

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

TEMA:

**Automatización de la Etapa Primaria en el Proceso de Tratamiento de
Aguas Residuales Industriales**

AUTORA:

Loor Rodríguez, María José

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

TUTOR:

M. Sc. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente

Guayaquil, Ecuador

16 de septiembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Loor Rodríguez, María José**, como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**.

TUTOR

M. Sc. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente

DIRECTOR DE LA CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Loor Rodríguez, María José**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Automatización de la Etapa Primaria en el Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales** previo a la obtención del título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021

LA AUTORA:

Loor Rodríguez, María José



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Loor Rodríguez, María José**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Automatización de la Etapa Primaria en el Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 16 días del mes de septiembre del año 2021

LA AUTORA:

Loor Rodríguez, María José

**REVISIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN CON PROGRAMA URKUND
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO**

TÍTULO: Automatización de la etapa primaria en el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales.

AUTOR: LOOR RODRÍGUEZ MARÍA JOSÉ



Document Information

Analyzed document	2021-09-01 Trabajo Titulacion Maria José Loor U.docx (D111951134)
Submitted	9/2/2021 3:10:00 AM
Submitted by	
Submitter email	eduardo.mendoza01@cu.ucsg.edu.ec
Similarity	0%
Analysis address	eduardo.mendoza01.ucsg@analysis.urkund.com

Sources included in the report

Después de analizar el resultado enviado por el programa Urkund, se determinó que el trabajo de titulación del estudiante: **LOOR RODRÍGUEZ MARÍA JOSÉ**, observa un porcentaje inferior al 4% de coincidencias con otros documentos encontrados en el internet.

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval. The signature appears to read "Eduardo Mendoza Merchán".

**Ing. Eduardo Mendoza Merchán, Mgs
DOCENTE TUTOR**

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido llegar a esta instancia de mi vida, por ser mi fortaleza y guía en todo momento.

A mis padres, Mariana Rodríguez y José Loor, por el trabajo que realizan día a día para que mi hermana y yo seamos excelentes personas. Gracias por inculcarme buenos valores y por brindarme su apoyo incondicional. Gracias porque sacrificaron mucho de sus vidas para que yo pudiera culminar mis estudios.

A mi hermana, por brindarme palabras de aliento cuando más lo necesitaba. Indudablemente soy una mujer de éxito gracias a ustedes.

A mi tía Maryuri, por ser como mi segunda madre y por brindarme un hogar cuando recién inicié esta hermosa etapa de mi vida universitaria.

A mi abuelita Lourdes, mi ángel, quien desde el cielo me cuida en todo momento. Espero estés orgullosa de mí, por este logro obtenido.

A mis profesores, por impartirme sus conocimientos y contribuir en mi formación académica y profesional, gracias por sus consejos.

A mi tutor, Ing. Eduardo Mendoza por guiarme e impulsarme clase a clase a realizar esta labor investigativa, gracias por su tiempo y dedicación.

A mis compañeros y amigos de clases, con quienes compartí buenos, malos y divertidos momentos, gracias por su generosidad, los recordaré con profundo cariño.

Gracias a cada uno de ustedes, por haber formado parte esencial de esta maravillosa etapa.

María José Loor Rodríguez

DEDICATORIA

*A mis padres, Mariana y José
por ser pilares fundamentales de mi vida
por el inmenso amor que siempre me brindan,
por su constante esfuerzo y motivación.*

Gracias por ser mi ejemplo a seguir.

*A mi hermana, Valentina
por su compañía incondicional,
por ser mi cómplice de aventuras.*

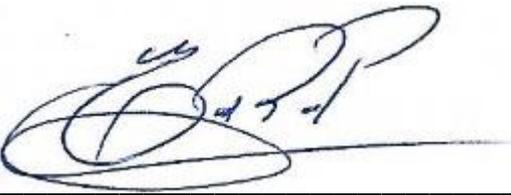
Este logro es para ustedes.

*Con amor,
María José Loor*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DECANO
f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO

COORDINADOR DEL ÁREA
f. 

M. Sc. BAYARDO BOHÓRQUEZ ESCOBAR

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación	5
1.3 Delimitación	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Metodología	7
1.6 Tareas de investigación.....	8
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 Estado del arte.....	9
2.2 Tratamiento de aguas residuales.....	14
2.2.1 Pretratamiento.....	15
2.2.2 Tratamiento primario	15
2.2.3 Tratamiento Secundario	18
2.2.4 Tratamiento Terciario	19
2.3 Sistemas de automatización	21
2.3.1 Lógicas de control	22
2.3.2 Arquitectura de la Red de Automatización Industrial.....	25
2.4 Sistemas SCADA.....	27
2.4.1 Elementos de un SCADA	28
2.4.2 Funciones de un sistema SCADA	33
2.5 Instrumentación en aguas residuales	34
2.5.1 Cribado.....	35

2.5.2	Tamices de tambor.....	35
2.5.3	Removedor de arena.....	36
2.5.4	Tanques de sedimentación primaria	36
2.5.5	Bombas dosificadoras	37
2.5.6	Flotación por aire disuelto	38
2.5.7	Sensores	38
2.5.8	Proceso de lodos activados (ASP)	39
2.5.9	Zanja de oxidación	40
2.5.10	Tratamiento biológico de separación de membranas (MBR)	40
2.5.11	Desinfección química.....	41
2.6	Lenguaje de Modelado Unificado (UML).....	42
2.6.1	Diagrama de uso de caso	43
2.6.2	Diagrama de secuencia.....	44
2.6.3	Diagramas de estado.	45
2.7	Redes de Petri.....	47
2.7.1	Redes de Petri autónomas y no autónomas	50
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES		53
3.1	Consideraciones generales de diseño.....	53
3.1.1	Descripción del sistema	53
3.1.2	Caracterización del sistema	56
3.1.3	Funciones del sistema.....	57
3.2	Arquitectura del sistema de tratamiento de aguas residuales.....	58
3.2.1	Arquitectura del sistema de control	58
3.2.2	Arquitectura de comunicaciones	60
3.2.3	Arquitectura del sistema SCADA.....	61
3.3	Análisis del sistema de control y automatización.....	62
3.3.1	Análisis del primer subsistema, estabilización de PH.....	63
3.3.2	Análisis del segundo subsistema, coagulación y floculación....	64

3.3.3	Análisis del tercer subsistema, remoción de lodos y sólidos disueltos.....	65
3.4	Modelado del sistema.....	66
3.4.1	Diagramas de casos de uso.....	66
3.4.2	Diagramas de secuencia.....	68
3.4.3	Diagramas de estado.....	71
3.4.4	Modelado en Redes de Petri.....	72
3.4.5	Ecuaciones de la RdP.....	77
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		81
4.1	Presentación de resultados.....	81
4.1.1	Resultados del estado del arte.....	81
4.1.2	Resultados de las arquitecturas.....	82
4.1.3	Resultados del modelado UML y RdP.....	83
4.2	Discusión de resultados.....	83
4.2.1	Discusión del cumplimiento de los requisitos funcionales.....	83
4.2.2	Cumplimiento de objetivos.....	85
4.2.3	Solución al problema de investigación.....	86
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		88
5.1	Conclusiones.....	88
5.2	Recomendaciones.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Planta de tratamiento de aguas residuales Garmerwolde en los Países Bajos.....	14
Figura 2 Esquematación de las etapas del Tratamiento de Aguas Residuales.....	15
Figura 3 Coagulación y floculación de una suspensión coloidal	16
Figura 4 Diagrama de flujo de funcionamiento de un DAF.....	17
Figura 5 Proceso combinado aeróbico / anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales.....	18
Figura 6 Difusores de membrana circular en un reactor extraído para mantenimiento.	20
Figura 7 Lógicas de control.....	23
Figura 8 Estructura de cinco capas de la red de automatización industrial. 26	
Figura 9 Diagrama simplificado de un SCADA.....	28
Figura 10 Sistema de control de procesos basado en PLC.	32
Figura 11 Cribas de barras limpiadas mecánicamente	35
Figura 12 Fila de tamices de tambor en una planta de tratamiento de efluentes textiles.....	36
Figura 13 Tanque de sedimentación rectangular de una PTAR en China . 37	
Figura 14 Bomba dosificadora electromagnética	37
Figura 15 Sensor de PH para aguas residuales.....	39
Figura 16 Tanque de aireación en una planta de tratamiento de efluentes textiles en China	39
Figura 17 Foto de una zanja de oxidación, China.	40
Figura 18 Membranas permeables	41
Figura 19 Desinfección química realizada por el método de cloración	41
Figura 20 Diagrama de caso de uso para el sistema de música con casos de uso incluidos.	43
Figura 21 Ejemplo de Diagrama de secuencia para programa de dibujo....	44
Figura 22 Diagrama de secuencia con dos marcos de interacción	45
Figura 23 Diagrama de estado para una sección del compilador Java.	46

Figura 24 Diagrama de estado con un estado de actividad y una transición sin disparador	47
Figura 25 Máquinas de estados a RDP: arco y transiciones.....	48
Figura 26 Red de Petri con cuatro lugares, cuatro transiciones, cinco arcos dirigidos de peso uno y cuatro arcos dirigidos de peso dos.....	50
Figura 27 Redes de Petri autónoma y no autónomas.....	50
Figura 28 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.....	54
Figura 29 Diagrama de bloques, etapa de tratamiento primario	54
Figura 30 Jerarquización de la arquitectura de control	59
Figura 31 Arquitectura de comunicaciones	60
Figura 32 Arquitectura del sistema SCADA	61
Figura 33 Diagrama de bloques del sistema de control de la primera etapa de la PTAR.	62
Figura 34 Primer subsistema de control, estabilización de Ph.....	63
Figura 35 Segundo subsistema de control, coagulación y floculación	64
Figura 36 Tercer subsistema de control, remoción de lodos y sólidos disueltos.....	65
Figura 37 Diagrama de caso de uso, subsistema de estabilización de PH. 66	
Figura 38 Diagrama de caso de uso, subsistema coagulación y floculación67	
Figura 39 Diagrama de caso de uso, subsistema de remoción de lodos	68
Figura 40 Diagrama de secuencia, subsistema de estabilización de PH....	69
Figura 41 Diagrama de secuencia, subsistema coagulación y floculación..	69
Figura 42 Diagrama de secuencia, subsistema de remoción de lodos	70
Figura 43 Diagrama de estados, subsistema estabilización de PH.....	71
Figura 44 Diagrama de estados, subsistema de coagulación y floculación	71
Figura 45 Diagrama de estados, subsistema de remoción de lodos.....	72
Figura 46 Red de Petri, subsistema de estabilización de PH.....	74
Figura 47 Red de Petri, subsistema de coagulación y floculación	75
Figura 48 Red de Petri, subsistema de remoción de lodos.....	76
Figura 49 Matriz de inhibición del subsistema de estabilización de PH	77
Figura 50 Matriz de inhibición del subsistema de coagulación y floculación78	

Figura 51 Matriz de inhibición del subsistema de remoción.....	78
Figura 52 Matriz de marcado del subsistema de estabilización de PH	79
Figura 53 Matriz de marcado del subsistema de coagulación y floculación	79
Figura 54 Matriz de marcado del subsistema de remoción.....	79
Figura 55 Transiciones habilitadas del subsistema de estabilización de PH79	
Figura 56 Transiciones habilitadas del subsistema de coagulación y floculación.....	80
Figura 57 Transiciones habilitadas del subsistema de remoción	80
Figura 58 Resultados del análisis del espacio de estados de la red.....	80

RESUMEN

Actualmente la automatización de los procesos llevados a cabo dentro de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, contribuyen a mejorar notablemente la calidad del agua, ya sea para el vertimiento al medio acuático o para fines de reutilización. Esta automatización de procesos es de vital importancia ya que implica menos consumo y costes por energía reduciendo el desgaste de los equipos y prolongando su vida útil, reducción de mano de obra en áreas específicas, aprovechamiento del tiempo debido a la disminución de averías, y reducción de costes por aditivos químicos evitando el desperdicio. El presente trabajo de investigación tiene como finalidad proponer una arquitectura de automatización para el control y supervisión eficiente de la primera etapa de tratamiento, dado que es una de las fases más complejas de monitorear, debido al gran uso de instrumentos de campo como sensores y actuadores, instrumentos de control y supervisión como controladores lógicos programables y sistemas Scada. El modelado mediante diagramas de casos de uso, secuencia y estados atribuidos al Lenguaje Unificado de Modelado (UML) permitió elaborar, diseñar y definir los actores y funciones de los subsistemas que integran la Etapa Primaria. La simulación se asistió mediante el uso de Redes de Petri, lo que permitió determinar la correcta funcionalidad de los subsistemas gracias al cumplimiento de sus propiedades de vivacidad, limitación y alcanzabilidad. Ambas herramientas fueron de gran ayuda para el aseguramiento del dinamismo del sistema en general.

Palabras claves: Automatización; Control y supervisión; Tratamiento Primario; Aguas Residuales; Redes de Petri

ABSTRACT

Currently, the automation of the processes carried out within the Wastewater Treatment Plants contributes to significantly improve the quality of the water, either for discharge into the aquatic environment or for reuse purposes. This automation of processes is of vital importance since it implies less consumption and costs for energy, reducing the wear and tear of the equipment, extending its useful life, reducing labor in specific areas, taking advantage of time due to the reduction of breakdowns, and reduction cost of chemical additives avoiding waste. The purpose of this research work is to propose an automation architecture for the efficient control and supervision of the first stage of treatment, given that it is one of the most complex phases to monitor, due to the extensive use of field instruments such as sensors and actuators. , control and supervision instruments such as programmable logic controllers and SCADA systems. Modeling through use case, sequence and state diagrams attributed to the Unified Modeling Language (UML) allowed to elaborate, design and define the actors and functions of the subsystems that make up the Primary Stage. The simulation was assisted through the use of Petri nets, which allowed to determine the correct functionality of the subsystems thanks to the fulfillment of their properties of vivacity, limitation and reachability. Both tools were of great help in ensuring the dynamism of the system in general.

Keywords: Automation; Control and supervision; Primary Treatment; Sewage water; Petri nets

INTRODUCCIÓN

Actualmente las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales juegan un papel importante en las industrias debido a su capacidad de tratamiento para eliminar o depurar los contaminantes presentes en el agua residual producto de sus procesos a fin de reutilizarla, consumirla o verterla al medio acuático. Este proceso de tratamiento de aguas residuales, está integrado por diversas etapas, generalmente las más conocidas son cuatro: tratamiento preliminar, etapa primaria, etapa secundaria y etapa terciaria, cuyas primeras fases involucran mayor dificultad de control por su realización manual.

En Ecuador la automatización de este proceso es muy poco implementada debido al desconocimiento de las bondades de estos sistemas automatizados, y a los altos costos de los equipos que se necesitan utilizar. Y aunque puede implicar una inversión inicial significativa, los resultados y el ahorro a largo plazo se ven reflejados. Entre los principales beneficios de implementación se tienen: un alto grado de seguridad tanto para el personal como de las instalaciones, reducción de costos por aditivos químicos, reducción de gastos por averías, aprovechamiento del tiempo. Es importante recalcar que también existe de por medio un beneficio hacia el medioambiente y su conservación.

La propuesta de este trabajo de investigación es proyectar una arquitectura de control y automatización aplicada a la primera etapa de este proceso de tratamiento, mediante el modelado UML, la simulación y evaluación de los subsistemas: estabilización de PH, coagulación – floculación y remoción de sólidos disueltos, con la ayuda de las Redes de Petri.

La metodología utilizada es de tipo correlacional permitiendo así medir la relación entre dos o más variables que interactúan en el sistema. De la misma manera se propone el método de investigación analítico, a través del cual se recolecta información oportuna proveniente de artículos científicos y partiendo de ello se elabora el estado del arte.

La investigación se ha dividido en cinco capítulos, detallados a continuación:

En el Capítulo 1 se expone el planteamiento del problema, su justificación, la delimitación del proyecto, los objetivos planteados, la metodología utilizada y varias tareas de investigación.

En el capítulo 2, se muestra el estado del arte basado en las diferentes formas de automatización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. El marco teórico inicia presentando información sobre el Proceso de Tratamiento y sus etapas. Luego se muestra información sobre sistemas de automatización, sistemas SCADA, y parte de la instrumentación utilizada en el tratamiento de la PTAR. Finalmente se realiza un estudio del modelado UML y las Redes de Petri.

En el capítulo 3, se dan a conocer las consideraciones iniciales de diseño del sistema, que involucran la descripción, su caracterización y las funciones a ejecutar. Luego se proyecta la arquitectura general del sistema y se elaboran diagramas de modelado para cada subsistema que integra la Primera Etapa de tratamiento a fin de entender la secuencia de sus interacciones. Posteriormente se realiza la evaluación y análisis con la ayuda de las Redes de Petri.

En el capítulo 4, se presentan los resultados alcanzados y se realiza una discusión de los mismos.

En el capítulo 5, se analizan las conclusiones obtenidas una vez modelado y evaluado el sistema en general y se proponen recomendaciones.

Definitivamente la automatización de procesos en las industrias y su relación con la proyección e implementación de arquitecturas, en conjunto con el modelado de sistemas y su posterior evaluación, resultan interesantes y de gran ayuda. Por tal motivo se invita a realizar una revisión del presente trabajo de investigación, el cuál ha sido elaborado en base a información científica y veraz y cuya estructura se organizó de forma clara y sencilla.

CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Planteamiento del problema

En las industrias de elaboración de harinas de pescado o camarón y aceites se ejecutan varios procesos para la obtención del producto final. Dichos procesos generan diferentes tipos de desechos o contaminantes no aptos para el vertimiento hacia los efluentes acuáticos, desechos de vísceras, sangre drenada, agua del lavado del pescado o camarón, entre otros. Debido a la necesidad de que los contaminantes presentes en el agua residual de estas industrias sean eliminados o depurados completamente, a fin de obtener agua limpia y sin residuos, se instalan Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), cuyos desechos pueden ser tratados adecuadamente para luego reutilizar esa agua para otros procesos en la misma industria, como por ejemplo para el lavado de equipos, limpieza de las instalaciones, etc. (Hussain & Bhattacharya, 2019). Este proceso de tratamiento de aguas residuales, conlleva varias fases para cumplir con el procedimiento adecuado, dentro de las cuales las primeras fases suelen tener mayor dificultad debido principalmente a su realización de forma manual existiendo una alta posibilidad de sobredosificación de aditivos y químicos, lo que origina que las aguas residuales tratadas en esta fase no sean aptas para continuar con las siguientes fases, al no poderse alcanzar el PH del agua requerido y elevando el costo de los procesos al requerirse mayor cantidad de sustancias químicas (Sonawane et al., 2018)

La automatización implica una mínima o nula intervención de la mano de obra humana en el control y monitoreo de elementos o procesos que conforman un sistema, cuya finalidad es optimizar su funcionamiento y reducir sustancialmente costos por operatividad o averías (Lamb, 2013). Esta automatización aplicada a los procesos de tratamiento de aguas residuales, especialmente en las primeras fases, permite dosificar adecuadamente las cantidades requeridas y hacer un seguimiento más óptimo del proceso, con la consecuente reducción de costos y mejorar la calidad del agua tratada. En base al análisis realizado en los párrafos anteriores, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuánto influye la arquitectura de automatización en el control y supervisión eficiente de la primera etapa del tratamiento de aguas residuales de una industria pesquera?

1.2 Justificación

El avance de las tecnologías de la industria, como la inteligencia artificial, los sensores y la supervisión en tiempo real permiten la recopilación de datos minuto a minuto y la automatización de cualquier máquina o proceso que así lo requiera. Estas tecnologías, evidentemente han mejorado la eficiencia y los procesos automatizados en otras industrias orientada a la fabricación, que actualmente se están adaptando para el tratamiento de aguas residuales.

Mediante la automatización y control de una PTAR, se puede supervisar y controlar en tiempo real las instalaciones, con el fin de optimizar el mantenimiento de la calidad del agua tratada, reducir los costos de operatividad de la planta, sustituir las tareas de operación y supervisión y así monitorear el correcto funcionamiento de los equipos. Se puede hacer un mejor uso del suministro de agua al reducir el desperdicio y el consumo, ya que a menudo se desperdician inmensos volúmenes de agua innecesariamente debido a los desbordamientos. Gracias a la automatización, los trabajadores de la planta pueden restringir de forma remota el flujo de la planta, reduciendo el riesgo de un desbordamiento y de contaminación al medio ambiente.

Dado que el uso de energía es uno de los costos más altos en cualquier planta de tratamiento de aguas residuales esta automatización ayuda a reducir la energía que la planta utiliza diariamente, así mismo ayuda a reducir el uso de aditivos químicos innecesarios. En cuanto a la mano de obra física, brinda mayor seguridad a los operarios dado que ya no se exponen a inhalaciones de químicos ni residuos perjudiciales para la salud.

Gracias al mantenimiento predictivo, se alertará sobre cuándo programar la próxima actividad de mantenimiento de los equipos y con esto, se reducirá el tiempo de inactividad producido por errores y se mejorará la vida útil las máquinas, lo que contribuye a que la calidad del agua no se vea afectada.

Mediante el monitoreo remoto se puede verificar cuál es el estado de las maquinas e instalaciones y, lo más importante, se pueden supervisar los procesos. El acceso a datos históricos y de tendencias permite refinar y modificar los procesos según sea necesario, identificar qué funciona y qué no, y ver cómo surgen patrones en momentos de situaciones variables.

Esta automatización puede implicar una inversión inicial significativa, pero ayuda a lograr un alto grado de seguridad tanto para el personal como de las instalaciones, la reducción de gastos por averías, la obtención de informes, gráficos, históricos, y al final todo esto se traduce en una reducción sustancial en costos para las industrias, mejorando su operación, y también ayudando a preservar nuestro preciado suministro de agua.

1.3 Delimitación

El presente trabajo de investigación propone la automatización de la primera etapa o etapa primaria correspondiente al tratamiento físico-químico del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales para la empresa Fortidex S.A. ubicada en la parroquia Posorja, de la ciudad de Guayaquil. El proceso completo de tratamiento de aguas residuales implica una extensión y complejidad que no se puede abordar en el tiempo que se dispone para el desarrollo del trabajo de titulación, por lo cual se ha optado por automatizar la primera etapa, lo cual es factible, dada la modularidad y flexibilidad que presentan los sistemas de automatización actuales. Debido a las rigurosas medidas que han tomado las industrias frente al ingreso del personal a sus plantas y por la situación económica actual a causa del Covid-19, no se podrá realizar la implementación de esta automatización. Sin embargo, mediante un modelado matemático y diagramas de estado se demostrará el correcto funcionamiento de los diseños del control y automatización de las bombas dosificadoras de coagulantes y floculantes y el respectivo monitoreo del pH, para corregir la concentración final de los contaminantes presentes en el agua y que esta pueda pasar a la siguiente etapa cumpliendo con la normativa medioambiental vigente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proyectar una arquitectura de control y automatización en la primera etapa del proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, utilizando el lenguaje de modelado unificado (UML) y redes de Petri, para contribuir a minimizar el impacto ambiental negativo generado por los residuos industriales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Proponer un sistema de control y automatización para las fases de estabilización de PH, coagulación y floculación, remoción de sólidos disueltos de la PTAR.
- Modelar el sistema de control y automatización, integrando los dispositivos de medición y dosificación para garantizar su correcto desempeño.
- Evaluar el comportamiento del sistema de control y automatización a través de diferentes pruebas de simulación.

1.5 Metodología

En el presente trabajo de investigación, se utiliza el método de tipo correlacional que permite medir la relación entre dos o más variables que interactúan en el sistema. Según (Prieto, 2018) este método “Conjuga elementos deductivos e inductivos y establece la presencia de dos variables en la ocurrencia de un fenómeno, evento o situación”. Dado que las variables obtenidas son medibles, se utiliza un enfoque cuantitativo para demostrar los beneficios de las redes de Petri aplicada a los procesos industriales mediante la simulación y validación de la arquitectura propuesta.

Se propone el método de investigación analítico, a través del cual se recolecta información oportuna de cada etapa del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales con la finalidad de entender y estudiar la problemática de automatización, evaluarla y a su vez encontrar soluciones para mejorar la arquitectura de automatización, todo esto, sustentado bajo el fundamento

teórico en bases científicas. Otro método utilizado en la presente investigación es de simulación, que permite escoger valores y parámetros para ajustar el proceso, con la finalidad de lograr mejores resultados y simplificar la presencia de errores en la arquitectura de automatización.

1.6 Tareas de investigación

Para cumplir con el desarrollo del proceso investigativo, se han elaborado las siguientes tareas de investigación:

1. Búsqueda de información bibliográfica actual y confiable sobre Procesos de Tratamientos de Aguas Residuales y Supervisión de sistemas de control, que permitan respaldar teóricamente el trabajo de investigación.
2. Definir la etapa del proceso a desarrollar para la demostración de la arquitectura propuesta.
3. Definir las variables del sistema y los componentes necesarios para la supervisión de etapa primaria de la PTAR.
4. Proponer la arquitectura de automatización para el control y supervisión de la primera etapa del tratamiento de aguas residuales.
5. Diseñar la arquitectura de automatización para el control y supervisión de la primera etapa de la PTAR.
6. Modelar mediante Diagramas de UML la arquitectura de automatización propuesta.
7. Analizar mediante las redes de PETRI el comportamiento dinámico del sistema.
8. Evaluar el sistema propuesto a través de métricas establecidas para su comparación con otros trabajos similares.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte.

Según (Zhang et al., 2020) debido a la variabilidad de las necesidades de tratamiento de aguas residuales, los vertidos industriales suelen estar obligados a ser tratados activamente en situ, realizando un pretratamiento antes de su vertido en el alcantarillado municipal. Tanto el endurecimiento continuo de las normativas medioambientales como los desafíos únicos asociados con la mejora de la sostenibilidad, es decir, la recuperación de recursos, exigen innovación. Los resultados de la adopción temprana de la instrumentación y las actualizaciones de procesos en las instalaciones operativas de tratamiento de aguas residuales, se están logrando con una mejora de hasta un 10% en la eliminación de nutrientes y el ahorro de energía. Métodos, como el control PID, permiten aprovechar la detección en tiempo real de la química de las EDAR para el monitoreo y control de procesos. Además, suavizan el rendimiento teniendo en cuenta la magnitud de la desviación del valor objetivo y las tasas de cambio previstas, y puede ser especialmente eficaz cuando se combina con hardware actualizado, como los accionamientos de frecuencia variable (VFD) para el control de la velocidad de las bombas.

Según (Moldovan & Nuca, 2019) la vigilancia de los sistemas de abastecimiento de agua es imperativa en la mayoría de los países europeos para los servicios de salud pública. Durante algunos de los procesos tecnológicos llevados a cabo se comprobó que, tras las mediciones, un impacto negativo en el medio ambiente es presentado por los siguientes contaminantes: amoníaco nitrógeno, sulfuros, cloruros etc., y mediante la supervisión y control por medio de un sistema SCADA se propone una reducción de costes de mantenimiento y aumento de la eficiencia energética lo que ayuda a mejorar la calidad de las aguas residuales que se vierten al río y que proceden directamente del sistema de alcantarillado. Una estación automatizada puede trabajar sin parar, y posee una alta eficiencia en la calidad y limpieza del agua, cada uno de sus elementos funciona con un 20% más de eficacia, los datos de todos los sensores se guardan cada segundo y

a partir de estos datos, se generan informes automatizados generados por los operadores en el momento deseado, con su ayuda, se puede ver la eficiencia de la central y la calidad del agua.

