

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un sistema automatizado para la producción
de soluciones químicas

INGE-2779

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Doménica Johanna Carrasco Romero

José Vicente Cabrera Blum

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

La culminación de mis estudios se la dedico, en primer lugar, a mis padres, porque este logro es suyo, fruto del amor incondicional y apoyo que me han brindado. A mi hermano Nicolás, por enseñarme, con su ejemplo y su propia lucha, a seguir mi propio camino con temple.

Del mismo modo, a mis tías Jenny y Kerly, y a mi prima Iskra, mujeres ejemplares cuyo legado de fortaleza y sabiduría inspira cada paso que doy.

Finalmente, a cada decisión que, con sus aciertos y tropiezos, me llevó a convertirme en esta versión de mí.

Doménica Carrasco

Dedicatoria

Dedico este trabajo final, reflejo del esfuerzo y compromiso a lo largo de mi formación, a mis padres, Diógenes y Bertha, y a mi hermano Jorge, quienes han estado a mi lado en cada etapa de mi vida estudiantil, brindándome su apoyo incondicional, amor y guía.

También dedico este logro a todas las personas que han creído en mí y, de una u otra forma, me han impulsado a seguir adelante en la búsqueda de mis metas. Espero estar a la altura de sus expectativas y retribuir la confianza que han depositado en mí.

José Cabrera

Agradecimientos

A mis padres Jacqueline y Jorge porque ellos fueron quienes construyeron el camino que recorrí para llegar hasta aquí. En mí habita la esencia de todo lo que me han entregado.

A mis amigos José, Mario, Miguel, David y Josué por hacer de esta etapa un viaje inolvidable llena de risas y apoyo incondicional, su compañía le dio un significado especial a esta experiencia.

A toda persona que se tomó el tiempo de darme unas palabras que me inspiraron a seguir con motivación en la carrera.

Doménica Carrasco

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor fortaleza en los momentos difíciles de este arduo camino. Su confianza y aliento me han impulsado a perseverar y a alcanzar una de mis metas más importantes.

A mis amigos, gracias por las risas, amanecidas, estrés de última hora y por estar ahí cuando más los necesitaba. No solo han sido compañeros de estudios, sino una parte fundamental de esta etapa de mi vida.

Y un agradecimiento muy especial a mi compañera de tesis, quien no solo ha sido mi principal apoyo en lo académico sino también en lo personal. Recorrer este camino contigo lo ha hecho más fácil, significativo y sé que no lo habría hecho igual sin ti, gracias, Doménica.

José Cabrera

Declaración Expresa

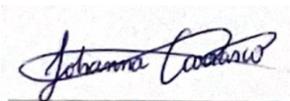
Nosotros Doménica Johanna Carrasco Romero y José Vicente Cabrera Blum acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

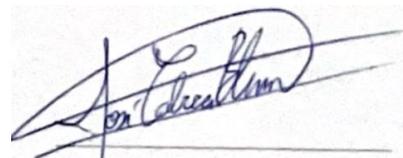
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autores/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de diciembre del 2024.



Doménica Johanna
Carrasco Romero



José Vicente
Cabrera Blum

Evaluadores

Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph.D.

Profesor de Materia

Wilton Edixon Agila Galvez, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

La fabricación de soluciones químicas requiere un control preciso en las variables involucradas dentro del proceso. Por ello, el presente proyecto se enfoca en el diseño de la automatización del sistema manual utilizado en la producción de hidróxido de amonio mediante el control de actuadores y monitoreo de sensores. De esta manera, es posible tener una respuesta rápida a anomalías de las variables críticas lo que contribuye en la consistencia de la calidad del producto, aumenta la seguridad y modularidad del sistema. Para ello se desarrolló un esquema integrado por un controlador lógico programable que contiene el algoritmo que maneja las etapas del proceso en función a la temperatura, presión y datos de producción. Asimismo, se seleccionó los actuadores y sensores más apropiados considerando seguridad, costo y normativa ATEX según se necesitase. A través de la simulación del algoritmo, se verificó el control de los actuadores según las variables clave, asegurando su desempeño en distintos escenarios. Como resultado, los electrónicos seleccionados y el algoritmo desarrollado gestionan la inyección de insumos, estabilizando el sistema ante desviaciones de temperatura y presión, lo que contribuye a la consistencia de la calidad del producto y la seguridad tanto del sistema como del personal de planta. También se diseñó una interfaz intuitiva para la configuración y monitoreo del sistema.

Palabras Clave: Controlador lógico programable, hidróxido de amonio, control, temperatura.

Abstract

The manufacturing of chemical solutions requires precise control of the variables involved in the process. Therefore, this project focuses on the design of the automation of the manual system used in the production of ammonium hydroxide through the control of actuators and monitoring of sensors. In this way, it is possible to quickly respond to anomalies in critical variables, which contributes to the consistency of the product quality, while increasing the safety and modularity of the system. To achieve this, an integrated framework was developed, consisting of a programmable logic controller that contains the algorithm managing the process stages based on temperature, pressure, and production data. The most suitable actuators and sensors were also selected, considering safety, cost, and ATEX regulations as needed. Through algorithm simulation, the control of the actuators was verified according to the key variables, ensuring their performance in different scenarios. As a result, the selected electronics and the developed algorithm manage the injection of inputs, stabilizing the system against temperature and pressure deviations, which contributes to the consistency of product quality and the safety of both the system and plant personnel. An intuitive interface was also designed for system configuration and monitoring.

Keywords: Programmable logic controller, ammonium hydroxide, control, temperature.

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas.....	X
Índice de planos.....	XI
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Justificación del problema	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Hidróxido de amonio.....	6
1.5.2 Producción de hidróxido amónico.....	7
1.5.3 Atmósferas explosivas.....	9

1.5.4	Estado del arte	11
Capítulo 2	.....	12
2.1	Metodología.....	13
2.2	Definición de requerimientos.....	13
2.3	Alternativas de solución.....	14
2.4	Selección de solución.....	15
2.5	Proceso de diseño.....	19
2.6	Diagrama de arquitectura del sistema	21
2.7	Diseño electrónico	23
2.7.1	Selección de controlador	23
2.7.2	Selección de HMI.....	26
2.7.3	Selección de flujómetros	29
2.7.4	Selección de válvulas	32
2.7.5	Selección de elementos adicionales.....	36
2.7.6	Dimensionamiento de suministro de energía.....	38
2.8	Diseño de control.....	40
2.8.1	Definición lógica del programa	41
2.8.2	Programación del PLC	48
2.8.3	Diseño Interfaz Hombre – Máquina.....	48
Capítulo 3	.....	50

3.1	Resultados y análisis	51
3.2	Diseño electrónico	51
3.3	Diseño de control.....	54
3.3.1	Prueba de la interfaz de usuario.....	54
3.3.2	Simulación de la lógica de control	62
3.4	Análisis de costos.....	66
Capítulo 4	.....	69
3.5	Conclusiones y recomendaciones	70
3.5.1	Conclusiones.....	70
3.5.2	Recomendaciones	71
Referencias	.....	72
Apéndices	.....	77

Abreviaturas

%	Abreviatura de porcentaje, utilizado para representar proporciones.
°C	Grados centígrados
AI	Entrada analógica
AO	Salida analógica
DI	Entrada digital
DO	Salida digital
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HMI	Interfaz Humano-Máquina
I/O	Entradas y salidas
Kg	Abreviatura de kilogramo, unidad de medida de masa
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de tuberías e instrumentación)
PLC	Controlador lógico programable
PPM	Partículas por millón
Psi	Libras por pulgada cuadrada
RTD	Resistencia variante por temperatura

Simbología

@	Indica “a”, por ejemplo 120 VAC @ 60 Hz
A	Amperio
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
FI	Indicador de flujo
FT	Transmisor o medidor de flujo.
H	Luz piloto
IP	Indicador de presión
IT	Indicador de temperatura
K	Relé
mA	Miliamperio
N.C.	Normalmente cerrado (Normally Closed)
N.O.	Normalmente abierto (Normally Open)
S	Pulsador
TP	Transmisor de presión
TT	Transmisor de temperatura
UC	Unidad de control
V	Voltios
VAC	Voltios en corriente alterna
VDC	Voltios en corriente continua
WI	Indicador de peso (balanza)

Índice de figuras

Figura 1.1 <i>P&ID del sistema de producción de hidróxido de amonio (original)</i>	8
Figura 1.2 <i>Clasificación de zonas según la Norma ATEX</i>	10
Figura 2.1 <i>Proceso de diseño</i>	19
Figura 2.2 <i>Diagrama de arquitectura del sistema</i>	22
Figura 2.3 <i>Diagrama de flujo de la programación - Principal</i>	41
Figura 2.4 <i>Diagrama de flujo de la programación – Modo automático</i>	42
Figura 2.5 <i>Diagrama de flujo de la programación – Ingreso parámetros</i>	44
Figura 2.6 <i>Diagrama de flujo de la programación – Ingreso agua</i>	45
Figura 2.7 <i>Diagrama de flujo de la programación – Inyección de amoniaco</i>	46
Figura 2.8 <i>Diagrama de flujo de la programación – Inyección de amoniaco</i>	47
Figura 2.9 <i>Diagrama de flujo de la programación – Pausa</i>	48
Figura3.1 <i>Diagrama P&ID – sistema automatizado (sensores)</i>	52
Figura 3.2 <i>Diagrama P&ID – sistema automatizado (actuadores)</i>	53
Figura 3.3 <i>Interfaz gráfica – Pantalla de inicio</i>	55
Figura 3.4 <i>Interfaz gráfica – Pantalla de proceso</i>	56
Figura 3.5 <i>Interfaz gráfica – Pantalla modo manual</i>	57
Figura 3.6 <i>Interfaz gráfica – Pantalla modo automático</i>	58
Figura 3.7 <i>Interfaz gráfica – Pantalla tendencias</i>	59
Figura 3.8 <i>Interfaz gráfica – Pantalla instrucciones</i>	60
Figura 3.9 <i>Interfaz gráfica – Pantalla información de proyecto</i>	61
Figura 3.10 <i>Simulación del controlador – Comprobación modo manual</i>	62
Figura 3.11 <i>Simulación del controlador – Inyección de agua en modo automático</i>	63

