacado. Una vez completado este proceso, el producto final estará listo para su entrega.

1.4.8. Gestión y Supervisión

Se instalará una Red de Información y un sistema HMI SCADA, mediante el cual se podrá controlar y supervisar todo el proceso. Esta información será enviada al departamento administrativo para toma de decisiones importantes.

1.4.9. Condiciones de Funcionamiento

La instalación será diseñada para que pueda operar 24 horas al día, 365 días al año. Al tratarse de una planta que se ocupa de productos alimenticios, todas las tuberías y los recipientes en contacto directo con el agua serán fabricados en acero inoxidable de alta calidad.

1.4.10. Condiciones de Mantenimiento y Seguridad

Debido a la utilización de métodos de purificación natural y tecnologías automatizadas de embotellado, la calidad y seguridad del producto está garantizada, ya que cumple con la norma BPM (buenas prácticas de manufactura) como principios de higiene e inocuidad en la elaboración de productos de consumo humano [7]. En diferentes etapas del proceso de elaboración se realizarán los siguientes controles de calidad: control del agua, control del envase, y control de producto terminado.

Cabe señalar también que el sistema HMI descrito anteriormente, permitirá controlar desde una pantalla y en tiempo real cada una de las etapas del proceso de elaboración.

Además de los controles mencionados, se implantarán normas de limpieza tanto para el personal, como para el mantenimiento de equipos y maquinaria.

1.4.11. Requerimientos de Desempeño

La planta al operar 24 horas al día podría ser capaz de producir un total de 4,905,000.00 litros por mes.

1.5. Diagrama de Bloques del Proceso

En el diagrama de bloques, figura 1, es donde todo comienza. Es aquí donde los componentes básicos se analizan y estos determinarán los requisitos básicos del sistema. Este es un diagrama de concepto, con una visión muy amplia del proceso [4].

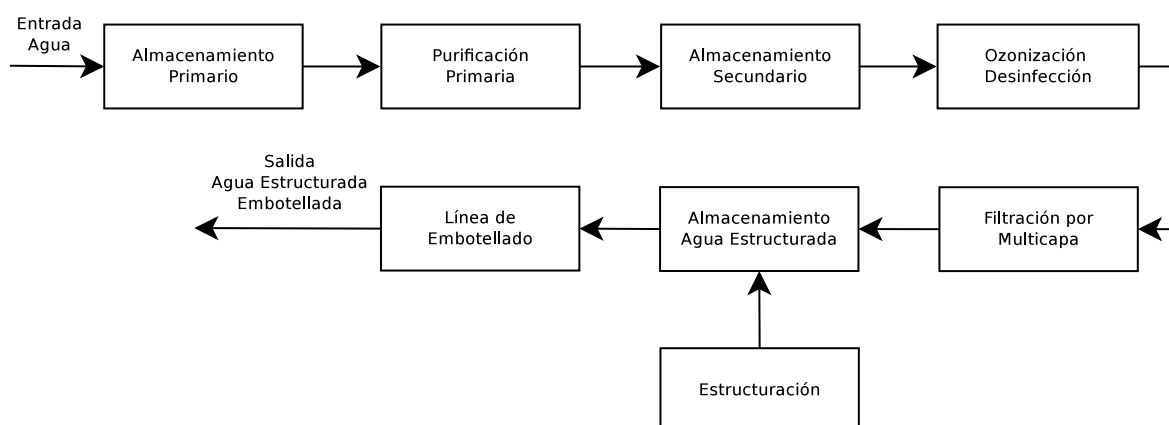


Figura 1: Diagrama de bloques

1.6. Diagrama de Flujo del Proceso (PFD)

En el diagrama de flujo de proceso, figura 2, se puede ver todo el flujo general de los procesos y equipos de la planta. Este no incluye datos de tuberías o instrumentación de menor importancia. El PFD cubre el procesamiento por lotes, las cantidades, la producción y la composición.

1.7. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

El Diagrama de Tubería e Instrumentación, que también puede ser referido como Diagrama de Proceso e Instrumentación, da una representación gráfica del proceso, que incluye

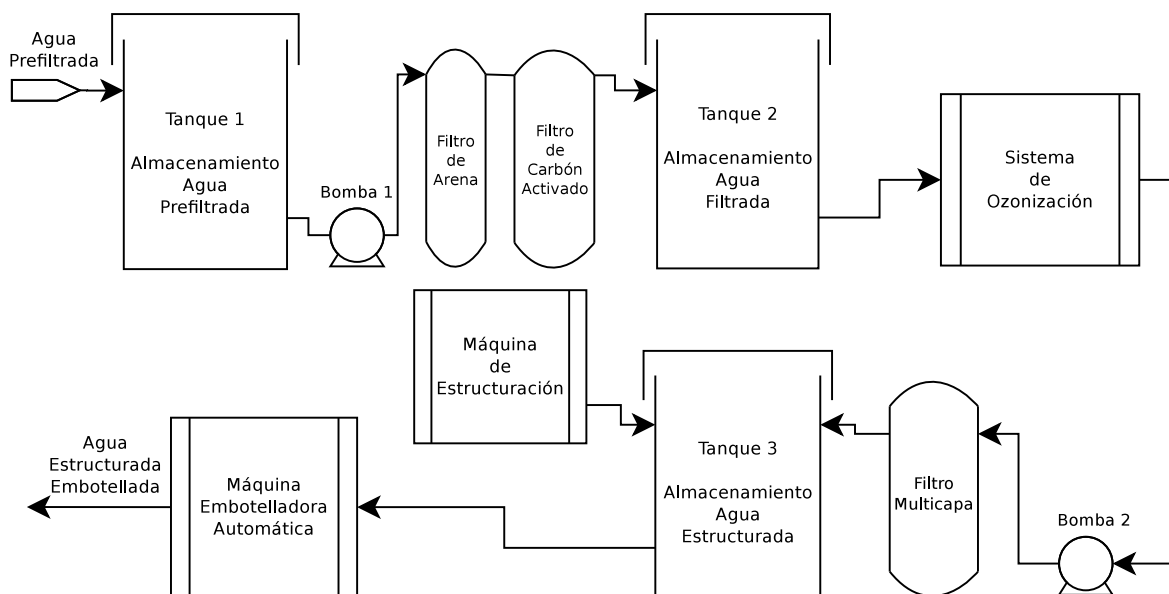


Figura 2: Diagrama de flujo de proceso

hardware como tuberías y equipos, y software como los sistemas de control; esta información se utiliza para el diseño de la construcción y operación de las instalaciones [4]. El P&ID vincula: la descripción del sistema, el diagrama de flujo, el esquema de control eléctrico, y el diagrama de lógica de control. El P&ID define el control del flujo del proceso, en el que el PFD es el circuito principal y el P&ID es el circuito de control. Ver anexo A.

1.7.1. Norma ISA-S5.1

El P&ID estará desarrollado de acuerdo a la norma ANSI/ISA-5.1-2009. Esta norma establece un medio uniforme de representación e identificación de instrumentos o dispositivos y sus funciones inherentes, sistemas y funciones de instrumentación y funciones de software de aplicación utilizadas para medir, supervisar y controlar, al presentar un sistema de designación que incluye esquemas de identificación y símbolos gráficos.

Esta norma es adecuada para el uso en la industria química, el petróleo, la generación de energía, el refinado de metales, y muchas otras industrias de procesamiento continuo, por lotes, de partes discretas y de manipulación de materiales [13]. Estas industrias requieren el uso de esquemas de sistemas de control, diagramas funcionales y esquemas eléctricos para describir la relación con el equipo de procesamiento y la funcionalidad del equipo de medición y control [13].

1.8. Definición y Especificación de Equipos

En este apartado se definirán los diferentes equipos y maquinaria a utilizar en el desarrollo del proyecto con sus respectivas especificaciones técnicas, las cuales se puede ver en el Anexo B.

1.8.1. Filtro de Arena

La filtración por arena se usa frecuentemente para eliminar sólidos en suspensión del agua. El medio de filtración consiste en una capa múltiple de arena con una variedad en tamaño y gravedad específica. Un filtro de arena tiene una capacidad de retención de suciedad DHC de 3 a 6 kg TSS¹/m² de superficie de arena.

Para el proceso de purificación se utilizará el filtro Pure Aqua MF-450 70F1855MM-SS como se observa en la figura 3, como medio de filtración se utilizará antracita, arena y grava de 5 micras. Este filtro está fabricado en acero inoxidable 316L, no requiere de consumibles, posee válvulas de control modular diseñado para una mayor flexibilidad operativa y para un ciclo de retrolavado automático con controlador de tiempo, el medio de filtración es de bajo costo y larga duración, es de fácil mantenimiento y resistente a la suciedad. Ver hoja de datos respectiva en el anexo B.1.



Figura 3: Filtro de arena Pure Aqua MF-450 70F1855MM-SS

Fuente: (Pure Aqua, 2016)

¹Sólidos en Suspensión Totales

1.8.2. Filtro de Carbón Activado

Los filtros de carbón activado se utilizan para purificar líquidos y gases en una variedad de aplicaciones, incluyendo agua potable municipal, procesamiento de alimentos y bebidas, eliminación de olores, control de contaminación industrial. La materia prima utilizada para el carbón activado es cualquier material orgánico con un alto contenido de carbono.

Se utilizará el filtro Pure Aqua MF-450 70F24100AC-SS, que se muestra en la figura 4. Este filtro está fabricado en acero inoxidable 316L, no requiere de consumibles, posee una válvula de control modular diseñado para una mayor flexibilidad operativa y para un ciclo de retrolavado automático con controlador de tiempo, el medio de filtración es de bajo costo y larga duración, es de fácil mantenimiento y resistente a la suciedad. Como medio de filtración se utilizará carbón activado granular (GAC), tratado previamente con la técnica NoRise que evitará un aumento elevado del nivel de pH [14]. Ver hoja de datos respectiva en el anexo B.2.



Figura 4: Filtro de carbón activado Pure Aqua MF-450 70F24100AC-SS

Fuente: (PureAqua, 2016)

1.8.3. Filtro Multicapa

Este tipo de filtro posee en su interior varias capas de filtración de diferentes materiales. Este sistema ofrece un mejor nivel de filtración debido a que imita en gran parte al proceso de filtración de agua que ocurre en la naturaleza [15].

Se utilizará el filtro Multicapa Naturally Filtered MG-30, que se muestra en la figura 5, fabricado en acero inoxidable 304L calibre 14. Este filtro tiene la capacidad de remover

cloro, cloraminas, sabores y olores, VOCs², THMs³, metales pesados, hierro y sulfuro de hidrógeno [15]. Ver hoja de datos en el anexo B.3.



Figura 5: Filtro multicapa Naturally Filtered MG-30

Fuente: (Naturally Filtered, 2015)

Características del fabricante:

- Válvula fleck 5600 SXT para lavado a contracorriente automático 4 GPM.
- Recubierto en tanque de acero inoxidable 304L calibre 14.
- Sistema patentado Mediaguard KDF 85, esta tecnología descompone eficazmente el cloro y las cloraminas, reduce el hierro, el sulfuro de hidrógeno y los metales pesados, controla el crecimiento de microorganismos y aumenta sustancialmente el rendimiento y la vida del carbón.
- Mezcla de Carbón, mezcla de carbón activado de centauro y cáscara de coco para una alta reducción de cloro, cloraminas, THMs, VOCs, metales pesados, sabores y olores.
- Lecho Filtrante, las tres últimas etapas compuestas por arena, grava y granate, proporcionan un lecho de filtro estable para evitar que los medios filtrantes escapen del sistema. También reduce partículas, atrapando sedimentos y otros desechos.

²Volatile organic compounds, compuestos orgánicos volátiles

³Trihalometanos, compuestos químicos volátiles

1.8.4. Máquina de Ozonización

Debido a sus excelentes cualidades de desinfección y oxidación, el ozono es ampliamente utilizado para el tratamiento de agua para consumo humano, entre otras aplicaciones [16]. El ozono es una molécula que se compone de tres átomos de oxígeno O_3 , es muy inestable y tiene una vida media corta, está formado por un átomo extra de oxígeno con una alta carga eléctrica. El ozono funciona según el principio de oxidación, cuando la molécula de ozono de carga estática O_3 entra en contacto con algún material oxidable, el átomo extra de oxígeno se libera y se une con el otro material y en una fracción de segundo se produce la oxidación. Finalmente, solo queda la molécula de oxígeno pura y estable [17].

El ozono puede destruir con eficacia bacterias y virus inactivos más rápidamente que cualquier otro producto químico desinfectante. Ayuda a eliminar el cloro, pesticidas y otros productos químicos tóxicos disueltos en el agua. El ozono reacciona para oxidar una serie de compuestos inorgánicos, lo que incluye: hierro, manganeso, sulfuros, nitrito, arsénico, ión bromuro y ión yoduro [18]. Mata patógenos 3,000 veces más rápido que el cloro, y elimina el 99.9% de todas las bacterias del grupo formado por coli como: E. coli, S. Areus, Bacillus subtilis, etc. Como desinfectante es más seguro que el cloro, ya que este es altamente carcinogénico [16].

Se utilizará el sistema de ozono de flujo lateral de la compañía Norland, específicamente el modelo SSOZ-30A, figura 6, el cual puede producir suficiente ozono para tratar hasta 30 galones (114 litros) por minuto. Este sistema se compone de módulos completos montados en bastidores diseñados específicamente para operaciones de agua embotellada de alta calidad [19]. Ver hoja de datos en el anexo B.4.

Para el proceso de ozonización, el agua es extraída de un tanque de almacenamiento por la bomba integral de represurización de acero inoxidable. Parte del agua que fluye a través de esta bomba es de flujo lateral, a través de otra bomba de acero inoxidable el agua se impulsa a través de un conjunto de inyector Venturi, donde el ozono se inyecta en el agua (figura 7). Esta corriente lateral de agua ozonizada se dirige luego al tanque de contacto, donde se mezcla con el flujo principal de agua de la bomba de represurización, antes de ser enviada hacia la unidad de estructuración y de embotellado.