Los autores (Ravi Mukeshbhai et al., 2019) manifiestan que recuperar las aguas residuales de manera efectiva para satisfacer la creciente demanda y no infligir en la supervivencia acuática, es uno de los desafíos de la humanidad. En vista de la falta de compromiso con el medio ambiente, las aguas residuales de los hogares y las industrias, sin tratamiento adecuado, vertidas en la fuente de agua pueden alterar el pH causando contaminación. Por ello, sugieren la implementación de un sistema PLC y SCADA para la automatización de la PTAR, mediante un diagrama de bloques general, el mismo que consta de E/S analógicas y E/S digitales. Todas estas E/S están conectadas al PLC como controlador principal y este a su vez está conectado al ordenador SCADA a través del cable Ethernet, lo que permite la supervisión en tiempo real. La eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales se incrementa por el aumento del nivel de automatización. La capacidad de tratamiento del agua de la planta depende de las E/S operadas. Los beneficios económicos se logran en términos de consumo de energía, costes químicos y de ingeniería

De acuerdo con (Sangitrao, 2016) la automatización de las plantas es uno de los requisitos más importantes, ya que mejora la calidad de los productos y reduce las necesidades de mano de obra. En este artículo se explica el proceso de Automatización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales utilizando PLC, SCADA y programas como Unity Pro XL y Video-Designer, para asegurar el ciclo de funcionamiento del equipo y el trabajo intermitente de la bomba de succión. El sistema de control automático diseñado logra la agitación automática del agua, el control del tiempo anaeróbico, anóxico y aeróbico. Además, proporciona una garantía fiable para el funcionamiento normal y la calidad del efluente. La práctica de puesta en marcha y funcionamiento demostró que el sistema mejoró en gran medida el grado de automatización y logró un buen impacto. El sistema de control distribuido híbrido cubre la automatización directa del proceso industrial y de las máquinas, abarcando la integración de sensores, controladores e interfaz

hombre-máquina en un sistema de control que ha manejado las demandas momento a momento de la operación del proceso.

La automatización y el control en tiempo real se utilizan desde hace tiempo en los sistemas de aguas residuales urbanas. Sin embargo, existe una necesidad crítica de revisar cómo el control en tiempo real contribuye a la gestión sostenible del agua, ya que actualmente, no existe un camino claro que vincule los beneficios de la automatización con la estabilidad del sistema de aguas residuales. Los resultados obtenidos a partir de la revisión bibliográfica sistemática muestran que las investigaciones anteriores sobre automatización y control relacionadas con la sostenibilidad en el sector del agua se centran en abordar cuestiones económicas (reducción de los costes operativos) y en mejorar la calidad del medio ambiente del agua, mientras que la sostenibilidad no se aborda en un grado significativo. La bibliografía presentada mostró que los enfoques de automatización y control en tiempo real desempeñan un papel clave en la gestión sostenible del agua y las aguas residuales, el objetivo de control estaba impulsado por las normas reglamentarias. Se espera que la demanda futura de control integrado en tiempo real de los sistemas de agua aumente debido a una normativa más estricta y a la necesidad de una mayor eficiencia para mitigar el cambio climático. (Ashagre et al., 2020)

Los autores (Zhang et al., 2021) manifiestan que el proceso anóxico-óxico se utiliza ampliamente con el biorreactor de membrana (MBR) para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en China, gracias a su gran eficacia, la buena calidad del permeado y su fácil funcionamiento. Sin embargo, dado que el contenido de las aguas residuales de alimentación fluctúa en un amplio rango y las condiciones de funcionamiento del sistema debe controlarse con precisión, es muy importante encontrar una forma eficaz de supervisar constantemente los nodos del sistema y ajustar los parámetros de funcionamiento, incluidas las cantidades utilizadas en el tratamiento químico. Por lo tanto, plantean utilizar tecnología de Internet de las cosas (IOT) para realizar la monitorización dinámica de los parámetros del proceso de tratamiento de aguas residuales. Este estudio presenta un caso de aplicación de control de sensores IOT y el apoyo al negocio de mantenimiento.

Mediante el cual, se puede realizar un sistema de análisis y toma de decisiones basado en datos de monitorización en tiempo real para ajustar los parámetros de funcionamiento a tiempo. Los resultados muestran que, con el apoyo de la IOT, el sistema de tratamiento de aguas residuales funciona de forma estable y la eficiencia del tratamiento se mejora significativamente.

Los eventos críticos de aguas residuales, como los bloqueos o desbordamientos de las alcantarillas, a menudo no se detectan hasta después del hecho. Estos eventos pueden ser costosos, tanto desde el punto de vista del impacto ambiental como monetario. Por esta razón los autores (Drenoyanis et al., 2019) presentan un dispositivo de radar portátil e independiente que permite la evaluación comparativa no invasiva de las bombas de la estación de bombeo de alcantarillado (SPS). Basado en datos históricos de lluvia, flujo y nivel de alcantarillado, un modelo de red neuronal podrá predecir eventos de desbordamiento antes de que ocurran, el monitoreo de esta red proporcionará ahorros significativos tanto en inspecciones visuales, trabajo reactivo de emergencia y los costos asociados de eventos de desbordamiento. Esto permitirá que la planificación anticipada de los aumentos a la infraestructura de red existente se base en decisiones informadas y, por lo tanto, reduzca los gastos de capital y operativos.

En el artículo de los autores (Revollar et al., 2020) se presenta un enfoque de control para mejorar la eficiencia general de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que consiste en un sistema de control en cascada que utiliza un indicador de desempeño global como variable controlada para llevar la planta a condiciones operativas que satisfagan las compensaciones involucradas en la operación de la PTAR, mejorando el desempeño global de la planta. El indicador de desempeño global seleccionado es el índice N/E que mide la relación entre la cantidad de compuestos nitrogenados eliminados (kgN) y la energía (kWh) requerida para lograr ese objetivo. Se utilizan controladores integrales proporcionales simples (PI) para adaptar la estrategia a los sistemas de automatización disponibles en las EDAR, la implementación en el Benchmark Simulation Model 2 (BSM2) demuestra el potencial del enfoque propuesto. Los resultados

muestran las posibilidades del índice N / E para ser utilizado como indicador del desempeño global de las EDAR.

Las PTAR utilizan cantidades excesivas de productos químicos (coagulantes) para asegurar la precipitación y separación de contaminantes del agua como partículas y fosfatos. Los sistemas de control de dosificación avanzados previenen la sobredosis y proporcionan las eficiencias de eliminación de impurezas necesarias. Sin embargo, estos sistemas de control suelen requerir grandes inversiones y deben depender de muchos sensores de calidad del agua costosos. Por ello (Sivchenko et al., 2018) proponen un nuevo prototipo de sensor de bajo costo basado en el análisis de imágenes de textura de las partículas coaguladas (flóculos). Los resultados obtenidos de las pruebas con un prototipo dan una base para el desarrollo del sensor de flóculos real. El sensor de flóculos sería adecuado para mejorar la estrategia de control de la dosis de coagulación y potencialmente sustituirá a algunos de los sensores de calidad del agua más costosos. El innovador sistema de adquisición de imágenes probado, demostró producir imágenes de flóculos con la calidad suficiente para ser utilizadas en la resolución de problemas, la detección de fallas en el proceso de coagulación y una predicción más eficiente de la dosis de coagulante.

En algunas plantas de tratamiento, el control de las operaciones se realiza manualmente, las muestras físicas deben ser recogidas y analizadas en el laboratorio. Sin embargo, esto es propenso a errores humanos y, por lo tanto, afecta a la eficiencia del sistema. La introducción de la automatización en el sistema reducirá significativamente los errores causados por la intervención humana y al mismo tiempo, reducirá los costes de funcionamiento a largo plazo al optimizar la materia prima utilizada, la cantidad de energía empleada y el número de recursos humanos. En el sistema automatizado propuesto por (Bagyaveereswaran et al., 2016) , se leen parámetros como pH, conductividad, sólidos disueltos totales y temperatura mediante sensores en línea. El microcontrolador enviará señales de corrección al PLC cada vez que estas lecturas van más allá de un rango no óptimo. El PLC se encarga de cerrar y abrir de válvulas, motores, etc. Todo el

sistema está previsto para ser operado de manera desatendida, que puede ser controlado y supervisado en HMI desde la oficina del centro de control.

2.2 Tratamiento de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de agua residuales PTAR, también conocidas como plantas depuradoras, tienen como finalidad recibir, tratar y procesar las aguas residuales provenientes de actividades industriales, municipales o domésticas, para posteriormente ser reutilizadas o regresadas al medioambiente en condiciones adecuadas y libres de contaminantes, cumpliendo con el («Acuerdo N° 97/A - Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua», 2015). En la figura 1 se aprecia una vista general de una planta de tratamiento de aguas residuales en los Países Bajos.



Figura 1 Planta de tratamiento de aguas residuales Garmerwolde en los Países Bajos

Fuente: (Van Loosdrecht & Brdjanovic, 2014)

Según (Carreño et al., 2019) los procesos de tratamiento de las aguas residuales varían según el tipo de contaminación, el origen de las aguas y sus propiedades, así como también de su destino final. Y es por ello que se establecen diferentes etapas. Sin embargo, las más conocidas e implementadas en las industrias son: etapa preliminar, primera etapa, segunda etapa y tercera etapa. En la figura 2 presentada a continuación, se visualiza una esquematización de las cuatro etapas del Proceso de Tratamientos de Aguas Residuales industriales y domésticas.

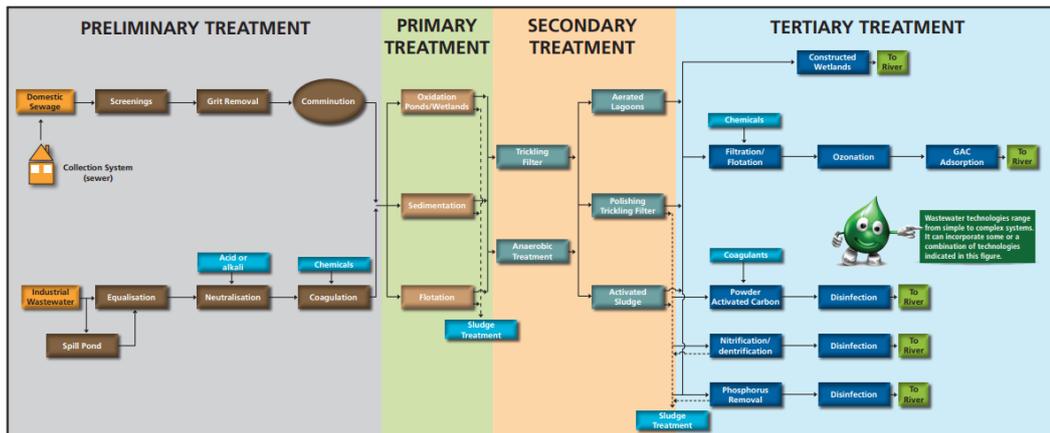


Figura 2 Esquematación de las etapas del Tratamiento de Aguas Residuales
Fuente: (South African Local Government Association & Water Research Commission, 2016)

2.2.1 Pretratamiento

Involucra un sinnúmero de pasos previos a la primera etapa del tratamiento, en esta etapa se busca eliminar arenas, grasas, sólidos gruesos de gran tamaño y aquellos organismos vivos en el agua bruta. El pretratamiento tiene como finalidad acondicionar el agua residual para evitar daños de funcionamiento, taponamientos o erosiones en los equipos y tuberías utilizadas en las etapas posteriores de la PTAR. Algunos de los equipos utilizados en este pretratamiento son: cribas, desarenadores, plantas compactas, rejas y tamices, desengrasadores y concentradores de grasas. (Ramalho, 2003)

2.2.2 Tratamiento primario

Esta fase permite la remoción de aquellos sólidos suspendidos presentes en el agua residual, ayuda a reducir las grasas y aceites que no pudieron ser eliminados en la etapa del pretratamiento. La estabilización de PH, coagulación-floculación, y remoción de sólidos disueltos son algunos de los procesos físico-químicos inmersos en el tratamiento primario.

2.2.2.1 Estabilización de PH

Este subproceso consiste en lograr establecer un PH óptimo o neutro del agua residual mediante la adición de compuestos químicos como ácido muriático o soda caustica, según sea la alcalinidad o acidez del agua en tratamiento. Este proceso será de gran ayuda ya que posteriormente los

aditivos químicos usados para el proceso de coagulación y floculación tendrán una mejor reacción si el PH del agua es aproximado a una escala 6.5 - 7.5.

2.2.2.2 Coagulación y floculación

Radica en la adición de reactivos químicos al agua residual que permitan desestabilizar la suspensión de las partículas coloidales, que son de diminuto tamaño y que por lo tanto no pueden sedimentarse con facilidad. Estos reactivos orgánicos, sales de hierro y aluminio como el cloruro férrico y el sulfato de aluminio son los coagulantes más utilizados en las PTAR, y son dosificados según las recomendaciones de los proveedores de químicos. También existen coagulantes naturales como los polisacáridos naturales y almidones, la celulosa y el quitosano.

La coagulación consiste en la agrupación de partículas finas para formar flóculos, los cuales son más fáciles de retirar debido a su gran tamaño contribuyendo en el proceso de clarificación ya que también permiten la adhesión de partículas pequeñas en ellos. La floculación radica en la acumulación de las partículas pequeñas adheridas al flóculo, este proceso se realiza por medio de agitadores. En la figura 3 se muestra el proceso de coagulación y floculación de una suspensión coloidal al agregar un sistema de coagulante- floculante natural luego de su mezcla.

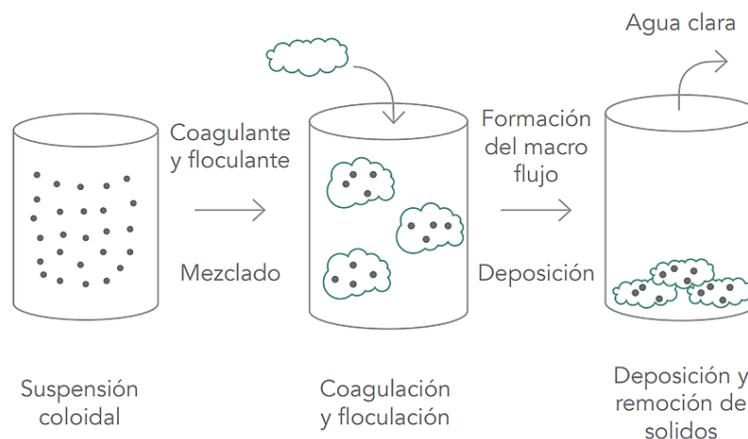


Figura 3 Coagulación y floculación de una suspensión coloidal
Fuente: (Arcila & Peralta, 2016)

Una de las ventajas de la floculación es que se reduce el tiempo de estancación del agua residual en el tanque clarificador. La poliacrilamida es un tipo de polímero sintético que puede ser catiónico, aniónico y no iónico,

dependiendo de la carga, positiva, negativa o neutral que posea, es considerado como un reactivo de tipo inorgánico que ayuda a que la floculación se realice con mayor eficacia, tiene gran facilidad de obtención en el mercado y un bajo costo. La poliacrilamida aniónica acelera la sedimentación, aumentando así la eficacia de la floculación y reduciendo la dosis requerida del coagulante para el tratamiento (Carreño et al., 2019).

2.2.2.3 Flotación por aire disuelto

Se produce una separación de las partículas sólidas, grasas o aceites del agua con menor densidad, gracias a la generación de pequeñas burbujas de aire, que se unen y son elevadas a la superficie y posteriormente retiradas del sistema. Aquellos flóculos o partículas con mayor dificultad de flotación o separabilidad requieren de la tecnología de flotación por aire disuelto DAF que se encarga de producir una serie de burbujas muy finas utilizadas para que dichas partículas en suspensión se adhieran y puedan elevarse a la superficie reduciendo además la Demanda Química de Oxígeno DQO y la Demanda Biológica de Oxígeno DBO, parámetros importantes de medición del grado de contaminación de las aguas residuales. (Ronzano Llodra, 2007)

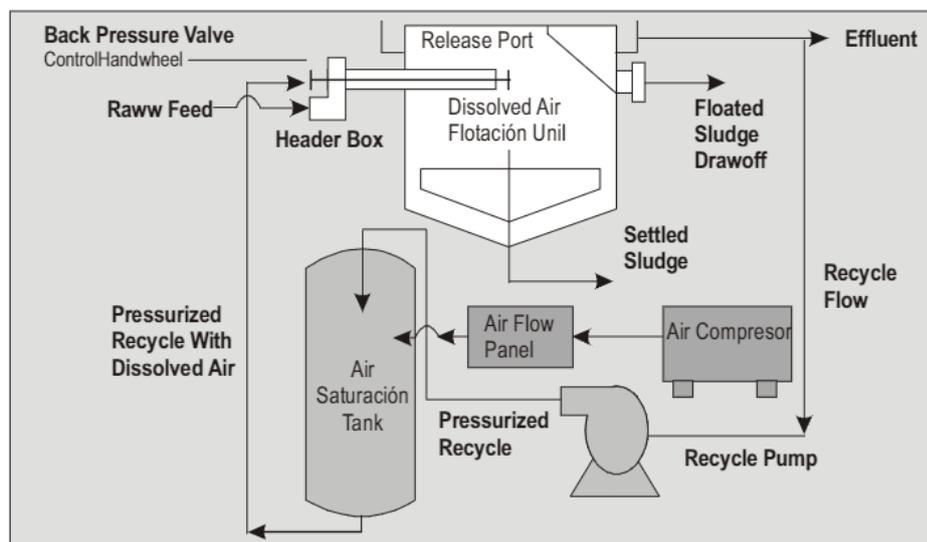


Figura 4 Diagrama de flujo de funcionamiento de un DAF

Fuente: (Salas Colotta, 2004)

En la figura 4 se muestran los elementos del sistema DAF: bomba de presurización, instalaciones de inyección de aire, tanque de presurización o recipiente de contacto, dispositivo regulador de contrapresión y cámara de flotación. El proceso implica presurizar el afluente o el agua residual reciclada

a 3-5 atm (40-70 psig) y luego liberar la presión, lo que crea burbujas diminutas que hacen flotar las partículas aceitosas y suspendidas hacia la superficie. Los sólidos flotantes se eliminan mediante un colector mecánico de superficie.

2.2.3 Tratamiento Secundario

Este tratamiento consta de varios procesos aerobios y anaerobios, el tratamiento aeróbico es más adecuado para aguas residuales de baja concentración, mientras que el tratamiento anaeróbico es más adecuado para aguas residuales de alta resistencia. Para maximizar el impacto, existen muchas variaciones en forma de operaciones combinadas que involucran tratamientos aeróbicos y anaeróbicos. Una variación incluye la secuenciación de los dos métodos, el reciclaje de lodos y la optimización de los beneficios de ambas operaciones, lo que resulta en una mejor calidad del agua tratada junto con una menor generación de lodos. Uno de estos esquemas se muestra esquemáticamente en la figura 5.

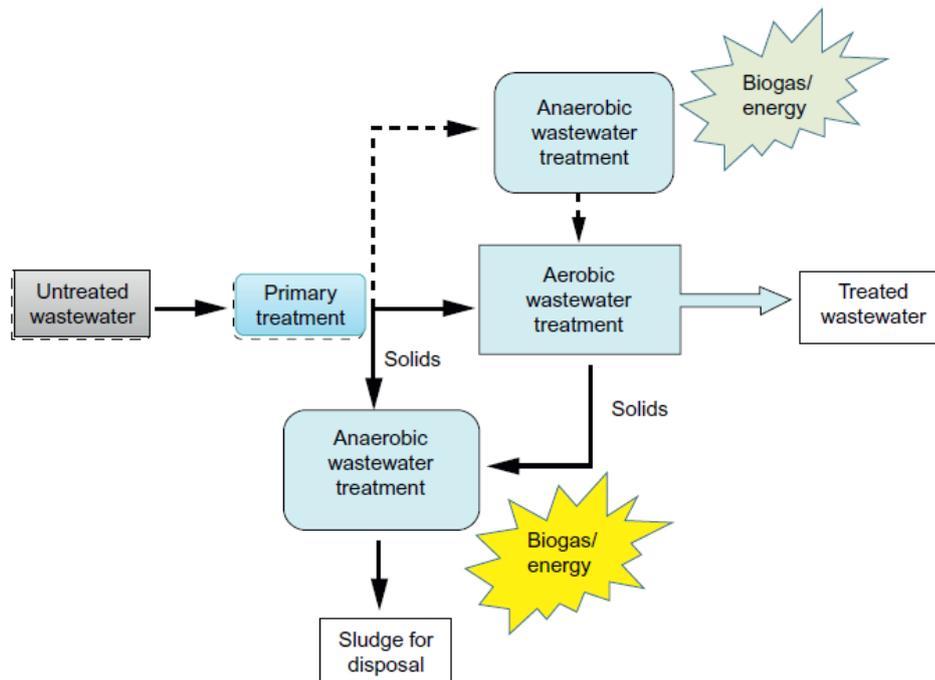


Figura 5 Proceso combinado aeróbico / anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales.

Fuente: (Ranade & Bhandari, 2014)

Cabe señalar que dicha secuenciación puede ser muy útil en los casos en que una fracción de las aguas residuales solo puede degradarse aeróbicamente y la otra solo degradarse anaeróbicamente. Una operación

secuencial también puede ayudar a eliminar sustancialmente el nitrógeno en el proceso.

Algunos diseños sugieren una combinación de anaeróbico + aeróbico o anaeróbico + aeróbico + anaeróbico para mejorar aún más la eficiencia. Un ejemplo comercial típico de tal combinación de procesos es el tratamiento de aguas residuales de destilería, que se realiza convencionalmente mediante un proceso anaeróbico para la generación de biogás seguido de un tratamiento aeróbico para cumplir con los estándares de aguas residuales, utilizando aguas residuales de alta resistencia para el tratamiento anaeróbico seguido de aguas residuales de baja resistencia para procesos aeróbicos. (Ranade & Bhandari, 2014)

El sistema de lodos activados es un método aerobio en suspensión que por medio de la recirculación de fangos activos es considerado un tratamiento biológico mediante el cual se produce la introducción de microorganismos facultativos que son capaces de desarrollarse con presencia o no de oxígeno y ayudan a transformar y oxidar los contaminantes en compuestos como amonio, CO₂ y H₂O (Orhon et al., 2009).

2.2.4 Tratamiento Terciario

Es la última etapa del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, aquí se llevan a cabo actividades de remoción de partículas remanentes que no se pudieron eliminar en la segunda etapa del tratamiento o aquellos contaminantes emergentes presentes por causa de los procesos llevados a cabo como restos de reactivos, tensoactivos, pesticidas y plaguicidas. Las fases que intervienen van a depender de la calidad de agua que se tenga al final de la anterior etapa y de la calidad de agua que se necesite reutilizar o descargar al medioambiente, cumpliendo con las normativas de la legislación vigente (Ramalho, 2003).

La ósmosis inversa en forma de tecnología de membranas se está utilizando para la recuperación a gran escala de aguas residuales, aunque la técnica depende del pretratamiento adecuado, el control químico y el uso de membranas de ósmosis inversas resistentes al ensuciamiento. También es

una operación que consume mucha energía. Otras desventajas incluyen el riesgo de contaminación bacteriana de la membrana, el costo del pretratamiento de las aguas residuales para evitar el ensuciamiento de la membrana y la sensibilidad de la membrana a los productos químicos.



Figura 6 Difusores de membrana circular en un reactor extraído para mantenimiento.

Fuente: (Wun Ng, 2006)

Los procesos de membrana convencionales son procesos impulsados por presión que requieren presiones específicas para efectuar la separación, según el tipo de membrana. Sin embargo, muchas veces, es la combinación de dos o más fuerzas impulsoras como la presión, la concentración y el potencial eléctrico lo que también puede ser interdependiente. Las separaciones de membrana convencionales son esencialmente procesos físicos que emplean un mecanismo de tamizado basado en el tamaño de los poros. Estos procesos de membrana de separación física se clasifican en microfiltración (<2 atm de presión, puede separar sólidos suspendidos), ultrafiltración (presión de hasta 10 atm, puede eliminar compuestos orgánicos de alto peso molecular), nanofiltración (presiones de hasta 20 atm, puede eliminar muchos divalentes / iones polivalentes y orgánicos de peso molecular medio) y, finalmente, ósmosis inversa (presiones tan altas como 50-70 atm, pueden eliminar prácticamente todas las especies contaminantes, produciendo agua pura). Por tanto, dependiendo del requisito de separación, se selecciona un proceso de membrana deseable.

La ósmosis puede dar agua prácticamente pura, encuentra un uso máximo en el área de desalinización y agua potable y es menos preferida en el tratamiento de aguas residuales debido a su alto costo. Para todos los propósitos prácticos, el tratamiento de aguas residuales industriales utiliza principalmente microfiltración y ultrafiltración, mientras que la nanofiltración es un área emergente en este campo. La microfiltración y la ultrafiltración se están convirtiendo en las opciones de pretratamiento preferidas sobre la ósmosis inversa. (Ranade & Bhandari, 2014)

Actualmente las industrias están contribuyendo y siendo responsables con el medio ambiente, construyendo las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, sin embargo, el brindarles un mantenimiento oportuno es de vital importancia para una correcta operación. El llevar un control de calidad y supervisión en los procesos que conforman el tratamiento como la captación, sedimentación, filtrado, flotación y aquellos procesos fisicoquímicos y biológicos, entre otros permiten a mediano y largo plazo la obtención de resultados beneficiosos, tanto para la empresa y para el medioambiente, así como también la disminución de errores. Es importante también que el personal cuente con conocimiento sobre la operación de la Planta de Tratamiento y de los equipos que intervienen en ella, con la finalidad de poder dar una solución rápida y viable a problemas operaciones que se presenten. (Hussain & Bhattacharya, 2019)

2.3 Sistemas de automatización

La automatización industrial es una disciplina amplia y diversa que abarca procesos, maquinaria, electrónica, software y sistemas de información que trabajan en conjunto hacia el cumplimiento común de objetivos: aumento de la producción, mejora de la calidad, menores costos y flexibilidad, (Lamb, 2013). Es el uso de comandos de programación lógica y equipos mecanizados para reemplazar la toma de decisiones y las actividades de comando-respuesta manual de los seres humanos.

El mundo de la automatización ha progresado a un ritmo acelerado durante las últimas cuatro décadas y las empresas de todo el mundo han invertido miles de millones de dólares en mejoras de calidad y productividad

al automatizar sus procesos de manera eficaz, mediante avances técnicos, computadoras más rápidas, software más confiable, mejores redes, dispositivos más inteligentes, materiales más avanzados y nuevas empresas. Todas las soluciones contribuyen a que los sistemas sean más potentes y ágiles que nunca.

Los primeros sistemas “automatizados” consistían en que un operador encendiera un interruptor, que suministraría energía a una salida, típicamente un motor. En algún momento, el operador apagaría el interruptor, invirtiendo el efecto y quitando la energía. Los fabricantes pronto avanzaron a los paneles de relés, que funcionaban como interruptores, pero permitían un control más complejo y preciso de las operaciones con múltiples salidas. Sin embargo, los bancos de paneles de relés generaban una cantidad significativa de calor, eran difíciles de cablear y actualizar, eran propensos a fallar y ocupaban mucho espacio. Estas deficiencias llevaron a la invención del controlador programable, un dispositivo electrónico que esencialmente reemplazó los bancos de relés, que ahora se usa en varias formas y en millones de operaciones automatizadas. En paralelo, los controladores analógicos y de lazo único fueron reemplazados por los sistemas de control distribuido (DCS) utilizados en la mayoría de las aplicaciones de control de procesos contemporáneas.

Estos nuevos dispositivos de estado sólido ofrecían mayor confiabilidad, requerían menos mantenimiento y tenían una vida más larga que sus piezas mecánicas. Los lenguajes de programación que controlan el comportamiento de los controles programables y DCS podrían modificarse sin la necesidad de desconectar o desviar un solo cable. Esto resultó en ahorros de costos considerables debido a la reducción del tiempo de puesta en servicio y los gastos de cableado, así como una mayor flexibilidad en la instalación y resolución de problemas.