Figura 3.12 <i>Simulación del controlador – Inyección de amoniaco en modo automático</i>	64
Figura 3.13 <i>Simulación del controlador – Alarma por temperatura alta en modo automático</i>	64
Figura 3.14 <i>Simulación del controlador – Alarma por presión alta en modo automático</i>	65
Figura 4.1 <i>Simulación del controlador – Sistema en espera para despacho modo automático</i> ...	66

Índice de tablas

Tabla 2.1 <i>Criterios de evaluación para las alternativas de solución</i>	16
Tabla 2.2 <i>Matriz de decisión para las alternativas de solución</i>	18
Tabla 2.3 <i>Comparación técnica de controladores de diferentes gamas, marca SIEMENS</i>	24
Tabla 2.4 <i>Criterios de selección para controladores</i>	25
Tabla 2.5 <i>Matriz de decisión para la selección de controladores</i>	26
Tabla 2.6 <i>Comparación técnica de HMI de diferentes gamas, marca SIEMENS</i>	27
Tabla 2.7 <i>Criterios de selección para HMI</i>	28
Tabla 2.8 <i>Matriz de decisión para la selección de HMI</i>	28
Tabla 2.9 <i>Criterios de selección para flujómetros</i>	31
Tabla 2.10 <i>Matriz de decisión para la selección de flujómetros</i>	32
Tabla 2.11 <i>Criterios de selección para válvulas actuadas</i>	35
Tabla 2.12 <i>Matriz de decisión para la selección de válvulas actuadas</i>	36
Tabla 2.13 <i>Equipos adicionales utilizados por el sistema</i>	37
Tabla 2.14 <i>Tabla de consumos de corriente de equipos a 24 VDC</i>	39
Tabla 2.15 <i>Tabla de consumos de corriente de equipos a 120 VAC</i>	40
Tabla 3.1 <i>Costos de Materiales</i>	67
Tabla 3.2 <i>Costos Indirectos</i>	68

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Alimentación

PLANO 2 Entradas PLC

PLANO 3 Entradas analógicas

PLANO 4 Salidas PLC

PLANO 5 Transmisores

PLANO 6 Relés y señalización

PLANO 7 Medidores de flujo

Capítulo 1

1.1 Introducción

La evolución de diversos productos como farmacéuticos, polímeros, agroquímicos y materiales especializados ha sido notablemente impulsada por la industria química, que emplea complejos procesos para convertir materias primas en productos de alto valor añadido. Dicha industria, esencial en la cadena de suministro para sectores como la manufactura, la energía y la agricultura, juega un papel importante en la promoción de la innovación tecnológica y el crecimiento económico, fomentando el desarrollo de áreas estratégicas [1]. Específicamente en Ecuador, este sector generó ventas por \$1.577,3 millones de dólares en 2020, con el 16,6% provenientes de la fabricación de productos como desinfectantes, reactivos de laboratorio y productos de limpieza derivados del hidróxido de amonio, utilizado en aplicaciones industriales y alimentarias [2]. Dentro de este contexto, el hidróxido de amonio se consolida como un insumo versátil y de gran alcance cuyas propiedades lo posicionan como un componente esencial en usos farmacéuticos, de limpieza y agrícolas [3], contribuyendo significativamente en el desarrollo económico del país.

Tradicionalmente, la mayoría de los procesos se han llevado a cabo de manera manual, confiando en la habilidad y precisión de los operadores para cumplir con las especificaciones técnicas de los productos. No obstante, esta dependencia introduce riesgos de inconsistencias y errores que pueden comprometer la calidad del insumo final y la estabilidad del procedimiento [4].

Por ejemplo, en una planta de fertilizantes de la empresa Terra, dedicada a la producción de nitrato de amonio (NA), el control del pH y la prevención de la formación de burbujas mediante inyectores de vapor se gestionaban a través de la supervisión manual de los operarios. Durante un apagado programado, no se efectuó una vigilancia adecuada de las condiciones críticas, como la baja densidad y el pH, que incrementan la sensibilidad del NA a la detonación. Como consecuencia,

se produjo una explosión que dejó cuatro personas fallecidas y dieciocho heridas. De forma análoga, el control manual de los componentes puede afectar el proceso, como se ejemplifica en [5], donde una fuga de 260,000 galones de gasolina provocó un incendio, debido a un error en la secuencia de activación de las válvulas por parte del operador en la transición del llenado a descarga del tanque.

Por lo tanto, se resalta la necesidad de un monitoreo continuo de las condiciones en la fabricación de sustancias que involucren el uso de amoníaco y un control preciso de los actuadores en los procesos industriales.

1.2 Descripción del problema

La fabricación de compuestos químicos exige un riguroso control sobre las variables físicas implicadas, debido a que fluctuaciones menores pueden modificar las propiedades del producto terminado, afectando su calidad y aplicabilidad [6]. En particular, la producción de hidróxido de amonio (descrita en detalle en la Sección 1.5.2), llevada a cabo por una empresa líder en la prestación de servicios para la industria de fluidos, se encuentra intrínsecamente condicionada al control estricto de variables como la temperatura y presión. Específicamente, la temperatura influye directamente en la solubilidad del compuesto, lo que puede limitar la correcta ejecución de la síntesis química, incrementar los niveles de desperdicio y, en consecuencia, generar una concentración de amonio en el producto final que no cumple con los requerimientos especificados en la orden solicitada.

En este escenario, se presentan dificultades operacionales dado que la variabilidad en la concentración de amonio, que define la calidad de la sustancia final, está vinculada en la habilidad y experiencia del personal operativo para regular las válvulas manualmente que ajustan la dosificación de reactivos. Como consecuencia, ocurren paros de producción asociados a

desviaciones de temperatura, extendiendo el tiempo de producción de 10 a 11 horas. Asimismo, se suelen registrar dos paros por sobrepresión, implementados con el fin de proteger la integridad estructural del tanque.

Por otro lado, considerando la naturaleza peligrosa de estas sustancias, la exposición tanto directa como prolongada de los operarios requiere de medidas especializadas para mitigar efectos adversos en su salud y garantizar la seguridad en el entorno laboral [7]. Específicamente, tener contacto con el hidróxido amónico provoca irritación las vías respiratorias y quemaduras, por lo que es necesario utilizar equipos de protección para su gestión [8].

1.3 Justificación del problema

En la actualidad, las industrias deben alinearse con las exigencias de sostenibilidad y responsabilidad ambiental, especialmente aquellas del sector químico, ya que manejan insumos peligrosos y contaminantes. Éticas como la reducción y uso eficiente de materias primas, implementación de estrategias responsables y la evaluación empresarial más allá de una perspectiva ambiental [9] y se alinean con el ODS 12 que busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En Ecuador, el marco legal promueve la sostenibilidad y el uso responsable de los recursos naturales y sustancias peligrosas, destacándose el Código Orgánico del Ambiente, donde el artículo 9 establece la responsabilidad integral en el manejo adecuado de productos tóxicos o peligrosos a lo largo de todo su ciclo de vida, abarcando desde su transporte y almacenamiento hasta su disposición final, garantizando que no generen riesgos para el ambiente ni para la salud. Complementariamente, el artículo 245 refuerza esta normativa al exigir a las personas naturales y jurídicas la prevención de la contaminación, la minimización de contaminantes y la reducción al máximo de emisiones dañinas, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y el desarrollo de sistemas que optimicen el uso eficiente de materiales. Estas

disposiciones consolidan un enfoque integral hacia la sostenibilidad y la protección ambiental en todas las actividades productivas [10].

En el caso del hidróxido amónico, sus vapores reaccionan con óxidos de nitrógeno y azufre presentes en la atmósfera formando partículas finas (PM2.5) [3], las cuales representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente. Además, cuando su disolución en agua excede ciertos límites de temperatura, se libera amoníaco anhidro como subproducto, el cual añade una carga adicional de contaminantes al aire y agua, agravando estos efectos negativos [11].

Finalmente, el proyecto debe tener la capacidad de parametrizar el sistema para diversas aplicaciones químicas, especialmente en la etapa de absorción o disolución en agua, ampliando significativamente la flexibilidad del proceso y permitiendo adaptarse rápidamente a diferentes demandas del mercado lo que implica beneficios financieros y operativos. Asimismo, esta estrategia promueve la innovación y representa un paso a la modernización industrial del país, incluso con sistemas relativamente sencillos, pero de precisión esencial. Esto contribuye al cumplimiento del ODS 9, que incentiva la innovación y el desarrollo de infraestructuras tecnológicas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar la modernización de un sistema de control de válvulas utilizado en la producción de hidróxido amónico, automatizando el accionamiento de los actuadores según condiciones de operación definidas por el personal de planta.

1.4.2 *Objetivos específicos*

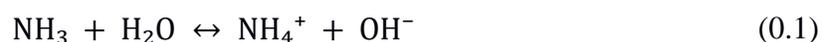
1. Desarrollar un algoritmo enfocado en la etapa de dilución de la sustancia química en función de un rango de temperatura con el propósito de parametrizar las variables claves en la producción.
2. Simular el controlador lógico para verificar el correcto funcionamiento de la secuencia programada y consideraciones necesarias.
3. Determinar los equipos y su costo para la modernización de un sistema de control manual de válvulas a uno automatizado, considerando la disponibilidad y facilidad de adquisición por parte de la empresa.

1.5 Marco teórico

1.5.1 *Hidróxido de amonio*

El hidróxido de amonio (NH_4OH) es un compuesto inorgánico que se presenta como un líquido incoloro con un olor penetrante característico del amoníaco. En cuanto a sus propiedades [11], posee una densidad de 0.9 g/cm y un punto de ebullición de 33 °C que evidencia su volatilidad. Además, clasifica como una base de naturaleza alcalina, debido que su nivel de pH comprende entre el rango de 10 - 11.

En la formulación química del licor de amoníaco mostrada en la ecuación (0.1), se establece un equilibrio químico entre los iones amonio (NH_4^+) y los iones hidróxido (OH^-), generado por la disolución del amoníaco gaseoso (NH_3) en agua (H_2O), lo que produce una reacción exotérmica [12]. Durante este proceso, es importante controlar la temperatura, dado que existe una relación inversa con la solubilidad del amoníaco en agua, lo que influye en eficiencia de la producción.