Figura 6: Máquina de ozonización Norland SSOZ-30A
Fuente: (Norland Int'l Inc, 2014)

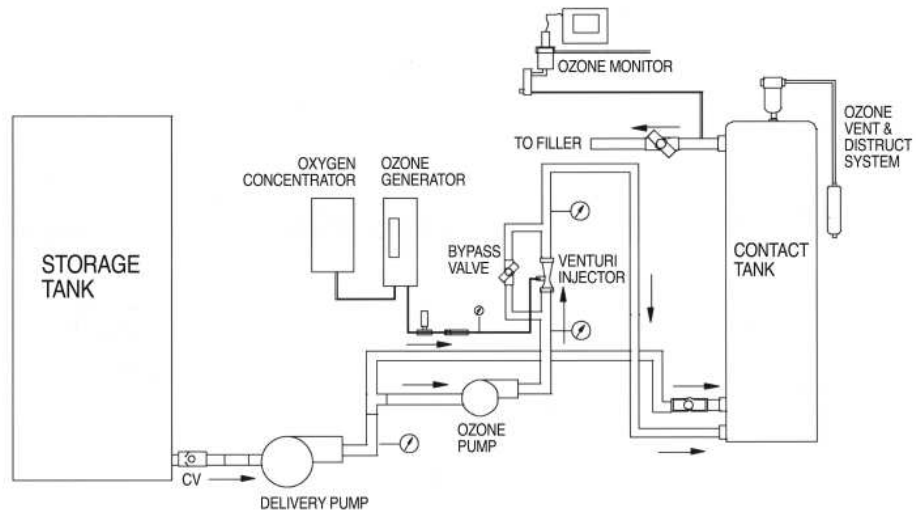


Figura 7: Funcionamiento del sistema de ozono de flujo lateral.
Fuente: (Norland Int'l Inc, 2007)

1.8.5. Máquina de Estructuración

Ciertas investigaciones científicas han descubierto que el agua pierde su geometría molecular natural al ser tratada con métodos de purificación agresivos, por el uso de sustancias químicas, por la contaminación ambiental, entre otros. Esta alteración molecular que sufre el agua afecta la tasa de absorción y por lo tanto, al ser ingerida por un ser vivo esta no tiene la capacidad de penetrar profundamente en los tejidos y células del cuerpo. Para solucionar este problema los científicos han encontrado diferentes tipos de soluciones, entre las cuales se encuentra la tecnología frecuencial [12].

La tecnología frecuencial se emplea en muchos campos de la medicina, especialmente en tratamientos alternativos de enfermedades. Y el agua, al ser el componente principal del ser humano no es la excepción. Este tipo de equipos pueden generar diferentes frecuencias de energía electromagnética, y transmitirlos al agua, de esta forma se logra recuperar su orientación, vibración, y geometría natural, al transformar de esta manera al agua con las mejores características para un buen metabolismo.



Figura 8: Máquina de estructuración BCX Ultra Rife Machine
Fuente: (Braintuner, 2016)

Para estructurar el agua se utilizará el generador de frecuencias BCX Ultra Rife Machine, figura 8, el cual puede generar varias frecuencias para diferentes aplicaciones. Específicamente para el agua se configurará estas frecuencias de acuerdo a las especificaciones de operación del equipo y a las investigaciones realizadas por científicos de esta área [1] [12] . Ver hoja de datos en el anexo B.5.

1.8.6. Máquina Embotelladora Automática

En el mercado internacional existen diferentes fabricantes de sistemas de embotellado automático de agua, con tecnología y capacidades que van de acuerdo a las necesidades de la empresa contratante. La selección de la máquina adecuada para el proyecto se ha realizado en base a los resultados de un plan de negocios y estudio de mercado realizados previamente para el producto agua estructurada embotellada.

Se utilizará la máquina embotelladora automática Norland Triumph 12000, figura 9, que puede producir hasta 12,000.00 botellas por hora en tamaños de 300.00 ml a 2,000.00 ml. Ver hoja de datos en el anexo B.6.



Figura 9: Máquina embotelladora automática Norland Triumph 12000

Fuente: (Norland Int'l Inc, 2016)

1.8.7. Bomba Centrífuga

Una bomba centrífuga se utiliza para inducir el flujo o elevar la presión de un líquido. Su funcionamiento es simple. En el corazón del sistema se encuentra un impulsor. Dispone de una serie de paletas curvas instaladas dentro de las placas de la cubierta. Cuando gira el impulsor, hace que el fluido que lo rodea también gire. Esto imparte la fuerza centrífuga a las partículas de agua, y el agua se mueve radialmente hacia el exterior [20]. Se utilizará la bomba centrífuga higiénica Sudmo Pentair SP Series, figura 10. Las características de esta bomba incluyen una construcción en acero inoxidable de alta calidad, especialmente diseñada para uso en plantas que procesan bebidas y agua para consumo humano. Todas las piezas en contacto con el líquido son de acero inoxidable 1.4404/316L, y poseen un



Figura 10: Bomba centrífuga higiénica Sudmo Pentair SP Series

Fuente: (Pentair, 2016)

diseño hidráulico que optimiza la carcasa de la bomba y el impulsor, en combinación con una superficie muy lisa. La combinación de estas características resulta en una muy buena limpieza y una alta eficiencia [21]. Ver hoja de datos en el anexo B.7

1.8.8. Tanque de Almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son utilizados tanto en aplicaciones comerciales como residenciales y son fabricados en diferentes tipos de materiales. Para el desarrollo del proyecto se utilizarán tres tanques de acero inoxidable 316L de la marca Pentair, estos son empleados en muchas industrias, en particular en la industria de alimentos y bebidas, figura 11. Proporcionan la máxima seguridad y durabilidad, y cumple con la norma NSF/ANSI 61⁴. Ver hoja de datos en el anexo B.8

1.8.9. Tubería

Se utilizará tubería de acero inoxidable 316L SCH40 de la marca Pentair, específicamente de la línea dedicada a la industria de alimentos y bebidas, figura 12. Esta proporciona máxima seguridad y durabilidad, y cumple con la norma sanitaria internacional NSF/ANSI 61. Ver hoja de datos en el anexo B.9

1.8.10. PLC

Los PLC se han utilizado en la industria de una u otra forma desde hace más de dos décadas. El PLC es una computadora digital que se emplea para la automatización de proce-

⁴Norma internacional sanitaria para componentes de sistemas de agua potable.



Figura 11: Tanque de almacenamiento Pentair
Fuente: (Pentair, 2016)



Figura 12: Tubería Pentair
Fuente: (Pentair, 2016)

tos electromecánicos típicamente industriales [5], tales como en el control de maquinaria en líneas de ensamblaje, control de procesos de manufactura, control de iluminarias etc.

Durante los últimos años el PLC ha ido evolucionando y hoy es también conocido como Controlador Programable de Automatización (PAC), estos incorporan mayor tecnología en sus sistemas, son escalables, multidisciplinarios e informatizados. Un PAC se orienta más hacia complejas arquitecturas de sistemas de automatización compuestas por aplicaciones de software basadas en PC que incluye funciones HMI.

Se utilizará el PLC Allen-Bradley CompactLogix 5370 1769-L23E-QBFC1B, figura 13. Este PLC ha sido diseñado para aplicaciones de pequeña y mediana escala, sus características



Figura 13: Controlador programable de automatización AB CompactLogix 5370

Fuente: (Allen-Bradley, 2016)

y flexibilidad, proporcionan un entorno de desarrollo común para todas las disciplinas de control y ayudan a reducir los costos de inversión en ingeniería. El controlador viene con módulos de entradas/salidas digitales y analógicas incorporados. Ver hoja de datos en el anexo B.10. Este controlador ha sido seleccionado en base a los requerimientos de diseño planteados en el capítulo dos del proyecto.

1.8.11. Válvula de Control

Una válvula de control solenoide o electroválvula es una válvula accionada electromecánicamente, es controlada por una corriente eléctrica a través de impulsos electromagnéticos de un solenoide. La válvula solenoide se abre o se cierra, no hay término medio, se le conoce también como válvula todo o nada; en el caso de una válvula de dos puertos, el flujo se enciende o se apaga; en el caso de una válvula de tres puertos, el flujo de salida se conmuta entre las dos vías de salida. Las electroválvulas son los elementos de control más utilizados en mecánica de fluidos. La solenoide ofrece una conmutación rápida y segura, alta fiabilidad, larga vida útil, buena compatibilidad media de los materiales utilizados, baja potencia de control y diseño compacto [5].

Hay muchas variaciones en el diseño de una válvula. Las válvulas ordinarias pueden tener varios puertos y trayectos de fluidos. Una válvula de 2 vías, por ejemplo, tiene 2 puertos. Si la válvula está abierta, entonces las dos vías están conectadas y el fluido puede fluir, si la válvula está cerrada, los puertos están aislados. Si la válvula está abierta cuando el solenoide no está energizado, la válvula se denomina normalmente abierta, figura 14. De forma similar, si la

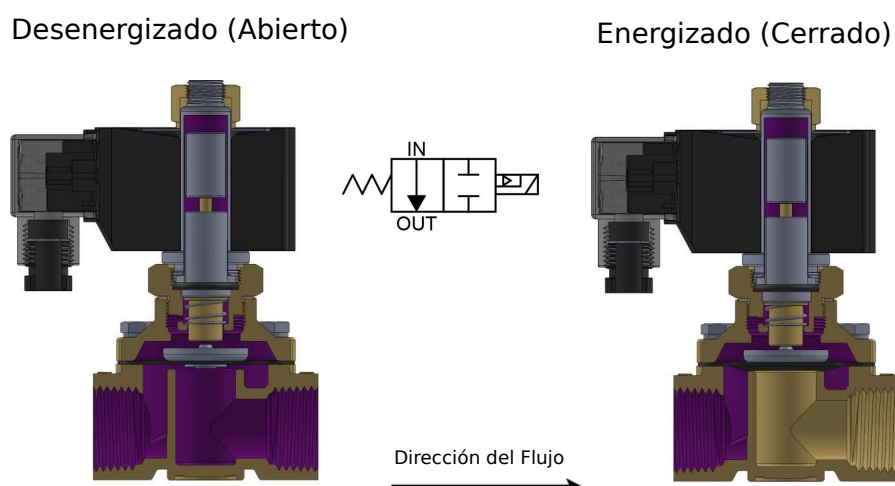


Figura 14: Operación de la válvula solenoide
Fuente: (STCValve, 2016)

válvula se cierra cuando el solenoide no está energizado, entonces la válvula se denomina normalmente cerrada.



Figura 15: Válvula solenoide STC 2S400
Fuente: (STCValve, 2016)

El desarrollo del proyecto requiere controlar el nivel de agua en los tanques de almacenamiento, dentro de un rango determinado, esto no requiere un control muy fino de la variable de proceso, por lo que es suficiente con un esquema de control on-off. Se utilizará la válvula de control STC 2S400, figura 15, fabricada en acero inoxidable y que cumple con los requerimientos de diseño tratados en el capítulo dos. Ver hoja de datos en el anexo B.11.

1.8.12. Sensor de Nivel

Un sensor de nivel o interruptor de boya es un dispositivo usado para detectar el nivel del líquido dentro de un tanque. El interruptor puede utilizarse en una bomba, un indicador, una alarma u otros dispositivos. Los interruptores de boya varían en tamaños y pueden ser tan simples como un interruptor de mercurio dentro de un flotador articulado o como un interruptor que se activa cuando el líquido alcanza niveles diferentes dentro del tanque. El tipo más común de interruptor de boya es simplemente un flotador que eleva una barra que acciona un micro interruptor, figura 16.

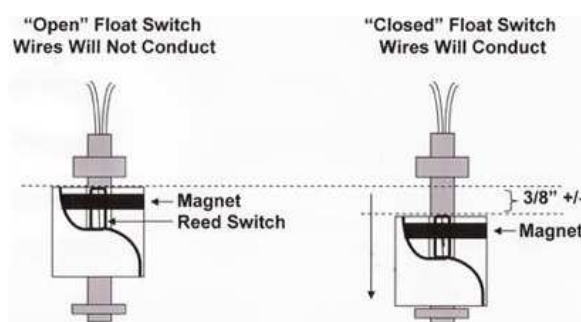


Figura 16: Mecanismo interruptor de boya

Fuente: (Deepak Rasaily, 2016)

Una aplicación muy común es en las bombas de sumidero y bombas de condensado, donde el interruptor detecta el nivel creciente de líquido hasta que el nivel ha sido sustancialmente reducido, momento en el que la bomba se desconecta. Los interruptores de boya son a menudo ajustables y pueden incluir una histéresis sustancial. Es decir, el punto de encendido del conmutador puede ser mucho mayor que el punto de apagado [5]. Estos interruptores suelen ser fabricados en acero inoxidable.

Se utilizará el interruptor automático de boya Bulletin 840-D1 de la marca Allen-Bradley, figura 17. Ver hoja de datos en el anexo B.12.

El interruptor debe instalarse sobre el tanque, y la boya debe estar en el agua, unidos por una barra, cadena o cable. El interruptor se activa de acuerdo a la posición de la boya en el agua. Los contactos del interruptor están abiertos cuando la boya fuerza la palanca de operación a la posición alta. A medida que el nivel de líquido disminuye, la boya y la palanca de accionamiento se mueven hacia abajo. Cuando la boya alcanza un nivel bajo preestablecido, los contactos del interruptor se cierran, lo que activa el circuito. Los contactos pueden activar directamente un motor o proporcionar una señal para un sistema lógico que

puede ser un PLC. A medida que el nivel del líquido sube, la boya y la palanca de operación se mueven hacia arriba. Cuando la boya alcanza un nivel alto preestablecido, los contactos del interruptor se abren.



Figura 17: Sensor de nivel tipo boya Bulletin 840-D1
Fuente: (Allen-Bradley, 2016)

1.9. Control del Proceso

La mayoría de los sistemas de control de procesos básicos consisten en un bucle de control como se muestra en la figura 18. Este tiene cuatro componentes principales que son:

- Una medida del estado o condición de un proceso.
- Un controlador que calcula una acción basada en este valor medido con respecto a un valor preestablecido o deseado (set point, consigna o referencia).
- Una señal de salida resultante del cálculo del controlador que se utiliza para manipular la acción del proceso a través de alguna forma de actuador.
- El proceso reacciona a esta señal y cambia su estado o condición.

La figura 18 muestra el diagrama de bloques de un bucle de control de procesos.