2.3.1 Lógicas de control

El control discreto es uno de los principales subsistemas de la automatización industrial iniciando su trayectoria con los sensores y relés conectados para realizar la lógica. Sin embargo, la flexibilidad requerida

presentó conceptos como el PLC que impulsado por los microprocesadores y microcontroladores evolucionó a los sistemas de parada de emergencia (ESD) mediante la adopción de redes y tecnologías de procesamiento distribuido tal como se muestra en la Figura 7.

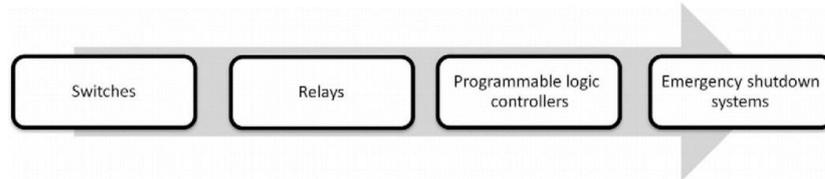


Figura 7 Lógicas de control
Fuente: (Mehta & Reddy, 2015)

2.3.1.1 Interruptores

En el pasado, el control de la máquina se podía lograr mediante el cableado de interruptores y relés juntos físicamente para realizar funciones lógicas. Se crearon diagramas de escalera cableados para que el circuito funcionara; la corriente tenía que fluir a través de cada peldaño. El principal inconveniente de este sistema era que un cambio en la función lógica requería un recableado físico del circuito. Esto implicó que el personal de mantenimiento realizara un trabajo que consumía mucho tiempo y a menudo resultaba en una pérdida de tiempo de producción, ya que la máquina tendría que ser apagada.

2.3.1.2 Relé

Los relés sirven como mecanismos de conmutación, temporización y multiplicación para dispositivos de entrada, como botones pulsadores, interruptores selectores y sensores fotoeléctricos. Los relés son bastante intuitivos; sin embargo, como dispositivos mecánicos, no ofrecen la misma flexibilidad de programación y resolución de problemas que se encuentra en los sistemas de control programables. Los relés también son conocidos por ocupar una cantidad considerable de espacio, que requieren un cableado extenso y un mantenimiento regular.

2.3.1.3 Controlador Lógico Programable

El primer controlador lógico programable PLC, introducido en 1970, se desarrolló en respuesta a la demanda de General Motors de un sistema de

estado sólido que tuviera la flexibilidad de una computadora, pero que pudiera ser programado y mantenido por ingenieros y técnicos de la planta. Estos primeros controladores programables ocupaban menos espacio que los relés, contadores, temporizadores y otros componentes de control que reemplazaban, y ofrecían mucha mayor flexibilidad en términos de su capacidad de reprogramación. El lenguaje de programación inicial, basado en los diagramas de escalera y los símbolos eléctricos comúnmente utilizados por los electricistas, fue clave para la aceptación de la industria del controlador programable. Porque los controladores programables se pueden programar en la lógica de escalera de relés, es relativamente sencillo convertir los diagramas eléctricos al programa del controlador programable. Este proceso implica definir las reglas de operación para cada punto de control, convertir las reglas electrónicas en lógica de escalera e identificar y etiquetar las salidas (direccionamiento). La fuerza laboral de hoy tiene una mezcla de ingenieros, algunos de los cuales han existido por un tiempo y están familiarizados con la lógica de escalera, así como ingenieros más nuevos que se sienten más cómodos con la programación y el control basados en computadoras. Esto ha llevado a una combinación de tecnologías de programación que se aplican según los antecedentes del usuario y las necesidades de la aplicación.

2.3.1.4 Sistemas de parada de emergencia

Los ESD (del inglés Emergency Shutdown Systems) minimizará las consecuencias de situaciones de emergencia, relacionadas con inundaciones típicamente incontroladas, escapes de hidrocarburos o brotes de incendios en áreas que transportan hidrocarburos o áreas que pueden ser peligrosas. Tradicionalmente, los análisis de riesgo han concluido que el sistema ESD necesita un alto nivel de integridad de seguridad SIL (del inglés Safety Integrity Level), típicamente SIL 2 o 3. Básicamente, el sistema consta de sensores, válvulas y relés de disparo montados en el campo, lógica del sistema para el procesamiento de señales entrantes, alarma y unidades HMI. El sistema es capaz de procesar señales de entrada y activar salidas de acuerdo con las tablas de causa y efecto definidas para la instalación. El cierre de sistemas y equipos de piezas es para aislar los inventarios de hidrocarburos, aislar los equipos eléctricos, evitar la escalada de eventos, detener el flujo de

hidrocarburos, despresurizar / purgar, controlar la ventilación de emergencia y cerrar puertas herméticas y cortafuegos (Mehta & Reddy, 2015)

2.3.2 Arquitectura de la Red de Automatización Industrial

En las redes de automatización industrial modernas, generalmente se utiliza un modelo de jerarquía de comunicación de cinco capas. Describe el equipo requerido, la arquitectura de la red, los modos de comunicación entre los equipos y la naturaleza del flujo de información y su control. La jerarquía de cinco capas se analiza a continuación.

2.3.2.1 Nivel de campo

El nivel de campo comprende sensores, actuadores, interruptores, etc. que se instalan en los tanques, recipientes y tuberías que componen una planta de proceso. Los sensores proporcionan información sobre las variables del proceso (temperatura, presión, flujo, nivel, etc.) y pasan las señales al nivel de E/S (entrada/salida). Estas señales luego se transmiten a los actuadores que controlan la apertura/cierre de válvulas o el arranque/parada de bombas.

2.3.2.2 Nivel de E/S:

El propósito principal del nivel de E/S es reunir las señales de entrada y salida. Las señales de los sensores se dirigen a los controladores y las de los controladores se dirigen a los actuadores.

2.3.2.3 Nivel de control

En el nivel de control, se procesan las señales de los sensores (ubicados en el campo) y, en función de las salidas de proceso deseadas, se generan comandos para los actuadores. Por lo general, el controlador lógico programable (PLC), el sistema de control distribuido DCS (del inglés Distributed Control System) y el control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) están presentes en esta capa.

2.3.2.4 Nivel de HMI

El nivel de interfaz humano-máquina (HMI) se ocupa principalmente de la visualización organizada y sistemática de las operaciones de la planta que

se pasan del nivel de control. La adquisición de datos, la gestión de recetas, la gestión de activos, las herramientas de programación de mantenimiento, etc. se utilizan en esta capa para una mejor gestión de procesos. Los operadores tienen información completa de la planta a través de representación esquemática y pueden tomar medidas correctivas para cualquier variable de proceso para prevenir o rectificar su situación de alarma. Otras opciones disponibles en este nivel son el registro de alarmas, la generación de informes históricos, la pista de auditoría, etc.

2.3.2.5 Nivel empresarial

A nivel empresarial, toda la información fluye hacia el Sistema de Información de Gestión (del inglés... MIS). Aquí, la toma de decisiones gerenciales como pedidos, programación de producción, facturación, envío, planificación futura, etc. se realiza a través de diferentes herramientas de software. La estructura de cinco capas de una red de automatización industrial se muestra a continuación, en la Figura 8.

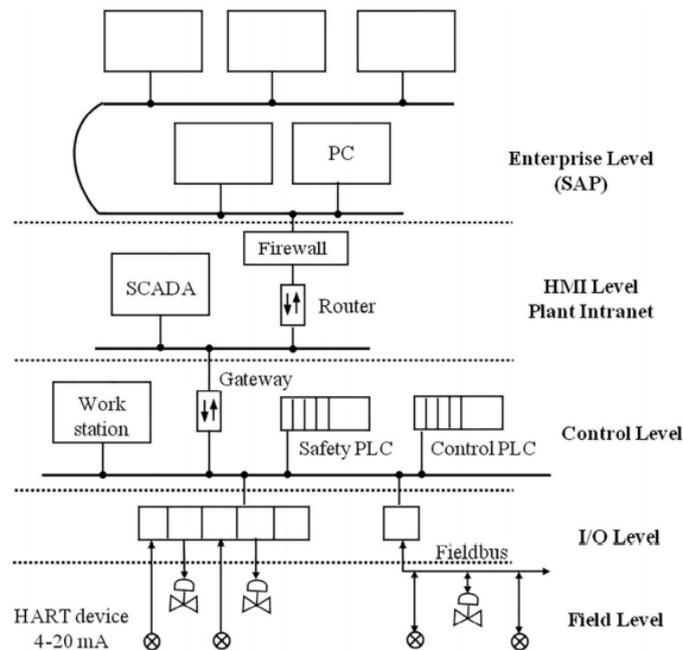


Figura 8 Estructura de cinco capas de la red de automatización industrial.

Fuente: (Dey & Sen, 2020)

La red de nivel empresarial puede incluso extenderse más allá de la red de automatización de la planta respectiva. Para evaluar el escenario del mercado, también se requiere la disponibilidad de información de otras casas de producción. En tales casos, la red de automatización de la planta está

conectada a la World Wide Web (WWW o Internet). Esta instalación permite al personal de la planta acceder a la información útil de la planta desde cualquier parte del mundo.

2.4 Sistemas SCADA

Los sistemas de control de supervisión y adquisición de datos SCADA (del inglés Supervisory Control And Data Acquisition) se utilizan ampliamente para monitorear y controlar de forma remota los procesos en las industrias: como la transmisión y distribución de energía eléctrica, la distribución de agua y las tuberías de líquido y gas a través del país, el monitoreo ambiental, el monitoreo de torres de telefonía celular, llenado, sistema de tuberías, sistema de riego, para realizar cambios de puntos de ajuste en controladores de proceso distantes, para abrir o cerrar válvulas o interruptores, para monitorear alarmas y para recopilar información de medición.

El SCADA casi siempre se instala en una computadora o computadoras y generalmente está conectado en red a otros controladores en la planta. Los controladores actúan como puntos de recopilación de datos específicos de la máquina o del nodo y, a menudo, actúan como respaldo de la información recopilada. Los terminales de operador también se pueden utilizar como puntos de entrada de datos para operadores, supervisores o ingenieros. Estos pueden o no estar conectados a un controlador de máquina. Uno de los principales propósitos de un sistema SCADA es archivar y compartir datos. Los datos se pueden recopilar de forma periódica o basada en eventos. Por ejemplo, los valores de presión de varios puntos pueden registrarse en una escala de tiempo periódica, como minutos u horas, o pueden registrarse valores cuando una presión cruza un umbral de alarma. Los valores a menudo se registran en plataformas o formatos de bases de datos estándar, como archivos .dbf o bases de datos SQL (del inglés Structured Query Language). Esto permite manipular los datos con paquetes de software de terceros para análisis estadístico o archivo. Las computadoras que ejecutan los paquetes de software SCADA están conectadas a los sensores a través de los puertos de comunicación del controlador o mediante tarjetas montadas en la propia computadora.

El sistema SCADA típico es una combinación de cuatro subsistemas diferentes, a pesar de que, a lo largo de las décadas las tecnologías subyacentes y el uso operativo del sistema SCADA han evolucionado con tecnología y topologías mejoradas, la arquitectura con estos cuatro elementos no ha cambiado mucho, tal como se presenta en la Figura 9:

1. La computadora central que corresponde al sistema anfitrión.
2. Un equipo de medición y control remoto ubicado en el campo llamado unidad terminal remota (RTU).
3. Un sistema de comunicación de área amplia (telefónico, Internet o intranet) para conectar todos estos equipos. Por lo general, se utiliza una red de comunicación de fibra óptica para integrar las múltiples tuberías y su equipo relacionado, ya que es el medio más confiable para la transferencia de datos.
4. Una interfaz de operador que proporciona acceso al sistema para el usuario.

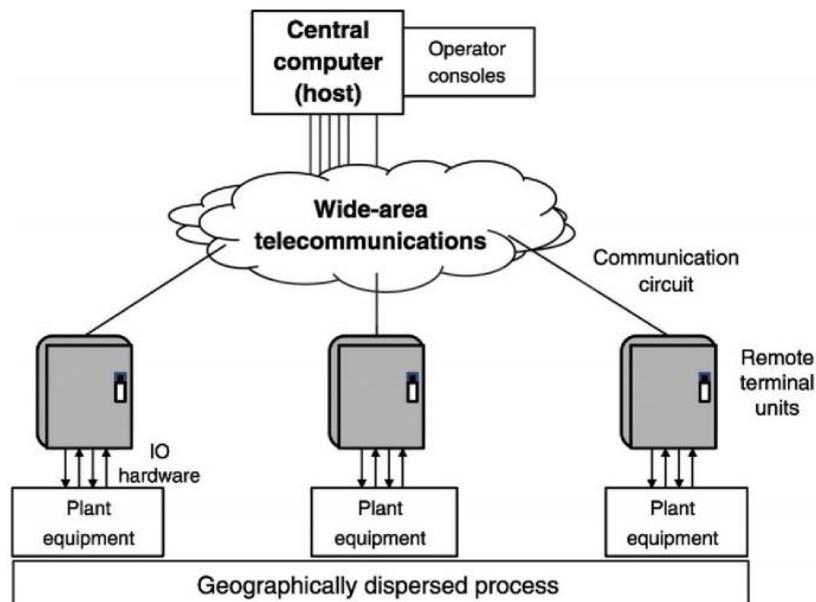


Figura 9 Diagrama simplificado de un SCADA
Fuente: (Mehta & Reddy, 2015)

2.4.1 Elementos de un SCADA

Un sistema SCADA generalmente consta de varios subsistemas. Los subsistemas pueden variar desde muy simples, fáciles de implementar hasta complejos como el suministro y monitoreo de agua en una localidad. El sistema consta de los siguientes elementos: una MTU, una RTU, dispositivos

de campo, HMI, PLC, comunicación SCADA, servidor de adquisición de datos, historiador de datos.

2.4.1.1 MTU (Unidad de terminal maestra)

La estación maestra, también llamada host central o MTU, recopila, almacena y procesa datos de varias RTU. La MTU proporciona una interfaz de operador para la visualización de información y el control posterior de sitios remotos. El tiempo requerido por la MTU para escanear todas las RTU y volver a la primera se denomina "tiempo de escaneo" o "intervalo de escaneo". En un sistema SCADA complejo, se utilizan varias estaciones submaestro que recopilan información de los sitios remotos (RTU) y retroalimentan sus datos al maestro (MTU) del sistema.

Los trabajos realizados por una MTU se pueden poner de la siguiente manera:

- Monitorea / controla todo el sistema de comunicación SCADA a través de un enlace de comunicación que puede ser LAN / WAN.
- Comprueba el enlace de comunicación con una RTU, comprueba su estado actual, envía una solicitud a la RTU de datos / información y los recopila.
- Muestra datos / gráficos visualmente usando HMI.

2.4.1.2 Unidad Terminal Remota

RTU o también conocida como Unidad Terminal Remota es una unidad de control y adquisición de datos independiente basada en microprocesador que monitorea y controla equipos en ubicaciones remotas lejos de la unidad central o MTU. Una RTU recopila datos de los dispositivos de campo y los codifica en una forma aceptable por la MTU. Una RTU típica tiene entradas / salidas analógicas y digitales. Una RTU se puede considerar como un dispositivo avanzado de entrada y salida (E / S) con funciones de comunicación integradas.

Una RTU puede comunicarse con otra RTU de igual a igual. También puede actuar como una estación de retransmisión para otra RTU, en cuyo caso simplemente almacena y envía la información / datos relevantes a la

MTU. Esta situación surge cuando una RTU no puede comunicarse directamente con la MTU. Las RTU recopilan información en tiempo real de los sensores y la envían a MTU cuando ésta los solicita. En algunos casos, RTU puede enviar una solicitud al maestro en caso de exigencias. La comunicación entre RTU y MTU se realiza a través de LAN / WAN. Los programas de configuración y control para una RTU se pueden descargar dinámicamente desde la estación maestra central. Algunas RTU también se pueden configurar localmente desde su propia unidad de programación. La comunicación entre RTU y MTU puede realizarse mediante cable, fibra óptica, línea telefónica, microondas o satélite. Los protocolos y esquemas de detección de errores se utilizan en la comunicación para la transferencia de datos sin errores y también para prevenir el phishing de algunos forasteros.

2.4.1.3 Dispositivos de datos de campo e interfaz

Los dispositivos de campo forman una de las partes más importantes de un sistema SCADA general. Los sensores de campo, actuadores, posicionadores de válvulas, medidores de caudal, sensores de temperatura, medidores de presión, medidores de consumo de energía, tableros de control de motores proporcionan la información necesaria a un operador en un sistema de distribución de agua. Los dispositivos de interfaz deben convertir los datos de campo en una forma que sea finalmente aceptable para un sistema SCADA. Las RTU proporcionan esta interfaz. Las RTU convierten los datos de campo en una forma, siguiendo el protocolo de comunicación, de manera que sea aceptable por la MTU para el análisis de datos, el almacenamiento de datos y para propósitos de HMI. Debido al ancho de banda limitado del canal de comunicación y para reducir la carga / sobrecarga en la MTU, las instrucciones para los dispositivos de interfaz se almacenan localmente. Un PLC juega ese papel. Un PLC está conectado directamente a los dispositivos de interfaz de datos de campo y tiene programas almacenados en él que se ejecutan en base a ciertas condiciones en los dispositivos de campo. Los PLC se utilizan para reemplazar la lógica de control de conmutación de relés. A veces se hace necesario alterar los programas que residen en un PLC mediante alguna lógica remota, que forma parte del "control de supervisión". A veces, los módulos de comunicación se incorporan

a un PLC y, a lo largo de los años, la línea de demarcación entre un PLC y una RTU se vuelve cada vez más borrosa.

2.4.1.4 Interfaz hombre-máquina (HMI) o Interfaz hombre-computadora

La interfaz de usuario HMI o SCADA proporciona una interfaz entre el hardware y el software en el sistema de comunicación SCADA. El rendimiento de SCADA depende considerablemente de la HMI, la cual es la ventana del operador del sistema de supervisión. Presenta al operador la diversa información sobre el estado de la planta de forma gráfica en forma de diagramas sinópticos. Estos diagramas son una representación esquemática de la planta que se está controlando. Los diagramas mímicos consisten en gráficos lineales y símbolos esquemáticos que representan elementos del proceso. HMI asume la responsabilidad de las operaciones de "supervisión" en un sistema SCADA. El operador emite comandos mediante punteros, teclados y pantallas táctiles. HMI incluye un software para dibujar que utiliza el personal del sistema, que también puede cambiar la representación visual según la necesidad del sistema. HMI proporciona diagnósticos, tendencias, información de gestión y también los estados actuales de diferentes parámetros bajo control SCADA. La representación pictórica es la forma más preferida para el estatus, los valores de las variables porque es más fácil de entender por los seres humanos. Por lo general, una HMI se diseña según las necesidades y especificaciones de la estructura SCADA. En ocasiones, se utiliza software patentado junto con una configuración de hardware que puede no ser compatible con otro hardware. Se encuentran disponibles algunos productos comerciales del uno mismo (COTS) que proporcionan una interfaz entre el hardware y el software SCADA. Proporcionan compatibilidad entre el hardware y el software SCADA.

En general, una HMI hace lo siguiente:

- Proporciona comunicación SCADA entre hardware y software
- Proporciona información sobre el estado de diferentes variables.
- Proporciona conversión entre varios tipos de datos.

2.4.1.5 Controlador Lógico Programable

Los PLC's son una parte integral de cualquier sistema basado en SCADA. Introducido a fines de la década de 1960, un PLC es un sistema basado en microprocesador que utiliza memoria programable para almacenar instrucciones e implementa funciones como lógica, secuenciación, temporización, conteo, aritmética y control PID para controlar procesos y máquinas. Un PLC tiene varios bloques, incluidos módulos de entrada y salida, un módulo de comunicación y un microprocesador. El diagrama de bloques de un sistema de control de procesos basado en PLC se muestra en la Figura 10. Las entradas y salidas conectadas al PLC se reconocen por sus direcciones. Es un número precedido por una letra para indicar si es una entrada o una salida. Los PLC grandes tienen varios racks de entradas y salidas y varios módulos en cada rack. Una entrada o salida se identifica por su número de bastidor seguido del número del módulo en ese bastidor.

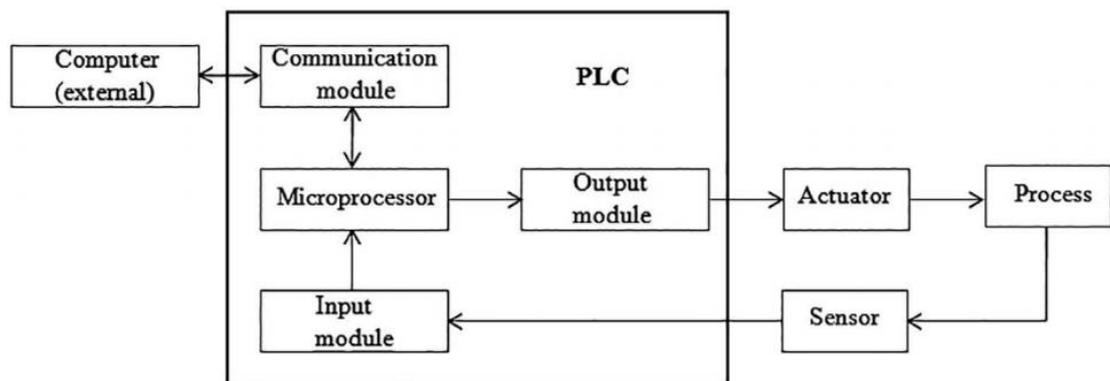


Figura 10 Sistema de control de procesos basado en PLC.
Fuente: (Dey & Sen, 2020)

2.4.1.6 Manejo de alarmas

El manejo de alarmas es uno de los aspectos más importantes de un sistema SCADA. La indicación de alarma puede ser en forma de sirena, un área intermitente en la pantalla o un cuadro emergente en la pantalla. El papel de la "alarma" es llamar la atención del operador hacia la parte del sistema "en alarma" para que se tomen las acciones apropiadas para eliminar la causa de la alarma. Se debe tener sumo cuidado cuando ocurra una cascada de eventos de alarma en rápida sucesión. En tal caso, el operador debe aplicar su conocimiento y experiencia de la planta con respecto a qué condición de

alarma debe ser atendida primero, dependiendo de la gravedad de que una condición fuera de rango pueda afectar el rendimiento del sistema. Cuando se produce una alarma, las acciones en forma de mensajes de texto y correo electrónico se envían al operador remoto o a la administración. Cuando se reconoce una alarma y se toman las medidas adecuadas, la alarma se desactiva.

2.4.2 Funciones de un sistema SCADA

Según Peñin (2013) las funcionalidades básicas de un sistema SCADA son las siguientes:

- I. Adquisición de datos de dispositivos de instrumentos de campo a través de RTU.
- II. Procesar los datos de campo para detectar alarmas y otros cambios significativos en el proceso.
- III. Proporcionar una base de datos coherente de información de proceso sobre la tubería y la instalación.
- IV. Presentar los datos a través de una interfaz gráfica de usuario fácil de entender, alarmas, tendencias e informes.
- V. Realización de control remoto de dispositivos de campo.
- VI. Realizar monitoreo y diagnóstico del sistema y tomar las acciones apropiadas.
- VII. Archivo histórico de datos para almacenamiento y análisis históricos recientes y a largo plazo.
- VIII. Transferencia de datos de ingeniería en tiempo real directamente hacia y desde el sistema de modelado.
- IX. Proporcionar datos del sistema a los sistemas de información de gestión y la gestión de la cadena de suministro.
- X. Proporcionar integración con las instalaciones del sistema de información geográfica.

Para permitir actualizaciones de datos en tiempo real desde el campo y ordenar las instrucciones del operador en el equipo de campo, los sistemas centrales necesitan dispositivos electrónicos de entrada / salida (E / S) remotos con capacidades de computación y comunicación. Las RTU se

utilizan para los fines anteriores y están ubicadas físicamente cerca del equipo de proceso donde se toman las medidas o se proporcionan las acciones de control. El sistema de supervisión central envía continuamente mensajes de solicitud a estas RTU y recopila los mensajes e infiere la información. El mensaje contiene la información de configuración, comandos para la estación del operador, valores de período actualizados de las mediciones del proceso, etc. El sistema repite secuencialmente la operación para cada RTU, hasta que se hayan procesado todas. La secuencia comienza de nuevo para la siguiente iteración y continúa sin fin. Las RTU son dispositivos electrónicos simples con un conjunto limitado de funciones. Normalmente, las RTU están diseñadas con circuitos de hardware de E / S para la medición de señales eléctricas generadas por dispositivos que producen voltaje o corriente en proporción a los parámetros físicos del proceso, como presión, caudal, nivel, temperatura, frecuencia, pulsos, voltaje y corriente. Las RTU también generan salidas de control, ya sea como señales de voltaje o corriente o en forma de interruptores o contactos individuales. Las señales de control de salida se inician al recibir un comando de la computadora central. Un sistema de comunicación permite que la RTU y la computadora central intercambien datos y controlen comandos.

2.5 Instrumentación en aguas residuales

Hoy en día debido a la urbanización e industrialización, varios contaminantes y sus derivados se vierten al medio acuático. La mayor parte de la contaminación es causada por sustancias orgánicas, nutrientes y contaminantes con baja concentración, pero es altamente tóxico para el medio ambiente acuático y humano. Especialmente, existen varios microcontaminantes y sus derivados que existen en el agua y las aguas residuales como subproductos de desinfección, productos farmacéuticos y de cuidado personal, antibióticos, pesticidas, metales pesados, etc. Este apartado proporciona un enfoque holístico en términos de medición, monitoreo y tecnologías de tratamiento avanzadas recientes para el tratamiento de aguas residuales y la reutilización del agua.

2.5.1 Cribado

La primera unidad de operación en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales la criba, dado que se requiere un tamiz para eliminar pelusas, fibras y otros sólidos extraños que podrían bloquear las bombas, el equipo MBR y dañar la maquinaria interna. Su uso mejorará el rendimiento de la planta al reducir la DBO y los sólidos en suspensión, reducen el tamaño de las partículas para el tratamiento y reducen la contaminación de los cursos de agua. Por lo general, cualquier sólido en suspensión de más de 2 a 6 mm de tamaño debe eliminarse mediante un tamiz.

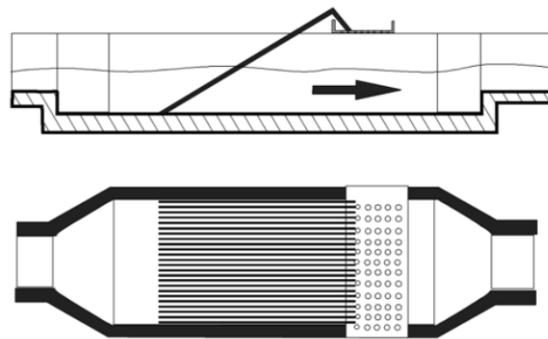


Figura 11 Cribas de barras limpiadas mecánicamente
Fuente: (Seneviratne, 2016)

Como se muestra en la Figura 11, las cribas de barras se colocan en sentido transversal u opuesto al flujo de agua, de modo que el agua pase a través de ellas y se retengan los sólidos más grandes. En general, las barras se pueden hacer con forma curva o recta (plana). Cuando están rectas, el posicionamiento de las barras con respecto a la horizontal puede ser vertical o inclinado.

