



**Diseño y simulación de una lógica de control para las etapas de proceso en el
tratamiento de aguas de producción mediante el uso de un PLC e interfaz gráfica**

Ricardo Pesca Niño

11131227887

Universidad Antonio Nariño

Facultad de ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ingeniería electromecánica

Bogotá D.C, Colombia

2023

**Diseño y simulación de una lógica de control para las etapas de proceso en el
tratamiento de aguas de producción mediante el uso de un PLC e interfaz gráfica**

Ricardo Pesca Niño

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director

Ing. José Germán Gutiérrez

Universidad Antonio Nariño

Facultad de ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ingeniería electromecánica

Bogotá D.C, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado Diseño y simulación de una lógica de control para las etapas de proceso en el tratamiento de aguas de producción mediante el uso de un PLC e interfaz gráfica, cumple con los requisitos para optar Al título de Ingeniero Electromecánico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá DC, 24 de abril de 2023

Dedicatoria

A mis hijos, sobrinos, y a esas personas que vienen atrás de nosotros, entendiendo que la vida es de sueños que podemos hacerlos realidad, no debemos dejar de luchar, caer y levantarse las veces que sea necesario.... este es el lema, porque cada cosa que existe fue el sueño de alguien que no desistió, que se levantó las veces que fue necesario...

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a DIOS, a la Virgen y al Divino niño, a mi madre, Mi Betty, a mi padre, a mis hijos, mis hermanos y todas las personas que me rodearon desde que empecé, y hasta el final de este proyecto de estudio, gracias por su apoyo incondicional, a quienes hicieron parte de mi porque fueron motivación durante esta etapa de mi vida. Agradecimiento especial a los docentes de la Universidad Antonio Nariño quienes, con su sabiduría y paciencia, decidieron compartir conmigo parte de su vida, su tiempo, muchos días de enseñanza en cada tema en cada materia, a mis compañeros que estuvieron acompañándome durante este proceso de aprendizaje, gracias por su compañía y soporte para el desarrollo de mi carrera como Ingeniero Electromecánico.

Tabla de contenido

	Pag.
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes	13
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo general.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 JUSTIFICACIÓN	18
4 MARCO TEÓRICO.....	20
4.1 Historia de la automatización industrial.	20
4.2 Tipos de sistemas de automatización.....	23
4.3 Componentes de un sistema automatizado.	26
4.3.1 Sensores.....	27
4.3.2 Actuadores.	28
4.3.3 Controladores.....	28
4.4 Sistemas de control de procesos.	29
4.5 Programación de sistemas automatizados.....	31
4.6 Diseño y simulación de sistemas automatizados.	33
5 DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
5.1 Fase 1: Filosofía de operación básica para cada etapa del proceso de tratamiento de agua.	35
5.2 Fase 2: Selección del controlador lógico y componentes del sistema de control.	35
5.3 Fase 3: Diseño y desarrollo de la lógica de control.	36
5.4 Fase 4: Desarrollo de la interfaz gráfica y evaluación del STAP.	36
6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
6.1 Filosofía de operación básica del STAP.	37

6.1.1	Filosofía de operación del depurador, representación P&ID.....	37
6.1.2	Filosofía de operación del desnatador o celda de flotación, representación P&ID	40
6.1.3	Filosofía de operación Filtro cáscara de nuez, representación P&ID.....	44
6.1.4	Filosofía de operación del tanque decantador, representación P&ID.....	50
6.2	Controlador lógico y componentes del sistema de control.	53
6.2.1	PLC 1769-L30ER CompactLogix 5370 Controller.....	53
6.2.2	FlexIO 1794-AENT 1794 10/100 Mbps Ethernet Adapter.....	56
6.2.3	Módulo de entradas digitales 1769-IQ16 16 Point 24 VDC Input	58
6.2.4	Módulo de salidas digitales 1769-OB16 24 VDC Output	60
6.2.5	Módulo de entradas digitales 1794-IB16 24 VDC Input	61
6.2.6	Módulo de salidas digitales 1794-OB16 24 VDC Output	63
6.2.7	Módulo de entradas analógicas 1794-IE8.....	65
6.2.8	Módulo de salidas analógicas 1794-OE4.....	66
6.2.9	Switch de comunicaciones Stratix 2000	68
6.2.10	PanelView Plus 7	71
6.3	Diseño y desarrollo de la lógica de control.....	73
6.3.1	STUDIO 5000.....	74
6.3.2	Lógica de programación el lenguaje Ladder, proyecto STAP.....	75
6.4	Factory Talk View Studio.....	88
6.4.1	Desarrollo de la interfaz gráfica, proyecto STAP.....	90
	CONCLUSIONES.....	98
	ANEXOS.....	101
	BIBLIOGRAFÍA	102

Lista de figuras

	Pág.
Figura 4-1 El automatismo a finales del siglo XIX: Fundición de la fábrica norteamericana Westinghouse.....	21
Figura 4-2 Honeywell TDC 2000 and Yokogawa CENTUM.	22
Figura 4-3 Automatización en la actualidad, línea ensambladora de automóviles.....	23
Figura 4-4 Control de procesos industriales alimentarios.....	24
Figura 4-5 Proceso de soldadura con robots	25
Figura 4-6 Ejemplo de sistema de producción industrial: demostrador neumático de laboratorio	26
Figura 4-7 Sensorica industrial	27
Figura 4-8 Actuadores industriales	28
Figura 4-9 Controladores lógicos programables PLC	29
Figura 4-10 Sistema de lazo abierto y cerrado-Diagrama de bloques.	30
Figura 4-11 Programación tipo escalera (Ladder).	32
Figura 4-12 Simulación de procesos industriales-control de presión, nivel, flujo.....	34
Figura 6-1 Vista de un depurador o scrubber.....	38
Figura 6-2 P&ID etapa de depuración STAP	39
Figura 6-3 Vista de un desnatador/celda de flotación.....	41
Figura 6-4 Unidad de flotación.....	42
Figura 6-5 P&ID etapa de desnate STAP	43
Figura 6-6 Sistema de filtración con cáscara de nuez.....	45
Figura 6-7 Unidad de filtración de aguas aceitosas	46
Figura 6-8 P&ID etapa de filtración STAP.....	47
Figura 6-9 Diagrama de flujo filosofía de operación etapa de filtración STAP	48
Figura 6-10 Tanque decantador Estación de producción de crudo.....	50
Figura 6-11 P&ID etapa de decantación STAP	51
Figura 6-12 Diagrama de flujo filosofía de operación etapa de decantación STAP.....	52
Figura 6-13 Anatomía PLC 1769 (L30ER)	54
Figura 6-14 Parte frontal FlexIO EtherNet/IP	56
Figura 6-15 Módulo de entradas digitales 1769-IQ16.....	58

Figura 6-16 Módulo de salidas digitales 1769-OB16.....	60
Figura 6-17 Vista frontal modulo 1794-IB16 24 VDC.....	61
Figura 6-18 Vista módulo de salidas digitales 1794-OB16 24 VDC Output	63
Figura 6-19 Vista módulo de entradas analógicas 1794-IE8	65
Figura 6-20 Vista módulo de salidas analógicas 1794-OE4.....	67
Figura 6-21 Vista Switch Stratix 2000.....	69
Figura 6-22 Vista PanelView Plus 7 9”	71
Figura 6-23 Studio 5000, software de diseño de sistemas de automatización.....	74
Figura 6-24 Estructura de tareas programadas.....	76
Figura 6-25 Rutinas de escalado señal analógica de entrada PDIT-01.....	77
Figura 6-26 Rutinas de escalado señal analógica de salida FCV-03	78
Figura 6-27 Rutinas de escalado señales digitales de entrada ZSO/ZSC-07 posición FV-07 decantador	79
Figura 6-28 Rutinas de escalado señales digitales de entrada ZSO/ZSC-01 posición FV-01 filtro	80
Figura 6-29 Rutinas de escalado señales digitales de salida bobina FV-07 decantador.....	82
Figura 6-30 Rutinas de escalado señales digitales de salida bobina FV-01 filtro	83
Figura 6-31 Rutina de envío de datos de tiempo estado de filtración a HMI	84
Figura 6-32 Rutina de programación de tiempos en estado de Descarga Decantador.....	85
Figura 6-33 Rutina de programación del lazo de control de nivel de aceites LIC-01 del depurador	86
Figura 6-34 Rutinas de programación de arranque de los agitadores y desnatadores.	86
Figura 6-35 Rutina de programación estado de Aislamiento filtro.....	87
Figura 6-36 Llamado de rutinas para ejecutar en el PLC	88
Figura 6-37 Factory Talk View Studio-Rockwell Automation	89
Figura 6-38 Creación de pantallas proyecto STAP.....	91
Figura 6-39 Pantalla vista general del STAP	92
Figura 6-40 Pantalla Proceso de Depuración STAP.....	93
Figura 6-41 Pantalla Proceso de depuración STAP	94
Figura 6-42 Pantalla Proceso de Filtración STAP	95
Figura 6-43 Pantalla Proceso de decantación STAP.....	97

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Características del controlador lógico programable	55
Tabla 2 Características técnicas FlexIO EtherNet/IP.....	57
Tabla 3 Especificaciones técnicas del 1769-IQ16	59
Tabla 4 Características del hardware PanelView Plus 7.....	72
Tabla 5 Lista de señales de instrumentación entradas análogas AI	77
Tabla 6 Lista de señales de instrumentación salidas análogas AO.....	78
Tabla 7 Lista de señales de instrumentación entradas digitales DI_Decantador	80
Tabla 8 Lista de señales de instrumentación entradas digitales DI_Filtros	81
Tabla 9 Lista de señales de instrumentación salidas digitales DO_Decantador	82
Tabla 10 Lista de señales de instrumentación salidas digitales DO_Filtros	83

Resumen

En los últimos años, la explotación de hidrocarburos se ha convertido en la principal fuente económica de nuestro país. Sin embargo, la producción de petróleo conlleva el tratamiento de aguas provenientes de los yacimientos, lo cual representa un desafío para las empresas petroleras. Actualmente, muchas de estas empresas operan sus Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) de manera manual, lo que implica mayores tiempos de procesamiento, riesgos operacionales y baja eficiencia.

Con el fin de optimizar los recursos y reducir los riesgos, se propone diseñar una lógica de control automatizada en un STAP. Esta lógica de control se basa en el uso de controladores lógicos programables (PLC) y permite la ejecución automática de las diferentes etapas del proceso de tratamiento, como la depuración, el desnate, la filtración y la decantación.

Además, se plantea el uso de una interfaz hombre-máquina (HMI) que permita la interacción del usuario con el sistema. Esta pantalla HMI mostrará los gráficos en tiempo real de las variables relevantes, permitiendo establecer valores de referencia y realizar operaciones necesarias. De esta manera, el operario podrá monitorear de manera remota y segura el proceso de tratamiento.

La lógica de control propuesta no solo incluye acciones de control lógicas, como el control de flujo, nivel y presión, sino también acciones de seguridad para prevenir problemas o riesgos potenciales. Por ejemplo, el sistema detendrá automáticamente una bomba si la presión de succión es baja o cerrará una válvula si el nivel de un tanque es alto.

La implementación de esta lógica de control automatizada en los STAP ofrece múltiples beneficios. En primer lugar, se reducirá el tiempo de procesamiento en cada etapa del tratamiento,

lo que se traducirá en una mayor eficiencia y producción. Además, se disminuirá la intervención humana en los equipos, mitigando los riesgos operacionales y aumentando la seguridad industrial.

Palabras claves: Tratamiento de agua, lógica de control, Sistema de Tratamiento de Aguas de Produccion STAP, confiabilidad, procesos industriales.

Abstract

In recent years, the exploitation of hydrocarbons has become the main economic source of our country. However, oil production involves the treatment of water from the reservoirs, which poses a challenge for oil companies. Currently, many of these companies operate the Systems of Produced Water Treatment (STAP) manually, resulting in longer processing times, operational risks, and low efficiency.

To optimize resources and reduce risks, it is proposed to design automated control logic in STAP. This control logic is based on the use of programmable logic controllers (PLCs) and enables the automatic execution of different stages of the treatment process, such as purification, skimming, filtration, and decantation.

Additionally, the use of a human-machine interface (HMI) is proposed to facilitate user interaction with the system. This HMI screen will display real-time graphics of relevant variables, allowing for the establishment of reference values and necessary operations. Consequently, operators can remotely and safely monitor the treatment process.

The proposed control logic includes not only logical control actions, such as flow control, level control, and pressure control but also safety actions to prevent potential issues or risks. For example, the system will automatically stop a pump if the suction pressure is low or close a valve if the tank level is high.

Implementing this automated control logic in STAP offers multiple benefits. Firstly, it will reduce processing time in each treatment stage, resulting in increased efficiency and

production. Additionally, it will minimize human intervention in the equipment, mitigating operational risks and enhancing industrial safety.

Keywords: Water treatment, control logic, Produced Water Treatment System (PWTS), reliability, industrial processes.

1 Introducción

En el contexto de la explotación y producción de petróleo y gas, el uso del agua desempeña un papel fundamental en los procesos, conocido como agua de producción. Para reducir la dependencia de fuentes naturales de agua y minimizar el impacto ambiental, la industria ha adoptado sistemas de tratamiento de aguas de producción (STAP), estos son sistemas diseñados para el tratamiento y manejo adecuado de las aguas que se producen como subproducto de la extracción de petróleo y gas.

Durante el proceso de producción de hidrocarburos, se extrae una gran cantidad de agua, conocida como agua de producción, que se mezcla con los hidrocarburos extraídos. Los STAP se encargan de tratar y purificar el agua de producción para eliminar los contaminantes y permitir su reutilización o descarga segura al medio ambiente. Estos sistemas están diseñados para cumplir con los estándares ambientales y de calidad del agua establecidos por las autoridades reguladoras.

Sin embargo, el agua de producción presenta desafíos ambientales significativos debido a su contenido de partículas de metales pesados y su alto grado de contaminantes derivados de los hidrocarburos, lo que puede afectar tanto las aguas superficiales como subterráneas. Por lo tanto, la implementación de un STAP se ha convertido en un requisito esencial en la industria petrolera y de gas para garantizar la explotación económica de los campos y cumplir con las políticas ambientales.

En el caso de Colombia, donde la explotación de hidrocarburos ha sido una fuente económica primordial, la gestión adecuada de las aguas producidas se vuelve aún más crucial. Empresas como Ecopetrol han implementado sistemas de recuperación y tratamiento de aguas, pero muchos de estos sistemas operan de manera manual, lo que implica tiempos

prolongados de procesamiento, riesgos operacionales y baja eficiencia. Esta metodología manual también aumenta la posibilidad de errores humanos y afecta tanto la seguridad de los trabajadores como el medio ambiente.

Por lo tanto, este trabajo de grado se enfoca en abordar estos desafíos. El objetivo principal es establecer una filosofía de operación eficiente y segura para cada etapa del proceso de tratamiento, utilizando la programación ladder como base en un controlador lógico programable (PLC).

La programación ladder es una técnica ampliamente utilizada en el control de procesos industriales debido a su fácil comprensión y aplicación. Permite el diseño de una lógica de control secuencial y paralela, que se ajusta perfectamente a las necesidades del tratamiento de aguas de producción. Mediante la programación ladder, se podrán diseñar y desarrollar las instrucciones o rutinas de control necesarias para cada etapa del proceso, como la depuración, el desnate, la filtración y la decantación.

Además, se desarrollará una interfaz gráfica que permita la supervisión y control del proceso de tratamiento de agua, utilizando herramientas de desarrollo de software ROCKWELL y considerando la experiencia del usuario. Esta pantalla HMI proporcionará gráficos en tiempo real de las variables relevantes, permitiendo establecer valores de referencia y realizar las operaciones necesarias. De esta manera, los operarios podrán monitorear de forma remota y segura el proceso de tratamiento, minimizando la exposición a condiciones peligrosas y maximizando la eficiencia de las operaciones.

Este proyecto busca contribuir a la optimización y seguridad en el tratamiento de aguas de producción en la industria de hidrocarburos en Colombia, a través del diseño y simulación

de una lógica de control para las etapas de proceso en el tratamiento de aguas de producción mediante el uso de un PLC e interfaz gráfica.

1.1 Antecedentes

En un estudio previo realizado por (Johnson, Smith, & Thompson, 2020), se investigó el proceso de tratamiento de aguas producidas en la industria petrolera, destacando la importancia de la eficiencia y la seguridad en esta etapa. El estudio reveló que la operación manual de los Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) conlleva tiempos prolongados de procesamiento, mayores riesgos operacionales y baja eficiencia. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar una lógica de control automatizada en los STAP para mejorar el rendimiento y la seguridad del proceso de tratamiento.

En la investigación realizada por (Garcia, López, & Rodríguez, Automation and Control Systems in the Oil Industry: Benefits and Challenges, 2019), se exploraron los beneficios de la automatización y el uso de controladores lógicos programables (PLC) en la industria petrolera. El estudio demostró que la automatización de los procesos industriales, incluido el tratamiento de aguas producidas, puede conducir a una mayor eficiencia, reducción de costos operativos y mejoras significativas en la seguridad y el control del sistema. Estos hallazgos respaldan la propuesta de implementar una lógica de control automatizada basada en PLC en los STAP, como una solución viable para optimizar el proceso de tratamiento de aguas producidas en nuestro proyecto.

Un artículo científico de (Smith & Jones, Human-Machine Interfaces in Industrial Systems: A Review of Benefits and Applications, 2018) examinó la implementación de interfaces hombre-máquina (HMI) en sistemas industriales complejos. El estudio destacó

cómo las pantallas HMI proporcionan una forma intuitiva y eficiente para que los operarios interactúen con los sistemas de control automatizados, permitiendo un monitoreo en tiempo real y una comunicación efectiva. Estos hallazgos respaldan nuestra propuesta de utilizar una HMI en nuestro proyecto, ya que permitirá a los operarios supervisar y controlar el proceso de tratamiento de forma remota y segura, mejorando la eficiencia y reduciendo los riesgos asociados con la intervención humana directa.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de control lógico para las etapas de proceso en el tratamiento de aguas de producción utilizando un controlador lógico programable (PLC) y una interfaz gráfica.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer una filosofía de operación básica para cada etapa del proceso de tratamiento de agua.
- Seleccionar un controlador lógico programable (PLC) adecuado para el sistema de control y programarlo para implementar la lógica de control diseñada.
- Diseñar la lógica de control para cada etapa del proceso de tratamiento de agua, identificando las variables y parámetros críticos que deben ser monitoreados y controlados.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita valorar el desempeño del sistema y realizar ajustes para la supervisión y control del proceso de tratamiento de agua.

3 Justificación

En los últimos años, la explotación de hidrocarburos se ha convertido en la principal fuente económica en nuestro país. Sin embargo, esta actividad conlleva una serie de retos, y uno de los desafíos más significativos radica en el tratamiento de las aguas producidas durante la extracción de petróleo. La gestión adecuada de estas aguas es esencial para garantizar la protección del medio ambiente y el cumplimiento de las regulaciones ambientales.

Actualmente, muchas empresas petroleras operan sus STAP de manera manual, lo que implica tiempos de procesamiento prolongados, riesgos operacionales y baja eficiencia. Esta metodología manual no solo es ineficiente, sino que también aumenta la posibilidad de errores humanos, malas interpretaciones o fallos de comunicación, lo que puede tener consecuencias negativas tanto para la operación como para la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente.

En este contexto, la implementación de una lógica de control automatizada basada en el uso de controladores lógicos programables (PLC) se presenta como una solución efectiva y necesaria. Mediante la automatización del proceso de tratamiento de aguas producidas, se logrará una ejecución automática y precisa de las distintas etapas del tratamiento, como la depuración, el desnate, la filtración y la decantación.

Además, se propone la utilización de una interfaz hombre-máquina (HMI) que permita la interacción del usuario con el sistema. Esta pantalla HMI proporcionará gráficos en tiempo real de las variables relevantes, permitiendo establecer valores de referencia y realizar las operaciones necesarias. De esta manera, los operarios podrán monitorear de forma remota y

segura el proceso de tratamiento, minimizando la exposición a condiciones peligrosas y maximizando la eficiencia de las operaciones.

La lógica de control propuesta no se limita únicamente a acciones de control lógicas, como el control de flujo, nivel y presión, sino que también incluye acciones de seguridad para prevenir problemas o riesgos potenciales. Esto contribuirá a salvaguardar la integridad del sistema, prevenir posibles daños y minimizar los riesgos asociados con la manipulación directa de los equipos.

La implementación de esta lógica de control automatizada en los STAP ofrece múltiples beneficios. En primer lugar, se logrará reducir significativamente el tiempo de procesamiento en cada etapa del tratamiento, lo que se traducirá en una mayor eficiencia y productividad en la operación. Además, al disminuir la intervención humana en los equipos, se minimizarán los riesgos operacionales y se mejorará la seguridad industrial en general.

4 Marco teórico

La automatización industrial es un campo de la ingeniería que se ocupa del diseño, implementación y mantenimiento de sistemas automáticos para controlar y optimizar los procesos industriales. La automatización industrial ha revolucionado la forma en que se produce y manufactura todo tipo de productos en la actualidad. Desde la producción de alimentos hasta la fabricación de automóviles, la automatización ha permitido a las empresas mejorar la calidad de sus productos, reducir costos y aumentar la eficiencia de sus procesos.

4.1 Historia de la automatización industrial.

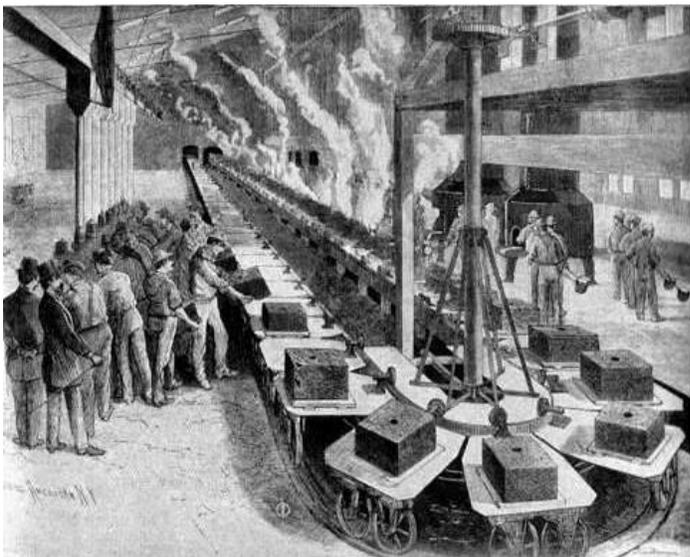
La historia de la automatización industrial se remonta a la Revolución Industrial del siglo XVIII, cuando se produjeron importantes avances en la producción de bienes gracias a la introducción de la maquinaria. La invención de la máquina de vapor y la hiladora mecánica en Inglaterra permitió la producción masiva de textiles, lo que llevó a una revolución en la industria textil. Desde entonces, la industria ha experimentado un rápido avance tecnológico con la introducción de nuevos procesos y maquinarias que mejoraron la productividad y la eficiencia en la producción de bienes (Allen & Chandler, 1993).