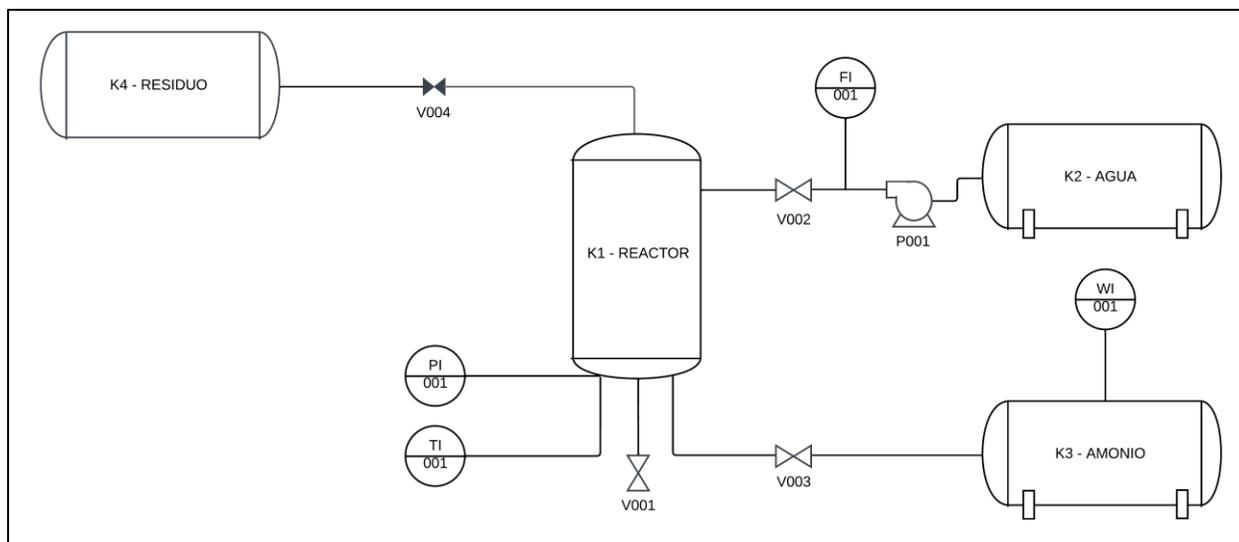
Con respecto a su aplicabilidad [3], participa en diversos sectores dado a sus distintas propiedades. En cuanto a la industria manufacturera, su capacidad para eliminar grasa y manchas, derivada de su naturaleza alcalina, lo convierte en un componente clave en la fabricación de productos de limpieza destinados tanto a aplicaciones domésticas como industriales. Específicamente en el sector textil, se utiliza como agente limpiador para la remoción de tintes residuales durante la fase de preparación de telas, proceso previo al teñido. Por otro lado, en la producción de medicamentos, cumple funciones clave como ajustador de pH, agente amortiguador y solubilizante, lo que mejora tanto la solubilidad como la biodisponibilidad de los fármacos. Además, se utiliza en la síntesis de ingredientes farmacéuticos activos (APIs) dada a su selectividad para reaccionar con ciertos compuestos; asimismo, se emplea en la producción de vacunas, donde inhibe la activación de virus y bacteria. En la industria agrícola, su aplicación abarca el uso como fertilizante líquido, favoreciendo el desarrollo saludable de los cultivos; formulación de herbicidas, fungicidas y pesticidas, ayudando a controlar los factores adversos que pueden poner en riesgo su crecimiento.

1.5.2 Producción de hidróxido amónico

La producción de hidróxido amónico, detallada en la Figura 0.1, se lleva a cabo en el reactor K1 mediante la disolución de agua y amoníaco, almacenados respectivamente en los depósitos K2 y K3. En este proceso, las cantidades de los materiales se determinan según el volumen total requerido y la concentración específica del producto final. Por otro lado, el transporte de los insumos se basa en el principio de presión diferencial, un concepto fundamental en mecánica de fluidos que establece que un fluido se desplaza de una región de mayor a menor presión, utilizando equipos adicionales o adecuaciones en el sistema [13].

Figura 0.1

P&ID del sistema de producción de hidróxido de amonio (original)



El procedimiento para la fabricación de hidróxido de amonio, llevado a cabo manualmente por los operadores, consta de diversas etapas, que se detallan a continuación:

- **Carga de agua:** En la primera etapa, el agua almacenada en el tanque K2 es transportada al reactor K1 utilizando una bomba que genera un diferencial de presión entre la succión y la descarga. Con la apertura de la válvula V002, el agua fluye al reactor hasta alcanzar el volumen especificado, indicado por el sensor de flujo FI-001.
- **Inyección de amoníaco:** Una vez completada la carga de agua, se introduce el amoníaco almacenado en el tanque K3, que opera a una presión de 140 psi. Al abrir la válvula V003, el amoníaco fluye hacia el reactor K1, cuya presión es ≤ 4 psi, gracias al diferencial de presión no es necesario equipos adicionales para la transferencia. Luego, la inyección se detiene cuando la báscula WI-001 registra el peso requerido. Finalmente, se mide la densidad del hidróxido amónico para asegurar la calidad requerida.

- **Manejo de residuos:** Cualquier amoníaco no disuelto en el agua es dirigido al tanque de residuos, asegurando que solo se retenga la mezcla homogénea en el reactor y disminuyendo la presión de este para así mantener un flujo estable.

Cabe mencionar que, durante la dosificación del amoníaco, se monitorean continuamente las variables de presión y temperatura para mantener condiciones óptimas que favorezcan la reacción química. Si se detectan desviaciones en estas variables, la inyección se pausa hasta que las condiciones vuelvan a ser adecuadas.

1.5.3 Atmósferas explosivas

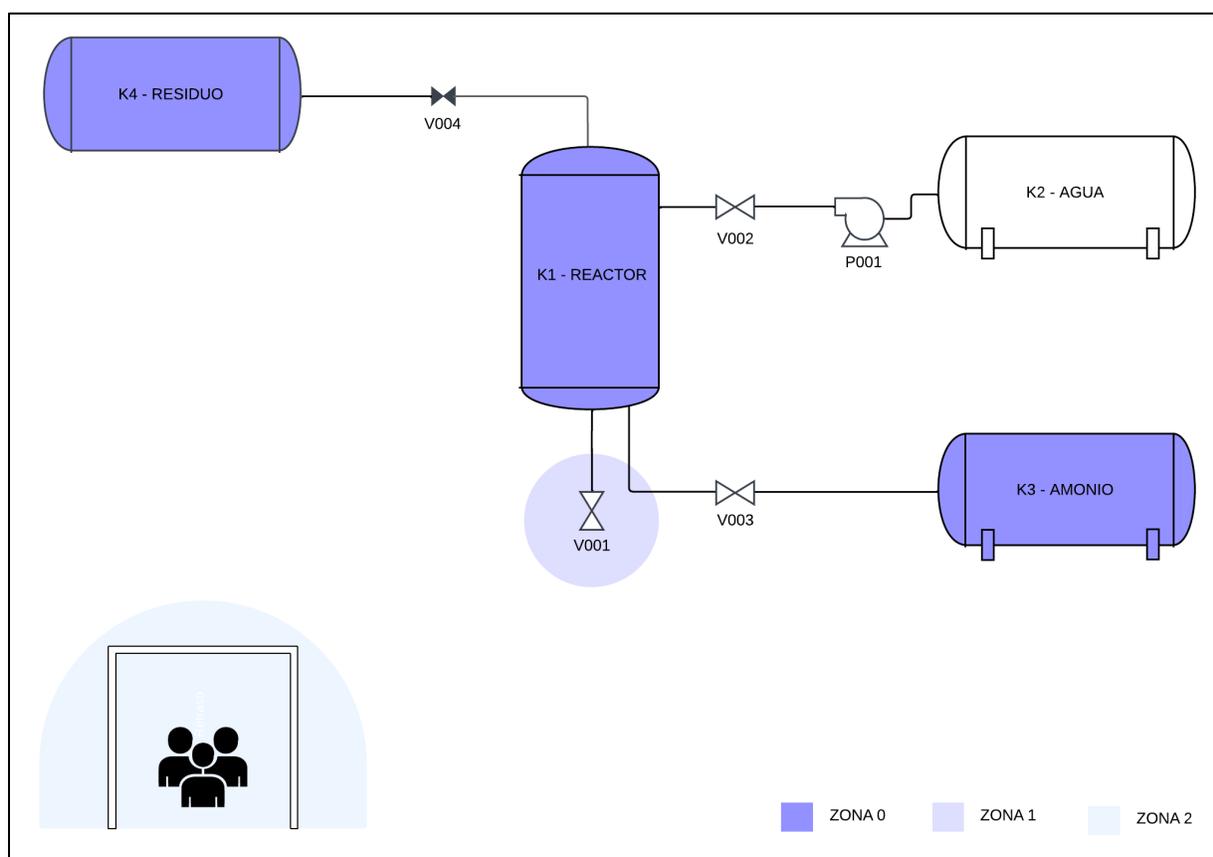
Las empresas deben evaluar la posible presencia de atmósferas explosivas, que pueden generarse por la mezcla de sustancias inflamables con el aire y que, en condiciones atmosféricas específicas, pueden propiciar una combustión. Para garantizar la seguridad en estos entornos, existen normativas específicas como la directiva ATEX (Atmósferas Explosivas) de la Unión Europea, que establece los requisitos de seguridad para los equipos y sistemas utilizados, asegurando que cumplan con los estándares necesarios para minimizar los riesgos de ignición [14]. En este contexto, la instrumentación a prueba de explosiones, certificada y con carcasas robustas, evita que chispas o calor interno actúen como fuentes de ignición en ambientes con gases, polvos o vapores inflamables. Dichos dispositivos son cruciales en sectores como la petroquímica, minería, farmacéutica y química, donde se controlan variables críticas como temperatura, presión, nivel y flujo, e incluyen equipos de mando [15].

Por otro lado, se clasifica las zonas con atmósferas explosivas en tres categorías, según la probabilidad de presencia de una mezcla de aire y sustancias inflamables. De esta manera, la zona 0 corresponde a aquellos espacios donde dicha mezcla está presente de forma continua o durante períodos prolongados, en cambio, la zona 1 incluye áreas donde la mezcla puede formarse durante

las operaciones normales y la zona 2 se refiere a lugares donde la presencia de la mezcla explosiva es poco probable y, en caso de ocurrir, su duración sería breve [14]. En la Figura 0.2, se ilustra un ejemplo de la clasificación de las zonas 0 a 2 en una planta química con tanques de almacenamiento, espacios de conexión/desconexión de mangueras, y áreas de producciones de soluciones respectivamente.