2.5.2 Tamices de tambor

Los tamices rotativos o los tamices de tambor son de uso generalizado debido a su fácil mantenimiento y robustez mecánica. Las pantallas tienen un tambor de malla de alambre de cuña hueca que gira alrededor de su eje horizontal. El agua residual ingresa axialmente al tambor y sale radialmente atrapando los tamices dentro del tambor. La velocidad del flujo es típicamente de 0,5 a 0,9 m / s, no demasiado lenta para permitir que la arena se asiente dentro del tambor y no demasiado rápida para permitir que los tamices pasen

por los tamices. La Figura 12 muestra una fila de tamices de tambor en una planta de tratamiento de efluentes textiles.



Figura 12 Fila de tamices de tambor en una planta de tratamiento de efluentes textiles

Fuente: (Seneviratne, 2016)

2.5.3 Removedor de arena

Inmediatamente después del cribado se elimina la arenilla. La eliminación de arenilla es un paso previo al tratamiento importante por varias razones que se enumeran a continuación:

1. Proteger los equipos mecánicos y las bombas del desgaste abrasivo.
2. Evita la obstrucción de la tubería debido a la deposición de arena.
3. Reduce la acumulación de arenilla en decantadores y digestores.

La arena se elimina haciendo uso de la gravedad específica para asentarse en los canales de arena. Para plantas de espacio limitado, los hidrociclones son una opción alternativa.

2.5.4 Tanques de sedimentación primaria

La eficiencia de la remoción de sólidos depende de las características del clarificador. Un dispositivo de sedimentación que incluye un deflector de entrada para la disipación de energía, una zona inactiva para la sedimentación de partículas, medios mecánicos para la remoción de sólidos sedimentados y baja velocidad de flujo hacia la salida se denomina comúnmente "clarificador", pueden ser rectangulares, circulares o de placa inclinada también llamados

lamelares, cuya selección se basa en las condiciones locales del sitio, el área disponible y la experiencia del equipo de diseño. Idealmente, deben estar disponibles dos tanques más. Los tanques rectangulares y lamelares usan menos área de tierra que los tanques circulares y son útiles donde la tierra es escasa.



Figura 13 Tanque de sedimentación rectangular de una PTAR en China
Fuente: (Seneviratne, 2016)

2.5.5 Bombas dosificadoras

Estos equipos se utilizan ampliamente para la adición controlada de productos químicos a un proceso. Pueden ser de casi cualquier tipo según la precisión de medición requerida. Las bombas centrífugas se utilizan cuando los flujos son grandes, la entrada está inundada y el riesgo de fugas de aire a través de la cámara de sellado es bajo. Los rotores de paletas deslizantes se utilizan cuando la precisión no supera el 90%. Las bombas dosificadoras electromagnéticas poseen mejor precisión sus accionamientos de velocidad variable facilitan el control tal como se muestra en la figura 14.



Figura 14 Bomba dosificadora electromagnética
Fuente: (Manchester, 2021)

Existen otras bombas rotativas y recíprocas que generalmente tendrán precisiones superiores al 90%, con la excepción de las unidades de tornillo y lóbulo de gran holgura.

2.5.6 Flotación por aire disuelto

Para la eliminación de aceite y grasa, la Flotación por Aire Disuelto (DAF) es muy adecuada especialmente donde la gravedad específica de los sólidos en suspensión es cercana a 1.0. El proceso DAF utiliza aire presurizado para liberar microburbujas de aire (de 10 a 50 micrómetros de diámetro) que se adhieren a las partículas, lo que facilita que las partículas de aceite libres suban a la superficie y luego se eliminen. El DAF es muy eficaz en la eliminación de aceite y grasa, ya que el aceite no se sedimenta de forma natural y tiene una gravedad específica menor que la del agua. Cuando el aceite está presente en forma emulsionada, se requieren productos químicos para desestabilizar la capa de emulsión de aceite.

La aplicación DAF más común para el tratamiento de aguas residuales es un sistema de flujo recirculado, ya que requiere menos equipo para la presurización, (menor consumo de energía), evita problemas de abrasión de la bomba y previene la formación de coloides y emulsiones dentro del sistema de bombeo.

Las unidades DAF pueden reducir las concentraciones de aceite a 10 - 25 mg/L siempre que la concentración del afluente no sea mayor de 500 mg/L. Los sistemas DAF operan a velocidades de carga hidráulica más altas que los sistemas de sedimentación por gravedad a 5 - 15 m/h y, en consecuencia, los tiempos de detención son más cortos en 15 a 30 minutos. Esto permite que el sistema DAF sea más compacto y ocupa menos espacio. Los sistemas DAF están disponibles en configuraciones circulares o rectangulares.

2.5.7 Sensores

Los sensores juegan un papel importante dentro de la industria de Tratamiento de Aguas debido a que Llevan a cabo tareas importantes como la detección y determinación de los contaminantes presentes en el agua. Existen de tipo electroquímicos, optoquímicos, piezoeléctricos, de ondas

acústicas, amperométricos, etc. La efectividad de estos sensores se mide en términos de precisión, selectividad, costo general y practicidad. En la figura 15 se muestra un sensor de pH que posee un electrodo de vidrio y en su interior gel patentado que presentan una referencia integral y no necesitan utilizar reactivos para comprar su medición.



Figura 15 Sensor de PH para aguas residuales.
Fuente: (Process Instruments, 2021)

2.5.8 Proceso de lodos activados (ASP)

El proceso ASP implica mezclar aguas residuales primarias sedimentadas o afluente igualado con un cultivo de microorganismos en un fluido llamado "licor mixto". Este licor mezclado pasa a través de un tanque de aireación que proporciona un ambiente rico en oxígeno adecuado para que los microbios coman y estabilicen la materia orgánica en el agua. La mezcla aporta oxígeno y alimentos a los microorganismos, lo que permite que los microorganismos se agrupen y eviten la formación de flóculos.



Figura 16 Tanque de aireación en una planta de tratamiento de efluentes textiles en China

Fuente: (Seneviratne, 2016)

El proceso de lodo activado (ASP) es un proceso biológico de desarrollar una masa activada de microorganismos capaces de estabilizar los residuos aeróbicamente. Los residuos orgánicos se introducen en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano (biomasa) en suspensión. El contenido del reactor se conoce como el "licor mixto" o los lodos activados, como se muestra en la figura 16.

2.5.9 Zanja de oxidación

Las aguas residuales, los microorganismos y los lodos activados se mezclan en una zanja de circuito continuo para completar las reacciones de nitrificación y desnitrificación. El equipo de oxidación consta de cuerpo de zanja, mezcladores de aireación y entrada y salida. Debido a su largo tiempo de retención hidráulica (HRT) de 20 a 36 horas, baja carga orgánica y larga edad del lodo en comparación con el ASP convencional.

La zanja de oxidación tal como se muestra en la figura 17 tiene muchas ventajas ya que proporciona un bajo consumo energético y mantenimiento, es muy fácil de operar, además proporciona resistencia a cargas de choque y sobretensiones hidráulicas debido al largo tiempo de retención hidráulica.



Figura 17 Foto de una zanja de oxidación, China.

Fuente: (Seneviratne, 2016)

2.5.10 Tratamiento biológico de separación de membranas (MBR)

El uso de membranas permeables para separar los sólidos suspendidos del licor mixto se realiza en muchas configuraciones de proceso diferentes.

Algunos de los beneficios potenciales del proceso de biorreactores de membrana es que el reactor biológico suele ser más pequeño, ya que el proceso puede ser operado a concentraciones más altas de lodos en suspensión. El tratamiento de las aguas residuales se realiza con mejor calidad, las estructuras de la planta existentes se pueden modernizar sin aumentar la capacidad del tanque del reactor y existe una reducción de la producción de lodos. En la figura 18 se presenta un ejemplo de construcción de membrana permeable.

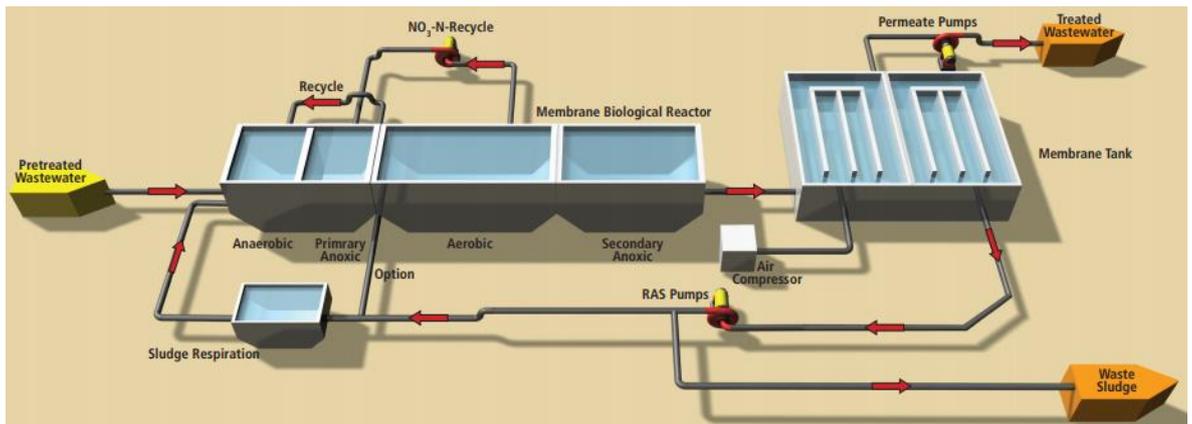


Figura 18 Membranas permeables

Fuente: (South African Local Government Association & Water Research Commission, 2016)

2.5.11 Desinfección química

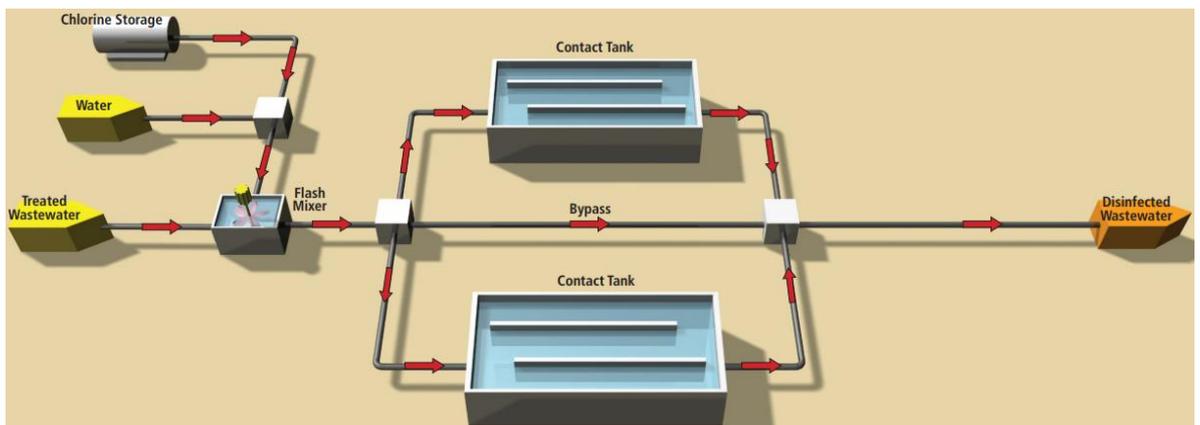


Figura 19 Desinfección química realizada por el método de cloración

Fuente: (South African Local Government Association & Water Research Commission, 2016)

Existen tres métodos para realizar el proceso de desinfección química de las aguas residuales tratadas, el primer método es la cloración mostrado en la figura 19, donde el cloro se puede agregar como gas, líquido o sólido en forma de hipoclorito de sodio o calcio. Es importante aclarar que la sobredosis

es un riesgo ecológico y, por lo tanto, se recomienda la descarga en cunetas / zanjas o humedales antes de la descarga directa en recursos hídricos sensibles. Por otro lado, la dosis insuficiente representa un riesgo para la salud en términos de exposición de los seres humanos a patógenos residuales. Por lo tanto, es importante seguir las precauciones necesarias prescritas cuando se trabaja con cloro y asegurarse de que todo el personal y los operadores estén capacitados en consecuencia. El segundo método es la ozonización, puesto que el ozono se disocia rápidamente y, por lo tanto, se produce in situ. El ozono remanente en el gas de escape se destruye antes de su liberación a la atmósfera, por lo que es mejor asegurar una dosis de ozono óptima para una eficiencia general. La desinfección depende de la dosis, la mezcla y el tiempo de contacto. Es fundamental que un sistema de desinfección con ozono se pruebe y calibre antes de su instalación en el sitio. Y por último el tercer método es la desinfección por radiación ultravioleta (UV), su efectividad de desinfección depende de las características de la transmisividad del efluente tratado, la intensidad de la radiación UV y la cantidad de tiempo que el microorganismo está sujeto a la radiación.

2.6 Lenguaje de Modelado Unificado (UML)

El Lenguaje de Modelado Unificado UML, es un lenguaje de modelado de propósito general para sistemas discretos que permite visualizar, comprender, especificar, construir, configurar, controlar y mantener documentada la información de los artefactos que conforman un sistema software, firmware o de lógica digital. Fue desarrollado con la finalidad de simplificar y combinar los conceptos que comúnmente eran aceptados y necesarios para respaldar los métodos orientados a objetos, ofreciéndoles una definición concreta, un vocabulario y una notación semántica. No se debe definir al lenguaje UML como la descripción de algún proceso y tampoco como un lenguaje de programación ya que está formado por componentes dinámicas que definen la historia de los objetos inmersos en el sistema a lo largo del tiempo, componentes estáticas que corresponden a los tipos de objetos indispensables para la implementación del sistema, componentes organizativas que agrupan los modelos en paquetes, para posteriormente poder dividir los sistemas complejos, de tiempo real o distribuidos en piezas y

así trabajar, controlar y comprender las dependencias de cada paquete, y finalmente los componentes de entorno que permiten representar las decisiones de implementación y organizar los tiempos de ejecución. A pesar de ser un lenguaje de modelado complejo y extenso puede ser utilizado en diferentes niveles y en diversas etapas con aplicación universal, su uso en problemas del mundo real está relacionado a los lenguajes de programación, sistemas operativos o aquellos asistidos por computadoras, entre otros.

2.6.1 Diagrama de uso de caso

Los casos de usos especifican la forma de interacción entre el usuario y el sistema, detallando cada una de las acciones que deben seguirse para lograr un propósito, cualquier alteración de estas acciones produce una variabilidad de escenarios. Un diagrama uso de caso UML brinda una perspectiva de todos los casos de uso posibles y su correlación.

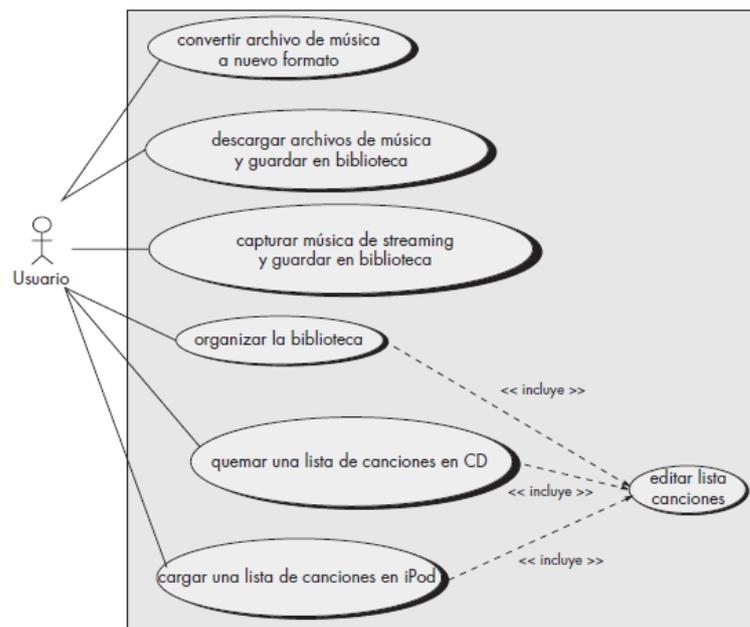


Figura 20 Diagrama de caso de uso para el sistema de música con casos de uso incluidos.

Fuente: (Pressman, 2010)

En la figura 20 se puede observar un diagrama de uso de caso para el sistema de música digital, los casos de uso se representan con óvalos, los actores o usuarios son aquellos que usan el sistema y se simbolizan con palitos, estos se conectan con los casos de usos mediante líneas. Los detalles se incluyen por separado y no en el mismo diagrama. Mediante un rectángulo se da a conocer cuál es el límite del sistema, en él se incluyen los casos de

usos, pero los actores no, dado que son personas o dispositivos externos que tienen como finalidad comunicarse con el sistema.

Cuando un caso de uso tiene relación con otro, es recomendable crear un nuevo diagrama de caso de uso para representar alguna actividad duplicada, mediante las flechas punteadas etiquetadas se puede anexar un caso de uso incluido a un caso de uso, esto evita que los diagramas se dupliquen al momento de agregar un nuevo paso. Los diagramas de casos de usos sirven para confirmar que se abarca toda la operatividad del sistema y ayudan a puntualizar las características del software desde el punto de vista del usuario.

2.6.2 Diagrama de secuencia

Los diagramas de secuencia se emplean para dar a conocer la comunicación existente entre objetos, mientras se ejecuta una acción. Indica el tiempo y orden en el que los objetos se envían mensajes entre sí, con la finalidad de ejecutar dicha tarea.

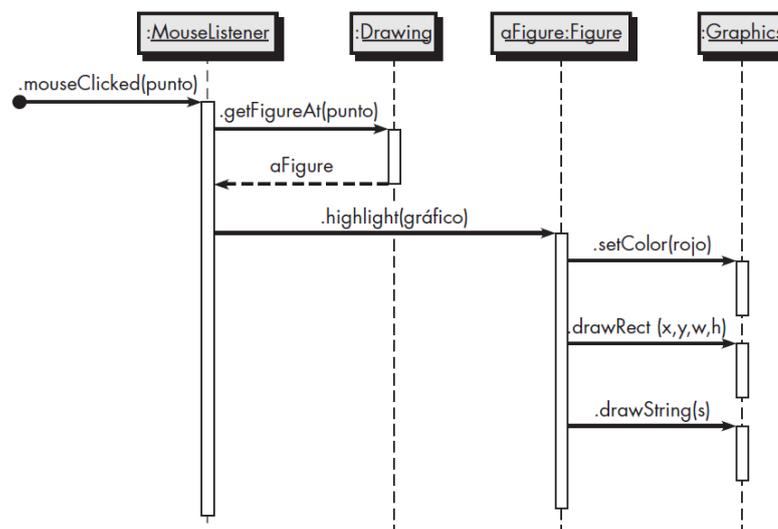


Figura 21 Ejemplo de Diagrama de secuencia para programa de dibujo.
Fuente: (Pressman, 2010)

En la figura 21 se muestran los pasos de un diagrama de secuencia para resaltar una figura al dar clic en un dibujo. En este diagrama los objetos se representan por cajas, que se ubican en filas en la parte superior. Dentro de la caja se pueden definir dos parámetros: el primero, antes de los dos puntos que corresponde al nombre al objeto y el segundo, después de los dos puntos que corresponde al tipo del objeto, tal como se puede ver en el tercer

rectángulo o caja. La línea de vida del objeto se simboliza por una línea punteada, según el avance del tiempo, este se extiende en forma descendente. Las flechas horizontales se usan desde el llamador hasta el llamado e indican las llamadas de método, que adicionalmente puede incluir tipos, parámetros y algún retorno, este último representado por una flecha punteada y una etiqueta de forma alternativa. Las barras de activación o barras blancas se trazan siempre que se realiza las llamadas de métodos y opcionalmente se utilizan para la representar la ejecución de un método por parte del objeto, esto se puede visualizar bajo la línea de vida del objeto. Para indicar que la fuente de un mensaje encontrado es irrelevante se usa un círculo negro seguido de una flecha.

Cuando la dirección del mensaje tenga dos posibilidades diferentes de rutas, se aconseja dibujar un nuevo diagrama de secuencia para la segunda posibilidad. Los marcos de interacción se utilizan cuando existe la necesidad de agregar condicionales o bucles, se interpretan mediante rectángulos que pueden ubicarse alrededor del diagrama de secuencia y poseen etiquetas que representan el tipo de estructuras de control, tal como se muestra en la figura 22.

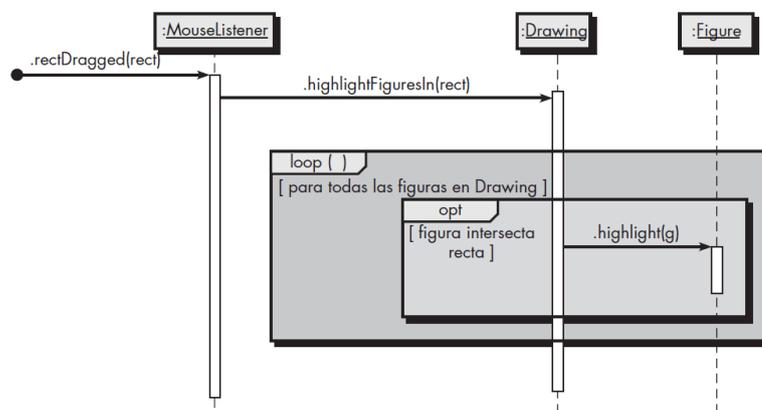


Figura 22 Diagrama de secuencia con dos marcos de interacción
Fuente: (Pressman, 2010)

2.6.3 Diagramas de estado.

Un diagrama de estado UML permite establecer los estados y el comportamiento de un objeto a través del tiempo mediante el modelado, es decir, permite conocer cuáles son las variables y sus valores en un determinado momento. En la figura 23 se muestra el diagrama de estado para una sección del compilador Java.

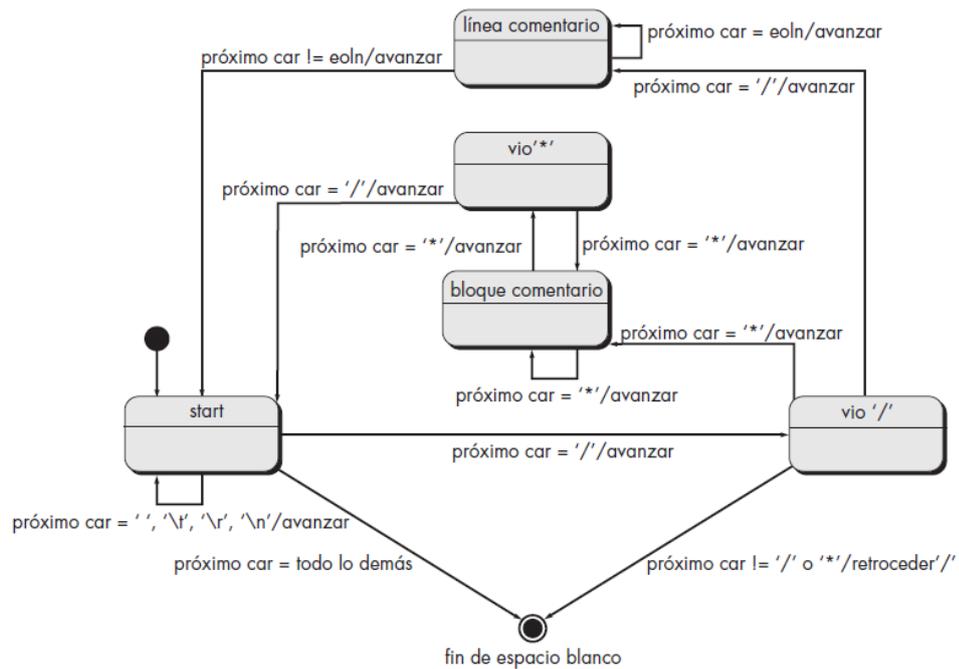


Figura 23 Diagrama de estado para una sección del compilador Java.
Fuente: (Pressman, 2010)

Existe un estado de actividad para el objeto, y está guiado por “*hacer actividad*”, donde el objeto realiza dicha actividad mientras se encuentra en un estado. Sin embargo, si este estado de “*hacer actividad*” se interrumpe gracias a una transición del estado de actividad antes de que esta termine, entonces se anula el “*hacer actividad*”, por lo contrario, si esta termina antes de que ocurra alguna transición de estado, el estado de actividad pasa a ser un estado normal de espera. Para representarlo se usa la parte inferior del rectángulo redondeado, es decir, la mitad inferior y se escribe “do/” seguido de la actividad que debe realizarse. Cuando ocurre una transición gracias a un evento disparador y el objeto se encuentra en un estado, este realiza dicho cambio, por cuál se produce un nuevo estado para el objeto. Los estados finales indican que ya no existen más transiciones, se representan por un círculo blanco y en su interior un círculo negro.

En la figura 24 se muestra la operación de un teléfono y sus estados. Cuando la persona que está llamando está en un estado de espera, la llamada se encuentra en el estado de *retener con música* por un periodo de 10 segundos. Finalizado el tiempo el “*hacer actividad*” de dicho estado de espera se completa por lo que pasa a comportarse como un estado normal y de no actividad. En cambio si la persona presiona la tecla # mientras se encuentra

en el estado de espera, es decir, durante los 10 segundos o antes de que finalice dicho tiempo, entonces el “hacer actividad” se cancela por la interrupción, y a consecuencia de ello la música reconfortante dejará de sonar.

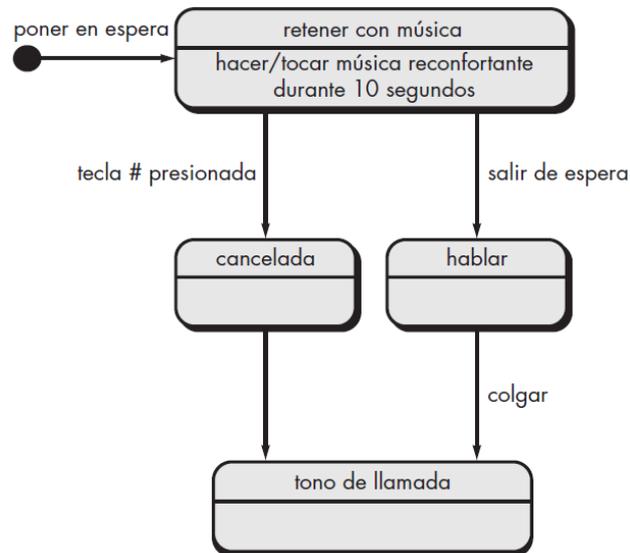


Figura 24 Diagrama de estado con un estado de actividad y una transición sin disparador

Fuente: (Pressman, 2010)

2.7 Redes de Petri

Las redes de Petri son un modelo bien establecido de sistemas concurrentes, con una teoría rica y sólida, pero aún en crecimiento. Las redes de Petri se utilizan intensamente en el diseño, verificación, análisis y creación de prototipos de sistemas de software, sistemas de control y sistemas de hardware.

Las redes de Petri, como se las llama ahora, hicieron su primera aparición, aunque en una forma diferente a la habitual, en la tesis doctoral de Carl Adam Petri en 1962. Allí se fija el objetivo de establecer la “Fundamentos de una teoría de la comunicación”, que debe aplicarse en el “diseño y programación de máquinas procesadoras de información”. En los años siguientes, la teoría tomó su forma definitiva, con los aportes fundamentales de Anatol Holt y varios grupos de investigación que comenzaron a trabajar en ella. Aproximadamente diez años después de su disertación, en Conceptos de teoría de redes, Petri presenta su “teoría de redes”, como “una forma de teoría general de sistemas, desarrollada como una herramienta para que el analista de sistemas represente e investigue sistemas de información y

comunicación planificados con el grado de detalle requerido”. Tras el primer estallido de interés en las ideas de Petri, el campo siguió creciendo, expandiéndose tanto en aspectos teóricos como prácticos. Hoy en día, las redes de Petri forman un campo establecido en la informática, con conferencias y revistas especializadas. Una de las principales características que distingue a la teoría de Petri de la teoría tradicional de los autómatas es un principio radical de asincronía dado que no se puede suponer una referencia temporal global en el modelo. Cualquier forma de sincronización en un sistema debe lograrse mediante el intercambio de información entre los componentes del sistema.

