

Sistema de Prototipo Autónomo para la Extracción de Fosforo de Biosólidos

Hugo Emmanuel Hernandez Ramírez

Director

Mag. Carlos Alberto Cardona Coy

Docente de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja

Codirector

Mag. Jeimy Mercedes Poveda Ávila

Directora de laboratorios

Universidad Santo Tomas sede Principal

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Electrónica

2024

Dedicatoria

*En primera medida a Dios por permitirme y ayudarme a continuar,
perseverar y culminar el proceso desarrollado.*

*A mi padre Hugo Hernández que en paz descanse pues sin él nunca me hubiese
querido retar eligiendo hacer esto, ya que, aún quiero ser tan apto como él,
ya cumplí mi promesa viejo...*

*A mi madre Elvia Ramirez pues a través de su perseverancia y fortaleza
me ha demostrado que todo es posible si se tiene un poco de amor y fe.*

*A mis hermanas Angélica Hernández, Natalia Hernandez y Nubia Hernández
por apoyarme y confiar en mi en todo momento no dejándome desistir jamás.*

Agradecimientos

Ingeniero Pablo Andrés Álvarez Camargo

Gracias por enseñarme a confiar en mi y demostrarme que en realidad se nota la diferencia cuando te esfuerzas un poco más, que no debo seguir al montón ya que en ocasiones siempre puedo ser mejor.

Ingeniera Laura Alejandra Martínez Tejada

Gracias por enseñarme a través del ejemplo que se puede llegar a la grandeza con un poco de diversión en el medio

Ingeniera Angélica María Salazar Madrigal

Gracias por darme consejos, tratarme y enseñarme con el mismo amor y respeto de una madre

Ingeniero Luis Fredy Sosa Quintero

Gracias por enseñarme que se puede exigir demasiado pero igualmente se puede dar y enseñar de la misma manera sin perder calidad.

Ingeniero Carlos Alberto Cardona Coy

Gracias por confiar en mi para darle solución a este proyecto y apoyarme para mejorar mi vida como investigador

Sensey Mabel Andrea Cubides Hernandez

Gracias por enseñarme a mantener mis emociones en equilibrio

Tal vez me faltaron más personas, ingenieros, amigos; sin embargo, he de mencionar que siempre estaré agradecido por aquellos que me brindaron apoyo en este proceso.

Tabla de contenido

1	Introducción	7
2	Justificación	8
3	Definición del problema	9
4	Objetivos.....	10
4.1	General.....	10
4.2	Específicos	10
5	Estado del Arte.....	11
5.1	Recovery of Phosphorus from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with the thermo-reductive RecoPhos-Process.....	11
5.2	Recuperación de fósforo y obtención de sólidos adsorbentes a partir de lodo de EDAR mediante un proceso combinado de extracción ácida y pirólisis	11
5.3	Water-Extractable Phosphorus in Biosolids: Implications for Land-Based Recycling	11
5.4	Análisis de redes bibliométricas a través de VOSVIEWER.....	12
6	Marco Teórico.....	14
6.1	Sensores medidores de nivel.....	14
6.1.1	Sensor Ultrasónico:.....	14
6.1.2	Sensor de Radar:	14
6.2	NTC 5350:20	14
6.3	Bray II.....	15
7	Metodología	16
7.1	Metodología Ágil para implementar.....	16
7.2	Fases de Desarrollo	16
7.2.1	Cronograma.....	16

7.2.2	Lectura del método a automatizar para su comprensión.....	17
7.2.3	Indagación de los elementos necesarios para la automatización	17
7.2.4	Planificación del sistema físico con el P&ID	17
7.2.5	Planteamiento y corrección del Grafcet.....	17
7.2.6	Desarrollo de la codificación Ladder.....	17
7.2.7	Desarrollo del proceso SCADA en HMI	17
7.2.8	Conexión del sistema al PLC.....	18
7.2.9	Desarrollo de la comunicación OPC.....	18
7.2.10	Desarrollo del proceso SCADA en LabVIEW	18
7.2.11	Pruebas y ajustes del sistema	18
7.3	Generalidades.....	18
7.4	Realización del P&ID	19
7.5	Costos.....	21
7.6	Realización del Grafcet.....	21
7.6.1	Etapa 0	23
7.6.2	Etapa 1	23
7.6.3	Etapa 2	23
7.6.4	Etapa 3 y 4	24
7.6.5	Etapa 5	24
7.6.6	Etapa 6	24
7.6.7	Etapa 7	24
7.6.8	Etapa 8	24
7.6.9	Etapa 9	24
7.6.10	Etapas 1.1/2.1/5.1/6.1/7.1	24
7.6.11	Etapa 0.1	24

7.7	Realización del software en Tia Portal	24
7.7.1	Tabla de variables	25
7.7.2	Programación del Ladder	26
7.7.3	Realización del proceso SCADA en HMI	30
7.7.4	Comunicación OPC	31
7.8	Realización del proceso SCADA en LabVIEW	34
7.9	Implementación en Web Server	38
8	Resultados y Discusión	41
8.1	Recomendaciones	45
9	Alcances	47
10	Conclusión	48
11	Referencias	49

1 Introducción

El Fósforo presenta una gran importancia en los fertilizantes para cultivos utilizados a nivel mundial , y teniendo en cuenta que este no puede ser producido o creado en un laboratorio, se tiene que acudir a fuentes externas para su extracción, de esta manera, por seguridad alimentaria, se han buscado distintas formas de abastecimiento, a causa de que su principal fuente de obtención es a través de minas de fosforita, las cuales están siendo agotadas, y en la búsqueda de soluciones para suplir esto, se ha dado como resultado qué, en los biosólidos hay grandes concentraciones de Fósforo que pueden ser extraídas gracias a la combinación de estas con una solución llamada Bray II .

Se plantea un código Ladder que pueda ser aplicado a un prototipo el cual ayude en la creación de la solución de Bray II de manera autónoma, como también su aplicación en el biosólido para que posterior al mezclado el Fósforo pueda ser extraído.

2 Justificación

Para entender la importancia de lo planteado en este proyecto, se debe tener en cuenta la esencialidad del elemento principal a tratar, el cual es el Fósforo, al ser un nutriente clave de la estructura vegetal como catálisis en la conversión de varias reacciones bioquímicas claves para las plantas. El Fósforo tiene un papel inherente en la captura y conversión de la energía solar en los compuestos vegetales útiles; ahora bien, este también hace parte esencial en el ADN de todos los seres vivos, en situaciones tales como la construcción de proteínas y otros compuestos esenciales para la estructura de la vida vegetal, el rendimiento de las semillas y la transferencia genética. (MOSAIC, 2022)

Teniendo en cuenta lo anterior, denota el gran impacto unilateral que presenta este compuesto sobre los seres vivos, y cómo, la inexistencia del mismo, puede ocasionar una crisis mundial; sin embargo, la ausencia del Fósforo no está tan alejada de la realidad, ya que, el utilizado en su mayoría por agricultores, es extraído de pocas fuentes de fosforita, ubicadas en Marruecos quien es el principal exportador, Estados Unidos, China , Rusia y Sudáfrica; todas estas conforman el 75% de las reservas a nivel mundial, y proyectan que dichas reservas sean agotadas en un mediano plazo, por lo que se requiere buscar nuevas fuentes de abastecimiento de Fósforo con el fin de ser priorizado en la fertilización de cultivos por seguridad alimentaria mundial. Así las cosas, y dando una respuesta a esta crisis, se plantea utilizar conocimientos de ingeniería electrónica para realizar la automatización de un prototipo que permita realizar el proceso de extracción de Fósforo en biosólidos, mitigando el impacto. Los conocimientos en ingeniería permitirán hacer menos rustico el proceso, así mismo a través de los sensores y demás, se espera dar una condición óptima para aumentar la cantidad de fosforó extraído. (ROSEN, 2020)

3 Definición del problema

El Fósforo, siendo un elemento el cual no puede ser obtenido de forma sintética en un laboratorio, y con una crisis de obtención a mediano plazo para su extracción en minas, necesita una forma que permita abastecerse de este alejándose del método de extracción convencional en minas por lo que se buscará automatizar el proceso que permita la extracción de Fósforo a partir de biosólidos, planteando y dándole respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo es el proceso de automatización, según la pirámide de CIM, para la extracción de fósforo en biosólidos?
- ¿Qué elementos químicos son requeridos para la extracción de Fósforo en biosólidos y cuál sería el aporte de la ingeniería electrónica en este proceso?
- ¿Cuáles son los sensores necesarios para el control de los tanques contenedores y mezcladores?, ¿Por qué fueron elegidos estos? y ¿qué otras alternativas se podrían posiblemente tomar?

4 Objetivos

4.1 General

- Desarrollar el código y SCADA para la automatización de un proceso que permita la extracción de fósforo en biosólidos a través de la realización de Bray II y su posterior aplicación de esta solución en un biosólido.

4.2 Específicos

- Crear un P&ID que permita la compresión general del sistema y la categorización de los sensores y actuadores necesarios para el desarrollo del prototipo.
- Virtualizar a través del HMI el control de cada etapa el cual permita tener una visualización de la posición en donde se encuentra el proceso
- Desarrollar una etapa que permita hacer un parado de emergencia en caso tal de que alguna etapa falle permitiendo retornar a la misma y no reiniciar todo el proceso

5 Estado del Arte

Encontrando como tema principal en el proyecto a desarrollar, la extracción o recuperación de Fósforo en biosólidos, se hizo una búsqueda de investigaciones o artículos que representaran un avance o estudio notable en este desarrollo, permitiendo encontrar los siguientes resultados:

5.1 Recovery of Phosphorus from Sewage Sludge and Sewage Sludge Ashes with the thermo-reductive RecoPhos-Process

Se desarrolló un estudio de un prototipo de reactor que permitiese extraer Fósforo y otros metales requeridos a partir de las cenizas en aguas residuales. El reactor diseñado, denominado “InduCarb” es normalmente utilizado para recuperar polvos en acerías, sin embargo, funcionó para el propósito deseado. El proceso Recophos incluyó la extracción fraccionada de fosfato y metales pesados de las cenizas volátiles encontradas en aguas residuales a temperaturas altas bajo condiciones de reducción para su extracción. El principio químico de la reacción central se basa en el proceso de Woehler, que determina que el fosfato reacción con el carbono y el dióxido de silicio en una caldera, provocando la reducción a Fósforo. Se realizaron evaluaciones de seguridad, las pruebas con un sistema de inducción de grafito para el calentamiento de las cenizas obteniendo un resultado positivo, pues el reactor pudo mantener las temperaturas requeridas, y, al tiempo permaneció sellado y en un buen funcionamiento. (Raupenstrauch, 2019)

5.2 Recuperación de fósforo y obtención de sólidos adsorbentes a partir de lodo de EDAR mediante un proceso combinado de extracción ácida y pirólisis

Este trabajo plantea la posibilidad de recuperación de Fósforo contenido en el lodo de EDAR mediante su extracción con ácido sulfúrico y a su vez activar el sólido para la posterior obtención de sólidos adsorbentes mediante pirólisis. En este estudio se centraron en la determinación del cómo afectan las condiciones de extracción, el tiempo de impregnación y la relación sólido vs líquido, viendo la cantidad de Fósforo extraído del lodo de EDAR, estudiando el efecto de las condiciones de extracción. Llevaron la extracción del Fósforo contenido en el lodo de EDAR mediante la impregnación del ácido sulfúrico en él; una vez transcurrido un tiempo determinado, se separaron las fases y se pudo ver y analizar el Fósforo recuperado. (López, Atienza Martínez, (dir), Galindo, & (dir), 2015)

5.3 Water-Extractable Phosphorus in Biosolids: Implications for Land-Based Recycling

En este documento plantean la extracción de Fósforo en el agua encontrada en cuencas hidrográficas agrícolas, ya que en estas se encuentra una gran pérdida de Fósforo, por lo que evaluaron su uso en biosólidos. Compararon los abonos lácteos, avícolas y el fertilizante y el porcentaje de extracción de cada uno de estos. (R. C. Brandt, 2004)

El proceso de elección de las investigaciones se da para mostrar el avance de extracción de fosforo o de su estudio bajo distintos puntos de enfoque, para ayudar a comprender y tomar inequívocamente la decisión del método y evitar posibles errores cometidos en estos estudios o poder tomar puntos clave que se vieron. Se ve un bajo índice de proyecto relacionado porque lo que busca desarrollar este proyecto es algo que no se ha implementado específicamente antes.

5.4 Análisis de redes bibliométricas a través de VOSVIEWER

Para realizar un mayor enfoque o estudio al tema relacionado, se buscó métodos de obtención de información, llegando al uso de herramientas prácticas como “VOSVIEWER” que permiten tener una visualización de los estudios sobre un tema relacionado; así las cosas, tomando como referencia SCOPUS la cual es una base de datos de referencias bibliográficas muy reconocida en el entorno de investigación se realizaron las siguientes cadenas de búsqueda:

Tabla 1 Cadenas de Búsqueda -SCOPUS

Cadena de búsqueda	Resultados
TITLE-ABS-KEY (phosphorus AND extraction AND in AND biosolids)	74
TITLE-ABS-KEY (extraction AND of AND chemical AND elements AND in AND biosolids)	42
TITLE-ABS-KEY(BRAY II in biosolids)	1

Como se puede observar en las cadenas de búsqueda, la información encontrada sobre el tema o método en específico es casi nula, pues el único resultado que se evidencia es del suscrito, ahora bien, aun teniendo una búsqueda más generalizada se obtienen como máximo 74 resultados, estos son pocos y no tienen una gran relevancia en el tema a tratar tal y como es mostrado en los Clústers posteriormente.