A lo largo del siglo XIX y principios del siglo XX (en la Figura 4-1 se ilustra un ejemplo de automatismo en una fábrica), la automatización industrial se centró en gran medida en el desarrollo de dispositivos mecánicos y eléctricos simples, como interruptores y relés, para controlar los procesos de producción. Sin embargo, a medida que avanzaba la tecnología, se produjeron importantes avances en la automatización industrial (Garcia, 2018).

Uno de los desarrollos más significativos en la historia de la automatización industrial fue el desarrollo del primer sistema de control numérico para máquinas herramientas en la década de 1950. Este sistema permitió el control programado de las operaciones de mecanizado, lo que llevó a una mejora significativa en la precisión y la calidad de los productos manufacturados.

Figura 4-1

El automatismo a finales del siglo XIX: Fundición de la fábrica norteamericana Westinghouse.



Fuente: Tomada de https://historiaybiografias.com/historia_automatizacion/

En la década de 1960, la introducción de los primeros sistemas de control automático de procesos (APC) permitió la monitorización y el control automático de los procesos químicos y petroquímicos, lo que llevó a mejoras significativas en la eficiencia y la seguridad en la industria química (Kessler, 2008).

En la década de 1970, se produjeron importantes avances en la tecnología de control de procesos con la introducción de los primeros sistemas de control distribuido (DCS). Los sistemas DCS permitían la monitorización y el control remoto de procesos a través de una red de

controladores distribuidos en toda la planta de producción. Esto permitió una mayor integración de los procesos de producción y una mayor eficiencia en la gestión de la planta (Kessler, 2008).

En la Figura 4-2, se ilustra una de los primeros DCS de la historia. fueron introducidos en 1975-Tanto Honeywell y la firma de ingeniería eléctrica japonesa Yokogawa introdujo sus propios DCS's producción independiente más o menos al mismo tiempo, con los sistemas de Centum TDC 2000.

Figura 4-2

Honeywell TDC 2000 and Yokogawa CENTUM.



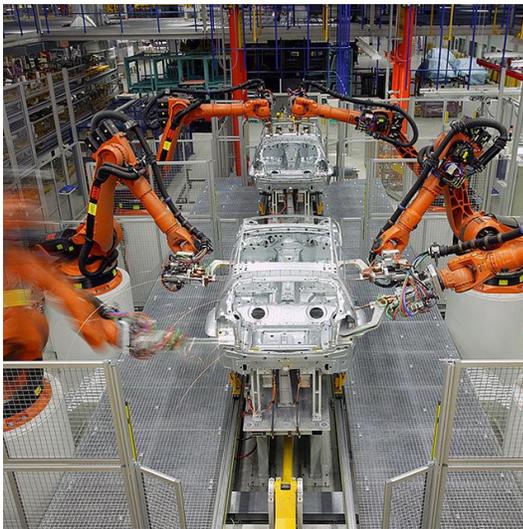
Fuente: Tomada de <https://1library.co/document/zpxwon7q-historia-de-los-sistemas-de-control-distribuido.html>

A medida que la tecnología avanzaba, surgieron nuevas formas de automatización industrial, como la robótica y la inteligencia artificial. En la década de 1980, se introdujeron los primeros robots industriales, que permitieron la automatización de tareas repetitivas y peligrosas en la fabricación de automóviles y otros productos. La introducción de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la década de 1990 llevó a una mayor automatización en la industria de procesos y manufactura, permitiendo la optimización de los procesos y la mejora de la calidad de los productos (Lee, Kao, & Yang, 2014).

Hoy en día, la automatización industrial se utiliza en una amplia variedad de industrias, desde la producción de alimentos hasta la fabricación de productos electrónicos. Los sistemas de automatización permiten la monitorización y el control preciso de los procesos de producción, lo que lleva a una mayor eficiencia, una mayor calidad de los productos y una reducción en los costos de producción. Además, la automatización industrial también ha mejorado la seguridad en el lugar de trabajo, al eliminar la necesidad de que los trabajadores realicen tareas peligrosas o repetitivas (en la Figura 4-3, ilustra robots como ensambladores de partes de vehículos).

Figura 4-3

Automatización en la actualidad, línea ensambladora de automóviles.



Fuente: Tomada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Automatizaci%C3%B3n_industrial

4.2 Tipos de sistemas de automatización.

Existen varios tipos de sistemas de automatización industrial, cada uno con sus propias características y beneficios. En general, estos sistemas se pueden clasificar en tres categorías principales: sistemas de control de procesos, sistemas de control de fabricación y sistemas de control de robótica.

Los sistemas de control de procesos se utilizan para controlar procesos continuos como la producción de productos químicos, alimentos (ver la Figura 4-4) y bebidas, petróleo y gas, y otros productos. Estos sistemas controlan los procesos mediante la monitorización de los sensores que miden las variables de proceso, como la temperatura, la presión, el flujo y la calidad. El controlador ajusta las variables de proceso para mantener el proceso dentro de los límites establecidos para la producción de productos de calidad (Stephenson, 2014).

Figura 4-4

Control de procesos industriales alimentarios



Fuente: Tomada de (AETECH, s.f.)

Los sistemas de control de fabricación se utilizan para controlar la producción de productos discretos como componentes electrónicos, automóviles, electrodomésticos y otros productos que se producen en lotes o en masa. Estos sistemas controlan la producción mediante la monitorización de los sensores que miden la posición, la velocidad, la fuerza y otros parámetros. El controlador ajusta los parámetros para mantener la producción dentro de los límites establecidos para la producción de productos de calidad (Stephenson, 2014).

Los sistemas de control de robótica se utilizan para controlar robots industriales que realizan tareas como soldadura, ensamblaje, pintura y manipulación de materiales. Estos sistemas controlan los robots mediante la monitorización de los sensores que miden la posición, la velocidad, la fuerza y otros parámetros, en la Figura 4-5 se observan robots soldando piezas y siendo operados de manera remota. El controlador ajusta los parámetros para mantener el robot dentro de los límites establecidos para la tarea en cuestión (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006).

Figura 4-5

Proceso de soldadura con robots



Fuente: Tomada de (FMA Communications Inc, 2021)

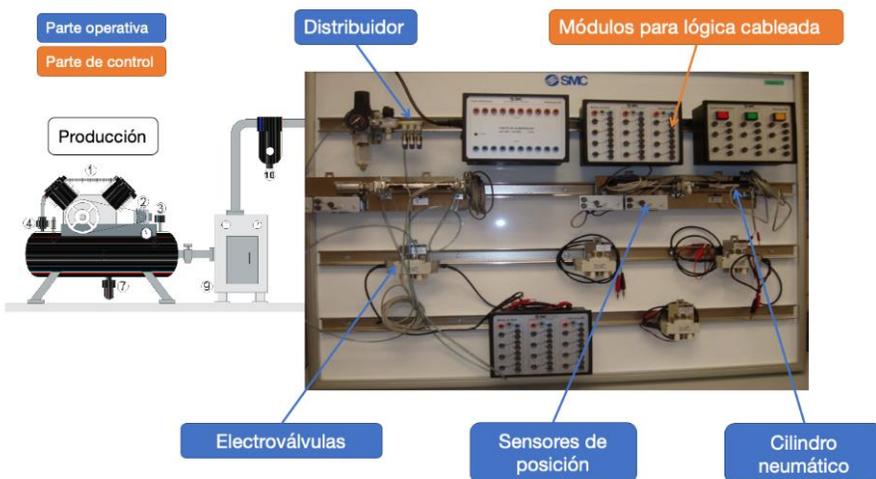
Además, existen otros sistemas de automatización que se utilizan en la industria, como los sistemas de control de calidad, los sistemas de control de almacenamiento y los sistemas de control de distribución. Los sistemas de control de calidad se utilizan para monitorear la calidad del producto y ajustar los parámetros del proceso para mejorar la calidad. Los sistemas de control de almacenamiento se utilizan para controlar el almacenamiento y la recuperación de materiales en la planta. Los sistemas de control de distribución se utilizan para controlar la distribución de productos terminados desde la planta a los clientes (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006).

4.3 Componentes de un sistema automatizado.

Un sistema automatizado es un conjunto de componentes que se interconectan y trabajan en conjunto para llevar a cabo una tarea de manera autónoma y sin intervención humana. Los componentes de un sistema automatizado se pueden clasificar en tres categorías principales: sensores, actuadores y controladores (en la Figura 4-6 muestra un banco de prácticas para sistemas neumáticos con sus respectivos elementos) (Garcia, 2018).

Figura 4-6

Ejemplo de sistema de producción industrial: demostrador neumático de laboratorio



Fuente: Tomada de (Introducción a la Automatización Industrial, s.f.)

Además de estos componentes principales, hay otros componentes que se utilizan en los sistemas automatizados, como los dispositivos de seguridad, las fuentes de alimentación, los interruptores de límite, los transformadores y los conectores. Los dispositivos de seguridad se utilizan para garantizar la seguridad de los trabajadores y del equipo en la planta. Las fuentes de alimentación proporcionan la energía necesaria para los componentes del sistema. Los interruptores de límite se utilizan para detectar el final de carrera de un movimiento lineal

o rotativo. Los transformadores se utilizan para cambiar el nivel de voltaje de la energía eléctrica. Los conectores se utilizan para interconectar los componentes del sistema y para facilitar el mantenimiento y la reparación.

4.3.1 Sensores

Los sensores son dispositivos electrónicos que se utilizan para detectar y medir diferentes variables físicas, como la temperatura, la presión, la posición y la velocidad. Los sensores son esenciales en los sistemas automatizados (la Figura 4-7, ilustra un grupo de sensores más usados en la industria), ya que permiten que el sistema detecte las condiciones y ajuste su comportamiento en consecuencia. Por ejemplo, en un sistema de automatización de fábrica, los sensores pueden detectar la presencia o ausencia de productos en una cinta transportadora, lo que permite que el sistema ajuste la velocidad de la cadena para garantizar una producción eficiente (Gomez Ortega, Guerrero Higuera, Ramirez Faz, & Gomez Cruz, 2019).

Figura 4-7
Sensorica industrial



Fuente: Tomada de (Inductecnica, 2022)

4.3.2 Actuadores.

Los actuadores son dispositivos mecánicos o electromecánicos que se utilizan para controlar el movimiento de los elementos mecánicos en un sistema automatizado. Por ejemplo, en un sistema de brazos robóticos, los actuadores son los motores que controlan el movimiento del brazo. Los actuadores son fundamentales para los sistemas automatizados (en la Figura 4-8 se observa algunos tipos de actuadores), ya que convierten las señales eléctricas en movimiento mecánico (Gomez Ortega, Guerrero Higuera, Ramirez Faz, & Gomez Cruz, 2019).

Figura 4-8

Actuadores industriales



Fuente: Tomada de (Slideshare.net)

4.3.3 Controladores.

Los controladores son dispositivos electrónicos que controlan el comportamiento de un sistema automatizado. Los controladores reciben datos de los sensores y toman decisiones sobre cómo responder a esos datos. Los sistemas de control pueden ser programados para responder de manera predecible y replicable a una variedad de entradas. Los controladores

lógicos programables (PLC) son los controladores más comunes en la industria (en la Figura 4-9, se ilustra algunos controladores de la marca Rockwell Automation), aunque existen otros tipos de controladores, como los basados en microcontroladores y los controladores por computadora (Roe, 2015).

Figura 4-9
Controladores lógicos programables PLC



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2020)

4.4 Sistemas de control de procesos.

Los sistemas de control de procesos son sistemas automatizados que se utilizan para controlar procesos continuos y repetitivos en la producción industrial. Estos sistemas se utilizan en una amplia gama de industrias, como la química, la petroquímica, la alimentaria, la farmacéutica y la de producción de energía.

Un sistema de control de procesos consta de cuatro componentes principales: un sensor, un controlador, un actuador y un proceso. El sensor mide una variable en el proceso, como la temperatura, la presión, el flujo o la concentración. El controlador compara la medición del sensor con un valor deseado o setpoint, y envía una señal al actuador para que ajuste la variable del

proceso y la mantenga en el setpoint. El proceso es el sistema físico que está siendo controlado, como una caldera, un reactor químico, una línea de producción o una planta de tratamiento de aguas (Garcia Sanchez, Rodriguez Gonzalez, & Gonzalez Briones, 2019).

Los sistemas de control de procesos pueden clasificarse en tres tipos principales: control de lazo abierto, control de lazo cerrado (ver Figura 4-10) y control de retroalimentación.

El control de lazo abierto es un sistema de control en el que la variable de salida del proceso no se mide ni se compara con el setpoint. En cambio, el controlador envía una señal de control constante al actuador. Este tipo de control se utiliza en procesos donde no es necesario ajustar la variable de salida de manera precisa, como en la apertura de una válvula o el control de la velocidad de una cinta transportadora.

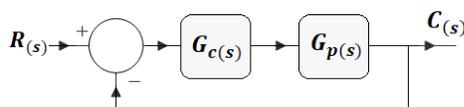
El control de lazo cerrado es un sistema de control en el que la variable de salida del proceso se mide y se compara con el setpoint, y el controlador ajusta la señal de control para mantener la variable en el setpoint. Este tipo de control se utiliza en procesos donde es importante mantener la variable de salida dentro de límites específicos, como en el control de temperatura de un horno o el control de nivel de líquido en un tanque.

Figura 4-10

Sistema de lazo abierto y cerrado-Diagrama de bloques.



Sistema de control a lazo abierto



Sistema de control a lazo cerrado

Fuente: Tomada de (Dademuchconnection, 2021)

4.5 Programación de sistemas automatizados.

La programación de sistemas automatizados es una parte esencial de la automatización industrial. Es el proceso mediante el cual se escribe un conjunto de instrucciones que se utilizan para controlar un sistema automatizado. La programación puede variar desde la programación de un controlador lógico programable (PLC) hasta la programación de un sistema de control distribuido (DCS) o un sistema de control numérico computarizado (CNC) (Sarka & Chowdhury, 2017).

La programación de sistemas automatizados es importante porque permite a los ingenieros de automatización industrial controlar y monitorear los procesos industriales en tiempo real, lo que aumenta la eficiencia y la productividad de la planta. Además, la programación permite la automatización de tareas repetitivas y peligrosas, lo que reduce los riesgos para la seguridad de los trabajadores.

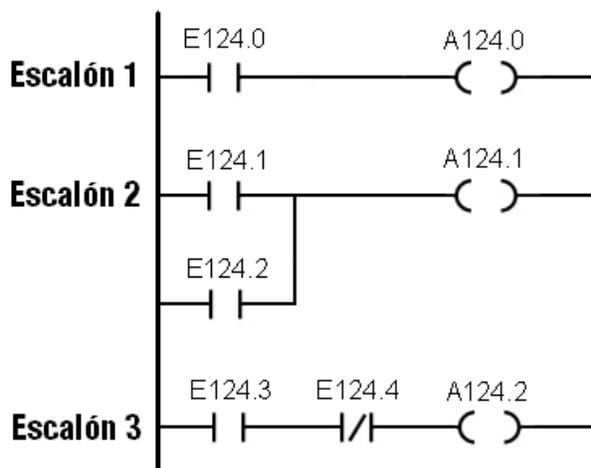
Existen varios lenguajes de programación utilizados en la automatización industrial, entre los más comunes se encuentran la Lógica tipo Escalera (Ladder Logic), el Texto estructurado (Structured Text) y el Diagrama Bloques de Función (Function Block Diagram).

El Ladder Logic es el lenguaje de programación más utilizado para la programación de PLC, que es uno de los controladores más utilizados en la automatización industrial. Este lenguaje de programación se basa en la lógica de relevadores y permite la programación de procesos en secuencia.

En la Figura 4-11, se ilustra un ejemplo de programación en lenguaje Ladder, integrando contactos normalmente abiertos NO y normalmente cerrados NC y bobinas como señal de salida.

Figura 4-11

Programación tipo escalera (Ladder).



Fuente: Tomada de (Paez Logreira, Zamora Musa, & Bohorquez Perez, 2015)

El Structured Text, por otro lado, es un lenguaje de programación similar al lenguaje C utilizado en la programación de computadoras. Este lenguaje de programación es utilizado para la programación de sistemas de control distribuido (DCS), que son utilizados en plantas industriales grandes y complejas (Paez Logreira, Zamora Musa, & Bohorquez Perez, 2015).

El Function Block Diagram es un lenguaje de programación utilizado para la programación de sistemas de control numérico computarizado (CNC), que se utilizan en la fabricación de piezas metálicas y otros componentes en la industria manufacturera.

La programación de sistemas automatizados también puede implicar el uso de software de simulación para probar y verificar el código antes de su implementación. El software de simulación permite a los ingenieros de automatización industrial verificar el funcionamiento del sistema antes de su puesta en marcha, lo que puede ahorrar tiempo y dinero en la detección y corrección de errores de programación (Priddy & Eckman, 1992).

4.6 Diseño y simulación de sistemas automatizados.

El diseño y simulación de sistemas automatizados es una parte crítica del proceso de automatización industrial. Antes de la construcción y puesta en marcha de un sistema automatizado, es importante diseñarlo y simularlo para garantizar que funcione correctamente y cumpla con los objetivos de la planta.

El diseño de sistemas automatizados comienza con la identificación de los procesos a automatizar. A continuación, se realiza un análisis detallado de los requisitos del sistema, que incluye la definición de las especificaciones técnicas, los diagramas de flujo de procesos, los diagramas de bloques y otros documentos de diseño.

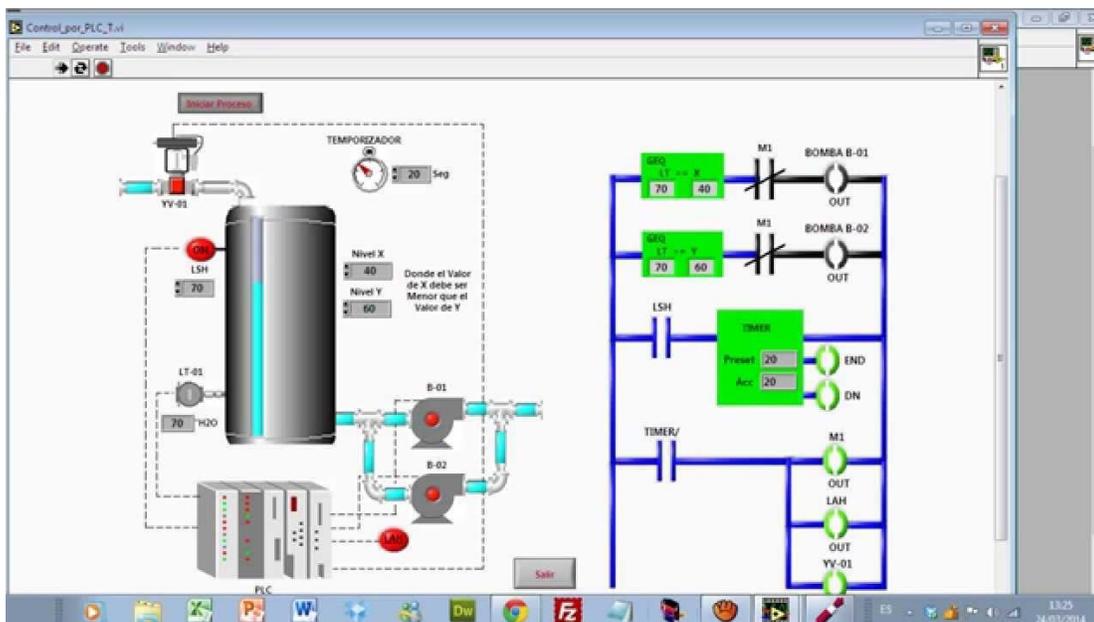
Una vez que se han definido los requisitos del sistema, el siguiente paso es el diseño del sistema, que incluye la selección de los componentes y equipos adecuados, la definición de las interconexiones entre los componentes y la selección del software necesario para la programación del sistema.

La simulación de sistemas automatizados es una parte importante del proceso de diseño, ya que permite a los ingenieros de automatización industrial probar el sistema antes de su implementación. La simulación se realiza utilizando software especializado que permite la creación de modelos virtuales del sistema, que se pueden utilizar para verificar su funcionamiento y detectar posibles problemas; también permite la realización de pruebas de rendimiento, lo que permite a los ingenieros de automatización industrial evaluar la capacidad del sistema para cumplir con los requisitos de producción de la planta (en la Figura 4-12, se observa la simulación de los procesos de una planta). Además, la simulación también puede ayudar a identificar posibles cuellos

de botella en el proceso de producción, lo que permite la realización de mejoras antes de la implementación del sistema (Priddy & Eckman, 1992).

Figura 4-12

Simulación de procesos industriales-control de presión, nivel, flujo.



Fuente: Tomada de (Priddy & Eckman, 1992)

Una vez que se ha completado el diseño y la simulación del sistema, el siguiente paso es la implementación del sistema. Durante la implementación, se lleva a cabo la construcción del sistema, la instalación y la puesta en marcha. Durante la puesta en marcha, se realizan pruebas de rendimiento adicionales para garantizar que el sistema cumpla con los requisitos de producción de la planta.

5 Diseño metodológico

Las actividades para desarrollar en este proyecto se definen en cuatro fases relacionando cada uno de los objetivos específicos del proyecto como se muestra a continuación:

5.1 Fase 1: Filosofía de operación básica para cada etapa del proceso de tratamiento de agua.

- Identificación y análisis de requisitos para cada etapa del proceso de tratamiento de agua de producción, incluyendo las variables críticas, los parámetros de control y las restricciones.
- Revisión de literatura y los estándares relevantes para el tratamiento de agua de producción para obtener información sobre las mejores prácticas y filosofías de operación.
- Definir la filosofía de operación que cumpla con los requisitos y objetivos del proceso de tratamiento de agua de producción.
- Realización de plano P&ID del proceso de tratamiento de aguas de producción.