Dentro del control de procesos, dos de las señales más importantes utilizadas se denominan:

- Variable de proceso PV

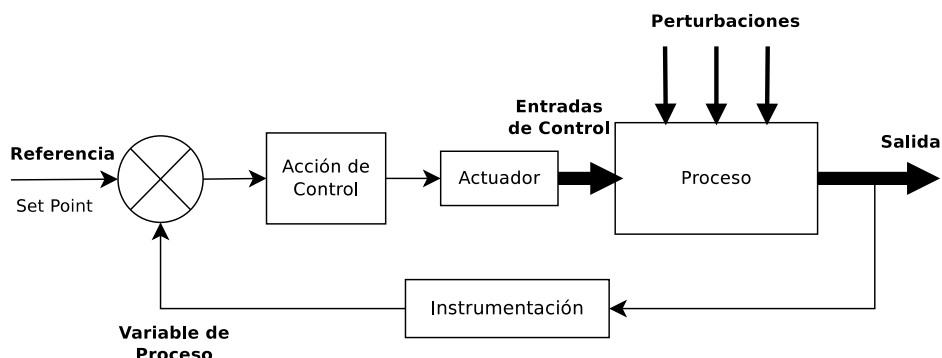


Figura 18: Diagrama de bloques con los elementos de un lazo de control de procesos

- Variable manipulada MV

Así, la variable de proceso o PV se mide mediante un instrumento en el campo y actúa como una entrada a un controlador automático que actúa en función del valor de la misma. La variable manipulada MV sirve para tener control sobre el PV. Si se coloca un flujo particular por ejemplo, se manipula una válvula para controlar el flujo. Aquí, la posición de la válvula se denomina Variable Manipulada MV y el flujo medido se convierte en la Variable de Proceso PV [4].

Durante el desarrollo del proyecto se necesitará controlar ciertas variables, especialmente aquellas relacionadas con el nivel de agua en los tanques de almacenamiento y con la medida de presión en los filtros, para esto se diseñarán controladores que cumplan con este propósito.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL SISTEMA

2.1. Automatización del Proceso de Purificación

2.1.1. Diseño y Desarrollo

Para el proceso de purificación se requiere un control de nivel automático en el tanque de almacenamiento TK-102, y un controlador de presión en los filtros (ver el P&ID en el anexo A). El diseño tendrá como base un sensor de nivel conocido también como interruptor de boya, un interruptor de presión y un controlador lógico programable PLC.

El controlador de nivel utilizará un interruptor de nivel de boya LT-102, una válvula de solenoide XV-102 y una bomba P-101. El sensor detectará el nivel de agua en el tanque, sensorá tanto el nivel bajo como el nivel alto. Si el nivel de agua es bajo, el motor bombeará el agua hacia el tanque y después de alcanzar el nivel alto, la bomba se detendrá.

El controlador de presión utilizará un interruptor de presión PT-101 y PT-103, una bomba P-101 y P-103. El interruptor detectará el valor de presión en los filtros. Si la presión es alta desactivará la bomba respectiva y enviará una señal hacia el PLC.

Para la parte de control se utilizará un PLC. La selección del controlador de nivel garantizará un suministro continuo de agua, y la selección del controlador de presión protegerá la integridad de las bombas y filtros.

2.1.2. Metodología

El diagrama de bloques del controlador automático de nivel y presión de agua se muestra en la figura 19. La operación estará basada en una señal de 24V DC desde el PLC, el interruptor de boya detectará el nivel del agua, la válvula solenoide se utilizará para controlar el

flujo, y el interruptor de presión sensorará la carga en los filtros. Las principales unidades que contiene el sistema son: el tanque de almacenamiento, la bomba, y el controlador.

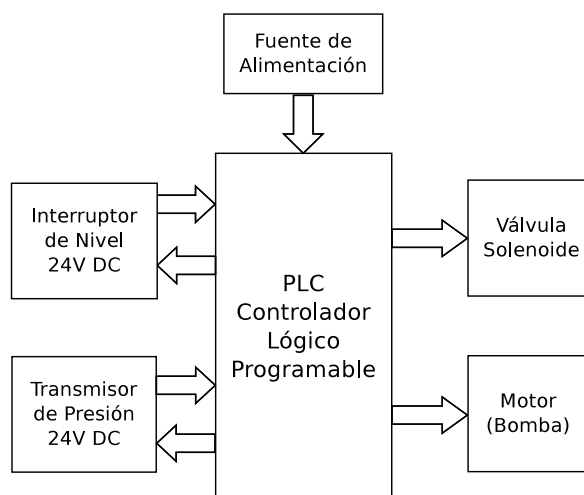


Figura 19: Diagrama de bloques del proceso de purificación

2.1.3. Descripción del Modelo de Purificación

El proceso comenzará con la extracción de agua desde el tanque de almacenamiento de agua prefiltrada TK-101, mediante la bomba centrífuga P-101. A través de tubería el agua pasa hacia el tanque de almacenamiento de agua filtrada TK-102, previo paso por los filtros de arena y carbón activado U-101 y U-102 respectivamente. La bomba constará de un interruptor de presión, y el tanque constará de un sensor de nivel de boya, junto con el solenoide conectado a sus fuentes de entrada. Todo el circuito se controlará con el PLC con ayuda de la programación de diagrama de escalera.

El programa se escribirá de tal manera que siempre que el nivel de agua llega por debajo del nivel bajo, la señal de nivel se enviará al PLC que a su vez activará la válvula solenoide. La válvula se abrirá y el agua fluirá hacia el tanque.

La figura 20, muestra el diagrama del modelo del sistema de filtración del agua.

Siempre que el nivel de agua alcanza un nivel alto, el sensor detectará el nivel alto, dará una señal al PLC y cerrará la válvula solenoide que a su vez detendrá el flujo de agua. La válvula estará abierta o cerrada dependiendo del nivel de agua del tanque. Si el nivel de agua en el tanque es del 90 %, la señal de alarma se activará y la bomba se apagará. Si el nivel está

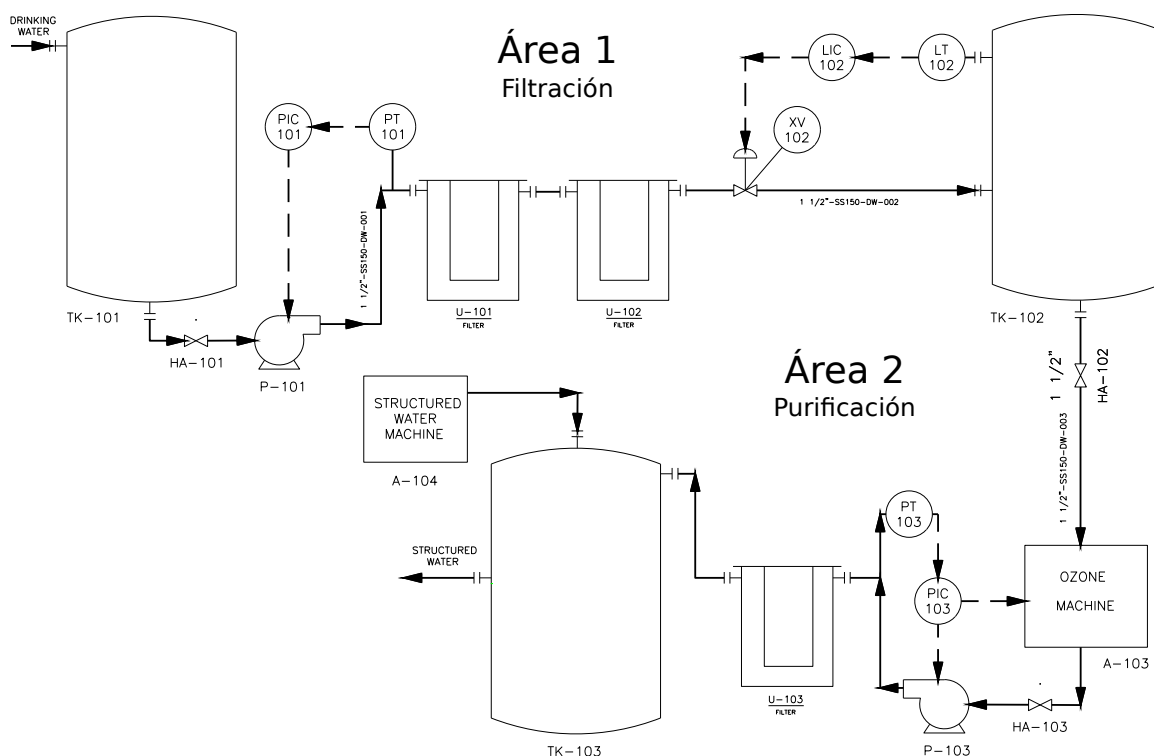


Figura 20: Diagrama del modelo del sistema de purificación

por debajo del 90%, la bomba se encenderá.

La tabla 1 muestra las condiciones de funcionamiento de los actuadores que se instalarán en el sistema, expuesto en el diagrama P&ID del anexo A. Las bombas no pueden funcionar si sus respectivas válvulas de ingreso en el lado de la succión no están abiertas.

Tabla 1
Condiciones de funcionamiento de los actuadores

	P-101	HA-101	XV-102	P-103	HA-103	A-103
Off	apagada	cerrada	abierta	apagada	cerrada	apagada
Circulación	encendida	abierta	abierta	encendida	abierta	encendida
PT-101-HP	apagada	abierta	-			apagada
PT-103-HP			-	apagada	abierta	apagada
LT-102-HL	apagada	abierta	cerrada			encendida
LT-102-LL	encendida	abierta	abierta			encendida

2.1.4. Controlador de Nivel

Durante el desarrollo de los controladores se creará el programa que posteriormente podrá ser cargado y ejecutado en el PLC. Esto se lo realizará de acuerdo a las condiciones de funcionamiento mostradas en la tabla 1. Se utilizará el software RSLogix de la compañía Allen-Bradley proveedora también de equipos PLC.

La figura 21 muestra el diagrama de bloques para el control de nivel en el tanque de almacenamiento de agua filtrada TK-102.

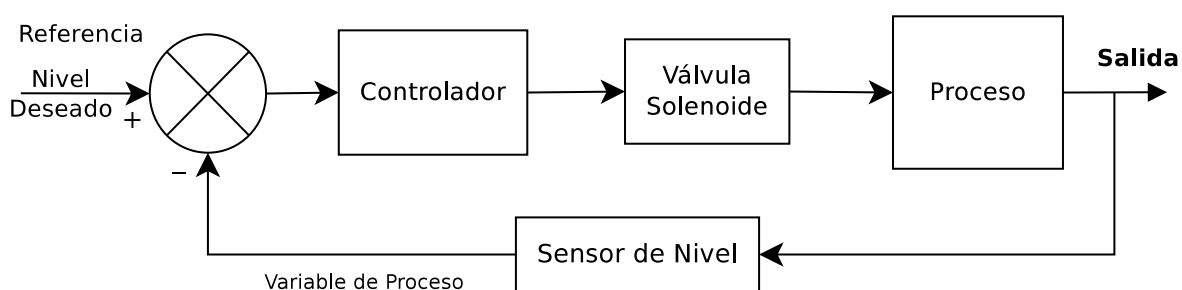


Figura 21: Diagrama de bloques del control de nivel

2.1.5. Controlador de Presión

La figura 22 muestra el diagrama de bloques para el control de presión entre las bombas y los filtros, este control se hará con el objetivo de proteger a las bombas de posibles daños ocasionados por el aumento de presión en los filtros. Este control no es necesario realizarlo desde el PLC, ya que se usará interruptores de presión que actúan directamente con la bomba respectiva.

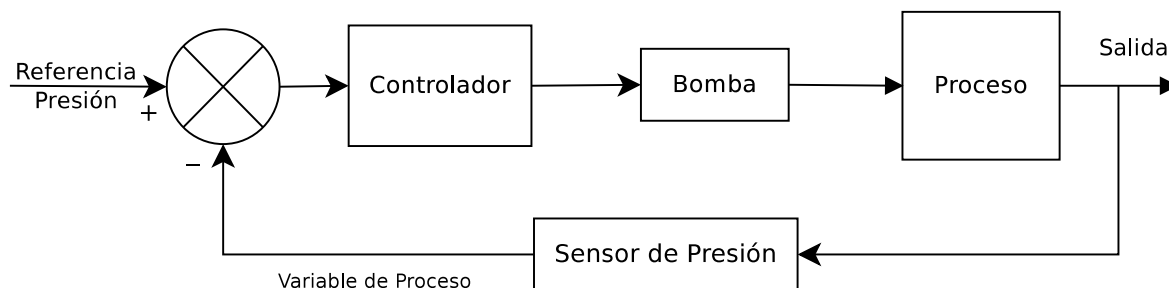


Figura 22: Diagrama de bloques del control de presión

2.1.6. Programación del PLC

Para la programación del PLC se utilizó el software RSLogix Micro Starter Lite, esta versión no requiere de licencia y es suficiente para cumplir con los objetivos de automatización planteados. Uno de los inconvenientes de esta versión es que solo dispone de PLCs con limitadas especificaciones técnicas, especialmente en cuanto a entradas y salidas. Debido a ello se ha tratado de utilizar la menor cantidad de entradas y salidas en el código de escalera. Se seleccionó el PLC MicroLogix 1100 Series B, tiene 4 entradas digitales, 2 entradas analógicas, y 4 salidas digitales. Este PLC cumple con los objetivos de diseño y simulación planteados en el proyecto, para su implementación se recomienda utilizar el PLC definido en el capítulo uno.

La programación del PLC se realizó en base a las variables de entrada y salida requeridas en el sistema, ver tablas 2 y 3 respectivamente, y en base al diagrama de flujo del control de nivel, ver figura 23.