En los Clusters de Visualización en red (*Ilustración 1*) y densidad (*Ilustración 2*) se denota cómo en efecto se han tratado temas de la existencia de fosforo y otros elementos químicos procedentes de biosólidos y que subyacen en fertilizante

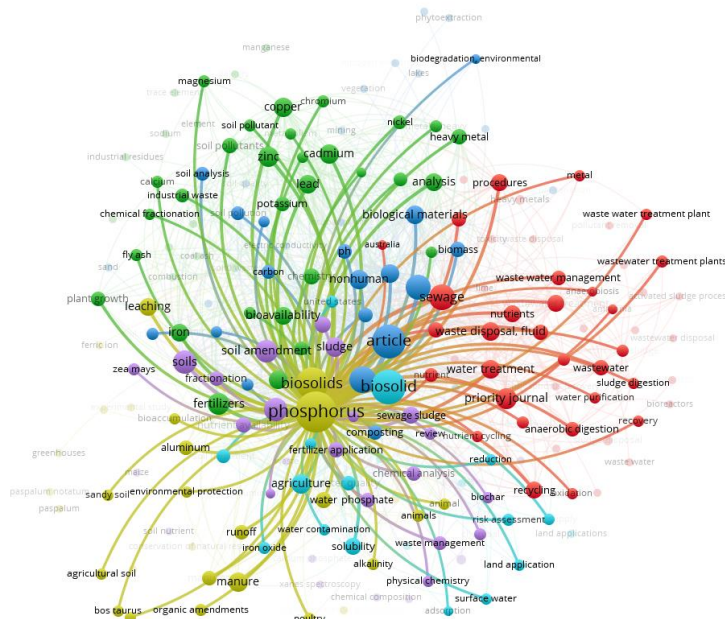


Ilustración 1 Clúster Visualización en Red Primera Cadena de Búsqueda - Referencia: Autor

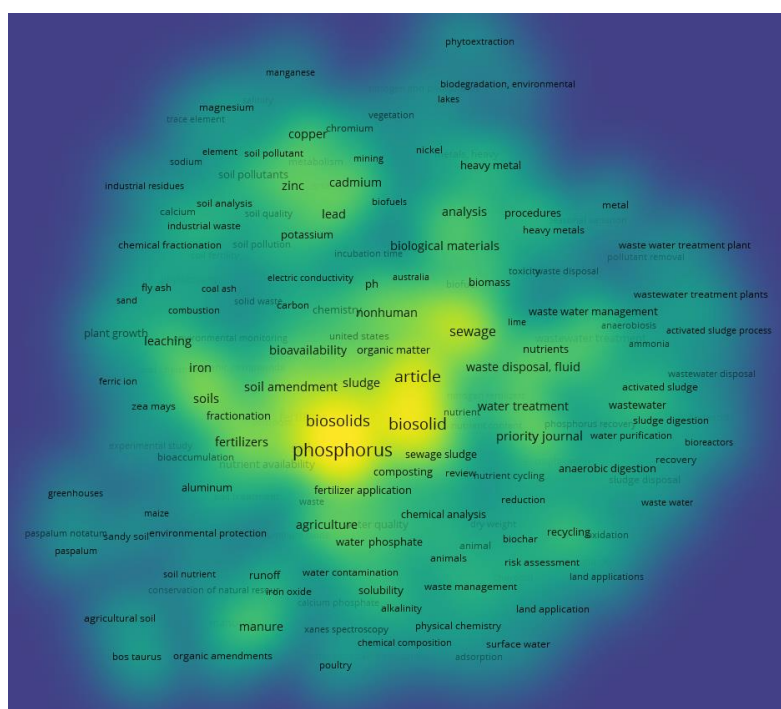


Ilustración 2 Clúster densidad Primera Cadena de Búsqueda - Referencia: Autor

6 Marco Teórico

Para el desarrollo del proceso de automatización se debe comprender y analizar aquellos dispositivos y términos necesarios para su implementación, por lo que en este caso se ve como fundamental los siguientes dispositivos y términos, siendo que con estos se determinará el cómo hacer la solución y extracción del fosforo en las medidas requeridas:

6.1 Sensores medidores de nivel

6.1.1 Sensor Ultrasónico:

El sensor ultrasónico es un sensor que posee una aplicación no intrusiva en el sistema a emplear, ya que no requiere ser ingresado directamente en contacto con el producto para producir la medición de este; permite la medición de nivel en líquidos y sólidos a granel, y, dependiendo de su referencia, la distancia a medir puede ser adaptada a lo requerido, igual que su resistencia en temperatura y presión. (COMTITRONIC, 2022)

6.1.2 Sensor de Radar:

El sensor de radar es un sensor adecuado para líquidos, sólidos y polvos a granel, con una tecnología de medición sin contacto que permite evitar la contaminación del elemento a tratar, puede llegar a un rango de medición hasta de 70 metros dependiendo de su estructura y soporta altas temperaturas y presiones.

Los dos sensores mencionados anteriormente se ven como los principales sensores a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto, por su poco contacto con el producto y que permite controlar tanto solidos como líquidos, sin embargo, se debe tener en cuenta la existencia de otros sensores que permiten medir los líquidos y sólidos como lo son los mencionados a continuación:

- Microondas Guiadas
- Capacitivo
- Cabeza Hidrostática
- Purga
- Nivel de Punto
- Capacitivo
- Vibración
- Conductivo

6.2 NTC 5350:20

“Esta norma cubre la determinación del fósforo disponible en los suelos, en el laboratorio, a través de diferentes métodos. Las mediciones objeto de esta norma pueden ser empleadas en campos relacionados con agricultura, medio ambiente y recursos naturales. La valoración de la cantidad de fósforo disponible al igual que la valoración de otros nutrientes vegetales sirve como índice de fertilidad del suelo y como orientación para la fertilización de los cultivos. La elección

del método para determinación de fósforo disponible dependerá del pH del suelo o de los valores de referencia utilizados para la interpretación posterior de los resultados.” (ICONTEC, 2020)

6.3 Bray II

La técnica BRAY II sirve esencialmente para el análisis de suelos que se utiliza para medir la cantidad de fósforo disponible en el suelo. El proceso de realizar BRAY II en la extracción de fósforo implica los siguientes pasos: Preparar la solución de ácido clorhídrico (HCl) al 0,025 N y la solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 0,03 N. Tomar una muestra de suelo de alrededor de 10 gramos y secarla en un horno a 60°C durante 24 horas para eliminar la humedad. Moler la muestra de suelo seco en un mortero y tamizarla a través de un tamiz de malla de 2 mm, y así sucesivamente. Es importante seguir las instrucciones con precisión para obtener resultados confiables (Motsara, 2008)

El Bray II es una solución ácida que se emplea para la extracción de formas de Fosforo que no son tan solubles. Esta solución se usa comúnmente cuando el fosfato en las rocas era el principal producto fertilizante de Fosforo usado en la agricultura. (Anonimo, 2022)

7.2.2 Lectura del método a automatizar para su comprensión

Para hacer un desarrollo óptimo y asegurar el cumplimiento de los requisitos necesarios para la realización del Bray II, se tuvo que realizar la lectura del método y las formas de poder aplicarlo y crearlo bajo la normativa NTC:5350, viendo así las posibilidades para la posterior ejecución en el sistema planteado.

7.2.3 Indagación de los elementos necesarios para la automatización

Si bien con la etapa anterior se conoce la metodología con la cual realizar el Bray II, es de suma importancia estar al tanto de los elementos o dispositivos a utilizar, ya que, dependiendo de los seleccionados, el planteamiento del P&ID y posterior desarrollo del código gira entorno a estos.

7.2.4 Planificación del sistema físico con el P&ID

Teniendo en cuenta la importancia implícita del proyecto, se debe tener en cuenta la planificación de lo que se debe hacer, ahora bien, esto incluye el tener claro el sistema a desarrollar para la realización del Bray II, dando solución a partir del planteamiento del P&ID quien permitirá entender mejor la estructura a partir del diagrama y el desarrollo del proceso.

7.2.5 Planteamiento y corrección del Grafcet

Al tener una buena gestión del proceso a desarrollar, se comenzó a realizar el planteamiento del Grafcet (*Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition*) que como su nombre lo indica, permitirá tener una vista del control con etapas y sus respectivas transiciones, dejando en claro cada necesidad del proceso y cómo ejecutarlo.

7.2.6 Desarrollo de la codificación Ladder

Al determinar las etapas y transiciones, se pudo comenzar a trabajar en el código Ladder que permitiese suplir la necesidad planteada para el proceso, con el fin de ser probado en el PLC bajo el menor tiempo posible, permitiendo avanzar en el desarrollo.

7.2.7 Desarrollo del proceso SCADA en HMI

Esta etapa se plantea para tener una visualización del proceso en la pantalla HMI del PLC, esto con el fin de tener una mayor interacción entre usuario-controlador, permitiendo también controlar partes del proceso desde la pantalla táctil.

7.2.8 Conexión del sistema al PLC

Al tener desarrollado el Ladder es necesario probarlo en el Controlador PLC para poder hacer posibles ajustes en el sistema, integrando también el SCADA y pudiendo así ver si estos funcionan entre sí, ya que es la finalidad.

7.2.9 Desarrollo de la comunicación OPC

Para poder dar una mayor versatilidad al proceso se ve necesario hacer una comunicación OPC ya que esta permite la interoperabilidad entre dispositivos y entornos de control diferentes, viendo que, se tuvo la necesidad de conectar *Tia portal* con *LabVIEW*.

7.2.10 Desarrollo del proceso SCADA en LabVIEW

Si bien ya se tenía un SCADA bajo el HMI del PLC se buscó tener o proporcionar mayor versatilidad al usuario, esto con la finalidad de que al querer visualizar o controlar partes del proceso, pueda hacerlo sin tener que estar en el campo o junto al controlador.

7.2.11 Pruebas y ajustes del sistema

La importancia de este apartado radica en que tal vez, al montar el sistema se presenten errores entre el software o las plataformas utilizadas, por lo que se requiere hacer las pruebas y ajustes necesarios para la entrega del producto final

7.3 Generalidades

En el desarrollo de este proceso se debe tener en cuenta el objetivo principal que refiere a la realización del Bray II el cual es una solución que permitirá la extracción del Fósforo en el biosólido introducido en el proceso, tomando como referente la norma NTC 5550 se plante para el sistema los siguientes datos:

- Para un kilogramo de muestra se necesita producir 7 litros de Bray II
- Para la producción de Bray II se requiere 8.3 ml de ácido clorhídrico por cada Litro de agua destilada
- Para la creación final de Bay II se deberá mezclar 100ml de la solución de ácido clorhídrico y agua destilada con 900ml de fluoruro
- Por cada 142,5 gramo de biosólido se necesita 1 litro de Bray II y debe ser agitado a 200 rpm

7.4 Realización del P&ID

En base a lo mencionado anteriormente del proceso para la realización del Bray II se planteó un P&ID que buscara suplir con la necesidad, tomando en cuenta las indicaciones necesarias dadas por el usuario. Así las cosas, se hicieron correcciones tales como que se tendrían un total inicial de dos tanques, pues para una mayor optimización del proceso se dejaría el agua destilada y el ácido clorhídrico (HCL) en un solo tanque pues no afectaría como tal la realización del Bray II.

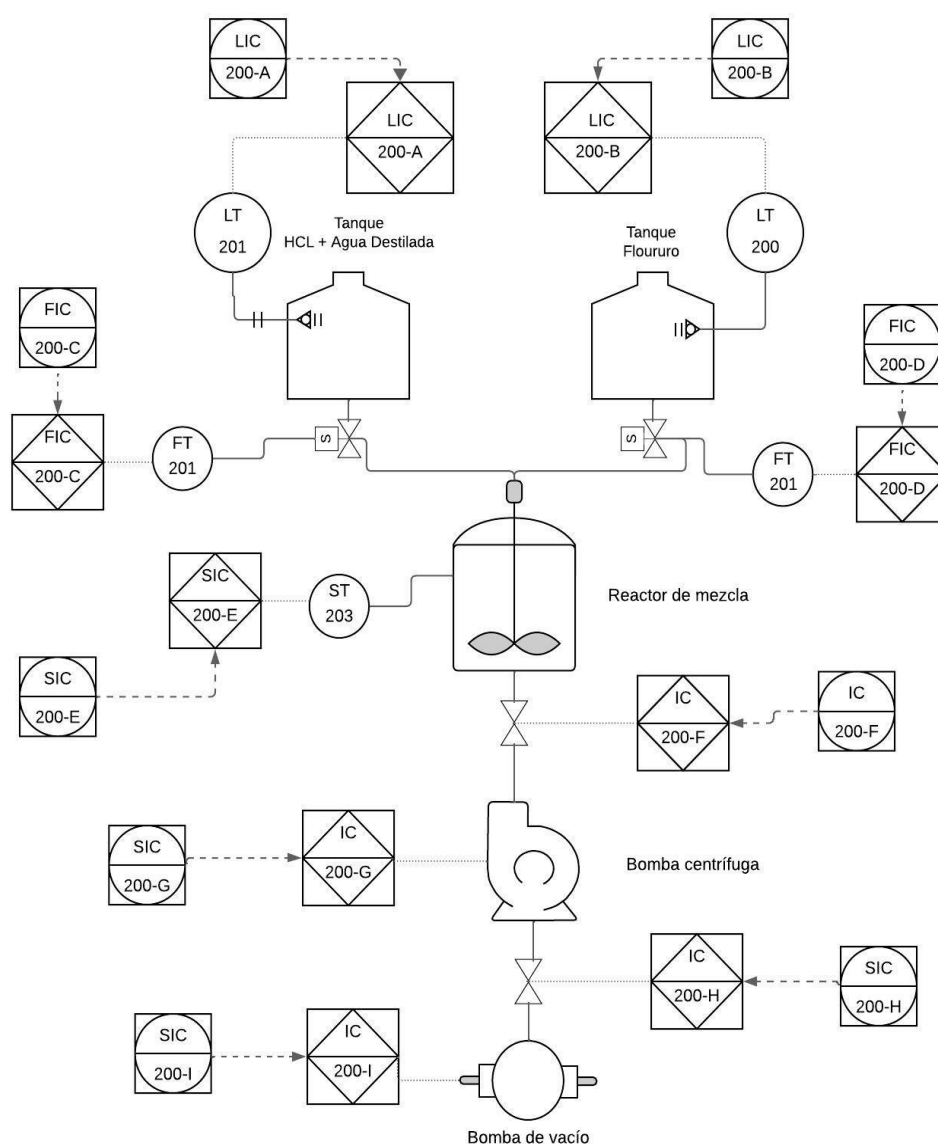


Ilustración 3 P&ID del proceso de extracción; Referencia: autor

La realización del P&ID se hizo bajo estándares de la norma ISA-S5 igual que la nomenclatura o los códigos de identificación de instrumentos utilizados (*ver ilustración 4*). El proceso en el P&ID se contempló dejando así los siguientes elementos:

- 2 tanques contenedores de los químicos a tratar
- Tanque de mezcla para la creación del Bray II
- Bomba centrífuga; en este caso esta puede ser remplazada por una bomba de lodos o un tanque mezclador que permita combinar el biosólido con el Bray II
- Bomba de vacío, esta permitirá hacer la extracción del fósforo contenido en el biosólido.
- 2 válvulas solenoides
- 2 válvulas On/Off
- 2 sensores de ultrasonido

PRIMERA LETRA (4)		LETRAS SUCESIVAS (3)			
	Variable medida o inicial	Letra de modificación	Lectura o función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación
A	Análisis(5, 19)		Alarma		
B	Quemador, combustión		Libre(1)	Libre(1)	Libre(1)
C	Libre (1)			Control (13)	
D	Libre (1)	Diferencial (4)			
E	Tensión (f.e.m.)		Sensor (Elemento primario)		
F	Caudal	Relación (4)			
G	Libre (1)		Vidrio, Dispositivo visión (9)		
H	Manual				Alto (7,15,16)
I	Corriente (eléctrica)		Indicar (10)		
J	Potencia	Exploración (7)			
K	Tiempo, programación tiempo	Variación de tiempo (4,21)		Estación de control (22)	
L	Nivel		Luz (11)		Bajo (7,15,16)
M	Libre (1)	Momentáneo (4)			Medio, Intermedio (7,15)
N	Libre (1)		Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
O	Libre (1)		Orificio, Restricción		
P	Presión, Vacío		Punto (Ensayo) Conexión		
Q	Cantidad	Integrar, Totalizar (4)			
R	Radiación		Registro (17)		
S	Velocidad, Frecuencia	Seguridad (8)		Interruptor (13)	
T	Temperatura			Transmisión (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunción (12)	Multifunción (12)	Multifunción (12)
V	Vibración, Análisis mecánico (19)			Válvula, Regulador tiro, Persiana (13)	
W	Peso, fuerza		Vaina, Sonda		
X	Sin clasificar (2)	Eje X	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)
Y	Evento, Estado o Presencia (20)	Eje Y		Relé, Cálculo, Conversión (13,14,18)	
Z	Posición, Dimensión	Eje Z		Motor, Actuador, Elemento final de control sin clasificar	

Ilustración 4 Código de identificación de instrumentos ISA-S5, Referencia: (Creus, septiembre 2010)

7.5 Costos

Se realizó un estudio de costos únicamente de los dispositivos utilizados en el desarrollo del software planteado para el P&ID mostrado con anterioridad; ahora bien, si se requiere hacer la implementación física del producto, se tendría que sumar a lo propuesto en la siguiente tabla:

Tabla 3 Precios estimados de los productos necesarios; Fuente: Autor

Producto unidad	Precio en COP
SIMATIC S7-1200 (PLC "CPU")	2'150.000
KTP700 Basic	4'506.000
CSM 1277 SIMATIC NET (compact switch module - "communication module")	667.580
SIPLUS S7-1200 PM 1207 ("power module")	990.090
Total	8'313.670

Estos precios por unidad son precios aproximados, pues dependen del valor del dólar.

7.6 Realización del Grafcet

Para realizar el desarrollo del *Grafcet* se utilizó el software “OFT2” ya que posee herramientas intuitivas. Respecto al procedimiento, se plantearon 9 etapas principales para el funcionamiento básico del proceso, es decir, con solo estas 9 etapas, el sistema tiene total funcionalidad y puede cumplir con su propósito; sin embargo, en búsqueda de un software un poco más robusto y óptimo en lo que a funcionalidad se refiere, se plantearon 2 módulos extras, los cuales tienen el propósito de brindar seguridad y versatilidad al sistema, estos llevan el nombre de “Parada de emergencia” y “Aseo”.

Respecto al módulo de parada de emergencia se realizó para dar seguridad a cualquier etapa que este realizando algún proceso en el momento, sin embargo, al quitar la parada de emergencia no empezará de ceros el proceso, sino que retornará en donde se quedó, por lo tanto, permite corregir errores sin perder el proceso que ya llevaba.

En el módulo de aseo, se abrirán todas las válvulas permitiendo vaciar los tanques y hacerles su respectivo aseo de una forma segura y solo podrá el sistema arrancar si ese módulo no está activado, es por esto por lo que solo podrá ser iniciado si todo el sistema está parado o en su etapa 0, evitando posibles desastres o accidentes.

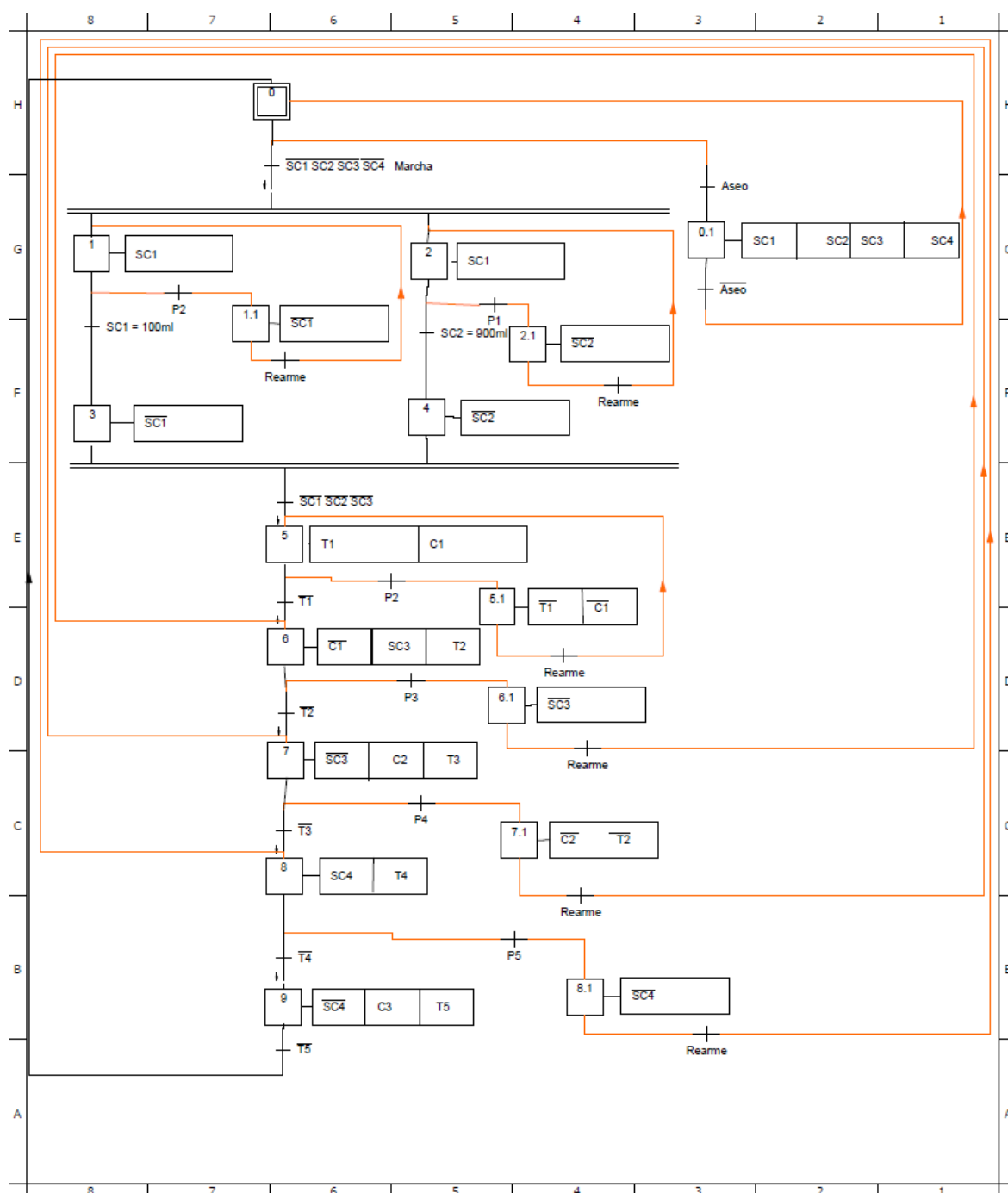


Ilustración 5 Grafcet con parada de emergencia y aseo; Referencia: autor

Como se puede ver en el Grafcet (ver ilustración 5) se manejan siglas un poco confusas, las cuales tienen su significado en la siguiente tabla:

Tabla 4 Explicación siglas del Grafcet; Referencia: autor

Sigla	Significado
SC1	Activación válvula 1.
SC2	Activación válvula 2.
SC3	Activación válvula 3.
SC4	Activación válvula 4.
C1	Activación del tanque de mezclado o tanque generador del Bray II.
C2	Activación del tanque para la mezcla del Bray II con el biosólido. Entiéndase por tanque la bomba centrífuga o la bomba de lodos.
C3	Activación de la bomba de vacío
T1	Tiempo de mezclado para el tanque generador de Bray II.
T2	Tiempo de activación de las bombas del biosólido.
T3	Tiempo de vaciado de la válvula 3.
T4	Tiempo de activación de la bomba de vacío

Teniendo claras las siglas utilizadas, es importante tener presente que aquellas que se encuentren negadas o con una barra en la parte superior a ellas, hacen referencia a su respectiva desactivación, así las cosas, la explicación del proceso por etapas quedó de la siguiente manera:

7.6.1 Etapa 0

Esta es la etapa de inicialización, es acá donde se asegura que todas las válvulas se encuentren cerradas y para pasar a la siguiente etapa se necesitará hacer la activación del botón o actuador “Marcha”.

7.6.2 Etapa 1

En esta etapa será abierta SC1 y no se cerrará hasta que sean depositados 100ml de la mezcla de ácido clorhídrico con agua destilada.

7.6.3 Etapa 2

En esta etapa será abierta SC2 y no se cerrará hasta que sean depositados 900ml de fluoruro.

7.6.4 Etapa 3 y 4

Estas etapas sirven para asegurar que SC1 y SC2 estén cerradas de forma correcta, permitiendo dar paso a la siguiente etapa

7.6.5 Etapa 5

En esta etapa es donde inicia el proceso de mezclado para crear el Bray II

7.6.6 Etapa 6

En esta etapa se asegura que el proceso de mezclado haya terminado y posteriormente se abre SC3 para dejar pasar el Bray II hacia el biosólido y pasado un tiempo se cerrará la válvula.

7.6.7 Etapa 7

En esta etapa se asegura que SC3 y posteriormente se inicia el proceso de mezcla entre el Bray II y el biosólido.

7.6.8 Etapa 8

En esta etapa se abre SC4 para dejar salir el biosólido hacia la bomba de vacío

7.6.9 Etapa 9

En esta etapa se inicia la bomba de vacío permitiendo separar el fósforo del biosólido

7.6.10 Etapas 1.1/2.1/5.1/6.1/7.1

Estas son las etapas de parada de emergencia, fueron colocadas únicamente en aquellas etapas que realizaban un proceso en específico, funciona de tal manera que, al oprimir el botón o actuador de parada de emergencia, el sistema se para en totalidad, pero al oprimir el botón o actuador de “rearme” se retornará a la etapa en la que se encontraba.

7.6.11 Etapa 0.1

Esta es la etapa de aseo, al ser activada, abrirá SC1, SC2, SC3, SC4 para poder hacerle mantenimiento o aseo a los tanques.

7.7 Realización del software en Tia Portal

Con el Graftet mapeado asegurando cada una de las etapas necesarias para el correcto funcionamiento del sistema, se procedió a hacer el desarrollo del software necesario a través de la aplicación “*Tia Portal*”, en este caso se utilizó la versión 18.

Una vez dentro de la aplicación, se hizo la configuración y selección de los dispositivos a utilizar, escogiendo el “SIMATIC PLC S7-1200” con una CPU “1214C DC/DC/Rly” en su última versión tal y como es mostrado en la *ilustración 6*.