5.2 Fase 2: Selección del controlador lógico y componentes del sistema de control.

- Se evalúan diferentes opciones de PLC de la marca ROCKWELL y se selecciona el que mejor se adapte a las necesidades del sistema de control.
- Selección los componentes modulares I/O, teniendo en cuenta la cantidad de señales del proceso.

5.3 Fase 3: Diseño y desarrollo de la lógica de control.

- Se realiza un análisis exhaustivo de las necesidades y requisitos del sistema de control para el tratamiento de agua de producción, incluyendo la identificación de las variables y parámetros críticos que deben ser monitoreados y controlados.
- Se diseña la lógica de control para cada etapa del proceso de tratamiento de agua, utilizando una metodología sistemática y basada en estándares.

5.4 Fase 4: Desarrollo de la interfaz gráfica y evaluación del STAP.

- Se desarrolla una interfaz gráfica para la supervisión y control del proceso de tratamiento de agua, utilizando herramientas de desarrollo de software ROCKWELL y considerando la experiencia de usuario.
- Creación un modelo del sistema de control que incluya la lógica de control diseñada, el controlador lógico programable (PLC) y la interfaz gráfica. Utilizar un software y métodos de simulación de variables para evaluar el desempeño del sistema en un entorno controlado.
- Identificación de las variables y parámetros críticos que deben ser monitoreados y controlados durante la simulación. Establecer los puntos de medición y las variables de control adecuadas para cada etapa del proceso de tratamiento de agua.

6 Análisis de Resultados

En este proyecto en particular, se ha dividido en cuatro fases, cada una con objetivos específicos para garantizar el éxito en la creación de un sistema de tratamiento de agua de producción. La primera fase se centra en establecer una filosofía de operación básica para cada etapa del proceso de tratamiento de agua, mientras que la segunda fase implica la selección del PLC y componentes del sistema de control. La tercera fase incluye el diseño y desarrollo de la lógica de control para cada etapa del proceso, y la cuarta fase se enfoca en la evaluación del sistema de control utilizando un software y métodos de simulación de variables.

6.1 Filosofía de operación básica del STAP.

Una filosofía de operación es un conjunto de principios y valores que guían la toma de decisiones y la forma en que se lleva a cabo una operación. Es una declaración explícita de los objetivos de la operación, los métodos para alcanzarlos y los valores que guían el proceso (International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2016).

A continuación, se presentan los equipos que desempeñan un papel fundamental en los procesos de depuración, desnate, filtración y decantación del sistema de tratamiento de aguas de producción, junto con su funcionalidad específica en cada etapa y representado en planimetría P&ID. El plano general del STAP se ilustra en el Anexo M.

6.1.1 *Filosofía de operación del depurador, representación P&ID*

El depurador es un equipo fundamental en el proceso de tratamiento de aguas, ya que permite la eliminación de cantidades moderadas de aceites libres presentes en el agua de producción. Este equipo cuenta con una sección transversal que disminuye la velocidad del líquido

y mejora su eficiencia, lo que le permite procesar grandes volúmenes de agua en un recipiente relativamente pequeño.

El depurador funciona mediante un proceso de coalescencia, en el que el agua aceitosa entra a un distribuidor que la hace pasar a través de dos deflectores perforados. Estos deflectores permiten que las gotas de aceite se fusionen y se separen del agua, formando una capa fina de aceite sobre la superficie del líquido (en la Figura 6-1 se ilustra un depurador usado en la industria petrolera). A medida que el proceso continúa, la capa de aceite se recolecta en un canal específico y se retira del recipiente (McCabe, 2005).

Figura 6-1

Vista de un depurador o scrubber

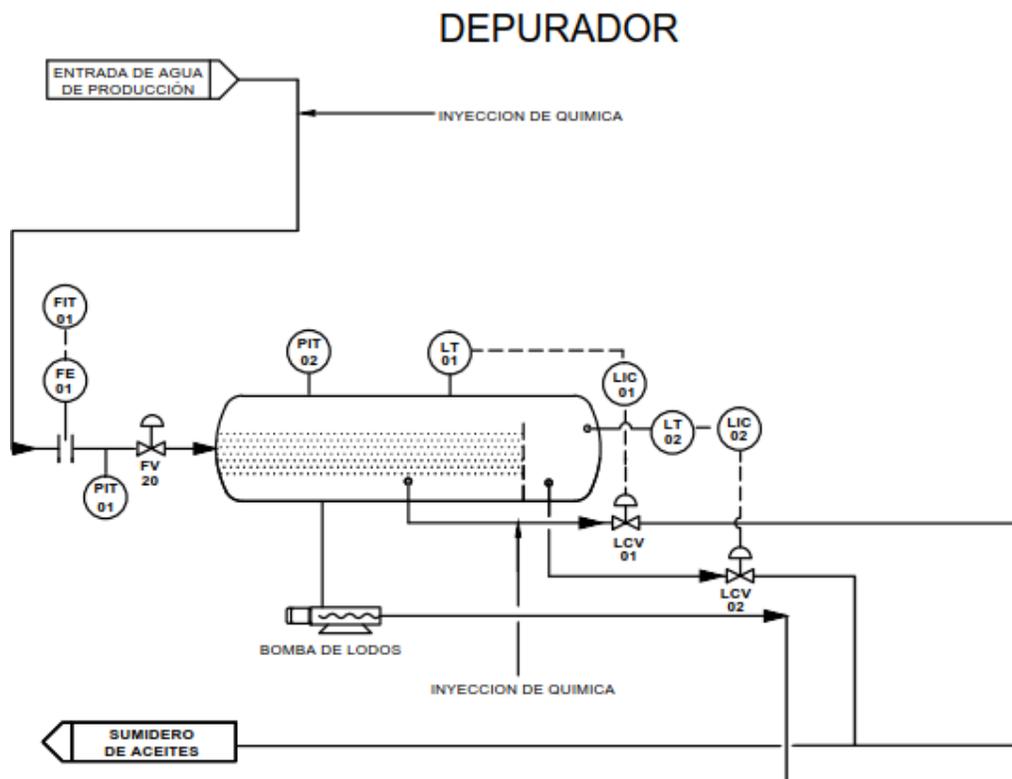


Fuente: El autor.

Este proceso es muy importante ya que permite la eliminación de sustancias contaminantes que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud pública. Además, su eficiencia en la recolección del aceite permite reducir los costos operativos y mejorar la calidad del agua tratada.

La etapa de depuración es la primera fase del Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP). En esta etapa, el agua de producción que ha sido previamente separada en etapas anteriores ingresa al depurador cuando la válvula ON/OFF FV-20 se encuentra abierta. Además, se realiza la medición del flujo de entrada al sistema utilizando un medidor basado en el principio de la placa de orificio y se monitorea la presión en la tubería mediante un transmisor de presión PIT-01, en la Figura 6-2 se ilustra el plano P&ID de la etapa de depuración.

Figura 6-2
P&ID etapa de depuración STAP



Fuente: El autor.

Dentro del tanque depurador se encuentran las placas coalescentes, cuya función es separar los aceites y los sólidos presentes en el agua. Estas placas también reducen el flujo de agua en un 25% a la salida del tanque depurador. Se ha instalado un instrumento de medición PIT-02 que permite monitorizar la presión del tanque.

Esta etapa de depuración cuenta con tres salidas distribuidas según la separación que realizan las placas coalescentes. Se utiliza un medidor de nivel LT-01 para medir el nivel de agua y controlar el lazo de control en la válvula LCV-01, encargada de regular la salida de agua hacia la celda de flotación/desnate. Por otro lado, el medidor de nivel LT-02 monitorea el nivel de aceites y controla la apertura de la válvula de control LCV-02, encargada de regular la salida de aceites hacia un sumidero. Asimismo, se utiliza una bomba de lodos para evacuar los sólidos que se acumulan en el fondo del tanque como resultado de la separación en las placas coalescentes.

6.1.2 Filosofía de operación del desnatador o celda de flotación, representación P&ID

El desnatador es un equipo utilizado en la industria de tratamiento de aguas, que tiene como finalidad la separación de líquidos y sólidos suspendidos mediante la flotación por espuma. En este proceso, se hace uso de la gravedad y del burbujeo de gas para que las partículas sólidas suspendidas en el agua se adhieran a las burbujas de gas y se eleven a la superficie del líquido, formando una capa de espuma que es retirada por desnatadores (Secretaría de Servicios Públicos, 2015).

Según (Cao & Wei, 2017), el proceso de flotación por espuma es una técnica de separación basada en la diferencia de densidades entre el líquido y las partículas suspendidas. Para lograr la

flotación, se inyecta gas en el líquido a través de difusores o boquillas, generando una corriente ascendente de burbujas que se adhieren a las partículas suspendidas y las transportan hacia la superficie. Una vez allí, las partículas forman una capa de espuma que es removida mediante los desnatadores (en la Figura 6-3 se ilustra una celda de flotación o desnatador usada en procesos de la industria petrolera).

Figura 6-3

Vista de un desnatador/celda de flotación



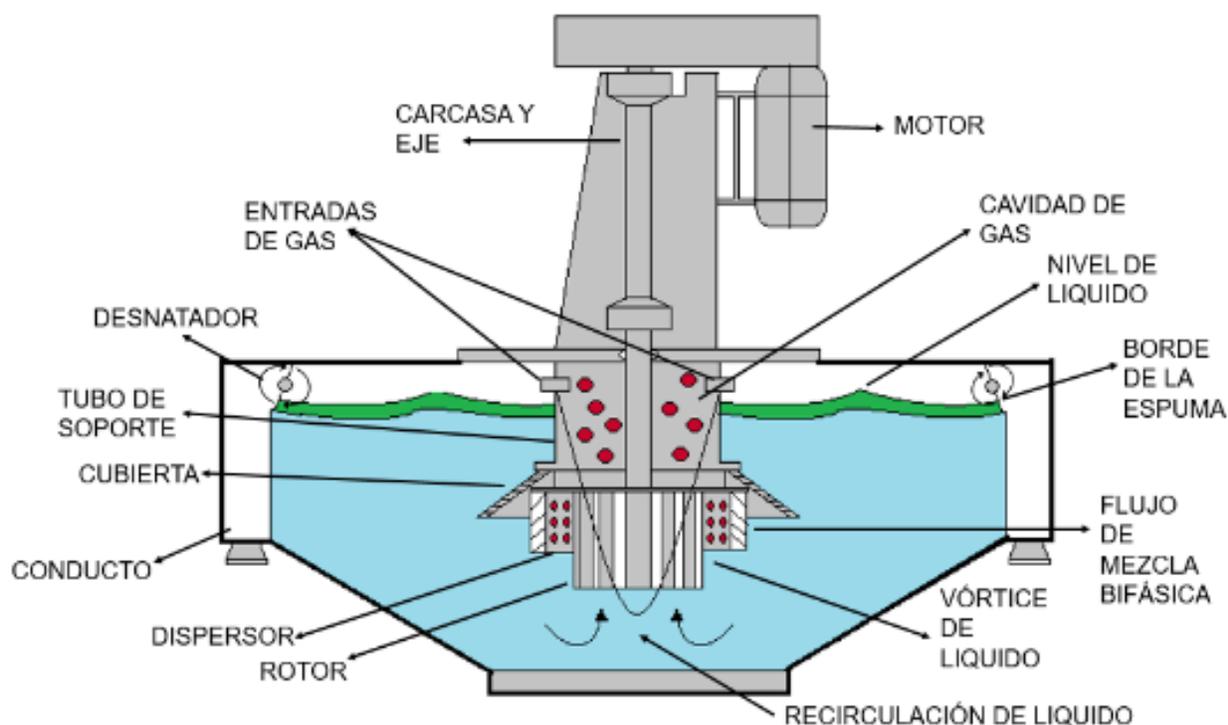
Fuente: El autor

Los desnatadores pueden ser de diferentes tipos, como los desnatadores de superficie, en los cuales la capa de espuma se forma en la superficie del líquido, o los desnatadores de difusión de aire, en los cuales la capa de espuma se forma en la parte inferior del líquido y asciende por medio de una corriente de aire. Según (Smith, 2010), los desnatadores son alimentados por motores con paletas que se encuentran a una altura determinada y que transportan la espuma hacia un canal

de recolección, donde es retirada mediante una bomba llamada "Bomba de aceites". En su estudio, (Smith, 2010) también señaló que los desnatadores de difusión de aire son más eficaces en la remoción de partículas finas y ligeras que los desnatadores de superficie (la Figura 6-4 se ilustra las partes de un desnatador de superficie).

Figura 6-4

Unidad de flotación



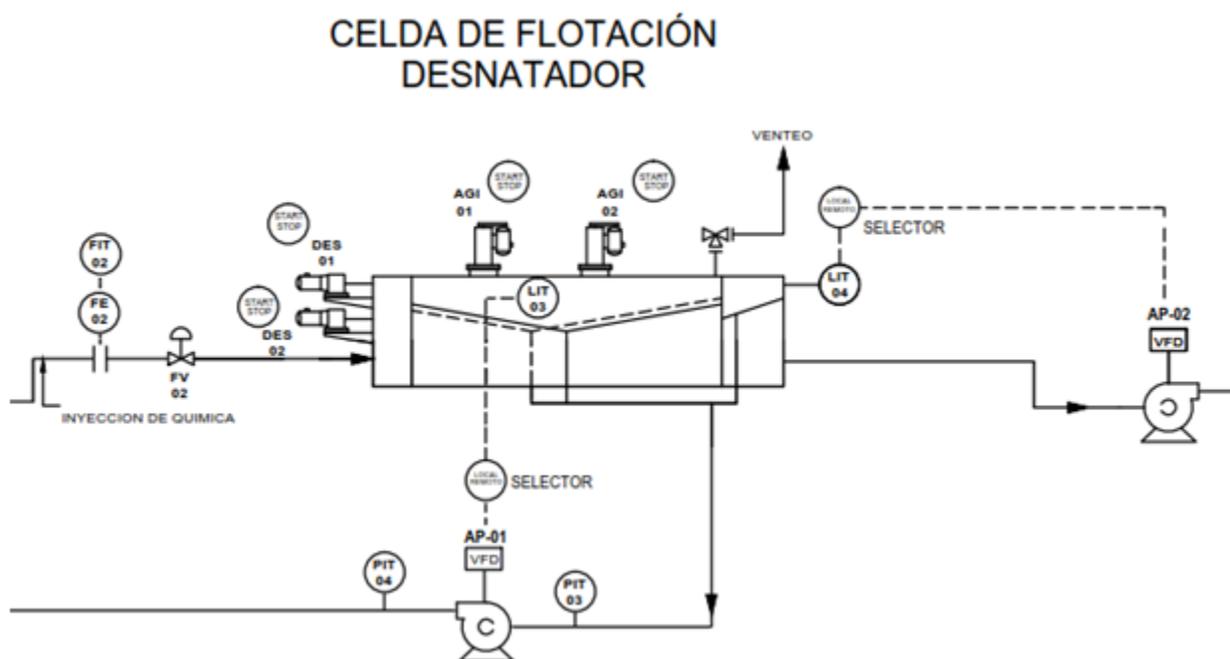
Fuente: Tomada de (BAWER S.A., 2015)

Es importante destacar que para lograr un funcionamiento eficiente del desnatador, es necesario mantener un nivel líquido estable y realizar una limpieza periódica de los desnatadores y los canales de recolección. Asimismo, se recomienda realizar un mantenimiento preventivo y predictivo en los equipos industriales, con el fin de maximizar su vida útil y minimizar los costos de mantenimiento.

El desnate en la celda de flotación es la segunda etapa del proceso en el Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) (ver plano P&ID ilustrado en la Figura 6-5). En esta etapa, el agua proveniente del depurador ingresa a la celda de flotación cuando la válvula ON/OFF FV-02 se encuentra abierta, y su flujo es medido por el medidor de flujo FIT-02.

Figura 6-5

P&ID etapa de desnate STAP



Fuente: El autor.

Una vez dentro de la celda, dos agitadores, AGI-01 y AGI-02, se mantienen en funcionamiento para generar el burbujeo necesario que permita la flotación de los aceites que aún están presentes en el agua. Este proceso de flotación da lugar a la formación de una capa de aceite conocida como espuma. Un medidor de nivel LIT-04 se encarga de monitorear y mantener un valor establecido, regulando así el control de una bomba AP-02, que se encarga de evacuar el agua

hacia el filtro. Esta evacuación tiene como objetivo principal generar y recolectar la capa de aceite, la cual es extraída mediante dos juegos de paletas o desnatantes, DES-01 y DES-02.

Se utiliza un medidor de nivel LIT-03 para detectar cuando el recipiente de recolección de natas o capa de aceite se encuentra lleno. En ese momento, se activa la bomba AP-01 para evacuar los aceites recolectados. Esta bomba cuenta con dos instrumentos, PIT-03 y PIT-04, que miden la presión de succión y descarga respectivamente, y protegen la máquina ante valores inferiores de succión y superiores de descarga.

Cabe destacar que las bombas tienen una opción de encendido o apagado que puede ser controlada de manera LOCAL/REMOTO mediante un selector, lo que permite al operador controlar la evacuación de agua y aceites según las necesidades operativas del sistema.

6.1.3 Filosofía de operación Filtro cáscara de nuez, representación P&ID

El filtro utiliza cáscaras de nuez negra o similares. Este medio filtrante está especialmente seleccionado para reducir la cantidad de sólidos y aceites presentes en las aguas de producción.

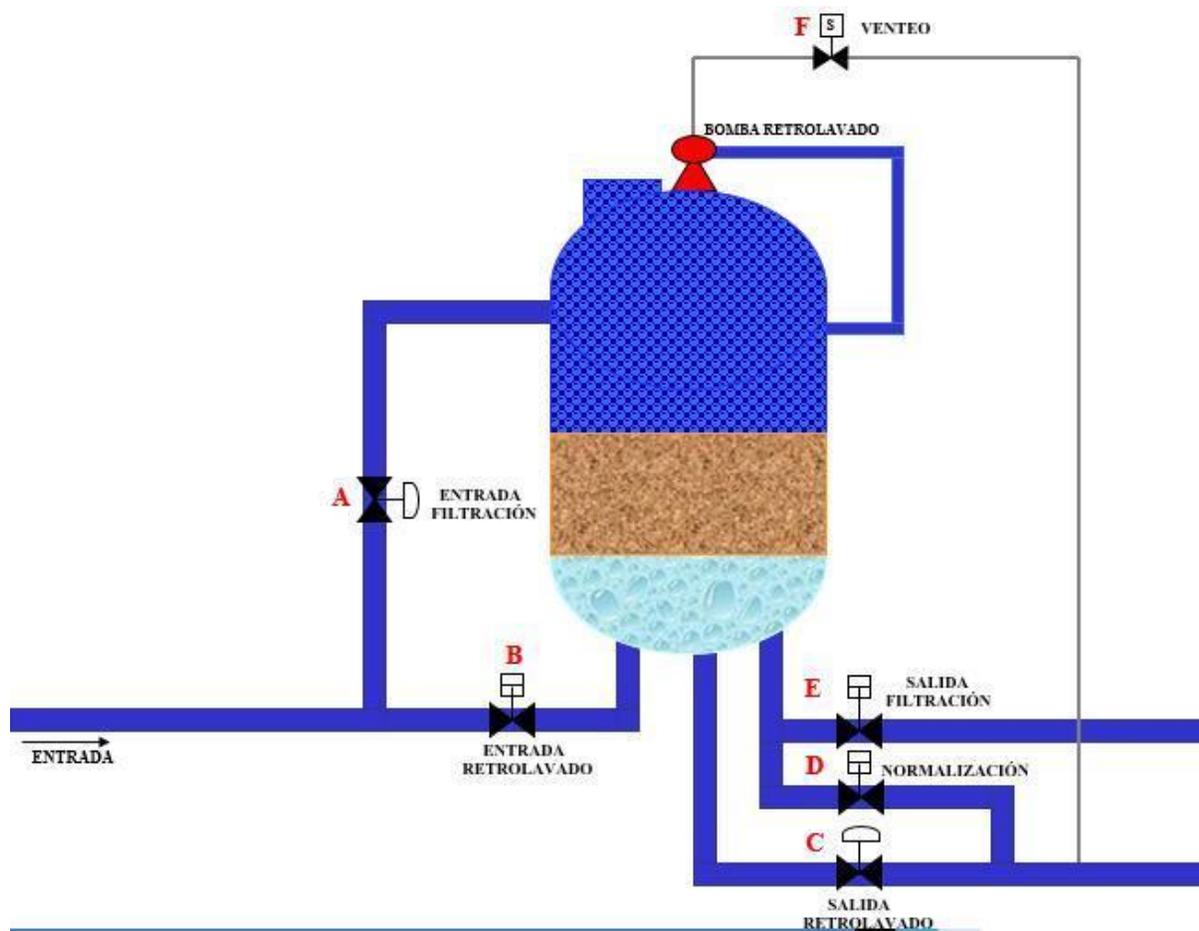
El filtro de cáscaras de nuez se utiliza para retener partículas con concentraciones de entrada menores a 80 ppm. Si la concentración se encuentra en niveles superiores, existe el riesgo de que el lecho filtrante se sature prematuramente durante la operación, lo que disminuiría la eficiencia del proceso de filtración.

Como todo elemento filtrante, después de un tiempo de operación, se satura y debe ser “regenerado”. En estos casos, se utiliza una bomba de agua para generar un retrolavado. Es decir, se hace circular agua de proceso en sentido inverso al que circula durante la operación normal. De ese modo, se retira todo el material adherido al lecho filtrante. El agua de retrolavado debe luego

disponerse o tratarse de un modo especial en el decantador, la Figura 6-6 muestra la estructura de un filtro cáscara de nuez.