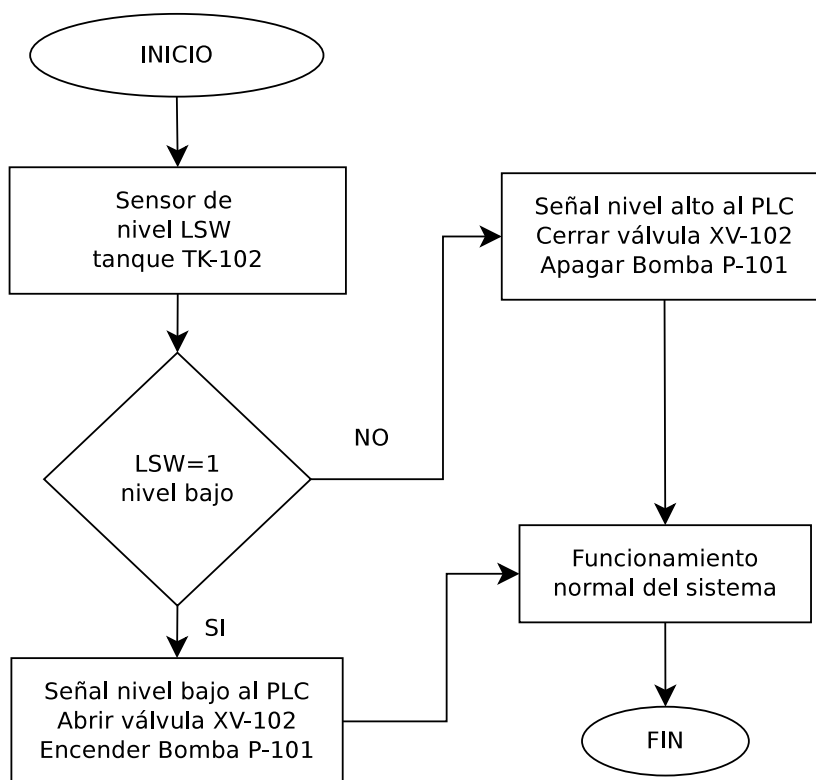


Figura 23: Diagrama de flujo del control de nivel

Tabla 2
Variables de entrada del PLC

Entradas	Función	Dirección
INICIO	Botón de inicio y parada del sistema	B3:0/0
MAN/AUTO	Botón de operación manual o automático	I0:0/16
LSW	Señal del sensor de nivel	I0:0/32
ON/OFF B1	Botón de encendido y apagado de la bomba 1	I0:0/64
ON/OFF B2	Botón de encendido y apagado de la bomba 2	I0:0/80

Tabla 3
Variables de salida del PLC

Salidas	Función	Dirección
VALVULA	Energizar o desenergizar válvula solenoide	O:0/0
BOMBA 1	Encender o apagar bomba 1	O:0/32
BOMBA 2	Encender o apagar bomba 2	O:0/48

El anexo C muestra el programa del PLC creado en RSLogix Micro Starter Lite y emulado en RSLogix Emulate.

2.2. Diseño del Sistema HMI-SCADA

El diseño se realizará de acuerdo a los niveles de jerarquía de pantallas HMI que se muestran en la figura 24, y de acuerdo a la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS). El nivel 1 de un sistema HMI muestra una vista completa para el operador de control, este deberá presentar si es necesario botones hacia los siguientes niveles del HMI. El nivel 2 muestra las unidades o subunidades a controlar por el operador, el nivel 3 muestra los equipos o controladores, y el nivel 4 deberá mostrar los enclavamientos y pantallas de diagnóstico.

Para el diseño de la interfaz HMI se utilizará el software Factory Talk View Machine Edition de la compañía Allen-Bradley. El sistema requiere un botón de encendido principal Inico/Parada, un botón de modo de operación Manual/Automático, un botón de operación manual on/off, un botón de salida del panel principal HMI. un panel de visualización para

las alarmas de nivel bajo y alto, un panel de visualización para los parámetros de calidad del agua. Además de un panel de visualización para la distribución en planta, y un panel para mostrar la gráfica de históricos del interruptor de nivel.

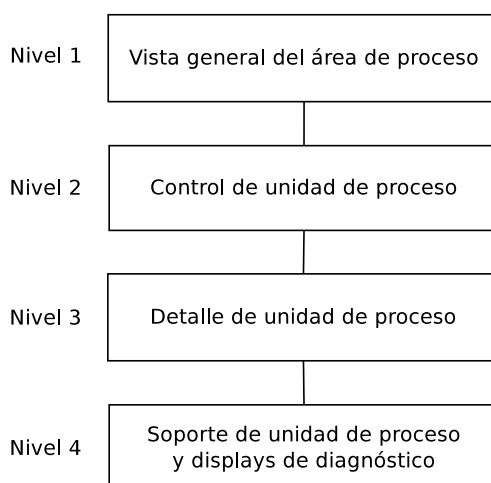


Figura 24: Jerarquía para pantallas HMI

La figura 25 muestra la pantalla principal de sistema HMI/SCADA de la planta, el panel superior permite al operador iniciar y parar todo el proceso, seleccionar entre un modo de operación manual y automático, encender y apagar manualmente las bombas P-101 y P-103, visualizar el estado de las alarmas, y salir del sistema. La parte central muestra un esquema general del proceso completo, en este panel el operador puede ver a nivel de planta el estado: del sensor de nivel LT-102, de las bombas P-101 y P-103, de válvula solenoide XV-102, y de los diferentes equipos del sistema. La parte inferior muestra la gráfica de históricos del sensor de nivel, y los parámetros de calidad del agua.

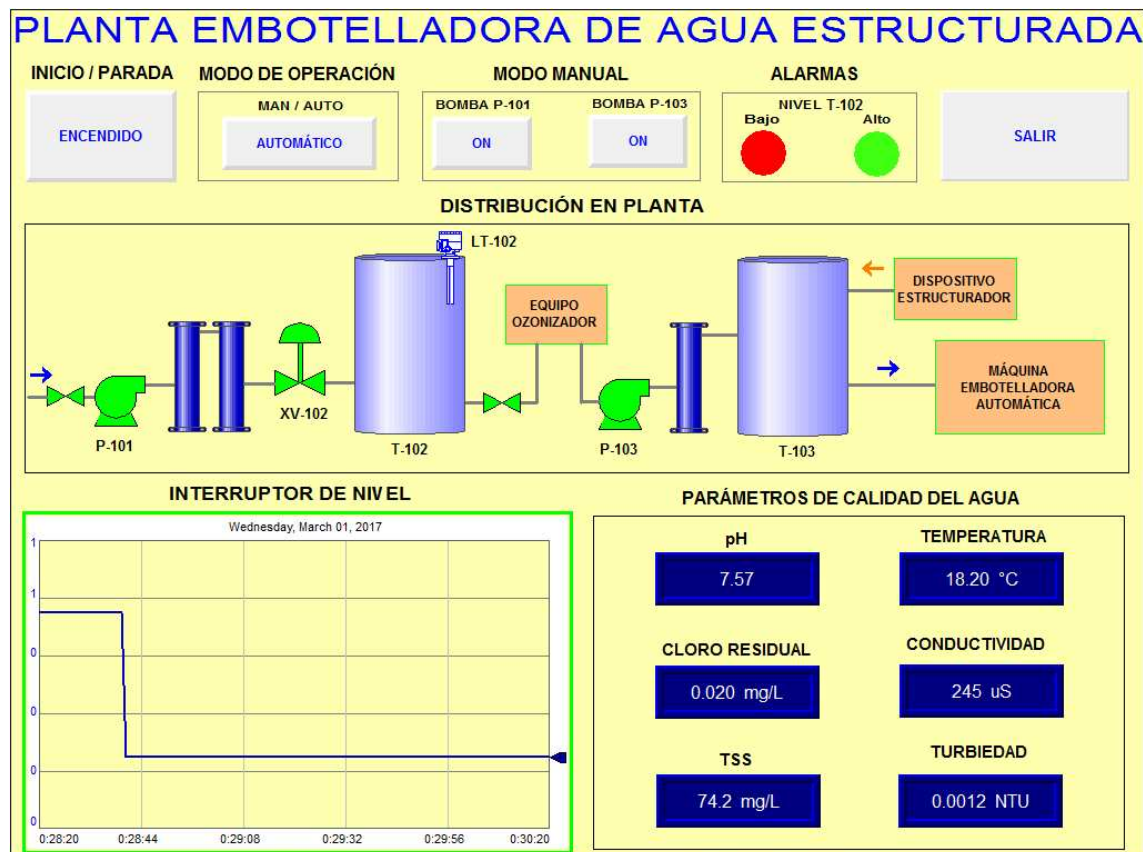


Figura 25: HMI de la planta

El diseño se realizó en base a las variables de enlace entre el PLC y el HMI. Ver anexo D.

2.3. Cálculos Matemáticos

2.3.1. Pérdida de Presión

La pérdida de presión o carga, pérdida de energía, o caída de presión, se produce por diferentes causas, como: cambios de elevación en las tuberías, fricción del líquido con las paredes de las tuberías, válvulas y filtros, y turbulencia generada por cambios abruptos de dirección de flujo [22]. En base al P&ID anexo A se calculará los valores de pérdida de presión en cada una de las áreas a partir de la bomba de succión primaria P-101.

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de ener-

gía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, se calculará el número de Reynolds N_R [22].

Si $N_R < 2,000$ el flujo será laminar

Si $N_R > 4,000$ el flujo será turbulento

$$N_R = \frac{v\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

donde

v = velocidad promedio del flujo (m/s)

ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

μ = viscosidad dinámica del fluido ($Pa \cdot s$)

Para calcular la pérdida de energía, h_L , se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach ecuación 2.2, debido a que esta se considera un modelo más exacto, y sirve tanto para flujo laminar como turbulento. La diferencia entre los dos flujos está en la evaluación del factor de fricción adimensional f [22].

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

que también puede ser expresada como:

$$P_{loss} = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.3)$$

donde

h_L = pérdida de energía debido a la fricción ($N \cdot m/N$)

P_{loss} = pérdida de presión ($Pa[N/m^2]$)

L = longitud de la corriente del flujo (m)

D = diámetro de la tubería (m)

v = velocidad promedio del flujo (m/s)

f = factor de fricción (adimensional)

g = aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

Si el flujo es laminar, el factor de fricción es $f = \frac{64}{R}$

Si el flujo es turbulento, el factor de fricción puede determinarse a partir del diagrama de Moody¹.

Pérdida de presión lineal

La pérdida de presión lineal es la mayor que se pueda producir en sistema hidráulico [23] y es ocasionada por la fricción del fluido con las paredes de la tubería, esta es conocida también como pérdida de presión por fricción. Antes de proceder con el cálculo, se determinará si el flujo es laminar o turbulento. Para usar la ecuación de Reynolds (2.1) se cuenta con la siguiente información:

Flujo de expulsión de la Bomba Centrífuga, $Q = 30 \text{ gpm}$

Díametro de la tubería de acero inoxidable 316L, $D = 0.0467 \text{ m}$

Densidad del fluido, $\rho = 1,000.00 \text{ Kg/m}^3$

Viscosidad dinámica del fluido agua, $\mu = 1.02 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Al conocer el diámetro de la tubería se calcula el área circular como:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 0.0017 \text{ m}^2$$

A partir del flujo se puede calcular la velocidad del fluido mediante:

¹Diagrama que muestra la gráfica del factor de fricción versus el número de Reynolds, con una serie de curvas relacionadas con la rugosidad relativa del material [22].

$$v = \frac{Q}{A} = 1.107 \text{ m/s}$$

Entonces, al aplicar los resultados que se obtuvieron para calcular el número de Reynolds se obtiene:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} = 50,538.78, \text{ el flujo es turbulento}$$

Mediante la ecuación de Darcy (2.3) se procederá a calcular la pérdida de presión en los diferentes segmentos y longitudes de la tubería mostrada en el P&ID.

El factor de fricción, f , para un flujo turbulento se obtiene del diagrama de Moody, para esto se requiere conocer la rugosidad relativa r del material a utilizar.

$$r = \frac{k}{D}$$

r = rugosidad relativa.

k = coeficiente de rugosidad absoluta del material (m).

$k = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ para acero inoxidable.

$$D = 0.04089 \text{ m}$$

$$r = \frac{k}{D} = 3.67 \times 10^{-5}$$

con el valor de r , y de acuerdo al diagrama de Moody, se obtiene un coeficiente de fricción de $f = 0.021$. Con lo que ya será posible calcular la pérdida de mediante (2.3).

La tabla 4 muestra los valores de pérdida de presión causado por las tuberías de acero inoxidable, clasificados por área. Ver figura 20.

Tabla 4
Pérdida de presión en tuberías

Área	$L(m)$	$P_{loss}(psi)$
Área 1 - Filtración	5.21	0.403
Área 2 - Purificación	4.69	0.031
Total	9.90	0.766

Pérdida de presión local

La pérdida de presión causada por componentes como: válvulas, curvas, tees y similares; se llama pérdida de presión menor. Las pérdidas menores pueden ser significativas en comparación con las pérdidas mayores. De hecho, cuando una válvula está cerrada o casi cerrada, la pérdida menor es infinita. Para una válvula abierta, la pérdida menor puede a menudo ser despreciable, por ejemplo, para una válvula de bola de agujero completo [23].

La caída de presión de estos componentes se correlaciona con la presión dinámica en el flujo y puede expresarse como:

$$P_{minor-loss} = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.4)$$

donde

$P_{minor-loss}$ = pérdida de presión menor ($Pa(N/m^2)$)

ξ = coeficiente de pérdida menor del componente.

v = velocidad de flujo (m/s)

ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

La tabla 5 muestra los valores de pérdida de presión debido a válvulas, curvas e instrumentos, divididos por área. Ver figura 20.

Tabla 5
Pérdida de presión en componentes

Componente	Cantidad	ξ	$P_{minor-loss}(psi)$
Válvulas - Área 1	3	0.15	0.068
Válvulas - Área 2	1	0.15	0.023
Curvas 90° - Área 1	11	1.20	1.988
Curvas 90° - Área 2	5	1.20	0.904
Instrumentos - Área 1	3	0.12	0.054
Instrumentos - Área 2	2	0.12	0.036
Total	14		3.073

Pérdida de presión en filtros

Cuando el filtro comienza a obstruirse a medida que los sólidos son retenidos en las capas del medio filtrante, se produce una pérdida de carga o caída de presión, y los caudales se reducen. Para evitar esto y la degradación de la calidad del agua, se ejecuta un ciclo de retrolavado, al invertir el flujo del agua. Esto se acciona por una válvula de control para el drenado, al llevar consigo, las partículas que se han acumulado durante el proceso de filtración. El flujo requerido para el retrolavado es específico para el medio y es mayor que el flujo de operación.

El diferencial de presión de un filtro es la pérdida de carga combinada a través del filtro y la válvula, cuando el medio filtrante está limpio. Esta pérdida de presión usualmente varía entre 2 y 3 PSI. Cuando las capas del medio filtrante han retenido cierta cantidad de partículas, se produce una caída de presión de entre 5 y 7 psi. Los filtros a utilizar en el desarrollo del presente proyecto tienen un sistema de retrolavado automático configurable de acuerdo a la calidad del agua, al medio filtrante y a las especificaciones técnicas del equipo. Ver hoja de datos de los filtros en el anexo B.