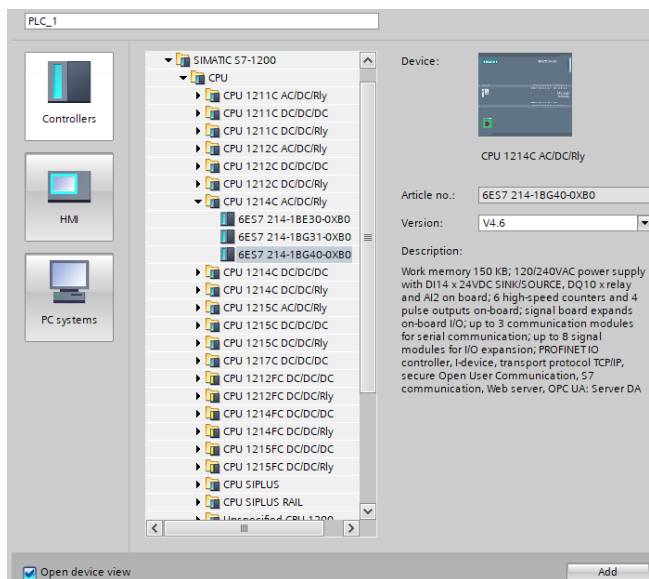


Ilustración 6 Selección de CPU Tia portal; Referencia: autor

7.7.1 Tabla de variables

Posterior a la selección del dispositivo a utilizar, se procedió a hacer la programación de la tabla de variables (*ver ilustración 7*) siempre teniendo en cuenta la guía impuesta por el Grafcet; ahora bien, aunque en el Grafcet se plantearon un total de 9 etapas principales, se puede observar que en este caso se digitaron 10 etapas, esto teniendo en cuenta que la décima etapa servirá para velar por la seguridad del sistema, pero esto será explicado de forma más precisa más adelante.

Referente a la nomenclatura utilizada en la tabla de variables, no se hará una explicación precisa de cada una de ellas, ya que, se intentó mantener la misma impuesta por el Grafcet, ahora bien, la representación del nombre de cada etapa se dejó bajo el acrónimo “ET” seguido de la numeración indicada con anterioridad; sin embargo, para mayor comodidad del usuario, en caso tal de que no tenga acceso a la visualización del Grafcet, se dejó la definición de cada una de las variables seguidas a estas de forma resumida.

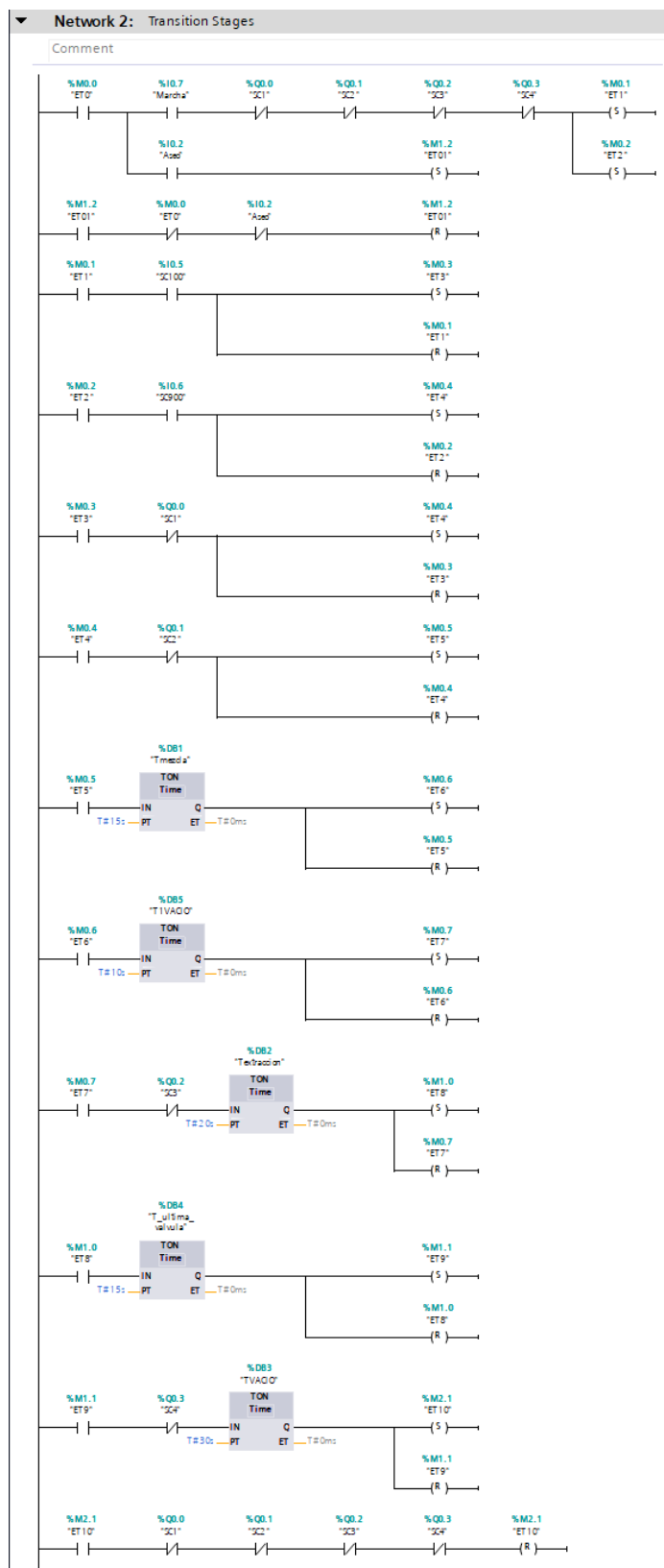


Ilustración 9 Red de etapas de transición Tia Portal; Referencia: Autor

La siguiente red realizada fue la de Parada de emergencia, puesto que se quiere evitar tener todo mezclado siendo que esta a diferencia de la etapa de Aseo sí tiene varios momentos en donde actúa, así que se decidió ponerla en una red aparte.

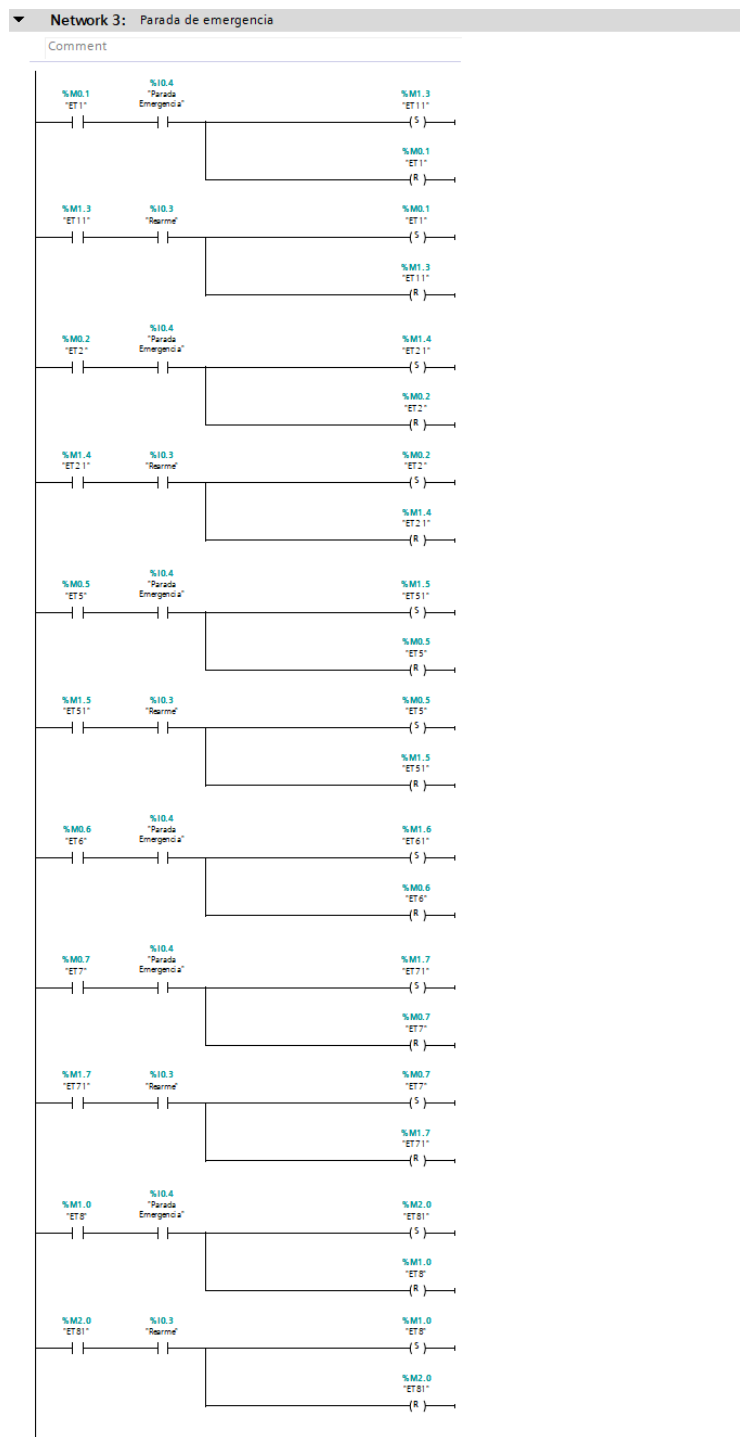


Ilustración 10 Red de parada de emergencia Tia Portal; Referencia: autor

A diferencia de la red de etapas de transición, esta no tiene varias cosas que condicionen su activación, sino únicamente el oprimir el botón o actuador en el momento en el que se esté realizando algún proceso, pues al hacerlo, se activará la etapa de parada de emergencia y se desactivará aquella que este ejecutando con anterioridad. Para poder volver a la etapa en la que se encontraba, se tendrá que activar el botón o actuador de “rearme” desactivando así la etapa de parada de emergencia y volviendo a donde se quedó.

Por último y más importante se tiene la red de salidas de cada una de las etapas, es aquí donde se activa las válvulas, mezcladores y bomba de vacío, se condiciona que solo podrá estar activa cada salida únicamente mientras esté ejecutándose la etapa correspondiente, tal y como es mostrado en la siguiente ilustración:

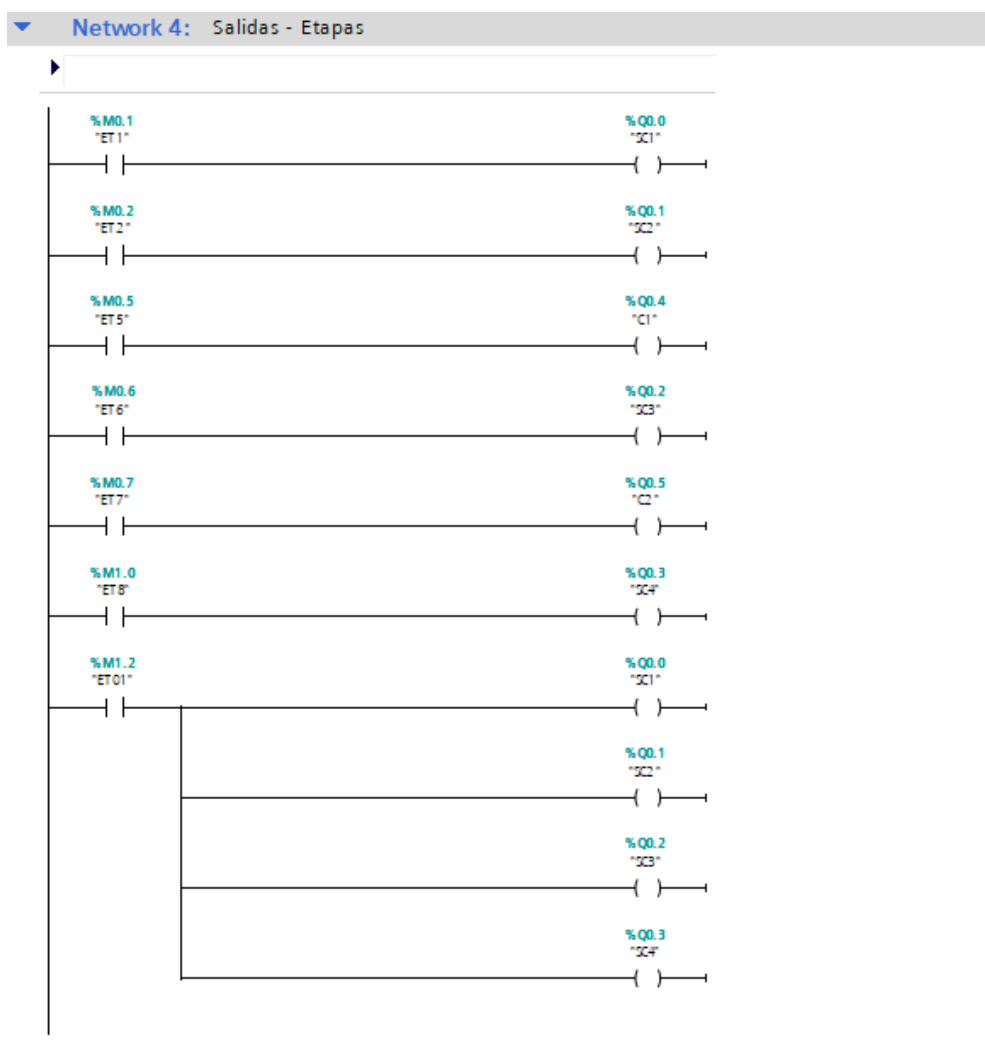


Ilustración 11 Red de salidas Tia Portal; Referencia: autor

7.7.3 Realización del proceso SCADA en HMI

Para realizar la programación o configuración del HMI se debe agregar un nuevo dispositivo en “Tia Portal”, seleccionando así el HMI de nuestra preferencia que en este caso es un “SIMATIC Basic Panel” de 7 pulgadas y que funciona por “PROFINET” (ver ilustración 12).