La noción habitual de estado en la teoría de autómatas, que corresponde a una instantánea ideal de todo el sistema en un instante dado, se distribuye entre los elementos del estado, representados por lugares. Los estados cambian por medio de eventos que modifican solo un subconjunto de elementos de estado. El estado global, que es una noción primitiva en la teoría de los autómatas, se convierte en una noción derivada en la teoría de la red de Petri, lo que refleja el hecho de que en un sistema distribuido ningún componente puede realmente observarlo. Partiendo de la idea básica, se han definido y estudiado diferentes tipos de redes de Petri. Se distinguen por la naturaleza de los elementos de estado: en el caso más simple, correspondientes a sistemas netos elementales, son variables booleanas. En esta clase de redes, un elemento de transición se caracteriza por el conjunto de elementos de estado que cambian de verdadero a falso (sus lugares de entrada) cuando ocurre la transición, y el conjunto de elementos de estado que cambian de falso a verdadero (sus lugares de salida).

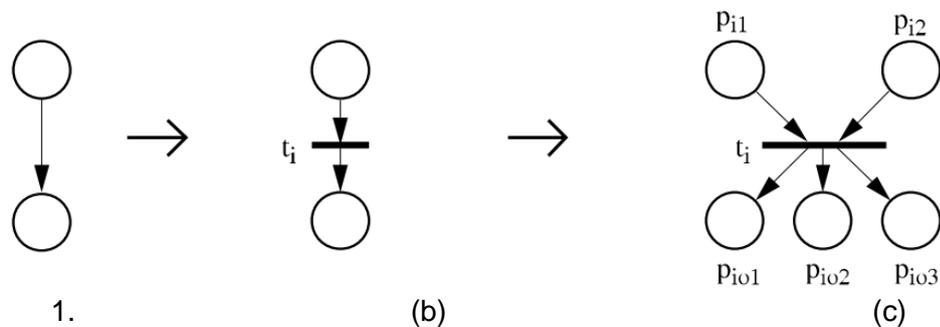


Figura 25 Máquinas de estados a RDP: arco y transiciones.

Fuente: (Diaz, 2013)

Un sistema de red elemental se describe como un sistema bipartito cuyos nodos se dividen en lugares (elementos de estado) y transiciones. En la figura 25a) se muestra el arco de una máquina de estados; 25b) arco de la red de Petri más simple; 25c) la transición en una red de Petri.

Como consecuencia, las RdP serán representadas visualmente por un gráfico que tiene dos tipos de nodos - transiciones y lugares - estos nodos están conectados entre ellos por arcos de lugares a transiciones y de transiciones a lugares. Tenga en cuenta que los arcos nunca conectan dos nodos similares. Los lugares que tienen arcos que los conectan a una transición T, es decir, que tienen arcos que conectan estos lugares a T, a menudo se denominarán simplemente lugares de entrada de T; De manera similar, los lugares conectados a una transición por arcos que van de T a estos lugares se denominarán lugares de salida de la transición.

Las transiciones de entrada y de salida de un lugar se definen mediante el mismo método. El estado global de una RdP puede definirse por el conjunto de sus lugares, algunos de ellos están marcados, es decir, tienen uno o más, generalmente varios tokens, y otros no están marcados, es decir, tienen cero tokens. Cada uno de estos lugares se convierte en un componente del estado global y es un subestado o un estado parcial del estado global del sistema.

La distribución de tokens correspondiente en todos los lugares se denomina marcado de un RdP. En otras palabras, una RdP es un modelo definido por:

- Un conjunto de lugares, denotados gráficamente por círculos;
- Un conjunto de transiciones, denotado gráficamente por barras o rectángulos;
- Un conjunto de arcos, denotados por flechas, que unen lugares a transiciones y transiciones a lugares; y
- Mediante una distribución de fichas en los lugares.

Los cinco elementos que representan una RdP, están simbolizados de la siguiente manera:

- I. P corresponde a un conjunto finito de lugares

- II. T corresponde a un conjunto finito de transiciones
- III. A corresponde a un conjunto de arcos dirigidos
- IV. W corresponde a la función de peso de los arcos, $w: \rightarrow \{1, 2, 3, 4, \dots\}$
- V. M corresponde al marcado inicial de la red

En la figura 26 se puede observar una RdP que hace uso de los elementos anteriormente mencionados.

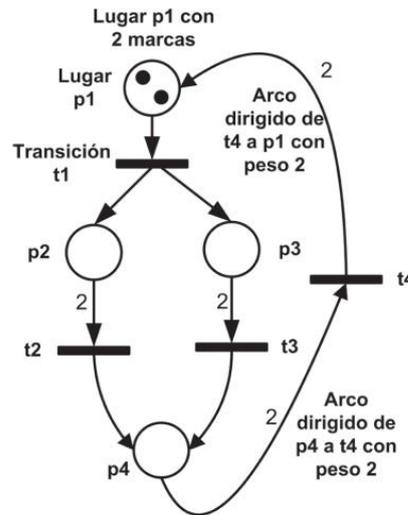


Figura 26 Red de Petri con cuatro lugares, cuatro transiciones, cinco arcos dirigidos de peso uno y cuatro arcos dirigidos de peso dos.

Fuente: (Murillo, 2008)

2.7.1 Redes de Petri autónomas y no autónomas

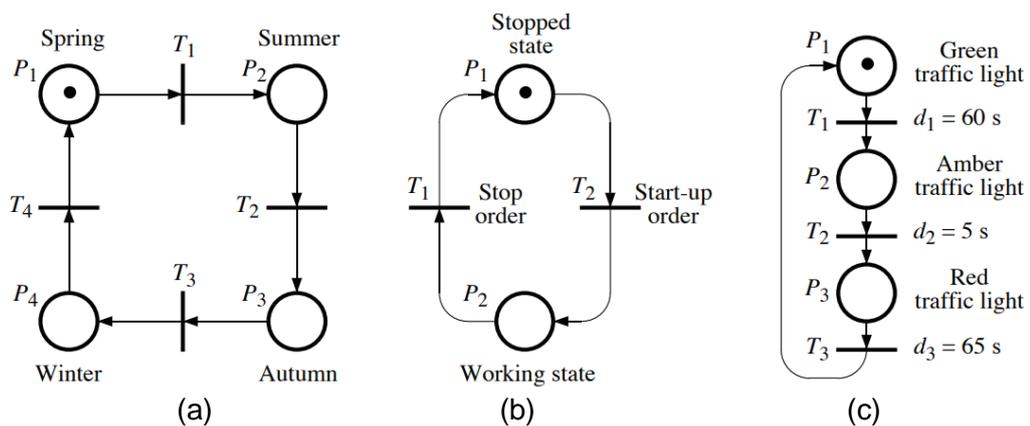


Figura 27 Redes de Petri autónoma y no autónomas.

Fuente: (David & Alla, 2010)

La figura 27a representa el ciclo estacional de una red autónoma. Un lugar está asociado con cada temporada y el cambio de una temporada a la siguiente con cada transición. La marca de la Figura a corresponder al resorte. Se puede ver en esta RdP que solo hay una transición T1 habilitada y que,

por lo tanto, esta transición será la siguiente en dispararse. Por lo tanto, la siguiente marca corresponderá al verano, pero no tenemos ninguna indicación de cuándo tendrá lugar la transición. Esta RdP describe el ciclo estacional de manera cualitativa. Cuando una RdP describe el funcionamiento de un sistema que evoluciona de forma autónoma, es decir, cuyos instantes de disparo son desconocidos o no indicados, podemos decir que se trata de una red de Petri autónoma. Aunque la palabra autónoma no es necesaria, permite distinguir claramente esta RdP de una red de Petri no autónoma. La Figura 27b representa el ciclo de estados de un sistema, por ejemplo, un motor que se detiene, luego arranca, luego se detiene nuevamente, etc. En el estado correspondiente al marcado de la Figura 27b, el sistema se detiene y la única transición habilitada es la transición T1. Pero en este caso, esta transición se activará cuando se produzca el evento externo, es decir, la orden de inicio. Es una red de Petri no autónoma.

La figura 27c representa un sistema (un semáforo) cuyo comportamiento es impulsado por el tiempo. Cuando hay un token en P1, el semáforo está en verde y T1 está habilitado. Esta transición se activará 60 s después del momento en que se habilitó. Cuando se dispara T1, se saca el token en P1 y se deposita un token en P2, el semáforo se vuelve ámbar y T2 se habilita.

También es una red de Petri no autónoma que describe el funcionamiento de un sistema cuya evolución está condicionada por eventos externos y / o por el tiempo. Una RdP no autónoma está sincronizada y / o temporizada.

Un modelo de red de Petri representa la estructura de un sistema y las causas y efectos inmediatos de las transiciones. El comportamiento de una red de Petri se puede representar de diferentes formas. Una clasificación fundamental de la semántica del comportamiento para las redes hace una distinción entre la llamada semántica de entrelazado y la llamada semántica de verdadera concurrencia. En el primero, se registran secuencias de eventos; si algunas transiciones son concurrentes, entonces se registran todas sus posibles secuenciaciones. En este último, el modelo formal del comportamiento de la red retiene información sobre la posible ejecución

concurrente de transiciones y la posible tenencia concurrente de estados. La principal herramienta formal utilizada en la semántica de entrelazado es el gráfico de marcado, que es un sistema de transición que registra todos los estados globales alcanzables y las transiciones entre ellos. La relación entre un modelo de red y su gráfico de marcación revela una dualidad que será explotada en el desarrollo de la teoría de regiones y en las técnicas de síntesis. En su forma más simple, aparente en redes elementales, se puede enunciar de la siguiente manera: un estado global (marca) es un conjunto de lugares; un lugar es (se puede describir extensivamente como) un conjunto de estados globales, es decir, el conjunto de marcas en el que se mantiene

Entendemos la síntesis como un proceso automatizado que, dadas las especificaciones de comportamiento o especificaciones parciales de un sistema a realizar, decide si las especificaciones son factibles y luego produce una red de Petri realizándolas exactamente, o si esto no es posible produce una red de Petri que realiza una Aproximación óptima de las especificaciones. En el primer caso, el sistema de red de Petri resultante es correcto por construcción. Se han desarrollado herramientas computacionalmente eficientes para la síntesis de redes de Petri, que por lo tanto pueden jugar un papel central en el diseño de sistemas asistidos por computadora (por el contrario, aún no existen herramientas eficientes para la síntesis de autómatas asincrónicos de Zielonka, que podrían ser una alternativa a la red de Petri síntesis). No consideramos redes de Petri de alto nivel, porque son demasiado sofisticadas para ser consideradas implementaciones realistas. No consideramos redes de Petri cronometradas o estocásticas, porque hasta ahora no se ha desarrollado ninguna teoría de síntesis para tales redes. El libro cubre la teoría, los algoritmos y las aplicaciones de la síntesis de redes de Petri. El acento se pone en los dos primeros elementos, pero las aplicaciones se presentan, ilustran y discuten a fondo en la última parte del libro. No abordamos temas importantes como el diseño jerárquico de las redes de Petri, la representación y análisis de sus espacios estatales alcanzables o la verificación de sus propiedades globales. Sin embargo, puede ser necesaria la verificación después de la síntesis de redes de Petri ilimitadas para comprobar que están libres de interbloqueos o bloqueos dinámicos.

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En el presente capítulo se detalla de manera estructural las consideraciones generales del diseño, descripción, características y funciones de la arquitectura para el control y automatización de la primera etapa de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, se expone su viabilidad mediante la simulación del modelado.

3.1 Consideraciones generales de diseño.

Actualmente las industrias de todo el mundo se han propuesto a contribuir con el medio ambiente y su cuidado, razón por la cual implementan procesos y actividades de reutilización de los recursos, la planta PTAR es una de esas estrategias que permiten reutilizar el líquido vital agua, mediante un tratamiento que permite eliminar los contaminantes presentes en el agua y a partir de eso aprovecharlas para diversos fines sin tener que desperdiciarla o desecharla. Este Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales se compone de varias etapas que deben efectuarse de manera correcta, sin embargo, existen etapas más complejas que otras, y que demandan mayor control, una de ellas es la del Tratamiento Primario, objeto del desarrollo de este trabajo de investigación, mediante el cual se demostrarán las ventajas e influencia de una arquitectura de automatización en el control y supervisión eficiente de este subproceso.

3.1.1 Descripción del sistema

El Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales, tal como se menciona en el marco teórico establece una combinación de procesos unitarios separados que se realizan en secuencia, de tal manera que cada uno respalde el desempeño del proceso anterior o aguas abajo, como también se conoce. Esta secuencia de procesos unitarios forma el tren de tratamiento, al final de este tren de tratamiento, se espera que el agua resultante cumpla con una calidad específica. A pesar del tamaño y la complejidad de ingeniería de algunas de estas plantas de tratamiento, las etapas se pueden agrupar de

forma general en cuatro grupos: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, tal como se muestra en la Figura 28.



Figura 28 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales
Fuente: El Autor

El tratamiento primario se enmarca de color rojo en la figura 28, su finalidad es remover los sólidos suspendidos disueltos del agua residual por medio de los procesos de coagulación y floculación y DAF tal como se muestra el diagrama de bloques de la figura 29.

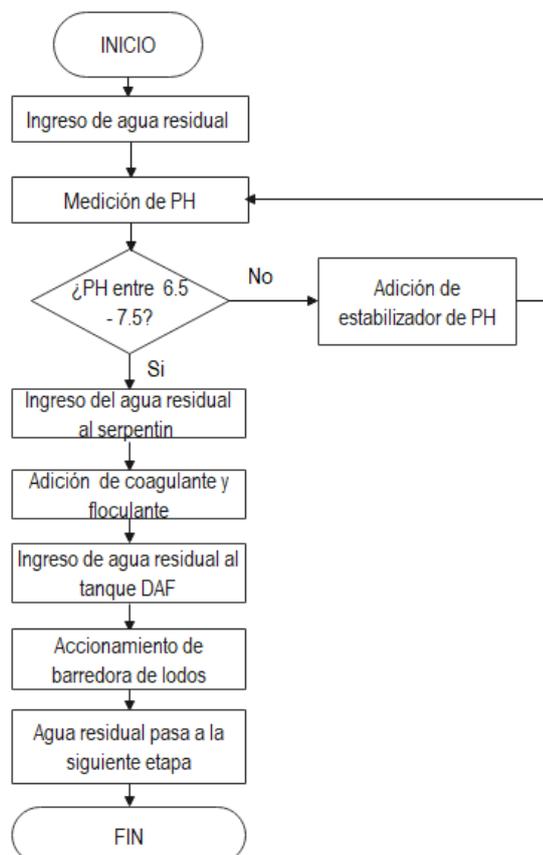


Figura 29 Diagrama de bloques, etapa de tratamiento primario
Fuente: El Autor

Para los primeros procesos coagulación - floculación, la acción de agrupación de estos sólidos disueltos es efectiva cuando el PH del agua residual es neutro o es próximo a 7, por lo general se trabaja con un rango de 6.5 – 7.5. Por ello es fundamental hacer una medición del PH en línea, al agua que ingresa a la primera etapa, con ayuda de un sensor industrial, esto permitirá detectar el grado de acidez o alcalinidad del agua residual. Existen industrias que realizan este proceso de medición con un instrumento portátil que puede ser de tipo electrónico, de tiras analizadoras, de gotas o de pastillas, el más utilizado a nivel industrial para comprobar el PH del agua, indistintamente de que tengan instalado algún sensor industrial, es el analizador de gotas que está compuesto por un tubo pequeño donde se recoge un muestra del agua residual y se le añade de 3 a 5 gotas del reactivo de PH, luego se compara el color obtenido con la tabla suministrada. Una de las desventajas de este equipo es que el operador debe estar constantemente realizando la medición y en su ausencia, no va a existir ninguna forma de control de este parámetro. Luego de la medición de PH, dependiendo de su grado de acidez o alcalinidad se realiza la adición de un estabilizador de PH que permita regular al rango deseado. En caso de que el agua residual de ingreso tenga un PH ácido o en rango de 1 a 6.4 se puede añadir algún tipo de sustancia caustica como la sosa o Hidróxido de Sodio NaOH, que tiene un gran nivel de alcalinidad, por el contrario, si el PH es alcalino de rangos de 7.6 a 14 se puede agregar una sustancia ácida como el Ácido Muriático o Ácido Clorhídrico HCl para bajar y neutralizar el PH. Si el agua cumple el rango requerido 6.5 – 7.5 pasa a un serpentín de seis vueltas, en la segunda vuelta se realiza la adición del coagulante que puede ser sulfato de aluminio granular tipo A, y en la cuarta vuelta se añade el floculante que puede ser de tipo aniónico como la poliacrilamida. A continuación, el agua residual pasa al tanque de retención DAF, dónde mediante la flotación por aire disuelto generada por algún equipo de inyección de aire se introducen burbujas al agua, con la finalidad de que esas burbujas atrapen las sustancias suspendidas, grasas o aceites que poseen menor densidad a la del agua y asciendan a la superficie para que sean barridos por medios mecánicos como una barredora de lodos y recogidos por una tolva para su almacenamiento. Finalmente, el agua residual pasa a la siguiente etapa de tratamiento.

3.1.2 Caracterización del sistema

En este apartado se detallan las características técnicas del sistema y los componentes o dispositivos encargados de llevar a cabo acciones de control y supervisión del sistema.

- Controlador:

La principal característica de este equipo es permitir el recibimiento de las señales de los sensores, el procesamiento de la información y luego el control de los actuadores de salida del sistema, permiten la visualización, ajustes y mantenimiento en campo. Generalmente tienen una interfaz muy amigable con el usuario y su programación se basa en íconos, operan con voltaje de alimentación de 110-220 VAC, frecuencia de 50/60Hz, poseen entradas digitales de 24VDC, análogas de 0-10 VDC o de 4-20 mA, salidas digitales por medio de relés que permiten el control de encendido y apagado de actuadores como bombas dosificadoras, barredoras de lodos automáticas. Con protección IP-65 y conexiones Ethernet, PROFIBUS, RS485, RS232, MODBUS.

- Sensores y actuadores:

Los sensores proporcionan datos de entrada a los sistemas de control y pueden ser de diferentes formas. Algunos de ellos pueden detectar la ausencia o presencia de un objeto o la posición de un actuador, mientras que existen sensores específicos para el tratamiento de aguas que se pueden utilizar para detectar la presión, la posición o características de un fluido.

Generalmente los sensores para medición de PH son resistentes a altas temperaturas, detectan las rápidas transiciones del proceso, poseen rango de medida de PH 0-14, precisión de $\pm 0,001$, tiempo de respuesta de 1s, presión de hasta 100 PSI dependiendo del modelo, conector de plomo estañado, longitud de cable desde 1m hasta 6 m, adicionalmente se puede usar extensión de cable. Poseen compensación de temperatura PT-1000, el voltaje de alimentación de la mayoría de estos sensores es de 12-24VDC.

Los sensores de flujo electromagnéticos poseen precisión de $\pm 0.3\%$, montaje en línea, material de acero inoxidable, se puede hacer uso de

cualquiera de estas comunicaciones 4-20mA, Modbus, RS485 Profibus PA/DP, PROFIBUS, con tensión de alimentación 12-24VDC, con protección IP65, IP67, presión máxima de 600 bares, temperatura máxima de 70°C.

Los sensores de nivel ultrasónicos para aplicaciones de lodos, poseen un rango de medición de 0.4m – 15m y una precisión de 0.01m, profundidad de inmersión máxima de 3m, presión máxima de 0.3 bar, conexión eléctrica que posee cable de dos hilos, malla y conector, material de acero inoxidable, tensión de alimentación de 24VDC, protección IP68.

En cuanto a los actuadores, las bombas dosificadoras pueden ser electromagnéticas o mecánicas, las primeras ofrecen mejor dosificación y operación. Mediante la regulación de las carreras por minuto, se establece la velocidad y caudal de dosificación de los químicos. Operadas con voltaje de alimentación de 115-220VAC monofásico, dependiendo del químico a dosificar se debe tener en cuenta la compatibilidad química con los materiales internos y externos de la bomba, para evitar un desgaste prematuro del equipo. Así mismo para el uso de polímeros se debe asegurar que la bomba pueda otorgar la fuerza necesaria para manejar la viscosidad del producto químico. Otra de las características comunes de estos equipos, es la entrada analógica 4-20mA que permite la interconexión con el controlador, asegurando que la dosificación se realice proporcionalmente a lo requerido por el proceso. Además, se puede hacer uso de conectores para señales externas, entradas de parada, por pulso o auxiliar.

- DAF

Dado que la capacidad de tratamiento de la planta PTAR es de 100 m³/h, se considera un equipo DAF que cumpla tal suficiencia, cuya construcción es de material acero inoxidable ya que el origen del agua residual para tratamiento es industrial pesquera, que incluya la extracción automática de lodos o sólidos suspendidos por medio de una barredora mecánica superficial.

3.1.3 Funciones del sistema

La primera etapa del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales está contemplada por varias fases que se relacionan entre sí y necesitan

efectuarse de manera correcta, siguiendo un orden de acciones y funciones específicas. Entre las principales funciones del sistema de control y supervisión se tienen:

1. Ingreso del agua residual al tanque de almacenamiento.
2. Estabilización del PH en el agua residual (entre 6.5 – 7.5).
3. Control de la secuencia de encendido y apagado de las bombas dosificadoras de químicos.
4. Control de ingreso del agua residual al serpentín. Accionamiento de la barredora de lodos.
5. Monitoreo de la salida del agua residual y su posterior ingreso a la siguiente etapa.
6. Diagnóstico de fallo de actuadores y sensores.

Funciones secundarias:

- I. Adquisición y registro de datos y eventos del sensor.
- II. Almacenamiento de los valores del sensor y el estado de la salida de control.
- III. Generación y envío de mensajes de alarma.

3.2 Arquitectura del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Debido a la funcionalidad del sistema y los elementos que la conforman, en el presente trabajo de investigación se proponen varias arquitecturas para el control, comunicación y supervisión eficiente de los equipos que intervienen en la automatización de la primera etapa del tratamiento de aguas residuales de una industria pesquera.

3.2.1 Arquitectura del sistema de control

En la figura 30 se muestra la arquitectura de control jerarquizada en cuatro niveles, desde el nivel inferior que corresponde a la instrumentación de campo que corresponde a sensores y actuadores como sensor de PH, válvulas, bombas, motores, etc. En el segundo nivel piramidal, se encuentra el autómata programable, en este caso el PLC, encargado de recibir, interpretar y almacenar la información proveniente de los instrumentos de campos, y a su vez tomar decisiones en base a los parámetros ya

preestablecidos, así mismo este dispositivo es el encargado de proporcionar señales de salida que faciliten y un correcto funcionamiento del sistema. Por ejemplo, de acuerdo al valor de entrada del sensor de ph, se activa un relé de salida que enciende una bomba dosificadora para estabilizar el ph del agua.

Entre el primer y segundo nivel, la red para establecer comunicación efectiva está dada por el protocolo de comunicación Ethernet. El tercer nivel corresponde al sistema SCADA, que mediante un monitor HMI le ofrece al operario una supervisión en tiempo real del sistema, pudiendo así observar y leer los valores almacenados en la memoria de los autómatas programables, por ejemplo: lecturas del sensor de PH, estados de alarmas, salidas activadas, fallos, selección de estados entre manual y automático. En la última etapa de esta jerarquización se tiene el entorno ERP que está centrado en mejorar la calidad del proceso, evitando el duplicado de la información, acumulación de archivos, pero sobre todo brindando información y alertas del estado de los equipos y maquinarias, mejorando la planificación y reduciendo así el mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos, proporcionando ciclos de vida más prolongados, reduciendo la paralización de maquinarias y de errores humanos.

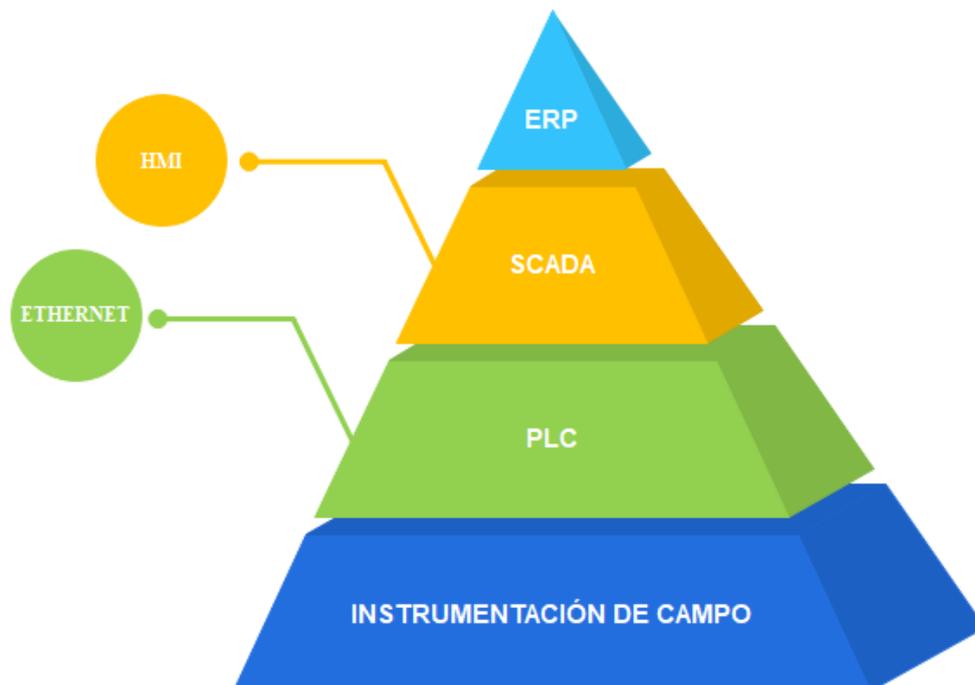


Figura 30 Jerarquización de la arquitectura de control
Fuente: El Autor

3.2.2 Arquitectura de comunicaciones

Debido a que la automatización corresponde a un entorno industrial, la topología jerárquica de red utilizada es la de tipo bus, con cable bidireccional, cuya trayectoria implica un canal de avance y otro de regreso, esto permite que se envíe y reciba información, tal como se muestra en la figura 31. Esta topología además de ser de arquitectura simple, posee facilidad de implementación.