Figura 6-6

Sistema de filtración con cáscara de nuez



Fuente: Tomada de (BAWER S.A., 2015)

Es fundamental destacar que la eficiencia de este tipo de filtración depende en gran medida de la calidad del medio filtrante y de la frecuencia y calidad de los procedimientos de regeneración. Por tanto, es esencial realizar un seguimiento riguroso del proceso para garantizar una eficiencia óptima del filtro y la eliminación eficaz de los sólidos y aceites en las aguas de producción (la Figura 6-7 ilustra un filtro cáscara de nuez usado en procesos de la industria petrolera).

Figura 6-7*Unidad de filtración de aguas aceitosas*

Fuente: El autor.

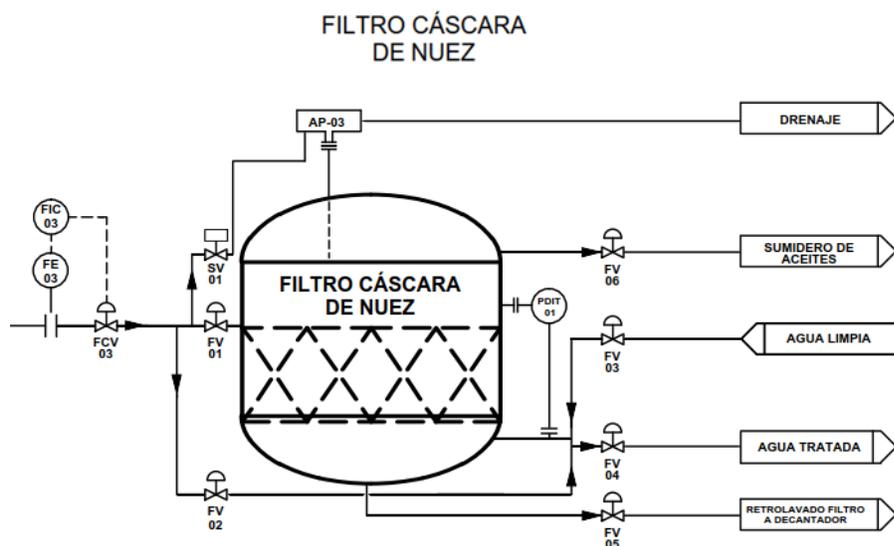
La filtración representa la tercera etapa del proceso en un Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) y, en cierta medida, la etapa final. En esta etapa, el agua procedente de la celda de flotación ingresa al filtro, controlando su flujo mediante la válvula de control FCV-03 y se mide mediante el medidor de flujo FIT-03. Para permitir el llenado del filtro, es necesario que la válvula de entrada FV-01 se encuentre abierta. En caso de decidir desviar el flujo de agua hacia el drenaje, se activa una válvula solenoide mediante la bomba AP-03.

La válvula FV-02 permite el paso de agua hacia el filtro para llevar a cabo el proceso de retrolavado cuando sea necesario y siempre y cuando la válvula FV-04 esté cerrada. Esta última válvula, a su vez, permite la salida de agua tratada hacia un tanque o recipiente de almacenamiento. Durante el proceso de filtración, los residuos de aceite se eliminan por la parte superior del filtro, habilitando la válvula FV-06 para dirigirlos hacia el sumidero de aceites.

Por último, en la secuencia de retrolavado del filtro, la válvula FV-03 se abre para permitir el ingreso de agua limpia al filtro, lo que garantiza su respectiva limpieza interna. Una vez finalizada la secuencia de retrolavado, la válvula FV-05 se abre para que el agua residual ingrese al decantador (en la Figura 6-8 se ilustra el plano P&ID y representa el proceso de filtración).

Figura 6-8

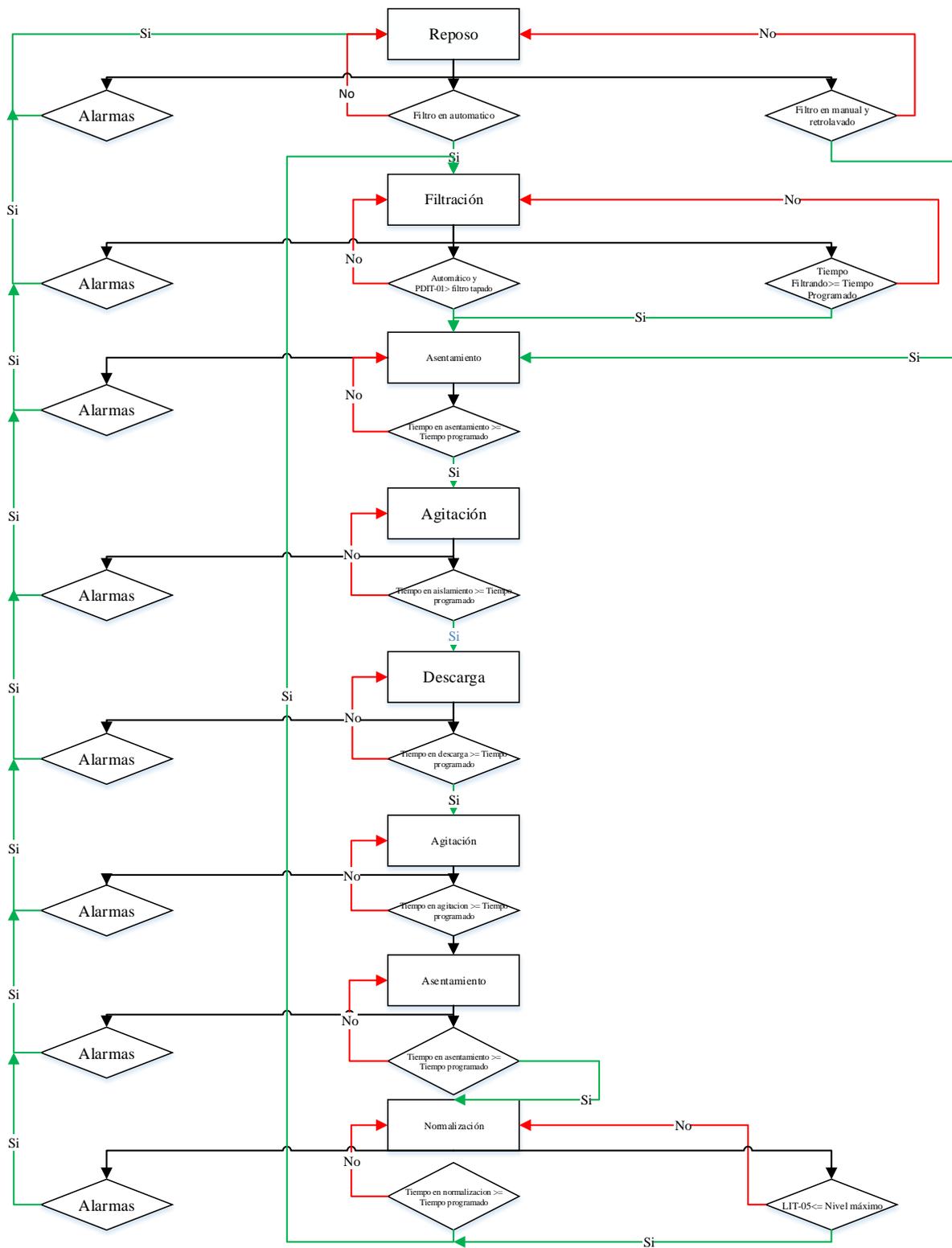
P&ID etapa de filtración STAP



Fuente: El autor.

El Filtro cáscara de nuez se utiliza para filtrar sólidos y aceites del flujo de agua producida. A medida que el fluido sucio pasa a través del Filtro, se eliminan la mayoría de los sólidos y aceites. El efluente de este filtro luego fluye hacia la salida de agua limpia. El flujo continúa de esta manera hasta que el filtro deba ser "regenerado" debido al tiempo transcurrido o a la presión diferencial (la diferencia entre las presiones de entrada y salida). La regeneración puede ser iniciada automáticamente o de forma manual (en la Figura 6-9 *Diagrama de flujo filosofía de operación etapa de filtración STAP* representa el diagrama de flujo de los estados de operación del filtro).

Figura 6-9
Diagrama de flujo filosofía de operación etapa de filtración STAP



Fuente: El autor.

En donde, las secuencias son:

- **Reposo:** Es el estado donde el filtro no se encuentra en operación y espera la orden del operador para realizar las demás secuencias.
- **Filtración:** Estado o secuencia inicial de la etapa de filtración, esta secuencia se da cuando el filtro entra en modo de operación automática y no se cumple dos condiciones; cuando el valor de presión diferencial es menor al valor asignado para determinar cuando el filtro se encuentra tapado u obstruido. La segunda condición es cuando se encuentre filtrando en un periodo de tiempo determinado por el operador.
- **Asentamiento:** Cuando todas las válvulas están cerradas.
- **Agitación:** El fluido en el recipiente pasa a través de la bomba de fluidización AP-03 y baja por el dentro de la boquilla de fluidización, ubicada en el centro del recipiente, que provoca una "acción de chorro".
- **Descarga:** El fluido que contiene sólidos y aceites sale mediante la apertura de la válvula FV-04 hacia el depósito de agua tratada.
- **Agitación:** El fluido en el recipiente pasa a través de la bomba de fluidización AP-03 y baja por el dentro de la boquilla de fluidización, ubicada en el centro del recipiente, que provoca una "acción de chorro".
- **Asentamiento:** Cuando todas las válvulas están cerradas.
- **Normalización:** Es necesario normalizar el filtro para eliminar el fluido sucio y los contaminantes pesados que permanecen en el fondo del recipiente. La válvula FV-03 se abre, lo que permite que el influente se limpie al pasar a través del lecho del medio filtrante y obliga a que todos los contaminantes sean expulsados hacia la línea de descarga de retrolavado mediante la apertura de la FV-05 hacia el decantador.

6.1.4 Filosofía de operación del tanque decantador, representación P&ID.

Un decantador de aguas de producción en la industria petrolera (la Figura 6-10 ilustra un ejemplo de un tanque decantador usado en procesos de la industria petrolera) es un equipo utilizado para separar los diferentes componentes que se encuentran en el agua producida en las etapas anteriores del proceso de tratamiento. Esta agua puede contener aceite, sólidos suspendidos y otros contaminantes que deben ser eliminados antes de que el agua pueda ser descargada en el medio ambiente o reutilizada en el proceso de producción de petróleo.

El decantador utiliza la gravedad como principio de separación, permitiendo que los componentes más pesados se asienten en la parte inferior del tanque, mientras que los componentes más livianos, como el aceite, se elevan hacia la superficie. El aceite se recoge y se envía a un tanque de almacenamiento, mientras que el agua tratada se descarga o se recicla (Boyun, William C, & Ali, 2017).

Figura 6-10

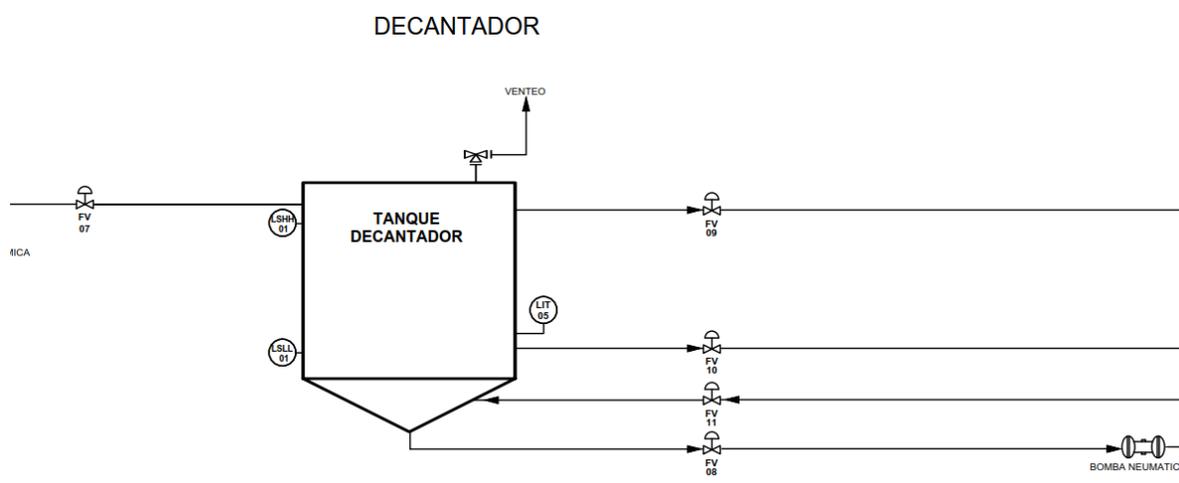
Tanque decantador Estación de producción de crudo



Fuente: El autor.

La etapa de decantación en el Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) tiene como objetivo tratar el agua residual proveniente de la etapa de filtración. Una vez finalizada la secuencia de retrolavado en el filtro, se abre la válvula FV-07 para permitir el ingreso del agua residual al tanque decantador. El medidor LIT-05 mide el nivel de llenado del tanque, mientras que dos interruptores de nivel, LSHH-01 y LSLL-01, ubicados en la parte superior e inferior respectivamente, evitan el desbordamiento y garantizan un nivel mínimo en el tanque (en la Figura 6-11 ilustra el plano P&ID y representa el proceso de la etapa de decantación del STAP).

Figura 6-11
P&ID etapa de decantación STAP



Fuente: El autor.

En esta etapa, se lleva a cabo un proceso prolongado de decantación de sólidos y separación de aceites residuales. Al finalizar la secuencia, la válvula FV-09 permite la salida de los aceites por desbordamiento, mientras que la válvula FV-10 permite la salida del agua tratada para su almacenamiento. Los sólidos residuales son succionados por una bomba neumática a través de la apertura de la válvula FV-08 hacia un depósito de lodos. La limpieza

Mediante la realización del plano P&ID del STAP (ver anexo M), se establecerán las bases para el diseño, la construcción, la puesta en marcha y la operación eficiente del sistema automatizado de tratamiento. Además, este plano será una herramienta fundamental para la identificación y resolución de posibles problemas o mejoras en el proceso, así como para la coordinación y comunicación entre los diferentes equipos de trabajo involucrados en el proyecto.

6.2 Controlador lógico y componentes del sistema de control.

El sistema de control se encarga de medir variables críticas como el flujo, el nivel, la presión y otros parámetros importantes. Luego, estos datos son procesados y analizados para determinar si los procesos están funcionando correctamente y si se están cumpliendo los objetivos de tratamiento del agua de producción. El sistema de control también puede tomar decisiones automáticas, como ajustar la velocidad de las bombas o abrir o cerrar válvulas, para garantizar que el proceso de tratamiento sea lo más eficiente posible y para evitar problemas como la sobrecarga del sistema o la contaminación.

A continuación, se enlista la Selección de componentes del sistema de control con sus características técnicas.

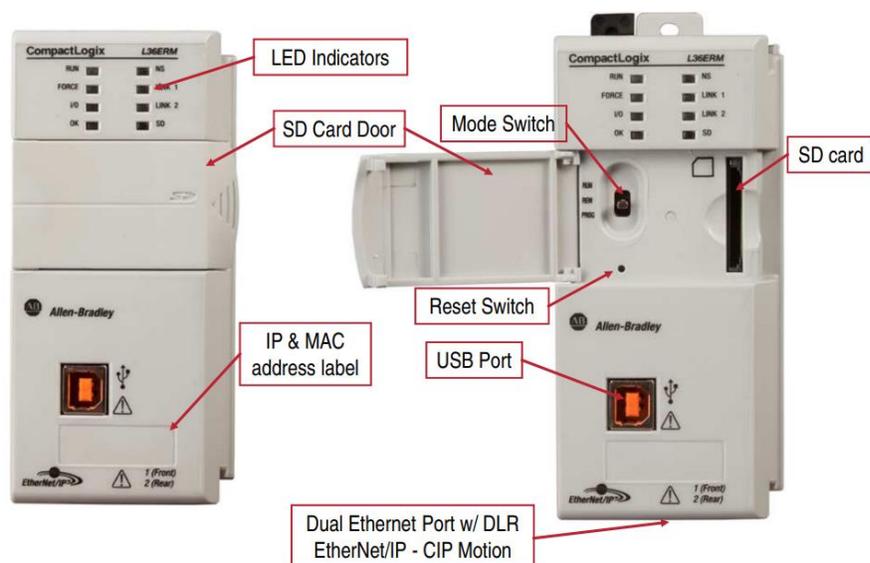
6.2.1 PLC 1769-L30ER CompactLogix 5370 Controller

El controlador 1769-L30ER CompactLogix 5370 de Rockwell (ver Figura 6-13) es un dispositivo altamente versátil y confiable utilizado en el campo de la automatización industrial y el control de procesos. Forma parte de la serie CompactLogix 5370, que se enmarca dentro de la

línea de productos de automatización industrial de Rockwell Automation, una empresa líder en soluciones de automatización (Rockwell Automation, 2020).

Figura 6-13

Anatomía PLC 1769 (L30ER)



Fuente: Tomado de (Rockwell Automation, 2020)

Este controlador programable ha sido especialmente diseñado para proporcionar un rendimiento excepcional y una gran capacidad de procesamiento en entornos industriales exigentes. Su robustez y fiabilidad hacen que sea ampliamente utilizado en una amplia gama de aplicaciones industriales, desde sistemas de control de maquinaria hasta procesos de fabricación complejos.

El 1769-L30ER destaca por su procesador de alto rendimiento, que le permite ejecutar programas de control de manera eficiente y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Esta capacidad de procesamiento potente garantiza una respuesta rápida y precisa ante las señales

y eventos del sistema, lo que resulta fundamental para el control y supervisión eficaz de los procesos industriales (Rockwell Automation, 2020).

La Tabla 1 muestra las características mas relevantes del PLC 1769-L33ER.

Tabla 1

Características del controlador lógico programable

Característica	1769-L33ER
Memoria disponible para el usuario	2MB
Tarjeta de memoria	1784-SD1 (1 GB), con el controlador 1784-SD2 (2 GB)
Puertos de comunicación	2 EtherNet/IP 1 USB
Conexiones Ethernet/IP	32 EtherNet/IP 120 TCP
Capacidad de expansión de módulo	16 módulos 1769 2 bancos de módulos
Clasificación de distancia	4 módulos
Fuente de alimentación eléctrica	1769-PA2, 1769-PB2, 1769-PA4, 1769-PB4

Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2020)

Además de su rendimiento excepcional, el controlador CompactLogix 5370 ofrece una amplia gama de opciones de comunicación. Está equipado con puertos Ethernet y serie integrados, lo que facilita la conectividad con otros dispositivos y permite la transferencia rápida de datos. También es compatible con protocolos de comunicación estándar de la industria, como Ethernet/IP, ControlNet y DeviceNet, lo que brinda flexibilidad y compatibilidad con una variedad de equipos periféricos y sistemas de control.

Otra ventaja significativa del 1769-L30ER es su capacidad de expansión. El controlador cuenta con una memoria ampliable, lo que permite almacenar programas de control complejos, datos de proceso y configuraciones del sistema. Esta capacidad de expansión garantiza que el

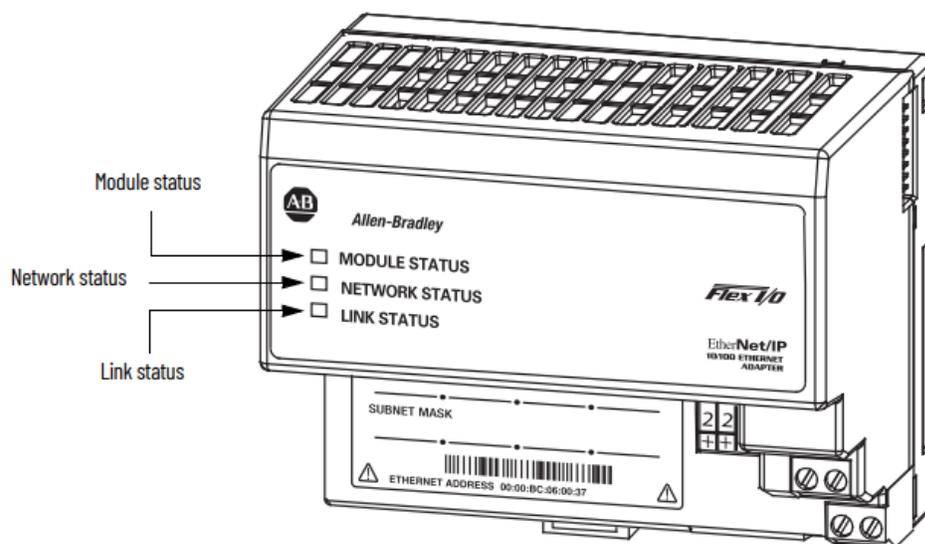
controlador pueda adaptarse y crecer junto con los requisitos cambiantes de la aplicación, sin comprometer su rendimiento.

6.2.2 FlexIO 1794-AENT 1794 10/100 Mbps Ethernet Adapter.

El adaptador Ethernet FlexIO 1794-AENT de Rockwell (ver Figura 6-14) es un componente fundamental en el ámbito de los sistemas de control y automatización industrial. Su función principal es habilitar la conectividad Ethernet y posibilitar la comunicación eficiente y confiable entre diversos dispositivos dentro de una red.

En el entorno de la automatización industrial, la conectividad Ethernet es esencial para lograr una comunicación fluida y precisa entre los diferentes componentes de un sistema. El adaptador 1794-AENT desempeña un papel crucial al actuar como un enlace de comunicación entre los módulos de E/S FlexIO y la red Ethernet/IP (Rockwell Automation, 2022).

Figura 6-14
Parte frontal FlexIO EtherNet/IP



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2022)

Al proporcionar una interfaz Ethernet de 10/100 Mbps, el adaptador permite la transferencia rápida de datos y la transmisión de información crítica en tiempo real. Esta conectividad Ethernet/IP está basada en un estándar ampliamente adoptado en la industria, lo que asegura la interoperabilidad con otros dispositivos y sistemas compatibles con Ethernet/IP. De esta manera, el adaptador facilita la integración de los sistemas de control en entornos industriales complejos.

La utilización del adaptador 1794-AENT junto con los módulos de E/S FlexIO amplía significativamente las capacidades de entrada y salida de un sistema de control. Esto permite conectar sensores, actuadores y otros dispositivos periféricos a través de una conexión de bus local, proporcionando una mayor flexibilidad y adaptabilidad en función de los requisitos de la aplicación.

En la Tabla 2, muestra las características más relevantes de la FlexIO EtherNet/IP.

