



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE
TURBIEDAD EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE EMAPASI-EP**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: WILSON ALEXANDER CABRERA CARBAJAL

TUTOR: ING. EDY LEONARDO AYALA CRUZ MSC. PHD.

Cuenca – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilson Alexander Cabrera Carbajal con documento de identificación N° 0105937544 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 02 de agosto del 2023

Atentamente,



Wilson Alexander Cabrera Carbajal
0105937544

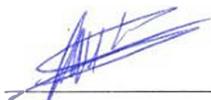
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Wilson Alexander Cabrera Carbajal con documento de identificación N° 0105937544, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Diseño de un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 02 de agosto del 2023

.Atentamente,



Wilson Alexander Cabrera Carbajal

0105937544

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edy Leonardo Ayala Cruz con documento de identificación N° 0105627277, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE TURBIEDAD EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EMAPASI-EP, realizado por Wilson Alexander Cabrera Carbajal con documento de identificación N° 0105937544, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 02 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Edy Leonardo Ayala Cruz, Msc. PhD.
0105627277

Dedicatoria

Wilson Alexander Cabrera Carbajal

El presente proyecto de titulación está dedicado:

A Dios y a la virgen del Cisne, quienes han sido mi guía y fortaleza para llevar a cabo cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres Wilson y Melva, quienes con su cariño, paciencia, esfuerzo y apoyo incondicional, me han permitido llegar a cumplir otro de los objetivos trazados. Gracias por siempre ser mi pilar e inculcar en mí, constancia, valentía y esfuerzo.

Finalmente, dedico a las personas que formaron parte del proceso y me brindaron su apoyo de una u otra forma.

Agradecimientos

Wilson Alexander Cabrera Carbajal

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llegar a cumplir esta meta tan anhelada y por brindarme salud, fuerza e impartirme sabiduría a lo largo del proceso.

Agradezco profundamente a mis padres que, gracias al cariño recibido, apoyo, paciencia y comprensión, ha sido posible lograr cada una de las metas que me he propuesto, gracias a mi madre por estar siempre dispuesta a acompañarme, guiarme y apoyarme en cada situación; a mi padre y mis hermanas por siempre alentarme y guiarme en la vida.

Me gustaría agradecer a mi Tutor de Proyecto de Titulación Ing. Edy Ayala, a quien admiro; por su esfuerzo y dedicación brindados al actual trabajo de titulación. Sus orientaciones, conocimientos y su paciencia han sido esenciales para culminar con el presente.

El agradecimiento, además, a las personas que formaron parte de mi vida universitaria, Jenny, Darwin, Ronaldo, Jose Luis, William, quienes con su apoyo altruista han sido partícipes de este gran sueño que no solo me pertenece a mí, sino a muchas personas. También mi gratitud a mis amigos Reither, Byron, Santiago y muchos más, quienes con sus palabras y acciones supieron alentarme a no rendirme en esta trayectoria.

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del Problema	3
2.3. Importancia y Alcances	4
2.4. Delimitación	4
2.4.1. Espacial o Geográfica	4
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial o Institucional	5
2.5. Problema General	5
2.6. Problemas Específicos	6
3. Justificación	6
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo General	7
4.2. Objetivos Específicos	7
5. Hipótesis	7
5.1. Hipótesis General	7

5.2. Hipótesis Específicas	7
6. Marco Teórico	8
6.1. Proceso de Potabilización	8
6.1.1. Captación	9
6.1.2. Floculación	10
6.1.3. Sedimentación	10
6.1.4. Filtración	10
6.1.5. Cloración	11
6.1.6. Almacenamiento	11
6.2. Tipos de Plantas de Potabilización	11
6.2.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Convencionales	11
6.2.2. Plantas de Tratamiento de Agua Compactas	12
6.2.3. Planta de Tratamiento de Agua con Sistema de Microfiltración	12
6.2.4. Planta de Tratamiento de agua con Sistema de Ultrafiltración	13
6.3. Turbiedad, un parámetro físico	13
6.4. Principio de Medición de Turbiedad	13
6.4.1. Fuentes de Luz	15
6.4.2. Detectores	15
6.5. Tipos de Medición de Turbiedad	16
6.5.1. Medición por Nefelometría	16
6.5.2. Medición por Absorción	16
6.5.3. Actuadores	17
6.6. Sistema de Control	17
6.6.1. Control ON/OFF	18
6.7. Instrumentación Industrial para Plantas de Potabilización	18
6.7.1. Sensor de Turbiedad Turbimax CUS52D	19
6.7.2. Transmisor de 4 Canales Liquiline CM444	20
6.7.3. Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200	22
6.7.4. Pulsador Luminoso Verde (NA)	24
6.7.5. Pulsador Luminoso Amarillo (NA)	24
6.7.6. Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocircuito fijo TM210 Protección LI	25
6.7.7. Interfaz Profinet	26
6.7.8. Interfaz Humano-Máquina (HMI) KTP700 basic color PN	27

6.7.9. Válvula de Mariposa KVZA	28
6.7.10. Software TIA PORTAL	29
6.8. Protocolo de Comunicación	30
6.8.1. Medio de Transmisión	30
6.8.2. Industrial Ethernet	30
7. Marco Metodológico	31
7.1. Parámetros del Diseño	31
7.1.1. Descripción de la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP	31
7.1.2. Proceso de Tratamiento de Agua Potable	31
7.1.3. Alimentación Eléctrica	34
7.1.4. Análisis de las Variables del Proceso	34
7.2. Análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control.	38
7.2.1. Dinámica del Sistema	38
7.2.2. Mecánica del Fluido	41
7.2.3. Sistema de Control ON/OFF	44
7.2.4. Simulación del Sistema de Monitoreo y Control	45
7.3. Sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y software disponibles en el mercado.	50
7.3.1. Esquema del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad	51
7.3.2. Diseño del Sistema de Monitoreo	54
7.3.3. Diseño del Sistema de Control	56
7.3.4. Diseño del Sistema de Alarma	58
7.3.5. Diseño del Sistema de Fuerza	59
8. Resultados	61
9. Conclusiones	63
10. Recomendaciones	64
Referencias	68
ANEXOS	69
Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica	70

Anexo B: Operacionalización de Variables	71
Anexo C: Registro de turbiedades de la planta de tratamiento de agua potable del cantón Santa Isabel.	72
Anexo D: Registro de turbiedades de la planta de tratamiento de agua potable del cantón Santa Isabel.	73
Anexo E: Información técnica del sensor Turbimax CUS52D.	74
Anexo F: Información técnica de la interfaz HMI 6AV2123-2GB03-0AX0.	79
Anexo G: Código programado en el software de TIA PORTAL.	82

Lista de Tablas

1.	Características del Sensor de turbidez turbimax CUS52D	20
2.	Características del transmisor de 4 canales liquiline CM444	21
3.	Características del Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200	23
4.	Características del Pulsador luminoso verde (NA).	24
5.	Características del Pulsador luminoso verde (NA).	25
6.	Características del Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocir- cuito fijo TM210 Protección LI.	26
7.	Características del KTP700 basic color PN	28
8.	Características de la válvula de mariposa KVZA	29
9.	Registro de turbiedades de los meses junio y julio del 2023.	35
10.	Registro de turbiedades de los meses noviembre y diciembre del 2022.	37
11.	Valores de turbiedad versus el voltaje entregado del sensor de turbiedad de nivel educativo	41
12.	Recurso de instrumentos y software	54
13.	Matriz de consistencia	70
14.	Variable dependiente	71

Lista de Figuras

1.	Planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP	5
2.	Proceso de Potabilización de agua	8
3.	Factores contaminantes de las fuentes de agua	9
4.	Proceso de potabilización de agua, etapa de floculación	10
5.	Planta de tratamiento de agua potable convencional	12
6.	Efectos de la luz al atravesar la muestra	14
7.	Representación de la medición por nefelometría	16
8.	Representación de la medición por absorción	17
9.	Representación gráfica del Control todo o nada	18
10.	Sensor de turbidez Turbimax CUS52D	19
11.	Transmisor de 4 canales liquiline CM444	21
12.	Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200	23
13.	Pulsador luminoso verde (NA)	24
14.	Pulsador luminoso amarillo (NA)	25
15.	Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocircuito fijo TM210 Protección LI	26
16.	KTP700 basic color PN	27
17.	Válvula de mariposa KVZA	29
18.	Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de Captación.	32
19.	Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de Floculación.	33
20.	Tanque de almacenamiento de agua tratada	34
21.	Registro de turbiedades de agua cruda y agua tratada	36
22.	Dinámica del sistema, dispersión de la luz	38
23.	Dinámica del sistema, funcionamiento de medición	39
24.	Dinámica del sistema, esquema de un sistema de medición de turbidez	40
25.	Esquema para el cálculo de presión	42
26.	Análisis del sistema de control ON/OFF	45
27.	Configuración del servidor OPCServer	46
28.	Simulación en la interfaz gráfica HMI, Primer estado	47
29.	Simulación en la interfaz gráfica HMI, Segundo estado	48
30.	Simulación en la interfaz gráfica HMI, Tercer estado	49
31.	Simulación de los actuadores y el panel de control	50
32.	Representación del esquema de proceso	51

33.	Esquema de instrumentación del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad	53
34.	Configuración de las variables para la Pantalla HMI	55
35.	Configuración de la Pantalla HMI	56
36.	Variables declaradas para el sistema de control	57
37.	Programación del sistema de control en TIA PORTAL	58
38.	Configuración del sistema de alarma	59
39.	Diseño del sistema de fuerza PLC	60
40.	Diseño del sistema de control, entradas y salidas digitales	61
41.	Simulación para el cálculo de presión	62

Resumen

Este proyecto presenta un diseño de sistema de monitoreo y control para los niveles de turbiedad en la planta de tratamiento de agua EMAPASI-EP (Empresa municipal de agua potable y alcantarillado de Santa Isabel).

La planta de tratamiento de agua potable ha estado en funcionamiento desde el año 2006, se encuentra ubicada en la provincia del Azuay, y es abastecida de agua cruda desde una fuente de la quebrada Paccha, con un caudal de 25 a 30 *lts/s*. Esta planta abastece aproximadamente a 4000 usuarios de agua potable y es operada normalmente por tres personas con turnos rotativos y un responsable a cargo de los análisis de laboratorio.

El problema que se presenta en la planta de tratamiento, se debe a que los niveles de turbiedad varían dependiendo de varios factores, ya sea climático u otros. Cuando los niveles superan el valor permisible, el proceso de tratamiento se ve afectado directamente, debido al tiempo de respuesta del operario en turno.

El objetivo de este diseño es reemplazar el proceso de análisis de turbiedad y el control de la válvula, ya que le toma al personal aproximadamente 10 minutos, analizar las muestras del tanque de captación de agua cruda y ocasionalmente el monitoreo se da de forma visual e instintiva. El control de la válvula se realiza manualmente cuando se identifican niveles de turbiedad altos. En estos casos, se cierra la válvula de paso hacia el tanque de captación de agua cruda. Este tipo de control se lo realiza durante las 24 horas del día, requiriendo un mayor control durante las horas de la noche.

El desarrollo de este sistema implica un levantamiento de información del proceso de tratamiento de agua potable, presentando que está dividido en las siguientes etapas: captación, floculación, sedimentación, filtración, cloración y almacenamiento. Se ha realizado un análisis de turbidez en muestras de agua cruda y tratada, tomadas entre junio y julio de 2023, revelando que el 42% de las muestras totales de agua tratada no cumplieron con el valor permitido 5 UNT (Unidades nefelométricas de turbiedad). El objetivo de recopilar información de la planta es proponer un sistema con la capacidad de reemplazar la operación manual actual con un sistema automatizado que cumpla con los requisitos de estandarización para medir la variable de turbidez.

En el desarrollo del sistema de monitoreo, se realizó el diseño para la interfaz estructurada de manera que muestra el estado de las válvulas, alarmas, niveles de turbidez y también permite controlar el sistema desde pantalla. Además, se llevó a cabo un análisis de presión en la entrada del tanque de captación, resultando en aproximadamente 23 *m.c.a.* (metros columna de agua) tal como se indica en la revisión bibliográfica para la selección de las

válvulas de control. Para elegir el sensor de turbiedad, es necesario que cumpla con el tipo de medición de nefelometría según la norma ISO 7027. Para verificar el funcionamiento de este sistema, en este trabajo de titulación se realizaron pruebas medición de turbiedad por absorción con un sensor genérico, el cual presentó un error relativo del 37% respecto al equipo de medición de turbiedad que utiliza actualmente EMAPASI-EP modelo 2100P ISO.

Palabras clave: Turbiedad, Alarma, Diseño de control, Diseño de alarma, Proceso de tratamiento.

Abstract

This project presents a design of a monitoring and control system for turbidity levels in the water treatment plant EMAPASI-EP (Santa Isabel Municipal Water and Sewage Company). The drinking water treatment plant has been in operation since 2006, is located in the province of Azuay, and is supplied with raw water from a source in the Paccha stream, with a flow rate of 25 to 30 *lts/s*. This plant supplies approximately 4000 drinking water users and is normally operated by three people on rotating shifts and a person in charge of laboratory analysis. The problem at the treatment plant is due to the fact that turbidity levels vary depending on various factors, whether climatic or other. When the levels exceed the permissible value, the treatment is directly affected due to the response time of the operator.

The objective of the design is to replace the process of turbidity analysis and valve control, which takes personnel approximately 10 minutes to analyze the raw water catchment tank samples and occasionally monitoring is done visually and instinctively. Valve control is performed manually when high turbidity levels are identified. The valve to the raw water collection tank is closed. This type of control is performed 24 hours a day, requiring greater control during the night.

The development of this system involved a survey of information on the treatment process, showing that it is divided into different stages: collection, flocculation, sedimentation, filtration, chlorination and storage. A turbidity analysis has been performed on raw and treated water samples taken between June and July 2023, revealing that 42% of the total treated water samples did not meet the permitted value of 5 UNT (Nephelometric Turbidity Units). The objective of collecting information from the plant is to propose a system with the functionality to replace the current manual operation with an automated system that meets the standardization requirements for measuring the turbidity variable.

In the development of the monitoring system, the design of the interface was structured to show the status of valves, alarms, turbidity levels and also allows the system to be controlled from the screen. In addition, a pressure analysis was performed at the catchment tank inlet, resulting in approximately 23 *m.c.a.* as indicated in the literature review for the selection of the control valves. In order to choose the turbidity sensor, it is necessary that it complies with the nephelometry type of measurement according to ISO 7027. To verify the performance of this system, in this titration work, turbidity measurement tests were carried out by absorption with a generic sensor, which presented a relative error of 37% with respect to the turbidity measurement equipment currently used by EMAPASI-EP, model 2100P ISO.

Keywords: Turbidity, Alarm, Control design, Alarm design, Treatment process.

1. Introducción

El agua está constantemente amenazada por diversos factores contaminantes que afectan su calidad y disponibilidad. Estos contaminantes pueden provenir de fuentes naturales o actividades humanas, y su presencia en el agua tiene consecuencias para los procesos de tratamiento. Uno de los principales factores contaminantes del agua son los desechos industriales y químicos. Las industrias liberan una amplia gama de productos químicos tóxicos en las aguas residuales, como metales pesados, solventes, pesticidas y productos químicos sintéticos. Estas sustancias contaminantes, que pueden filtrarse en los sedimentos, afectan directamente a las personas de forma perjudicial (Enriquez Bolaños, 2021).

En el campo del tratamiento de agua potable, se han reemplazado diferentes procesos manuales por procesos automatizados más eficientes. Tareas como en análisis de muestras de forma manual de los parámetros tanto físicos, químicos y microbiológicos del agua, el ajuste de los niveles de los productos químicos o el control de los equipos de filtración que requieren intervención humana constante. Sin embargo, ahora existen sistemas automatizados que supervisan y controlan estos procesos de manera continua y precisa, estos permiten una monitorización en tiempo real de los parámetros del agua, ajustando automáticamente los niveles de productos químicos según sea necesario y optimizando el funcionamiento de los equipos (Espinoza Ortega y Abril Abril, 2020). Estos procesos automatizados han mejorado significativamente la eficiencia y la precisión del tratamiento de agua potable, asegurando una calidad del agua óptima para el consumo humano (Salcedo Cañarte, Sevillano Zambrano, Salas Vazquez, y cols., 2020).

Este diseño busca reemplazar el proceso manual de medición que se lo realiza mediante el instrumento portátil 2100P ISO, este proceso le toma al personal un total de 10 minutos, ya que se requiere preparar la muestra, calibrar el instrumento y realizar varias mediciones para comparación de los valores. Se toma la acción basándonos en el nivel de turbiedad admisible por la planta que es de 40 NTU valores normales para un tratamiento eficiente. Se cierra o abre la válvula de entrada de agua cruda manualmente en caso de que la muestra de turbiedad presente un valor mayor al admisible. El sistema automatizado buscaría reemplazar el control manual, ya que resulta desgastante para el operario en turno el tomar muestras y el abrir y cerrar la válvula de paso de agua cruda hacia el tanque de captación. Mediante la programación se busca actuar de forma rápida en caso de que los niveles de turbiedad sobrepasen los límites establecidos. Como requerimiento de la planta se añade una torre de luz, como sistema de alarma. Este sistema tiene como fin el dar aviso cuando aumente los niveles de turbiedad, y cuando el valor sobrepase los 40 NTU, que son los valores imposibles de tratar

establecido por el personal en la planta, toma acción el sistema de control. Para el sistema de control se reemplaza la válvula de control manual por dos electroválvulas controladas, estas válvulas permiten el paso del agua y en caso de superar el valor de los límites de turbiedad imposibles de tratar, estas se cerrarán y darán paso para que el agua sea enviada al sistema de alcantarillado.

2. Problema

A continuación se describe los siguientes puntos como antecedentes, la descripción del problema y alcance del proyecto.

2.1. Antecedentes

La planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP se diseñó en el 2004 y su construcción se finalizó en el 2006, tiene una vida útil de 25 a 30 años; que abastece a una población de 4000 usuarios. Cuenta con procesos de floculación, sedimentación, filtración, cloración y almacenamiento. Trabaja con un caudal de 25 a 30 *lts/s* de acuerdo a las mediciones volumétricas, abastece a un tanque de almacenamiento de 500 m^3 y 3 tanques de 250 m^3 , que se encuentran ubicados en la zona de los bomberos Santa Isabel.

Según información del Instituto Nacional de Estadística y Censos “*el 90,23% de los GAD Municipales cuentan con sistemas de tratamiento de agua para consumo humano, el 1,86% compra agua tratada y el 7,91% no cuenta con sistemas de tratamiento*” (INEC, 2016). De los cuales, el 74% cumplen con la Norma INEN 1108 y el otro 26% no lo cumple, de esta manera, se tiene como objetivo que para el 2030 mejorar la calidad del agua (INEC, 2016).

La planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, cuenta con una fuente de abastecimiento de la quebrada Paccha, perteneciente a la parroquia Cañaribamba. Los niveles de turbiedad que presenta el agua cruda hace que el proceso de potabilización se vea afectado de manera directa en el tiempo y costos. “*La turbiedad de la fuente de abastecimiento incide sobre la eficiencia de los procesos convencionales de potabilización en la planta*” (Montoya, Loaiza, Torres, Cruz, y Escobar, 2011), por lo que se recomienda controles ante situaciones en donde se presenten altos niveles de turbiedad.

La medición de turbiedad o “*la medición de la turbidez es un proceso esencial en el sector*

del saneamiento” (HACH, 2023), se lo hace completamente manual por el personal capacitado en planta, la empresa cuenta con el Turbidímetro portátil 2100P ISO que tiene un rango de mediciones de hasta un nivel máximo de 1000 UNT, haciéndolo apto para realizar mediciones en los procesos que se requiera, ya sea en agua cruda o potabilizada.