La tabla 6 muestra los valores de pérdida de presión para los diferentes filtros que se utilizará en el proyecto, clasificados por área. Ver figura 20

Tabla 6
Pérdida de presión en filtros

Filtro	$\Delta P(\text{psi})$	$P_{\text{loss medio}}(\text{psi})$	$P_{\text{loss}}(\text{psi})$
Arena - Área 1	2.20	5.30	7.35
Carbón Activado - Área 1	1.30	3.70	5.00
Multicapa - Área 2	1.75	4.40	6.15
Total	5.25	13.10	18.35

Pérdida de presión total

La tabla 7 y 8 muestra la pérdida de presión del sistema de filtración y purificación por elemento y por área.

Tabla 7
Pérdida de presión total por elemento

Tipo de Elemento	$P_{\text{loss}}(\text{psi})$
Tuberías	0.77
Filtros	18.35
Componentes	3.07
Total	22.19

Tabla 8
Pérdida de presión total por área

Área	$P_{\text{loss}}(\text{psi})$
Área 1 - Filtración	15.01
Área 2 - Purificación	7.18
Total	22.19

2.3.2. Potencia de la Bomba

La potencia de una bomba es la energía requerida para mover un fluido al aumentar su velocidad y presión, depende de ciertos parámetros que incluyen, la eficiencia, la presión diferencial, la densidad, viscosidad del fluido, y el caudal.

La potencia está relacionada con la carga dinámica total (TDH) por sus siglas en inglés, y esta se refiere a la energía que la bomba imparte al líquido. La siguiente ecuación permite calcular el valor de este parámetro [24].

$$TDH = \frac{144 \times [P_2 - P_1 + \Delta P]}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + [z_2 - z_1] \quad (2.5)$$

donde:

TDH = carga dinámica total (ft)

P = presión ($psia$)

ΔP = pérdida de presión (psi)

z = elevación del fluido por arriba (+) o por debajo (-) de la bomba (ft)

v = velocidad del fluido (ft/s)

ρ = densidad del fluido (lb/ft^3)

Los índices 1 y 2 se refieren a origen y destino del fluido respectivamente.

La tabla 9, muestra los valores de TDH para las bombas P-101 y P-103. Ver diagrama P&ID en el anexo A.

Tabla 9
Carga dinámica total

Bomba	$TDH(ft)$
P-101 - Área 1	186.32
P-103 - Área 2	169.14

Con los valores de TDH conocidos, se procederá a calcular el valor de la potencia de la bomba mediante la siguiente relación [24]:

$$BPH = \frac{TDH \cdot Q \cdot S_g}{3960 \cdot \eta} \quad (2.6)$$

donde:

BPH = potencia de la bomba sin pérdidas (hp)

TDH = carga dinámica total (ft)

Q = caudal del fluido (gpm)

S_g = gravedad específica del fluido, adimensional

η = eficiencia de la bomba, 60 – 80 % para bombas centrífugas.

La tabla 10 muestra los valores de potencia BPH para las bombas P-101 y P-103.

Tabla 10
Potencia de la bomba

Bomba	$BPH(hp)$	$BPH_{comercial}(hp)$
P-101	1.88	2.00
P-103	1.71	1.75

De acuerdo a la curva de rendimiento de la bomba Sudmo Pentair SP Series [21], se requiere un motor de 3,000.00 rpm para que la bomba entregue la carga y caudal deseados. Ver hoja de datos en el anexo B.7 para las especificaciones técnicas de la bomba seleccionada.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL SISTEMA

3.1. Análisis del Proceso de Purificación

En una planta de tratamiento de agua para consumo humano, el análisis del proceso es una parte muy importante en la que se debe poner mayor énfasis. Por ello, se establecerán procedimientos para la operación y manejo de los puntos críticos del proceso, esto permitirá producir la calidad de agua deseada con un esfuerzo mínimo y maximizar la confiabilidad de la producción de agua para consumo humano. Estos procedimientos están relacionados con las propiedades toxicológicas y organolépticas¹ del agua, y con la reducción del esfuerzo operacional y el costo de producción.

3.1.1. Análisis del Proceso Operacional

El proceso operativo de la planta de tratamiento de agua estructurada embotellada empieza desde el ingreso del agua hacia el tanque de almacenamiento primario, y está dividido en varias etapas. A continuación se establecerán los procedimientos para la operación del sistema a través de cada etapa, lo cual permitirá optimizar la productividad, disminuir el costo y aumentar la confiabilidad de operación de la planta.

La primera etapa abarca un sistema de dos filtros conectados en serie, esta configuración en serie es necesaria pero tiene el inconveniente de que si un filtro sufre un aumento de presión afectará también al otro y en consecuencia a todo el sistema. Para solventar este problema se ha previsto instalar un interruptor de presión entre las bombas y los filtros, esto fue tratado en el capítulo 2.1.5 del proyecto. A más del sistema del control de presión, cada filtro consta de un medidor de presión local que permitirá al operador verificar y comparar

¹Propiedad relacionada con el sabor, olor y color del agua, esta debe ser suave, agradable y clara.

con los valores máximos de presión soportado por las bombas. El mismo sistema ha sido diseñado para el filtro de la etapa de filtración por multicapa.

Otro de los parámetros que permitirá optimizar el funcionamiento de la planta, es el de garantizar siempre un suministro de agua filtrada hacia las etapa de ozonización. Para esto se ha diseñado un sistema de control de nivel en el tanque de almacenamiento de agua filtrada, este sistema se puede ver con mayor detalle en el capítulo 2.1.3 del proyecto.

La etapa de ozonización consta de un sistema controlado de generación de ozono y posterior mezcla de este con el caudal principal de agua, esto garantiza un suministro constante de agua hacia la etapa de estructuración.

3.1.2. Análisis de las Propiedades Físico-Químico-Biológicas

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua permiten analizar si ella cumple con los parámetros establecidos por los organismos de control, como: la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Asociación de Calidad de Agua (WQA), o el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, para que pueda ser considerada apta para consumo humano. A continuación se muestran los distintos parámetros que se analizan durante una prueba de agua, con sus respectivos límites recomendados.

Metales

- Arsénico, 10 ug/L
- Calcio, 200 mg/L
- Hierro, 0.3 mg/L
- Plomo, 10 ug/L
- Magnesio, 50 mg/L
- Manganeso, 0.05 mg/L
- Mercurio, 1.0 ug/L
- Potasio, sin límite mencionado

- Sodio, 200 mg/L
- Uranio, 0.10 mg/L

Inorgánicos y Físicos

- Sólidos Totales Disueltos (PPM o mg/L), 500 mg/L
- Alcalinidad Total, 200 mg/L
- Bromato, 10 ug/L
- Cloramina, 1 mg/L
- Cloro, 0.3-1.5 mg/L
- Clorito, 1 mg/L
- Fluoruro, 1.5 mg/L
- Nitrato, 50 mg/L
- Nitrito, 0.5 mg/L
- Sulfato, 200 mg/L
- Dureza (como carbonato de calcio), 0-75 mg/L
- pH², 6.5-8.5
- Turbidez (NTU³), 0.5 NTU

Biológicos

- Bacterias Totales (CFU⁴)
- Coliformes Totales (CFU)

²Es un indicador de la acidez o alcalinidad de una sustancia.

³Unidad nefelométrica de turbidez.

⁴Unidades formadoras de colonias.

- E.Coli (P o A)

Orgánicos

- Carbono orgánico total (TOC), 1 mg/L
- Total de THM, 100 ug/L
- Prueba detallada de VOC, Pesticidas, Herbicidas y PCB⁵

Los sistemas de desinfección y purificación utilizados en el desarrollo del proyecto, garantizan que el agua cumpla con los requerimientos de los parámetros de calidad de agua mencionados, ya que los filtros y equipos de desinfección y purificación fueron seleccionados en base a estos requerimientos. La función de estos filtros y equipos fue descrita en el capítulo 1.8 del proyecto.

3.2. Modelado del Proceso de Purificación

En esta sección se modelará el proceso de purificación del agua mediante el software comercial WatPro en versión demo. WatPro es un simulador de tratamiento de agua para predecir la calidad del agua, basada en procesos de tratamiento específicos y adición química [25]. WatPro utiliza parámetros de calidad del agua tales como pH, TOC, SUVA⁶ y parámetros de operación de tanques de proceso, para simular el rendimiento de la planta. WatPro se puede utilizar para: diseñar y dimensionar sistemas de tratamiento de agua; minimizar la formación de subproductos de desinfección (DBPs), tales como THMs, HAAs⁷, clorito y clorato; entre otras aplicaciones [25].

La figura 26 muestra el modelo del proceso de purificación del agua.

Los parámetros ingresados en el simulador WatPro para la entrada de agua, son parámetros que se obtienen de agua prefiltrada y no de agua demasiado contaminada, ya que la planta se centra específicamente en la producción de agua estructurada. En la figura 27, se puede comprobar que cada unidad de tratamiento cumple con los requisitos mínimos de

⁵Bifenilos Policlorados, son compuestos químicos formados por cloro, carbono e hidrógeno.

⁶Absorbancia ultravioleta específica.

⁷Ácidos Haloacéticos, subproducto de la desinfección por cloración.

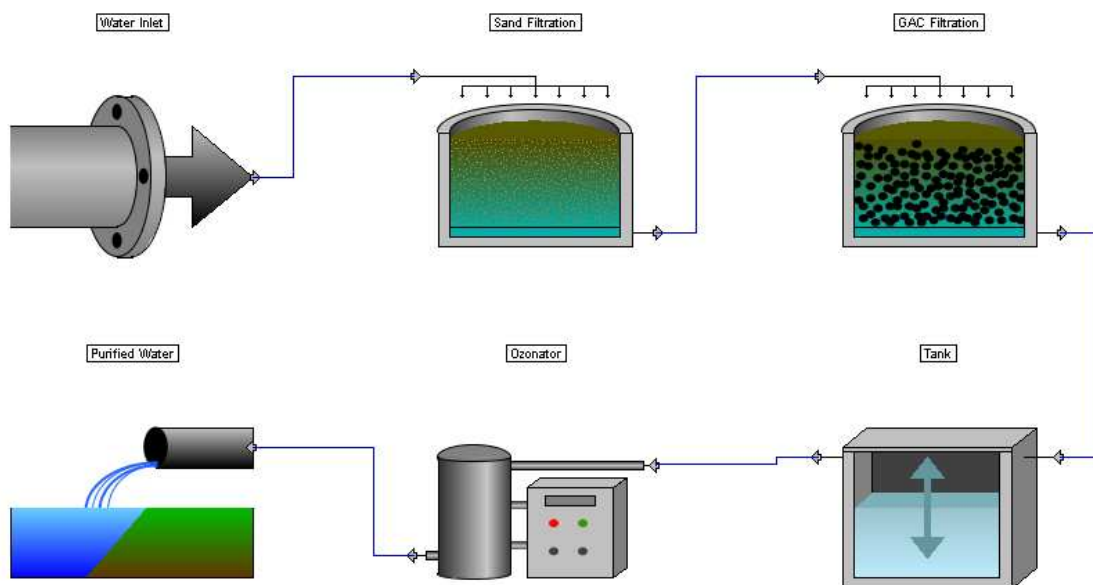


Figura 26: Modelamiento del proceso de purificación del agua

calidad de agua. Por ejemplo, en el parámetro TOC se tiene una disminución de 2.58 mg/L entre la entrada y la salida, de la misma forma la turbidez ha disminuido en 0.5 NTU .

	Water Inlet eff_0	Ozonator eff_4	Sand Filtration eff_1	Tank eff_3	GAC Filtration eff_2
pH (-)	7.5	7.50012	7.50012	7.50012	7.50012
TOC (mg/L)	3.0	0.42436	3.0	0.42436	0.42436
UV254 (1/cm)	0.1	0.0141453	0.1	0.0141453	0.0141453
Temperature (deg C)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Ammonia (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Alkalinity (mg/L)	100.0	100.002	100.002	100.002	100.002
Hardness (mg/L)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Turbidity (NTU)	0.5	0.00125	0.025	0.00125	0.00125
Ca(aq) (mg/L)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
Mg(aq) (mg/L)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Carbonates(aq) (mg/L)	218.171	218.171	218.171	218.171	218.171
CaCO3(p) (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MgOH(p) (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Other Anion (Ca ⁻) (moles/L)	0.00200182	0.00200182	0.00200182	0.00200182	0.00200182
Other Cation (Cb ⁺) (moles/L)	0.00199827	0.00199827	0.00199827	0.00199827	0.00199827
TTHM (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHCl3 (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHBrCl2 (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHBr2Cl (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHBr3 (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chlorite (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chlorate (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HAA5 (ug/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 27: Resultado del modelamiento del proceso de purificación

3.3. Análisis de la Estructura Molecular del Agua

La mayor parte de pruebas realizadas en agua purificada se centran en analizar las propiedades físicas, químicas y biológicas conocidas. Debido a que el proyecto se caracteriza por la producción de agua estructurada, es necesario realizar un análisis de la estructura geométrica de sus moléculas, esta propiedad se puede considerar también como un parámetro físico, ya que una molécula puede ser visible si se utilizan ciertos equipos especializados para tal propósito.

Ya que el proyecto se trata de un diseño, y actualmente no existe un software que modele el proceso de estructuración del agua, se utilizarán imágenes ilustrativas para mostrar el resultado de pruebas realizadas en agua estructurada. Estas imágenes han sido ilustradas en base a investigaciones científicas referentes a esta área [12] [10] [1].

La figura 28 muestra la diferencia entre, el agua que se somete a métodos de tratamiento agresivos, y el agua purificada estructurada. La imagen de la izquierda es conocida también como agua hexagonal o agua viva, mientras que la imagen de la derecha es conocida como agua desorganizada o agua muerta.