Tabla 2

Características técnicas FlexIO EtherNet/IP

Característica	Descripción
Comunicación Ethernet/IP	Utiliza el protocolo Ethernet/IP, estándar de comunicación ampliamente usado en la industria.
Conectividad flexible	Permite la conexión de módulos de E/S FlexIO de Rockwell a través de una conexión de bus local.
Configuración y monitoreo	Se puede configurar y monitorear utilizando herramientas de software de Rockwell Automation, como Studio 5000.
Alimentación redundante	Compatible con opciones de alimentación redundante para asegurar la disponibilidad continua del sistema.

Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2022)

Además de su papel en la conectividad, el adaptador 1794-AENT también se destaca por su capacidad de configuración y monitoreo. A través de herramientas de software como Studio 5000 de Rockwell Automation, es posible realizar una configuración sencilla del adaptador y monitorear sus funciones de comunicación y E/S de manera eficiente. Esto facilita el mantenimiento y la supervisión del sistema en tiempo real, optimizando así el rendimiento y la eficiencia operativa (Rockwell Automation, 2022).

6.2.3 Módulo de entradas digitales 1769-IQ16 16 Point 24 VDC Input

El módulo 1769-IQ16 16 Point 24 VDC Input de Rockwell (ver Figura 6-15) Automation es un componente de entradas digitales utilizado en sistemas de control y automatización industrial. Este módulo permite la adquisición de señales digitales provenientes de dispositivos externos, convirtiéndolas en valores digitales utilizables por el sistema de control.

Figura 6-15

Módulo de entradas digitales 1769-IQ16



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 1999)

Este módulo tiene 16 puntos de entrada, lo que significa que puede adquirir hasta 16 señales digitales diferentes. Estas entradas están diseñadas para trabajar con una tensión de 24 VDC, lo que las hace compatibles con la mayoría de las aplicaciones industriales que utilizan este estándar de voltaje.

El módulo 1769-IQ16 es compatible con una amplia gama de dispositivos de campo y sensores que generan señales digitales. Estos dispositivos pueden incluir interruptores, sensores de proximidad, finales de carrera y otros dispositivos que proporcionan información binaria sobre el estado de una máquina o proceso (Rockwell Automation, 1999).

La Tabla 3, muestra las especificaciones técnicas mas relevantes del modulo 1769-IQ16.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del 1769-IQ16

Especificación	1769-IQ16
Tipo de tensión	24 VDC (drenador/surtidor)
Margen de tensión de funcionamiento	10-30 VDC (a 30°C) 10-26.4 VDC (a 60°C)
Número de entradas	16
Consumo de corriente del bus (máx.)	115 mA a 5 VDC (0.575 W)
Disipación del calor	3.55 W total
Retardo de señal (máx.)	Conexión: 8.0 ms Desconexión: 8.0 ms
Tensión en estado bloqueado (máx.)	5 VDC
Intensidad en estado bloqueado (máx.)	1.5 mA
Tensión en estado conductor (mín.)	10 VDC
Intensidad en estado conductor (mín.)	2.0 mA
Intensidad de irrupción (máx.)	250 mA
Impedancia nominal	3 k Ω

Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 1999)

El módulo 1769-IQ16 es fácil de integrar en sistemas de control CompactLogix de Rockwell Automation. Se puede instalar directamente en el chasis del sistema y se conecta mediante un bus de comunicación local. Esto permite una conexión rápida y sencilla con el controlador principal y otros módulos de E/S.

Además, el módulo 1769-IQ16 es compatible con el software de programación de Rockwell Automation, como Studio 5000. Esto facilita la configuración y la programación del módulo dentro del entorno de desarrollo, permitiendo establecer la lógica de control necesaria para utilizar las señales adquiridas de manera efectiva.

6.2.4 Módulo de salidas digitales 1769-OB16 24 VDC Output

El módulo de salidas discretas 1769-OB16 (ver Figura 6-16) es un dispositivo que ofrece 16 salidas a relé y funciona en un rango de voltaje de 10 a 30 VDC.

Figura 6-16

Módulo de salidas digitales 1769-OB16



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2001)

Este módulo se destaca por su fácil instalación, soporte y conexión, ya que viene equipado con un carriel que se ajusta al rack o arreglo de módulos. Además, cuenta con una

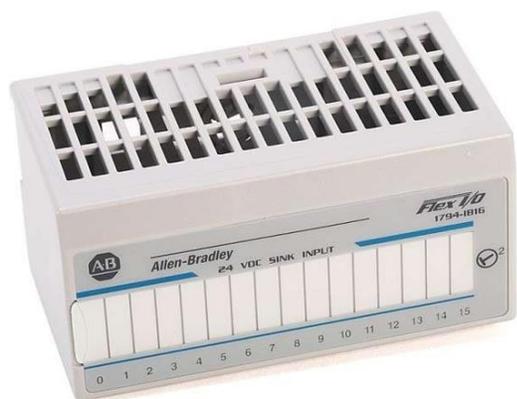
palanca que enclava el bus al módulo del lado izquierdo, facilitando la instalación en tableros de control (Rockwell Automation, 2001).

6.2.5 Módulo de entradas digitales 1794-IB16 24 VDC Input

El módulo de entradas digitales 1794-IB16 (ver Figura 6-17) es un componente de adquisición de señales digitales diseñado para su uso en entornos industriales. Este módulo ofrece una solución confiable para el monitoreo y control de señales de entrada en sistemas automatizados. El 1794-IB16 es parte de la serie de productos 1794 Flex I/O de Rockwell Automation (Rockwell Automation, 2015).

Figura 6-17

Vista frontal modulo 1794-IB16 24 VDC



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

Características principales:

1. Entradas digitales: El módulo 1794-IB16 proporciona 16 canales de entrada digital, lo que permite la conexión de dispositivos o sensores digitales. Estas entradas son compatibles

con señales de 24 VDC (corriente continua) y pueden detectar tanto señales de encendido/apagado como señales de pulso.

2. **Compatibilidad de voltaje:** El módulo es capaz de trabajar con una amplia gama de voltajes de entrada, en particular, acepta una fuente de alimentación de 24 VDC. Esto lo hace compatible con diversos sistemas de control y permite una integración sencilla en aplicaciones industriales.
3. **Interfaz de conexión:** El 1794-IB16 utiliza un conector amovible, que facilita la instalación y el mantenimiento del módulo. El conector proporciona una conexión segura y confiable con el bus de campo o el módulo de E/S al que está conectado.
4. **Diagnóstico y estado de la entrada:** El módulo cuenta con indicadores LED en cada canal de entrada, que permiten una fácil identificación del estado de la señal. Estos LED's proporcionan información visual sobre el estado de la entrada, como si está activa o inactiva, lo que facilita la supervisión y el diagnóstico rápido de problemas.
5. **Configuración y control:** El 1794-IB16 se configura y controla mediante software de programación compatible con la plataforma de automatización utilizada. Esto proporciona flexibilidad en la configuración de las entradas digitales, como asignar etiquetas o establecer alarmas o eventos asociados a cada canal.
6. **Robustez y durabilidad:** El módulo está diseñado para soportar condiciones industriales exigentes, como variaciones de temperatura, vibraciones y humedad. Además, cumple con estándares de protección contra sobretensiones y cortocircuitos, lo que garantiza una operación segura y confiable en entornos industriales adversos (Rockwell Automation, 2015).

6.2.6 Módulo de salidas digitales 1794-OB16 24 VDC Output

El módulo de salidas digitales 1794-OB16 (ver Figura 6-18) es un componente diseñado para proporcionar control y activación de dispositivos en entornos industriales. Este módulo ofrece 16 canales de salida digital, permitiendo la conexión de cargas de potencia moderada a través de señales de salida de 24 VDC (corriente continua) (Rockwell Automation, 2015).

Figura 6-18

Vista módulo de salidas digitales 1794-OB16 24 VDC Output



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

Características principales:

1. Salidas digitales: El módulo 1794-OB16 proporciona 16 canales de salida digital para controlar dispositivos o cargas. Estas salidas son compatibles con señales de 24 VDC y son capaces de activar y desactivar dispositivos según comandos recibidos desde un controlador o sistema de automatización.

2. **Compatibilidad de voltaje:** El módulo es capaz de trabajar con una amplia gama de voltajes de salida, en particular, emite señales de 24 VDC. Esto lo hace compatible con diversos dispositivos y sistemas de control presentes en aplicaciones industriales.
3. **Interfaz de conexión:** El 1794-OB16 utiliza un conector amovible, lo que facilita su instalación y mantenimiento. Este conector proporciona una conexión segura y confiable con el bus de campo o el módulo de E/S al que está conectado, asegurando una correcta transmisión de las señales de salida.
4. **Capacidad de carga:** Cada canal de salida del módulo es capaz de suministrar corriente a cargas de potencia moderada, lo que permite activar y controlar dispositivos o sistemas que requieran un nivel de potencia adecuado.
5. **Diagnóstico y estado de la salida:** El módulo cuenta con indicadores LED en cada canal de salida, lo que permite una fácil identificación del estado de la señal de salida. Estos LEDs proporcionan información visual sobre el estado de activación de cada salida, lo que facilita la supervisión y el diagnóstico rápido de problemas.
6. **Configuración y control:** El 1794-OB16 se configura y controla mediante software de programación compatible con la plataforma de automatización utilizada. Esto brinda flexibilidad en la configuración de las salidas digitales, como asignar etiquetas o establecer lógica de control asociada a cada canal.
7. **Robustez y durabilidad:** El módulo está diseñado para soportar condiciones industriales exigentes, incluyendo variaciones de temperatura, vibraciones y humedad. Además, cumple con estándares de protección contra sobretensiones y cortocircuitos, asegurando una operación segura y confiable en entornos industriales adversos (Rockwell Automation, 2015).

6.2.7 Módulo de entradas analógicas 1794-IE8

El módulo de entradas analógicas 1794-IE8 (ver Figura 6-19) es un dispositivo diseñado para adquirir y monitorear señales analógicas en entornos industriales. Este módulo ofrece 8 canales de entrada analógica, permitiendo la conexión de sensores o dispositivos que proporcionan una señal de voltaje o corriente proporcional a la variable medida.

Figura 6-19

Vista módulo de entradas analógicas 1794-IE8



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

Características principales:

1. Entradas analógicas: El módulo 1794-IE8 cuenta con 8 canales de entrada analógica, lo que permite la conexión simultánea de hasta 8 sensores o dispositivos de medición. Estas entradas son compatibles con señales de voltaje o corriente, y están diseñadas para adquirir y convertir con precisión los valores analógicos en formato digital.
2. Rango de medición: El módulo admite una amplia gama de rangos de medición configurables, lo que permite adaptarse a diferentes variables de proceso. Por ejemplo, puede medir temperaturas, presiones, niveles o cualquier otra magnitud analógica dentro de los rangos especificados por el fabricante.

3. Resolución y precisión: El 1794-IE8 ofrece una alta resolución y precisión en la conversión de las señales analógicas. Esto garantiza una lectura precisa de los valores medidos, lo que es crucial para el control y monitoreo de procesos industriales críticos.
4. Interfaz de conexión: El módulo utiliza un conector amovible, lo que facilita la instalación y el mantenimiento. El conector proporciona una conexión segura y confiable con el bus de campo o el módulo de E/S al que está conectado, asegurando una correcta transmisión de las señales analógicas.
5. Configuración y calibración: El 1794-IE8 se configura y calibra mediante software de programación compatible con la plataforma de automatización utilizada. Esto permite ajustar y personalizar los rangos de medición, así como realizar la calibración necesaria para garantizar una precisión óptima en las lecturas analógicas.
6. Diagnóstico y estado de la entrada: El módulo cuenta con indicadores LED en cada canal de entrada, lo que facilita la identificación del estado de la señal y ayuda en el diagnóstico de problemas. Estos LEDs proporcionan información visual sobre la condición de cada entrada, como si está dentro del rango deseado o si se produce alguna falla.
7. Robustez y durabilidad: El módulo está diseñado para soportar condiciones industriales adversas, como variaciones de temperatura, vibraciones y humedad. Además, cumple con estándares de protección contra sobretensiones y cortocircuitos, asegurando un rendimiento confiable y una larga vida útil en entornos industriales exigentes.

6.2.8 *Módulo de salidas analógicas 1794-OE4*

El módulo de salidas analógicas 1794-OE4 (ver Figura 6-20) es un componente diseñado para proporcionar señales de salida analógicas en entornos industriales. Este módulo

ofrece 4 canales de salida analógica, permitiendo la generación de señales de voltaje o corriente proporcional a la variable de control (Rockwell Automation, 2015).

Figura 6-20

Vista módulo de salidas analógicas 1794-OE4



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

Características principales:

1. Salidas analógicas: El módulo 1794-OE4 cuenta con 4 canales de salida analógica, lo que permite la generación de señales de control en aplicaciones industriales. Estas salidas son compatibles con señales de voltaje o corriente y están diseñadas para proporcionar una respuesta precisa y proporcional a las demandas del sistema (Rockwell Automation, 2015).
2. Rango de salida configurable: El módulo permite la configuración de diferentes rangos de salida, adaptándose a las necesidades de la aplicación. Esto permite generar señales de voltaje o corriente en rangos específicos, facilitando la integración con dispositivos y sistemas de control externos.
3. Resolución y precisión: El 1794-OE4 ofrece una alta resolución y precisión en la generación de las señales analógicas de salida. Esto garantiza un control preciso y confiable

de los dispositivos o sistemas que reciben estas señales, lo que es esencial para un rendimiento óptimo en procesos industriales críticos.

4. Interfaz de conexión: El módulo utiliza un conector amovible, lo que facilita la instalación y el mantenimiento. El conector proporciona una conexión segura y confiable con el bus de campo o el módulo de E/S al que está conectado, asegurando una correcta transmisión de las señales analógicas de salida.
5. Configuración y control: El 1794-OE4 se configura y controla mediante software de programación compatible con la plataforma de automatización utilizada. Esto permite ajustar los parámetros de salida, como rangos y valores de escala, así como establecer la lógica de control asociada a cada canal de salida.
6. Diagnóstico y estado de la salida: El módulo cuenta con indicadores LED en cada canal de salida, lo que facilita la identificación del estado de la señal generada. Estos LED's proporcionan información visual sobre la condición de cada salida, permitiendo un monitoreo rápido y sencillo de las señales de control generadas.
7. Robustez y durabilidad: El módulo está diseñado para soportar condiciones industriales adversas, como variaciones de temperatura, vibraciones y humedad. Además, cumple con estándares de protección contra sobretensiones y cortocircuitos, asegurando un rendimiento confiable y una larga vida útil en entornos industriales exigentes (Rockwell Automation, 2015).

6.2.9 *Switch de comunicaciones Stratix 2000*

El switch de comunicaciones Stratix 2000 (ver Figura 6-21) es un dispositivo diseñado para proporcionar una conectividad confiable y segura en redes industriales. Este switch se utiliza

comúnmente para establecer una red Ethernet industrial en entornos de automatización y control, permitiendo la comunicación eficiente entre diferentes dispositivos y sistemas (Rockwell Automation, 2017).

Figura 6-21

Vista Switch Stratix 2000



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2017)

Características técnicas del Switch de Comunicaciones Stratix 2000:

1. Puertos Ethernet: El Stratix 2000 cuenta con múltiples puertos Ethernet, que pueden variar según el modelo. Estos puertos permiten la conexión de diferentes dispositivos, como controladores de automatización, servidores, equipos de supervisión y otros dispositivos de red, facilitando la comunicación y el intercambio de datos.
2. Conectividad Ethernet industrial: El switch es compatible con los estándares de Ethernet industrial, como EtherNet/IP, que es ampliamente utilizado en entornos industriales para la comunicación de dispositivos de automatización. Esto permite una integración sencilla con otros dispositivos y sistemas compatibles con este estándar.

3. Administración y configuración: El Stratix 2000 ofrece capacidades de administración y configuración avanzadas, lo que permite ajustar y optimizar el rendimiento de la red. Esto incluye funciones como la configuración de VLAN, calidad de servicio (QoS), seguridad de red y monitoreo del tráfico, lo que ayuda a garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de la red.
4. Confiabilidad y redundancia: El switch está diseñado para proporcionar alta confiabilidad y disponibilidad en entornos industriales. Ofrece características de redundancia, como enlaces ascendentes duales (uplink) y soporte para protocolos de redundancia de anillo, que permiten una rápida recuperación en caso de fallos de red.
5. Seguridad de red: El Stratix 2000 cuenta con funciones de seguridad integradas para proteger la red industrial contra amenazas externas y asegurar la integridad de los datos. Esto incluye características como autenticación de dispositivos, control de acceso basado en puertos y detección de intrusos, proporcionando una capa adicional de protección para la red (Rockwell Automation, 2017).

La FlexIO 1794-AENT es un módulo de E/S remoto que permite la conexión de dispositivos y sensores distribuidos en una red Ethernet industrial. Este módulo utiliza el protocolo EtherNet/IP para la comunicación y se conecta al switch de comunicaciones Stratix 2000 a través de los puertos Ethernet disponibles.

La FlexIO 1794-AENT actúa como una extensión de la red Ethernet industrial, permitiendo la adquisición y control de señales analógicas o digitales en ubicaciones remotas. El switch de comunicaciones Stratix 2000 facilita la conectividad de la FlexIO 1794-AENT con otros dispositivos y sistemas en la red, asegurando una comunicación confiable y eficiente.

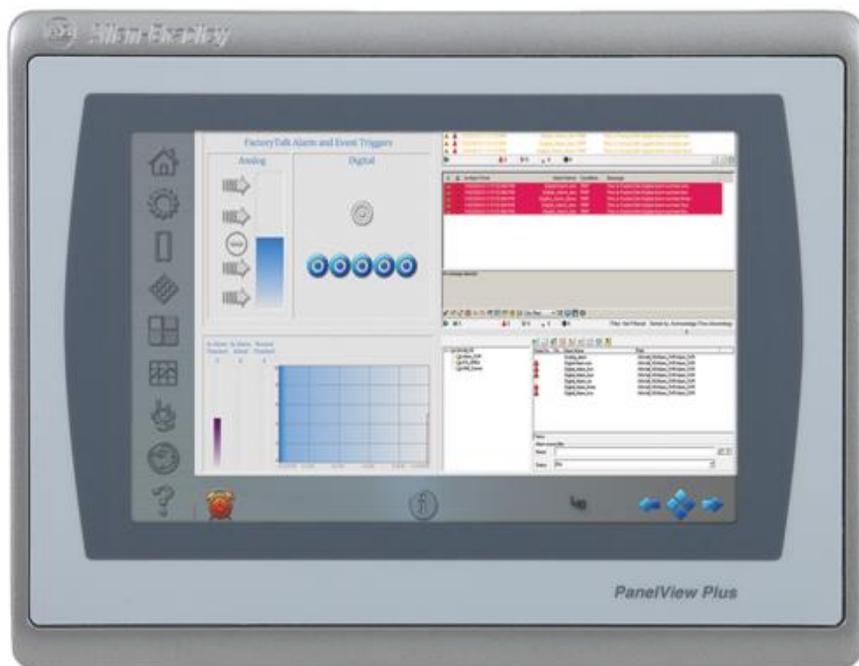
El switch Stratix 2000 proporciona los puertos Ethernet necesarios para conectar la FlexIO 1794-AENT, permitiendo la transmisión de datos entre el módulo de E/S y otros dispositivos en la red. Además, con sus capacidades de administración y configuración, el switch permite optimizar el rendimiento de la red y garantizar la seguridad de la comunicación.

6.2.10 PanelView Plus 7

El PanelView Plus 7 de Rockwell Automation (Figura 6-22) es una interfaz de operador que combina una pantalla táctil color de alta resolución con capacidades de control y monitoreo en un dispositivo compacto. Diseñado para su uso en entornos industriales, el PanelView Plus 7 proporciona una interfaz intuitiva y fácil de usar para interactuar con sistemas de automatización y control (Rockwell Automation, 2015).

Figura 6-22

Vista PanelView Plus 7 9"



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

En la Tabla 4 muestra las características mas relevantes de la PanelView Plus 7.

Tabla 4

Características del hardware PanelView Plus 7

Elemento	Característica	Descripción
Pantalla/táctil	Pantalla gráfica a color TFT con pantalla táctil en diferentes tamaños	<ul style="list-style-type: none"> - Pantalla táctil de 4.3 pulg. de ancho (WQVGA) - Pantalla táctil de 5.7 pulg. (VGA) - Pantalla táctil de 6.5 pulg. (VGA) - Pantalla táctil de 9.0 pulg. de ancho (WVGA) - Pantalla táctil de 10.4 pulg. (SVGA) - Pantalla de 12.1 pulg. de ancho función táctil (WXGA) - Pantalla táctil de 15.0 pulg. (XGA)
Alimentación eléctrica	Entrada de alimentación no aislada de 24 VCC nom. (18...30 VCC)	El PanelView Plus 7 requiere una entrada de alimentación de corriente continua de 24 VCC nominal (18...30 VCC)
Puerto Ethernet	Un puerto Ethernet 10/100Base-T	El terminal cuenta con un puerto Ethernet para la comunicación con el controlador, compatible con velocidades de 10/100Base-T y con función Auto MDI/MDI-X.
Ranuras de montaje	Varios tamaños de ranuras de montaje	Las palancas de montaje se insertan en las ranuras del terminal para facilitar su montaje en paneles o envoltentes. El número de ranuras varía según el tamaño del terminal.
Puerto USB (anfitrión)	Un puerto USB 2.0 de alta velocidad (tipo A)	El PanelView Plus 7 cuenta con un puerto USB anfitrión de alta velocidad (tipo A) para la conexión de dispositivos externos compatibles con USB 2.0.
Puerto USB (dispositivo)	Un puerto USB 2.0 de alta velocidad (tipo B)	El terminal tiene un puerto USB de dispositivo de alta velocidad (tipo B) USB 2.0 que permite la conexión a una computadora principal.
Ranura de tarjeta SD	Ranura para tarjetas SD y cubierta protectora	<ul style="list-style-type: none"> - El PanelView Plus 7 dispone de una ranura para tarjetas SD, compatible con tarjetas con número de catálogo 1784-SDx, para almacenamiento externo. - Se incluye una cubierta protectora que asegura la tarjeta SD y es requerida en instalaciones ATEX y en lugares peligrosos.
Batería	Cubierta de la batería	El terminal tiene una cubierta que permite el acceso a la batería de litio, facilitando su reemplazo cuando sea necesario.
Indicadores de estado	Indicadores de estado en la parte trasera del terminal	Los indicadores de estado ubicados en la parte trasera del terminal proporcionan información sobre el estado y las condiciones de fallo del dispositivo.

Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2015)

6.3 Diseño y desarrollo de la lógica de control.

En el ámbito de la automatización industrial, el diseño y desarrollo de la lógica de control desempeña un papel fundamental para el funcionamiento eficiente y confiable de los sistemas automatizados. En este contexto, los Controladores Lógicos Programables (PLC) han demostrado ser herramientas esenciales, permitiendo la programación y ejecución de algoritmos lógicos complejos que supervisan y controlan una amplia variedad de procesos industriales.

El PLC CompactLogix L30ER y el entorno de desarrollo Studio 5000 se han convertido en una opción popular entre los profesionales de la automatización debido a su versatilidad y capacidad de adaptación a diversas aplicaciones industriales. El lenguaje de programación Ladder, utilizado en conjunto con este hardware y software, ofrece una forma gráfica e intuitiva de diseñar y desarrollar la lógica de control.

El diseño de la lógica de control implica el análisis cuidadoso de los requerimientos del sistema y la traducción de estos en un conjunto de instrucciones lógicas comprensibles para el PLC. Este proceso requiere una comprensión profunda de los componentes del sistema, así como de los dispositivos y sensores utilizados para la adquisición de datos. El objetivo principal es establecer un conjunto de reglas y condiciones que gobiernen el comportamiento del sistema, permitiendo una operación segura, eficiente y confiable.

El lenguaje Ladder, basado en una representación gráfica de circuitos eléctricos, proporciona un enfoque visual y fácil de entender para el diseño de la lógica de control. Mediante la combinación de contactos y bobinas, que representan entradas y salidas respectivamente, se pueden construir redes lógicas complejas. Estas redes, junto con las instrucciones adicionales disponibles en el lenguaje, permiten la implementación de funciones lógicas avanzadas, como

temporizadores, contadores y comparadores, para abordar una amplia gama de requisitos de control (Oliverio, Garcia, & Perez, 2017).

6.3.1 STUDIO 5000

Studio 5000 de Rockwell Automation (ver Figura 6-23), es un Entorno Integral para el Desarrollo de Control Industrial. Studio 5000 de Rockwell Automation es un entorno de desarrollo integrado que ofrece una amplia gama de herramientas y funcionalidades para el diseño, desarrollo, prueba y mantenimiento de sistemas de control industrial. Con una interfaz intuitiva y coherente, Studio 5000 facilita la programación eficiente y fluida en entornos de automatización industrial (Rockwell Automation, 2018).

Figura 6-23

Studio 5000, software de diseño de sistemas de automatización



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2018)

Una de las características sobresalientes de Studio 5000 es su capacidad para admitir múltiples plataformas de hardware, incluyendo la serie de Controladores Lógicos Programables (PLCs) CompactLogix, ControlLogix y SoftLogix, así como la familia de Controladores de E/S Distribuidas (Distributed I/O). Esto proporciona a los diseñadores y programadores la flexibilidad

de seleccionar la plataforma de hardware más adecuada para sus aplicaciones específicas de control industrial.

Studio 5000 cuenta con un conjunto de herramientas poderosas para la creación y edición de programas de control. El Editor de Lógica permite desarrollar la lógica de control utilizando lenguajes de programación como Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST), Function Block Diagram (FBD) y Sequential Function Chart (SFC). Estos lenguajes ofrecen diferentes enfoques para expresar la lógica de control, lo que permite a los usuarios elegir la opción más adecuada según las necesidades del proyecto.

Studio 5000 ofrece capacidades de simulación que permiten a los usuarios probar y verificar la lógica de control antes de implementarla en tiempo real. Esta funcionalidad de simulación ayuda a identificar posibles errores y optimizar el rendimiento del programa antes de su despliegue en el sistema real.

Además, Studio 5000 proporciona herramientas avanzadas de diagnóstico que permiten monitorear y solucionar problemas en el sistema de control. Estas herramientas brindan información detallada sobre el estado del sistema, lo que facilita la detección y resolución de problemas, y ayuda a mejorar la eficiencia y la productividad.

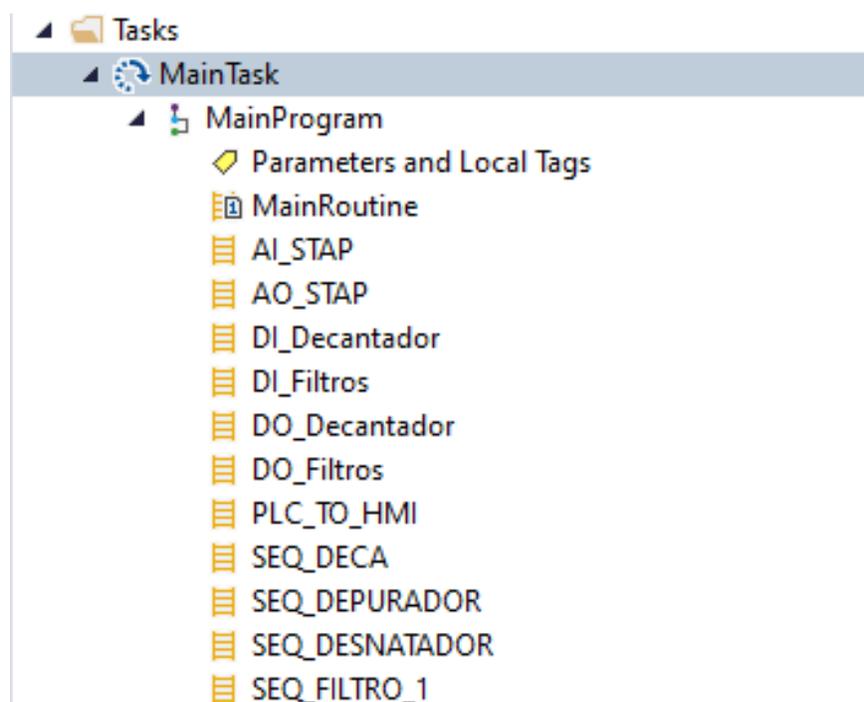
6.3.2 Lógica de programación el lenguaje Ladder, proyecto STAP.

Una vez realizada la selección del controlador lógico y los elementos que integran el sistema de control, se avanza hacia el diseño de la lógica de programación. En este proceso, se considera tanto la funcionalidad requerida como los requisitos específicos para el control de cada etapa del proceso del Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP)

En el proyecto STAP (Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción), se emplea la lógica de programación en lenguaje Ladder para desarrollar un control preciso y eficiente en el proceso de tratamiento de aguas residuales generadas durante la producción de petróleo y gas, en la Figura 6-24 se ilustra el grupo de tareas que fueron programadas para este proyecto. El lenguaje Ladder proporciona una representación gráfica y estructurada de la lógica de control, lo cual permite una programación organizada y distribuida.

Figura 6-24

Estructura de tareas programadas



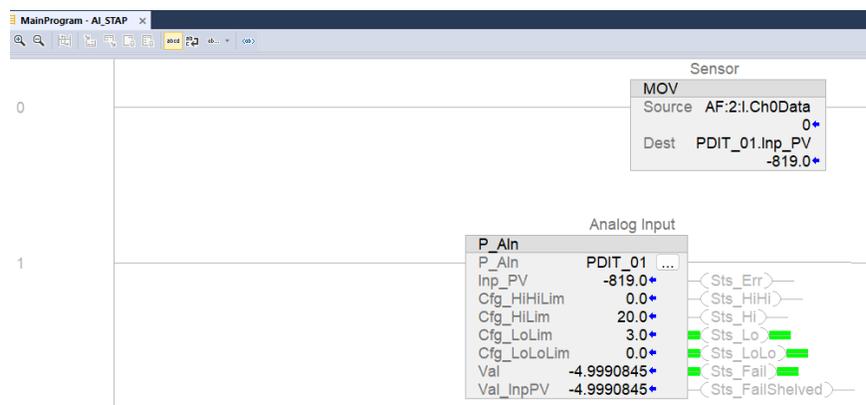
Fuente: Tomada por el autor.

AI_STAP: Esta rutina se encarga de escalar las señales analógicas de entrada del proyecto STAP. Su función es convertir y ajustar los valores de las señales analógicas provenientes de sensores o dispositivos de medición para que sean adecuados y utilizables en el sistema de control, en la Figura 6-25 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para

variables análogas de entradas del proyecto. En el anexo A **AI_STAP**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las entradas analógicas del proyecto.

Figura 6-25

Rutinas de escalado señal analógica de entrada PDIT-01



Fuente: El autor.

La Tabla 5, se observan todas las señales análogas del proyecto STAP con su respectiva descripción.

Tabla 5

Lista de señales de instrumentación entradas análogas AI

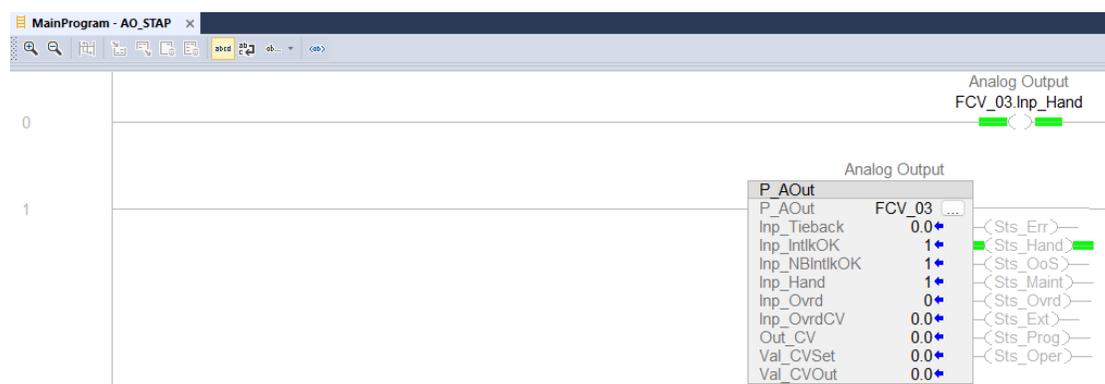
Tag P&ID	Tag PLC	Descripción	Tipo
PIT-01	PIT_01	Presión de entrada del depurador	AI
FIT-01	FIT_01	Instrumento de flujo control de flujo de entrada del depurador	AI
PIT-02	PIT_02	Presión del Depurador	AI
LIT-01	LIT_01	Instrumento de nivel para control de nivel de crudo del depurador	AI
LIT-02	LIT_02	Instrumento de nivel para control de nivel de agua del depurador	AI
FIT-02	FIT_02	Instrumento de flujo control de flujo de entrada del desnatado	AI
LIT-03	LIT_03	Nivel de Aceite del desnatado	AI
LIT-04	LIT_04	Instrumento de nivel para control de nivel de agua del desnatado	AI
PIT-03	PIT_03	Presión succión bomba de aceite del desnatado	AI
PIT-04	PIT_04	Presión de descarga bomba de aceite del desnatado	AI
FIT-03	FIT_03	Instrumento de flujo control de flujo de entrada del del filtro	AI
PDIT-01	PDIT_01	Presión diferencial del filtro	AI
LIT-05	LIT_05	Nivel de decantador	AI

Fuente: El autor.

AO_STAP: En esta rutina se realiza el escalado de las señales analógicas de salida del proyecto STAP. Su objetivo es ajustar los valores de las señales analógicas que serán enviadas a dispositivos de control o monitoreo externos, asegurando una correcta interpretación y respuesta por parte de dichos dispositivos, en la Figura 6-26 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para variables análogas de salidas del proyecto. En el anexo B **AO_STAP**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las salidas analógicas del proyecto.

Figura 6-26

Rutinas de escalado señal analógica de salida FCV-03



Fuente: El autor.

La Tabla 6, se observan todas las señales análogas del proyecto STAP con su respectiva descripción.

Tabla 6

Lista de señales de instrumentación salidas análogas AO

Tag P&ID	Tag PLC	Descripción	Tipo
LCV-01	LCV_01	Válvula control de nivel de crudo del depurador	AO
LCV-02	LCV_02	Válvula control de nivel de agua del depurador	AO
LCV-04	LCV_04	Válvula control de nivel de agua del desnatado	AO
FCV-03	FCV_03	Válvula Control de flujo de entrada del filtro	AO

Fuete: El autor.

DI_Decantador: Esta rutina se encarga de escalar las señales digitales de entrada específicas del decantador en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Su función es adaptar y procesar las señales digitales provenientes de sensores o interruptores utilizados en el decantador, para que puedan ser interpretadas y utilizadas por el sistema de control, en la Figura 6-27 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para variables digitales de entrada de la posición de la FV-07 en el decantador. En el anexo C **DI_Decantador**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las entradas digitales de la etapa de decantación.

Figura 6-27

Rutinas de escalado señales digitales de entrada ZSO/ZSC-07 posición FV-07 decantador



Fuente: El autor.

La Tabla 7, se observan todas las señales digitales de entrada de la etapa de decantación del STAP con su respectiva descripción, estos son interruptores o finales de carrera instalados al interior del posicionador de la válvula, con esto se puede determinar, según se configure, en qué estado de posición se encuentra la válvula de flujo, además, se establece un tiempo para confirmar dicho estado, sino al terminar el conteo no hay una confirmación o cambio de estado del switch de posición, la lógica de control activa una alarma en la válvula.

Tabla 7

Lista de señales de instrumentación entradas digitales DI_Decantador

Tag	Tag PLC	Descripción	Tipo
ZSO-07	ZSO_07	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-07	ZSC_07	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-08	ZSO_08	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-08	ZSC_08	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-09	ZSO_09	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-09	ZSC_09	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-10	ZSO_10	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-10	ZSC_10	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-11	ZSO_11	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-11	ZSC_11	Switch confirmación válvula cerrada	DI
LSHH-01	LSHH_01	Switch de nivel por alto-alto	DI
LSLL-01	LSLL_01	Switch de nivel por bajo-bajo	DI

Fuente: El autor.

DI_Filtros: En esta rutina se realiza el escalado de las señales digitales de entrada específicas del filtro cáscara de nuez. Su objetivo es procesar y acondicionar las señales digitales provenientes de sensores o interruptores utilizados en el filtro cáscara de nuez, para que puedan ser interpretadas y utilizadas adecuadamente en el sistema de control.

Figura 6-28

Rutinas de escalado señales digitales de entrada ZSO/ZSC-01 posición FV-01 filtro



Fuente: El autor.

En la Figura 6-28 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para variables digitales de entrada de la posición de la FV-01 en el filtro cáscara de nuez. En el anexo D **DI_Filtro**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las entradas digitales de la etapa de filtración.

La Tabla 8, se observan todas las señales digitales de entrada de la etapa de filtración del STAP con su respectiva descripción.

Tabla 8

Lista de señales de instrumentación entradas digitales DI_Filtros

Tag P&ID	Tag PLC	Descripción	Tipo
ZSO-01	ZSO_01	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-01	ZSC_01	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-02	ZSO_02	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-02	ZSC_02	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-03	ZSO_03	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-03	ZSC_03	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-04	ZSO_04	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-04	ZSC_04	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-05	ZSO_05	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-05	ZSC_05	Switch confirmación válvula cerrada	DI
ZSO-06	ZSO_06	Switch confirmación válvula abierta	DI
ZSC-06	ZSC_06	Switch confirmación válvula cerrada	DI

Fuente: El autor.

DO_Decantador: Esta rutina se encarga de escalar las señales digitales de salida del decantador. Su función es ajustar y adecuar las señales digitales de salida que serán enviadas a actuadores o dispositivos de control externos, garantizando un correcto funcionamiento del decantador dentro del STAP. En la Figura 6-29 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para variables digitales de salida de la valvula FV-07 en el decantador. En el

anexo E **DO_Decantador**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las salidas digitales de la etapa de decantación.

La Tabla 9, se observan todas las señales digitales de salida de la etapa de decantación del STAP con su respectiva descripción.

Figura 6-29

Rutinas de escalado señales digitales de salida bobina FV-07 decantador



Fuente: El autor.

Tabla 9

Lista de señales de instrumentación salidas digitales DO_Decantador

Tag P&ID	Tag PLC	Descripción	Tipo
FV_07	ATR:1:O.0	Válvula entrada decantador	DO
FV_08	ATR:1:O.1	Válvula de lodos	DO
FV_09	ATR:1:O.2	Válvula salida de aceite	DO
FV_10	ATR:1:O.3	Válvula salida de agua	DO
FV_11	ATR:1:O.4	Válvula agua lavado	DO

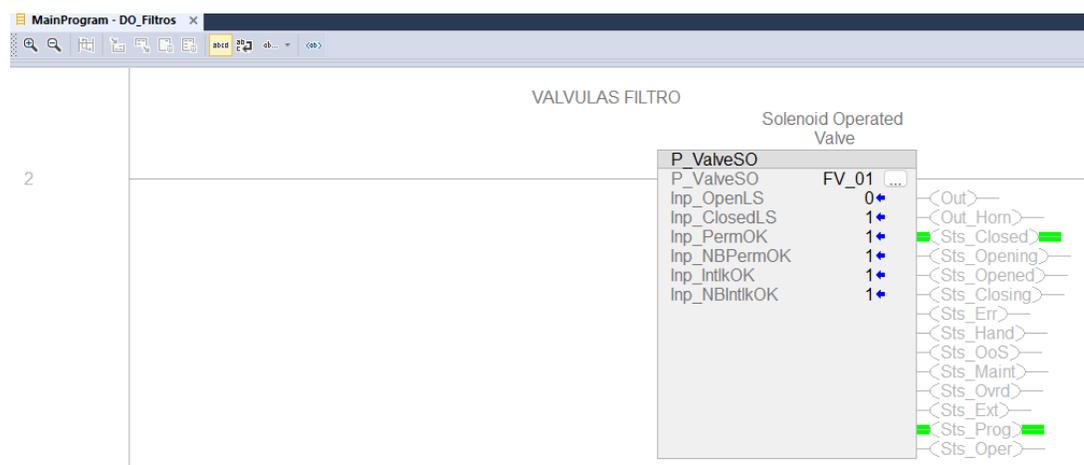
Fuente: El autor.

DO_Filtro: En esta rutina se realiza el escalado de las señales digitales de salida del filtro cáscara de nuez. Su objetivo es procesar y ajustar las señales digitales de salida que serán enviadas a actuadores o dispositivos de control externos, asegurando un correcto desempeño del filtro

cáscara de nuez en el sistema de tratamiento, En la Figura 6-30 se ilustra una de las rutinas de escalado de la lógica de programación para la variable digital de salida de la FV-01 en el filtro. En el anexo F **DO_Filtro**, se muestra la lógica de programación realizada para el escalado de todas las salidas digitales de la etapa de filtración.

Figura 6-30

Rutinas de escalado señales digitales de salida bobina FV-01 filtro



Fuente: El autor.

La Tabla 10, se observan todas las señales digitales de salida de la etapa de filtración del STAP con su respectiva descripción.

Tabla 10

Lista de señales de instrumentación salidas digitales DO_Filtros

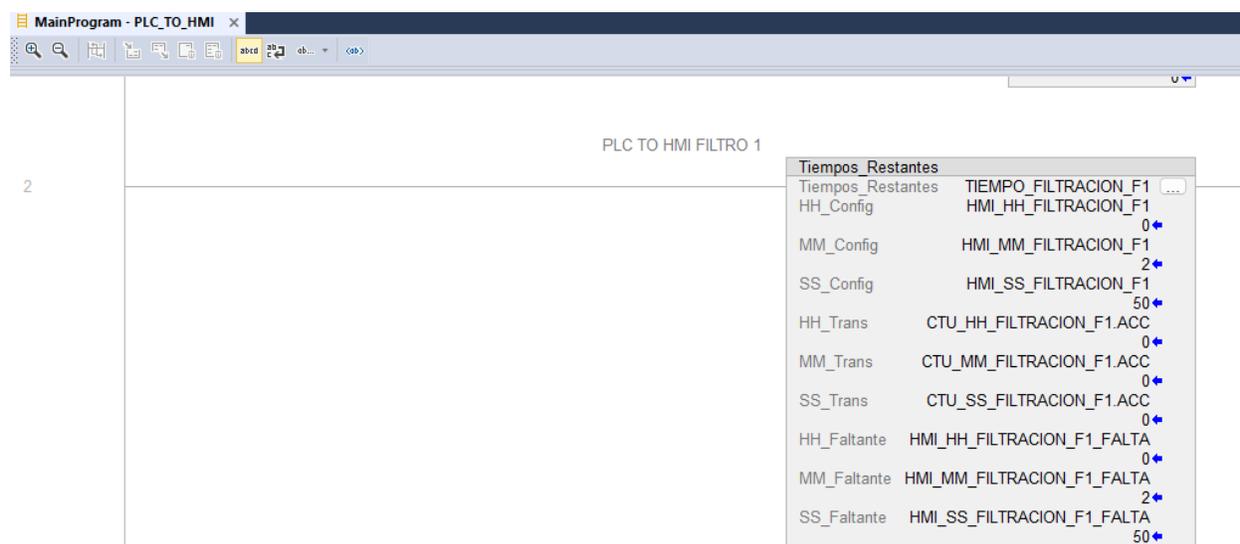
Tag P&ID	Tag PLC	Descripción	Tipo
AP-02	xAP_02	Bomba de trasvase	DO
AP-03	xAP_03	Bomba de chorro	DO
FV-01	AF:1:O.9	Válvula de entrada al filtro	DO
FV-02	AF:1:O.10	Válvula Bypass o retro lavado	DO
FV-03	AF:1:O.11	Válvula Agua Limpia	DO
FV-04	AF:1:O.12	Válvula normalización	DO
FV-05	AF:1:O.13	Válvula de lodos	DO
FV-06	AF:1:O.14	Válvula de drenaje	DO
SV-01	AF:1:O.15	Válvula de lubricación bomba retro lavado	DO

Fuente: El autor.