“Debido a las limitaciones de costos, algunas Plantas de Tratamiento de Agua más pequeñas pueden usar solo uno o dos instrumentos de laboratorio para el muestreo de turbidez” (Termodinámica, 2023). Al no existir ningún instrumento o sistema de monitoreo en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, se considera la utilización de un instrumento de medición, con características de medición por nefelometría o absorción.

Hoy en día existen sistemas con monitoreo y control aplicados en plantas de tratamiento de agua potable, ya que el nivel de automatizar ciertos procesos viene dado por el avance tecnológico en cuanto a equipos de industrialización, tanto en controladores, sensores, actuadores y los sistemas de comunicación (Espinoza Ortega y Abril Abril, 2020), obteniendo una gran ventaja en cuanto a resultados comparados con procesos que se realizan manualmente.

2.2. Descripción del Problema

El proceso para el tratamiento de agua potable pasa por diferentes etapas como: captación de agua cruda, floculación, decantación, filtración, cloración y almacenamiento de agua tratada. Este proceso requiere un tiempo estimado de 3 horas, recalando que el agua que se almacena en el tanque de captación de agua cruda, tiene que tener un nivel de sedimentos aceptables para su purificación. Por el momento este tipo de procedimiento se lo hace a través de mediciones de turbiedad y de forma instintiva dependiendo del clima. La empresa EMAPASI-EP cuenta con el personal que realiza diferentes tareas y una de ellas es la medición y control de turbidez de agua cruda operando las 24 horas del día, el proceso es completamente manual realizándolo en intervalos de tiempo establecidos. De esta manera, su tiempo de respuesta es mayor en cuanto al control de turbiedad y hacer que todo el proceso se vea afectado económicamente, por los químicos que ya se han aplicado en el proceso de floculación y la cloración. La mayor tendencia de fallos en cuanto a dependencia del clima, es en épocas de invierno, porque se tiene una relación de aumento de sedimentos por efectos de la lluvia, haciendo que el monitoreo manual sea más riguroso por la persona encargada, obteniendo como resultado un desgaste físico.

2.3. Importancia y Alcances

La importancia de la investigación para el diseño de monitoreo y control de los parámetros de turbiedad, es la reducción de tiempos en el análisis de los niveles de turbiedad que por el momento se lo realiza de forma manual mediante un turbidímetro disponible en la planta EMAPASI-EP y el tiempo de respuesta en cuanto se presenta niveles de turbiedad altos que se vuelven imposibles para la potabilización.

El diseño del sistema de monitoreo y control de los parámetros de turbiedad tendrá como fin el presentar un sistema autónomo; que nos permita tomar datos de forma continua mediante un sensor de turbiedad. Analizando los rangos de turbiedad adquiridos manualmente se establecerá un valor límite admisible de sólidos en suspensión para el accionar del sistema de alarma y control.

2.4. Delimitación

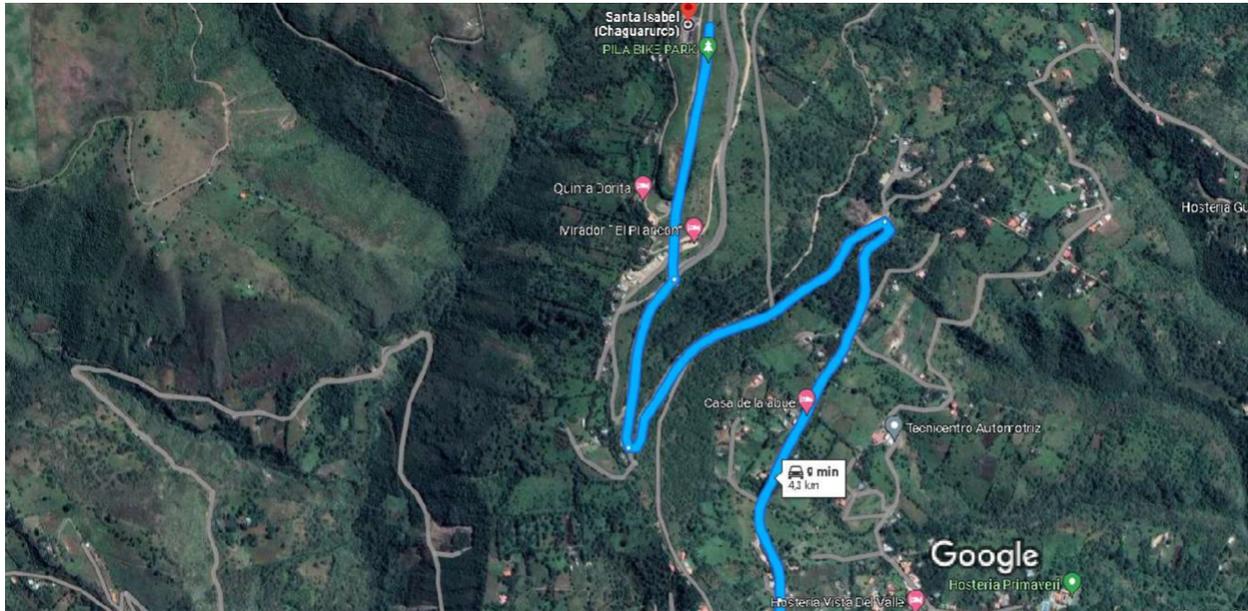
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o Geográfica

El diseño para el monitoreo y control de los parámetros de turbiedad para el tanque de almacenamiento, se analizará en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, ubicado en el sector de Pilancon del cantón Santa Isabel, provincia del Azuay.

Figura 1

Planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.



Nota: Planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, ubicado en el sector de Pilancon del cantón Santa Isabel, provincia del Azuay. Con coordenadas (-3.2546850926370037, -79.3201159642604), tomado de (Google, 2023).

2.4.2. Temporal

La presente investigación se desarrollará en un periodo de 400 horas que corresponden a las asignaturas de Trabajo de titulación uno y Trabajo de titulación dos.

2.4.3. Sectorial o Institucional

El proyecto se aplicará en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.

2.5. Problema General

- ¿Qué diseño es idóneo para un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda?
- ¿Es posible realizar un análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control de turbiedad?
- ¿Es factible diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y software disponibles en el mercado?

3. Justificación

La planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP desde terminada su construcción en el 2006 no ha tenido cambios en cuanto a su infraestructura, esta tiene la capacidad de abastecer a 4000 usuarios. Su rendimiento máximo se da en horarios de la noche, ya que, en ese intervalo de tiempo, su demanda es menor y pueden llenar los tanques de almacenamiento de agua tratada. El primer tanque tiene una capacidad de 500 metros cúbicos ubicada en la planta de tratamiento EMAPASI-EP, existen otros dos tanques que se encuentran ubicados en la zona de bomberos de Santa Isabel con una capacidad de 250 metros cúbicos cada uno. La planta de tratamiento tiene una operabilidad de 24 horas todos los días de la semana y su personal tiene rotación de turnos con tareas específicas para el control de llenado de los tanques, además del control del nivel de sólidos en suspensión en el tanque de almacenamiento de agua cruda.

En la actualidad las plantas de tratamiento presentan resultados positivos en cuanto a la optimización de los procesos, desde la captación de agua cruda hasta el almacenamiento de agua potabilizada. Por lo que, la empresa, habiéndose con una deficiencia en cuanto a un sistema de monitoreo y control incapaz de realizar una adquisición de datos de los parámetros de turbiedad de manera eficiente y rápida, se ve en la necesidad de requerir un diseño con la utilización de instrumentos industriales como: sensores, PLC, y sistemas de alarma. Obteniendo como resultado un control de la turbiedad las 24 horas del día, optimizando el proceso tanto en tiempos de respuesta y costos, reemplazando el proceso que se lo realiza manualmente por el operario en turno.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.

4.2. Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda.
- Realizar un análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control.
- Diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y software disponibles en el mercado.

5. Hipótesis

5.1. Hipótesis General

- Se diseñará un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.

5.2. Hipótesis Específicas

- Se establecerá los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda.
- Se analizará la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control de turbiedad.
- Se diseñará un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y software disponibles en el mercado.

6. Marco Teórico

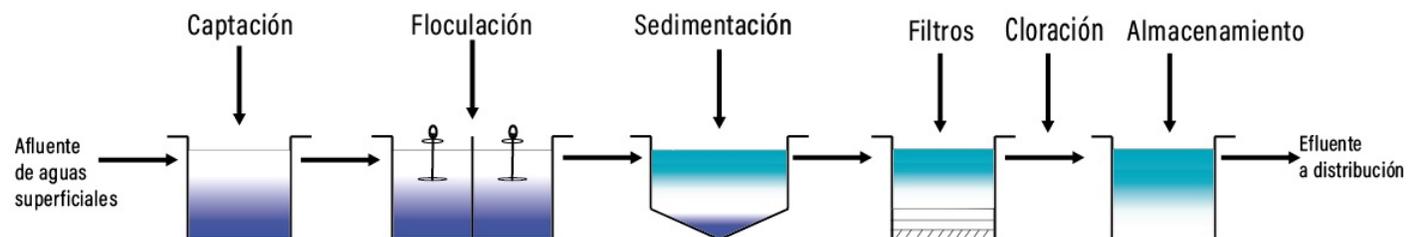
El tratamiento de agua potable es muy importante, ya que tiene un impacto directo en la salud humana. Garantizar el suministro de agua adecuado, ayuda a prevenir enfermedades y proteger la calidad de vida de las personas. Por consiguiente se presenta uno de los procesos de potabilización aplicado en el tratamiento de agua potable.

6.1. Proceso de Potabilización

El proceso de potabilización tiene como objetivo el dar un tratamiento adecuado para el control tanto de propiedades físicas, químicas y microbiológicas, de esta manera garantizar una calidad de agua apta para el consumo humano (Maxi Cadme, 2022). Este proceso comienza con la fase de almacenamiento (captación) del agua cruda. Luego, se agregan sustancias químicas para llevar a cabo el proceso de floculación, seguido de ello se lleva a cabo la fase de sedimentación. La sedimentación consiste en una estructura donde los grupos de partículas se dirigen al fondo de la estructura debido a la influencia de la gravedad. La siguiente etapa es la filtración, donde las partículas que aún se encuentran en el agua se retienen en el medio filtrante (como arena y gravilla), lo que resulta en un agua incolora. La desinfección es la etapa posterior, en la cual se añade cloro para eliminar los microorganismos, y finalmente se distribuye a través de la red de suministro hacia hogares, empresas y otros destinos. A continuación, en la figura 2 se presenta un esquema de cada una de las etapas.

Figura 2

Proceso de Potabilización de agua



Nota: Etapas del proceso de potabilización para el tratamiento de agua potable tomado de (Howe, Hand, Crittenden, Trussell, y Tchobanoglous, 2012)

6.1.1. Captación

En el proceso de captación del agua cruda, se tiene diferentes fuentes de abastecimiento como: Lagos, ríos, agua de mar, entre otras. Esta diversidad de fuentes tiene como consecuencia el que presente diversos factores de contaminación. Los lagos y ríos pueden estar expuestos a la contaminación de las actividades humanas. Existen otras fuentes potenciales de contaminación, como la presencia de microorganismos patógenos y contaminación química (Howe y cols., 2012), En la figura 3 puede observar diversos factores de contaminación.

Figura 3

Factores contaminantes de las fuentes de agua



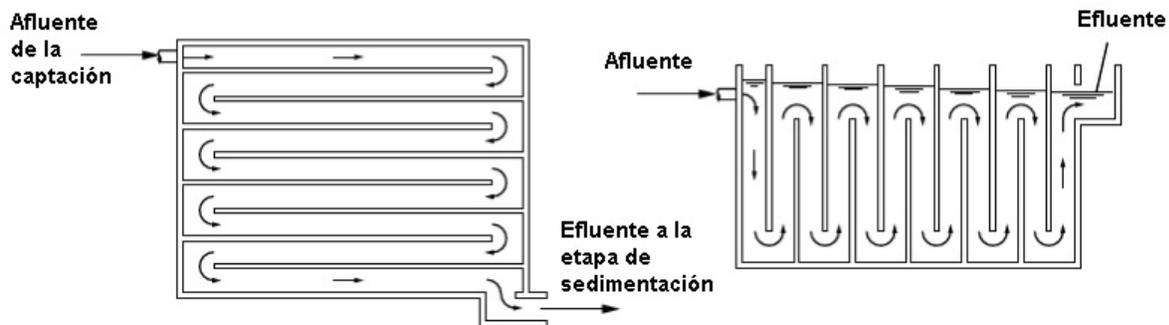
Nota: En esta figura se nombra diferentes factores de contaminación de las fuentes hídricas para el abastecimiento de las plantas de tratamiento de agua potable (Howe y cols., 2012)

6.1.2. Floculación

Existen varios sistemas de floculación tales como: Sistemas de floculación de turbina vertical como se puede observar en la figura 2, y el tipo de sistema de floculación hidráulica que se lo puede observar en la figura 4. El sistema de floculación hidráulica genera un tipo de floculo del tamaño de $0,05 - 0,15m$, esto presenta una ventaja en cuanto a esta etapa (Howe y cols., 2012).

Figura 4

Proceso de potabilización de agua, etapa de floculación



Nota: Proceso de potabilización de agua, en esta figura se presenta el sistema de floculación hidráulica (Howe y cols., 2012).

6.1.3. Sedimentación

En esta etapa su estructura está diseñada de manera que permite que los sólidos presentes en el agua se separen y se asienten en la parte de la base debido a la acción de la gravedad. Como resultado se obtiene que el agua fluya hacia la siguiente etapa, libre de la mayoría de impurezas y partícula grandes, atribuyendo a obtener un agua más clara (Howe y cols., 2012).

6.1.4. Filtración

La etapa de filtración tiene como diseño el utilizar material (arena), que atrapa las partículas que aún están suspendidas. La arena retiene las partículas y una vez que este material se satura, se realiza el proceso de lavado para su mantenimiento.

6.1.5. Cloración

En esta etapa se realiza la agregación del cloro, ya que el agua requiere una desinfección y eliminación de microorganismos patógenos. La cloración se lo puede realizar en diferentes etapas del proceso y requiere ser controlada cuidadosamente para garantizar una concentración adecuada.

6.1.6. Almacenamiento

Dentro del almacenamiento, esta estructura tiene la capacidad de almacenar el agua una vez realizada todas las etapas de tratamiento. En distribuciones altas se requiere el almacenamiento de agua porque la demanda resulta mayor. En plantas convencionales el agua se almacena en horas de menos demanda que por lo general es en las noches y se distribuye en horas de alta demanda.

6.2. Tipos de Plantas de Potabilización

Las plantas de potabilización, tienen diferentes procesos o pasos para el tratamiento de agua. Su estructura está diseñada para propiciar un agua que cumpla con los estándares de calidad y está a la vez sea apto para el consumo humano. Existen diferentes tipos de Plantas potabilizadoras, pero las más empleadas dentro del sector urbano y rural son las siguientes: Plantas de tratamiento de agua potable convencionales, las plantas de tratamiento de agua potable compactas, las plantas de tratamiento de agua con sistema de microfiltración y las plantas de tratamiento de agua potable con sistema de ultrafiltración (Vivas Cardenas, Moreno Moreno, y cols., 2023).

6.2.1. Plantas de Tratamiento de Agua Potable Convencionales

Este tipo de planta está diseñada de la forma en donde cada etapa del tratamiento, se da en una estructura diferente, como se muestra en la figura 5. Consta de canales, floculadores y filtros, este tipo de plantas potabilizadoras abastecen a un gran número de usuarios (Ciudades o Municipios) (FibrasyNormasdeColombiaS.A.S., 2004).

Figura 5

Planta de tratamiento de agua potable convencional



Nota: Planta de tratamiento de agua potable convencional EMAPASI-EP

6.2.2. Plantas de Tratamiento de Agua Compactas

Este tipo de planta realiza las etapas de coagulación, floculación y sedimentación en una sola estructura. La siguiente etapa es mover el agua hacia los filtros, tiene ventajas como: mantener un largo tiempo el suministro del recurso, presenta un alta calidad en el agua y la desinfección la realiza con un método de ultravioleta eliminando el 99.9% de las bacterias (FibrasyNormasdeColombiaS.A.S., 2004).

6.2.3. Planta de Tratamiento de Agua con Sistema de Microfiltración

El diseño de este tipo de planta potabiliza el recurso hídrico con presencia de partículas de hasta 5 micras. Fabricada en fibra de vidrio, genera poco consumo energético y puede purificar desde 250 a 30 000 *lts/h*. La ventaja es su uso de poca energía, el uso de membranas que lo hace adecuado y eficiente al momento de la eliminación de microorganismos, esto hace que el uso de cloro como desinfectante sea aplicado en menores cantidades y el uso de espacio para su instalación es menor (FibrasyNormasdeColombiaS.A.S., 2004).

6.2.4. Planta de Tratamiento de agua con Sistema de Ultrafiltración

Este tipo de planta de tratamiento puede ser abastecida por diferentes afluentes, ya sea ríos, quebradas, lagunas, etc. Pues su tecnología le permite retener partículas del tamaño de hasta 0,01 micras. Esto genera un agua potable de mejor calidad, lo hace ideal para plantas envasadoras de agua. Logra purificar hasta 20 000 *lts/h*. La ventaja de utilizar este tipo de plantas son: No se requiere de insumos químicos, fácil de almacenar y transportar, larga vida útil y resistente a los agentes químicos (FibrasyNormasdeColombiaS.A.S., 2004).

6.3. Turbiedad, un parámetro físico

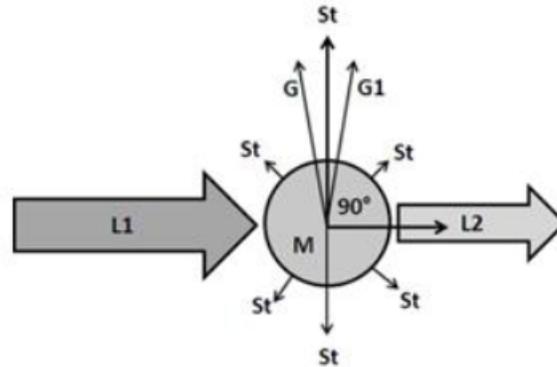
La turbiedad o “*la turbidez se define por la Organización Internacional de Normalización (ISO), como la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de partículas no disueltas de material distinto al propio líquido*” (Pardo Vilcacundo y Pérez Albornoz, 2019). El parámetro de turbiedad es de importante estudio en el campo de tratamiento de agua, ya que al presentar un índice alto de turbiedad se la asemeja con una alta probabilidad de presencia de organismos y de material en suspensión.

6.4. Principio de Medición de Turbiedad

El principio de medición de turbiedad se entiende como, en el momento que se envía una señal de luz en la muestra del líquido, los sólidos en suspensión hacen que la luz sea reflejada en otras direcciones, por lo que al momento de absorción, su intensidad se ve afectada directamente como se puede observar en la figura 6. Cuando se requiera analizar niveles de turbiedad baja, recomiendan usar niveles de luz dispersa (fotodetectores). Cuando se requiera medir altas concentraciones de turbiedad, se emplean métodos como absorción (Acebo-González y Hernández-García, 2013).

Figura 6

Efectos de la luz al atravesar la muestra



Nota: Se observan los cambios de luz al atravesar la muestra. L1 se refiere al rayo de luz que incide sobre la muestra, mientras que L2 es el rayo de luz que ha pasado a través de la muestra. M representa la muestra en análisis. St indica la luz dispersada por las partículas suspendidas en la muestra. G y G1 hacen referencia a los rayos periféricos del haz de luz dispersado, tomado de (NEPHELOMETRY, 1993).