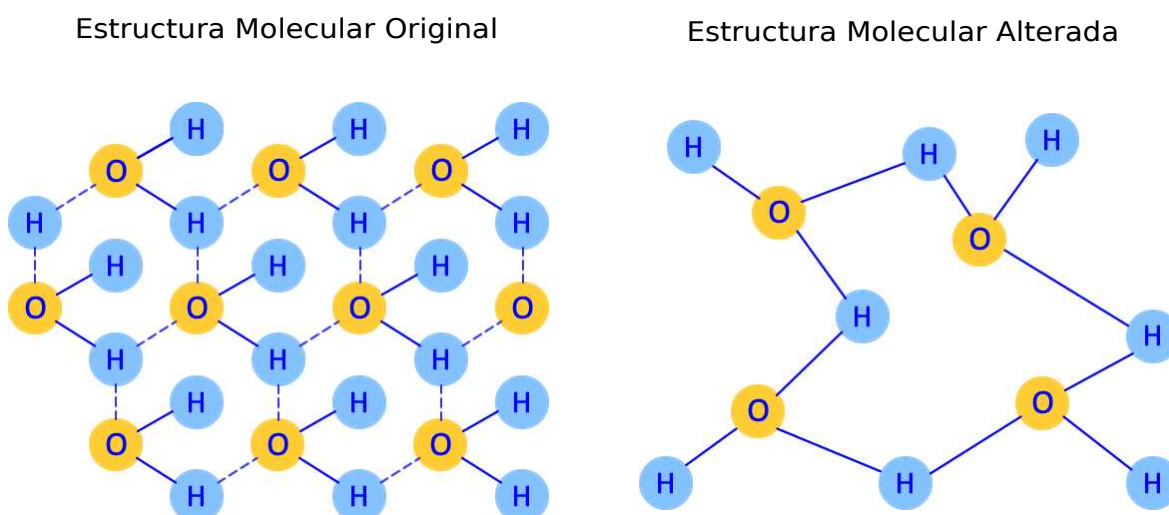


Figura 28: Diferencia entre agua estructurada y agua común

Estructura molecular original: Al transmitir la información vibratoria a las moléculas, el agua recupera su orientación y geometría natural original, esto transforma al agua con las mejores características para un buen metabolismo.

Estructura molecular alterada: Afecta el índice de biodisponibilidad del agua, y por lo

tanto, al ser ingerida por un ser vivo, esta no tiene la capacidad de penetrar profundamente en los tejidos y células del cuerpo.

3.4. Monitorización de la Calidad de Agua

Durante el diseño, se ha previsto instalar un equipo de monitoreo para controlar la calidad de agua en cualquier momento, específicamente los parámetros de:

- Cloro Residual Total
- Turbidez
- pH
- TSS
- Conductividad
- Temperatura

Algunos de estos parámetros también se obtuvieron del análisis realizado en el modelado del proceso de purificación. La tabla 11 muestra dichos parámetros y los resultados de la simulación:

Tabla 11
Resumen final del análisis de las propiedades del Agua

Resumen Final del Análisis			
Parámetro	Criterio	Valores	Unidad
Desinfectantes			
Cloro	4.0	0.0	mg/L
Dióxido de cloro	0.8	0.0	mg/L
Cloromines	1.0	0.0	mg/L
DBPs			
TTHMs	100	0.0	ug/L
HAA5s	100	0.0	ug/L
Clorito	1	0.0	mg/L
Reducción total de giardia	4	5.5	log(10)
Reducción total de virus	5	6.0	log(10)
Reducción Total de cripto	2	2.29	log(10)
Turbiedad			
Turbiedad	0.5	0.00125	NTU

Los resultados de la simulación representados en la figura 27 y la tabla 11 muestran que los parámetros derivados del cloro se redujeron a cero, al igual que los compuestos químicos volátiles THMs. La reducción de microorganismos fue muy significativa y la turbiedad pasó de 0.5 NTU a 0.00125 NTU.

3.5. Simulación del Sistema de Control

La simulación del proceso completo se ejecutará mediante el uso del software Factory Talk View ME de la compañía Allen-Bradley. La simulación se trata de comprobar el funcionamiento del sistema de control a través de acciones ejecutadas por el operador desde el panel de control.

A continuación se muestra el software requerido para ejecutar el proceso de simulación:

- Factory Talk View ME, versión 8.20 demo

- RSLinx Classic Lite, versión libre
- RSLogix Emulate 500, versión libre
- RSLogix Micro Starter Lite, versión libre

La figura 29 muestra el PLC virtual en funcionamiento.

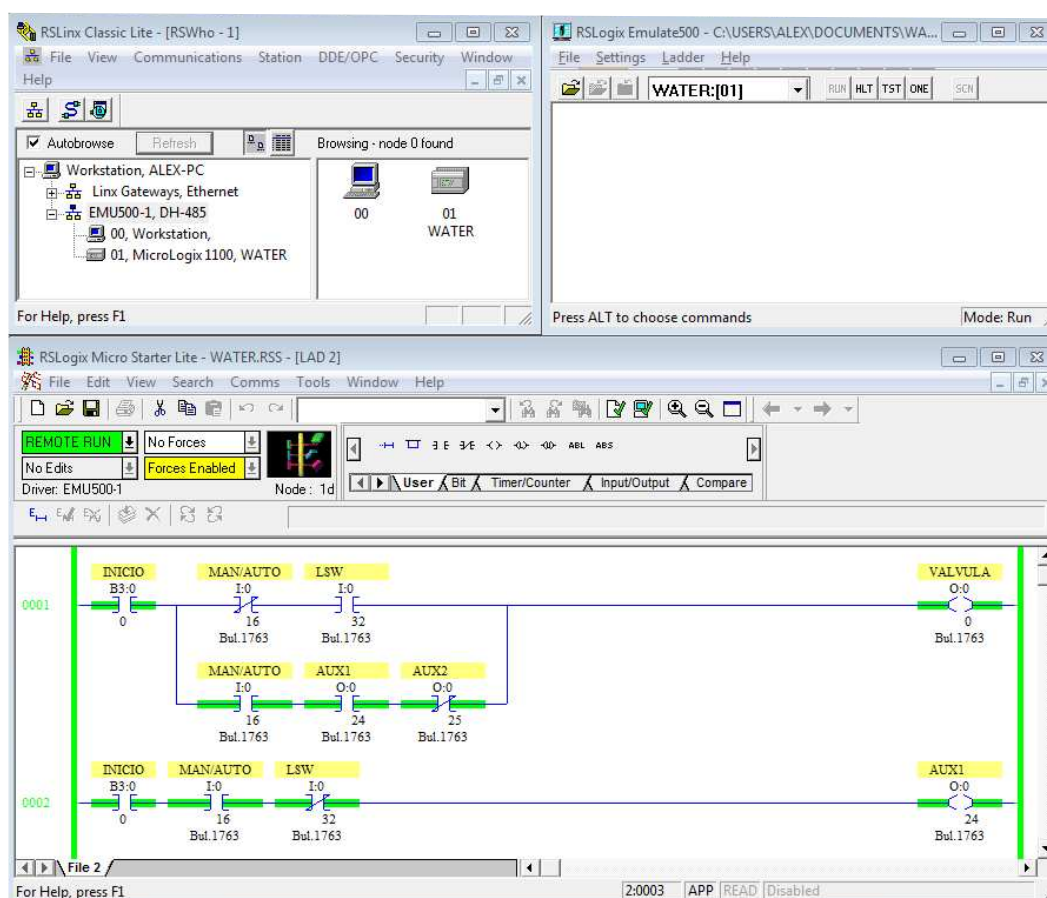


Figura 29: Emulación del PLC

Pasos para ejecutar la simulación:

- Ejecutar el software RSLinx classic, y crear un enlace de comunicación a través del driver EMU500-1
- Correr RSLogix emulate, cargar el programa del PLC creado en el capítulo dos, y ponerlo en modo run.

- Abrir Factory talk view, cargar el proyecto creado en el capítulo dos, y ejecutar el panel HMI.
- Ejecutar RSLogix micro starter, abrir el programa del PLC creado en el capítulo dos, ponerlo en modo online y luego en modo run; esto solo es necesario si se requiere forzar una entrada desde el PLC emulado, u observar los estados de entradas y salidas a través del código ladder.

3.5.1. Resultado de la Simulación

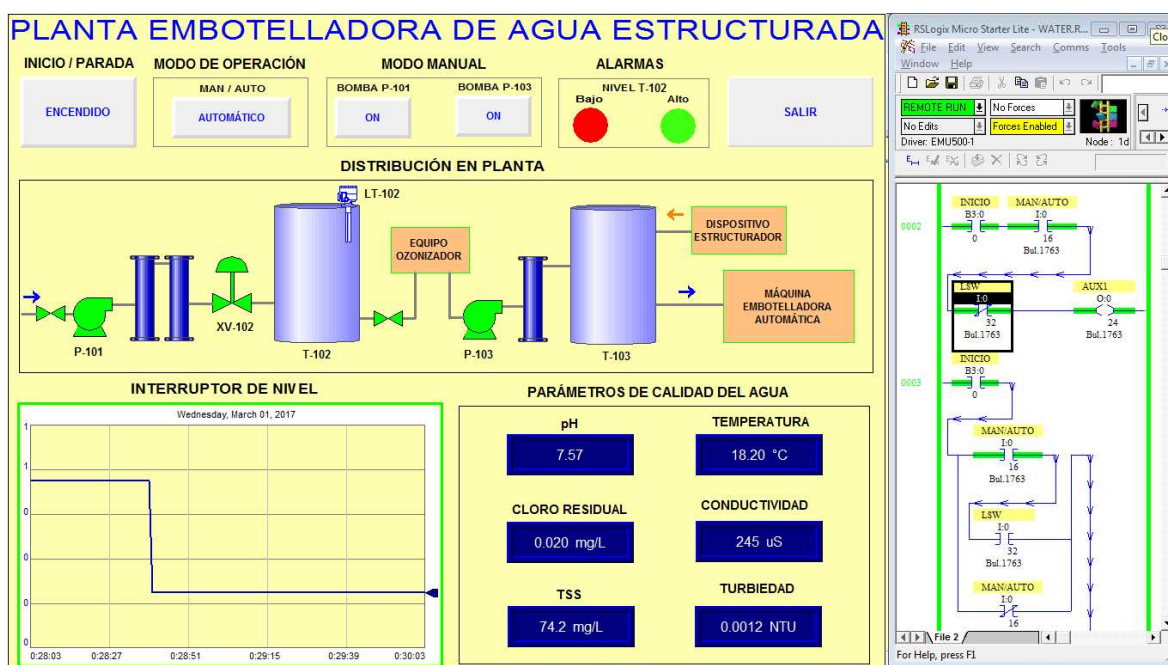


Figura 30: Simulación de la planta con sensor de nivel activado

La figura 30 muestra el resultado de la simulación con el sistema iniciado en modo automático. La bomba P-101 y la válvula solenoide XV-102 se encuentran activadas, debido a que el sensor de nivel LT-102 detectó nivel bajo en el tanque T-102, lo que provocó que la alarma de nivel bajo se active. En el panel inferior izquierdo se puede observar el estado anterior y actual del sensor de nivel, y en el panel inferior derecho los parámetros de calidad de agua. En parte derecha de la imagen se puede apreciar el estado de los contactos del PLC emulado.

La figura 31 muestra a la bomba P-101 y la válvula solenoide XV-102 desactivadas, ya que el sensor de nivel LT-102 detectó nivel alto en el tanque T-102, lo que provocó que la

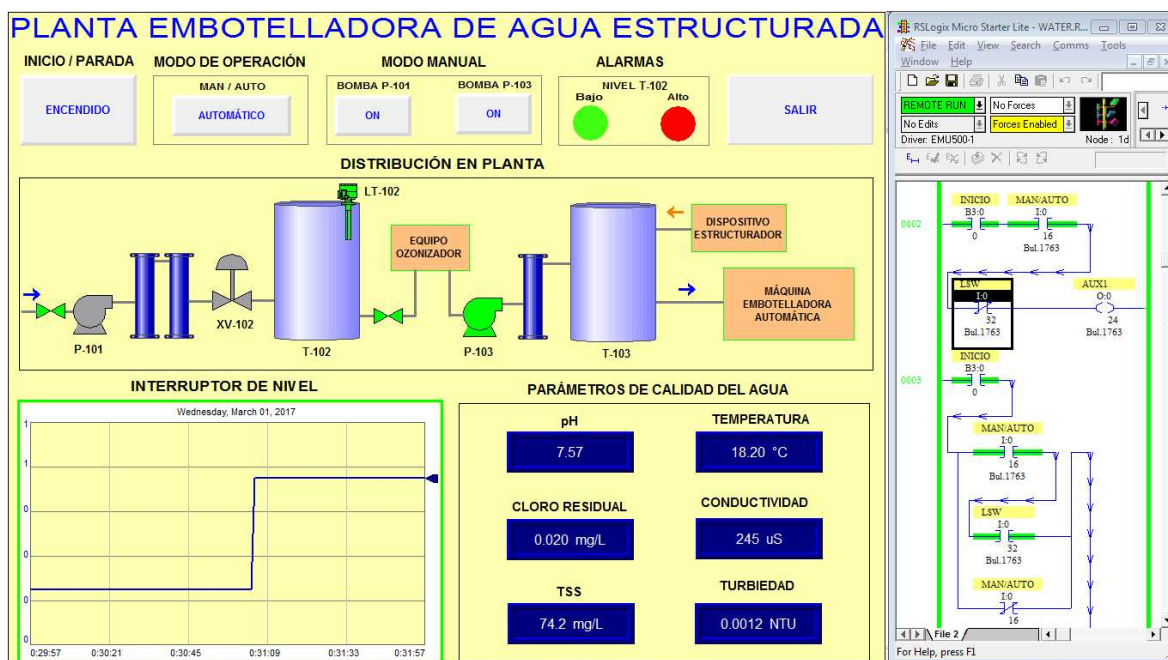


Figura 31: Simulación de la planta con sensor de nivel desactivado

alarma de nivel alto se active, el histórico de este comportamiento se puede observar también en la gráfica mostrada en el panel inferior izquierdo del HMI.

3.5.2. Estado de las Alarmas

En el panel superior del HMI se puede observar que el sistema consta de una alarma de nivel bajo y otra de nivel alto. La figura 32 muestra el procedimiento a seguir en caso de que alguna de ellas se active.