Figura 0.2

Clasificación de zonas según la Norma ATEX



1.5.4 Estado del arte

Dentro del ámbito de la automatización de procesos industriales en el sector químico, particularmente en aquellos que implican la operación de tanques reactores, se emplean sistemas avanzados de control mediante el uso de Controladores Lógicos Programables (PLC). Por ejemplo, en [16] se describe el uso de un PLC Siemens S7-300 para el control de válvulas, sensores y actuadores, facilitando la regulación del flujo de sustancias químicas hacia los tanques reactores mediante el monitoreo continuo de la temperatura, presión y flujo. Además, se diseña para operar en entornos clasificados como zonas explosivas.

En la presente tesis, se mantiene el principio básico de automatización, pero con un valor agregado en términos de la parametrización de las variables fundamentales para el monitoreo del proceso. Se establece una definición precisa de los límites operativos para cada variable, con el objetivo de mejorar el control del sistema. Asimismo, se plantea el cálculo del flujo másico requerido en función de los datos de producción obtenidos, buscando optimizar la eficiencia operativa del proceso. A diferencia de los sistemas convencionales, que se centran en el monitoreo pasivo de variables, este enfoque propone una automatización activa, que integra la toma de decisiones basada en datos específicos de producción.

Capítulo 2

2.1 Metodología

A continuación, se presenta a detalle el desarrollo del diseño de un sistema para la producción de hidróxido amónico, considerando la integración de sensores, actuadores y sistemas de control para asegurar el cumplimiento de las necesidades específicas del proceso.

2.2 Definición de requerimientos

La empresa estableció que el proceso de producción de amoníaco depende de un control preciso de variables críticas como el flujo, la presión y la temperatura dado que influyen directamente en la eficiencia de la reacción y la calidad del producto final. Además, se destacó la necesidad de garantizar la seguridad en el entorno de trabajo debido a la manipulación de sustancias químicas peligrosas, por lo que se requiere que la instrumentación cumpla con las normativas ATEX para prevenir riesgos. Con base en estos requisitos y considerando el proceso a partir de la configuración inicial del flujo de agua, se detallan a continuación los requerimientos técnicos y no técnicos necesarios para asegurar la operación eficiente y segura del sistema.

Requerimientos técnicos:

- **Monitoreo de sustancias:** Totalizar las cantidades de agua y amoníaco utilizadas.
- **Control de temperatura y presión:** Garantizar un control preciso de estas variables críticas en el tanque reactor.
- **Configuración:** Permitir ajustar la concentración de amonio deseada en el producto final.
- **Cumplimiento de la normativa:** La instrumentación debe cumplir con la normativa ATEX para asegurar la seguridad en la manipulación de sustancias peligrosas.

Requerimientos No Técnicos

- **Intuitividad:** El sistema debe ser fácil de usar para los trabajadores, es decir que sea interpretable sin la necesidad de tener un conocimiento a fondo del tema.
- **Disponibilidad de componentes:** Los componentes deben ser fácilmente adquiribles, con énfasis en minimizar el impacto financiero del proyecto.

2.3 Alternativas de solución

Con el propósito de resolver la problemática planteada en la sección 1.2, se detallan las siguientes alternativas de sistemas a considerar como solución:

Sistema con válvulas remotas e inteligentes: El sistema permite a los operadores controlar la inyección de agua y amoníaco desde un centro de comando. Además, las válvulas inteligentes pueden detener automáticamente la inyección de amoníaco en caso de anomalías en la temperatura o presión, ya que están equipadas con sensores que permiten establecer límites para estos parámetros. En este escenario, se emplean los sensores ya integrados en el proceso (WI-001 y FI-001), los cuales son indicadores para que los operadores detengan la inyección de acuerdo con las condiciones requeridas.

Proceso automatizado con un controlador lógico programable (PLC): Un algoritmo ejecutado por el PLC controla de manera automática las válvulas, en función de las señales provenientes de los sensores de presión, temperatura y flujo. Dichos parámetros, son digitados y monitoreados a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI), que facilita su visualización y permite un control remoto eficiente. Además, se integran sensores y válvulas adicionales compatibles con el PLC, garantizando un control adecuado del proceso y la correcta interoperabilidad de todos los dispositivos involucrados.

Control predictivo con Machine Learning: Una computadora central ejecuta un sistema basado en Machine Learning, que crea un modelo del comportamiento de la planta en función de los datos de los sensores y los requisitos de producción. Dicho modelo permite monitorear en tiempo real la temperatura, presión y flujo, y predecir posibles fallos. Cuando el sistema detecta una anomalía, envía señales a los controladores para detener automáticamente el proceso.

2.4 Selección de solución

En cuanto a los criterios de evaluación de las alternativas (Tabla 0.1) se definieron considerando tanto las necesidades actuales del sistema y las perspectivas a futuro, tales como la facilidad de implementación, el impacto en la eficiencia operativa y la viabilidad económica. Cada parámetro posee un peso en una escala de 1 a 5, donde 5 indica la máxima relevancia.

Tabla 0.1*Crterios de evaluación para las alternativas de solución*

Criterio	Peso	Descripción
Control de variables	5	Evalúa la capacidad del sistema para detectar y responder de manera efectiva a cambios en parámetros críticos, como temperatura, presión y flujo.
Facilidad de uso	4	Se refiere a la facilidad con que los operadores pueden utilizar el sistema sin necesidad de una capacitación extensa.
Costo	3	Representa la optimización en la inversión inicial necesaria, que abarca equipos de instrumentación, software y los costos relacionados con la programación e instalación.
Mantenimiento	3	Describe la facilidad del mantenimiento requerido considerando la frecuencia con que debe realizarse para garantizar su funcionamiento óptimo.
Interoperabilidad	2	Mide la capacidad del sistema para integrarse y comunicarse eficientemente con las tecnologías y dispositivos existentes
Flexibilidad	2	Indica la habilidad del sistema para adaptarse a cambios en el proceso y permitir la incorporación de nuevas líneas de producción, como más tanques.

Según los criterios establecidos, como se muestra en la Tabla 0.2, el sistema de válvulas remotas e inteligentes destaca por su facilidad de operación, ya que, una vez configurado, el operador solo debe activar las válvulas mediante botones, además, tiene un costo reducido debido a la simplicidad tecnológica y su mantenimiento es accesible para personal con conocimientos básicos en electrónica. En contraste, el control predictivo basado en Machine Learning presenta limitaciones debido a su alta complejidad en términos de operación, configuración, mantenimiento y adaptación a sistemas heterogéneos.

En comparación, el sistema automatizado con un controlador lógico programable se destaca por su capacidad superior en el control de variables, gracias a su procesamiento rápido e integración de múltiples sensores que permiten detectar y responder a anomalías de manera eficiente. Además, su compatibilidad con diversos protocolos de comunicación y la disponibilidad de módulos de expansión garantizan una integración versátil y escalable. También, el mantenimiento requiere revisiones periódicas del hardware y monitoreo de la lógica del programa, sin necesidad de intervenciones frecuentes. Aunque el costo inicial es elevado, estas características lo posicionan como la mejor opción en términos de desempeño y adaptabilidad. Por lo tanto, el proceso automatizado con un PLC cumple de manera óptima con los criterios establecidos y se selecciona como la solución escogida.

Tabla 0.2*Matriz de decisión para las alternativas de solución*

Criterio	Control de variables	Facilidad de uso	Costo	Mantenimiento	Interoperabilidad	Flexibilidad	Total Puntaje	Total Puntaje Ponderado
Peso	5	4	3	3	2	2		
Sistema con válvulas remotas e inteligentes	1	3	3	3	1	1	12	39
Proceso automatizado con un controlador lógico programable	3	3	1	2	3	3	16	48
Control predictivo con Machine Learning	2	1	3	1	1	2	11	32

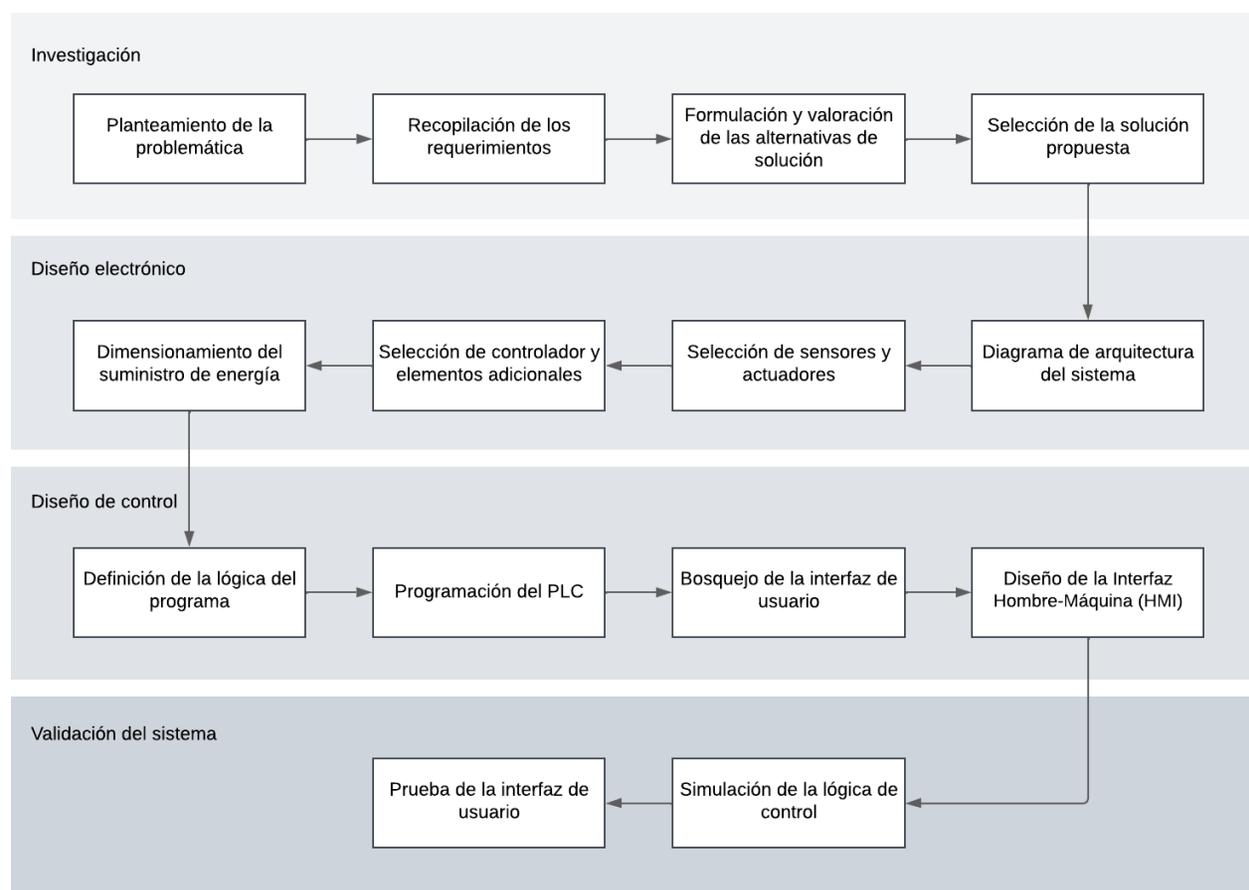
Nota. Cada parámetro se evalúa con un puntaje de 1 a 3, donde 3 indica que la característica cumple al máximo con los requisitos establecidos.