Para el análisis del sistema de medición por nefelometría, se dice que el cociente de la intensidad de la luz transmitida entre la intensidad de luz dispersada es directamente proporcional a la concentración de sólidos en suspensión que la muestra en estudio posee, se detalla a continuación la siguiente ecuación.

$$\frac{I_d}{I_o} = K_s c$$

Donde:

I_d :Intensidad de luz dispersada

I_o :Intensidad de luz transmitida

K_s :Constante empírica

c :Concentración

6.4.1. Fuentes de Luz

Las fuentes de luz son equipos capaces de transformar energía eléctrica en luz. En mediciones de turbidez, se utilizan principalmente lámparas de filamento de tungsteno incandescente, las cuales emiten luz en un amplio espectro con diversas longitudes de onda (Acebo-González y Hernández-García, 2013). Además, se emplean otros dispositivos para medir la turbidez, como el LED (diodos emisores de luz), que tienen la capacidad de emitir radiación electromagnética cuando se polarizan directamente.

- LED: El diodo emisor de luz es considerado una fuente de luz, estos son diseñados comúnmente de Silicio y Germanio. También existen diseños como lo son el Galio y Arsénico.
- Lámpara de filamento de tungsteno: Este tipo de fuente se implementó en la aeronáutica, debido a su tamaño compacto y a su alta intensidad. Actualmente, esta fuente se utiliza para mediciones de turbidez, gracias a su banda espectral con múltiples longitudes de onda.

6.4.2. Detectores

En este tipo de estudio donde se requiere la medición de turbiedades, después de que la luz es emitida hacia la muestra, es necesario un instrumento que sea capaz de captar las variaciones de luz (Torres Rivera, 2023). A continuación se presenta los tipos de detectores utilizados.

- Tubos fotomultiplicadores

Este dispositivo recibe la luz dispersa y la convierte en una señal eléctrica. Es muy sensible a rayos ultravioleta y requiere de alimentación de alta tensión precisa para mantener un rango de medición estable.

- Foto resistor

Este dispositivo es conocido también como fotoconductor de sulfuro de cadmio, es utilizado para detectar la intensidad de luz. Está compuesto por sulfuro de cadmio, es un material muy sensible a la luz que actúa como un resistor cuya función varía con la cantidad de luz que incide sobre él. La resistencia del foto-resistor varía inversamente con la intensidad de luz.

6.5. Tipos de Medición de Turbiedad

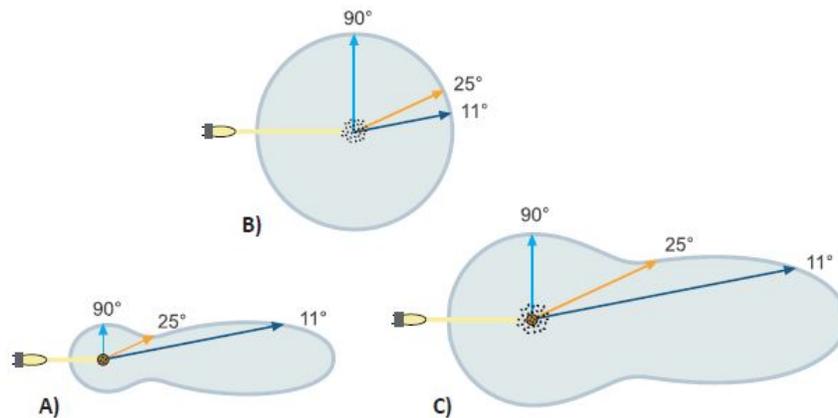
Existen dos tipos de medición de turbiedad, como lo son el de medición por nefelometría y la medición por absorción que serán descritas a continuación.

6.5.1. Medición por Nefelometría

Este tipo de medición se da por un sistema mediante un reflector, que genera un haz de luz. Un detector de luz está ubicado a 90 grados, este detector convierte la intensidad lumínica recibida en una señal eléctrica (Endress+HauserAG, 2023a). Este tipo de medición trabaja con niveles menores a 5 UNT, es ideal para mediciones en agua potable, el ángulo más bajo para mediciones es de 11 grados (GmbH, 2023).

Figura 7

Representación de la medición por nefelometría



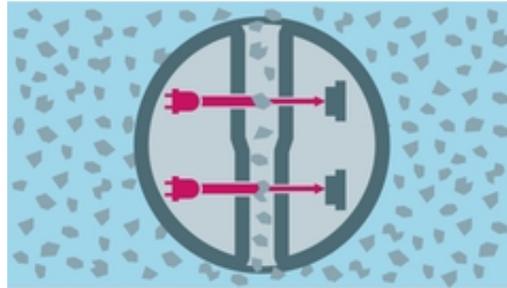
Nota: Distribución angular de la intensidad de la luz difusa causada por: A) partículas más grandes, B) coloides y C) una mezcla de ambos, tomado de (GmbH, 2023).

6.5.2. Medición por Absorción

La medición por absorción tiene un sistema donde el reflector, envía un haz de luz directamente al detector. Los sólidos en suspensión presentes en medio de los dispositivos, hacen que disminuya la intensidad de luz y el detector convierte una señal eléctrica (Endress+HauserAG, 2023a). Es ideal para trabajar en rangos altos de turbiedad como aguas residuales.

Figura 8

Representación de la medición por absorción



Nota: Medición de turbidez por absorción, tomado de Endress+HauserAG (2023a).

6.5.3. Actuadores

Para los sistemas de control, los actuadores resultan instrumentos importantes dentro de los procesos. Los actuadores se disponen en hidráulicos, neumáticos y eléctricos, tiene la funcionalidad de transformar esta energía en un modo de control. Los actuadores hidráulicos por lo general se los usan para, generar potencia y estos demandan un alto gasto en mantenimiento. Los actuadores neumáticos son usados para, posicionamiento y presentan una gran desventaja en cuanto al rango de aplicaciones. Los actuadores electrónicos trabajan mediante accionamientos por corriente eléctrica y en la industria resultan indispensables en procesos mecatrónicos (Gutiérrez Hinestroza y Iturralde Kure, 2017) .

6.6. Sistema de Control

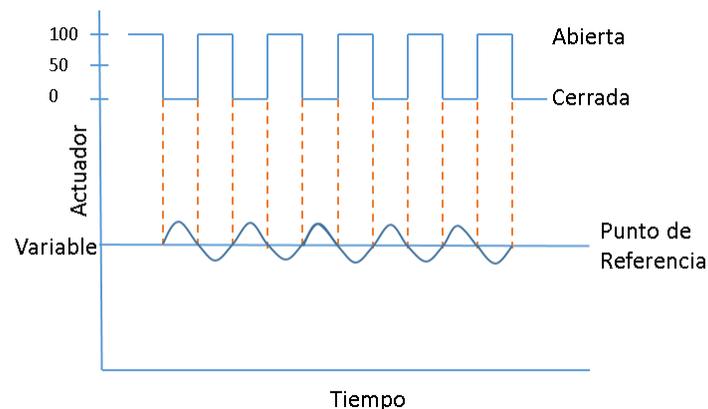
Un sistema de control es el conjunto de elementos que se encuentran conectados, para una determinada acción ante una variable o fenómenos. El sistema de control tiene una variable de entrada, esta pasa por un proceso ya definido dependiendo de la configuración y su acción será la variable de salida (Hernández, 2010).

6.6.1. Control ON/OFF

En el sistema de control todo o nada, el actuador toma dos posiciones. Este control se define por presentar un ciclo continuo de variación de la variable a controlar. Si el proceso a controlar tiene una reacción lenta y el tiempo de respuesta es bajo, este tipo de control resulta adecuado a utilizar. La variable a controlar tiene oscilaciones continuas y estas tienen variaciones si se presentan cambios de carga en el proceso (Creus, 2010), como se observa en la figura 9.

Figura 9

Representación gráfica del Control todo o nada



Nota: Representación gráfica del control todo o nada (on-off).

6.7. Instrumentación Industrial para Plantas de Potabilización

El seleccionar la instrumentación adecuada para el sistema de monitoreo y control, se toma en cuenta varios aspectos. Se considera el método por el cual se debe captar la señal de turbidez que cumpla con la normativa ISO 7027, esto implica el determinar el sensor adecuado para medir la turbidez de manera precisa y confiable. El sistema de control debe tener la capacidad de recibir dicha señal y realizar la acción necesaria en función de esta, y por último se selecciona los componentes adecuados para el sistema de monitoreo y alarma.

6.7.1. Sensor de Turbiedad Turbimax CUS52D

El sensor de sólidos en suspensión tiene, como característica, el de medición por nefelometría. Este tipo de medición es ideal para mediciones con rangos altos de turbiedad. El sensor Turbimax CUS51D como se observa en la figura 10 mide la presencia de sólidos en suspensión y es ideal para aplicaciones en plantas de tratamiento para aguas sin tratamiento (Endress+HauserAG, 2019). El sensor Turbimax CUS52D, es fiable y presenta una alta precisión al momento de la medición de turbidez. Tiene características en su diseño que ofrece auto-limpieza, lo que hace que el mantenimiento no sea constante. Sus tiempos de respuesta en cuanto al cambio en la variable estudiada es instantánea. Su diseño lo hace ideal para diferentes aplicaciones como: Procesos de tratamiento de agua potable, captación de agua cruda, almacenamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales y redes de distribución en industrias. (Endress+Hauser, 2020)

Figura 10

Sensor de turbidez Turbimax CUS52D



Nota: Sensor de turbidez Turbimax CUS52D, tomado de (Endress+Hauser, 2020).

Tabla 1

Características del Sensor de turbidez turbimax CUS52D.

Características técnicas	Valores
Rango de medición	0,000 a 4 000 UNT
Presión de proceso	0,5 a 10 bar abs
Principio de medición	Nefelométrica (90° de dispersión) ISO7027
Límite de caudal	No se requiere caudal mínimo

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Endress+Hauser, 2020).

6.7.2. Transmisor de 4 Canales Liquiline CM444

El transmisor tiene la función de recibir la señal de la variable mediante un dispositivo y envía la señal de forma neumática, eléctrica, digital, etc. (Creus, 2010) El transmisor Liquiline CM442 permite conexión de sensores de forma autónoma, y trabaja con 12 parámetros de medición. Cuenta con sistemas de control y la tecnología Heartbeat que ayuda con puntos de medición y costes de mantenimiento. Cuenta con protocolos de comunicación e interfaces de comunicación que son: HART, PROFIBUS DP, Modbus TCP, EtherNet/IP, PROFINET y servidor WEB (Endress+HauserAG, 2023b). El Transmisor de 4 canales Liquiline CM444, brinda un sistema capaz de reconocer de forma automática los sensores. Tiene entradas, salidas y módulos matemáticos, tiene una extensa lista de aplicaciones tanto para: Alimentos, tratamientos de agua, aguas residuales, industria química. Presenta varias ventajas, la puesta en marcha es segura, ahorrando costos y tiempo (Endress+Hauser, 2019), figura 11.

Figura 11

Transmisor de 4 canales liquiline CM444



Nota: Transmisor de 4 canal Liquiline CM444, tomado de (Endress+Hauser, 2019).

Tabla 2

Características del transmisor de 4 canales liquiline CM444.

Características Técnicas	Valores
Señal de entrada	2 de 0/4 a 20 mA y 0 a 30 V
Especificaciones de los cables	Memosens cable de datos CYK10, conector M12
Corriente de entrada nominal	max. 8mA
Tensión de alimentación	100 a 230 Vca, 50/60 Hz
Consumo de potencia	100 a 230 V CA, 73 VA; 24 VCC Max 68 W
Fusible	Fusible no intercambiable

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Endress+Hauser, 2019).

6.7.3. Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200

Un sistema de control permite manejar máquinas industriales con pasos pre-configurados. Este tipo de sistema es un PLC que integra diferentes tipos de señales de entrada/salida como lo son analógicas y digitales. El PLC cuenta con sistemas que nos permite configurar procesos y al mismo tiempo visualizarlos, también cuenta con sistemas que nos permite configurar el proceso y al mismo tiempo controlarlos con señales de realimentación (Salazar y Arango, 2017).

El hardware de un controlador lógico programable tiene, un medio de comunicación para entradas y salidas (I/O). Los tipos de memoria que ocupa son: Memoria solo de lectura (ROM), eléctricamente programable (EPROM) y memoria de acceso aleatorio (RAM). Existe una ventaja principal debido a la existencia de módulos estándar (Sabri, 2013).

Existen gran variedad de módulos de interfaz dentro de un controlador lógico programable disponible: Módulo de entrada discreta DC y AC, módulo de salida discreta DC y AC, módulos de entradas y salida Analógicos (con rangos 0 a 5 VDC, -10 a +10 VDC, 4 a 20 mA, con resolución de 10 a 16 bits), módulo para temporizador y contador, módulo para el control P, PI y PID (Sabri, 2013).

El PLC, brinda una serie de opciones que nos permite controlar un número limitado de dispositivos, ideal para automatizar procesos. Su estructura flexible y los diferentes tipos de instrucciones lo hace adecuado para una variedad extensa de aplicaciones, combina elementos como: Microprocesador, fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, PROFINET y E/S de control rápidas. El programa contiene diferentes lenguajes, con la lógica indispensable para monitorear y controlar las herramientas utilizadas en la aplicación (Siemens, 2018), figura 12.

Figura 12

Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200



Nota: Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200 con referencia del fabricante 6ES7215-1BG40-0XB0 , tomado de (Siemens, 2023d).

Tabla 3

Características del Controlador Lógico Programable (PLC) SIMATIC S7-1200.

Características Técnicas	Valores
Tensión de alimentación	120/230 V AC
Frecuencia de red	47 Hz/63 Hz
Intensidad de entrada	300 mA con 120 V AC, 150 mA con 240 V AC
Tensión de entrada	24 V
Entradas digitales	14; integrado
Salidas digitales	10; relé
Entradas analógicas	2
Salidas analógicas	2
Interfaz	PROFINET

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Siemens, 2023d).

6.7.4. Pulsador Luminoso Verde (NA)

El pulsador luminoso verde es un dispositivo con salida de señales temporales o permanentes, junto con esta mecánica los contactos realizan acciones temporales o permanentes. Normalmente, el pulsador luminoso verde se lo utiliza para indicar condición segura en el proceso (AG, 2021), se puede observar el dispositivo en la siguiente figura 13.

Figura 13

Pulsador luminoso verde (NA)



Nota: Pulsador luminoso verde (NA) con referencia del fabricante 3SU1106-0AB40-1BA0 , tomado de (Siemens, 2023b).

Tabla 4

Características del Pulsador luminoso verde (NA).

Características Técnicas	Valores
Tensión de alimentación	230 V (50/60 Hz)
Corriente de conexión del módulo (max)	3A
Temperatura ambiente proceso	-25 °C...+70 °C
Resistencia a tensión	4 kV

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Siemens, 2023b).

6.7.5. Pulsador Luminoso Amarillo (NA)

El pulsador luminoso Amarillo es un dispositivo con salida de señales temporales o permanentes, junto con esta mecánica los contactos realizan acciones temporales o permanentes.

Normalmente, el pulsador amarillo se lo utiliza para indicar señal de advertencia (AG, 2021), se puede observar el dispositivo en la siguiente figura 14 .

Figura 14

Pulsador luminoso amarillo (NA)



Nota: Pulsador luminoso amarillo (NA) con referencia del fabricante 3SU1106-0AB30-1BA0 , tomado de (Siemens, 2023a).

Tabla 5

Características del Pulsador luminoso verde (NA).

Características Técnicas	Valores
Tensión de alimentación	230 V (50/60 Hz)
Corriente de conexión del módulo (max)	3A
Temperatura ambiente proceso	-25 °C...+70 °C
Resistencia a tensión	4 kV

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Siemens, 2023a).

6.7.6. Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocircuito fijo TM210 Protección LI

Este interruptor es importante para la protección de los equipos, si se presenta una sobrecarga en el sistema.

Figura 15

Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocircuito fijo TM210 Protección LI



Nota: Pulsador luminoso amarillo (NA) con referencia del fabricante 3SU1106-0AB30-1BA0 , tomado de (Siemens, 2023a).

Tabla 6

Características del Interruptor 2 polos con disparador de sobrecarga y cortocircuito fijo TM210 Protección LI.

Características Técnicas	Valores
Tensión de alimentación	500 V (50/60 Hz)
Durabilidad eléctrica	6 000
Temperatura ambiente proceso	-25 °C...+80 °C
Vida útil mecánica	15 000

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica, tomado de (Siemens, 2023a).

6.7.7. Interfaz Profinet

El Controlador Lógico Programable SIMATIC S7-1200, en su interfaz de comunicación, incorpora Profinet Controller. Esta funcionalidad permite comunicación entre un Controlador

Lógico Programable (PLC) y una Interfaz Máquina-Humano (HMI), también nos permite tener comunicación entre dos controladores (PLC). El protocolo TCP/IP, nos ayuda a la comunicación entre Controladores (PLC) y equipos (Transmisores, sensores). La velocidad de transmisión es de 10/100 Mbps.

6.7.8. Interfaz Humano-Máquina (HMI) KTP700 basic color PN

La Interfaz Humano-Máquina (HMI), dentro de un sistema de automatizado, apoya en tareas de control y monitoreo. Su funcionalidad nos permite visualizar curvas, históricos, etc. Su sistema es capaz de guardar proyectos y parámetros de forma automática.

Figura 16

KTP700 basic color PN



Nota: KTP700 Basic color PN con referencia del fabricante 6AV2123-2GB03-0AX0 , tomado de (Siemens, 2023c).

Tabla 7*Características del KTP700 basic color PN*

Características Técnicas	Valores
Tipo	Pantalla TFT panorámica
Tensión de alimentación	24 V DC
Intensidad de entrada	230 mA
Potencia	5,5 W
Protocolos	PROFINET, EtherNet/IP(TCP/IP)
Temperatura proceso	-20 °C/60 °C

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica de KTP700 Basic color PN, tomado de (Siemens, 2023c).

6.7.9. Válvula de Mariposa KVZA

Para los sistemas de control, los actuadores resultan instrumentos importantes dentro de los procesos. Los actuadores se disponen en hidráulicos, neumáticos y eléctricos, tiene la funcionalidad de transformar esta energía en un modo de control. Los actuadores hidráulicos por lo general se los usan para, generar potencia y estos demandan un alto gasto en mantenimiento. Los actuadores neumáticos son usados para, posicionamiento y presentan una gran desventaja en cuanto al rango de aplicaciones. Los actuadores electrónicos trabajan mediante accionamientos por corriente eléctrica y en la industria resultan indispensables en procesos mecánicos (Gutiérrez Hinestroza y Iturralde Kure, 2017) . Este tipo de válvula, como se observa en la figura 17 tiene un accionamiento automático, mediante un actuador giratorio. Tiene accionamiento mediante palanca de mano y un indicador de posición final.

Figura 17

Válvula de mariposa KVZA



Nota: Válvula de mariposa KVZA.

Tabla 8

Válvula de mariposa KVZA

Características Técnicas	Valores
Factor de seguridad	1,35
Tensión de alimentación	24 V DC-110 V AC
Presión del fluido	10-16 bar
Peso	140 Kg
Ángulo de giro	0 a 90°

Nota: En la tabla se puede observar la información técnica de válvula de mariposa KVZA,

6.7.10. Software TIA PORTAL

TIA Portal es el software de programación utilizado para los controladores PLC de SIEMENS, nos brinda la posibilidad de incorporar otros dispositivos como equipos de control de movimiento, convertidores de frecuencia, servomotores, sistemas de visualización y pantallas con control táctil/integrado de teclas, además de configurar redes de comunicación (Yuste y Guerrero, 2017), se describe a continuación algunas de las características fundamentales.