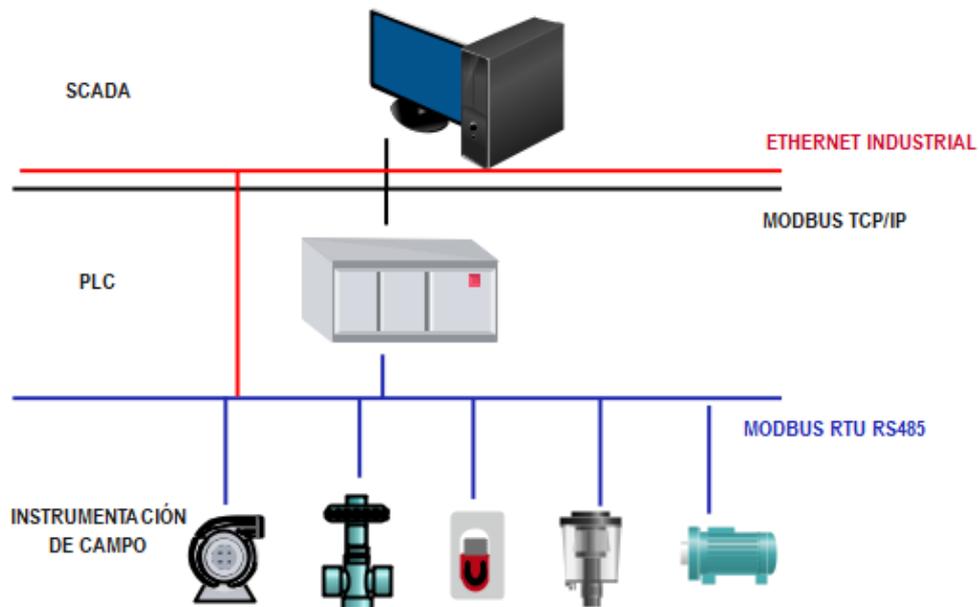


Figura 31 Arquitectura de comunicaciones
Fuente: El Autor

El protocolo de comunicación Modbus TCP/IP permite la interconexión confiable y a gran velocidad entre los dispositivos de supervisión como el sistema SCADA y aquellos dispositivos que ejercen el control y la automatización como el PLC. Para la transmisión de datos entre los dispositivos de campo como sensores y actuadores y los equipos de control, se hace uso del protocolo estándar MODBUS RTU RSJ485, que es ampliamente usado en entornos industriales ya que permite tener varios dispositivos conectados en un mismo bus, tal como se muestra en la parte inferior de la figura 31. Un requerimiento básico de la capa de red, para que permita llevar eficazmente esta comunicación es que las direcciones IP asignadas a los nodos se encuentren en un mismo intervalo, pueden ser de tipo C. Para la capa física entre el PLC y el protocolo MODBUS TCP, se usa el conector RJ45. La dirección MAC del PLC, es única e irrepetible, también

es conocida como dirección física del equipo, está compuesta de 6 bytes y es de suma importancia para la capa de enlace. En cuanto a la capa de transporte TCP el puerto a utilizar por defecto, es el 502.

3.2.3 Arquitectura del sistema SCADA

En la arquitectura Cliente-Servidor, que unifica los dos puntos anteriores, es decir, la arquitectura de control y la de comunicación. El Controlador Lógico Programable, es el equipo principal cuyas funciones consisten en la adquisición de las señales de la instrumentación de campo y en monitorear y controlar el proceso. Dado que el sistema es flexible y escalable, se pueden incluir a futuro más PLC's encargados de monitorear las demás etapas del proceso de la PTAR, y no afectaría la supervisión del sistema.

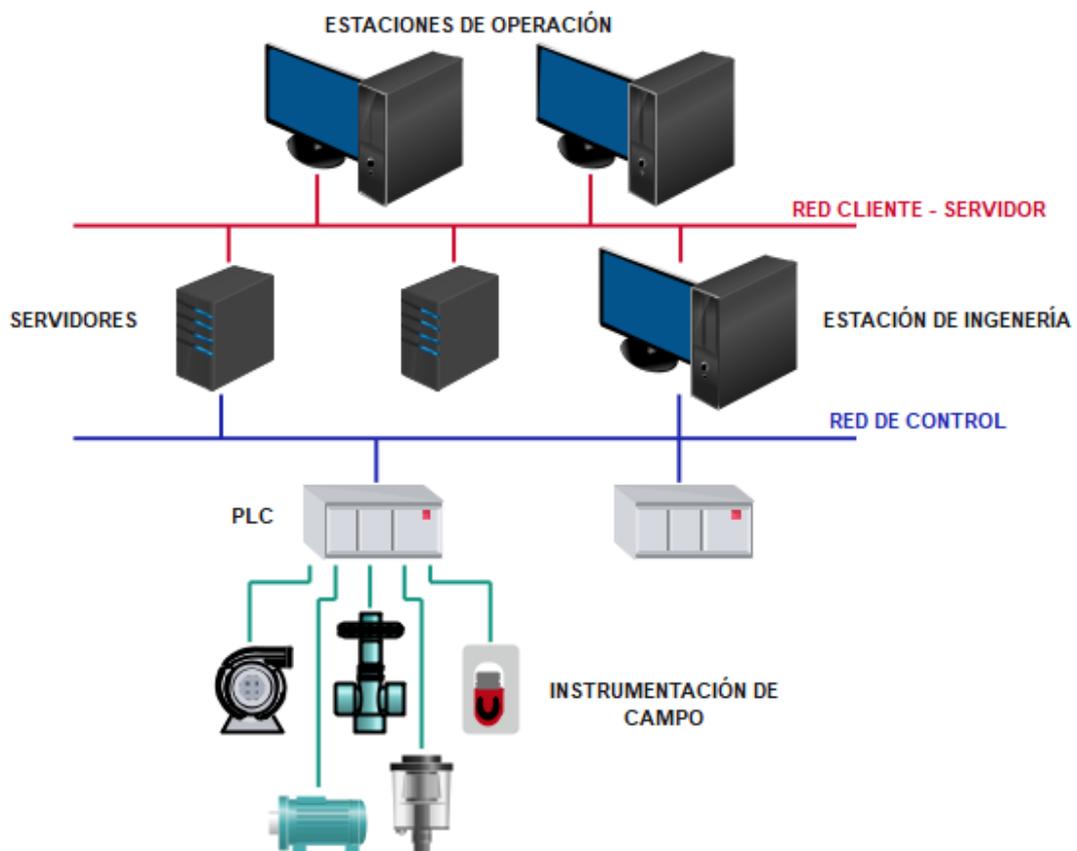


Figura 32 Arquitectura del sistema SCADA
Fuente: El autor

Tal como se muestra en la figura 32 el primer nivel corresponde a la instrumentación de campo, sensores y actuadores, el PLC corresponde al nivel de control ubicado en el segundo nivel, a esta red se interconecta la

interfaz HMI, que puede ser denominada como la estación de ingeniería o desarrollo, al final se encuentra la estación de operación, que mediante la red cliente-servidor permite que el operario o usuario final conocido como cliente, pueda supervisar y controlar el proceso, accediendo al servidor a través de la red de comunicación.

3.3 Análisis del sistema de control y automatización

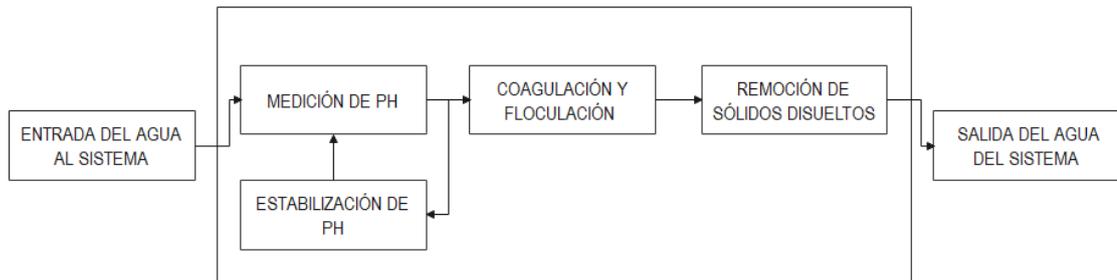


Figura 33 Diagrama de bloques del sistema de control de la primera etapa de la PTAR.

Fuente: El Autor

En la figura 33 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control para la automatización de la primera etapa de la PTAR, considerando sus componentes, entrada y salida del sistema.

Inicialmente en la entrada del sistema se verifica el ingreso del agua residual, el primer componente o fase corresponde a la medición de PH del agua residual, en caso de existir algún error se realiza una retroalimentación del sistema mediante la estabilización del ph del agua, es decir, el agua del sistema regresa al componente inicial las veces que sean necesarias, a fin de cumplir con el parámetro deseado (PH de rango 6.5 - 7.5). Una vez el sistema cumpla con el rango de ph óptimo, el sistema avanza a su segundo componente, denominado procesos de coagulación y floculación, en esta fase únicamente es necesaria la supervisión, no se realiza corrección de errores. En el tercer componente se realiza la remoción de los sólidos disueltos y lodos del agua residual con ayuda de la tecnología DAF, el agua tratada finalmente es descargada a la segunda etapa del proceso de tratamiento y se considera como la salida del sistema.

A continuación, se analizan cada uno de los subsistemas de control de este proceso, mediante la explicación de diagramas de flujo.

3.3.1 Análisis del primer subsistema, estabilización de PH

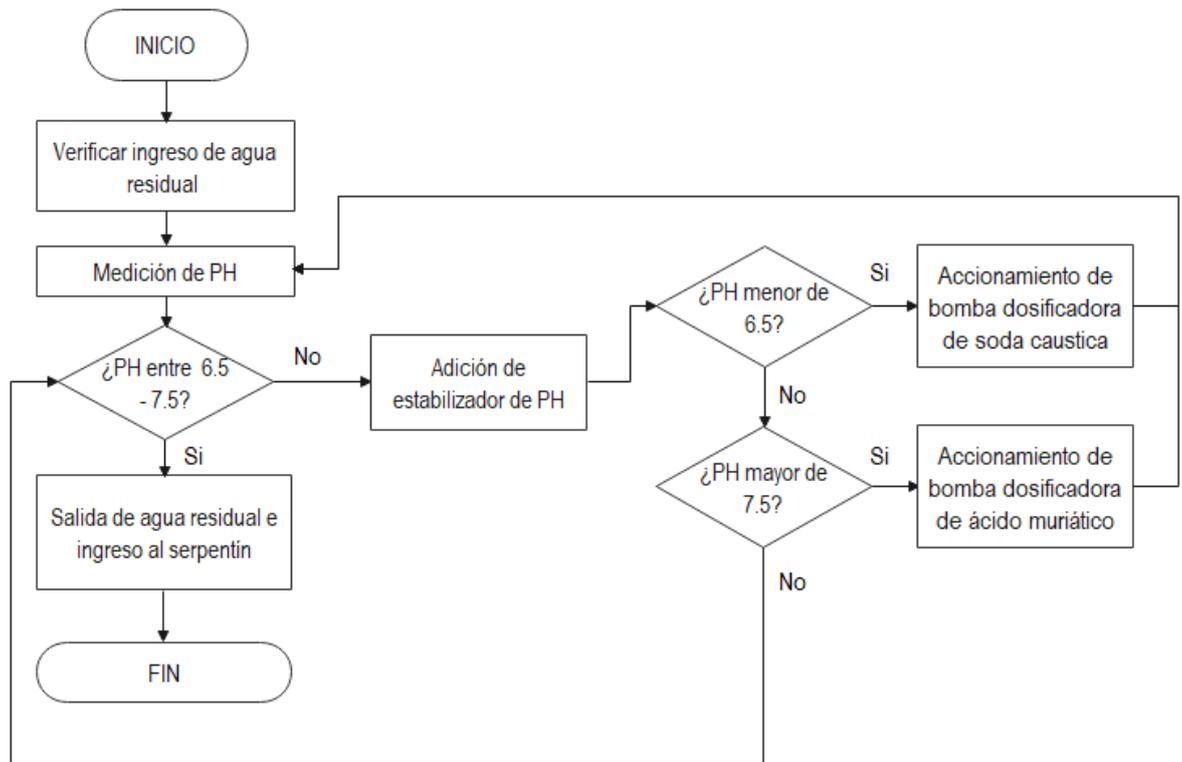


Figura 34 Primer subsistema de control, estabilización de Ph
Fuente: El Autor

En la figura 34 se muestra el primer subsistema de control, correspondiente a la medición y estabilización del PH del agua residual. Inicialmente se realiza una verificación del flujo de agua residual en el sistema y luego se procede a realizar la medición del parámetro de PH, mediante un sensor de PH de escala de 0-14. Si la medición cumple con el rango óptimo que es de 6.5 a 7.5 entonces el agua residual del sistema es adecuada para ser descargada al siguiente subsistema o serpentín para llevar a cabo los procesos de coagulación y floculación. Caso contrario el agua pasa por un proceso de estabilización de PH, en el cual existen dos casos, el primero cuando el PH del agua residual es menor que 6.5 y cuyo proceso consiste en accionar una bomba dosificadora de soda caustica, y el segundo caso cuando el PH del agua es mayor que 7.5 y cuyo proceso resulta en accionar la bomba dosificadora de ácido muriático. Para ambos casos, luego de tomar una decisión la retroalimentación del sistema regresa a la medición del PH en el sistema. Es importante mencionar que esta retroalimentación se puede ejecutar infinitas veces hasta que el parámetro de PH sea el óptimo para avanzar con el proceso.

3.3.2 Análisis del segundo subsistema, coagulación y floculación

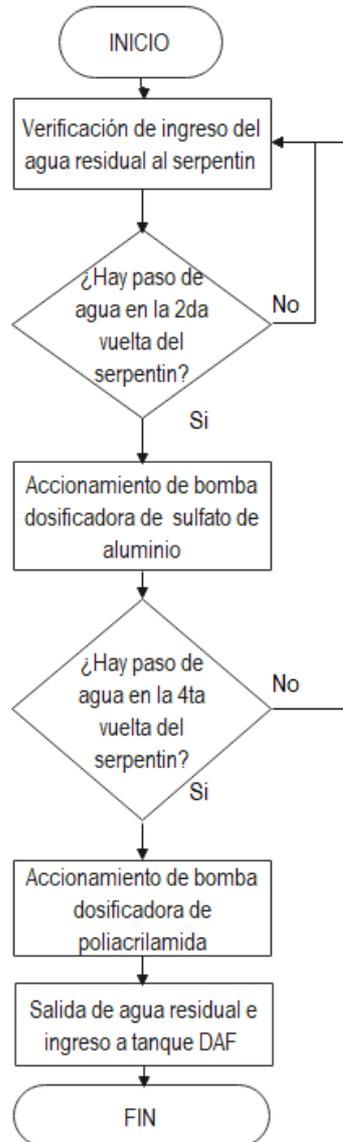


Figura 35 Segundo subsistema de control, coagulación y floculación
Fuente: El Autor

En la figura 35 se muestra el segundo subsistema de control que corresponde a los procesos de coagulación y floculación, cuyo inicio consiste en la verificación de ingreso del flujo de agua residual al serpentín. Cabe resaltar que este serpentín funciona de manera descendente, es decir, el número de vueltas se enumera desde la parte inferior finalizando en la parte superior. Por consiguiente, se verifica que haya paso de agua en la segunda vuelta del serpentín, en caso afirmativo se acciona la bomba dosificadora de sulfato de aluminio denominado también como coagulante. Más adelante se vuelve a realizar una verificación del paso de agua para la cuarta vuelta, si existe flujo entonces el proceso prosigue con el accionamiento de la bomba

dosificadora de poliacrilamida denominada también como floculante. En sentido contrario, para ambos casos si el sistema no detecta flujo en la segunda y cuarta vuelta del serpentín, entonces se ve obligado a volver al inicio del sistema y realizar la verificación del flujo del agua residual.

3.3.3 Análisis del tercer subsistema, remoción de lodos y sólidos disueltos.

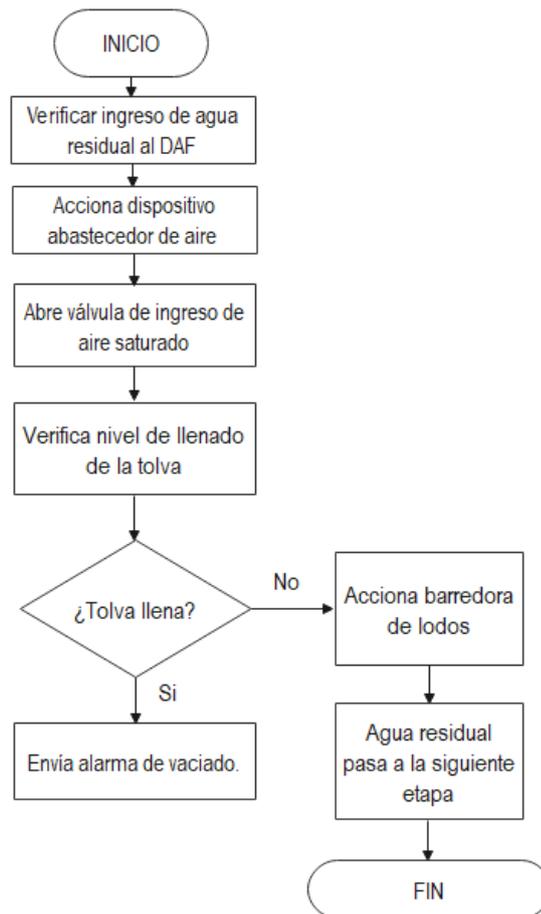


Figura 36 Tercer subsistema de control, remoción de lodos y sólidos disueltos.

Fuente: El Autor

En la figura 36 se muestra el tercer subsistema de control que corresponde a los procesos de remoción de sólidos disueltos y acumulación de lodos, cuyo inicio consiste en la verificación de ingreso del flujo de agua al tanque DAF. Por consiguiente, se realiza una verificación del ingreso de aire saturado provisto por un compresor de aire, para crear micro-burbujas encargadas de adherir los sólidos disueltos y llevarlos a la superficie. Luego se acciona la barredora de lodos que se encuentran en la superficie del tanque DAF para que finalmente estos sean vertidos en un sumidero. Una vez

recolectados los sólidos disueltos, el agua residual es apta para ser descargada a la segunda etapa del proceso de tratamiento de agua residual, lo que determina el fin del proceso en general.

3.4 Modelado del sistema

En esta sección se presenta el modelado del sistema por medio de diagramas UML los cuales permiten comprender la funcionalidad del sistema y su interacción entre los componentes, representando de forma visual los actores, procesos y estados que intervienen, garantizando así una correcta arquitectura de información. Se desarrollan tres tipos de diagramas de casos de usos: diagramas de casos de uso, diagramas de secuencia y diagramas de estados, para representar los tres subsistemas que integran la automatización de la Primera Etapa del Tratamiento de Aguas Residuales de este proyecto.

3.4.1 Diagramas de casos de uso

A través, del modelado con diagramas de casos de uso se describen los actores externos, que pueden ser personas, cosas o algún sistema externo y su interacción con el sistema, mediante la descripción de uno o varios casos de uso que representan una o un conjunto de acciones a ejecutar dentro del sistema.

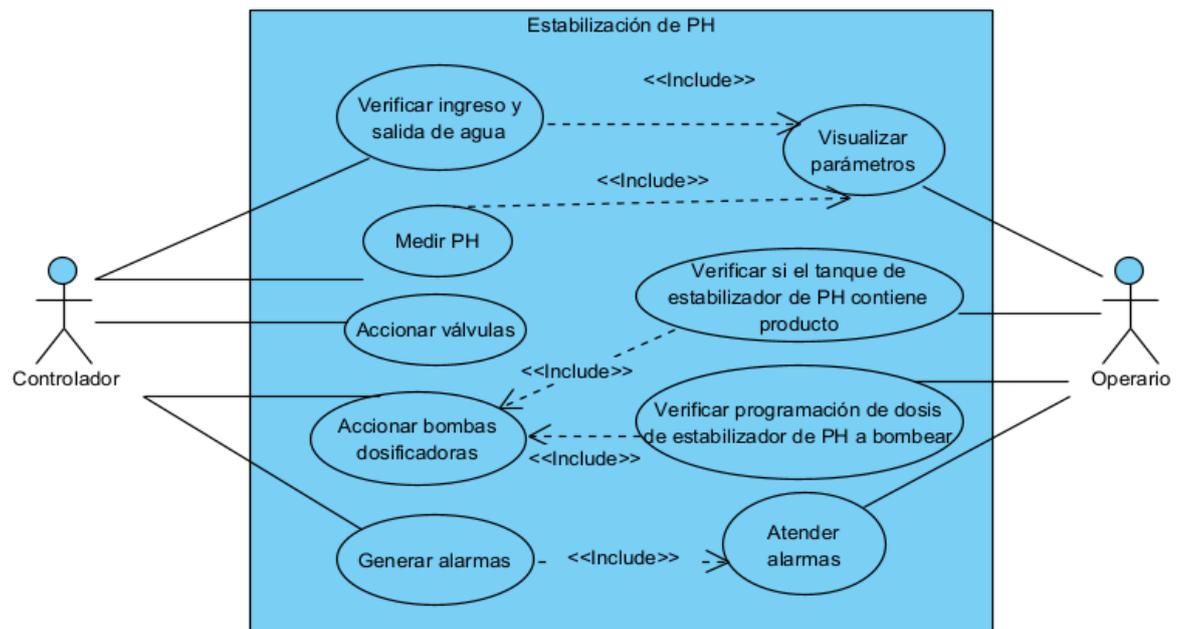


Figura 37 Diagrama de caso de uso, subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

En la figura 37 se presenta el diagrama de caso de uso de la fase de estabilización de PH donde intervienen dos actores: el controlador, quien genera las acciones de verificación de parámetros, accionamiento de equipos y generación de alarmas y el operario, quien es el encargado de supervisar y atender cualquier alarma que se origine en el sistema.

Existen casos de usos que están incluidos con otros mediante la función <<include>>. Por ejemplo, para el caso de uso original “Accionar bombas dosificadoras” se necesita previamente que el operario ejecute manualmente dos casos de uso: “Verificar si el tanque de estabilizador de PH contiene producto” y “Verificar programación de dosis de estabilizador de PH a bombear”, estos casos de uso incluidos no pueden ejecutarse independientemente en el sistema, deben tener relación con el caso de uso original con el propósito de que esté completo.

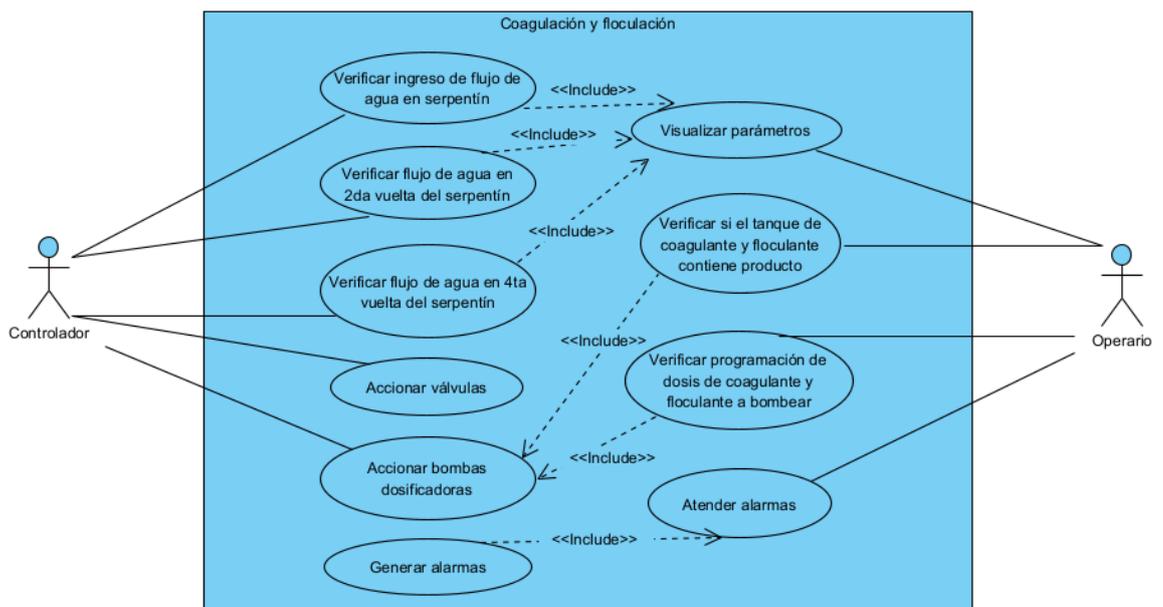


Figura 38 Diagrama de caso de uso, subsistema coagulación y floculación
Fuente: El Autor

Para el desarrollo del segundo subsistema referente al proceso de coagulación y floculación, se usan funciones similares al anterior subsistema, como el accionamiento de bombas dosificadoras, accionamiento de válvulas y generación de alarmas. Sin embargo, se agregan dos nuevos casos de uso para el primer actor, dado que el controlador es el encargado de la verificación de flujo, entonces realiza dos verificaciones de flujo adicionales en el serpentín para el correcto funcionamiento del sistema. En cuanto al segundo actor, el

operario nuevamente realiza funciones ya mencionadas en el primer subsistema, ya que corresponden a la supervisión y atención de alarmas. Y aquellos casos de uso incluidos como la verificación de producto en el tanque y la programación de la dosis a bombear, en este subsistema se realizan con químicos diferentes del anterior, es decir, con coagulante y floculante.

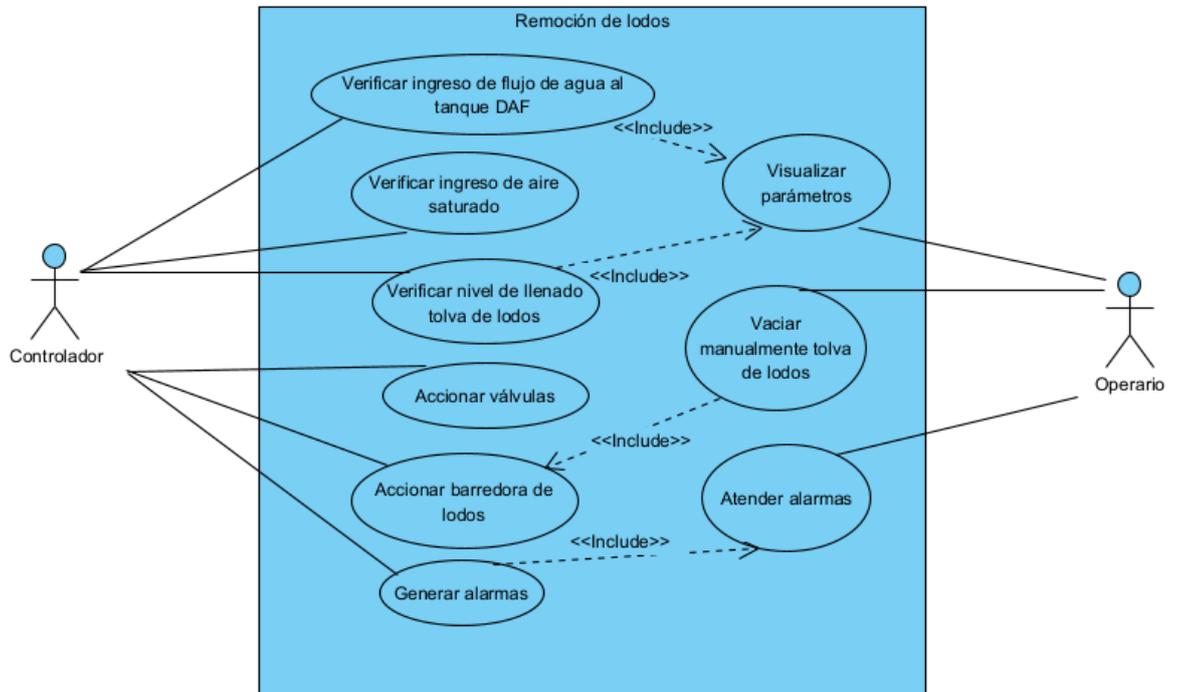


Figura 39 Diagrama de caso de uso, subsistema de remoción de lodos
Fuente: El Autor

Por otro lado, en la figura 39 se detalla el caso de uso del tercer subsistema, remoción de lodos donde el primer actor lleva a cabo tres funciones de verificación de distintos parámetros: flujo de agua, ingreso de aire saturado y nivel de llenado. Adicional, el controlador lleva a cabo dos casos de uso de accionamiento de actuadores, como válvulas y barredora de lodos, para esta última se emplea un caso de uso incluido que consiste en la ejecución de una acción que el operario debe realizar: “Vaciar manualmente tolva de lodos”. Las demás funciones del operario son las de supervisión y atención al sistema.