2.5 Proceso de diseño

El diagrama presentado en la Figura 0.1 representa un flujo de desarrollo técnico dividido en cuatro etapas principales: investigación, diseño electrónico, diseño de control y validación del sistema.

Figura 0.1

Proceso de diseño



En la fase de investigación, se inició con el planteamiento del problema, identificando las deficiencias en el sistema actual de producción de hidróxido de amonio que requerían solución. Posteriormente, se recopilaban los requerimientos técnicos y no técnicos a través de un levantamiento de información proporcionado por la empresa, lo que permitió comprender con

claridad las necesidades del cliente y las limitaciones existentes. Luego, se formularon diversas alternativas de solución, evaluando su viabilidad técnica y económica, para seleccionar la opción más adecuada.

Dentro del diseño electrónico, se elaboró un diagrama de la arquitectura del sistema para identificar los componentes necesarios y sus interrelaciones. Con los elementos definidos, se analizaron las distintas opciones disponibles en cada categoría: sensores, actuadores y controladores para seleccionar aquellos que cumplieran mejor las necesidades. Adicionalmente, se definió el suministro de energía requerido.

Por otro lado, en el diseño de control, se definió la lógica del algoritmo para programar el PLC, detallando las etapas del proceso, junto con las reglas y condiciones necesarias para que el sistema opere correctamente. Simultáneamente, se diseñó la Interfaz Hombre-Máquina, facilitando a los operadores un control sencillo.

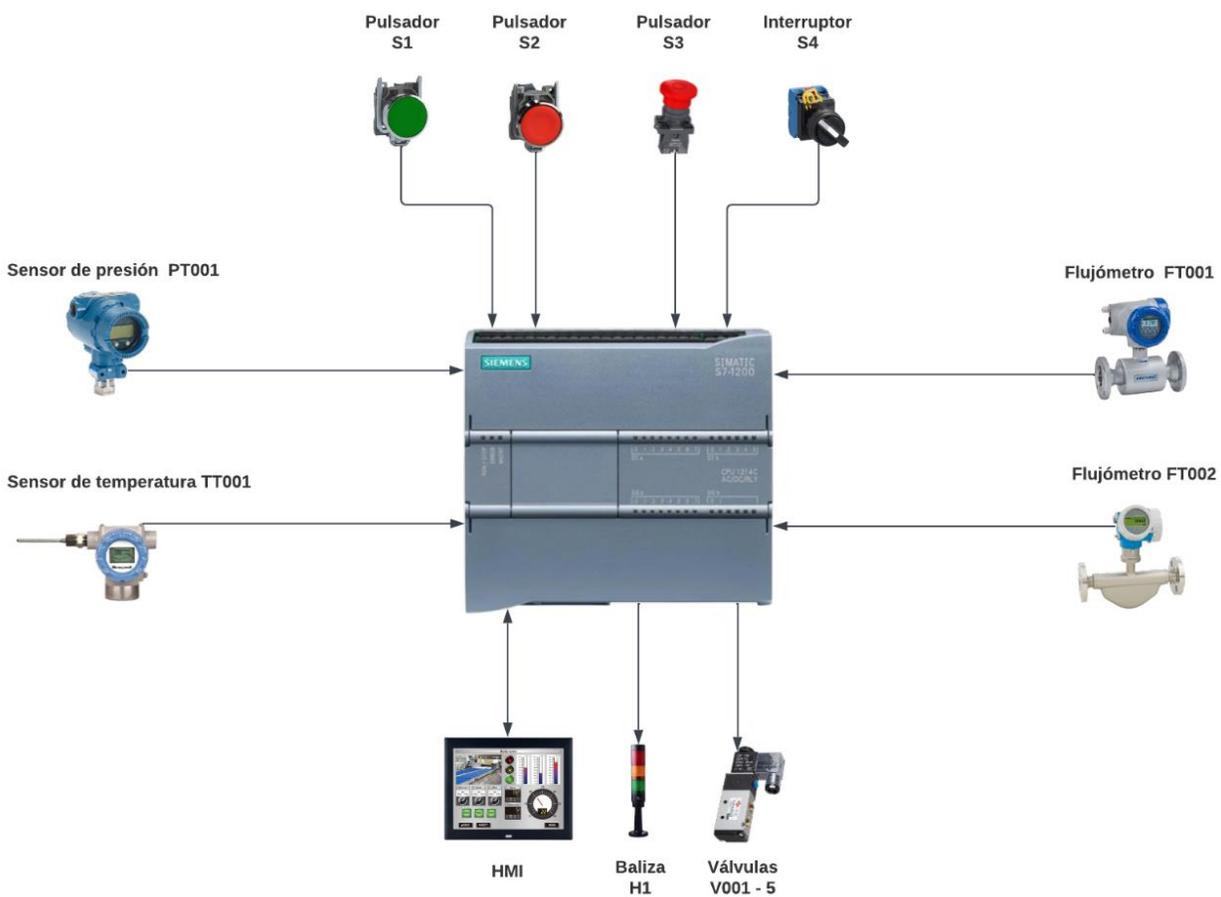
Finalmente, en la validación del sistema, se simuló la lógica de control para verificar su correcto funcionamiento. Dicha prueba incluyó la interacción con la interfaz de usuario, asegurando que el sistema operara de manera adecuada y que la interfaz fuera comprensible para los trabajadores.

2.6 Diagrama de arquitectura del sistema

Con respecto a la arquitectura descrita en la Figura 0.2, el PLC constituye el núcleo del sistema automatizado que recibe señales provenientes de los sensores y controles de mando para procesarlas mediante su código interno, activando así las salidas correspondientes.

Entre los sensores integrados en el sistema se encuentran los caudalímetros FT001 y FT002, encargados de medir el flujo de agua y amonio, respectivamente. Además, un transmisor de presión y otro de temperatura monitorean las variables críticas en el tanque reactor. Por otro lado, los actuadores incluyen las válvulas V001 a V005, cuya operación permite el control del flujo de agua, amonio y solución de hidróxido de amonio a través del sistema.

Complementando el control del proceso, se dispone de pulsadores para las funciones de inicio S1, pausa S2 y parada S3, un interruptor S4 para la selección del modo operativo, y una HMI que facilita la introducción de datos y parámetros al sistema.

Figura 0.2*Diagrama de arquitectura del sistema*

2.7 Diseño electrónico

A continuación se detalla la selección, dimensionamiento y cálculos necesarios para los dispositivos electrónicos del sistema.

2.7.1 Selección de controlador

Un Controlador Lógico Programable es un dispositivo electrónico que integra una Unidad Central de Procesamiento (CPU) y memoria para almacenar programas específicos, los cuales ejecutan instrucciones lógicas y operaciones aritméticas, permitiendo procesar datos en tiempo real para gestionar entradas y salidas con precisión y, de esta manera, facilitar el control y la automatización de sistemas industriales. En un entorno de producción, las entradas corresponden generalmente a sensores, mientras que las salidas regulan actuadores, lo que permite que la lógica del programa controle secuencias de operación basadas en condiciones predeterminadas, convirtiendo al PLC en un componente esencial para la automatización, especialmente en líneas de producción [17].

Entre las marcas más utilizadas se encuentran Siemens, Allen-Bradley (Rockwell Automation), Mitsubishi Electric, Schneider Electric y Omron, cada una ofrece una amplia gama de modelos adaptados a diferentes necesidades industriales, así como su propio entorno de programación especializado, como el TIA Portal para Siemens. En esta marca, los PLC s7-1500, s7-1200 y LOGO! representan la gama alta, media, y baja respectivamente tomando en consideración su capacidad de procesamiento, manejo de entradas y salidas, protocolos de comunicación incorporados y costo como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 0.3

Comparación técnica de controladores de diferentes gamas, marca SIEMENS

PLC	LOGO!	S7-1212C	S7-1214C	S7-1500
	12/24 RCE	AC/DC/RLY	DC/DC/DC	
Alimentación	24 VDC	120-240 VAC	24 VDC	24 VDC
Memoria de trabajo	512 B	75 KB	100 KB	175 KB
Memoria de datos	2 KB	1 MB	4 MB	1 MB
				24 DI
	8 DI	8 DI	14 DI	16 DO
I/O integrados	4 DO RLY	6 DO RLY	10 DO	4AI
	4 AI	2 AI	2 AI	1AI para RTD 2AO
Contadores rápidos	4@5kHz	3@30kHz 3@100kHz	3@30kHz 3@100kHz	6@100kHz
Capacidad de ampliación	24 DI 20 DO 8 AI 8 AO	1 signal board 2 módulos de señal 3 módulos de comunicación	1 signal board 8 módulos de señal 3 módulos de comunicación	32 módulos de señal 32 módulos de comunicación
Costo [USD]	251.00	623.00	943.00	3685.00

Nota. Datos técnicos obtenidos del catálogo de SIEMENS, [18, pp. 173, 178,189]

Los aspectos bajo los cuales se comparan los dispositivos PLC de las diferentes gamas de SIEMENS (Tabla 0.4) son:

- **Complejidad:** Capacidad de procesamiento del PLC, su habilidad de ejecutar secuencias complejas de código como operaciones aritméticas avanzadas, lazos PID y tiempos de ejecución del programa

- **Cantidad de I/O:** Cantidad de entradas y salidas tanto integradas en el dispositivo como posibles de adicionar por módulos de expansión. En este punto no se consideran periféricas descentralizadas como método para aumentar el número.
- **Comunicación:** Número de protocolos de comunicación integrados (como Modbus TCP/IP) y capaces de integrar con módulos de comunicación de campo, comunicación inalámbrica, etc.
- **Escalabilidad:** Flexibilidad para adaptarse a nuevos cambios, e integraciones de nuevas tecnologías

Tabla 0.4*Crterios de selección para controladores*

Peso	Criterio	Rango de importancia	% de decisión
3.00	Cantidad de I/O	1	23.08
2.00	Escalabilidad	2	11.54
3.00	Complejidad	3	19.23
2.00	Costo	4	15.38
1.00	Comunicación	5	15.38
11.00		Total	100.0

Según la Tabla 2.5, que presenta la matriz de decisión sobre los controladores lógicos programables, el dispositivo más adecuado para el proceso es el S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC. Debido a que destaca por su capacidad para aplicaciones de complejidad media y alta, así como por la cantidad de entradas y salidas, tanto integradas como adicionales mediante módulos de expansión. Además, ofrece protocolos de comunicación compatibles para la integración con otros sistemas, escalabilidad para futuras expansiones y un costo competitivo.

Dada la disponibilidad de entradas y salidas digitales, es posible emplear las proporcionadas por el medidor. No obstante, se ha decidido integrar un módulo adicional de 4 entradas analógicas para corriente y voltaje, debido a que, por razones de distancia, los sensores de temperatura y presión requieren señales de 4 a 20 miliamperios para garantizar una medición estable.

Tabla 0.5

Matriz de decisión para la selección de controladores

Criterio	Cantidad de I/O	Escalabilidad	Complejidad	Costo	Comunicación	Total sin peso	Total con peso	Prioridad
Peso	3	2	3	2	1			
LOGO!	1	2	1	5	1	10	21	4
1212C	2	3	2	4	3	14	29	3
1214C	4	3	3	3	3	16	36	1
1511-1PN	5	4	5	1	4	19	44	2

2.7.2 Selección de HMI

Los dispositivos HMI (interfaz humano máquina) permiten conectar en tiempo real al operador con los instrumentos y procesos productivos industriales en planta en un solo lugar y de forma remota, permitiendo supervisión y control eficientes. Diversas funcionalidades, como el uso de alarmas, animaciones, gráficos y scripts vuelven a las pantallas en interfaces altamente personalizables. Su versatilidad se manifiesta en una amplia gama de aplicaciones, desde la manufactura hasta la energía, donde optimizan la producción, reducen errores humanos y mejoran

la seguridad [19]. Estas características y funcionalidades son comparadas en la Tabla 2.6 bajo dos dispositivos de gamas diferentes.

Tabla 0.6

Comparación técnica de HMI de diferentes gamas, marca SIEMENS

	KTP700 Basic Panel	TP700 Comfort panel
Elementos de mando	Pantalla táctil y 8 teclas	Pantalla táctil
Memoria	10 MB	12 MB y Tarjeta SD/ USB
VARIABLES / Pantallas	800 / 250	2048 / 500
Comunicación	1xProfinet/Industrial Ethernet	2xProfinet/Industrial Ethernet Profibus DP/MPI
Costo [USD]	1683.00	3136.00

Nota. Datos técnicos obtenidos del catálogo de SIEMENS, [18, pp. 198,199]

Los aspectos bajo los cuales se comparan las interfaces HMI (Tabla 2.7) son:

- **Costo:** Valor del producto, y licencias necesarias para configurar y comisionar el dispositivo.
- **Facilidad de uso:** Conocimientos técnicos requeridos para diseñar proyectos con el dispositivo, y facilidad que tendrá el operador para manejar este.
- **Funcionalidad:** Número de elementos adicionales como gráficos interactivos, lector de PDF, gráficas de tendencia, entre otros, los cuales aportan información al usuario en tiempo real volviendo al proceso más eficiente.
- **Escalabilidad:** Capacidad de integrarse en otros sistemas contando con los recursos computacionales necesarios, e interfaces de comunicación utilizadas en la industria.

Tabla 0.7*Criterios de selección para HMI*

Peso	Criterio	Rango de importancia	% de decisión
3.00	Costo	1	42.86
2.00	Facilidad de uso	2	28.57
1.00	Funcionalidad	3	14.29
1.00	Escalabilidad	4	14.29
7.00		Total	100.00

De acuerdo con la evaluación de la Tabla 0.8, el dispositivo idóneo para la solución escogida es la HMI Basic Panel KTP700 ya que cumple con los requisitos del cliente y, pese a tener menos funcionalidades que el modelo Comfort, ofrece un costo significativamente menor, manteniendo la misma facilidad de uso.

Tabla 0.8*Matriz de decisión para la selección de HMI*

Criterio	Costo	Funcionalidad	Escalabilidad	Facilidad de uso	Total sin peso	Total con peso	Prioridad
Peso	3	2	1	1			
Basic panel KTP700	4	1	2	3	10	19	1
Comfort panel TP700	1	3	4	3	11	16	2

2.7.3 Selección de flujómetros

En el ámbito de fabricación de sustancias, resulta imperativo implementar un sistema riguroso de monitoreo que determine con precisión la cantidad de los componentes utilizados a lo largo del proceso productivo, incluyendo tanto los insumos como el producto terminado. Por ello, se emplean distintos medidores de flujo, responsables de cuantificar con precisión y continuidad el volumen o la masa de fluidos que circulan por sistemas de transporte.

Existen diversos tipos de acuerdo con su principio de funcionamiento [20]:

- Electromagnéticos: Basados en la Ley de Faraday, estos dispositivos operan mediante la inducción de un voltaje en un conductor al pasar por un campo magnético; en este contexto, el líquido actúa como el conductor, generando un voltaje proporcional al flujo del sistema. Rodea los 450 USD.
- Turbina: Incorpora un rotor que gira al ser atravesado por el fluido, con una velocidad de rotación proporcional al flujo. Este movimiento permite que el rotor refleje con precisión el caudal del sistema. Rodea los 200 USD.
- Ultrasónicos: Emplean ondas ultrasónicas para medir el flujo, detectando variaciones en frecuencia de las ondas a medida que atraviesan el fluido, permitiendo calcular el volumen de flujo sin contacto directo. Rodea los 500 USD.
- Coriolis: Se basa en un tubo vibrante que, al ser atravesado por el fluido, experimenta cambios en frecuencia, fase o amplitud. Esta señal se procesa electrónicamente para obtener un valor preciso de flujo másico. Rodea los 2300 USD.
- Presión diferencial: Mide la diferencia de presión antes y después de que el fluido pase a través de un componente que introduce resistencia. Rodea los 300 USD.

- **Desplazamiento positivo:** Cuantifica el flujo mediante un componente rotatorio que divide el líquido en volúmenes específicos. Al contabilizar las rotaciones del componente, se determina el caudal total del fluido en el sistema. Rodea los 1400 USD.

Los precios mencionados fueron obtenidos de Alibaba [21] como referencia en diciembre del 2024, sin incluir impuestos, aranceles y costos de envío. Por otro lado, los parámetros con los que se compararon estos flujómetros (Tabla 2.9) son:

- **Precisión:** Cercanía de la medición del flujómetro al valor real transportado por la tubería, factor crítico para detectar desperdicios, fugas, y comprobación de inventario. Para mantener la precisión es imperativo realizar las respectivas calibraciones de los medidores según las recomendaciones del fabricante.
- **Condiciones de proceso:** Factores que afectan el rendimiento y vida útil del medidor, tales como viscosidad, temperatura, presión, y caudal del fluido. Debido a esto, se debe hacer una correcta selección del equipo según los requerimientos en el sistema donde se instalará.
- **Pérdida de carga:** Reducción de presión en la línea causada directamente por el medidor. Los medidores con partes móviles representan una mayor pérdida de carga, mientras aquellos con mediciones indirectas tienen baja o nula pérdida.
- **Costo:** Inversión monetaria que representa el costo del medidor con sus respectivos transmisores para interpretar los datos, y la instalación correspondiente. El costo variará dependiendo del material seleccionado y requerimientos especiales tales como el cumplimiento de certificaciones anti-explosivas.

Tabla 0.9*Criterios de selección para flujómetros*

Peso	Criterio	Rango de importancia	% de decisión
3.00	Precisión	1	23.08
1.50	Condiciones de proceso	2	11.54
2.00	Costo	3	19.23
1.00	Pérdida de carga	4	15.38
7.50		Total	100.00

De acuerdo con la Tabla 2.10, se selecciona el medidor de flujo Coriolis para la medición del amoniaco debido a su alta precisión, baja caída de presión, la medición en línea de la densidad, y medición de flujo y totalizador másico, a pesar de tener un costo elevado y requerir de una instalación precisa para que estos no se encuentren tensados ni sufran de vibraciones externas. En cambio, para la medición de agua se ha seleccionado un medidor de turbina, debido a su coste reducido, precisión intermedia y facilidad de instalación. Adicionalmente, considerando que el fluido en cuestión es agua, el totalizador volumétrico puede ser representado de manera másica, dado que 1 litro de agua tiene una equivalencia de 1 kilogramo.

Tabla 0.10*Matriz de decisión para la selección de flujómetros*

Criterio	Precisión	Condiciones de proceso	Costo	Pérdida de carga	Total sin peso	Total con peso	Prioridad
Peso	3	1.5	2	1			
Coriolis	5	4	2	4	15	29	1
Turbina	2	2	5	2	11	21	3
Ultrasónico	4	3	4	4	15	28.5	2

Nota. 5 mayor puntuación, 1 menor puntuación

2.7.4 Selección de válvulas

Las válvulas industriales, componentes cruciales en los sistemas de fluidos cuyo objetivo principal es dar paso, detener, o modular el caudal en una tubería, se clasifican principalmente por sus actuadores. Estos dispositivos, que pueden ser accionados manual, neumática, hidráulica o eléctricamente, determinan la velocidad, precisión y seguridad con la que una válvula controla el flujo de un fluido.