- Admite la programación de PLC de Siemens, incluidas las series SIMATIC S7-1200, S7-1500, S7-300 y S7-400, utilizando varios lenguajes de programación, como la lógica de escalera (LAD), el diagrama de bloques de funciones (FBD) y el lenguaje de control estructurado (SCL).
- El portal TIA permite crear interfaces hombre-máquina (HMI) intuitivas e interactivas con herramientas como WinCC Comfort/Advanced o WinCC Professional. Las HMI permiten a los operadores interactuar con el proceso de automatización y supervisarlos.
- Ofrece herramientas para configurar y controlar sistemas de control de movimiento, incluida la configuración de ejes, perfiles de movimiento y sincronización.
- El software proporciona potentes herramientas de diagnóstico para identificar problemas, supervisar el rendimiento y solucionar problemas de los sistemas de automatización.

6.8. Protocolo de Comunicación

Un protocolo de comunicación es un conjunto de normas para el transporte de datos entre dispositivos en red. Definen el formato y la estructura de los paquetes de datos, las normas de transmisión y recepción de datos, la gestión de errores y otros aspectos de la comunicación. Los protocolos de comunicación son esenciales para que dispositivos de distintos fabricantes y sistemas operativos puedan comunicarse e intercambiar información de forma eficaz y fiable.

6.8.1. Medio de Transmisión

El cable de par trenzado, es un medio de transmisión utilizado en múltiples aplicaciones donde se requiera comunicación analógica. Este se presenta en diferentes categorías, pero las más utilizadas son las de categoría cuatro, ya que soportan velocidades de hasta 100 y 150 Mbps. En este proyecto se plantea utilizar este medio de comunicación (Alonso y cols., 2017).

6.8.2. Industrial Ethernet

El protocolo de comunicación Ethernet tiene como norma (IEEE 802.3), se ha vuelto el sistema más sofisticado en cuanto a la interconexión de computadores. En las redes industriales se está dando un auge en cuanto a la utilización de este protocolo de comunicación. Las topologías diseñadas en conmutadores presentan una desventaja en cuanto al desarrollo de investigaciones porque no son gratuitas (Kaschel y Pinto, 2001).

7. Marco Metodológico

Dentro del Marco Metodológico para el alcance de los objetivos de la investigación se tiene, el establecer los parámetros iniciales para el diseño. Se realizará un análisis de la dinámica del sistema de medición de la turbiedad y el análisis de la mecánica del agua para el diseño del control y elección de válvulas. Por último, se tiene el diseñar un sistema de monitoreo y control para el nivel de turbiedad utilizando los equipos y software disponibles en el mercado.

7.1. Parámetros del Diseño

En los parámetros del diseño se describe la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP. También el de determinar las variables y el análisis de cada una de ellas.

7.1.1. Descripción de la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP

La planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP como se observa en la figura 5, se encuentra ubicado en el cantón Santa Isabel, provincia del Azuay. La planta cuenta con la capacidad de abastecer a 4 000 usuarios, ocupa un área aproximada de 3360 metros cuadrados y es abastecido con un caudal de 25 a 30 litros por segundo por la quebrada Paccha perteneciente a la parroquia Cañaribamba. Su estructura es de una planta convencional, finalizó su construcción en el 2006, abasteciendo al centro cantonal desde la fecha, hasta el día de hoy. Dentro de sus procesos no ha sufrido ningún cambio, tanto a nivel estructural como en las diferentes etapas del proceso.

7.1.2. Proceso de Tratamiento de Agua Potable

Esta planta de tratamiento de agua potable tiene una estructura para cada etapa como se lo puede observar en la figura 2, a continuación se describe cada etapa.

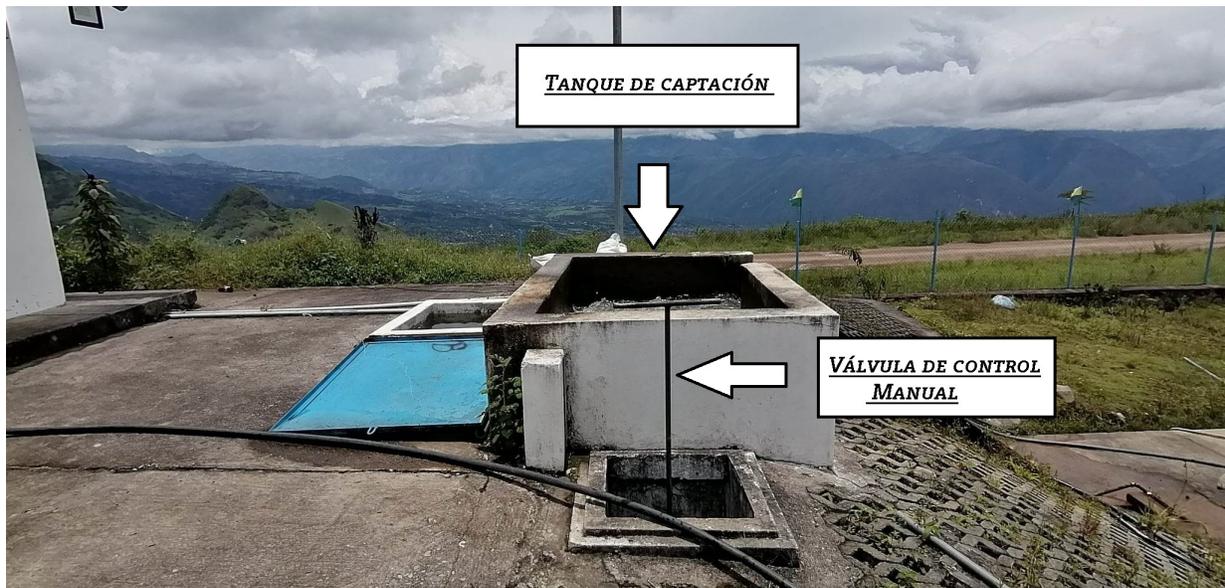
Captación

La captación del agua cruda se da desde la fuente denominada quebrada Paccha perteneciente a la parroquia Cañaribamba, con un caudal de 25 a 30 *lts/s*. El almacenamiento del agua se dirige hacia un tanque con estructura de concreto, con una capacidad de 6 m^3 de volumen aproximadamente. Aquí su estructura está construida de tal manera que tiene una válvula manual, para desviar el paso de agua cruda hacia el sistema del alcantarillado en caso de que presente turbiedad alta, como se puede observar en la figura 18. Es importante recalcar

esta etapa, ya que en ella se busca reemplazar este sistema de control manual. Buscando optimizar tanto la toma de muestra de la turbiedad como el control de la válvula de control.

Figura 18

Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de captación.



Nota: Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de captación

Floculación

En la etapa de floculación, la planta de tratamiento de agua potable hace uso de policloruro de aluminio, como floculante para el tratamiento. Los sólidos en suspensión o cualquier tipo de material se adhieren al flóculo para realizar de una manera eficiente la decantación, su estructura se puede observar en la figura 19.

Figura 19

Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de floculación.



Nota: Proceso de tratamiento de agua potable, etapa de floculación. Aquí se aplica el sistema de floculación hidráulica

Sedimentación

En esta etapa nos permite la separación y sedimentación de los flóculos que se formaron en la etapa anterior. Aquí el agua fluye a través de agujeros presentes en la estructura metálica conocida como flautas, mientras que los flóculos se asientan gradualmente en el fondo. De esta manera, la sedimentación ayuda a obtener un agua con mayor claridad y con una reducción significativa de partículas en suspensión.

Filtración

En esta etapa, se lo realiza mediante filtros rápidos descendientes colocados en una estructura de concreto, son móviles para poder realizar el mantenimiento correspondiente. El agua pasa mediante unos agujeros que permiten el paso del agua a la siguiente etapa.

Cloración

Dependiendo del caudal de ingreso, se realiza la adición del químico para el proceso de desinfección del agua, pasando a la última etapa que es el almacenamiento.

Almacenamiento

Realizado todos los procesos de tratamiento para potabilizar el agua, este pasa a ser almacenada en un tanque con una capacidad de 500 metros cúbicos de volumen y a los tanques de almacenamiento que están ubicados en la zona delos bomberos, su estructura fue realizada en concreto y se lo puede observar en la figura 20.

Figura 20

Tanque de almacenamiento de agua tratada



Nota: Tanque de almacenamiento de agua tratada con la capacidad de 500 mectros cúbicos.

7.1.3. Alimentación Eléctrica

La planta de tratamiento de agua potable cuenta con una alimentación eléctrica, según el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) de voltajes NTE INEN 3098, con un voltaje nominal de 120/240 AC y con una frecuencia nominal de 60 Hz (INEN, 2016).

7.1.4. Análisis de las Variables del Proceso

Para el sistema de control y monitoreo de los niveles de Turbiedad en el tanque de captación de agua cruda, se tomó en cuenta las siguientes variables:

- Turbiedad: Entre las fechas 01/06/2023 y 12/07/2023, se realizó la toma de datos de turbiedades tanto del agua cruda, como del agua tratada, como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9

Registro de turbiedades de los meses junio y julio del 2023.

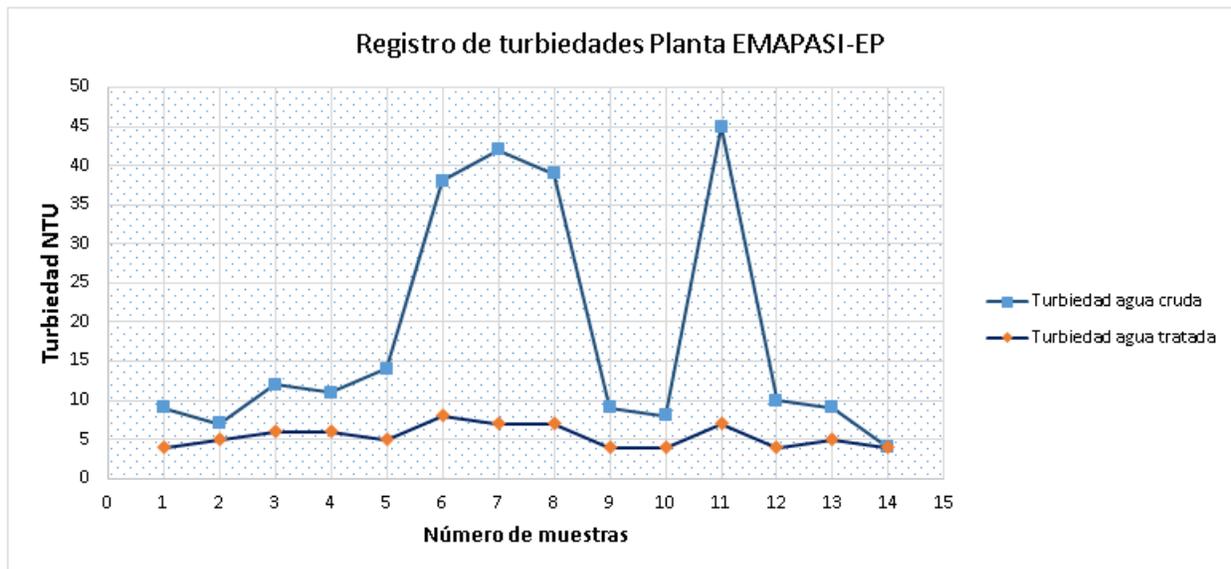
N° muestras	Fecha	Turbiedad agua cruda (UNT)	Turbiedad agua tratada (UNT)
1	01/06/2023	9	4
2	02/06/2023	7	5
3	05/06/2023	12	6
4	06/06/2023	11	6
5	07/06/2023	14	5
6	08/06/2023	38	8
7	09/06/2023	42	7
8	04/07/2023	39	7
9	05/07/2023	9	4
10	06/07/2023	8	4
11	07/07/2023	45	7
12	10/07/2023	10	4
13	11/07/2023	9	5
14	12/07/2023	4	4

Nota: *Estos datos fueron otorgados por la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, que corresponden a los meses de junio y julio del año 2023.*

Se puede observar en la figura 21, el comportamiento de la turbiedad del agua cruda y del agua ya realizado el proceso de tratamiento. Se obtiene que el 42% que equivale a 6 muestras del total de 14 muestras obtenidas no cumplen con el límite aceptable (5 NTU), mientras que el 58% del resto de total de muestras que equivale a 8 muestras si cumple. Se puede suponer que el nivel de turbiedad en la captación de agua cruda, tiene una relación directa en cuanto al nivel de agua tratada, ya que existen varios factores para que el proceso no lo realice correctamente.

Figura 21

Registro de turbiedades de agua cruda y agua tratada



Nota: Registro de turbiedades de agua cruda y agua tratada, tomados en los meses de junio y julio del 2023, mostrando una deficiencia en cuanto al control ya que presenta que el 42% de las muestras después de realizado el tratamiento, no cumple con el límite permisible para el consumo humano.

En la tabla 10 se puede apreciar las medidas de turbiedad otorgadas por la planta de tratamiento que corresponden a los meses noviembre y diciembre del año 2022, estos datos serán utilizados para el análisis del sistema de control y el comportamiento de los actuadores.

Tabla 10

Registro de turbiedades de los meses noviembre y diciembre del 2022.

Fecha	Turbiedad (UNT)
01/11/2022	12
02/11/2022	15
08/11/2022	13
09/11/2022	10
10/11/2022	11
11/11/2022	12
14/11/2022	14
15/11/2022	18
08/12/2022	55
09/12/2022	83
12/12/2022	56
16/12/2022	43
19/12/2022	34
20/12/2022	29
21/12/2022	20
22/12/2022	17
26/12/2022	14
28/12/2022	12
29/12/2022	10
30/12/2022	14

Nota: *Estos datos fueron otorgados por la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP que corresponden a los meses de noviembre y diciembre del año 2022.*

- Corriente: La corriente es de 4 a 20 mA, para la transmisión de datos desde el sensor hasta el controlador.
- Tensión: La red de alimentación debe ponderar una alimentación constante de 110 V para los dispositivos tanto de control y monitoreo.

- Velocidad de transmisión: La red de comunicación PROFINET, tiene una velocidad máxima de 100 Mbps en la transmisión de los datos, por lo que lo hace ideal en la industria cuando se requiere una respuesta inmediata en el control de los sistemas.

7.2. Análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control.

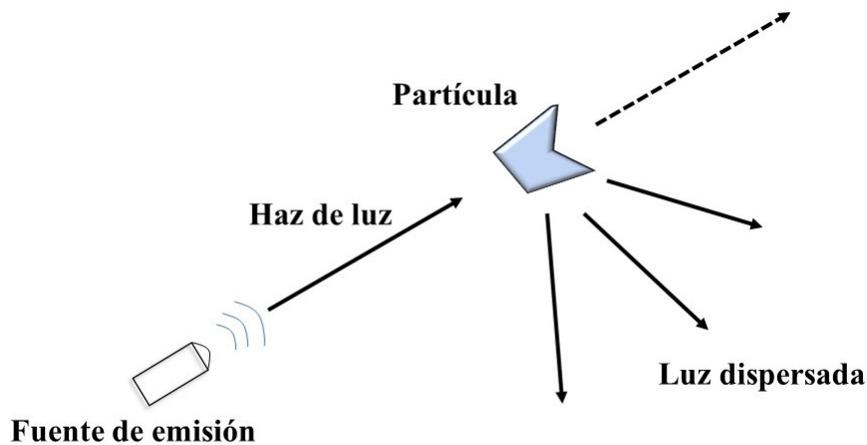
Para el análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido, se realizó el levantamiento de información de las variables necesarias tanto de la planta de agua potable EMAPASI-EP, como la revisión bibliográfica del sistema de medición de los dispositivos.

7.2.1. Dinámica del Sistema

La medición de turbidez se lo realiza utilizando una fuente de emisión, este dispositivo enviará un haz de luz a través de la muestra. Las partículas que se encuentren en la muestra harán que la luz se desvíe, este proceso se lo denomina dispersión, explicación gráfica de la dispersión de la luz en la figura 22.

Figura 22

Dinámica del sistema, dispersión de la luz



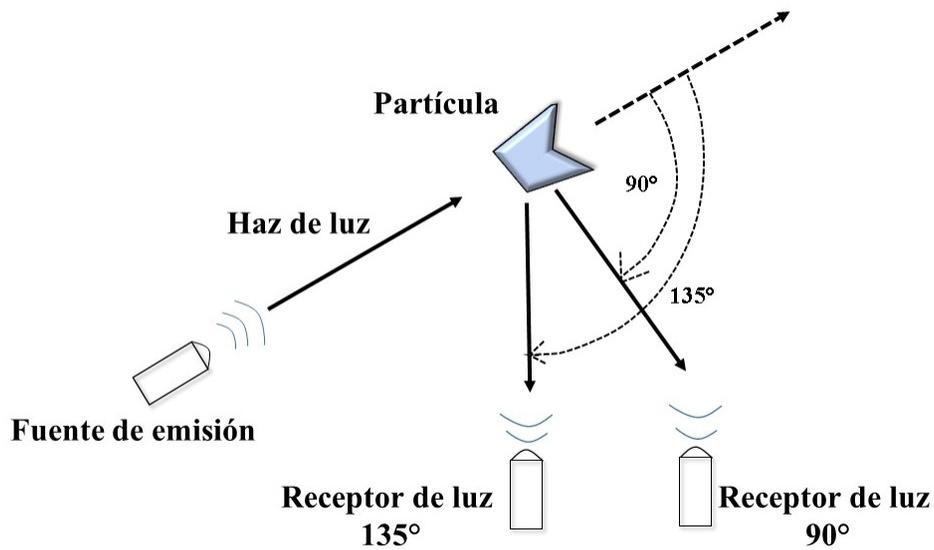
Nota: Dinámica del sistema, dispersión de la luz

El sistema de medición de la luz dispersada se obtiene por dos rangos medibles, el primer

rango es de 90 grados que es utilizado para turbiedades en agua de consumo. El segundo rango de medición es de 135 grados y este tipo de medición es para rangos de altas concentraciones de sólidos en suspensión, la explicación gráfica sobre el modo de funcionamiento de medición de turbiedades se explica en la figura 23.

Figura 23

Dinámica del sistema, funcionamiento de medición

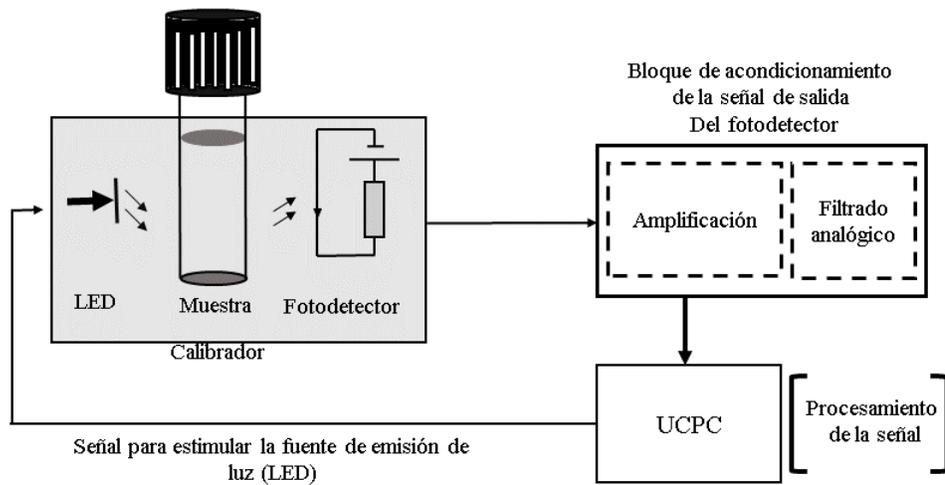


Nota: Dinámica del sistema, funcionamiento de medición

La fuente de luz es la que emite la longitud de onda específica, mientras que el receptor de luz, que puede ser un sensor óptico o un receptor de fotones, recibe la señal. Antes de llegar a un bloque de acondicionamiento, la señal de luz es amplificada y filtrada para convertirla en impulsos eléctricos. Posteriormente, estos impulsos eléctricos son introducidos en una unidad de procesamiento y control que convierte las señales analógicas de entrada en valores digitales. (Acebo-González y Hernández-García, 2013), a continuación se presenta el esquema de un sistema de medición de turbidez en la figura 24.