PLC_TO_HMI: Esta rutina se encarga de gestionar el intercambio de datos entre el PLC (Controlador Lógico Programable) y la interfaz hombre-máquina (HMI). Su función es permitir la comunicación bidireccional entre ambos dispositivos, facilitando el monitoreo y control del sistema de tratamiento de aguas residuales a través de la HMI, en la Figura 6-31 se ilustra una de las rutinas para el envío de datos de tiempos programados en secuencia de la etapa de filtración a la Panel View HMI. En el anexo G **PLC_TO_HMI**, se muestra la lógica de programación realizada para el envío de datos bidireccional entre el PLC y la HMI.

Figura 6-31

Rutina de envío de datos de tiempo estado de filtración a HMI

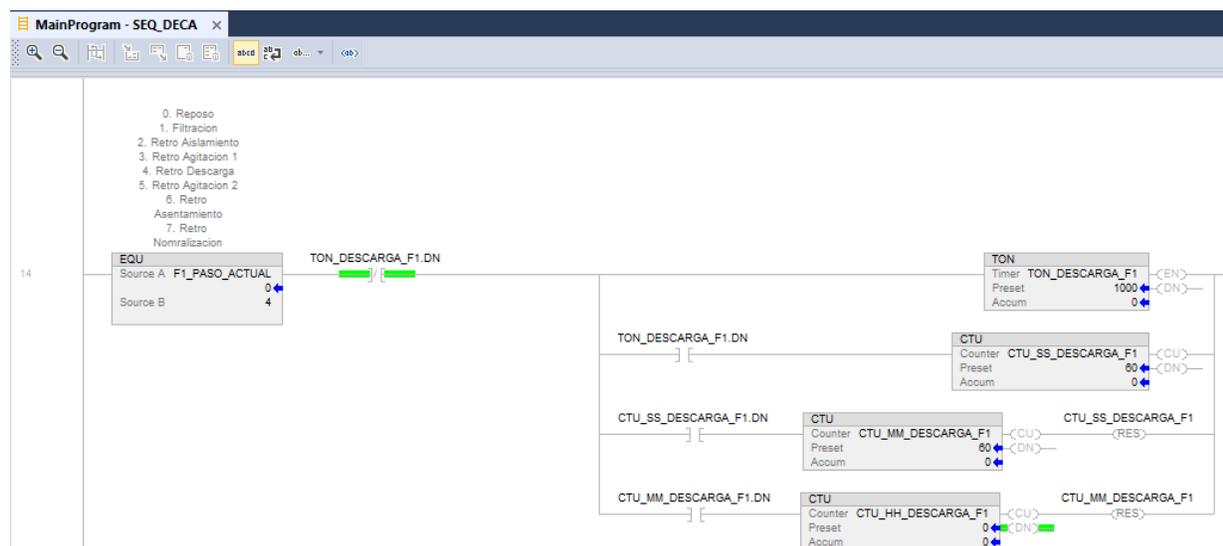


Fuente: El autor.

SEQ_DECA: En esta rutina se establecen las condiciones operativas para el proceso de decantación. Define la secuencia de eventos y acciones que deben llevarse a cabo para un correcto funcionamiento del decantador, incluyendo tiempos, niveles de operación y acciones específicas, en la Figura 6-32 se ilustra la rutina de programación de tiempo en el estado de descarga del tanque decantador.

Figura 6-32

Rutina de programación de tiempos en estado de Descarga Decantador



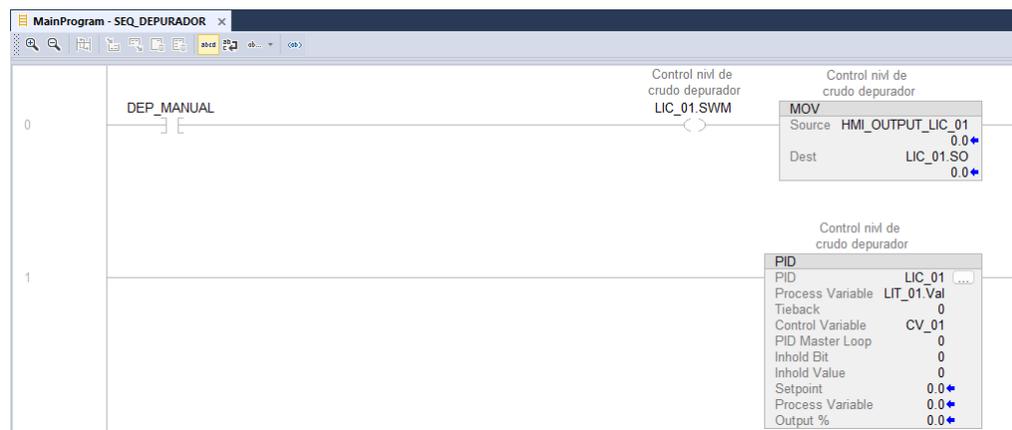
Fuente: El autor.

En el anexo H **SEQ_DECA**, se muestra la lógica de programación realizada para la secuencia de estados de la etapa de decantación, teniendo como base el diagrama de flujo (ver Figura 6-12).

SEQ_DEPURADOR: Esta rutina se encarga de establecer las condiciones operativas para el proceso de depuración en el sistema de tratamiento. Define la secuencia de eventos y acciones necesarias para asegurar un adecuado funcionamiento del proceso de depuración, teniendo en cuenta los parámetros de calidad del agua y los requisitos específicos del sistema, en la Figura 6-33 se ilustra la rutina de programación del lazo de control a la salida de aceites en la etapa de depuración, se aclara que los parámetros de sintonía del lazo de control son ideales y que para trabajos futuros del proyecto se debe de realizar el modelamiento de la planta para determinar los valores y/o constantes del bloque PID. En el anexo I **SEQ_DEPURADOR** se muestra la lógica de programación para la etapa de depuración del STAP.

Figura 6-33

Rutina de programación del lazo de control de nivel de aceites LIC-01 del depurador

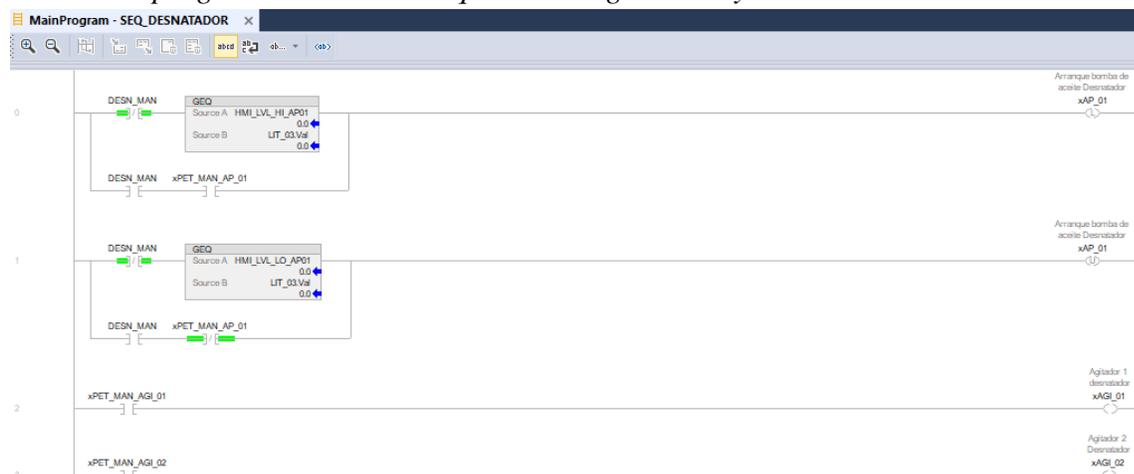


Fuente: El autor

SEQ_DESNATADOR: En esta rutina se establecen las condiciones operativas para el proceso de desnate. Define la secuencia de eventos y acciones necesarias para la separación y eliminación de los componentes de grasas y aceites presentes en el agua de producción, garantizando así su adecuada limpieza y tratamiento, en la Figura 6-34 se ilustra las rutinas de arranque de los motores asociados a los agitadores y desnatadores de la etapa de desnate en la celda de flotación. En el anexo J **SEQ_DESNATADOR** se ilustra la lógica de programación.

Figura 6-34

Rutinas de programación de arranque de los agitadores y desnatadores.

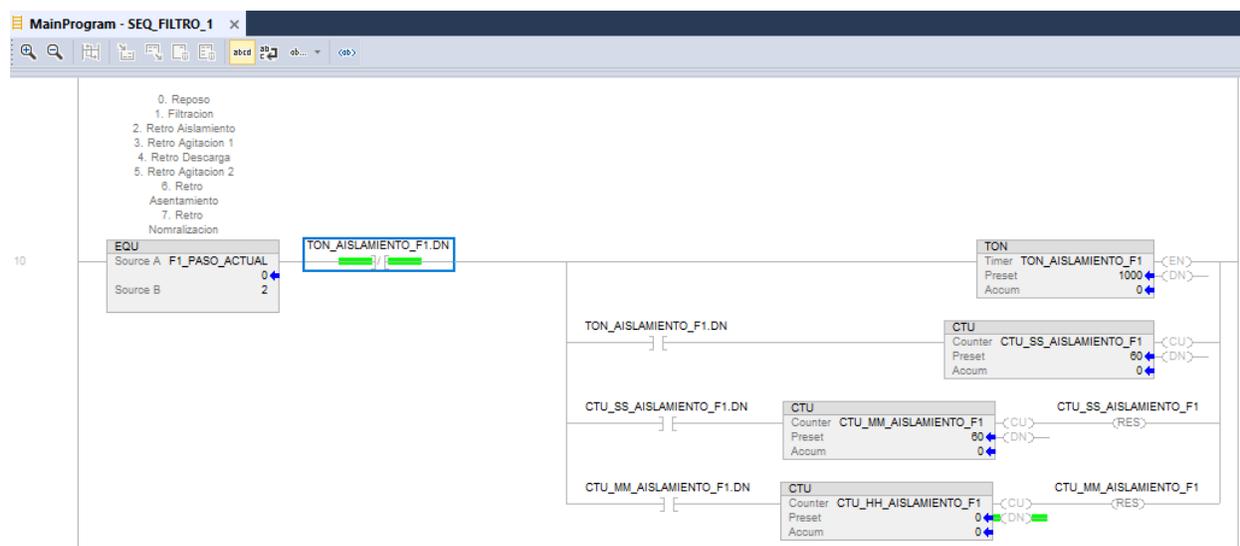


Fuente: El autor.

SEQ_FILTRO_1: Esta rutina se encarga de establecer las condiciones operativas para el proceso de filtración. Define la secuencia de eventos y acciones requeridas para la eliminación de impurezas y partículas suspendidas en el agua mediante el filtro cáscara de nuez, asegurando un resultado de alta calidad en la salida del sistema de tratamiento, en la Figura 6-35 se ilustra una de las rutinas de programación de la secuencia de estados del filtro. En el anexo K **SEQ_FILTRO_1** se muestra la lógica de control asociada a las secuencias de las etapas de filtración.

Figura 6-35

Rutina de programación estado de Aislamiento filtro



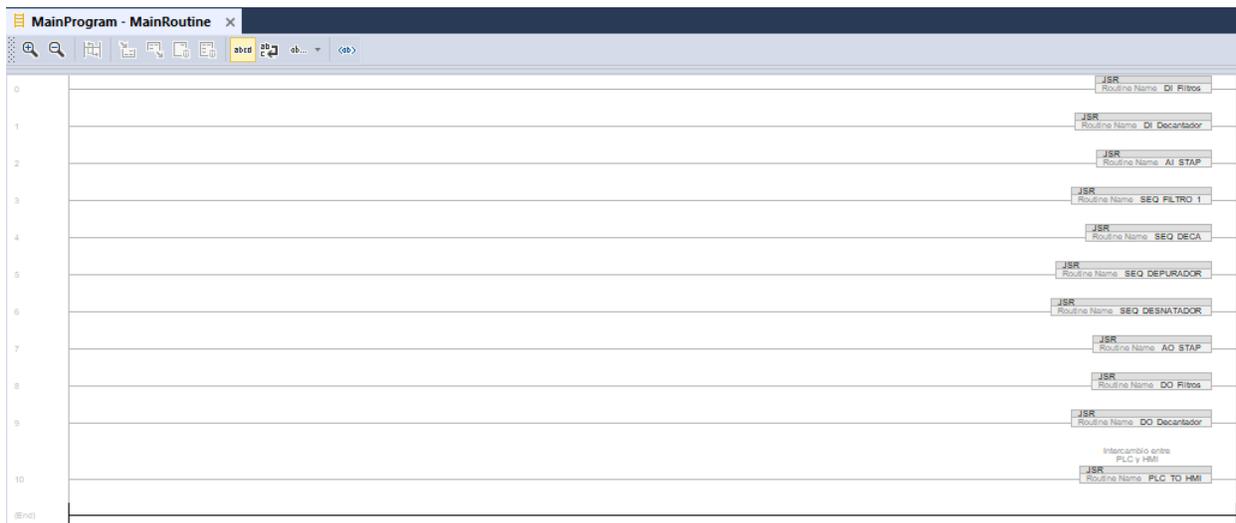
Fuente: El autor.

Cada una de estas rutinas desempeña un papel fundamental en el funcionamiento integral del proyecto STAP, contribuyendo a la automatización y control eficiente de los procesos de tratamiento de aguas de producción. Mediante la aplicación de la lógica de programación en el lenguaje Ladder, se logra una gestión precisa y organizada de las señales y condiciones operativas, asegurando un óptimo rendimiento y cumplimiento de los objetivos establecidos para el sistema de tratamiento de aguas residuales. Todas estas rutinas son llamadas en una rutina principal

llamada MainRoutine (ver Figura 6-36) y es allí donde se ejecutan de manera ordenada, ver Anexo L **MainRoutine** para visualizar el orden de ejecución de las tareas del proyecto STAP.

Figura 6-36

Llamado de rutinas para ejecutar en el PLC



Fuente: El autor.

6.4 Factory Talk View Studio.

FactoryTalk View Studio, desarrollado por Rockwell Automation (ver Figura 6-37), es una poderosa herramienta de desarrollo de aplicaciones de interfaz hombre-máquina (HMI) que ofrece capacidades avanzadas de diseño y programación. Esta plataforma tecnológica permite a los ingenieros y diseñadores crear interfaces de usuario altamente funcionales y personalizadas para sistemas de control industrial.

FactoryTalk View Studio proporciona una amplia gama de herramientas y características que permiten a los usuarios desarrollar interfaces intuitivas y atractivas. Con su interfaz de usuario basada en Windows, los ingenieros pueden diseñar pantallas interactivas utilizando elementos

gráficos, como gráficos, botones, indicadores de estado y alarmas, para representar y controlar los procesos industriales de manera efectiva.

Figura 6-37

FactoryTalk View Studio-Rockwell Automation



Fuente: Tomada de (Rockwell Automation, 2022)

Una de las características destacadas de FactoryTalk View Studio es su capacidad de integración con otros productos de Rockwell Automation. Esta herramienta es compatible con una variedad de controladores lógicos programables (PLCs), sistemas de adquisición de datos y dispositivos de E/S, lo que permite una fácil comunicación y sincronización de datos entre el sistema de control y la interfaz de usuario (Rockwell Automation, 2022).

FactoryTalk View Studio también ofrece una amplia gama de opciones de conectividad y comunicación. Permite la conexión a múltiples controladores y dispositivos, y admite protocolos industriales comunes como OPC (OLE for Process Control) y Ethernet/IP, lo que facilita la integración con sistemas existentes y la interoperabilidad con otros equipos de automatización (Rockwell Automation, 2022).

La capacidad de personalización es otro aspecto importante de FactoryTalk View Studio. Los usuarios tienen la libertad de adaptar y configurar la interfaz de usuario según las necesidades y preferencias específicas del sistema y de los operadores. Esto incluye la posibilidad de crear pantallas personalizadas, definir perfiles de usuarios, establecer niveles de acceso y configurar alarmas y eventos específicos.

6.4.1 Desarrollo de la interfaz gráfica, proyecto STAP.

Como resultado del desarrollo de la pantalla con el software FactoryTalk View Studio, se ha logrado crear una interfaz gráfica para el sistema de control del sistema de tratamiento de aguas de producción.

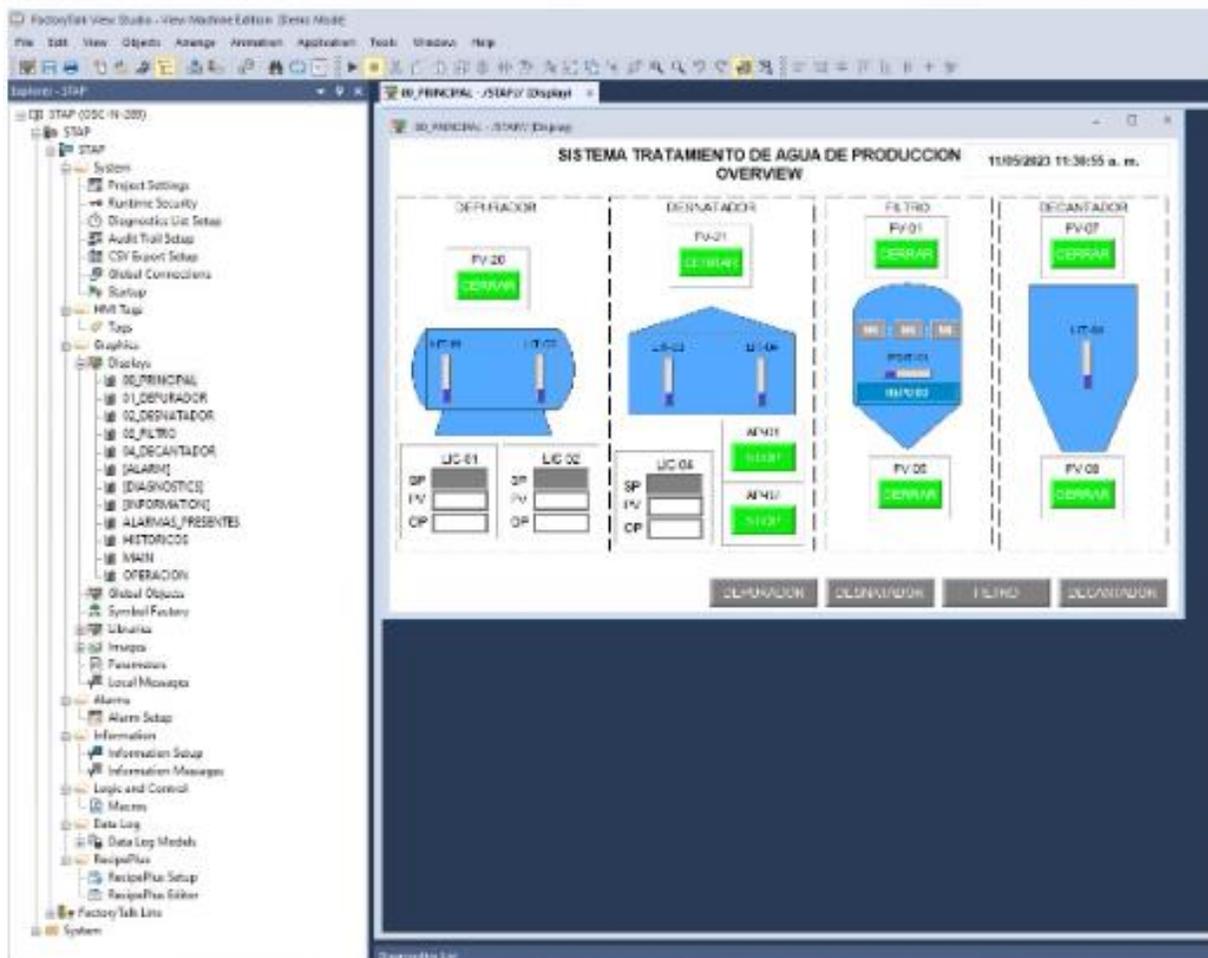
Utilizando FactoryTalk View Studio, se han diseñado y desarrollado pantallas personalizadas que permiten al operador interactuar de manera eficiente y efectiva con el sistema. Estas pantallas incluyen elementos visuales claros y comprensibles, como gráficos, indicadores de estado, botones y alarmas, que proporcionan una representación visual clara de los diferentes procesos y componentes del sistema de tratamiento de aguas.

La interfaz desarrollada en FactoryTalk View Studio (ver Figura 6-38) ofrece una navegación intuitiva y fluida, lo que facilita al operador acceder rápidamente a la información y las funciones necesarias. Además, se han implementado características interactivas, como botones

de control y deslizadores, que permiten al operador realizar acciones y ajustes precisos en tiempo real.

Figura 6-38

Creación de pantallas proyecto STAP



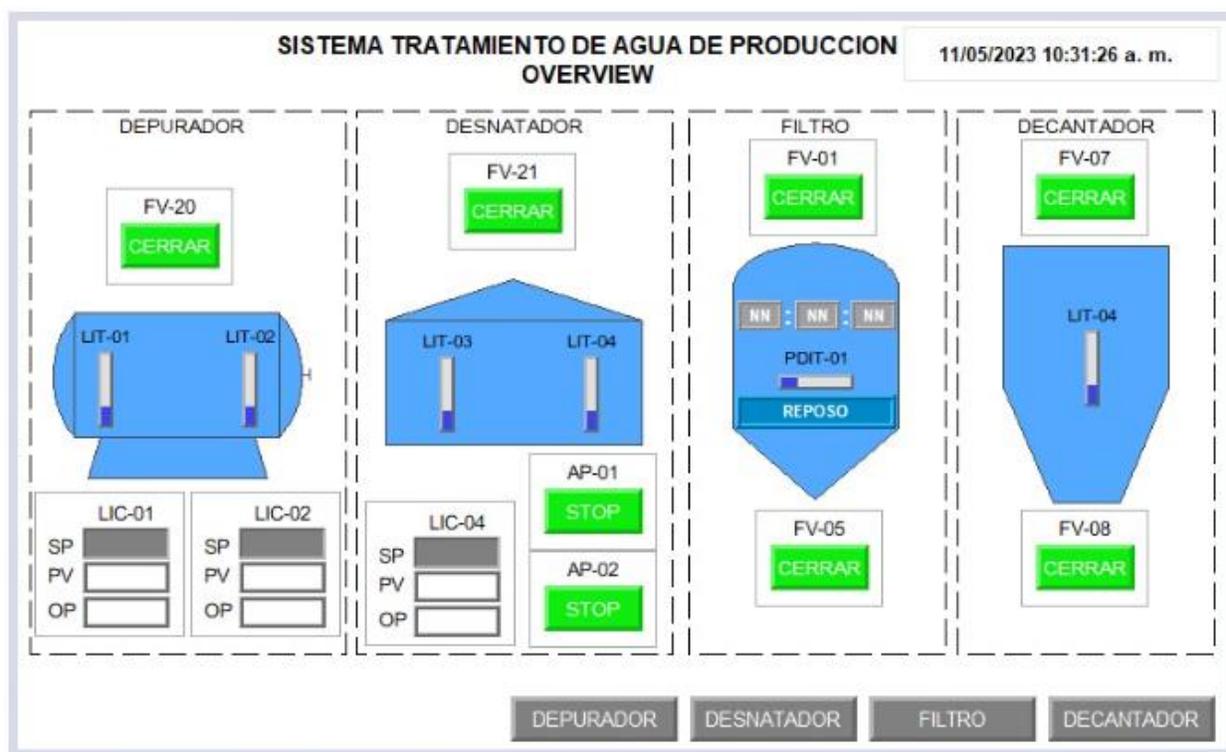
Fuente: El autor.