3.4.2 Diagramas de secuencia

Por medio del modelado con diagramas de secuencia se describe la interacción entre los objetos del sistema y los mensajes que intercambian entre sí. En este caso, los objetos están representados por un rectángulo,

cuya línea vertical ubicada en la parte inferior, simboliza la línea de vida en la que dicho objeto es concurrente.

sd Estabilización de PH

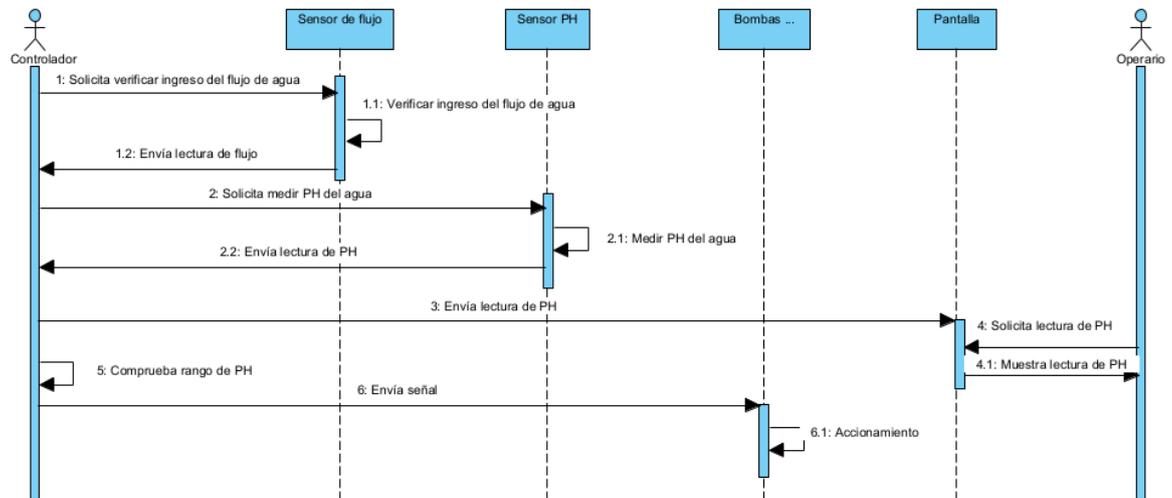


Figura 40 Diagrama de secuencia, subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

En la figura 40 se identifica el diagrama de secuencia del subsistema de estabilización de PH, en el cual existen tres objetos, dos de ellos son sensores. Por ejemplo, el primer actor definido como controlador solicita al objeto definido como sensor de flujo mediante un mensaje, la verificación del ingreso de flujo de agua, transcurrido un tiempo, el objeto ejecuta la verificación y responde al controlador mediante el envío de una lectura de flujo. Otra de las interacciones del controlador es aquella que realiza con el objeto definido como pantalla, al cual envía una lectura de sensor y la almacena, hasta que el operario, le solicite la lectura y este mismo objeto le responda mostrando dicha lectura de sensor.

sd Coagulación y floculación

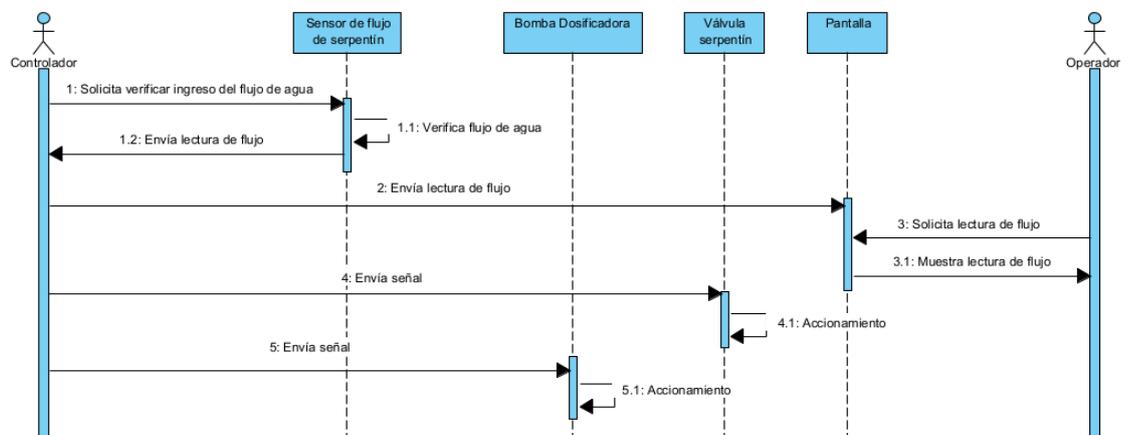


Figura 41 Diagrama de secuencia, subsistema coagulación y floculación
Fuente: El Autor

Por consiguiente, en la figura 41 se muestra el diagrama de secuencia del segundo subsistema de coagulación y floculación en el cual se envían y reciben mensajes de verificación y lecturas similares al primer subsistema. Adicional se envía una señal para llevar a cabo el accionamiento, es decir, apertura o cerrado y encendido o apagado de los actuadores, como por ejemplo la válvula principal del serpentín y las bombas dosificadoras de coagulante y floculante.

sd Remoción de lodos

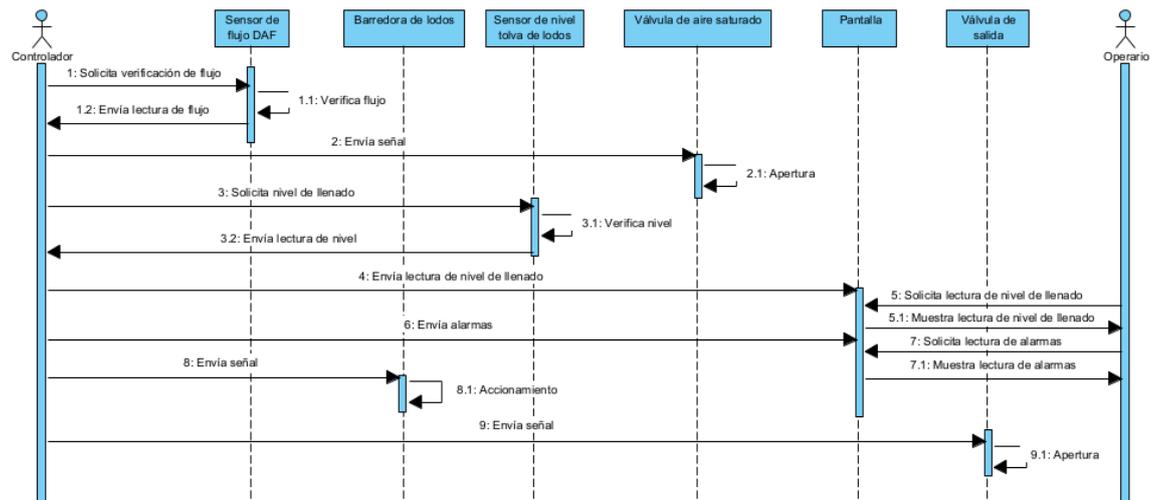


Figura 42 Diagrama de secuencia, subsistema de remoción de lodos
Fuente: El Autor

Asimismo, para el tercer subsistema de remoción de lodos presentado en la figura 42, se definen seis objetos. El controlador solicita verificación de parámetros a los sensores de flujo y nivel y estos ejecutan la verificación en un tiempo determinado y responden con el envío de la lectura hacia el controlador, para el último parámetro que corresponde al nivel, esta misma lectura es enviada desde el actor principal al objeto definido como pantalla, puesto que el operario solicita la información al objeto pantalla y esta le muestra la lectura correspondiente. Cabe recalcar que para el envío y visualización de alarmas el controlador se interrelaciona de forma similar con el objeto pantalla.

En cuanto a las válvulas, estas reciben una señal por parte del controlador para ejecutar su apertura. De la misma manera el controlador es el encargado de enviar una señal al objeto definido como barredora de lodos, para llevar a cabo su accionamiento.

3.4.3 Diagramas de estado

Finalmente, los diagramas de máquina de estados explican cómo un objeto pasa de un estado a otro y cuál es la nueva interacción a desempeñar cuando completa dicha actividad.

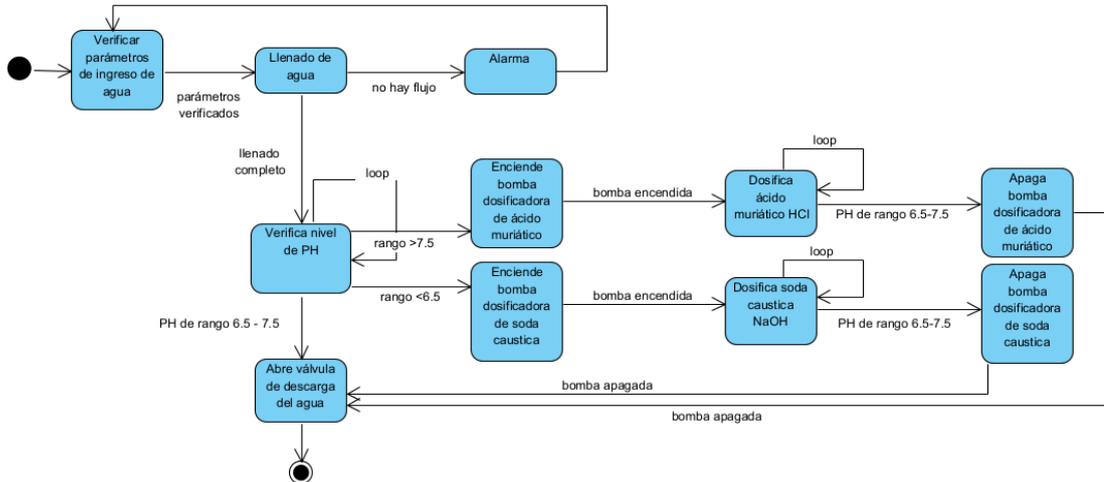


Figura 43 Diagrama de estados, subsistema estabilización de PH
Fuente: El Autor

En la figura 43 se presenta el diagrama de máquina de estados para el primer subsistema de estabilización de PH donde el proceso principal es la medición de PH del agua residual, este proceso siempre va a realizarse en bucle y toma tres decisiones, la primera cuando el PH es óptimo, es decir, de rango 6.5-7.5; la segunda, cuando el rango de PH es básico o mayor a 7.5; la tercera, cuando el rango de PH es ácido o menor de 6.5.

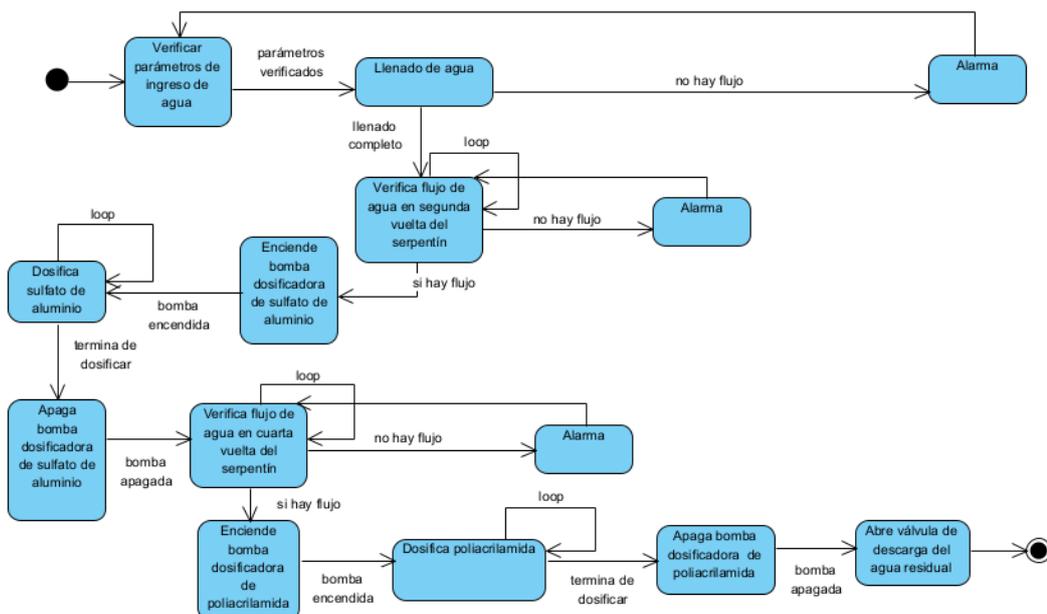


Figura 44 Diagrama de estados, subsistema de coagulación y floculación
Fuente: El Autor

Para el diagrama de máquina de estados del subsistema de coagulación y floculación que se muestra en la figura 44 los procesos principales son la verificación de flujo de agua en la segunda y cuarta vuelta del serpentín, pues a partir de eso se realiza la respectiva dosificación de productos químicos como coagulantes y floculantes.

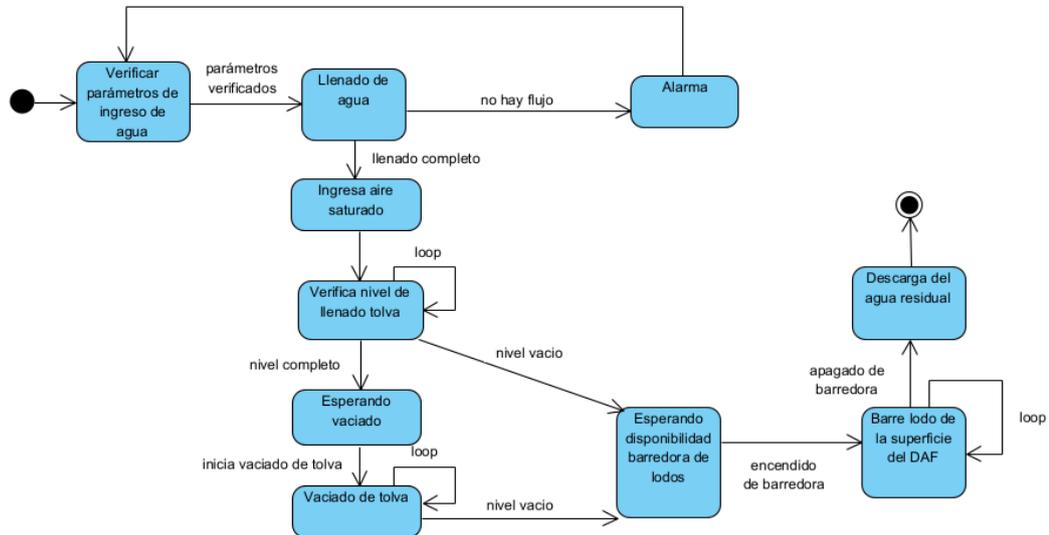


Figura 45 Diagrama de estados, subsistema de remoción de lodos
Fuente: El Autor

El diagrama de máquina de estados del tercer subsistema de remoción de lodos, contiene procesos que se realizan repetitivamente mientras el sistema está ejecutándose. Por ejemplo, “Solicita verificar nivel de llenado tolva” se va a llevar a cabo aun cuando se haya generado una alarma de vaciado y también mientras la barredora de lodos esté en funcionamiento. Es importante realizar esta verificación constantemente para evitar un rebose de lodos en la tolva y para que el agua residual que ingresa tenga espacio de tratamiento.

3.4.4 Modelado en Redes de Petri

Las redes de Petri son un modelo bien establecido de sistemas concurrentes, que se utilizan intensamente en el diseño, verificación, análisis y creación de prototipos y sistemas de control. En el presente proyecto, se utilizan herramientas computacionalmente eficientes para la síntesis de las redes de Petri, como Visión Object Net y PIPE que juegan un papel central en el diseño y entendimiento de las ecuaciones que generan el desarrollo de estas redes.

Tal como se ha mencionado en capítulos anteriores, las redes de Petri presentan distintos elementos que permiten identificar los componentes activos y pasivos, en este caso se realiza un breve recordatorio de cada uno para poder comprender el desarrollo de la red basada en los diagramas de estados UML de las figuras 43, 44 y 45.

Inicialmente se tienen los lugares que gráficamente están representados por un círculo o una elipse. Un lugar p siempre modela un componente pasivo: p puede almacenar, acumular o mostrar cosas. Un lugar tiene estados discretos. El segundo tipo de elementos de una red de Petri son las transiciones, que gráficamente, se representan por un rectángulo. La transición t siempre modela un componente activo: puede producir cosas, consumirlas, transportarlas o cambiarlas.

Estos lugares y transiciones mencionados anteriormente están conectados entre sí mediante arcos dirigidos, los mismos que están representados por una flecha. Este arco nunca modela un componente del sistema, sino una relación abstracta, a veces solo teórica, entre componentes como conexiones lógicas, derechos de acceso o enlaces inmediatos.

3.4.4.1 Diseño RdP del Subsistema: Estabilización de PH

En la figura 46 se presenta la Red de Petri del primer subsistema de Estabilización de PH, donde el estado inicial es la Verificación de los parámetros de ingreso de agua. A continuación, se tienen tres estados principales:

- Llenado de agua: Posee dos transiciones de decisión, la primera cuando realiza un llenado completo del agua y posteriormente se enlaza con el segundo estado principal, y la segunda cuando no existe flujo y pasa a un estado de alarma.
- Verificando nivel de PH: Este estado realiza una verificación del nivel de PH del agua residual, y posee tres transiciones de decisión: la primera, si el nivel de PH es óptimo, pasando así al tercer estado principal: la segunda, si el PH es mayor de 7.5 lo que provoca una serie de estados como: encendido de bomba dosificadora, dosificación y apagado de dosificadora esto siempre y cuando el PH sea óptimo: y la tercera,

cuando el PH es menor de 6.5 que funciona prácticamente igual que la anterior. Cabe recalcar que dicho estado sólo puede elegir entre una de las tres transiciones mencionadas.

- Descarga del agua residual: En este estado concluye el primer subsistema y da paso al segundo, que se describe a continuación.

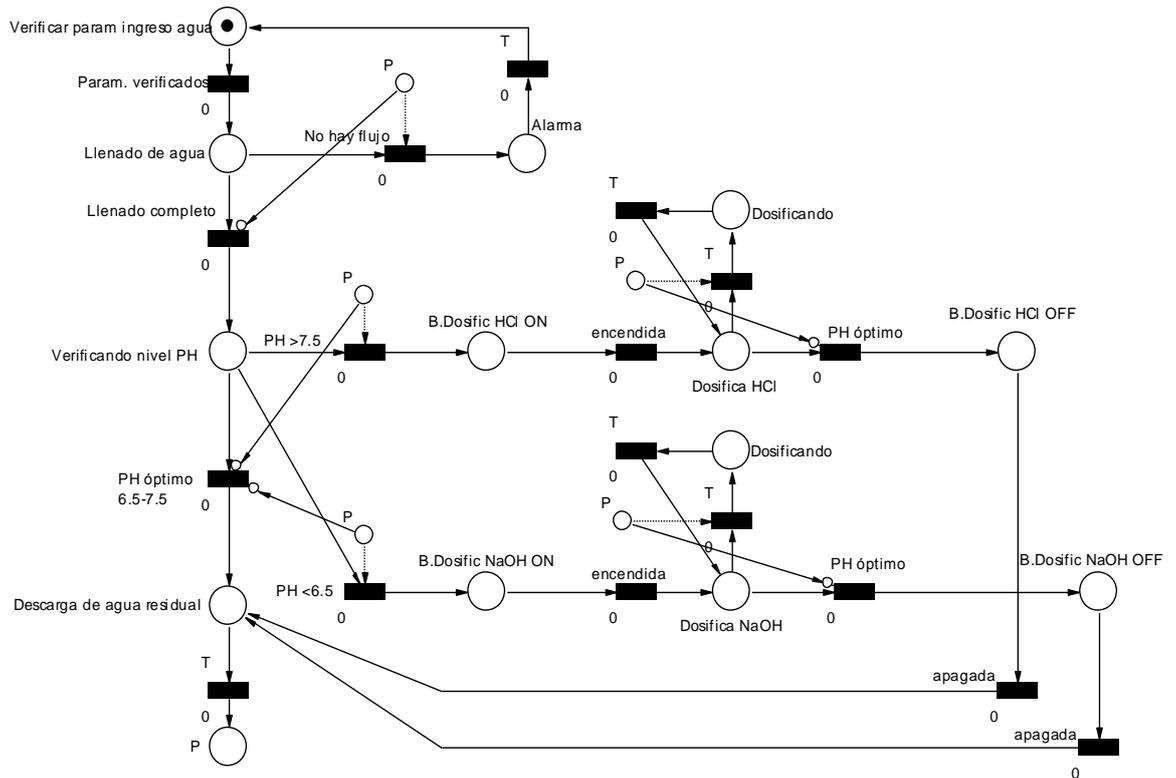


Figura 46 Red de Petri, subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

3.4.4.2 Red de Petri del Subsistema: Coagulación y floculación

Seguidamente, se muestra en la figura 47 la Red de Petri del subsistema de coagulación y floculación, el cual se compone de diez estados principales. Esta red al igual que la anterior inicia con un estado de Verificación de los parámetros de ingreso de agua residual.

Cabe recalcar que realiza dos verificaciones de flujo adicionales, esto con la finalidad de asegurarse que puede pasar al siguiente estado de dosificación. Cuando el token, se sitúa en el estado Dosificando, el mismo queda activo el tiempo que sea necesario y se da por finalizado únicamente por la transición Dosificación completa.

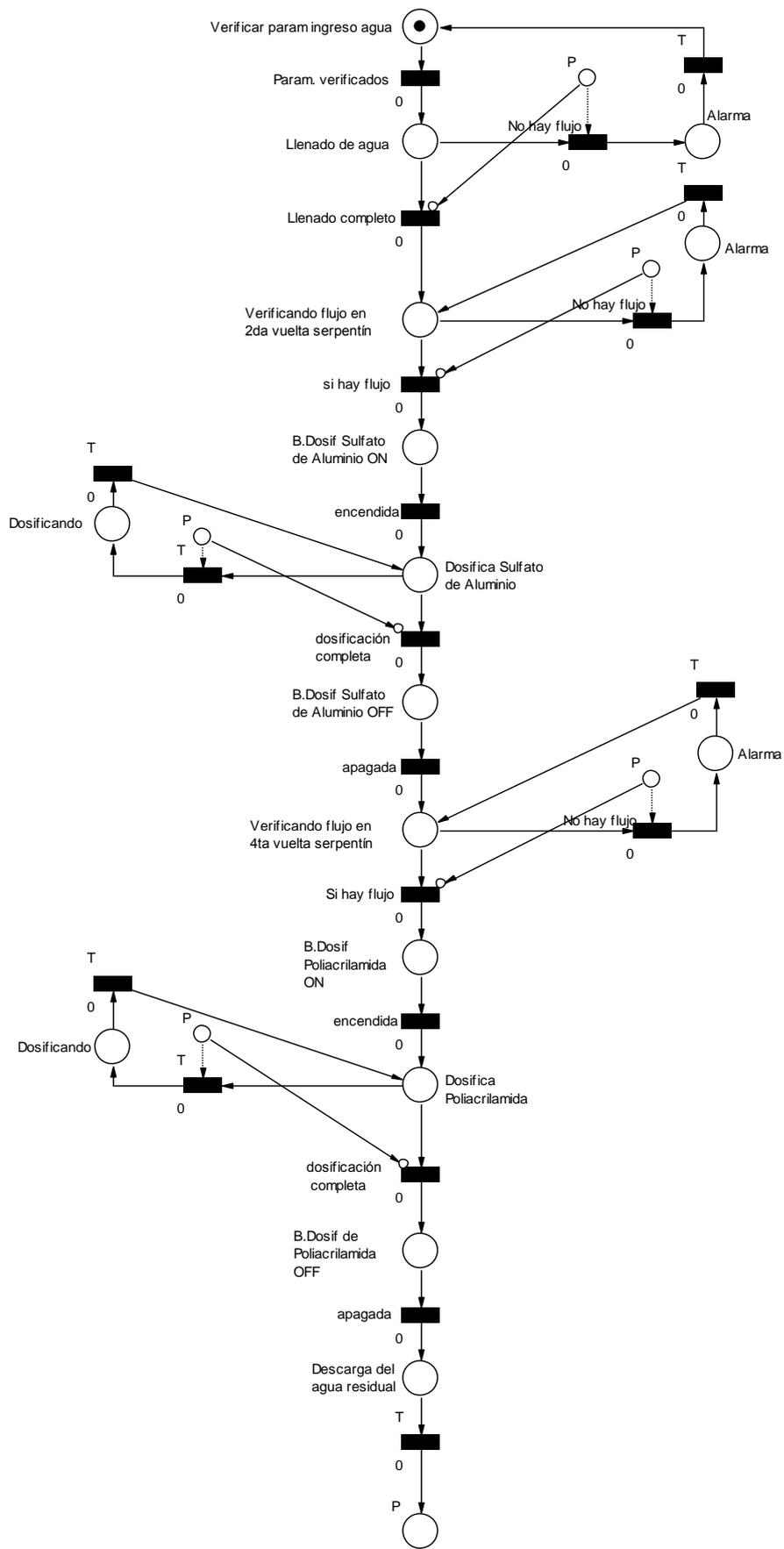


Figura 47 Red de Petri, subsistema de coagulación y floculación
Fuente: El Autor

3.4.4.3 Red de Petri del Subsistema: Remoción de sólidos

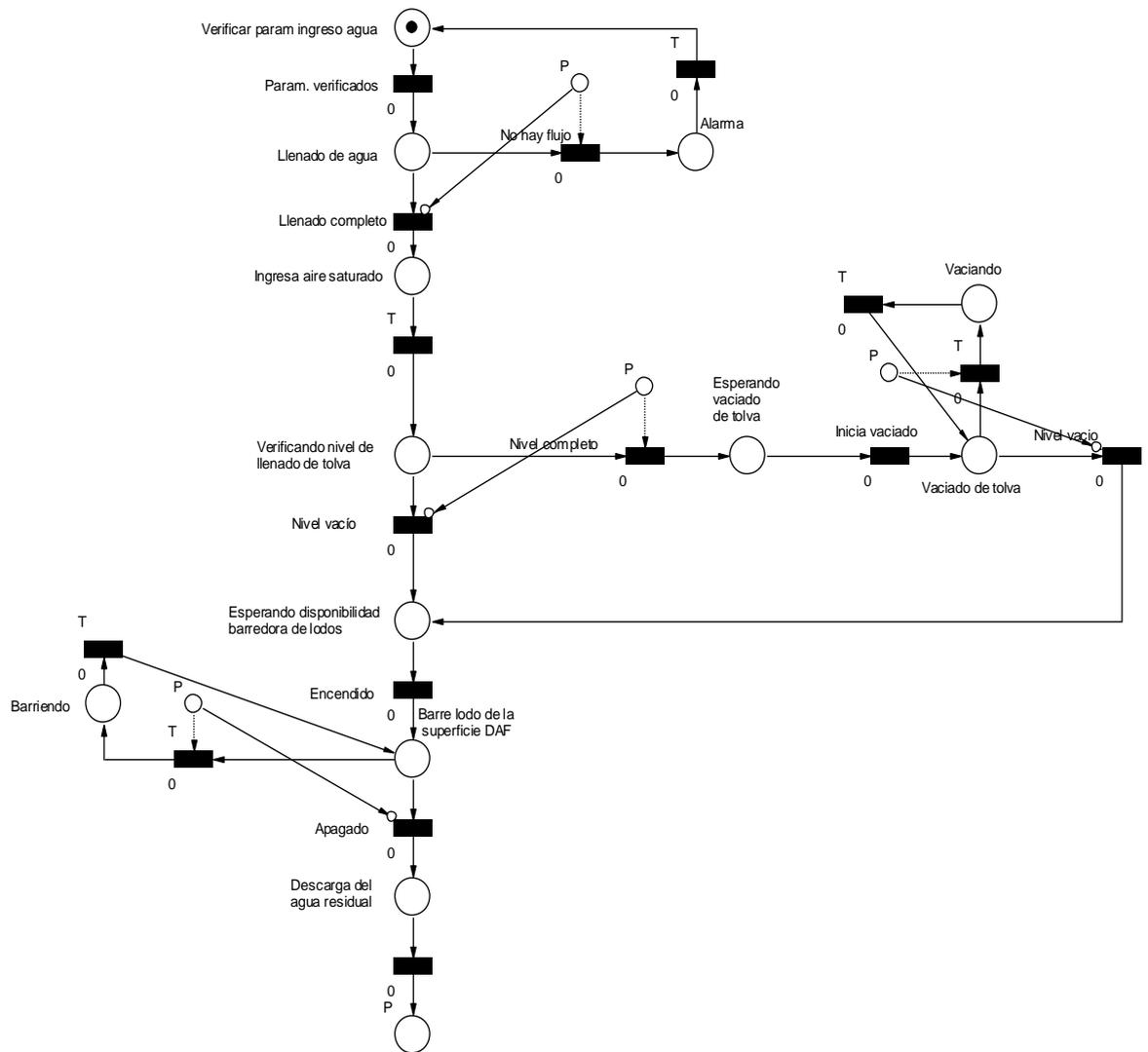


Figura 48 Red de Petri, subsistema de remoción de lodos
Fuente: El Autor

Finalmente, en la figura 48 se presenta la Red de Petri del subsistema de remoción de lodos, integrada por seis estados principales, iniciando con la respectiva verificación de parámetros de ingreso, y continuando con los siguientes estados, hasta llegar al estado de Verificando nivel de llenado de tolva, en el que el sistema continúa sin inconvenientes siempre y cuando el nivel esté vacío, caso contrario pasa por una transición de Iniciar vaciado, y por un estado de Vaciado de tolva, con la finalidad de que la tolva esté vacía y pueda conglomerar los lodos producidos por el estado de Barrido de lodos de la superficie DAF. Una vez que la barredora cumple su propósito se apaga y el agua residual pasa a la Segunda Etapa.