Figura 24

Dinámica del sistema, esquema de un sistema de medición de turbidez



Nota: Dinámica del sistema, esquema de un sistema de medición de turbidez. tomado de (Acebo-González y Hernández-García, 2013)

En la tabla 11 se muestra los valores medidos mediante un sensor de turbiedad genérico con el tipo de medición por absorción, en el análisis de toma de muestras presento un error relativo del 37% que lo hace ineficaz para medir valores de turbiedad en este tipo de aplicaciones.

Tabla 11

Valores de turbiedad versus el voltaje entregado del sensor de nivel educativo.

Vt	Turbiedad (UNT)	Muestra (UNT)	% Error relativo al valor de muestra
3,38	0,16	0,10	37
3,20	21	15	28
3,9	8	6,79	15
2,112	380	395	4
1,25	792	714	10
0,235	1100	1128	3

Nota: *Análisis de turbiedades con sensor de medición de turbiedad genérico, presentando el error mas bajo del 3% para valores de 1100 NTU y para valores menores de 21 NTU, el porcentaje varía entre el 37% y 15%, siendo los valores mas altos presentados dentro del análisis*

7.2.2. Mecánica del Fluido

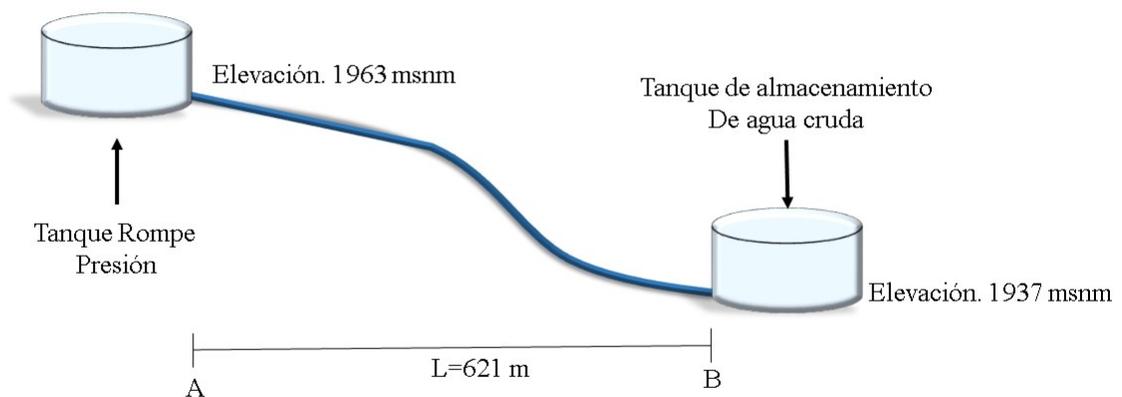
Se realiza el cálculo de presión en la entrada del tanque de captación de agua cruda utilizando los datos de la figura 25, estos datos permitirán la simulación del sistema como se lo puede observar en la figura 41 utilizando el software de epanet, que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico, el cálculo de presiones en redes y más.

Se determina también, aplicando las ecuaciones de Hazen-Williams (Alegret Breña y Martínez Valdés, 2019), en la entrada de la planta de tratamiento de agua potable que se lo denomina por la letra B, se realizó el levantamiento de las variables necesarias para el análisis de presión. Utilizando los teoremas de hidráulica de tuberías que trabajan a presión, la primera variable es la altitud en la que se encuentra la planta. El tanque de almacenamiento de agua cruda se encuentra a una altitud de 1937 msnm, y el segundo tanque de almacenamiento, que es utilizado como rompe presión, se encuentra a una altitud de 1963 msnm y se la denomina con la letra A, la distancia que existe entre los dos tanques se denomina con la letra L y tiene 621 m de distancia. La quinta variable es la del caudal, según lo estipulado por el personal en plata, el caudal es de 30 *lts/s*, teniendo como 0.03 *m³/s* de caudal. La sexta variable es el diámetro de la tubería utilizada, que es de 0.2 *m* de diámetro. Con base en todas las variables

se realiza el cálculo de presión en la entrada del tanque de almacenamiento, se tiene una explicación gráfica de como están distribuidos los datos en la siguiente figura 25.

Figura 25

Esquema para el cálculo de presión



Nota: Esquema para el cálculo de presión, se muestra todos los datos necesarios para el cálculo de la presión en la entrada del tanque de captación.

A continuación se realiza el cálculo de la presión aplicando las siguientes fórmulas.

- Velocidad del flujo

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$V = \frac{4(0,03m^3/s)}{\pi(0,2m)^2}$$

$$V = 0,954\ 900\ m/s$$

- Coeficiente de resistencia a la fricción del agua

$$K = \frac{10,67L}{C^{1,852}D^{4,87}}$$

$$K = \frac{10,67(621m)}{150^{1,852}0,2^{4,87}}$$

$$K = \frac{6\ 626,07}{(10\ 718,179\ 150)(3,94 \times 10^{-4})}$$

$$K = 1\ 567,180\ 174$$

- Perdida de carga

$$H_f = KQ^{1,852}$$

$$H_f = (1\ 567,180\ 174)(0,03)^{1,852}$$

$$H_f = 2,369\ 990\ m$$

$$H_i = 1\ 960,630\ 005\ m$$

- Presión de llegada

$$P = 23,630\ 005\ mca$$

$$P = 23\ 1724,808\ 400\ Pa$$

$$P = 231,724\ 808\ 400\ KPa$$

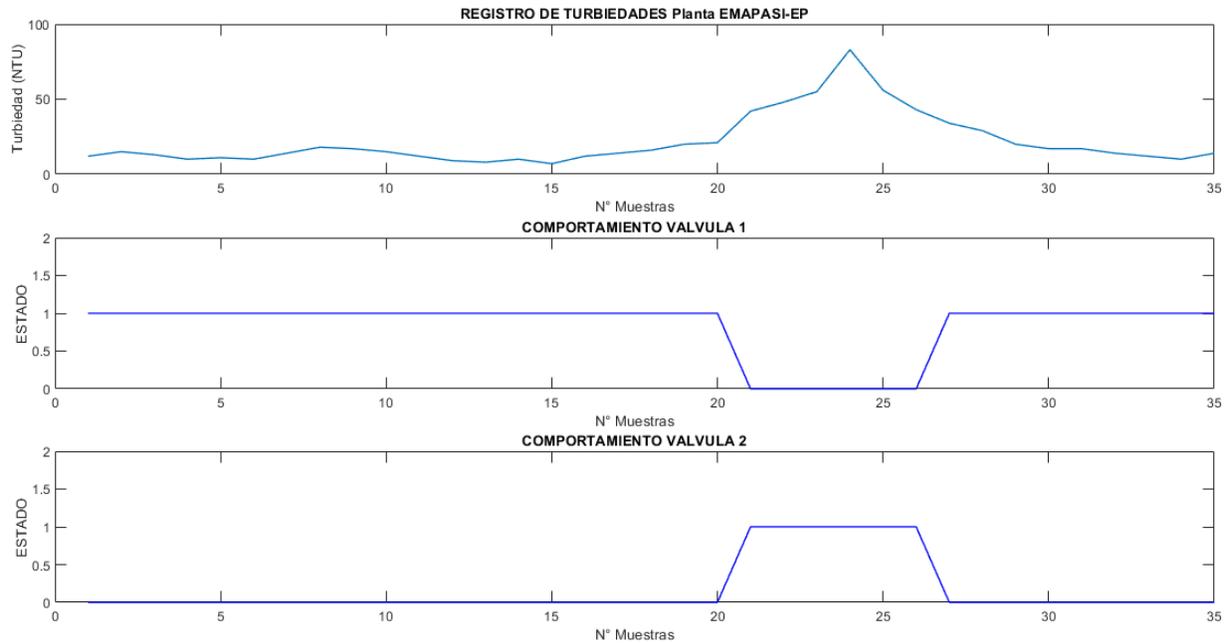
Como resultado, se obtiene que la presión de llegada en la entrada de la planta de tratamiento de agua potable es de aproximadamente 231,724 808 400 KPa.

7.2.3. Sistema de Control ON/OFF

Con base a los datos de la tabla 10 se analizó el sistema, en la figura 26 se observa el comportamiento de los actuadores, cuando se tiene un nivel de turbiedad alto, el estado de la válvula 1 pasa a un estado de cierre, cerrando el paso de agua hacia el tanque de captación y el estado de la válvula 2 pasa a un estado de apertura, para que el agua con niveles máximos a 40 NTU desfogue por el sistema de alcantarillado, este control durará hasta que los niveles de turbiedad vuelvan a los niveles normales, de esta manera permitiendo mantener la planta libre de aguas lodosas o intratables para el proceso.

Figura 26

Análisis del sistema de control ON/OFF



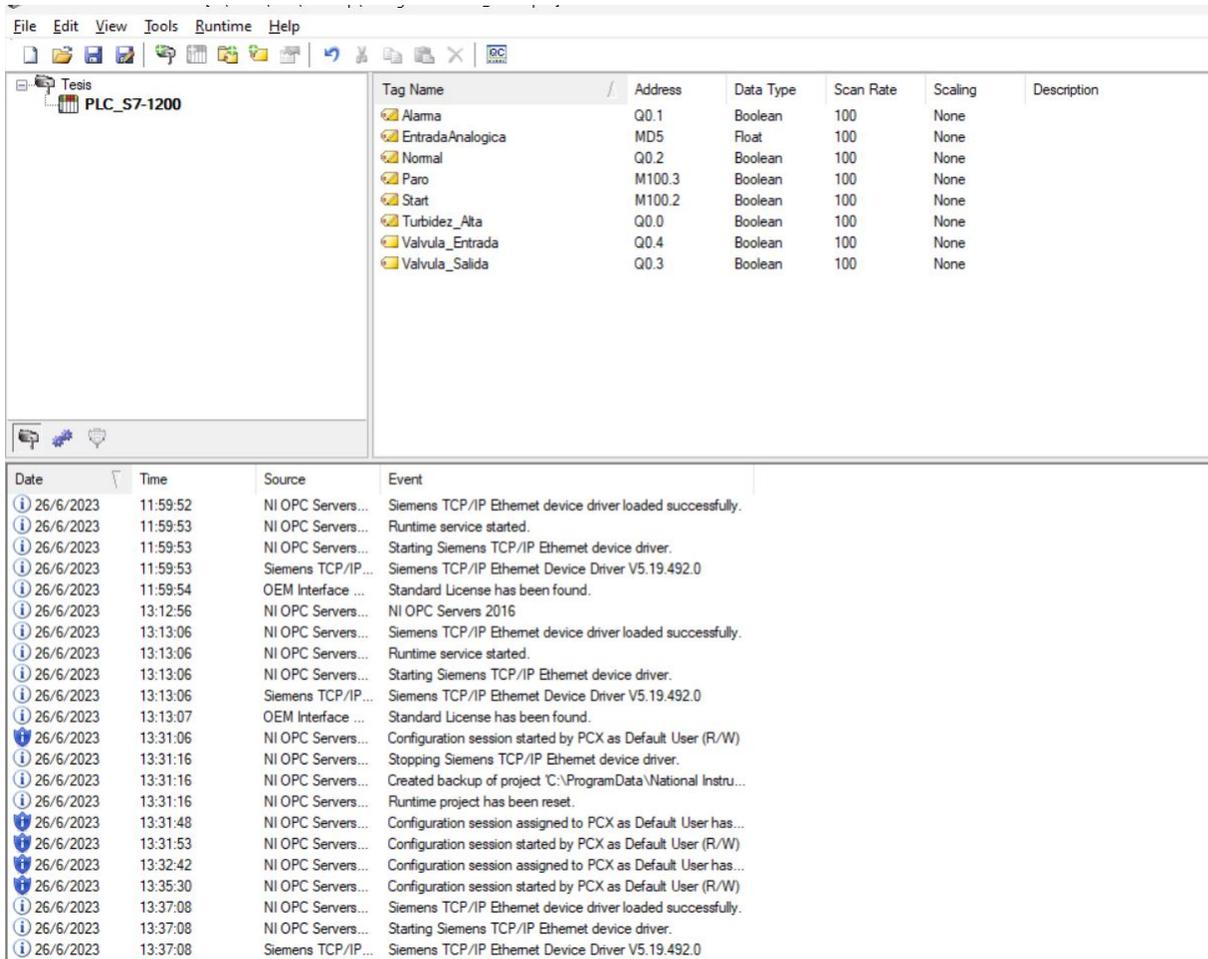
Nota: Se puede observar el comportamiento de los actuadores ante turbiedades que superan los límites permisibles.

7.2.4. Simulación del Sistema de Monitoreo y Control

Para la simulación del sistema de monitoreo y control de turbiedad se hizo uso de los servidores OPC, ya que nos permite interactuar con diferentes instrumentos disponibles en los laboratorios (PLC, HMI, ACTUADORES,ETC) en tiempo real. Este tipo de servidor permite la operación entre los controladores y a su vez nos brinda una adquisición de datos, por lo que se realiza la configuración de las variables a utilizar, como se puede observar en la figura 27.

Figura 27

Configuración del servidor OPC Server



Nota: Configuración del servidor OPCServer.

Una vez analizado el comportamiento del sistema, se configura la interfaz de visualización con tres estados de trabajo: Primer estado, trabajo normal. Segundo estado, mantenerse alerta. Tercer estado, activación de control.

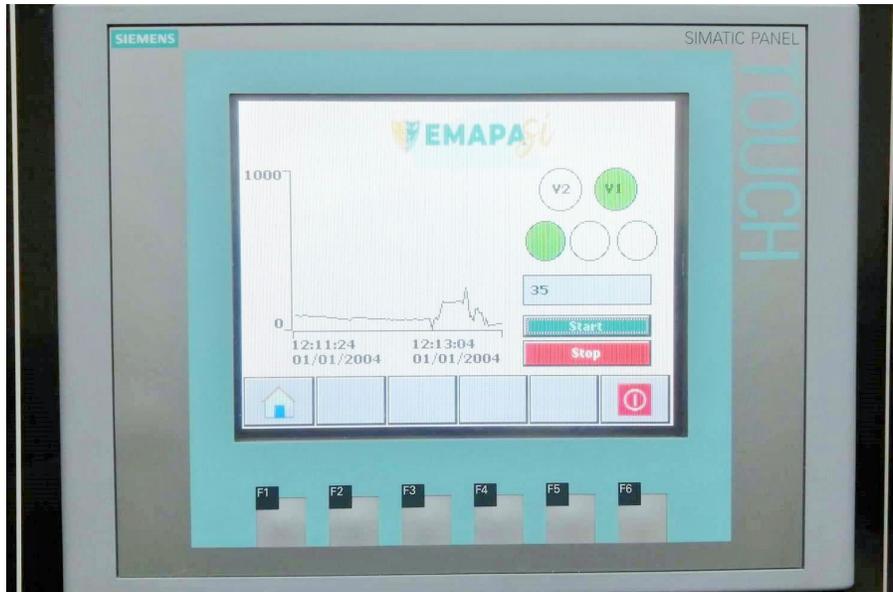
- Primer estado

En este estado, como lo puede ver en la figura 28, la simulación presenta una apertura de la válvula 1, presentándola de un color verde. Y el estado de trabajo también presenta un valor normal de turbiedad (VERDE), este aviso se presenta en la interfaz para

mayor confianza del operador en caso de que el sistema de alarma (luces) presente algún desperfecto.

Figura 28

Simulación en la interfaz gráfica HMI, primer estado



Nota: Simulación en la Interfaz Gráfica HMI , primer estado.

■ Segundo estado

En este estado que se puede observar en la figura 29, la simulación trabaja en condiciones normales en el actuador, permitiendo el paso de agua con turbiedad permisible, pero con un cambio en el sistema de alarma que se lo puede observar de color (AMARILLO).

Figura 29

Simulación en la Interfaz Gráfica HMI, segundo estado



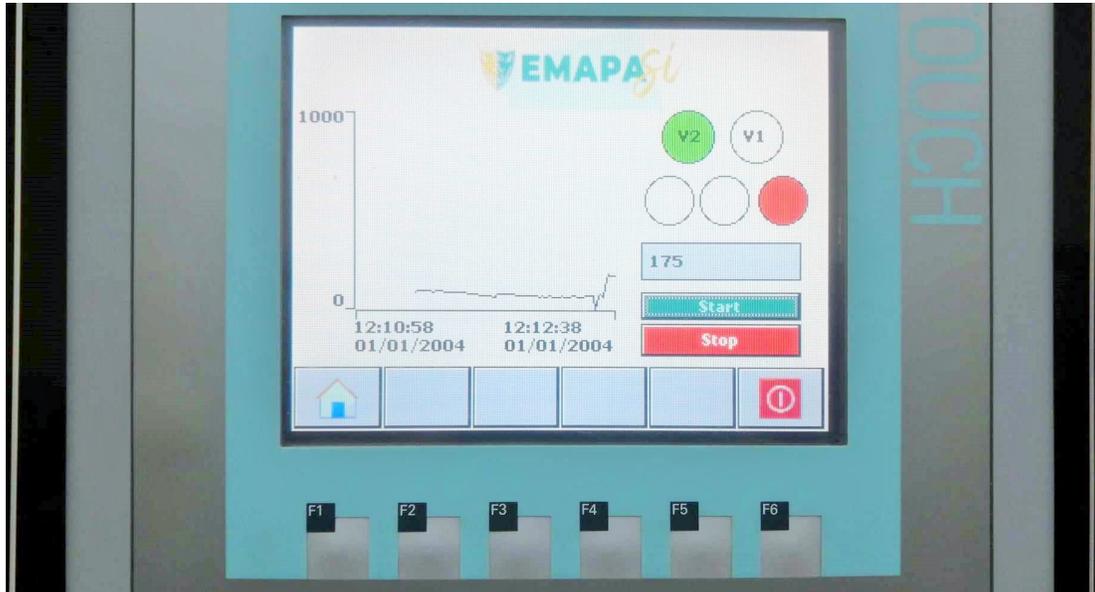
Nota: Simulación en la interfaz gráfica HMI, segundo estado.

- Tercer estado

Se puede observar la figura 30 que en este estado, el comportamiento de la válvula 1 cambia a un estado bajo, también cambiando de color en el panel. Mientras que la válvula 2 cambia de estado a apertura, para el desfogue de agua y mostrando en el panel que se encuentra activo de color verde. El comportamiento del sistema de alarma pasa a un modo de aviso de alerta (ROJO) para mostrar al personal que los niveles de turbiedad han superado los permisibles.