La pantalla desarrollada proporciona información en tiempo real sobre el estado del sistema de tratamiento de aguas, mostrando datos importantes como niveles, presiones, temperaturas y caudales. También se han configurado alarmas y eventos específicos que alertan al operador en

caso de condiciones anormales o situaciones de riesgo, lo que garantiza una respuesta rápida y eficiente ante cualquier problema. La Figura 6-39, da una vista general del STAP.

Figura 6-39

Pantalla vista general del STAP



Fuente: El autor.

En el proyecto de implementación del sistema de control para el sistema de tratamiento de aguas de producción, se ha creado una pantalla individualizada para cada proceso principal, que incluye depuración, desnate, filtración y decantación. Estas pantallas han sido diseñadas y desarrolladas utilizando el software FactoryTalk View Studio, con el objetivo de proporcionar una representación visual detallada y clara del estado de cada proceso y las variables relevantes.

Pantalla Proceso de Depuración STAP.

Esta pantalla proporciona una representación visual detallada y precisa del proceso de depuración (ver Figura 6-40), permitiendo al operador monitorear y controlar de manera eficiente esta etapa crítica.

Figura 6-40

Pantalla Proceso de Depuración STAP.



Fuente: El autor.

En la pantalla del proceso de depuración, se presenta una representación gráfica de los componentes y equipos involucrados en el proceso, como válvulas de control e instrumentos de medida. Mediante la utilización de símbolos y colores intuitivos, se muestra claramente el estado de cada componente, permitiendo al operador visualizar instantáneamente la configuración y el funcionamiento del sistema. Además de las representaciones visuales, la pantalla del proceso de depuración muestra información en tiempo real sobre variables clave, como flujo, nivel y otros

parámetros relevantes. Estos datos se presentan de manera clara y legible, lo que facilita la supervisión constante y el análisis preciso del rendimiento del proceso de depuración.

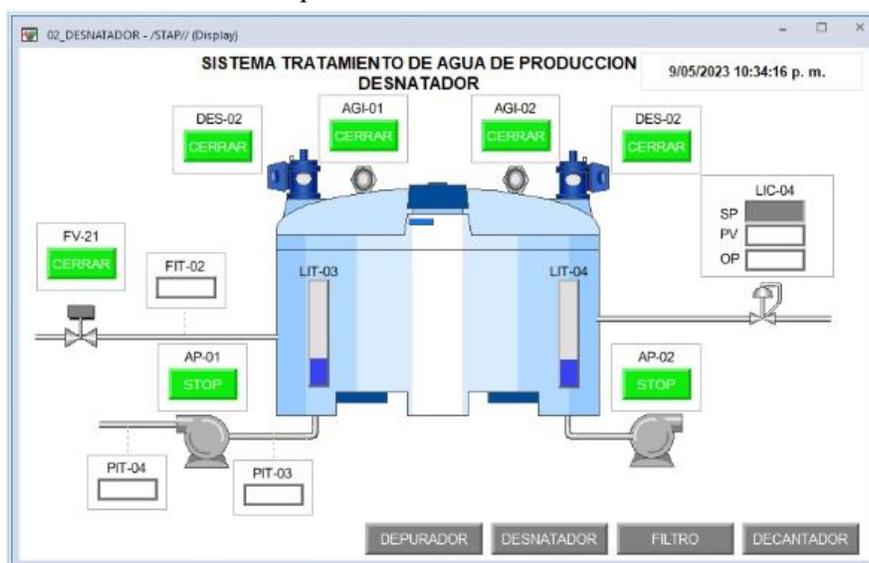
La pantalla también incluye alarmas y notificaciones visuales para alertar al operador sobre condiciones anormales o situaciones críticas que requieran atención inmediata. Estas alarmas permiten una respuesta rápida y efectiva ante cualquier evento no deseado, garantizando la seguridad y la integridad del sistema de tratamiento de aguas.

Pantalla Proceso de Desnate STAP.

En la pantalla del proceso de desnate, se presenta una representación gráfica de las celdas de flotación y los componentes asociados, como los agitadores, los espumadores y los sistemas de alimentación. Mediante el uso de símbolos y colores intuitivos, se muestra claramente el estado de cada celda de flotación y los equipos relacionados, lo que permite al operador visualizar instantáneamente la configuración y el funcionamiento del proceso de desnate.

Figura 6-41

Pantalla Proceso de depuración STAP



Fuente: El autor.

La pantalla del proceso de desnate muestra información en tiempo real sobre variables importantes, como el nivel de espuma, la velocidad de agitación, la concentración de sólidos y otros parámetros relevantes.

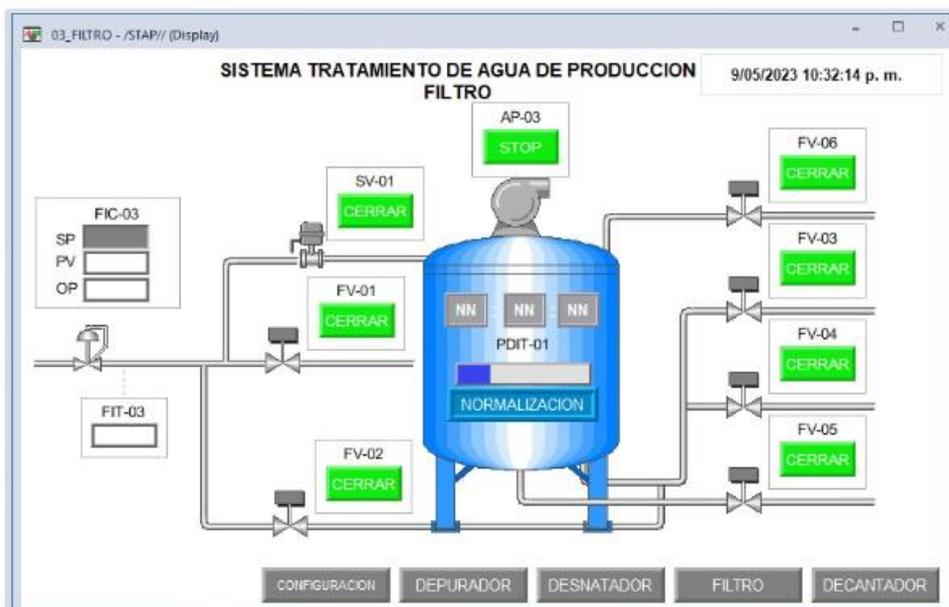
La pantalla también incluye alarmas y notificaciones visuales para alertar al operador sobre condiciones anormales o situaciones críticas que requieran atención inmediata. Estas alarmas permiten una respuesta rápida y efectiva ante cualquier evento no deseado, garantizando la seguridad y la eficacia del proceso de desnate.

Pantalla Proceso de Filtración.

Esta interfaz gráfica proporciona al operador una visión detallada y en tiempo real de todo el proceso de filtración (ver Figura 6-42), permitiendo un control efectivo y una supervisión precisa de cada etapa.

Figura 6-42

Pantalla Proceso de Filtración STAP



Fuente: El autor.

Al acceder a la pantalla del proceso de filtración, el operador se encontrará con una representación visual intuitiva de los filtros cáscara de nuez y su disposición en el sistema. Cada filtro se muestra con indicadores visuales que representan su estado actual, como la apertura y cierre de las válvulas de entrada y salida, el flujo de agua a través del filtro y otras variables relevantes.

La pantalla del proceso de filtración también incluye alarmas y notificaciones que alertan al operador sobre condiciones anormales o situaciones de riesgo, como un flujo de agua insuficiente, una presión diferencial alta o la necesidad de operar el equipo en otro modo. Estas alarmas se presentan de manera destacada y se acompañan de instrucciones claras para que el operador pueda tomar acciones correctivas de manera oportuna.

Pantalla Proceso de Decantación.

La pantalla del proceso de decantación en el sistema STAP (Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción) desempeña un papel fundamental en la supervisión y control de esta etapa crucial. Diseñada con una interfaz intuitiva y visualmente atractiva, esta pantalla proporciona al operador una representación clara y en tiempo real de todo el proceso de decantación.

Al acceder a la pantalla del proceso de decantación (ver Figura 6-43), el operador se encontrará con una vista detallada del decantador y su disposición en el sistema. El tanque decantador se muestra con indicadores visuales que representan su nivel de llenado, permitiendo al operador evaluar rápidamente el estado actual y la capacidad disponible de cada tanque. Además de la visualización gráfica, la pantalla también muestra información relevante en forma de datos numéricos, como el flujo de entrada y salida de agua.

Figura 6-43*Pantalla Proceso de decantación STAP*

Fuente: El autor.

La pantalla del proceso de decantación también incluye alarmas y notificaciones para alertar al operador sobre eventos críticos, como un nivel de llenado excesivo, una obstrucción en las salidas de sedimentación o una falla en los equipos en general.

Conclusiones.

Se ha logrado establecer una filosofía de operación básica para cada etapa del proceso de tratamiento de agua en el proyecto. Mediante el análisis detallado de cada etapa, se identificaron los equipos y procesos necesarios para el tratamiento de aguas de producción. El depurador, el desnatador, el filtro de cáscaras de nuez y el tanque decantador se han demostrado como componentes clave en el sistema de tratamiento de agua, cada uno desempeñando un papel importante en la eliminación de aceites, sólidos suspendidos y otros contaminantes.

La selección del controlador lógico programable (PLC) adecuado, en este caso el 1769-L30ER CompactLogix 5370, es fundamental para la implementación exitosa de la lógica de control en el sistema de tratamiento de aguas de producción. Este controlador ofrece un rendimiento excepcional, capacidad de procesamiento en tiempo real y opciones de comunicación versátiles, lo que permite un control preciso y una supervisión eficiente de los procesos industriales. Además, su capacidad de expansión garantiza que el controlador pueda adaptarse a los requisitos cambiantes de la aplicación sin comprometer su rendimiento.

Se ha diseñado la lógica de control para cada etapa del proceso de tratamiento de agua utilizando el lenguaje de programación Ladder. Mediante el uso de diferentes rutinas, como AI_STAP, AO_STAP, DI_Decantador, DI_Filtros, DO_Decantador, DO_Filtros, PLC_TO_HMI, SEQ_DEPURADOR, SEQ_DESNATADOR y SEQ_FILTRO_1, se han identificado las variables y parámetros críticos que deben ser monitoreados y controlados en cada fase del proceso.

Cada una de estas rutinas cumple un papel específico en el sistema de control, desde el escalado de señales analógicas y digitales de entrada y salida, hasta la gestión de la comunicación entre el PLC y la interfaz hombre-máquina (HMI). Además, se han establecido secuencias de eventos y acciones necesarias para asegurar un adecuado funcionamiento de las etapas de depuración, desnate y filtración.

La implementación de esta lógica de control en el proyecto STAP ha permitido una gestión precisa y eficiente de las señales y condiciones operativas, garantizando un rendimiento óptimo y el cumplimiento de los objetivos establecidos para el sistema de tratamiento de aguas de producción.

La interfaz desarrollada proporciona una representación visual clara y detallada de los diferentes procesos y componentes del sistema de tratamiento de aguas. Mediante gráficos, indicadores de estado, botones y alarmas, se muestra en tiempo real información relevante como niveles, presiones, temperaturas y caudales. Además, se han implementado características interactivas que permiten al operador realizar ajustes y acciones precisas en tiempo real.

La interfaz gráfica desarrollada con FactoryTalk View Studio ha facilitado la supervisión y control del proceso de tratamiento de agua, proporcionando al operador una herramienta clara y accesible para evaluar el desempeño del sistema y realizar los ajustes necesarios. Esto ha contribuido a mejorar la eficiencia, seguridad y eficacia del tratamiento de aguas en el proyecto STAP.

Este trabajo ha demostrado la importancia y los beneficios de utilizar un PLC y una interfaz gráfica en el tratamiento de aguas de producción. Ha proporcionado una solución

integral que mejora la eficiencia, la supervisión y el control del proceso, contribuyendo así a la optimización de los recursos, la protección del medio ambiente y la garantía de la calidad del agua tratada.

Anexos.

Anexo A: AI_STAP

Anexo B: AO_STAP

Anexo C: DI_Decantador

Anexo D: DO_Decantadores

Anexo F: DO_Filtros

Anexo G: PLC_TO_HMI

Anexo H: SEQ_DECA

Anexo I: SEQ_DEPURADOR

Anexo J: SEQ_DESNATADOR

Anexo K: SEQ_FILTRO_1

Anexo L: MainRountine

Anexo M: P&ID STAP_

Bibliografía

- AETECH. (s.f.). Cómo un software para el control de procesos industriales alimentarios ayuda a garantizar la trazabilidad. Obtenido de <https://www.aetech.biz/software-control-procesos-industriales-alimentarios-ayuda-garantizar-la-trazabilidad/>
- Allen, J. S., & Chandler, A. (1993). *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business*. . Harvard University Press.
- BAWER S.A. (2015). Sistema de filtración con cáscara de nuez-BFS. Bogota.
- Blogger.com. (30 de agosto de 2016). Sensores y Actuadores [fotografía]. Obtenido de Blogger.com: <http://infteckg.blogspot.com/2016/08/actuadores.html>
- Boyun, G., William C, L., & Ali, G. (2017). *Petroleum Production Engineering*. Elsevier.
- Cao, Y., & Wei, D. (2017). Flotation process control based on froth texture units. *Minerals Engineering*.
- Cozar, R., Castejón, C., & Moya, F. (2019). Controladores lógicos programables (PLC): ¿cuál es su papel en la industria 4.0? *Información Tecnológica*.
- Dademuchconnection. (21 de Febrero de 2021). Obtenido de <https://dademuch.com/2021/02/21/sistema-de-primer-orden-a-lazo-abierto-y-a-lazo-cerrado/>
- Exemys.com. (06 de Abril de 2020). Obtenido de https://www.exemys.com/beta/docs/spanish/WREMOTE_UM/WirelessMB.html
- FMA Communications Inc. (21 de Diciembre de 2021). Programe su robot de soldadura como un profesional. Obtenido de <https://www.thefabricator.com/thefabricatoren espanol/article/automationrobotics/programe-su-robot-de-soldadura-como-un-profesional>
- Garcia Sanchez, T., Rodriguez Gonzalez, S., & Gonzalez Briones, A. (2019). Control de procesos industriales: una revisión de la literatura reciente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
- Garcia, J. (2018). Sistemas automatizados: definición y componentes. *Revista de Tecnología Industrial*.
- Garcia, J., López, M., & Rodríguez, P. (2019). Automation and Control Systems in the Oil Industry: Benefits and Challenges. *International Journal of Oil, Gas and Energy*.

- Gómez Expósito, A., Ruiz Mezcuca, b., & Leon de Mora, C. (2019). Introduction to Industrial Ethernet Communications. In *Advances in Industrial Control*. Springer, Cham.
- Gomez Ortega, J., Guerrero Higuera, A. M., Ramirez Faz, j. A., & Gomez Cruz, F. J. (2019). Sistemas de adquisición y procesamiento de señales para aplicaciones en automatización industrial. *Información tecnológica*.
- Groover, M. P. (2014). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Pearson.
- Hancock, M. J. (2007). *Discrete control systems*. CRC Press.
- Huang, G. Q., & Zhang, Y. F. (2017). Industrial big data analytics for cyber-physical systems-based manufacturing. *International Journal of Production Research*.
- Inductecnica. (2022). Inductecnica, soluciones industriales. Obtenido de <https://www.inductecnica.cl/>
- INDUSOFT. (16 de Agosto de 2021). Sistema de control de calidad en la industria farmaceutica. Obtenido de <http://www.indusoft.pe/blog/control-de-calidad-en-la-industria-farmaceutica/>
- International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). (2016). Development of Operation Philosophy for Water Control Systems (Desarrollo de filosofía de operación para sistemas de control de agua). 1-28.
- Introducción a la Automatización Industrial. (s.f.). Obtenido de https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/arquitecturasistemaproduct.html
- Jain, s., & Jain, S. K. (2017). Wireless Communication Technologies in Industrial Automation: State-of-the-Art and Future Directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Johnson, A., Smith, B., & Thompson, C. (2020). Enhancing Efficiency and Safety in Produced Water Treatment: A Case Study in the Oil Industry. *Journal of Environmental Engineering*.
- Kessler, H. (2008). A brief history of process control. . *Control Engineering Practice*.
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing and Industry 4.0: A review of research issues and application examples. *International Journal of Production Research*.
- Lazarevic, M., & Tasic, M. (2016). Discrete Event Control Systems in Manufacturing: A Review on Models and Methods. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Lee, J., Kao, A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*.

- Liu, S., & Li, J. (2017). Industrial big data in the context of IoT: A review. IEEE Access.
- Lopez, F. A., & Zurita R, R. A. (2017). Instrumentacionuc.wixsite.com. Obtenido de Protocolo de comunicación Hart: <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-p-comunicacion>
- Marquez, A., & Ruiz, E. (2015). Mantenimiento Industrial: Preventivo, Correctivo, Predictivo. Mexico: McGraw-Hill Education.
- Martinez, L. (2020). Sensores en sistemas automatizados. Revista de Ingeniería.
- McCabe, W. L. (2005). Principios de operaciones unitarias (Vol. 2). McGraw-Hill.
- Monografias.com. (s.f.). Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos107/sistemas-control-tiempo-discreto/sistemas-control-tiempo-discreto>
- Myerson, g. (2018). Introduction to Industrial Automation. Elsevier.
- nVent HOFFMAN. (2021). Qué es un gabinete o tablero eléctrico. Obtenido de <https://hoffman-latam.com/blog/que-es-un-gabinete-o-tablero-electrico/>
- Oliverio, F., Garcia, M., & Perez, C. (2017). Diseño y desarrollo de un sistema de automatización basado en PLC y SCADA. Revista de Tecnología.
- Paez Logreira, H. D., Zamora Musa, R., & Bohorquez Perez, J. (2015). Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB. Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.).
- Precision.cl. (2023). Obtenido de <https://blog.precision.cl/redes-industriales/la-evolucion-de-las-redes-industriales>
- Priddy, K. L., & Eckman, R. A. (1992). Simulation Software for Automated Manufacturing. Journal of Manufacturing Systems.
- Rockwell Automation. (1999). Compact™ 1769-IQ16 Módulo de entradas 24 V c.c drenador/surtidor. Rockwell Internationa.
- Rockwell Automation. (2001). Módulo de salida de relé de CA/CC de 16 puntos. Publicación 1769-IN062A-ES-P.
- Rockwell Automation. (2015). Módulos de E/S digitales ControlLogix. Publicación de Rockwell Automation.

- Rockwell Automation. (2015). Terminales estándar PanelView Plus 7. Publicación de Rockwell Automation.
- Rockwell Automation. (2017). Stratix 2000 Ethernet Unmanaged Switches. Rockwell Automation Publication.
- Rockwell Automation. (2018). Manual de referencia Instrucciones generales de los controladores Logix 5000 . Publicación de Rockwell Automation.
- Rockwell Automation. (2020). Controladores Logicos Programables.
- Rockwell Automation. (2022). FactoryTalk View Site Edition User's Guide. Rockwell Automation Publication.
- Rockwell Automation. (2022). FLEX I/O EtherNet/IP Adapters. Publication 1794-IN082F-EN-P.
- Rodriguez, M. (2023). Redes de comunicación industriales y buses de campo. Escuela de líderes Masters Online, Cursos y Postgrados.
- Roe, T. A. (2015). Controladores programables: Una introducción a la programación de sistemas de control. McGraw Hill.
- Ruiz Cortés, A. M. (2019). Introducción a las redes de comunicación industrial. Editorial Universitaria Ramón Areces.
- Sarka, D., & Chowdhury, M. A. (2017). Programmable Logic Controller (PLC) in Industrial Control System. International Journal of Computer Applications.
- secoin. (s.f.). Controladores [fotografía]. Obtenido de secoin: <https://www.secoin.com.uy/>
- Secretaría de Servicios Públicos. (2015). Manual de operación y mantenimiento para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Aguascalientes, México: Gobierno del Estado de Aguascalientes.
- Sistema de control lazo cerrado [imagen]. (diciembre de 2006). Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.redalyc.org/pdf/849/84911652039.pdf>
- slideshare. (14 de octubre de 2014). Actuadores [fotografía]. Obtenido de slideshare: slideshare
- Slideshare.net. (s.f.). Obtenido de <https://es.slideshare.net/LinderTorriconFlores/actuadores-elementos-finales>
- Smith, J. (2010). Principles of Froth Flotation. Journal of Chemical Education.

- Smith, J., & Jones, R. (2018). Human-Machine Interfaces in Industrial Systems: A Review of Benefits and Applications. *Journal of Automation and Control Engineering*.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons.
- Stephenson, K. (2014). Industrial process control systems. In B. W. Bequette (Ed.), *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall.
- VCRobótica Automatización . (20 de julio de 2018). Ventajas de automatizar tu proceso [fotografía]. Obtenido de VCRobótica Automatización : VCRobótica Automatización
- Villanueva Garza, C. A. (2004). *Control de posición para un manipulador robótico utilizando retroalimentación difusa visual basada en imagen con cámara fija*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Zurawski, R. (2013). *Industrial Automation: Hands-On*. CRC Press.