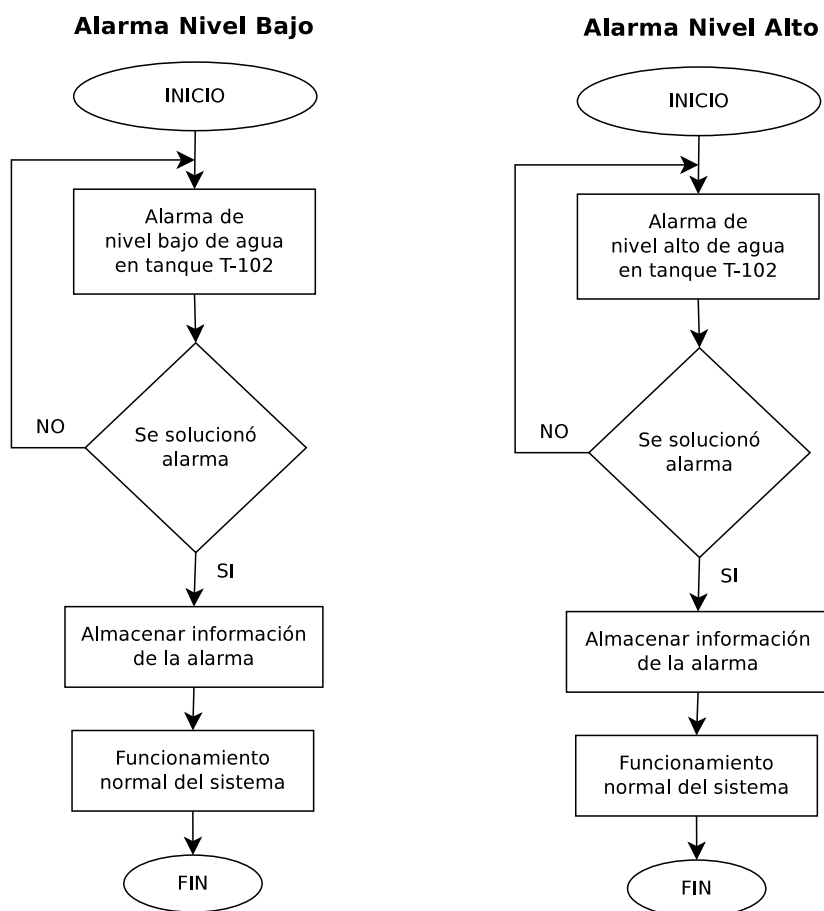


Figura 32: Procedimiento en caso de activación de alarmas de nivel

3.6. Análisis Económico Financiero

Una de las mayores preocupaciones a la hora de iniciar una nueva empresa, es saber cuánto se necesita invertir, de qué manera se obtendrán esos recursos, cómo se utilizarán, cuáles serán los beneficios, y en qué tiempo se recuperará la inversión inicial. Para esto es de vital importancia realizar un estudio de la inversión financiera, así como también una evaluación financiera de los resultados que arrojen los diferentes estados que serán proyectados por ejemplo a 4 años.

Para evaluar el proyecto se procederá a calcular los diferentes indicadores financieros que permitirán analizar si un proyecto será rentable o no en el tiempo. Se utilizará información y datos obtenidos de un plan de negocios realizado previamente para este mismo proyecto, como estudio de mercado, y estado de pérdidas y ganancias o flujo de caja proyectado, este

flujo incluye: ventas, costo de producción, gastos de ventas, administrativos y financieros, participaciones, impuesto a la renta, y utilidad neta proyectada.

Flujo de caja proyectado

El análisis de los estados financieros dentro de una empresa es muy importante, ya que permite tomar decisiones acertadas sobre su futuro, la ausencia de este análisis puede ser perjudicial para cualquier tipo de negocio. La figura 33 muestra el flujo de caja proyectado a 4 años.

Flujo de caja proyectado					
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
(-) Inversión	455,997.39				
Ventas	0.00	2,173,029.33	2,281,680.79	2,395,764.83	2,515,553.07
(-) Costo de producción	0.00	1,423,977.13	1,489,128.65	1,557,537.76	1,629,367.32
Utilidad Bruta en Ventas	0.00	749,052.20	792,552.14	838,227.07	886,185.76
(-) Gasto de ventas	0.00	160,896.55	168,581.38	176,650.45	185,122.97
Utilidad Neta en Ventas	0.00	588,155.65	623,970.76	661,576.62	701,062.78
(-) Gastos Administrativos	0.00	30,346.90	30,346.90	30,346.90	30,346.90
Utilidad en Operación	0.00	557,808.75	593,623.86	631,229.72	670,715.88
Gastos Financieros	0.00	28,404.72	21,347.68	13,563.27	4,976.51
Utilidad antes de participaciones	0.00	529,404.03	572,276.18	617,666.46	665,739.37
(-) 15% Participaciones	0.00	79,410.60	85,841.43	92,649.97	99,860.91
Utilidad antes de impuestos	0.00	449,993.42	486,434.75	525,016.49	565,878.47
(-) 22% impuesto a la renta	0.00	98,998.55	107,015.64	115,503.63	124,493.26
Utilidad neta	-455,997.39	350,994.87	379,419.10	409,512.86	441,385.20

Figura 33: Flujo de caja proyectado a 4 años

Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es un indicador financiero que mide el flujo de los ingresos y egresos proyectados de una inversión, para determinar, si luego de descontar la inversión inicial, queda alguna ganancia o utilidad.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{1+k} - I_0 \quad (3.1)$$

donde

V_t = flujo de caja anual proyectado a 4 años.

I_o = inversión inicial, $I_o = \$455,997.39$

n = número de años, $n = 4$

k = tasa de descuento, $k = 15\%$

entonces

$VAN = \$657,735.67$

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento (k) de un proyecto de inversión, que permite que el beneficio neto actualizado sea igual a la inversión, es decir $VAN = 0$. La TIR es la máxima tasa de descuento que puede tener un proyecto para que sea rentable.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{1+k} - I_o = 0 \quad (3.2)$$

$TIR = 74.40\%$

El resultado dice entonces, que la tasa de rendimiento interno obtenida es superior a la tasa mínima de rentabilidad, por tanto es un proyecto económicamente viable.

El análisis final, realizado en base a los indicadores económico financieros, muestra que los valores que se calcularon son favorables para poner en marcha el proyecto, siempre y cuando se cumpla con los requerimientos y estrategias planteadas en el plan de negocios.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones están divididas en dos partes, la primera trata acerca del sistema de automatización del proceso, y la segunda acerca del sistema de purificación del agua.

4.1. Conclusiones

4.1.1. Sistema de Purificación

En base a las investigaciones realizadas acerca de métodos de tratamiento de agua, se ha logrado integrar diferentes técnicas y métodos de purificación no agresivos a la estructura molecular del agua.

Mediante el uso de software especializado para modelado de sistemas de tratamiento de agua, se ha logrado obtener los parámetros de calidad de agua dentro de los rangos permitidos.

4.1.2. Sistema de Automatización

Para realizar un diseño de procesos industriales es importante definir los requerimientos funcionales del sistema, a través de diagramas de instrumentación y tuberías, y descripción general del proceso.

Gracias al uso de software especializado para simulación de procesos industriales automatizados, se ha logrado demostrar que el sistema funciona de acuerdo a las condiciones planteadas durante el diseño.

Debido al uso de tanques de gran capacidad de almacenamiento y por los requerimientos de caudal y volumen de la planta, solo ha sido necesario diseñar un controlador de nivel todo-nada, para mantener el agua en los niveles deseados.

4.2. Recomendaciones

4.2.1. Sistema de Purificación

Para obtener resultados más detallados en cuanto al modelado del sistema de tratamiento de agua, es necesario adquirir la licencia del software WatPro, ya que además permite generar gráficas especializadas de los parámetros de calidad del agua.

Debido a que es importante comprobar los método de estructuración del agua, se recomienda adquirir un equipo especializado que permita observar la estructura molecular del agua tratada.

4.2.2. Sistema de Automatización

Si se requiere controlar otras variables del sistema, es necesario adquirir la licencia del software RSLogix, ya que la versión gratuita solo permite programar ciertos modelos de PLC, limitados en cuanto a especificaciones técnicas.

En caso de implementarse este proyecto, se recomienda adquirir la licencia del software Factory talk view ME, para mantener un control y monitoreo completo de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wolfgang Ludwig. The memory of water. 1997.
- [2] Igor Smirnov. Activated water. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2003.
- [3] Denny Edwards. *Functional Requirements Specification*. G.F.S. Computing, Inc.
- [4] IDC Technologies. *Pocket Guide on Industrial Automation*. Srinivas Medida, USA, first edition, 2007.
- [5] Deepak Rasaily Karma Gyatsho Bhutia and Aarfin Ashra. Plc based automated water level control system. *EEECOS*, 2016.
- [6] Wayne Salter Axel Daneels. What is scada. *CERN-CNL-2000-003 Vol. XXXV, issue no 3*, 2000.
- [7] John G. Rodwan. Bottled water - the recovery begins. <http://www.bottledwater.org>, May 2011.
- [8] Paul M. Jakus, W. Douglass Shaw, To N. Nguyen, and Mark Walker. Risk perceptions of arsenic in tap water and consumption of bottled water. *Water Resources Research*, 2009.
- [9] Tim G. Williams. Power, control, wealth, the third industrial revolution. <http://ezinearticles.com>, February 2015.
- [10] Gerald H. Pollack. *The Fourth Phase of Water*. Ebner and Sons, USA, first edition, 2013.
- [11] Avunoori Anudeep Kumar and Pundru Srinivasa Rao. Automation of bottle manufacturing, filling and capping process using low cost industrial automation. *IJERT*, 2014.

- [12] Nenah Sylver PhD. *The Rife Handbook Of Frequency Therapy*. Desert Gate Publications, LLC, USA, revised edition, 2011.
- [13] ISA. *ANSI/ISA-5.1-2009 Instrumentation Symbols and Identification*. ISA, September 2009.
- [14] Evoqua Water Technologies. Granular activated carbon (gac). <http://www.evoqua.com>, 2016.
- [15] Naturally Filtered. Natural home mg-30. <http://www.naturallyfiltered.com>, 2016.
- [16] Pralay Majumdar. Development of ozone water disinfection. *IJRET*, 2013.
- [17] Lenntech BV. Ozone applications drinking water. <http://www.lenntech.com>, 2010.
- [18] Marina Kritsevskaja. Ozone in drinking water treatment. *EOLSS*, 2008.
- [19] Norland International. Ozone treatment. <https://www.norlandintl.com>, 2016.
- [20] Learn Enginnering. Working of centrifugal pumps. <http://www.learnengineering.org/>, January 2014.
- [21] Pentair. Sudmo hygienic centrifugal pumps. <http://foodandbeverage.pentair.com/>, January 2016.
- [22] Robert L. Mott. *Applied Fluid Mechanics*. Pearson Education Inc., UK, sixth edition, 2006.
- [23] Engineering Toolbox. Fluid mechanics. <http://www.engineeringtoolbox.com/>, February 2016.
- [24] Drew W. Schiller Kimberly Fernandez, Bernadette Pyzdrowski and Michael B. Smith. Understand the basics of centrifugal pump operation. *CEP*, 2002.
- [25] Hydromantis. Software for modeling drinking water treatment process. <http://www.hydromantis.com/>, September 2016.

ANEXOS

ANEXO A

DIAGRAMA P&ID

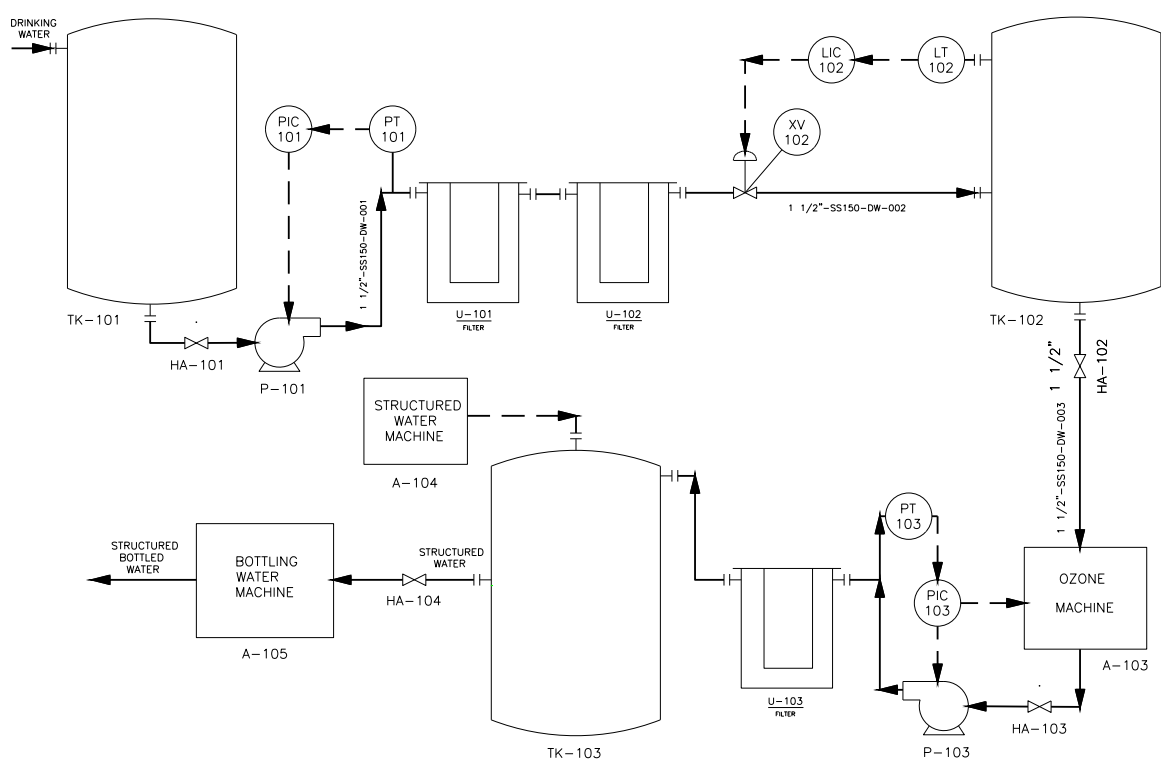


Figura 34: Diagrama P&ID del sistema

ANEXO B

HOJA DE DATOS

B.1. Filtro de arena

La tabla 12 muestra la hoja de datos del filtro de arena Pure Aqua MF-450 70F1855MM-SS que contiene como medio de filtración antracita, arena y grava de 10 micras.