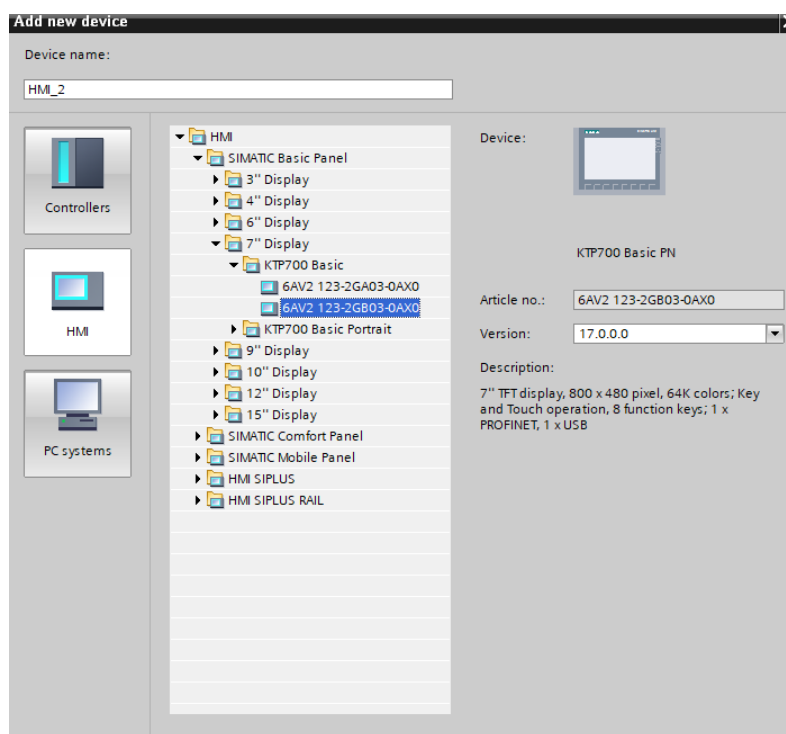


Ilustración 12 Configuración de HMI Tia Portal; Referencia: autor

Una vez elegido el dispositivo necesario, se comenzó a realizar la implementación del proceso SCADA para el HMI enrutando cada una de las etapas, salidas y actuadores necesarios para la visualización y control en pantalla, permitiendo representar gráficamente el proceso en tiempo real tal y como es mostrado a continuación:

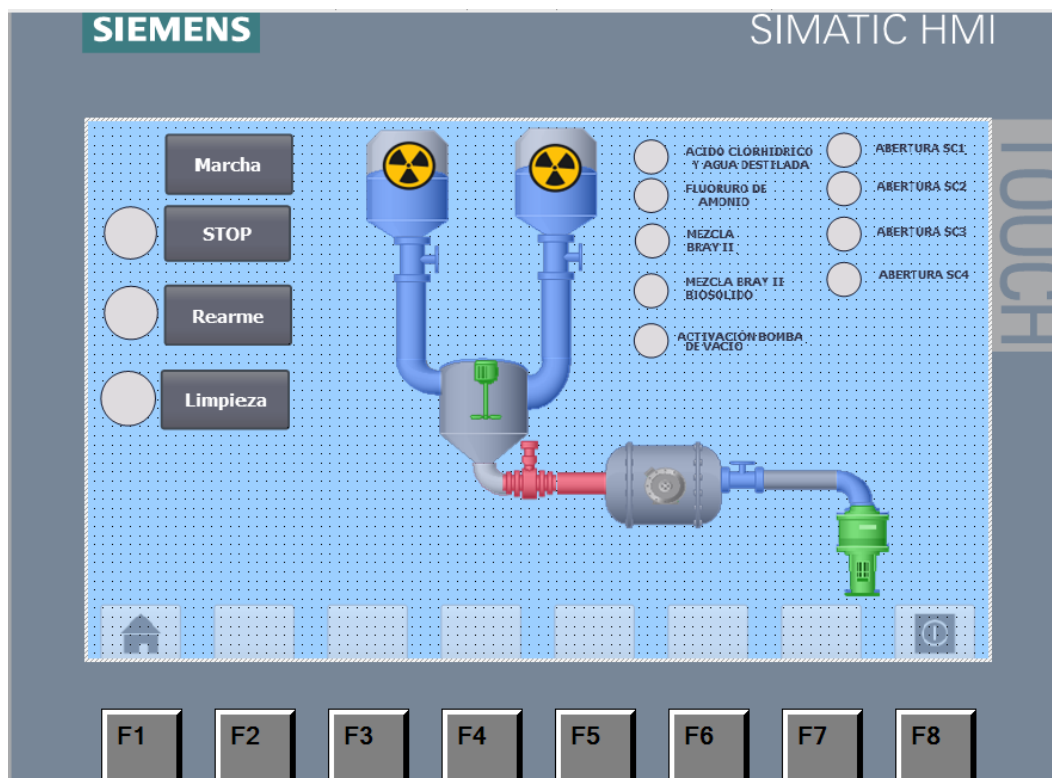


Ilustración 13 SCADA en HMI Tia Portal; Referencia: autor

7.7.4 Comunicación OPC

Para realizar la comunicación OPC es necesario hacer la instalación del software “LabVIEW”, en este caso fue usada la versión 2024 Q1 de 32 bits, también se debe asegurar tener los siguientes módulos:

- OPC Servers
- LabVIEW Real-Time Module

Se debe tener en cuenta que estos módulos no vienen directamente con la instalación base del software, sino que deben ser obtenidos a través de “NI Package Manager”; así las cosas, y teniendo todas las herramientas necesarias, se abre la aplicación de “OPC Servers Configuration” para comenzar con la configuración y comunicación entre “Tia Portal” y “LabVIEW”.

Una vez instalados los módulos, se abre la aplicación “OPC Servers Configuration” y se crea un canal nuevo (ver ilustración 14), al darle siguiente, se selecciona “Siemens TCP /IP

Ethernet” en el apartado de “Device driver” (ver ilustración 15) y posteriormente se elige la tarjeta de red propia del dispositivo, se deja lo demás predeterminado y ya queda listo el canal.

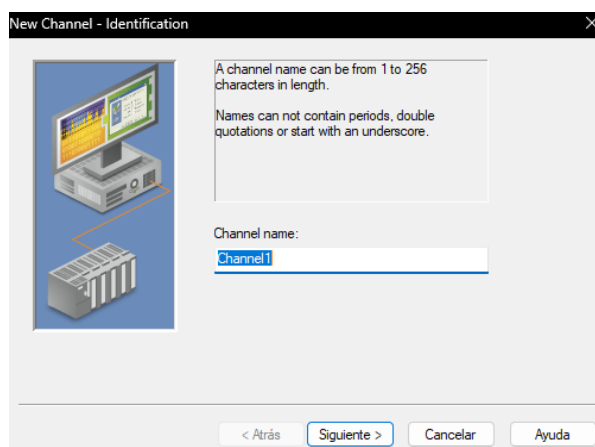


Ilustración 14 Creación nuevo canal OPC; Referencia: autor

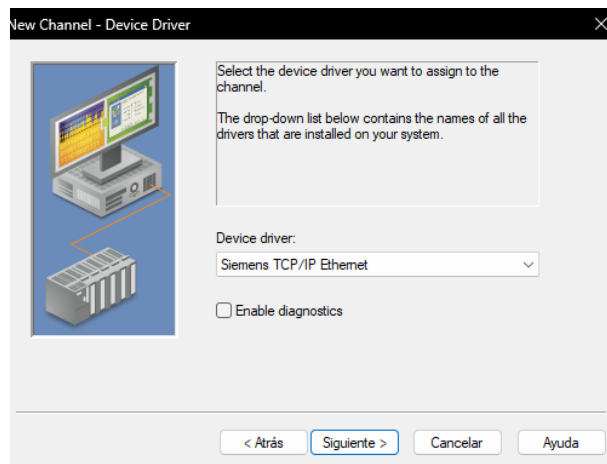


Ilustración 15 Configuración Device driver; Referencia: autor

Creado el canal se procede a hacer la conexión con el dispositivo poniendo el nombre que se desee y seleccionando el plc que se está utilizando en el proceso (ver ilustración 16), hecho esto, el siguiente paso es configurar la misma ip del plc (ver ilustración 17), la cual suele ser de fabrica “192.168.0.1” a menos que sea modificada en el dispositivo a través de *Tia Portal*, lo demás de deja predeterminado y es así cómo se crea la conexión.

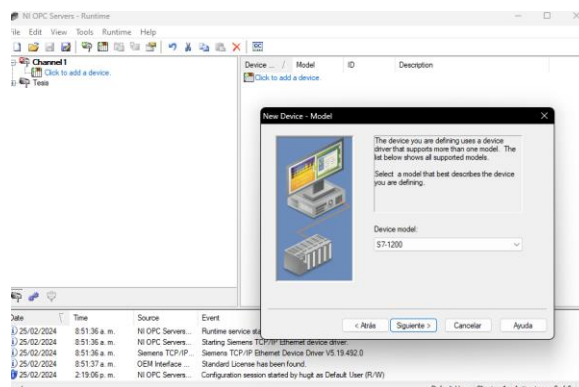


Ilustración 16 Configuración de dispositivo OPC; Referencia: autor

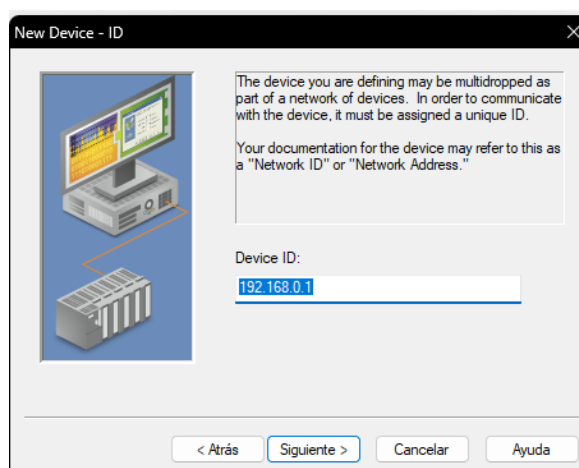


Ilustración 17 Configuración de ip OPC; Referencia: autor

Por ultimo se debe crear las variables las cuales son las que serán visualizadas o controladas desde el SCADA puesto en *LabVIEW*, dándole nombre y poniéndole la ruta correspondiente tal y como es mostrado a continuación:

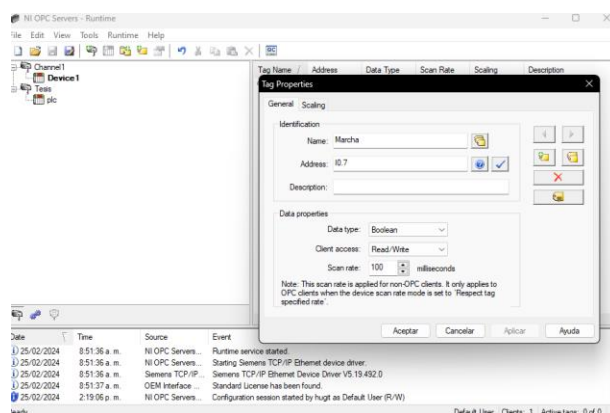


Ilustración 18 Creación de Tags para la comunicación OPC; Referencia: autor

Al terminar de crear cada una de las variables a tratar, se debe ingresar a “Quick Client” a través de el ícono que es mostrado en la *ilustración 19*, y es allí donde se podrá ver el estado de cada variable y si el enrutamiento y conexión se está realizando de forma satisfactoria.

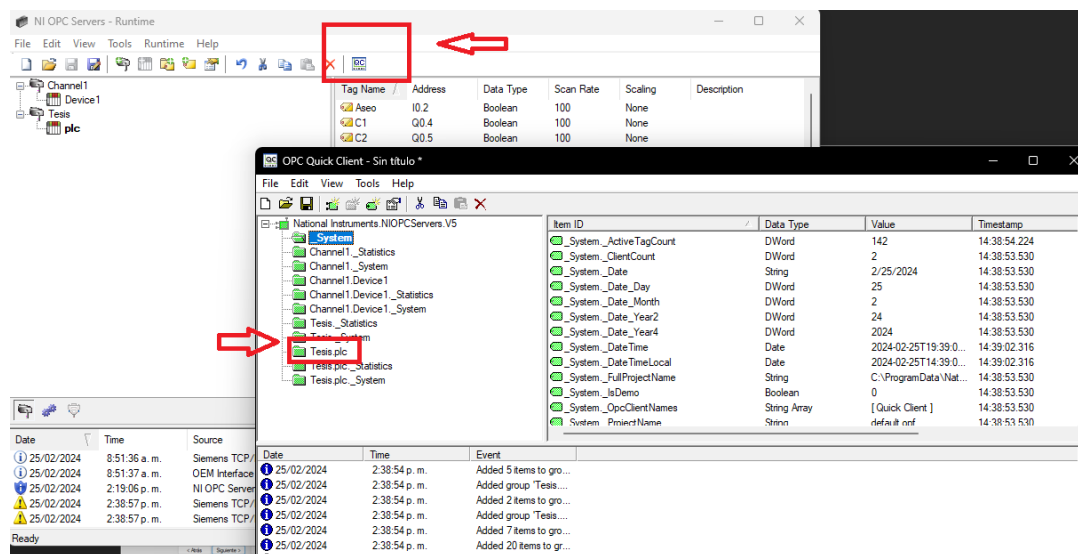


Ilustración 19 Quick Client OPC; Referencia: autor

7.8 Realización del proceso SCADA en LabVIEW

Para hacer el proceso SCADA en LabVIEW es necesario primero abrir un proyecto nuevo en donde se cree un “I/O Server” (ver *ilustración 20*), posteriormente se selecciona “OPC Client” y en la pestaña que aparece se señala la opción de “National instruments.NIOPCServers.V5” (ver *ilustración 21*); al aceptar la opción se creará un archivo que al abrirlo se verá reflejado un indicativo con el nombre de OPC al que se debe dar clic derecho y seleccionar “Export Variables” (ver *ilustración 22*) es allí donde se añade cada uno de los “tags” puestos en el *OPC Servers Configuration*. Al terminar de cargar las variables, se crea el “Vi” o archivo para comenzar a programar en LabVIEW el SCADA.