Figura 30

Simulación en la interfaz gráfica HMI, tercer estado

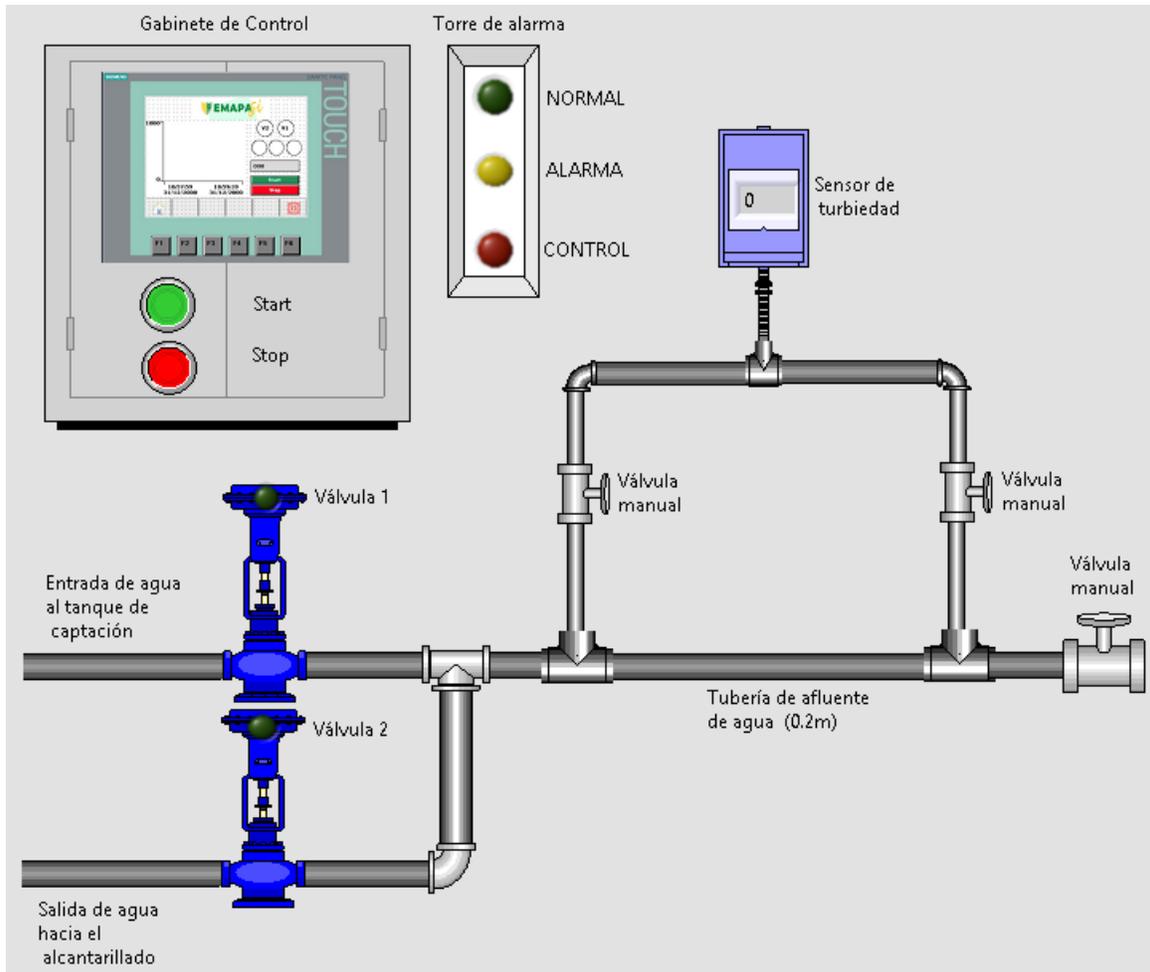


Nota: Simulación en la Interfaz Gráfica HMI, tercer estado.

Para observar el comportamiento de los actuadores, se usó el software LABVIEW, mediante la interfaz de OPCserver se pudo conectar el PLC y HMI y se mantuvo una comunicación para tener una visualización en tiempo real de los dispositivos externos y el software como se puede observar en la figura 31.

Figura 31

Simulación de los actuadores y el panel de control



Nota: Simulación de los actuadores y el panel de control en la interfaz de LABVIEW

7.3. Sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y software disponibles en el mercado.

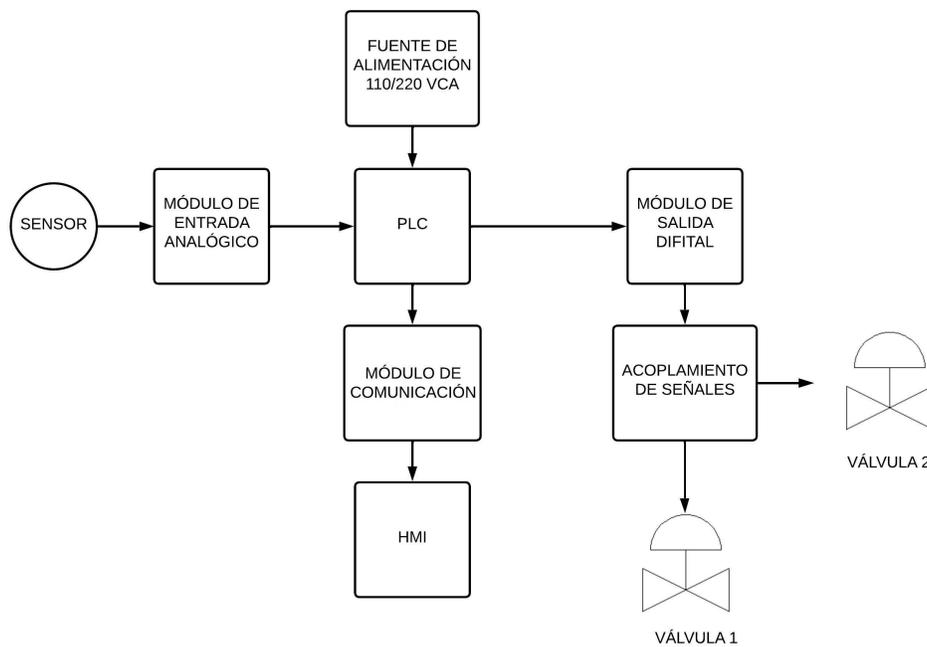
Se presenta el diseño del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad mediante un esquema, además se presenta el diseño del sistema de alarma establecido por un rango de valores permisibles de turbiedad.

7.3.1. Esquema del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad

Para el diseño del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad en la entrada de la planta de tratamiento de agua potable, se realizó el levantamiento de la planta, la recolección de datos mediante el instrumento de medición que ocupa el laboratorio, el análisis dinámico del sistema y mecánica del agua.

Figura 32

Representación del esquema de automatización.



Nota: Se representa de forma gráfica el sistema de automatización donde se establece los dispositivos que serán utilizados para cumplir los objetivos de la investigación

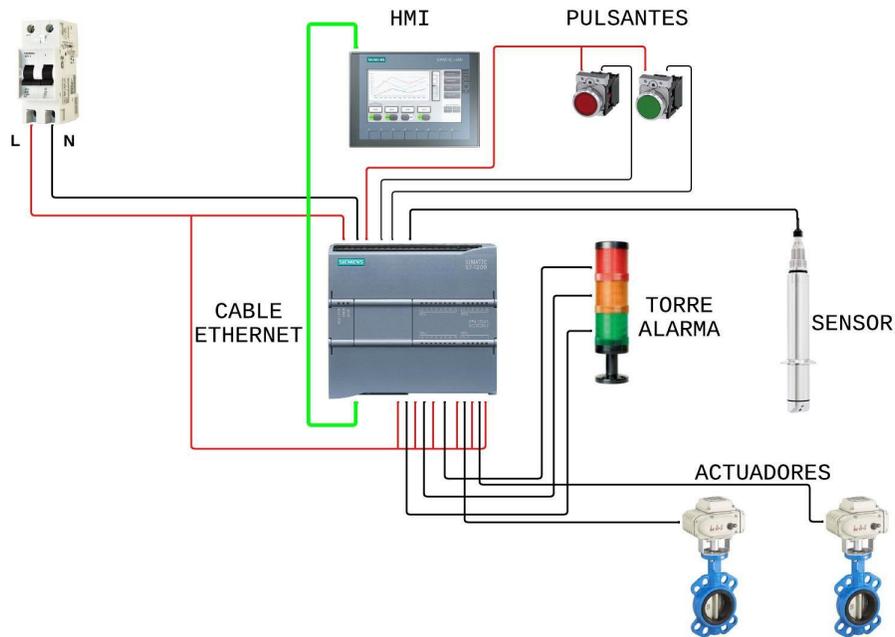
Con ello se determina el esquema del proceso presentado en la figura 32, los instrumentos necesarios para la realización del diseño de control y el diseño para el monitoreo de los niveles de turbiedad, se puede observar en la figura 33 el esquema de instrumentación a utilizar. Los componentes a utilizar dentro del sistema son:

- Un sensor de Turbiedad, capaz de transformar la señal lumínica a una señal eléctrica y esta es enviada hacia un transmisor.

- Un transmisor, con la capacidad de recibir la señal eléctrica proveniente del sensor, y transformarla en datos leíbles para el controlador.
- Un controlador lógico programable, donde se recibe la señal desde el transmisor y realiza las acciones necesarias, para el control de los niveles de turbiedad, donde se configura las entradas y salidas.
- Dos pulsantes, que envían señales de entrada al controlador, teniendo como respuesta, el dar inicio al sistema de operación y el parar el sistema de operación, ya sea para realizar mantenimiento o calibración del sensor.
- Un HMI, esta interfaz gráfica humano-máquina, nos permitirá el monitoreo de los niveles de turbiedad, para tomar decisiones en cuanto la agregación de químicos en los flóculos.
- Dos Electroválvulas con control ON/OFF, nos permitirá el control de una manera más eficiente y rápida, permitiendo el paso de agua en los niveles permitidos, y cerrando el paso de agua en los niveles superiores al rango establecido.
- Una torre de señalización, este permitirá al operador mantenerse alerta en cuanto a los niveles de turbiedad.

Figura 33

Esquema de instrumentación del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad



Nota: Esquema de instrumentación del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad

En la tabla 12, se presenta un presupuesto aproximado al costo de todos los implementos necesarios para el diseño, estos pueden variar dependiendo del área de adquisición y el tiempo en el que se lo quieran adquirir, tomando en cuenta los cambios constantes de los precios en el mercado.

Tabla 12*Recurso de instrumentos y software.*

Equipos	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Fuente de alimentación	1	600,00	600,00 \$
Riel DIN	1	4,00	4,00 \$
Gabinete de control	1	390,00	390,00 \$
Pulsante N/A	1	9,00	9,00 \$
Pulsante N/C y N/A	1	33,00	33,00 \$
Luz piloto verde 24VDC	1	13,00	13,00 \$
Luz piloto rojo 24VAC	1	18,00	18,00 \$
Luz piloto Naranja 24VAC	1	18,00	18,00 \$
Borneras	1	10,00	10,00 \$
Relé 24VDC	1	16,00	16,00 \$
Relé 24VAC	1	18,00	18,00 \$
CPU 1212C AC/DC/RELE S7 1200	1	1 300,00	1 300,00 \$
Turbimax CUS52	1	6 386,00	6 386,00 \$
Interfaz HMI	1	1 530,00	1 530,00 \$
Sensor de turbiedad	1	4 337,00	4 337,00 \$
Electroválvula	2	600,00	1 200,00 \$
TOTAL	17		15 882,00 \$

Nota: En la tabla se observa el costo a considerar de diferentes elementos para el desarrollo del diseño del sistema de control, con referencia al uso del software se coloca un aproximado del costo total de las licencias.

7.3.2. Diseño del Sistema de Monitoreo

Los datos del sensor se presentan en el panel de monitoreo, para ello se configura la pantalla HMI de la siguiente forma. Se presenta un histórico de todas las medidas de turbiedad en función del tiempo con un intervalo de 5 minutos. Tiene la opción de controlar dos modos de control: START%I1.2, que da inicio al monitoreo y el segundo estado es el de STOP%I1.1, dejando de recibir datos. Presenta los estados de las electro-válvulas, encendiendo de color

verde la válvula de entrada y en caso de que esta se des-energice esta se apagará y se encenderá la electroválvula de desfogue de agua turbia. En la figura 34, puede observar la configuración de las variables y en la figura 35 se puede observar la configuración de como está distribuida la interfaz.

Figura 34

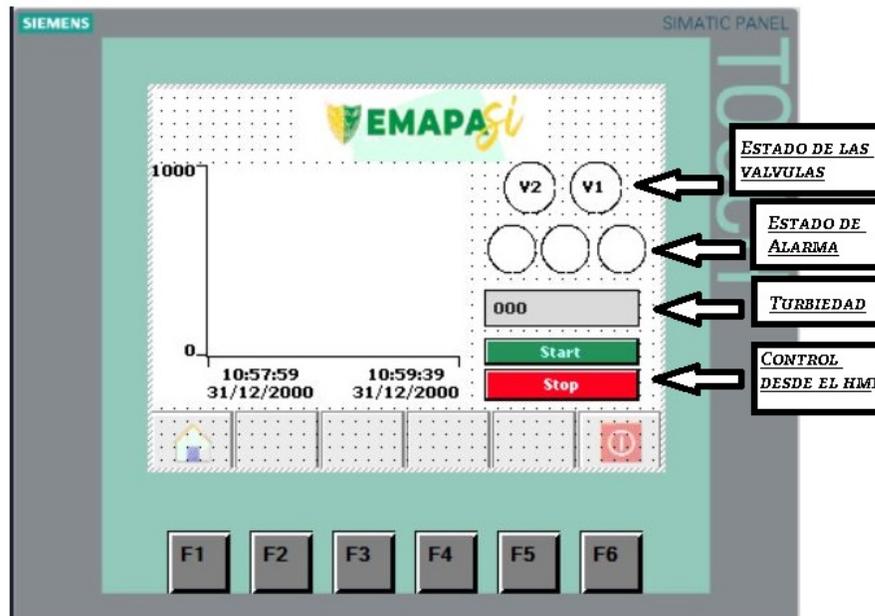
Configuración de las variables para la Pantalla HMI

Variables HMI						
Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Conexión	Nombre del PLC	Variable PLC	
Valvula	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexi...	PLC_1	Valvula	
Valvula2	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	Valvula2	
E_Scale	Tabla de variables estándar	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	E_Scale	
StartHMI	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	StartHMI	
ParoHMI	Tabla de variables estándar	Bool	HMI_Conexión_1	PLC_1	ParoHMI	

Nota: Configuración de las variables para la Pantalla HMI (TIA PORTAL)

Figura 35

Configuración de la Pantalla HMI



Nota: Configuración de la Pantalla HMI (TIA PORTAL)

7.3.3. Diseño del Sistema de Control

El PLC es el encargado de realizar el control del sistema, utilizando el software TIA Portal y el lenguaje ladder se configura el proceso a realizarse para el control de turbiedad. Se declara todas las variables que se pueden observar en la figura 36.

Figura 36

Variables declaradas para el sistema de control

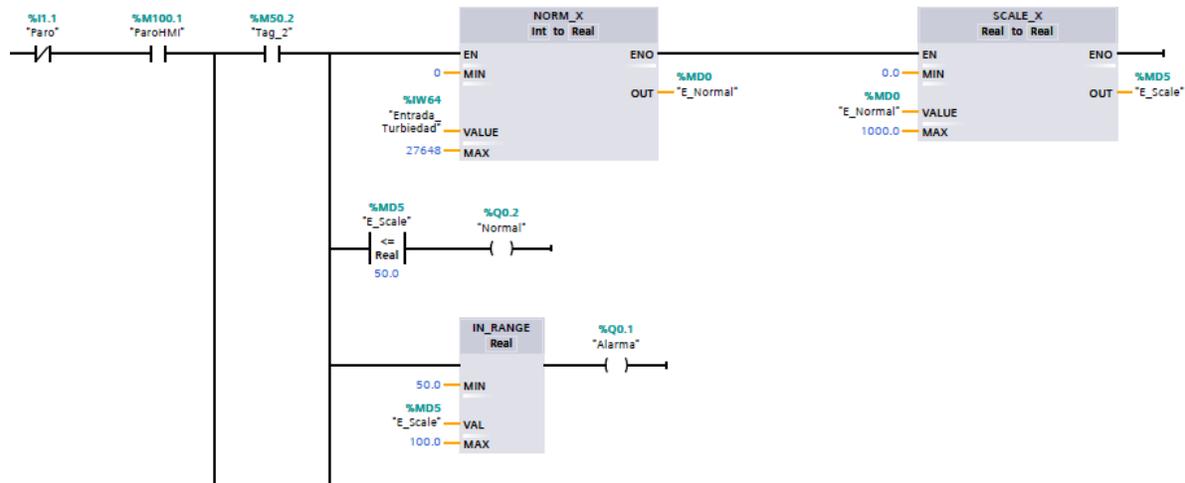
Variables PLC								
	Nombre	Tabla de variables e..	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	Entrada_Turbiedad	Tabla de variables e..	Word	%IW64	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	E_Normal	Tabla de variables e..	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	E_Scale	Tabla de variables e..	Real	%MD5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Normal	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Alarma	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Valvula_2	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Valvula_1	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Turbidad_Alta_Alarma	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Tag_1	Tabla de variables e..	Bool	%M50.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Emergencia	Tabla de variables e..	Bool	%I1.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Paro	Tabla de variables e..	Bool	%I1.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Start	Tabla de variables e..	Bool	%I1.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Tag_2	Tabla de variables e..	Bool	%M50.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	StartHMI	Tabla de variables e..	Bool	%M100.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	ParoHMI	Tabla de variables e..	Bool	%M100.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	StartLabView	Tabla de variables e..	Bool	%M100.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	ParoLabView	Tabla de variables e..	Bool	%M100.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota: Variables declaradas para el sistema de control (TIA PORTAL)

Una vez declarado las variables a utilizar, se realizó la programación. En la figura 37, se presenta el lenguaje utilizado para el control. Se configura un pulsante de "STOP" para pausar el sistema en caso de emergencia o distintas tareas como: Mantenimiento o calibración de los sensores. Seguido un pulsante "START", para dar inicio con la toma de mediciones según la entrada analógica configurada con el nombre de "Entrada Turbiedad".

Figura 37

Programación del sistema de control en TIA PORTAL



Nota: Programación del sistema de control (TIA PORTAL)

7.3.4. Diseño del Sistema de Alarma

Para el sistema de alarma se configura con base en lo establecido por el personal en planta, donde se pide que las aguas turbias por encima de 40 NTU sean consideradas aguas lodosas o imposibles de tratar, en este salta un sistema de alarma, donde nos indica que si los niveles de turbiedad están por encima de los 40 NTU. Se enciende una luz roja para dar aviso al personal en planta y proceder a la respectiva verificación. En caso de que los niveles de agua estén por debajo de los 40 NTU y por encima de los 10 NTU, el personal tendrá el aviso de que los niveles de turbiedad están subiendo, por lo que lo dará un aviso de alerta, ya sea que los niveles de turbiedad bajen a niveles normales que este caso se consideran por debajo de los 10 NTU, se puede apreciar el sistema y las salidas del controlador en la figura 38.

Figura 38

Configuración del sistema de alarma



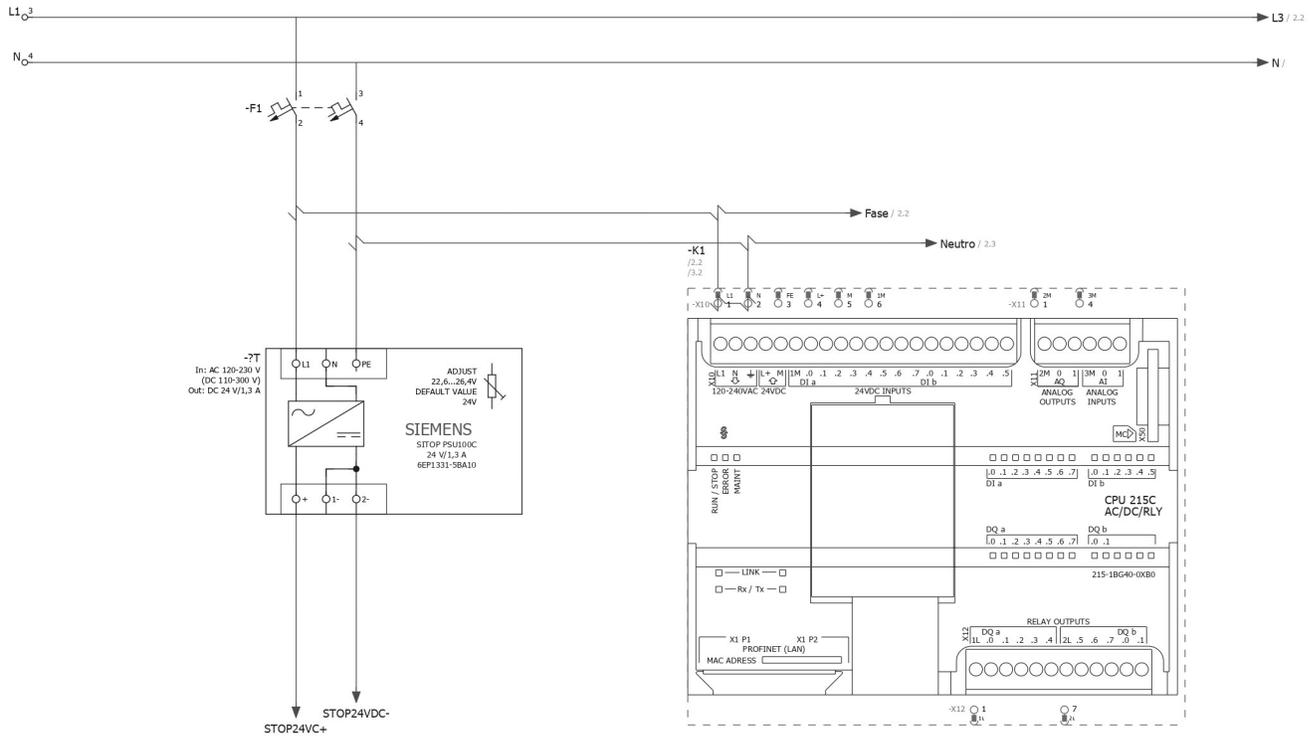
Nota: Configuración del sistema de alarma, este rango de valores fueron establecidos por el personal en planta.