La elección del actuador adecuado depende de diversos factores, entre ellos las condiciones operativas, la naturaleza del fluido, los requerimientos de seguridad y los costos asociados. En entornos con riesgo de explosión, por ejemplo, las válvulas neumáticas o solenoides con certificación antideflagrante son obligatorias para garantizar la integridad del personal y las instalaciones. Adicionalmente, estos actuadores pueden ser accionados remotamente por un

sistema automatizado para el control de flujo en la tubería bajo condiciones de temperatura y presión en un proceso industrial. Los tipos de actuadores de válvulas son [22]:

- **Actuador neumático:** Válvulas cuyo accionamiento depende de aire comprimido para mover el mecanismo que permite el paso de flujo, y los más comunes son de cilindro o pistón, y de membrana. La fuerza y velocidad con la que se abre o cierra la válvula depende de la presión del suministro de aire comprimido. En el entorno industrial, son válvulas bastante reconocidas debido a que gran parte de las fábricas tienen líneas de aire comprimido dispuestas a lo largo de la planta. Rodea los 30 USD.
- **Actuador hidráulico:** Para la apertura y cerrado del cuerpo de válvula se utilizan fluidos presurizados como aceite hidráulico, por lo que las partes móviles se encuentran en constante lubricación disminuyendo desgaste. Estos actuadores son más utilizados en aplicaciones donde se requiera aplicar una fuerza significativa tales como maquinaria pesada o procesos industriales a gran escala. Rodea los 200 USD.
- **Actuador eléctrico:** Este utiliza un motor eléctrico para dirigir el movimiento de la válvula lo cual permite un control preciso de posicionamiento y apertura de esta. Estos actuadores son ideales para aplicaciones que requieran ajustes finos en el flujo de una tubería, pero tienden a tener una operación más lenta comparados con neumáticos o hidráulicos. Rodea los 75 USD.
- **Actuada por solenoide:** A través de un solenoide y un vástago se controla la posición de la válvula, ideal para sistemas que requieran la apertura y cerrado de válvulas rápidamente y de forma no tan precisa, con un funcionamiento simple. En caso de atmósferas explosivas, deben utilizarse actuadores certificados para asegurar la integridad del personal. Rodea los 37 USD.

Precios obtenidos de Alibaba [21] como referencia en diciembre del 2024, sin incluir impuestos, aranceles y costos de envío.

A continuación, criterios para comparar diferentes tipos de actuadores (Tabla 2.11):

- **Seguridad:** Fiabilidad del actuador para prevenir fugas o cierres incompletos, y las consecuencias que pueden traer estos. Los actuadores neumáticos suelen ofrecer menor riesgo debido a la naturaleza no inflamable del aire comprimido.
- **Velocidad:** Tiempo requerido para abrir o cerrar completamente una válvula, es crítico en aplicaciones industriales. Este factor, está directamente relacionado con la potencia del actuador.
- **Costo:** Además del costo inicial de adquisición e instalación, se deben considerar los costos de operación, mantenimiento y reemplazo del actuador o cuerpo de válvula. El costo podría verse reducido por sistemas que ya funcionan en la planta como puede ser un circuito de aire comprimido o un banco hidráulico.
- **Mantenimiento:** Frecuencia y complejidad del mantenimiento, los cuales varían según el actuador. Estos procedimientos consideran cambio o limpieza de filtros, o sistemas lubricantes.
- **Capacidad de carga:** Fuerza que el actuador debe ejercer sobre la válvula dependiendo del diámetro de tubería, viscosidad del fluido y presión de operación. Los actuadores hidráulicos son capaces de generar fuerzas más elevadas que otros.

Tabla 0.11*Criterios de selección para válvulas actuadas*

Peso	Criterio	Rango de importancia	% de decisión
3.00	Seguridad	1	23.08
1.50	Velocidad	2	11.54
2.00	Costo	3	19.23
2.00	Mantenimiento	4	15.38
2.00	Carga	5	15.38
1.50	Precisión	6	15.38
12.00		Total	100.00

Los actuadores más comunes para la solución planteada son neumáticos, hidráulicos y por solenoide debido al cumplimiento de normativas ATEX mencionado. Tras evaluar las opciones disponibles y considerando los factores de costo, mantenimiento y complejidad de la aplicación, se ha determinado que las válvulas on/off son la solución más viable. La simplicidad de estas válvulas, junto con los costos asociados en contraste a la implementación de válvulas proporcionales, justifican esta elección. Para esta aplicación se prioriza la seguridad y velocidad como se detalla en la Tabla 2.12, teniendo como resultado la mejor opción las válvulas neumáticas dado que en entornos explosivos la fuga de aire comprimido no representa un peligro de ignición, y su velocidad depende de la presión del aire comprimido suministrado.

Tabla 0.12*Matriz de decisión para la selección de válvulas actuadas*

Criterio	Costo	Velocidad	Seguridad	Mantenimiento	Capacidad de carga	Total sin peso	Total con peso	Prioridad
Peso	2	1.5	3	2	2			
Actuador neumático	5	3	5	4	3	20	43.5	1
Actuador hidráulico	2	4	3	2	5	16	33.0	3
Actuada por solenoide	4	5	2	3	4	18	35.5	2

Nota. 5 mayor puntuación, 1 menor puntuación

2.7.5 Selección de elementos adicionales

Además de los equipos seleccionados utilizando las matrices de decisión, la Tabla 2.13 describe los elementos a considerar para el correcto funcionamiento del sistema de automatización.

Tabla 0.13*Equipos adicionales utilizados por el sistema*

Dispositivo	Descripción
Transmisor de temperatura	Transmisor de temperatura con sensor RTD explosion-proof, salida analógica de 4~20 mA.
Transmisor de presión	Transmisor de presión piezoeléctrico explosion-proof, salida analógica de 4~20 mA.
UPS 840W	Suministro de alimentación ininterrumpida, para energizar la fuente a 24 VDC y mantener el sistema funcionando por un tiempo limitado en bajones de energía.
Disyuntores o MCB	Dispositivos de protección para los circuitos DC y AC, dimensionados según aquel que se vaya a conectar
Relés de interfaz x5	Relés intermedios entre las salidas DC del PLC y las válvulas direccionales accionadas por solenoides, para aislar ambas partes.
Relé de alimentación 120VAC	Relé utilizado para indicar al PLC si el sistema se encuentra alimentado por la acometida de la planta, o por el UPS. Es utilizado para impedir el funcionamiento del sistema en caso de cortes energéticos.
Botonera verde para Marcha	Pulsador verde con un contacto normalmente abierto (N.O.).
Botonera roja para Pausa	Pulsador rojo con un contacto normalmente abierto (N.O.).

Selector modo de funcionamiento	Selector 2 posiciones con un contacto normalmente abierto (N.O.).
Hongo rojo de paro de emergencia	Hongo con enclavamiento color rojo, con un contacto normalmente cerrado (N.C.).
Baliza	Dispositivo de señalización visual para indicar a los operadores el estado en el que se encuentra el sistema.
Ventilador x2	Dispositivos que proveen de ventilación forzada al tablero de control.
Luz LED para panel	Luz encendida al abrir el tablero, para tener iluminación en operaciones como puestas en marcha y mantenimientos.
Válvula direccional actuada por solenoide x5	Válvula direccional 5 puertos 2 estados actuada por solenoide internamente pilotada, para accionar las válvulas con actuador neumático.
Válvula con actuador neumático x5	Válvula de asiento inclinado, con actuador neumático 2 puertos para permitir el paso de flujo o amoniaco.

2.7.6 Dimensionamiento de suministro de energía

Primero, se debe calcular el consumo general y los elementos de protección necesarios para el tablero de control. Debido a la selección de equipos, la alimentación del PLC, HMI, transmisores de flujo, temperatura, y presión, y válvulas direccionales accionadas por solenoide es de 24 VDC, por lo que se debe encontrar el consumo de todos los equipos para dimensionar la salida en amperios de la fuente DC.

De acuerdo con los cálculos presentados en la Tabla 0.14, la demanda máxima de corriente continua del sistema es de 4.69 A @ 24 VDC. Para garantizar un margen de operación y permitir la incorporación de futuros dispositivos, se ha seleccionado una fuente de alimentación SITOP de 10 A. Esta fuente, que opera a 120 VAC y consume 4.4 A, suministrará la energía necesaria para todos los componentes del circuito de control. Dado el bajo consumo de corriente continua, se ha determinado que un cable AWG#18 con aislamiento TFN es adecuado para esta aplicación, ya que soporta hasta 10 A de corriente nominal. Adicionalmente, se considera también la alimentación de corriente alterna de la acometida.

Tabla 0.14

Tabla de consumos de corriente de equipos a 24 VDC

Dispositivo [24 VDC]	Corriente máxima [A]
PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC	1.5
HMI KTP700 BASIC PANEL	0.23
Transmisor de flujo Datamate 2200	1.67
Transmisor de flujo de turbina	0.05
Válvula solenoide direccional 5/2 x5	1.0
Transmisor de temperatura	0.02
Transmisor de presión	0.02
Baliza 3 colores	0.19
Relé de interfaz para salida de PLC x8	0.2
Corriente consumida total	4.83

La Tabla 0.15 indica los consumos de corriente alterna de cada dispositivo, sumando un total de 12.65 Amperios. En esta tabla, se considera el consumo máximo del UPS, mismo que alimentará de forma continua a la fuente SITOP, energizando el sistema de control en variaciones de voltaje o cortes de energía (durante 30 minutos aproximadamente).

Tabla 0.15

Tabla de consumos de corriente de equipos a 120 VAC

Dispositivo [120 VAC]	Corriente máxima [A]
UPS 840 W	7.00
Luminaria LED	0.17
Ventilador con filtro x2	0.48
Toma corriente	5.00
Corriente consumida total	12.65

El sistema neumático ha sido diseñado para operar con 5 válvulas neumáticas, cada una con un consumo máximo de 4.2 m³/h a 65 psi. Para asegurar un funcionamiento óptimo en condiciones variables y garantizar la apertura secuencial de las válvulas, se ha dimensionado una fuente de alimentación de aire comprimido con un caudal de 35 m³/h a 80 psi. Este margen de seguridad permite responder a posibles fluctuaciones en la demanda y asegurar la continuidad del proceso.