Tabla 12
Hoja de datos filtro de arena

Modelo	70F1855MM-SS
Presión operacional	25-100 psi (1.73-6.9 bar)
Temperatura de funcionamiento	41-122 °F (5-50 °C)
Suministro eléctrico	115/240 V, 1 Fase, 50/60 Hz
Flujo mínimo	17.7 gpm (67 lpm)
Flujo continuo	26.6 gpm (100 lpm)
Flujo máximo	35.4 gpm (134 lpm)
Flujo de retrolavado	26.6 gpm (67 lpm)
Duración de retrolavado	Programable, recomendado 90 s
Periodo de retrolavado	Programable, recomendado 8-10 h
Tamaño del tanque (DxH)	18x60 in (0.46x1.52 m)
Cantidad medio de filtración	5.5 ft^3 (0.16 m^3)
Tamaño de tubería	1 1/2 in
Peso aproximado	644 lbs (293 kg)
Medio filtrante	Antracita, arena y grava
Tamaño de las partículas	1-2.5 mm (10 micras filtración)
Presión diferencial	2.20 psi
Pérdida de presión	5.10 psi

B.2. Filtro de carbón activado

La tabla 13 muestra la hoja de datos del filtro de carbón activado Pure Aqua MF-450 70F24100AC-SS que contiene como medio de filtración carbón activado, con forma granular de alto grado de porosidad 8x30 mesh (mallas).

Tabla 13
Hoja de datos filtro de carbón activado

Modelo	70F24100AC-SS
Presión operacional	25-100 psi (1.73-6.9 bar)
Temperatura de funcionamiento	41-122 °F (5-50 °C)
Suministro eléctrico	115/240 V, 1 Fase, 50/60 Hz
Flujo mínimo	22.0 gpm (83.3 lpm)
Flujo continuo	25.1 gpm (95 lpm)
Flujo máximo	37.7 gpm (142.7 lpm)
Flujo de retrolavado	37.7 gpm (142.7 lpm)
Duración de retrolavado	Programable, recomendado 80-90 s
Periodo de retrolavado	Programable, recomendado 10-12 h
Tamaño del tanque (DxH)	24x60 in (0.61x1.52 m)
Cantidad medio de filtración	10 ft^3 (0.28 m^3)
Tamaño de tubería	1 1/2 in
Peso aproximado (lbs)	532 (242 kg)
Medio filtrante	Carbón activado granular GAC
Granulometría del medio	8x30 mesh > 8(2.36 mm) < 30(0.6 mm)
Presión diferencial	1.30 psi
Pérdida de presión	3.20 psi

B.3. Filtro multicapa

En la tabla 14 se muestra la hoja de datos del filtro multicapa Naturally Filtered MG-30.

Tabla 14
Hoja de datos filtro multicapa

Modelo	MG-30
Flujo máximo	30 gpm (114 lpm) @ 50 psi
Flujo mínimo de entrada	15 gpm (57 lpm) @ 35 psi
Rango de presión	40-100 psi (2.76-6.895 bar)
Presión diferencial	1.75 psi
Flujo de retrolavado	12 gpm (45.42 lpm)
Duración de retrolavado	Programable, recomendado 90 s
Período de retrolavado	Programable, preprogramado 4 días
Temperatura de operación	40-150 °F (4.4-66 °C)
Conexiones entrada/salida	1 1/2 in (38.1mm) NTP embra
Conexiones drenaje	1 in (25.4mm) NPT macho
Alimentación	AC 110 V, 60 Hz (220 V, 50 Hz opcional)
Dimensiones (DxH)	14x67.5 in (0.35x1.71 m)
Peso	245 lbs (111 kg)

B.4. Máquina de ozonización

La tabla 15 muestra la hoja de datos de la máquina de ozonización Norland SSOZ-30A.

Tabla 15
Hoja de datos máquina de ozonización

Modelo	Norland SSOZ-30A
Capacidad máxima	30 gpm (114 L/min)
Niveles de ozono residual	0.1-0.4 mg/L
Presión de operación máxima	50 psi
Caída de presión a 50 gpm	menor a 3 psi
Voltage	208-240 V
Fase	1 Fase
Corriente	20 A carga conectada
Dimensiones HxWxD	87x48x44 in (2.21x1.27x1.12 m)
Peso	509 lbs (239 kg)

B.5. Máquina de estructuración

La tabla 16 muestra la hoja de datos de la máquina de estructuración BCX Ultra Rife Machine.

Tabla 16
Hoja de datos máquina de estructuración

Tipo	Generador de frecuencia
Modelo	BCX Ultra Rife
Suministro eléctrico	120-240 VAC 50/60Hz
Aplicaciones	Provee energía a varios dispositivos de salida
Frecuencias	3 Frecuencias directas independientes 1 a 4,000,000 Hz 5 Frecuencias de amplitud iguales 1 a 100,000 Hz Multitud de frecuencias con formas de onda personalizadas
Salidas	2 pares electrodos 1 par tubo de rayos 1 vara LED 1 Auxiliar
Ciclo de trabajo	1 a 100%

B.6. Máquina embotelladora automática

La tabla 17 muestra la hoja de datos de la máquina embotelladora automática Norland Triumph 12000.

Tabla 17
Hoja de datos máquina embotelladora automática

Modelo	Norland Triumph 12000
Número de estaciones de Trabajo	Lavadora 24, Llenadora 24, Taponadora 6
Capacidad	12,000 botellas/hora a 500 ml de Volumen
Suministro eléctrico	3 Fases, 415/240 V, 50/60 Hz
Voltage de alimentación del sistema de control	24 V DC
Potencia Instalada	3.5 kW
Potencia del motor principal	2.2 kW
Presión de aire comprimido	0.7 Mpa, consumo 0.8 m^3/h
Nivel de ruido	78 dBA
Diámetro y altura máxima de las botellas	90 mm x 310 mm
Dimensiones	3.6 m x 3.1 m x 3 m
Peso	5,000 kg

B.7. Bomba centrífuga

La tabla 18 muestra la hoja de datos de la bomba centrífuga higiénica Sudmo Pentair SP Series.

Tabla 18
Hoja de datos bomba centrífuga

Modelo	Sudmo Pentair SP Series
Material	Acero inoxidable 1.4404 (AISI 316L)
Flujo Máximo	35 gpm
Presión máxima de fluido	80 psi (1.4 bar)
Rango de funcionamiento de presión de aire	20-80 psi (1.4 a 5.5 bar)
Elevación máxima de succión	Mojado: 29 ft (8.8 m), Seco: 16 ft (4.9 m)
Suministro eléctrico	3 Fases, 230 V, 50/60 Hz
Motor	IEC 90S
Potencia del motor	2 hp (1.5 kW) y 1.75 hp (1.30 kW)
Velocidad del motor	3,000 rpm
Eficiencia	75 %
Tamaño de tubería	1 1/2 in

B.8. Tanque de almacenamiento

La tabla 19 muestra la hoja de datos del tanque de almacenamiento Sudmo Pentair.

Tabla 19
Hoja de datos tanque de almacenamiento

Modelo	Sudmo Pentair
Material	Acero inoxidable 316L
Norma	NSF/ANSI 61
Capacidad	2,000 Galones (7,570 litros)
Diámetro	8 ft (2.44 m)
Altura	7 ft 6 in (2.29 m)

B.9. Tubería

La tabla 20 muestra la hoja de datos de la tubería de acero inoxidable 316L.

Tabla 20
Hoja de datos tubería

Material	Acero Inoxidable 316L
Norma	NSF/ANSI 61
Tamaño nominal	1 1/2 in (DN40)
Diámetro exterior OD	1.90 in (48.3 mm)
Schedule	SCH 40
Espesor de las paredes	0.145 in (3.69 mm)
Diámetro interno	1.61 in (40.89 mm)
Peso	4.06 kg/m
Presión interna de ruptura	11,447 psi
Presión externa de colapso	4,332 psi

B.10. PLC

La tabla 21 muestra la hoja de datos del controlador programable de automatización Allen-Bradley CompactLogix 5370 L2 1769-L23E-QBFC1B.

Tabla 21
Hoja de datos PLC

Serie	CompactLogix 5370 L2
Modulo	1769-L23E-QBFC1B
Memoria de usuario	512 KB
Entradas incorporadas	16 digitales (24 V DC) 4 analógicas (0-10.5V 0-21 mA)
Salidas incorporadas	16 digitales 24 VDC 2 analógicas (0-10.5V 0-21 mA)
Fuente de alimentación integrada	24 V DC
Consumo de corriente @ 24 VDC	500 mA
Potencia	13.58 W
Puertos de comunicación	1 EtherNet/IP 1 RS-232 serial
Peso	2.7 lbs (1.22 kg)
Software de programación	RSLogix 5000

B.11. Válvula solenoide

La tabla 22 muestra la hoja de datos de válvula solenoide STC 2SO400.

Tabla 22
Hoja de datos válvula solenoide

Modelo	STC 2SO400
Material	Acero inoxidable 316L
Tipo	2 Vías, normalmente abierta (NO)
Activación	Diafragma de elevación directa
Orificio	40
Cv	29
Presión de operación	0-90 psi
Presión de Prueba	300 psi
Voltaje	Opciones 12, 24 V DC
Potencia de la bobina	35-40 W
Tamaño del puerto	1 1/2 in (NPT)
Peso	5.4 lbs

B.12. Sensor de nivel

La tabla 23 muestra la hoja de datos del interruptor automático de boya Bulletin 840-D1 de la marca Allen-Bradley.

Tabla 23
Hoja de datos sensor de nivel tipo flotador

Modelo	Bulletin 840-D1
Material	Acero inoxidable
Suministro eléctrico	32 V DC
Potencia máxima	0.25 HP
Rango de temperatura (interruptor)	-22...+150 °F (-30...+66 °C)
Rango de temperatura (boya)	-22...+200 °F (-30...+93 °C)
Dimensiones HxWxD	5.75x3.44x3.19 in (146x87x81 mm)
Peso	2 lb (0.9 kg)

ANEXO C
PROGRAMA DEL PLC

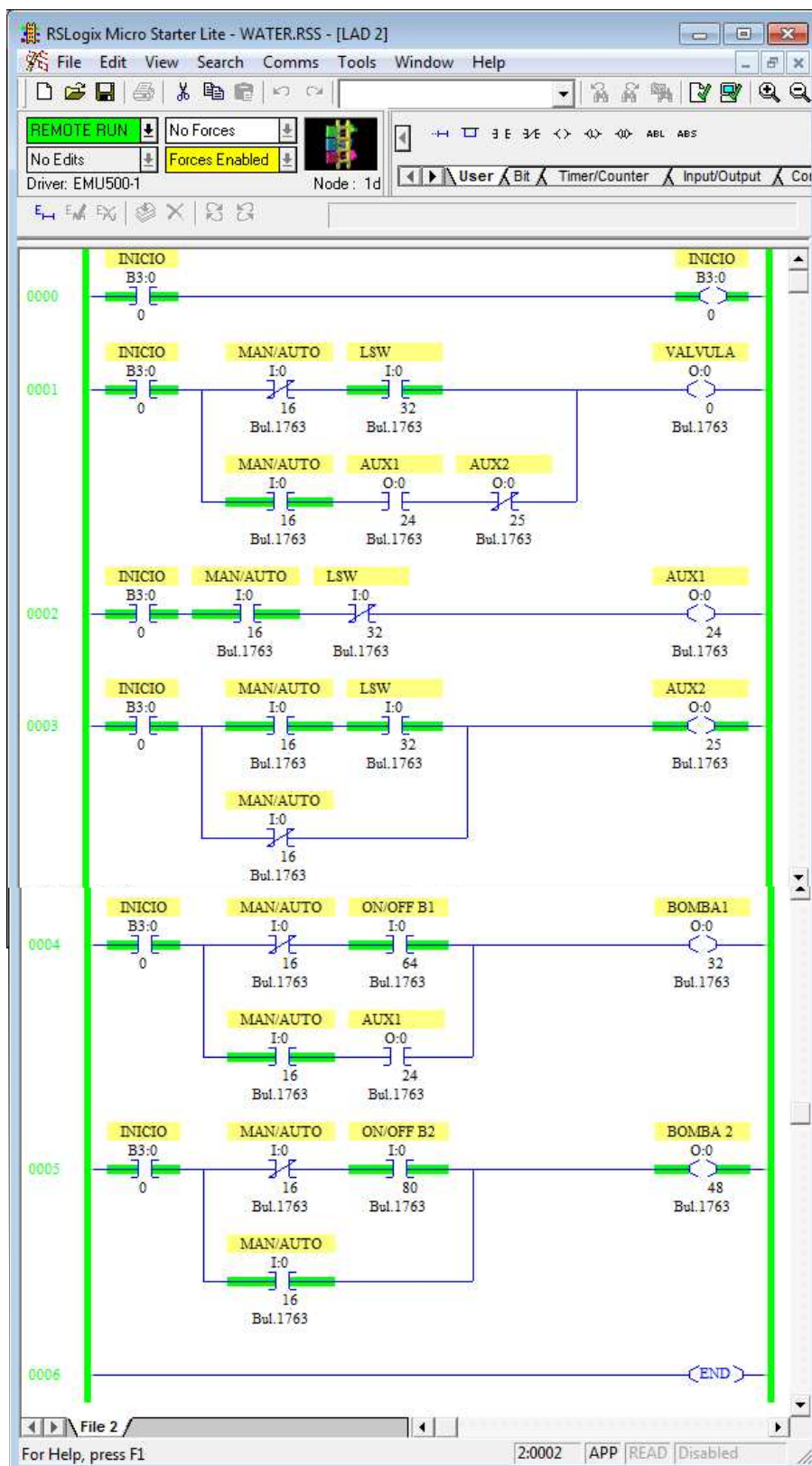


Figura 35: Programa del PLC

ANEXO D

VARIABLES DE ENLACE PLC HMI

Tabla 24
Variables de enlace entre el PLC y el HMI

Variable	Función	Dirección
INICIO/PARADA	Botón de inicio y parada del sistema	B3:0/0
MAN/AUTO	Botón de operación manual o automático	I0:0/16
LSW	Señal del sensor de nivel	I0:0/32
ON/OFF P-101	Botón de encendido y apagado de la bomba P-101	I0:0/64
ON/OFF P-103	Botón de encendido y apagado de la bomba P-103	I0:0/80
VALVULA	Energizar o desenergizar válvula solenoide	O:0/0
BOMBA P-101	Encender o apagar bomba P-101	O:0/32
BOMBA P-103	Encender o apagar bomba P-103	O:0/48