7.3.5. Diseño del Sistema de Fuerza

En la figura 39 se tiene la conexión eléctrica del PLC y un Regulador de voltaje de 24 V, ya que se hace uso de una fuente externa de alimentación para los pulsantes para protección del equipo PLC, los equipos están conectados a los 110 V con una protección de un interruptor automático para protección ante sobrecargas.

Figura 39

Diseño del sistema de fuerza PLC



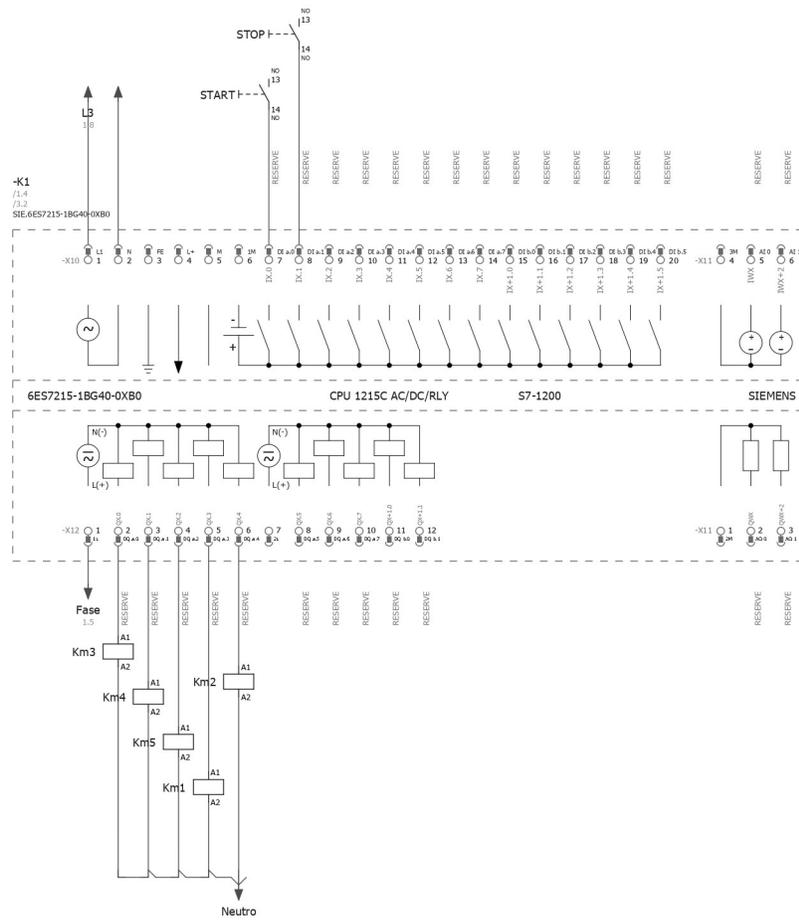
Nota: Diseño del sistema de fuerza PLC

En la figura 40 se observa la conexión eléctrica, las entradas %I1.0, %I1.1 del PLC están destinadas a recibir señales de entrada provenientes de los botones físicos de “START” y “STOP”. Estas entradas están siendo utilizadas para detectar el estado de trabajo, como el encendido y apagado del sistema.

Por otro lado, las salidas digitales del PLC, representadas por las direcciones %Q0.0, %Q0.1, %Q0.2, %Q0.3, %Q0.4 y %Q0.5, están conectadas a bobinas que actúan como interruptores controlados por el PLC. Estas salidas se utilizan para activar o desactivar los actuadores y las luces de la torre de control, según sea necesario en el sistema.

Figura 40

Diseño del sistema de control, entradas y salidas digitales



Nota: Diseño del sistema de control, entradas y salidas digitales

8. Resultados

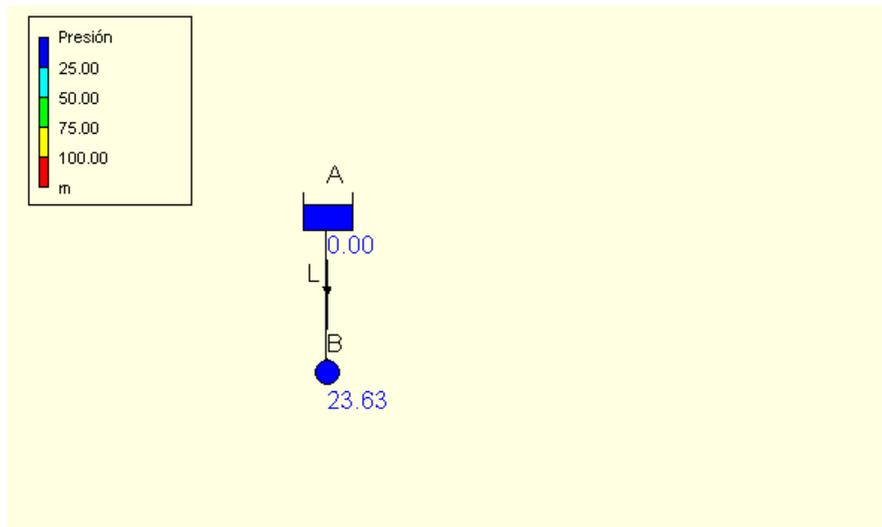
Como resultado de levantamiento de información de la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP, se revisó que tiene una estructura diseñada para cada una de las etapas, tanto de captación, floculación, sedimentación, filtros, cloración y almacenamiento. Se puede observar en la figura 2 como están distribuidas cada etapa. Se realizó el análisis de turbiedad entre las fechas de junio y julio del 2023, para verificar la eficiencia de la planta convencional, teniendo como resultado que el 42% del total de muestras no cumplen con el

valor permisible de turbiedad 5 UNT, una vez realizada los procesos de tratamiento. Como adición al análisis, se puede observar en la tabla 10 que en las fechas de noviembre y diciembre del 2022, se registró un valor de turbiedad de 83 UNT, el más alto registrado en estas fechas.

Para el dimensionamiento de la válvula de control automatizada se determinó con el valor de las variables, tanto de altura de la planta, la longitud entre el tanque de captación y el tanque rompe presión, mediante ello se pudo realizar la simulación en el software epanet como se puede observar en la figura 41 llegando a obtener un valor de 23 *m.c.a.* de presión, este valor servirá para elección de la válvula de control.

Figura 41

Simulación para el cálculo de presión



Nota: Simulación para el cálculo de presión mediante el software EPANET, con los valores en $A = 1963 \text{ msnm}$, $B = 1937 \text{ msnm}$, $\text{DiametroTubería} = 0.2\text{m}$, $\text{Longitud} = L = 621 \text{ m}$

El diseño del sistema de monitoreo se lo puede observar en la figura 35, donde se brinda al personal en planta visualizar los estados de la válvula 1 y 2, el estado del sistema de alarma y los niveles de turbiedad que están presentados tanto en histórico de gráfica como en representación numérica. Se tiene la opción de controlar el sistema con dos botones de encendido y apagado. Para la configuración y verificación de la interfaz gráfica se realizó la simulación, tanto, en los dispositivos con los que cuenta el laboratorio de PLC y en la interfaz que brinda el programa de labview, utilizando el software de OPCserver para una comunicación en tiempo real.

La configuración del sistema de alarma, se observa en la figura 38, donde los valores fueron definidos por el personal en planta. La luz de color verde tiene como representación los niveles de turbiedad normales, la luz de color amarillo es un indicativo de que los niveles de turbiedad están superando los valores permisibles y la luz de color rojo representa que el nivel de turbiedad que está registrando el sensor son niveles imposibles de tratar por lo que se activa el modo de control.

El modo de operación de la planta se lo puede observar en la figura 18, este cuenta con un sistema de control manual. El diseño automatizado servirá para monitorear en tiempo real el nivel de turbiedad y el control automático de las válvulas, el cual busca reemplazar este tipo de control, está representado por dos válvulas como lo puede observar en la figura 31, la válvula 1 con salidas en el controlador de %Q0.4 esta conectada directamente a la alimentación del tanque de captación y la válvula 2 con salida en el controlador de %Q0.5 que está conectada al sistema de alcantarillado, estas válvulas operan con un control automático para apertura y cierre dependiendo de los niveles de turbiedad.

9. Conclusiones

La realización del sistema de monitoreo y control de los niveles de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable del cantón de Santa Isabel, busca plantear un sistema con la capacidad de sustituir el control manual con el que opera actualmente, analizando los parámetros iniciales, el sistema dinámico y mecánico del agua. De esta manera se establecen los equipos que cumplan con la estandarización de medición.

Se logró establecer los parámetros iniciales, donde se describe que la planta de tratamiento utiliza una estructura para cada etapa. Para el análisis de las variables del proceso, la empresa EMAPASI-EP proporcionó los datos de turbiedad que comprenden entre las fechas 01/06/2023 y 12/07/2023, mostrando que un 42% no cumple con los valores permisibles, además el nivel de turbiedad más alto presente en el agua cruda fue de 82 NTU, que fueron durante las fechas de noviembre y diciembre.

Se obtuvo la dinámica del sistema y la medición de presión del fluido en el tanque de captación de agua cruda, mediante revisión bibliográfica del sensor de turbiedad que cumple con la norma ISO 7027, para una mejor observación de la dinámica de medición, se utilizó un sensor genérico con el tipo de medición por absorción y en el cálculo de la presión se utilizó las ecuaciones de Hazen- Williams y el software epanet, obteniendo como resultado un valor aproximado de 23 *m.c.a.* de presión a la llegada del tanque de captación, con este valor se

puede dimensionar las válvulas.

El software TIA Portal y los equipos de laboratorio de PLC que dispone la Universidad Politécnica Salesiana brindó las herramientas y equipos necesarios para obtener el diseño de monitoreo y control, ya que mediante los equipos se pudo simular el sistema de interfaz por medio de la pantalla HMI, mostrando en tiempo real los niveles de turbiedad recogidos por el sensor, reduciendo el tiempo de la obtención del resultado.

El diseño de alarma de tipo torre de luz se debió a que el personal en planta requirió un sistema capaz de dar aviso con tres comportamientos, niveles normales de turbiedad, niveles de turbiedad permisibles, niveles de turbiedad no permisibles. Por lo que se presentó el diseño mostrando los tres estados de la forma, verde, amarillo y rojo respectivamente.

La revisión bibliográfica de los componentes a utilizar, permitió dimensionar el diseño del proyecto, en la tabla 12 se puede observar que la inversión es de, 15 000,00 USD, esto representa una inversión para los equipos, no está establecido el costo de importación, construcción e implementación.

10. Recomendaciones

Para la implementación del sistema es necesario tener en cuenta una reestructuración de la planta, por lo que la tubería del afluente al tanque de captación se encuentra bajo tierra. Es importante también el considerar un sistema de filtros porque la planta de tratamiento no cuenta con ningún sistema, para seguridad de las válvulas.

Tener en cuenta al momento de adquisición del sensor de turbiedad cumpla con la medición por nefelometría. Se recomienda considerar un sensor de turbiedad en la etapa final una vez realizado el tratamiento de agua potable, para determinar la eficiencia del sistema.

El sistema de alarma debe estar colocado en una zona alta para una mayor alcance en área de la planta de tratamiento, ya que el personal al tener tareas en diferentes lugares, debe poder visualizar el estado de alarma desde cualquier punto de la planta.

Tomar en cuenta que los valores de turbiedad definidos por el personal, no son valores estándar, por lo que varían dependiendo de la zona, del afluente y del sistema de tratamiento de agua potable. Se recomienda tener un registro de los valores de los niveles de turbiedad constantes y el tiempo de muestreo dependerá del personal en planta.

La planta, al no contar con sistemas automatizados en ninguna de las estructuras, el personal en planta sugiere un estudio en el monitoreo de caudal para la agregación de químicos en la etapa de cloración.

Referencias

- Acebo-González, D., y Hernández-García, A. T. (2013). Los métodos turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida palabras. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 44(1), 001–017.
- AG, S. (2021, 9). *Aparatos de mando y señalización aparatos de mando y señalización sirius act 3su1*. Descargado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/462/107542462/att_910056/v1/manual_SIRIUS_ACT_3SU1_es-MX.pdf
- Alegret Breña, E., y Martínez Valdés, Y. (2019). Coeficiente de hazen-williams en función del número de reynolds y la rugosidad relativa. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 41–55.
- Alonso, C. G. M., Rafael, S. F., Francisco, M. P., Gabriel, D. O., Elio, S. R., Miguel, S. P. V., ... others (2017). *Comunicaciones industriales: principios básicos*. Editorial UNED.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial* (Octava edición ed.). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Endress+Hauser. (2019, 11). *Información técnica liquiline cm442/cm444/cm448*. Descargado de https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/005056A500261EEAAEC1BAA1B33B02E8/TI00444CES_2319.pdf
- Endress+Hauser. (2020, 5). *Turbimax cus52d 2 endress+hauser*. Descargado de https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/005056A500261EEAB3B3A674DAF797D6/TI01136CES_0620.pdf
- Endress+HauserAG. (2019). *Información técnica turbimax cus51d*. Descargado de https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EE9A1D17A4449EBBA59/TI00461CES_1719.pdf
- Endress+HauserAG. (2023a). *Sensores de turbidez del agua y turbidímetros | endress+hauser*. Descargado de <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/turbidimetros-sensores-turbidez-agua>
- Endress+HauserAG. (2023b). *Transmisor de 4 canal liquiline cm444*. Descargado de https://bdih-prod-assetcentralapi-assetcentral-rest-srv.cfapps.eu10.hana.ondemand.com/files/DLA/005056A500261EEAAEC1BAA1B33B02E8/TI00444CES_2319.pdf
- Enriquez Bolaños, V. E. (2021). *Evaluación de la contaminación de actividades de curtiembre con énfasis en cromo hexavalente, en el río pichaví* (B.S. thesis).

- Espinoza Ortega, E. A., y Abril Abril, J. A. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de la concentración de manganeso en agua cruda en la planta de tratamiento de agua potable tixán-etapa ep* (B.S. thesis).
- FibrasyNormasdeColombiaS.A.S. (2004). *Plantas de tratamiento de agua potable – ptap: Funcionamiento y tipos*. Descargado de <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/plantas-de-tratamiento-de-agua-potable-ptap-funcionamiento-y-tipos/>
- GmbH, O.-D. (2023). *Guía de turbidez: Dispersión de la luz y medidas de absorción*. Descargado de <https://www.optek.com/es/guia-de-turbidez.asp>
- Google. (2023). *Google maps*. Descargado de <https://www.google.com.ec/maps/@-3.2548154,-79.3200229,86m/data=!3m1!1e3?hl=es&entry=ttu>
- Gutiérrez Hinestroza, M. d. V., y Iturralde Kure, S. (2017). *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. La Libertad: Universidad Estatal Peninsula de Santa elena, 2017.
- HACH. (2023). *Turbidímetros*. Descargado de <https://latam.hach.com/turbidimetros#>
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control* (Primera edición ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Howe, K. J., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussell, R. R., y Tchobanoglous, G. (2012). *Principles of water treatment*. John Wiley & Sons. Descargado de <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/reader.action?docID=7103512&query=water+treatment>
- INEC. (2016). *Estadística de información ambiental económica en gobiernos autónomos descentralizados municipales 2015 (agua y alcantarillado)*. Descargado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015/Documento_Tecnico-Gestion_de_Agua_y_Alcantarillado_2015.pdf
- INEN. (2016, 7). *Norma técnica ecuatoriana voltajes normalizados nte inen 3098*. Descargado de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_3098.pdf
- Kaschel, H., y Pinto, E. (2001). Análisis del estado del arte de los buses de campo aplicados al control de procesos industriales. *Fac. de Ingeniería, Depto. De Ingeniería Eléctrica. Universidad de Santiago de Chile*.
- Maxi Cadme, P. L. (2022). *Diseño de un sistema mecatrónico para la dosificación de sulfato de aluminio en una planta de tratamiento de agua potable* (B.S. thesis).
- Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C. H., y Escobar, J. C. (2011). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*(16), 137–138.

- NEPHELOMETRY, D. O. T. B. (1993). Appendix b. determination of turbidity by nephelometry.
- Pardo Vilcacundo, L. S., y Pérez Albornoz, M. A. (2019). *Insolubilización biológica del cromo en aguas residuales de la industria de curtiembre* (B.S. thesis).
- Sabri, C. (2013). *Mecatrónica* (Tercera reimpresión ed.). Grupo editorial PATRIA.
- Salazar, J. Á., y Arango, J. G. M. (2017). *Tia portal. aplicaciones de plc*. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Salcedo Cañarte, H. J., Sevillano Zambrano, E. J., Salas Vazquez, C., y cols. (2020). *Diagnóstico, optimización y propuestas técnicas para la planta de tratamiento de agua potable de la zona rural en la parroquia san cristóbal, cantón paute, provincia del azuay* (Tesis Doctoral no publicada). ESPOL. FICT.
- Siemens. (2018, 7). *S7 controlador programable s7-1200*. Descargado de https://media.automation24.com/manual/es/91696622_s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf
- Siemens. (2023a, 4). *Hoja de datos 3su1106-0ab30-1ba0*. Descargado de <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatsheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D3SU1106-0AB30-1BA0%26language%3Des>
- Siemens. (2023b, 4). *Hoja de datos 3su1106-0ab40-1ba0*. Descargado de <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatsheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D3SU1106-0AB40-1BA0%26language%3Des>
- Siemens. (2023c, 4). *Hoja de datos 6av2123-2gb03-0ax0*. Descargado de <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ww/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatsheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D6AV2123-2GB03-0AX0%26language%3Des>
- Siemens. (2023d, 4). *Hoja de datos 6es7215-1bg40-0xb0*. Descargado de <https://mall.industry.siemens.com/teddatsheet/?format=PDF&caller=Mall&mlfbs=6ES7215-1BG40-0XB0&language=es>
- Termodinámica. (2023). *Turbiedad 101: qué es y por qué es tan importante | hach*. Descargado de <https://www.termodinamica.cl/turbidity-article-turbidity101>
- Torres Rivera, D. A. (2023). Diseño e implementación de sistema óptico para medición de turbidez en agua.
- Vivas Cardenas, G. A., Moreno Moreno, D. S., y cols. (2023). *Análisis investigativo del control y tratamiento de agua potable (ptap) del municipio de apulo-cundinamarca* (Tesis

Doctoral no publicada).