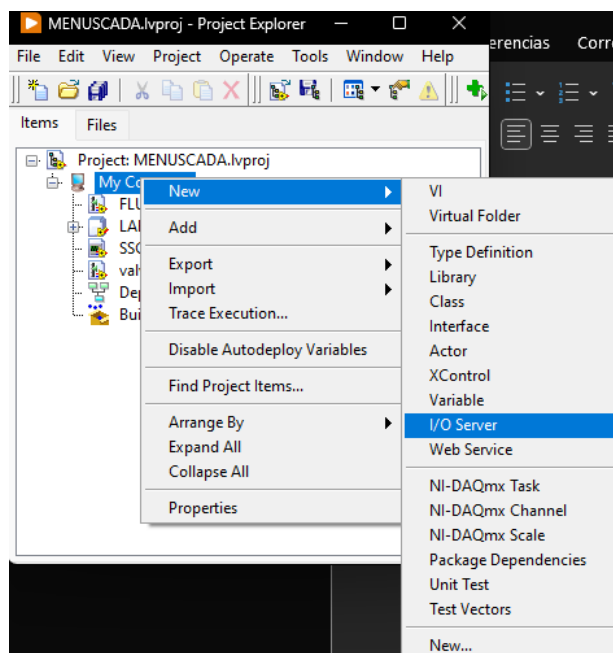


Ilustración 20 Creación I/O Server LabVIEW; Referencia: autor

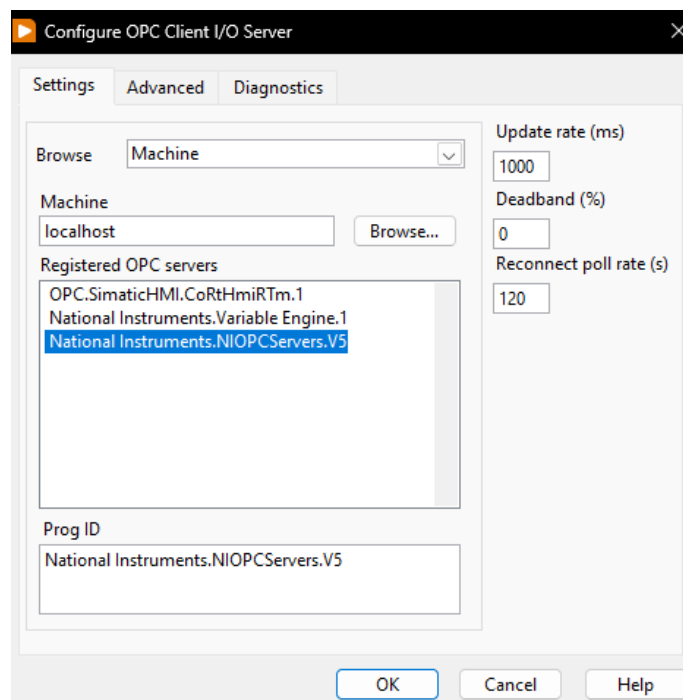


Ilustración 21 Configuración I/O Server

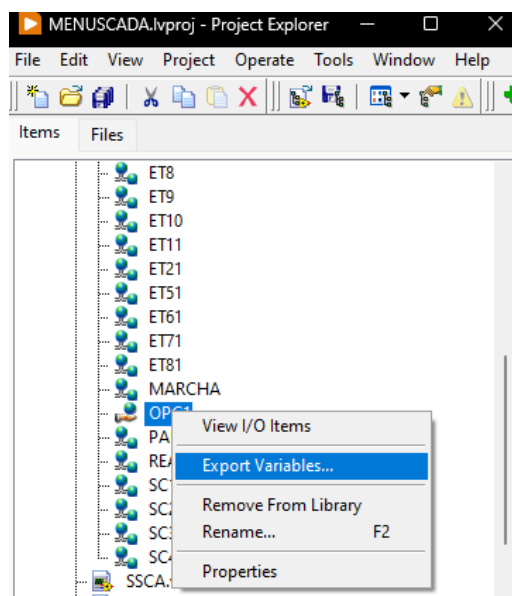


Ilustración 22 Selección de variables en OPC; referencia: autor

Una vez creado el archivo o entorno “Vi” se comienza a hacer el enlace entre actuadores, entradas y salidas con ayuda de la creación de leds, botones y tanques, los cuales en el apartado de diagramas de bloques serán enrutados a lo que se requiera tal y como es mostrado a continuación:

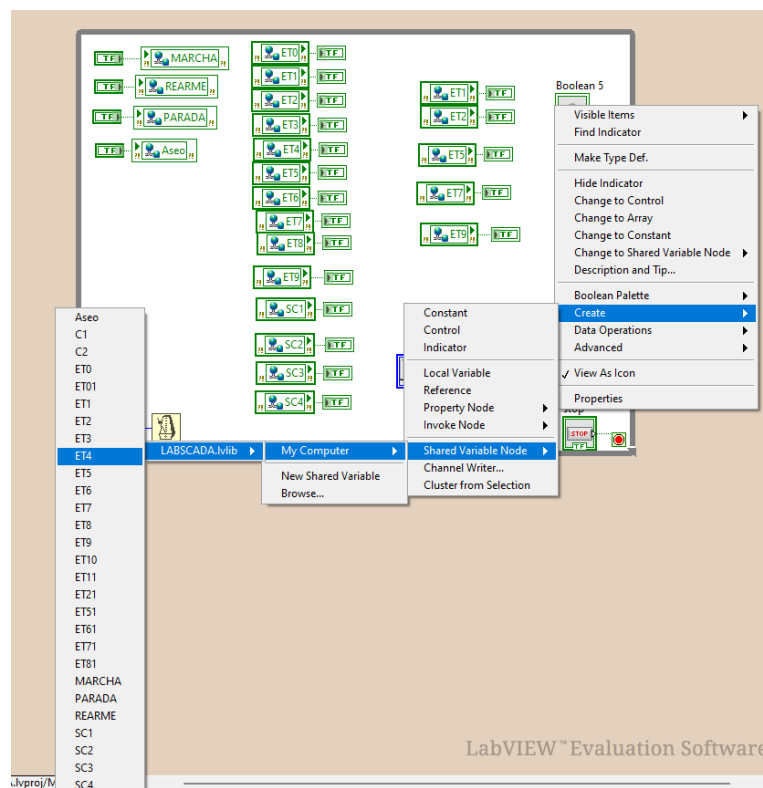


Ilustración 23 Enlace de entradas y salidas en LabVIEW; Referencia: autor

Para brindar una visualización más interactiva al usuario o visualmente más cómoda, se hizo uso del módulo DSC que permite remplazar los iconos predeterminados de LabVIEW con unos menos rústicos (*ver ilustración 24*)

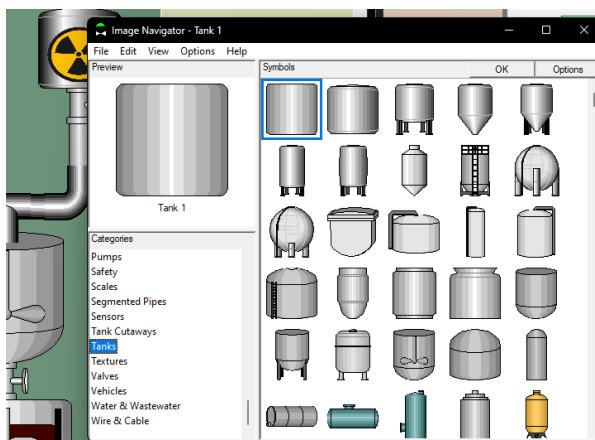


Ilustración 24 Modulo DSC LabVIEW; Referencia: autor

Así las cosas, se realizó el SCADA haciendo la configuración de cada uno de los parámetros necesarios mostrando en qué estado del proceso se encuentra en tiempo real mientras el software desarrollado se encuentra en ejecución quedando de la siguiente manera:

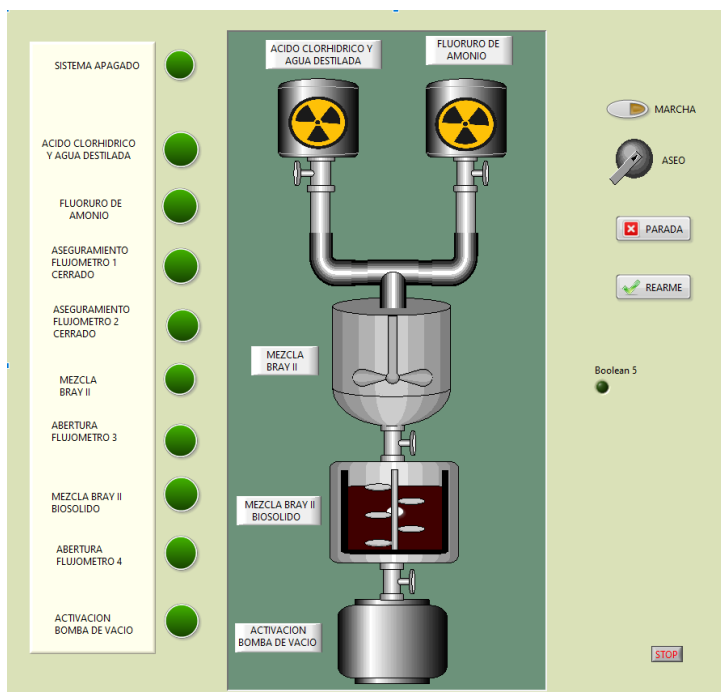


Ilustración 25 SCADA en LabVIEW; Referencia: autor

A diferencia del anterior SCADA, aunque la funcionalidad y finalidad son parecidas, LabVIEW permite tener una mayor personalización gracias al módulo DSC como fue explicado anteriormente, además que permite al usuario tener acceso a esto sin necesidad de encontrarse en el campo de acción, teniendo las mismas funcionalidades.

7.9 Implementación en Web Server

Ya con el SCADA implementado en LabVIEW, se puede hacer una visualización de este a través del navegador con la creación de un Web Server, es aquí donde se ven los beneficios de utilizar las últimas versiones, pues en anteriores versiones este proceso o visualización solo permitía ser mostrado en *internet explorer* con base en Windows 7 o máximo 8.1.

Para hacer su implementación primero se tiene que dirigir a la barra superior de LabVIEW en el apartado de “Tools” y enseguida, seleccionar “Options”, esto desplegará un nuevo menú en donde se tiene que activar el “Remote Panel Server” tal y como es mostrado en la siguiente ilustración:

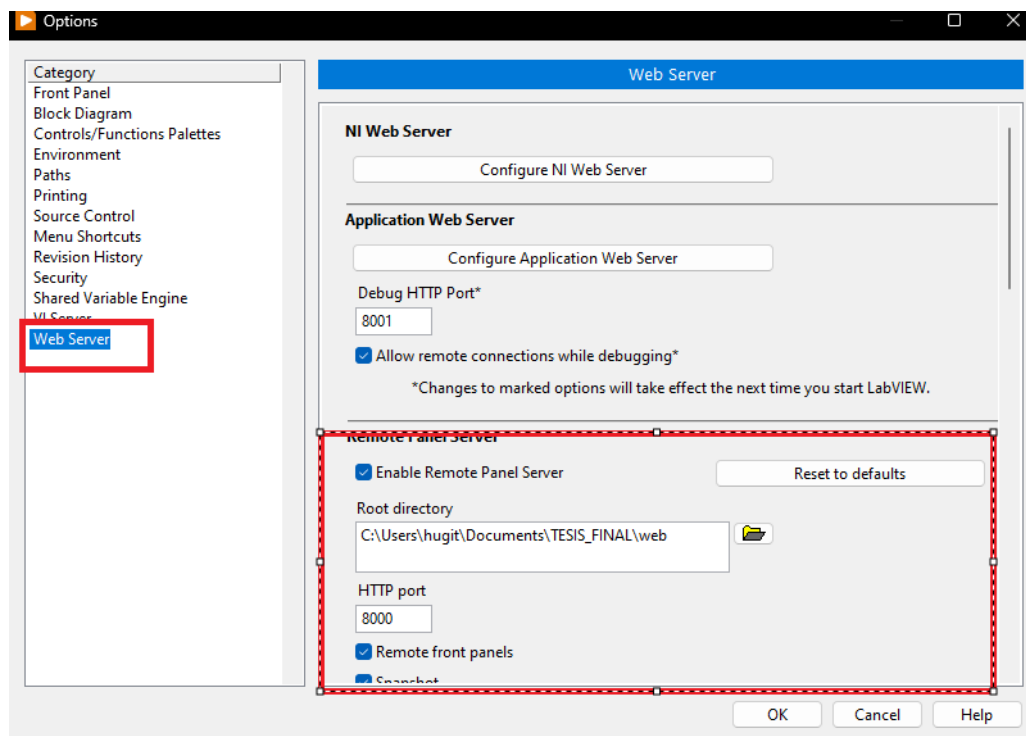


Ilustración 26 Activación de Web server en LabVIEW; Referencia: autor

Seguidos estos pasos, de nuevo hay que dirigirse al apartado de “Tools” seleccionando “Web Publishing Tool” (ver ilustración 27) después “Next”, es allí donde se permitirá hacer modificación de los títulos y descripciones que se requieran para la página web (ver ilustración 28). En el siguiente y ultimo apartado, se selecciona la dirección donde quedará guardada la información y el programa facilitará la dirección enlace para hacer conexión tal y como es mostrado en la ilustración 29.