3.4.5 Ecuaciones de la RdP

Para comprobar la correcta funcionalidad de las Redes de Petri se hace uso de las matrices generadas con la ayuda del software PIPE. Esta herramienta facilita la identificación de inhibiciones, marcados, limitaciones, bloqueos, puntos muertos, seguridad de la red, etc.

A continuación, se presentan las matrices obtenidas de cada subsistema, según los parámetros a mencionar.

- **Matriz de inhibición H:** Mediante esta matriz se puede comprobar la propiedad de la limitación, considerando a la red como segura, dado que los números son únicamente binarios, es decir, “0” que representa que el lugar está vacío y “1” que representa que el lugar está ocupado. Seguidamente se muestran las tres matrices de inhibición, correspondientes a las figuras 49, 50 y 51.

Inhibition matrix <i>H</i>	
	T0 T1 T10 T11 T12 T13 T14 T15 T16 T17 T18 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9
P0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P10	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P11	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
P12	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P13	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P14	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P15	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P16	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P17	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P18	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P2	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
P4	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P5	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P6	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P7	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P8	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
P9	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Figura 49 Matriz de inhibición del subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

En caso de presentarse un número distinto a los ya mencionados, se dice que la red no cumple con la cualidad de limitación.

Inhibition matrix *H*

	T0	T1	T10	T11	T12	T13	T16	T17	T18	T19	T2	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T3	T5	T6	T8	T9
P0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 50 Matriz de inhibición del subsistema de coagulación y floculación
Fuente: El Autor

Inhibition matrix *H*

	T0	T1	T11	T12	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T9
P0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 51 Matriz de inhibición del subsistema de remoción
Fuente: El Autor

- **Marcado.** Dentro de esta matriz se designan las marcas iniciales del sistema y también aquellas que cumplen tareas externas.

En la figura 52 se muestran tokens en distintos lugares, la marca en P0 corresponde al inicio del subsistema y marcas en P10 y P16 ejecutan procesos externos inmersos en el subsistema.

		Marking																		
		P0	P1	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Initial		1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Current		1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 52 Matriz de marcado del subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

De la misma manera, en la figura 53 se muestra la marca en P0 de inicio y las marcas en P11 y P22 de acciones externas que integran el subsistema.

		Marking																					
		P0	P1	P10	P11	P12	P13	P14	P17	P18	P19	P2	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P3	P4	P7	P8	P9
Initial		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Current		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 53 Matriz de marcado del subsistema de coagulación y floculación
Fuente: El Autor

Asimismo, en la figura 54, existe una marca en P17 correspondiente a una acción integrada al subsistema y la marca en P0 que denota el inicio.

		Marking																
		P0	P1	P10	P13	P15	P16	P17	P18	P19	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Initial		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Current		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 54 Matriz de marcado del subsistema de remoción
Fuente: El Autor

- **Transiciones habilitadas.** En la figura 55 se muestra habilitada la marca “T2” debido a que es la transición que continúa luego de la marca “P0” nombrada como Verificación de parámetros de ingreso de agua que corresponde al inicio del subsistema.

Enabled transitions																	
T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	yes	no						

Figura 55 Transiciones habilitadas del subsistema de estabilización de PH
Fuente: El Autor

De la misma manera, la transición “T2” está habilitada en los subsistemas de coagulación-floculación y remoción tal como se muestra en las figuras 56 y 57.

Enabled transitions																					
T0	T1	T10	T11	T12	T13	T16	T17	T18	T19	T2	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T3	T5	T6	T8	T9
no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	yes	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no

Figura 56 Transiciones habilitadas del subsistema de coagulación y floculación

Enabled transitions																
T0	T1	T11	T12	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T9
yes	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	yes

Figura 57 Transiciones habilitadas del subsistema de remoción

- Análisis del espacio de estados:** Mediante este análisis se puede concluir que la red cumple con características importantes como: delimitación, seguridad y ausencia de puntos muertos. El primer parámetro es el de limitabilidad, el cual resultó verdadero, es decir, la red no posee más de una marca dentro de sus interacciones. Sin embargo, no se consideran los tokens asignados al inicio de cada subsistema, ni de aquellas tareas externas que se deban ejecutar. El segundo parámetro es el de alcanzabilidad, en el cual se afirma que la simulación de la red abarcará todos los estados posibles en determinado momento, sin excluir alguno de ellos. Finalmente, la ausencia de puntos muertos denota que la red no se inhibirá en algún momento y por ello afianza la propiedad de la vivacidad, lo que implica que los lazos infinitos no se producirán.

Petri net state space analysis results

Bounded	true
Safe	true
Deadlock	false

Figura 58 Resultados del análisis del espacio de estados de la red

Fuente: El Autor

En la figura 58 se presentan los resultados del análisis del espacio de estados de la red del primer subsistema. Cabe recalcar que los resultados para los dos subsistemas restantes, fueron los mismos y por ende sólo se hace uso de esta figura para evitar repeticiones.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados alcanzados en este trabajo de investigación, con el propósito de analizar y justificar el alcance de los objetivos planteados anteriormente, por medio de las arquitecturas y modelado del sistema.

4.1 Presentación de resultados

En esta sección se dan a conocer las aportaciones más relevantes producto de la elaboración y redacción del Estado del arte, diseño de las arquitecturas del sistema de control, comunicación y Scada. Adicionalmente se analiza el modelado del sistema a través de los diagramas UML y Redes de Petri.

4.1.1 Resultados del estado del arte

En esta sección inicialmente se reunieron un sinnúmero de artículos científicos sobre la Automatización de Plantas de Tratamiento Residuales Industriales con autores de diferentes partes del mundo. Luego se realizó un pre-filtrado destacando la actualidad de dichos artículos y la temática tratada. Dado que el objeto de estudio de este trabajo de investigación es la Primera Etapa, los artículos se seleccionaron en base a una perspectiva general, ya que las formas de subdividir las etapas o fases de este proceso de tratamiento no es standard y no hay un modelo en específico a seguir, más bien el proceso se adapta de acuerdo a la realidad de la industria, el entorno y la necesidad de tratamiento y de reutilización del agua.

Cabe recalcar que el aporte de los artículos finalmente seleccionados, contribuyó a entender que la Etapa Primaria es una de las etapas más complejas de controlar, ya que los procesos que la integran necesitan realizarse bajo parámetros y dosis preestablecidas y con mucha precisión. Lo que de alguna manera afecta si el proceso es llevado a cabo por una persona, que posiblemente en cualquier momento por alguna necesidad ajena, puede abandonar el sitio y descuidar el control y supervisión del sistema. De la misma manera se recalcó la importancia del control y supervisión de estas

Plantas de tratamiento de agua debido a su relación directa con el impacto que causa en el ambiente, si es que una o algunas de las fases de este proceso no se cumplen correctamente.

Las tecnologías implementadas en estos artículos para llevar a cabo el control y supervisión de tal proceso, van desde un control PID, uso de controladores programables, sistemas SCADA, utilización de programas como Unity Pro XL y Video-Designer, tecnologías IOT, etc., que de alguna manera contribuyen al ahorro significativo de energía, costos de mantenimiento, costos de aditivos químicos, mano de obra, reducción de fallos y errores, la conservación del medioambiente y la reutilización del recurso agua.

4.1.2 Resultados de las arquitecturas

En el presente trabajo de investigación se establecieron diferentes arquitecturas que fueron de gran ayuda para diseñar y modelar el correcto funcionamiento del sistema.

A continuación, se plantean los resultados para cada una de las arquitecturas:

- **Arquitectura de control:** Está dada por todos los elementos que hicieron posible el control del sistema, iniciando por la instrumentación de campo utilizada, como sensores y actuadores, el controlador lógico programable, el sistema de supervisión SCADA y finalmente el entorno ERP encargado de brindar información de alarmas que ayuden a disponer de un correcto funcionamiento del sistema, reduciendo errores y tiempo de paralizaciones.
- **Arquitectura de comunicación:** Encargada de establecer el tipo de comunicación entre la instrumentación de campo, el controlador programable y el sistema de supervisión. En el presente proyecto se planteó el uso del protocolo Modbus para la interacción de los equipos.
- **Arquitectura del sistema SCADA:** Encargada de supervisar el proceso y de mostrar los valores de los parámetros medidos y aquellas alarmas presentadas al operario, accediendo al servidor a través de la red de comunicación previamente establecida.

4.1.3 Resultados del modelado UML y RdP

Los diagramas de modelado UML permitieron definir el sistema, los actores y las tareas a ejecutar por cada uno de ellos. Se definieron tres subsistemas: estabilización de PH, coagulación - floculación y remoción de sólidos, para cada uno se desarrollaron diagramas de casos de usos, de secuencia y de estados. Los primeros permitieron exponer el comportamiento del subsistema y su relación con los actores externos: el controlador y operario. Los diagramas de secuencia, mostraron la interacción entre los objetos del subsistema a lo largo del tiempo y cuáles eran los mensajes que se enviaban y recibían con la finalidad de ejecutar alguna acción. Finalmente, los diagramas de estados presentan las transiciones que fluyen de un estado a otro, denotando así los escenarios posibles para un sistema en respuesta de un evento previo.

Se elaboró el modelado con RdP para cada subsistema, comprobando la funcionalidad correcta y fiabilidad de la red, mediante la matriz de inhibición se confirmó que la red cumple con el parámetro de limitación, ya que los únicos números presentados eran "0" y "1". Con respecto al indicador "punto muerto" el resultado del análisis de las tres redes elaboradas, reafirmó que no se obtienen lazos infinitos dado que el parámetro es falso. Este análisis también asegura la propiedad de la vivacidad que consiste en que la RdP debe carecer de punto muerto, si es que existe alguna transición viva.

4.2 Discusión de resultados

En esta parte se muestran los resultados relacionados a las funciones de desempeño del sistema y se realiza una discusión en cuanto los objetivos propuestos inicialmente y su respectivo cumplimiento. Adicional se plantean soluciones al problema de investigación con la finalidad de verificar el aporte de esta arquitectura en las industrias.

4.2.1 Discusión del cumplimiento de los requisitos funcionales

Los diagramas UML de casos de uso y diagramas de estado permitieron verificar la ejecución de las funciones secundarias del sistema que

previamente fueron establecidas en el capítulo tres, estas funciones están enmarcadas en el campo de la supervisión, entre ellas se encuentran:

- Adquisición de datos y eventos del sensor: Referida principalmente a las solicitudes de verificación por parte de los sensores; PH del agua residual, flujo de agua, nivel de llenado de la tolva de lodos. Asimismo, se plantean respuestas de acuerdo a la señal que ingresa al sensor: positivas, que permiten que el proceso continúe con normalidad o negativas que se ven en la necesidad de realizar correcciones en el proceso y de emitir alguna alarma.
- Almacenamiento de los valores del sensor y el estado de la salida de control: Esto se lleva a cabo, con la finalidad de mostrarle al operario el estado de los sensores y actuadores que intervienen en el proceso.
- Generación y envío de alarmas: Se ejecuta por medio del controlador, el cual envía alarmas de fallos o anomalías en el sistema. Por ejemplo, cuando no hay flujo de ingreso de agua residual, lo que implica que el proceso no puede continuar y debe realizar nuevamente la verificación de parámetros inicial. Adicionalmente, en la segunda y cuarta vuelta del serpentín se producen nuevas alarmas en caso de existir ausencia de flujo de agua. Una de las ventajas de esta función es que permite corregir a tiempo los errores y contribuye al ahorro de costes en aditivos químicos, puesto que, sin presencia de flujo de agua residual, no es posible ni viable dosificar productos químicos.

Mediante el modelado de las RdP se comprueban las funciones principales del sistema desarrolladas en los diagramas de estados y que están enmarcadas en el ámbito del control, entre ellas se encuentran:

- Estabilización del PH del agua residual: Esto se logra gracias a la ejecución del control de secuencia de encendido y apagado de bombas dosificadoras, dependiendo del rango de PH sensado se enciende una de las dos bombas dosificadoras en situ, puede ser la de ácido muriático o la de soda caustica, y se pagan una vez alcanzado el PH óptimo, lo que provoca que el agua residual pueda pasar al siguiente subsistema.

- Control de la secuencia de encendido y apagado de las bombas dosificadoras de químicos: Que permiten una dosificación adecuada evitando pérdida del producto.
- Control de ingreso del agua residual al serpentín: Se lleva a cabo inicialmente en el segundo subsistema, adicionalmente se realizan verificaciones en la segunda y cuarta vuelta.
- Accionamiento de la barredora de lodos: Según la disponibilidad y el nivel de llenado de la tolva.
- Monitoreo de la salida del agua residual y su posterior ingreso a la siguiente etapa: Cada subsistema está diseñado para realizar una verificación de ingreso del agua residual, a fin de que el proceso se ejecute correctamente.

Finalmente se puede concluir que las funciones destinadas al desenvolvimiento del sistema se cumplen a cabalidad gracias al modelado UML de RdP.

4.2.2 Cumplimiento de objetivos

En este apartado se presenta un análisis del cumplimiento del objetivo general y aquellos objetivos específicos planteados en el primer capítulo del presente trabajo de investigación.

4.2.2.1 Cumplimiento del objetivo general

Se cumplió con la propuesta de proyectar una arquitectura de control y automatización para la primera etapa del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, pues mediante el modelado de los diagramas UML se establecieron los límites, comportamiento y la estructura de cada subsistema que integran al proceso en general. De la misma forma, mediante las redes de Petri, se simularon cada uno de los subsistemas asegurando su correcto funcionamiento, contribuyendo así con la minimización del impacto ambiental negativo generado por el tratamiento inadecuado de las aguas residuales. Se concluye que las redes funcionan correctamente y para el propósito establecido.

4.2.2.2 Cumplimiento de objetivos específicos

- Se logró elaborar diagramas de flujo que permitieran definir el sistema de control y automatización en general. De la misma manera se elaboraron diagramas de flujo para cada una de las fases: estabilización de PH, coagulación-floculación y remoción que integran esta primera etapa denominándolos como subsistemas.
- Se logró modelar cada subsistema de control y automatización mediante diagramas de casos de uso, secuencia y estados, integrando los actores principales, dispositivos de medición y dosificación y aquellos de supervisión. Así mismo se delimitaron las funciones y acciones para cada uno.
- Se evaluó el comportamiento de cada subsistema mediante la simulación de las RdP con la ayuda de los softwares Vision Object Net y PIPE, analizando cada una de las ecuaciones obtenidas para cada subsistema, demostrando finalmente un correcto funcionamiento.

4.2.3 Solución al problema de investigación

¿Cuánto influye la arquitectura de automatización en el control y supervisión eficiente de la primera etapa del tratamiento de aguas residuales de una industria pesquera?

Partiendo de esta problemática se destaca la necesidad de diseñar y evaluar una arquitectura de automatización que permita el control de los equipos que integran el sistema y de la misma manera establecer los actores involucrados en la supervisión del mismo. Para ello el primer paso fue una investigación basada en artículos científicos sobre formas de automatización de una PTAR y cuáles fueron los beneficios obtenidos en su implementación. Seguidamente, se establecieron las funciones del sistema y se subdividieron las fases de esta primera etapa de tratamiento con la finalidad de analizar el desenvolvimiento de cada subsistema. De la misma manera, los diagramas UML permitieron aclarar las funcionalidades de cada sistema, sus actores y la relación con aquellos dispositivos de control y supervisión, con el propósito de evidenciar el ahorro de costes por mano de obra, mantenimiento, tiempos perdidos por averías, ahorro de energía y de productos químicos. Finalmente

se evaluó el correcto funcionamiento de la arquitectura de automatización mediante la simulación de las RdP y sus ecuaciones, lo que permite constatar que lo anteriormente mencionado da solución al problema de investigación planteado.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones originadas a partir de la finalización del presente trabajo investigativo. Adicionalmente se exponen algunas consideraciones que pueden ser tomadas en cuenta en trabajos de investigación futuros vinculados al tema.

5.1 Conclusiones

- Se propuso la arquitectura de automatización y control para la primera etapa del tratamiento, por ser una de las fases más complicadas de controlar y tratar adecuadamente. Esta arquitectura, permitirá llevar a cabo una correcta reutilización del agua residual en la industria, ahorrar costes de operación, aditivos químicos, mantenimiento y supervisión. Además de realizar una importante contribución con el medioambiente.
- Las arquitecturas de control, comunicación y supervisión propuestas en el presente trabajo investigativo permitieron establecer una comunicación efectiva entre los dispositivos de campo de control, asimismo las funciones principales y secundarias del sistema se cumplieron a cabalidad.
- El uso de un controlador programable como instrumento de control favorece a transferir las señales de control a varios dispositivos de campo, aumentando la compatibilidad de varios equipos a través de interfaces y protocolos, también permite una interoperabilidad con la implementación de supervisión SCADA.
- El modelado por medio de los diagramas UML permite determinar el comportamiento de los subsistemas, definiendo los requisitos funcionales de cada uno.
- De la misma manera las RdP, permiten determinar el comportamiento dinámico por medio de la simulación y análisis de sus ecuaciones asegurando un correcto diseño y funcionamiento.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda la utilización de los softwares E-Draw para la esquematización y realización de diagramas de flujos; Visual Object Net y PIPE que son herramientas de código abierto que permiten el diseño, simulación y análisis de las Redes de Petri.
- Es importante dividir los sistemas complejos en subsistemas y posteriormente modelarlos en subredes, ya que permiten una simulación más sencilla.
- A los estudiantes, investigar y analizar temáticas relacionadas con la reutilización y reúso de recursos ambientales aprovechando el uso de procesos automatizados y de supervisión, con la finalidad de contribuir a preservar el medioambiente.
- A la comunidad, continuar con el desarrollo de estrategias y procesos de automatización que permitan a las industrias resolver problemáticas importantes de sus procesos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo N° 97/A - Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. (2015). En Ministerio del Ambiente, *Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Vol. VI (387.^a ed.)*.
<https://www.informea.org/es/node/333086>
- Arcila, H., & Peralta, J. (2016). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11, 136.
<https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>
- Ashagre, B. B., Fu, G., & Butler, D. (2020). Automation and real-time control of urban wastewater systems: A review of the move towards sustainability. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 69(8), 751-768. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.074>
- Bagyaveereswaran, V., Vijayan, A., Manimozhi, M., & Anitha, R. (2016). Automation and On-Line Monitoring of Effluent Treatment Plant. *International Journal of Chemical Sciences*, 14(4), 3167-3178.
- Carreño, R. M., Palá, M. O., Corona, T. P., Rubio, M. V. A., Albarrán, Y. M., Sánchez, J. C. D., & García, P. (2019). *Tratamiento de aguas: Ejercicios resueltos y prácticas de laboratorio* (1era ed.). Dextra Editorial S.L.
- David, R., & Alla, H. (2010). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets* (2.^a ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10669-9>
- Dey, C., & Sen, S. K. (2020). *Industrial automation technologies*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2493423>
- Diaz, M. (Ed.). (2013). *Petri Nets: Fundamental Models, Verification and Applications*.
- Drenoyanis, A., Raad, R., Wady, I., & Krogh, C. (2019). Implementation of an IoT Based Radar Sensor Network for Wastewater Management. *Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part B*. <https://doi.org/10.3390/s19020254>

- Hussain, A., & Bhattacharya, A. (2019). *Advanced Design of Wastewater Treatment Plants: Emerging Research and Opportunities*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9441-3>
- Lamb, F. (2013). *Industrial Automation: Hands On* (1era ed.). McGraw-Hill Education. <https://b-ok.lat/book/2481481/e696d6>
- Manchester, N. (2021). *Bomba dosificadora electromagnetica Serie EHE*. Walchem. <https://www.walchem.com/serie-ehe/?lang=es>
- Marín Galvín, R. (2014). *Tratamiento y depuración industrial de aguas*. Ediciones Díaz de Santos. https://www21.ucsg.edu.ec:2653/es/lc/ucsg/titulos/62911?as_all=plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales&as_all_op=unaccent__icontains&fs_page=2&prev=as
- Mehta, B., & Reddy, Y. (2015). *Industrial process automation systems: Design and implementation*. Elsevier. <https://b-ok.lat/book/2572980/34c562>
- Moldovan, A., & Nuca, I. (2019). Automation of Wastewater Treatment Plant. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905867>
- Murillo, D. (2008). Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Abril 2008*, 21(4). https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/231
- Orhon, D., Babuna, F. G., & Karahan, O. (2009). *Industrial Wastewater Treatment by Activated Sludge*. Iwa Publishing. <https://www.bookdepository.com/es/Industrial-Wastewater-Treatment-by-Activated-Sludge-Derin-Orhon/9781843391449>
- Pressman, R. S. (2010). *Ingeniería del software: Un enfoque practico* (7ma ed.). McGraw-Hill. <https://www.amazon.es/Ingenieria-del-software-enfoque-practico/dp/8448111869>
- Prieto, J. H. P. (2018). *Metodología de la investigación* (1era ed.). Pearson Educación de México, S.A.

- Process Instruments. (2021). *Medidor de pH*. Process Instruments. <http://www.processinstruments.mx/productos/medidor-ph/>
- Ramalho, R. (2003). *Introduction to Wastewater Treatment Processes* (1era ed.). Reverté S.A. <https://www.freelibros.me/quimica/tratamiento-de-aguas-residuales-r-s-ramalho>
- Ranade, V. V., & Bhandari, V. M. (2014). *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06975-X>
- Ravi Mukeshbhai, S., Daxesh, P., & Vipul, S. (2019). *PLC Based Automation Of Sewage Treatment Plant*. *VII(1)*, 252-258.
- Revollar, S., Vilanova, R., Vega, P., Francisco, M., & Meneses, M. (2020). Wastewater Treatment Plant Operation: Simple Control Schemes with a Holistic Perspective. *Sustainability*, *12*, 768. <https://doi.org/10.3390/su12030768>
- Ronzano Llodra, E. (2007). *Tratamiento biológico de las aguas residuales*. Ediciones Díaz de Santos. <https://www21.ucsg.edu.ec:2653/es/ereader/ucsg/52898>
- Salas Colotta, G. (2004). Diseño de un flotador por aire disuelto (DAF) en el Tratamiento del agua residual de una textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, *7(1)*, 36-39.
- Sangitrao, R. R. (2016). Automation of sewage treatment plant using PLC & SCADA. *Int. J. Adv. Res. Electr. Electr. Instr. Eng*, *5*, 8627-8637.
- Seneviratne, M. (2016). *Wastewater Treatment Technologies*. Roadmap to Zero de la ZDHC. <https://toaz.info/doc-viewer>
- Sivchenko, N., Kvaal, K., & Ratnaweera, H. (2018). Floc sensor prototype tested in the municipal wastewater treatment plant. *Cogent Engineering*, *5(1)*, 1436929. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1436929>
- Sonawane, S., Setty, P., Narsaiah, B., & Naik, S. (Eds.). (2018). *Innovative Technologies for the Treatment of Industrial Wastewater: A Sustainable Approach*. <https://b-ok.lat/book/3419070/167994>

- South African Local Government Association, & Water Research Commission. (2016). *Wastewater treatment technologies* (p. 36). <https://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=7079&l=es>
- van Loosdrecht, M. C. M., & Brdjanovic, D. (2014). Anticipating the next century of wastewater treatment. *Science*, *344*(6191), 1452. <https://doi.org/10.1126/science.1255183>
- Wun Ng, J. (2006). *Industrial Wastewater Treatment* (p. 153). <https://doi.org/10.1142/P405>
- Zhang, W., Ma, F., Ren, M., & Yang, F. (2021). Application with Internet of things technology in the municipal industrial wastewater treatment based on membrane bioreactor process. *Applied Water Science*, *11*, 52. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01375-8>
- Zhang, W., Tooker, N. B., & Mueller, A. V. (2020). Enabling wastewater treatment process automation: Leveraging innovations in real-time sensing, data analysis, and online controls. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *6*(11), 2973-2992. <https://doi.org/10.1039/D0EW00394H>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Loor Rodríguez, María José**, con C.C: # 2400147795 autora del trabajo de titulación: **Automatización de la Etapa Primaria en el Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 16 de septiembre de 2021



Nombre: **Loor Rodríguez, María José**

C.C: **2400147795**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Automatización de la Etapa Primaria en el Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales		
AUTOR(ES)	Loor Rodriguez María José		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Msc. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Educación Técnica para el Desarrollo)		
CARRERA:	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	16 de septiembre de 2021	No. DE PÁGINAS:	93
ÁREAS TEMÁTICAS:	Automatización, aguas residuales, supervisión		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Automatización; Control y supervisión; Tratamiento Primario; Aguas Residuales; Redes de Petri		
RESUMEN/ABSTRACT			
<p>Actualmente la automatización de los procesos llevados a cabo dentro de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, contribuyen a mejorar notablemente la calidad del agua, ya sea para el vertimiento al medio acuático o para fines de reutilización. Esta automatización de procesos es de vital importancia ya que implica menos consumo y costes por energía reduciendo el desgaste de los equipos, prolongando su vida útil, reducción de mano de obra en áreas específicas, aprovechamiento del tiempo debido a la disminución de averías, y reducción de costes por aditivos químicos evitando el desperdicio. El presente trabajo de investigación tiene como finalidad proponer una arquitectura de automatización para el control y supervisión eficiente de la primera etapa de tratamiento, dado que es una de las fases más complejas de monitorear, debido al gran uso de instrumentos de campo como sensores y actuadores, instrumentos de control y supervisión como controladores lógicos programables y sistemas Scada. El modelado mediante diagramas de casos de uso, secuencia y estados atribuidos al Lenguaje Unificado de Modelado (UML) permitió elaborar, diseñar y definir los actores y funciones de los subsistemas que integran la Etapa Primaria. La simulación se asistió mediante el uso de Redes de Petri, lo que permitió determinar la correcta funcionalidad de los subsistemas gracias al cumplimiento de sus propiedades de vivacidad, limitación y alcanzabilidad. Ambas herramientas fueron de gran ayuda para el aseguramiento del dinamismo del sistema en general.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-59473179	E-mail: majo60798@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsq.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			