Yuste, R. L., y Guerrero, V. (2017). *Autómatas programables siemens: Grafcet y guía gemma con tia portal*. Marcombo.

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 13

Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Qué diseño es idóneo para un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP?	Diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.	Se diseñará un sistema de monitoreo y control de turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable EMAPASI-EP.	-VI: Diseño. -VD: Turbiedad.	Diseño de monitoreo y de control Sistemas de alarma
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda?	Establecer los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda.	Se establecerá los parámetros iniciales para diseñar un sistema que permita monitorear y controlar el nivel de turbiedad en un tanque de captación de agua cruda.	-VI: Diseño. -VD: Turbiedad.	Turbiedad, Tiempo, Velocidad de transmisión de datos
¿Es posible realizar un análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control de turbiedad?	Realizar un análisis de la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control de turbiedad.	Se analizará la dinámica del sistema y la mecánica del fluido para el diseño de monitoreo y control de turbiedad.	-VI: Diseño. -VD: Turbiedad.	Sistema de control, Velocidad de fluido
¿Es factible diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y softwares disponibles en el mercado?	Diseñar un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y softwares disponibles en el mercado.	Se diseñará un sistema de monitoreo y control de turbiedad apoyado en equipos y softwares disponibles en el mercado.	-VI: Diseño. -VD: Turbiedad.	PLCs, Sensores, Transmisores

Nota: La matriz de consistencia presentada facilita identificar la relación que existe entre las variables y los objetivos además de como se relaciona con el marco teórico referencial.

Anexo B: Operacionalización de Variables

La tabla 14 presenta la operacionalización de la variable dependiente: tiempo de operación.

Tabla 14

Variable dependiente.

VARIABLE DEPENDIENTE: TURBIEDAD				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
Nivel de turbiedad para el control	<p>Definición conceptual: Permite determinar el rango de trabajo para efectuar una acción definida, establecida por condiciones determinadas.</p> <p>Definición operacional: Los actuadores tomaran la acción en base a los niveles de turbiedad.</p>	Turbiedad	UNT	Sensor de turbiedad

Nota: La tabla presenta las definiciones de las dimensiones de la variable dependiente utilizada en la investigación, aplicadas al nivel de turbiedad.

Anexo C: Registro de turbiedades de la planta de tratamiento de agua potable del cantón Santa Isabel.



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL CANTON SANTA ISABEL

REGISTRO DE TURBIEDADES

FECHA	TURBIEDAD AGUA CRUDA UNT	TURBIEDAD AGUA TRATADA UNT
01/06/2023	9	4
02/06/2023	7	5
05/06/2023	12	6
06/06/2023	11	6
07/06/2023	14	5
08/06/2023	38	8
09/06/2023	42	7
04/07/2023	39	7
05/07/2023	9	4
06/07/2023	8	4
07/07/2023	45	7
10/07/2023	10	4
11/07/2023	9	5
12/07/2023	4	4


 Ing. Cristina Ramón.
 TECNICA DE LA UNIDAD DE GESTION AMBIENTAL
 DEL GAD. STA. ISABEL

Nota: Registro de niveles de turbiedad de las fechas junio y julio del 2023 proporcionados por la planta de tratamiento EMAPASI-EP.

Anexo D: Registro de turbiedades de la planta de tratamiento de agua potable del cantón Santa Isabel.



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL CANTON SANTA ISABEL	
REGISTRO DE TURBIEDADES DE MESES NOVIEMBRE Y DICIEMBRE DEL 2022	
FECHA	TURBIEDAD (UNT)
01/11/2022	12
02/11/2022	15
08/11/2022	13
09/11/2022	10
10/11/2022	11
11/11/2022	10
14/11/2022	14
15/11/2022	18
16/11/2022	17
21/11/2022	15
22/11/2022	12
23/11/2022	9
24/11/2022	8
25/11/2022	10
28/11/2022	7
29/11/2022	12
30/11/2022	14
01/12/2022	16
02/12/2022	20
05/12/2022	21
06/12/2022	42
07/12/2022	48
08/11/2022	55
09/11/2022	83
12/12/2022	56
16/11/2022	43
19/12/2022	34
20/12/2022	29
21/12/2022	20
22/12/2022	17
23/12/2022	17
26/12/2022	14
28/12/2022	12
29/12/2022	10
30/12/2022	14

Atentamente:

Ing. Cristina Ramón

TECNICA DE LA UNIDAD DE GESTION AMBIENTAL
DEL GAD. MUNICIPAL SANTA ISABEL

Nota: Registro de niveles de turbiedad de las fechas noviembre y diciembre del 2022 proporcionados por la planta de tratamiento EMAPASI-EP.

Anexo E: Información técnica del sensor Turbimax CUS52D.

Turbimax CUS52D

AVISO

Dispersión múltiple

Si se sobrepasa el rango operacional específico, el valor medido indicado por el sensor puede reducirse a pesar de un aumento de turbidez. El rango operacional indicado se reduce en caso de un producto altamente absorbente (p. ej., oscuro).

- ▶ Si hay un producto altamente absorbente (p. ej., oscuro), determine el rango operacional experimentalmente de antemano.

Sistema de medición

Un sistema de medición completo incluye:

- Sensor de turbidez Turbimax CUS52D
- Transmisor multicanal Liquline CM44x
- Portasondas:
 - Cámara de flujo CUA252 (solo para sensor de acero inoxidable) o
 - Cámara de flujo CUA262 (solo para sensor de acero inoxidable) o
 - Portasondas Flexdip CYA112 y soporte Flexdip CYH112 o
 - Portasondas retráctil, p. ej., Cleanfit CUA451
- O bien instalación directa mediante conexión de tubería (solo para sensor de acero inoxidable)
 - Clamp de 2" o
 - Varivent

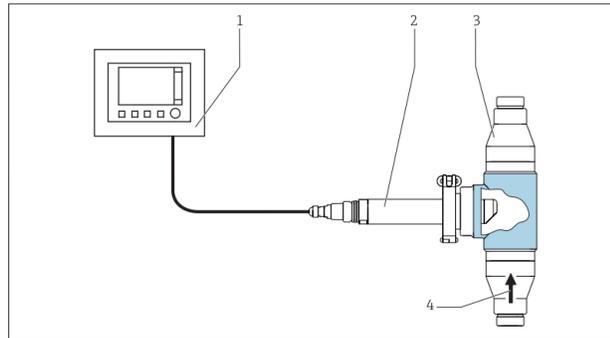


Fig. 2 Ejemplo de dispositivo de medición con cámara de flujo CUA252 para sensor de acero inoxidable

- 1 Transmisor multicanal Liquline CM44x
- 2 Sensor de turbidez Turbimax CUS52D
- 3 Cámara de flujo CUA252
- 4 Sentido del caudal

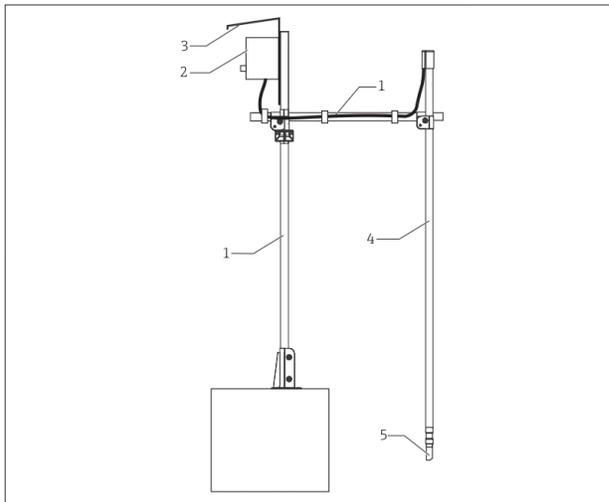


Fig. 3 Ejemplo de dispositivo de medición con portasondas de inmersión

- 1 Soporte Flexdip CYH112
- 2 Transmisor multicanal Liquiline CM44x
- 3 Cubierta protectora
- 4 Portasondas Flexdip CYA112
- 5 Sensor de turbidez Turbimax CUS52D

Este tipo de instalación es particularmente adecuado para caudales fuertes o turbulentos (> 0,5 m/s (1,6 ft/s)) en balsas o canales.

Estructura del sensor

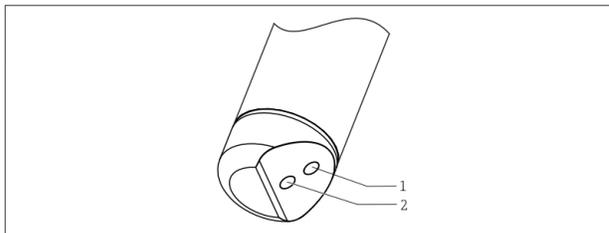
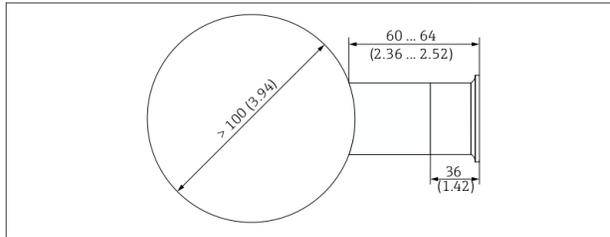


Fig. 4 Disposición de la fuente de emisión y del receptor de emisión

- 1 Receptor de emisión
- 2 Fuente de emisión

Referencia de estado sólido

La referencia de estado sólido se puede usar para comprobar la integridad funcional del sensor.



21 Conexión a tubería con casquillo de soldadura. Dimensiones: mm (in)

Para el funcionamiento automático del sensor en accesorios de tubería o cámaras de flujo, existe la opción de usar el sistema de limpieza por ultrasonidos CYR52 (→ 22).

Las burbujas provocan errores en las mediciones de turbidez. Se puede minimizar el efecto de esta interferencia usando una trampa de burbujas (→ 22).

Entorno

Rango de temperatura ambiente	-20 ... 60 °C (-4 ... 140 °F)
Temperatura de almacenamiento	-20 ... 70 °C (-4 ... 158 °F)
Grado de protección	IP 68 (1,8 m (5,91 pies) de columna de agua durante 20 días, 1 mol/l KCl)
Compatibilidad electromagnética (CEM)	Emisión de interferencias e inmunidad ante interferencias según <ul style="list-style-type: none"> ▪ EN 61326-1:2013 ▪ EN 61326-2-3:2013 ▪ NAMUR NE21: 2012

Proceso

Rango de temperatura del proceso	Sensor de acero inoxidable -20 ... 85 °C (-4 ... 185 °F)
	Sensor de plástico -20 ... 60 °C (-4 ... 140 °F) En caso de altas temperaturas en combinación con valores de pH extraordinariamente altos o bajos y condiciones límite desde el punto de vista químico, p. ej., durante procesos de limpieza CIP, la estabilidad a largo plazo del sensor es limitada.
	i A fin de evitar daños en el sensor en los procesos de limpieza CIP, el sensor se debe usar exclusivamente en combinación con un portasondas retráctil. El portasondas retráctil permite retirar el sensor del proceso durante la limpieza.
Rango de presión del proceso	Sensor de acero inoxidable 0,5 ... 10 bar (7,3 ... 145 psi) (abs.)

Sensor de plástico
 0,5 ... 6 bar (7,3 ... 87 psi)

Límite de caudal

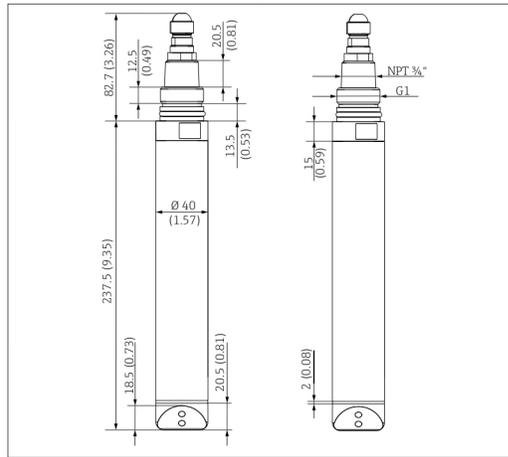
Caudal mínimo
 No se requiere ningún caudal mínimo.

i Para sólidos con tendencia a formar depósitos, asegúrese de que la mezcla se forma adecuadamente.

Construcción mecánica

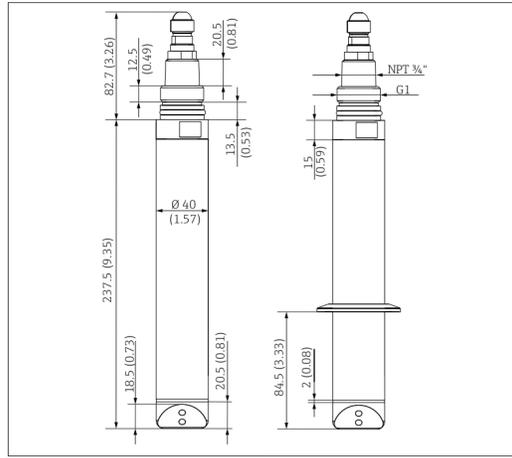
Medidas

Sensor de plástico



22 Dimensiones del sensor de plástico. Dimensiones: mm (in)

Sensor de acero inoxidable



23 Dimensiones del sensor de acero inoxidable y del sensor de acero inoxidable con conexión clamp (derecha). Dimensiones: mm (in)

Anexo F: Información técnica de la interfaz HMI 6AV2123-2GB03-0AX0.

SIEMENS

Hoja de datos

6AV2123-2GB03-0AX0



SIMATIC HMI, KTP700 Basic, Basic Panel. Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 7", 65536 colores, Interfaz PROFINET, configurable a partir de WinCC Basic V13/ STEP 7 Basic V13, incluye software Open Source, que se cede gratuitamente ver CD adjunto

Información general	
Designación del tipo de producto	KTP700 Basic color PN
Display	
Tipo de display	Pantalla TFT panorámica, retroiluminación LED
Diagonal de pantalla	7 in
Achura del display	154,1 mm
Altura del display	85,9 mm
Nº de colores	65 536
Resolución (píxeles)	
• Resolución de imagen horizontal	800 pixel
• Resolución de imagen vertical	480 pixel
Retroiluminación	
• MTBF de la retroiluminación (con 25 °C)	20 000 h
• Retroiluminación variable	SI
Elementos de mando	
Fuentes de teclado	
• Teclas de función	
— Nº de teclas de función	8
— Nº de teclas de función con LED	0
• Teclas con LED	No
• Teclas del sistema	No
• Teclado numérico	SI; Teclado en pantalla
• Teclado alfanumérico	SI; Teclado en pantalla
Manejo táctil	
• Variante con pantalla táctil	SI; Analógica resistiva
Diseño/montaje	
Posición de montaje	vertical
Montaje en pared/directo	No
Montaje vertical (formato retrato) posible	SI
Montaje horizontal (formato apaisado) posible	SI
Máx. ángulo de inclinación permitido sin ventilación externa	35°
Tensión de alimentación	
Tipo de tensión de la alimentación	DC
Valor nominal (DC)	24 V
Rango admisible, límite inferior (DC)	19,2 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28,8 V
Intensidad de entrada	
Consumo (valor nominal)	230 mA
Intensidad transitoria de conexión Pt	0,2 A² s
Potencia	

6AV21232GB030AX0
Página 1/6

21/7/2023

Sujeto a cambios
© Copyright Siemens

SIEMENS

Hoja de datos

6AV2123-2GB03-0AX0



SIMATIC HMI, KTP700 Basic, Basic Panel, Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 7", 65536 colores, Interfaz PROFIBUS, configurable a partir de WinCC Basic V13/STEP 7 Basic V13, incluye software Open Source, que se cede gratuitamente ver CD adjunto

Información general	
Designación del tipo de producto	KTP700 Basic,color PN
Display	
Tipo de display	Pantalla TFT panorámica, retroiluminación LED
Diagonal de pantalla	7 in
Achura del display	154,1 mm
Altura del display	85,9 mm
Nº de colores	65 536
Resolución (píxeles)	
• Resolución de imagen horizontal	800 pixel
• Resolución de imagen vertical	480 pixel
Retroiluminación	
• MTBF de la retroiluminación (con 25 °C)	20 000 h
• Retroiluminación variable	Si
Elementos de mando	
Fuentes de teclado	
• Teclas de función	
— Nº de teclas de función	8
— Nº de teclas de función con LED	0
• Teclas con LED	No
• Teclas del sistema	No
• Teclado numérico	Si, Teclado en pantalla
• Teclado alfanumérico	Si, Teclado en pantalla
Manejo táctil	
• Variante con pantalla táctil	Si, Analógica resistiva
Diseño/montaje	
Posición de montaje	vertical
Montaje en pared/directo	No
Montaje vertical (formato retrato) posible	Si
Montaje horizontal (formato apaisado) posible	Si
Máx. ángulo de inclinación permitido sin ventilación externa	35°
Tensión de alimentación	
Tipo de tensión de la alimentación	DC
Valor nominal (DC)	24 V
Rango admisible, límite inferior (DC)	19,2 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28,8 V
Intensidad de entrada	
Consumo (valor nominal)	230 mA
Intensidad transitoria de conexión IT	0,2 A ² s
Potencia	

6AV21232GB030AX0
Página 1/6

21/7/2023

Sujeto a cambios
© Copyright Siemens

SIEMENS

Hoja de datos

6AV2123-2GB03-0AX0



SIMATIC HMI, KTP700 Basic, Basic Panel, Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 7", 65536 colores, Interfaz PROFIBUS, configurable a partir de WinCC Basic V13/STEP 7 Basic V13, incluye software Open Source, que se cede gratuitamente ver CD adjunto

Información general	
Designación del tipo de producto	KTP700 Basic,color PN
Display	
Tipo de display	Pantalla TFT panorámica, retroiluminación LED
Diagonal de pantalla	7 in
Achura del display	154,1 mm
Altura del display	85,9 mm
Nº de colores	65 536
Resolución (píxeles)	
• Resolución de imagen horizontal	800 pixel
• Resolución de imagen vertical	480 pixel
Retroiluminación	
• MTBF de la retroiluminación (con 25 °C)	20 000 h
• Retroiluminación variable	Si
Elementos de mando	
Fuentes de teclado	
• Teclas de función	
— Nº de teclas de función	8
— Nº de teclas de función con LED	0
• Teclas con LED	No
• Teclas del sistema	No
• Teclado numérico	Si, Teclado en pantalla
• Teclado alfanumérico	Si, Teclado en pantalla
Manejo táctil	
• Variante con pantalla táctil	Si, Analógica resistiva
Diseño/montaje	
Posición de montaje	vertical
Montaje en pared/directo	No
Montaje vertical (formato retrato) posible	Si
Montaje horizontal (formato apaisado) posible	Si
Máx. ángulo de inclinación permitido sin ventilación externa	35°
Tensión de alimentación	
Tipo de tensión de la alimentación	DC
Valor nominal (DC)	24 V
Rango admisible, límite inferior (DC)	19,2 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28,8 V
Intensidad de entrada	
Consumo (valor nominal)	230 mA
Intensidad transitoria de conexión IT	0,2 A ² s
Potencia	

6AV2123-2GB03-0AX0
Página 1/6

21/7/2023

Sujeto a cambios
© Copyright Siemens

Anexo G: Código programado en el software de TIA PORTAL.

Totally Integrated Automation Portal			
PruebaTesis / PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] / Bloques de programa			
Main [OB1]			
Main Propiedades			
General			
Nombre	Main	Número	1
Tipología	Automático	Tipo	OB
Idioma		Idioma	KOP
Información			
Título	"Main Program Sweep (Cycle)"	Autor	
Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizado	
Main			
Nombre		Tipo de datos	Valor predet.
Temp			
Constant			
Segmento 1:			

Nota: Código de programación autor (TIA PORTAL)