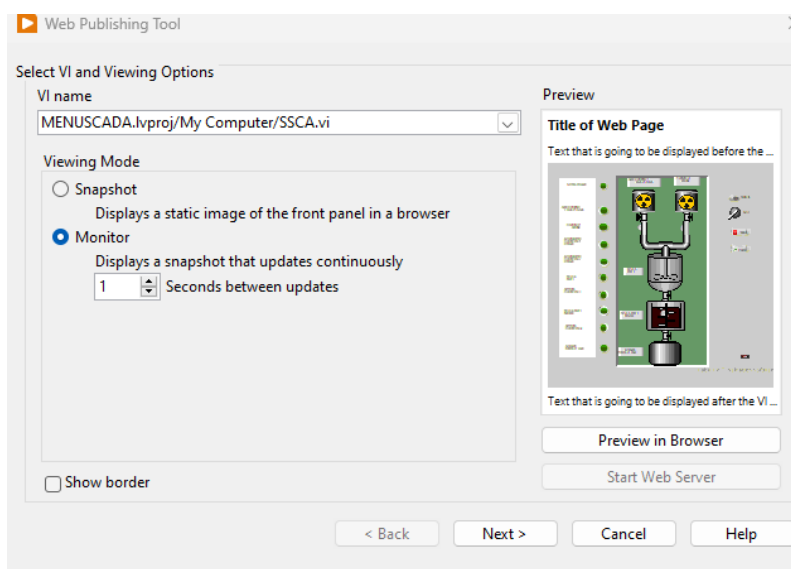


Ilustración 27 Web Publishing Tool en LabVIEW; Referencia: autor

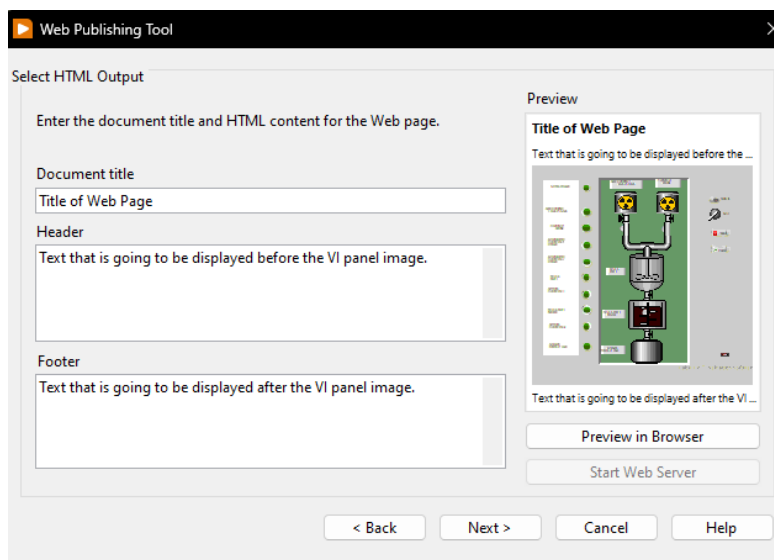


Ilustración 28 Modificación de títulos y descripciones para la página web; Referencia: autor

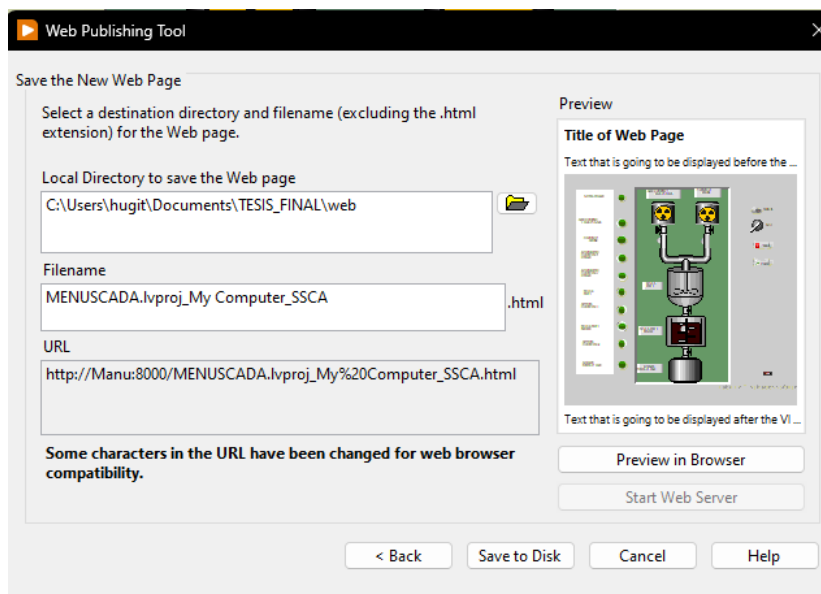


Ilustración 29 Directorios de guardado y URL de la página; Referencia: autor

8 Resultados y Discusión

Al enrutar y probar el sistema con la conexión directa a los dispositivos, se pudo evidenciar su correcto funcionamiento (*ver ilustración 30*), haciendo los cambios de estados en la visualización gráfica con los tiempos requeridos en el HMI.

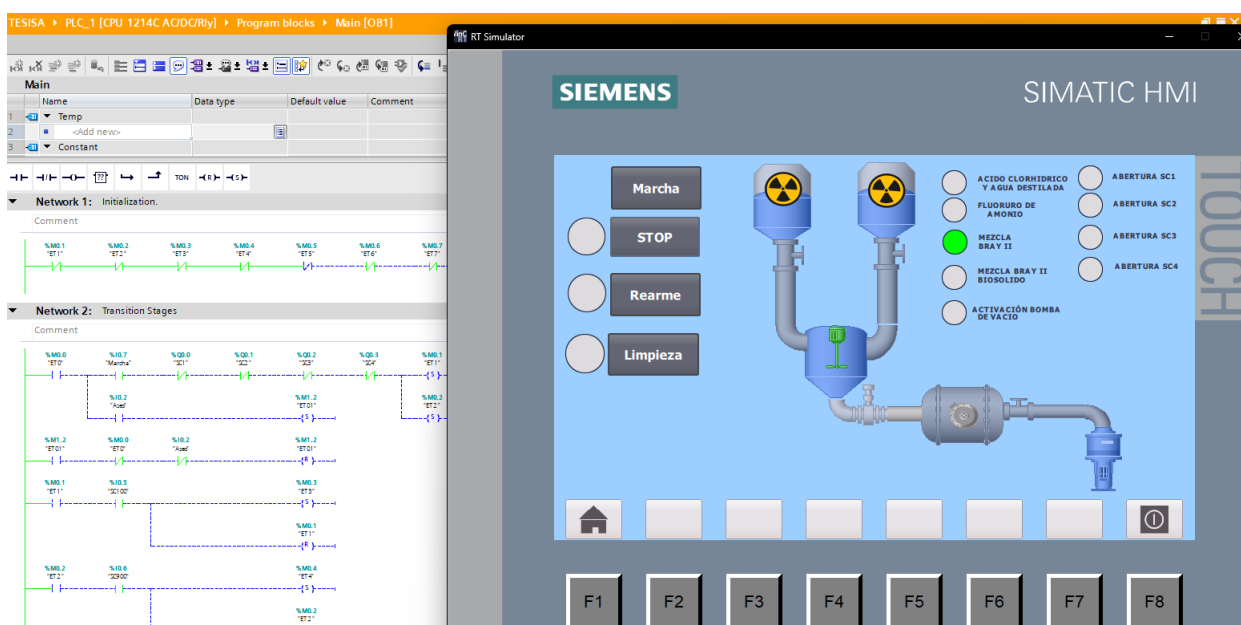


Ilustración 30 SCADA HMI

Por el apartado del SCADA de LabVIEW este de igual forma funciono bajo lo esperado (*ver ilustración 31*), ahora bien, hay que tener puntos en cuenta tales como que, en la comunicación entre plataformas, su velocidad dependerá del equipo donde se esté ejecutando, ya que, LabVIEW al ser un software tan robusto puede provocar un pequeño retraso con el sistema principal si su equipo no soporta del todo la ejecución simultánea.

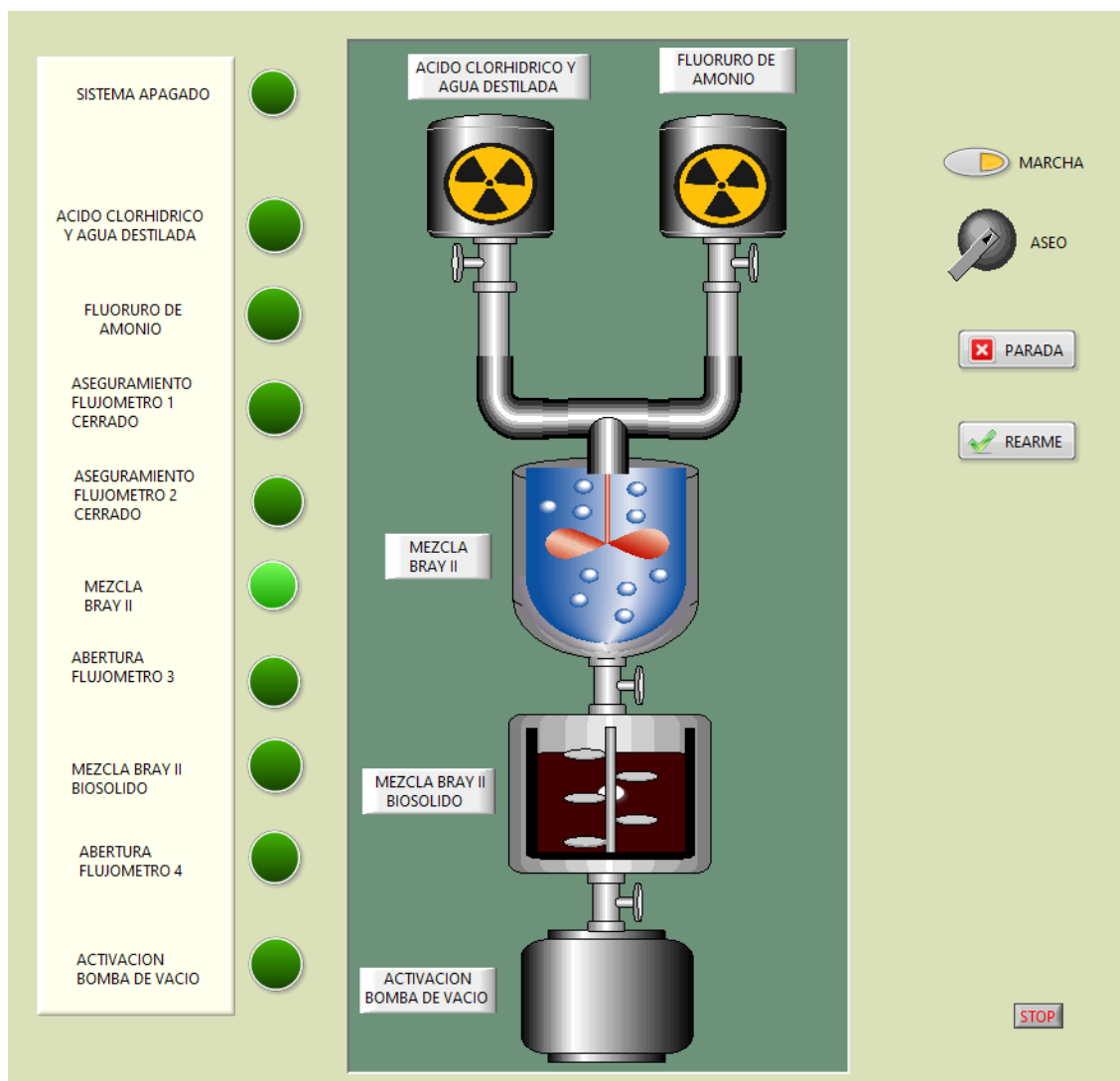


Ilustración 31 SCADA desarrollado en LabVIEW en funcionamiento; Referencia: autor

En el caso del Web Service para hacer consumo de la pagina web, se tendrá que abrir el URL facilitado en la ilustración 29 escogiendo el navegador de preferencia. La implementación de este apartado dio una mayor versatilidad al sistema según las necesidades y gustos del usuario tal y como es mostrado a continuación:

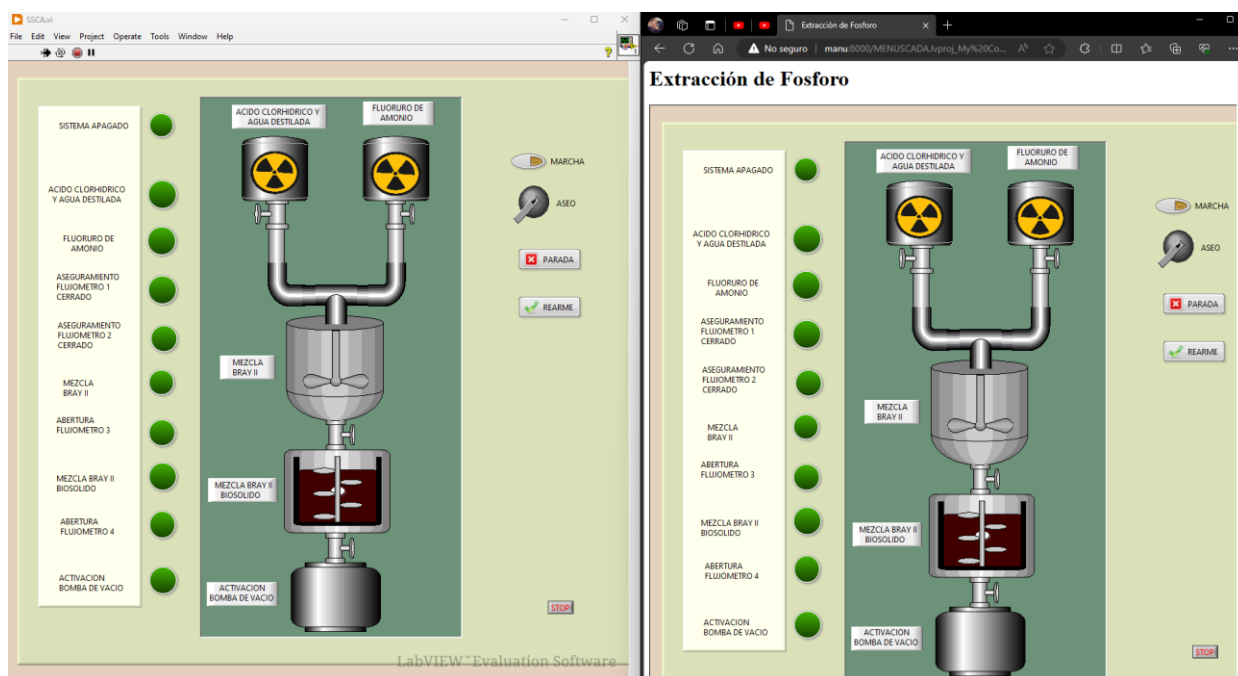


Ilustración 32 Web Service implementado; Referencia: autor

Ahora bien, para mejorar el Web Service, se hizo la abstracción del servicio facilitado por LabVIEW, modificando el tiempo de 1s del SCADA en el código y dejándolo en una respuesta de 1ms. A través de “HTML”, “CSS”, “JS” se creó una pagina Web totalmente responsive, lo que quiere decir que puede ser vista desde cualquier dispositivo ajustándose a su tamaño sin alterar los datos presentes en ella y permitiendo visualizar en tiempo real el SCADA propuesto en LabVIEW quedando así tal y como es mostrado en las siguientes ilustraciones:



Ilustración 33 Página Web creada para la visualización del proceso y SCADA; Referencia: autor

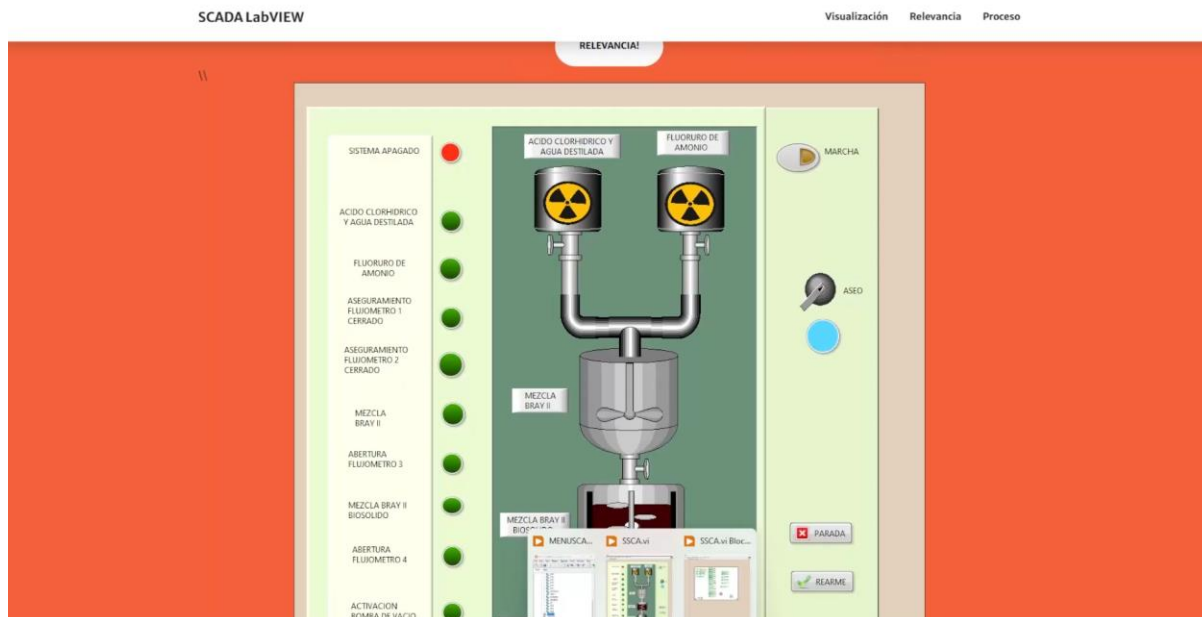


Ilustración 34 Página Web creada para la visualización del proceso y SCADA; Referencia: autor



Ilustración 35 Página Web creada para la visualización del proceso y SCADA; Referencia: autor

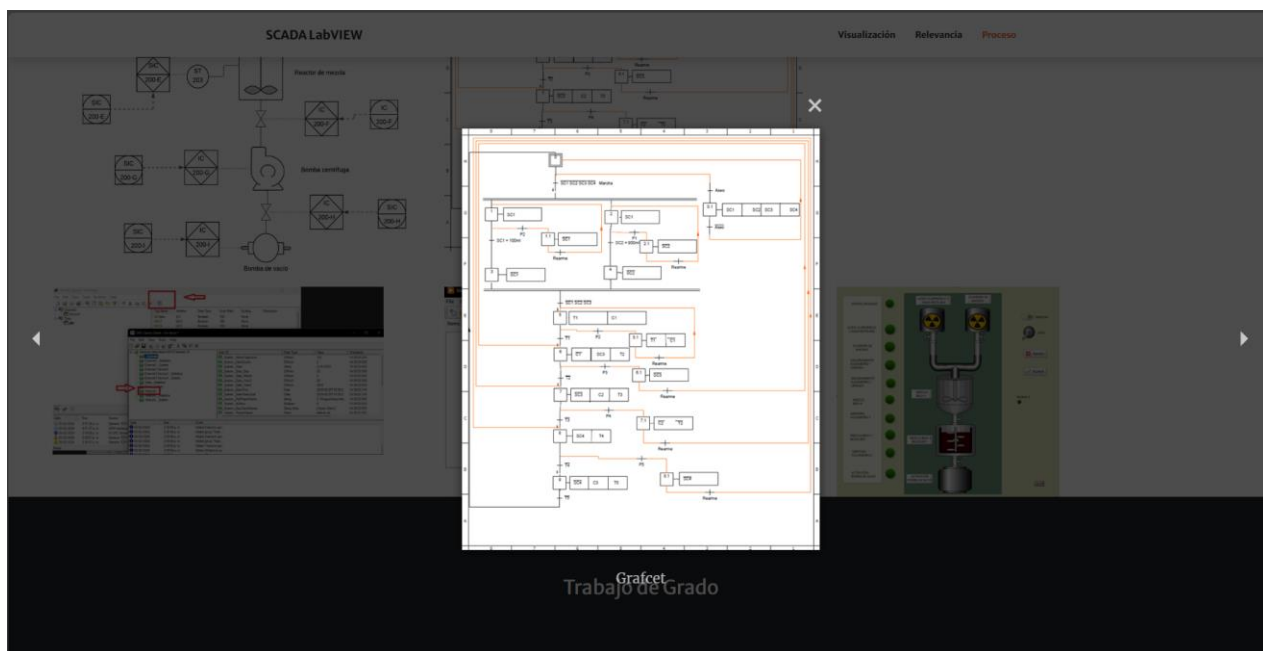


Ilustración 36 Página Web creada para la visualización del proceso y SCADA; Referencia: autor

8.1 Recomendaciones

Si bien la implementación fue efectiva, el proceso se puede mejorar con el tiempo, teniendo en cuenta presupuestos o modos de empleo para la automatización de la creación del Bray II y su respectiva extracción de fósforo proveniente de los biosólidos.

Se debe tener en cuenta la modificación de tiempos y medidas requeridas según la necesidad de producción, esto buscando proveer una solución de Bray II lo más pura posible.

En el proceso de desarrollo se tomaron en cuenta alternativas para el control del volumen en los tanques intentando controlar en lo máximo la cantidad de líquido depositado, viendo alternativas como el desarrollo de un PID, sin embargo bajo pruebas previamente realizadas en el sistema, se llegó a la conclusión de que esta solución presentaría demasiados inconvenientes, puesto que, en el ajuste de la medida para llegar a la señal de referencia se desperdiciaría líquido, lo cual en este caso no puede suceder, ya que, se manejan químicos, sería peligroso y demasiado costoso para el sistema. Es por lo anterior descrito que se eligió controlar el nivel con sensores de ultrasonido para evitar desbordamientos a causa de que estos no son invasivos y pueden perdurar

a través del tiempo sin corroerse siendo perfectos para este tipo de líquidos, ya que, al introducir sensores invasivos se pueden presentar alteraciones en los compuestos químicos además de daños prolongados en los sensores, se recomienda no utilizar tampoco sensores infrarrojos ya que estos no tendrían utilidad en la medición por el rebote con la superficie; por otro lado, se eligieron flujómetros o válvulas solenoides para el paso de los químicos puesto que estos permitirán tener un control preciso de la cantidad que se pasa, sin embargo, hay que tener en cuenta que estos sensores no se vean afectados por los ácidos manejados; un ejemplo de esto en una escala pequeña es el sensor “YF-S201” el cual es un flujómetro que funciona bajo efecto Hall con paletas plásticas y es aplicable para prototipos de gran precisión y magnitud en pequeña escala; del mismo modo cuando se quiera hacer la implementación física del proceso se debe tener en cuenta aspectos claves como los ya mencionados y la utilización de plásticos y tuberías no corrosibles.

9 Alcances

El proyecto desarrollado tiene una amplia proyección por la innovación que este conlleva, ya que, el método es muy poco estudiado pero muy efectivo; se está haciendo de forma inicial localmente, llevando a cabo las pruebas mostradas en el presente documento, siguiente a esto se espera ser implementado físicamente y puesto bajo innovación, llevado este a un nivel internacional por su gran importancia explicada anteriormente, y a causa de que la metodología aplicada para la recuperación del fosforo, cumple con las normativas de cada país, no presenta problema y aporta también a la economía circular en la fertilización de plantas, recuperación de zonas forestales o recuperación de suelos erosionados, enfocados a la seguridad alimentaria.

Para hacer las pruebas pertinentes al funcionamiento del sistema se utilizaron componentes físicos como actuadores y demás, que permitieron tener noción del funcionamiento real, teniendo en cuenta los grandes costos que conllevaría poner los sensores “reales”, sin embargo, esto no afectó la visualización del proceso pues a términos prácticos en cada etapa que actuó un sensor hubo algo que lo representó además que a través de los SCADA desarrollados se pudo ver el funcionamiento del sistema general .

10 Conclusión

Se realizó un software efectivo que permitiese desarrollar el proceso para la creación de la solución Bray II y su aplicación en un biosólido para posteriormente extraer fósforo de él, creando un P&ID que cumpliera con la normativa ISA-S5 y haciendo optimización de las etapas requeridas, añadiéndole eventos de seguridad como paradas de emergencia y aseo. También se efectuó dos SCADA que funcionan simultáneamente con el proceso en diferentes plataformas dejando al usuario visualizar y controlar el estado del proceso a distancia de forma interactiva desde el HMI o LabVIEW; así las cosas, se deja el proyecto en el tercer nivel de la pirámide CMI por la supervisión y control de forma remota de los procesos, preparado para una implementación en un prototipo físico y cumpliendo con la normativa general para la producción del Bray II impuesta por la NTC 5350:20.

11 Referencias

- Anonimo. (2 de 10 de 2022). *Algreatlakes*. Obtenido de <https://algreatlakes.com/blogs/news/understanding-soil-test-phosphorus>
- ARDUINO. (s.f.). *ARDUINO*. Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- COMTITRONIC. (04 de 10 de 2022). *COMTITRONIC*. Obtenido de <https://www.comtitronic.com/control-de-procesos-y-medicion/niveles/medida-de-nivel/ultrasonido/>
- Creus, A. (septiembre 2010). *Instrumentación industrial 8va edición*. México: marcombo; Alfomega.
- ICONTEC. (2020). *ICONTEC*. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-de-fosforo-disponible-ntc5350-2020.html>
- López, M., Atienza Martínez, M., (dir), M., Galindo, G., & (dir), G. (2015). *Zaguan.unizar*.
- MOSAIC. (2022). *Mosaic*. Obtenido de <https://www.croptnutrition.com/nutrient-management/phosphorus>
- Motsara, M. R. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. .
- R. C. Brandt, H. A. (2004). Water-Extractable Phosphorus in Biosolids: Implications for Land-Based Recycling. *Water Environment Research*, 9.
- Raupenstrauch, H. (02 de 08 de 2019). *Cordis*. Obtenido de <https://cordis.europa.eu/project/id/282856/es>
- ROSEN, J. (15 de Octubre de 2020). *National Geographic*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2020/10/agricultores-afrontan-crisis-de-fosforo-solucion-empieza-en-el-suelo#:~:text=Hay%20dos%20razones.,no%20podemos%20permitirnos%20malgastar%20f%C3%B3sforo.>