2.8 Diseño de control

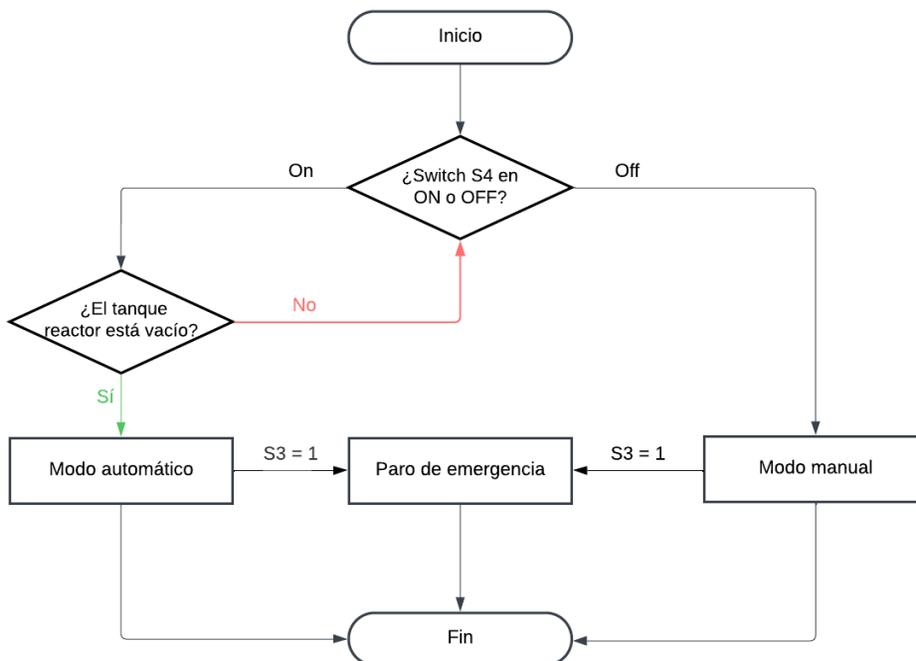
En esta sección se desarrolla la programación del controlador conforme a la norma IEC-61131-3. Asimismo, se diseña la interfaz gráfica de usuario para su implementación en el panel de control, garantizando una interacción eficiente y directa por parte de los operadores.

2.8.1 Definición lógica del programa

La programación del controlador, basada en la lógica definida en la Figura 0.3, depende del modo de operación seleccionado con el interruptor S4: ON para automático y OFF para manual. En modo automático, el proceso continúa solo si el tanque reactor K1 está vacío, lo cual se confirma si el sensor de presión PI-001 indica una presión menor a 0 psi; de lo contrario, se debe vaciar abriendo la válvula correspondiente. Cabe mencionar que, presionar el pulsador S3 en cualquier momento activa un paro de emergencia, cerrando automáticamente todas las válvulas del sistema, desde V-001 hasta V-005.

Figura 0.3

Diagrama de flujo de la programación - Principal

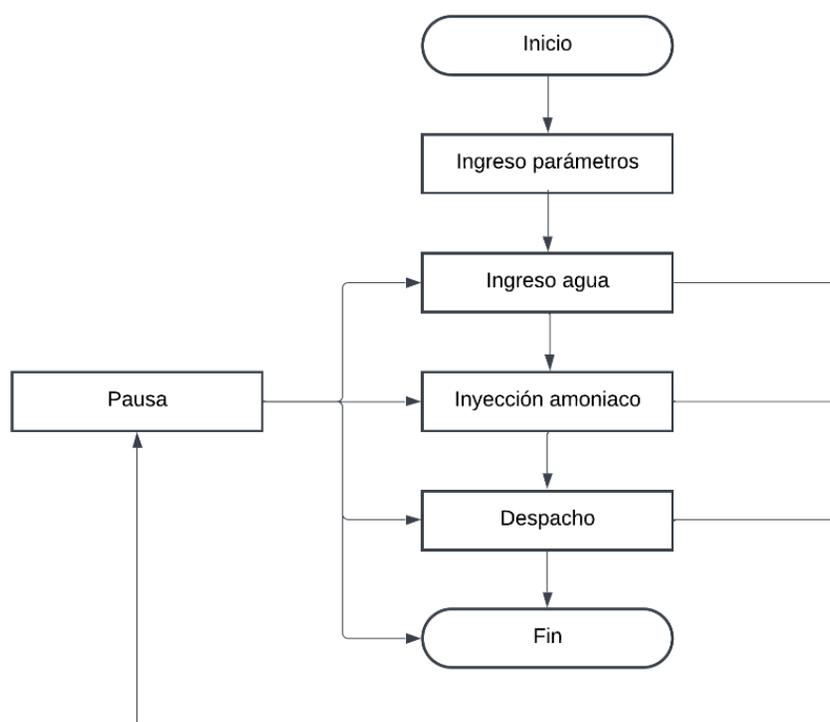


A continuación, en el modo automático, se ejecutan los procesos especificados en la Figura 0.4, los cuales incluyen la introducción de los parámetros necesarios para iniciar las operaciones de inyección de agua, amoníaco y despacho del producto final. Durante estos pasos, existe la

posibilidad de entrar en un estado de pausa, lo que detendrá temporalmente el proceso, permitiendo que el proceso se interrumpa sin perder la información de las etapas completadas, garantizando que pueda reanudarse de manera eficiente desde el punto exacto del cese, optimizando así el tiempo de ejecución y asegurando la continuidad operativa sin comprometer la calidad del proceso.

Figura 0.4

Diagrama de flujo de la programación – Modo automático



En la primera etapa del proceso, denominada *Ingreso de parámetros* (Figura 0.5), se requiere que el operador introduzca ciertos valores en la interfaz HMI. Específicamente, el operador debe ingresar:

- La cantidad máxima de hidróxido de amonio [kg], teniendo como restricción la capacidad del tanque reactor.

- La concentración máxima de amonio [%], considerando un límite de 30%.
- La temperatura máxima [°C], sin exceder los 30 °C.
- La presión máxima [psi], con una cota de 40 psi.

Con la validación de los datos ingresados, se calcula las masas de agua y amoníaco necesarias mediante las fórmulas 2.1 y 2.2. En función de la concentración deseada de amoníaco, se establece una relación proporcional con la masa total del producto final, lo que permite determinar la cantidad exacta de los insumos requeridos para alcanzar la composición deseada.

$$NH_3 [kg] = NH_4OH^- [kg] \cdot \frac{NH_3[\%]}{100 [\%]} \quad (0.1)$$

$$H_2O [kg] = NH_4OH^- [kg] - NH_3 [kg] \quad (0.2)$$

De manera complementaria, se establecen los límites operativos de temperatura y presión del tanque reactor basándose en análisis históricos realizados por el cliente. Dichos estudios demostraron que, al aplicar los diferenciales respecto a los valores máximos mostrados en las ecuaciones 2.3 y 2.4, el sistema alcanza una estabilización eficiente tanto en términos de tiempo como en la consistencia de las repeticiones.

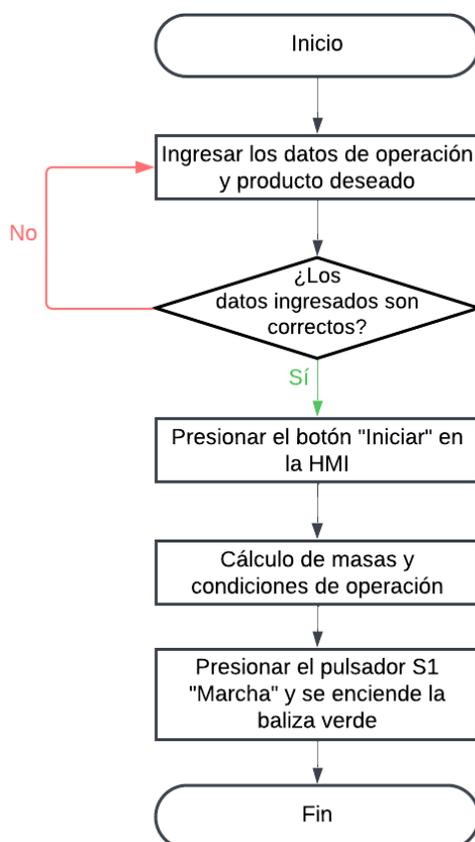
$$\Delta T = T_{max} - T_{min} = 5 [^{\circ}C] \quad (0.3)$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} = 20 [psi] \quad (0.4)$$

A continuación, el trabajador debe presionar el botón “Iniciar” en la interfaz de usuario para guardar los parámetros configurados. Posteriormente, se activa el pulsador S1 “Marcha” para iniciar el proceso de producción de hidróxido de amonio automático, lo que hará que el indicador visual de la baliza se encienda en verde, señalando el comienzo.

Figura 0.5

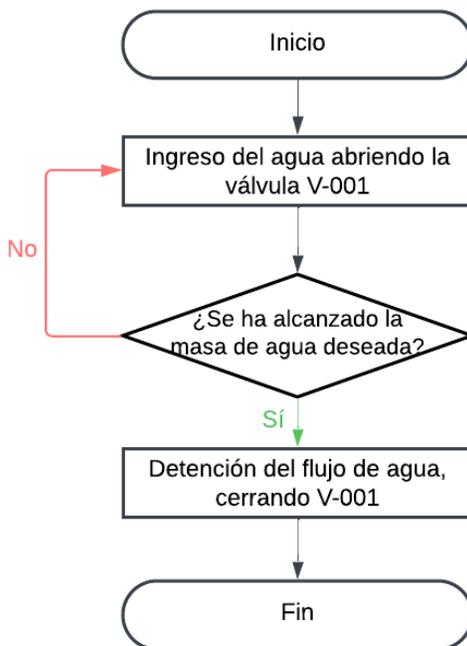
Diagrama de flujo de la programación – Ingreso parámetros



Luego, en la segunda etapa (Figura 0.6) denominada *Ingreso agua*, se marca el inicio de la producción de hidróxido de amonio, donde se acciona la válvula V-001, ubicada en la salida del tanque de agua, para permitir que el líquido fluya hacia el tanque reactor hasta que el medidor FT-001 registre que se ha alcanzado la cantidad necesaria.

Figura 0.6

Diagrama de flujo de la programación – Ingreso agua

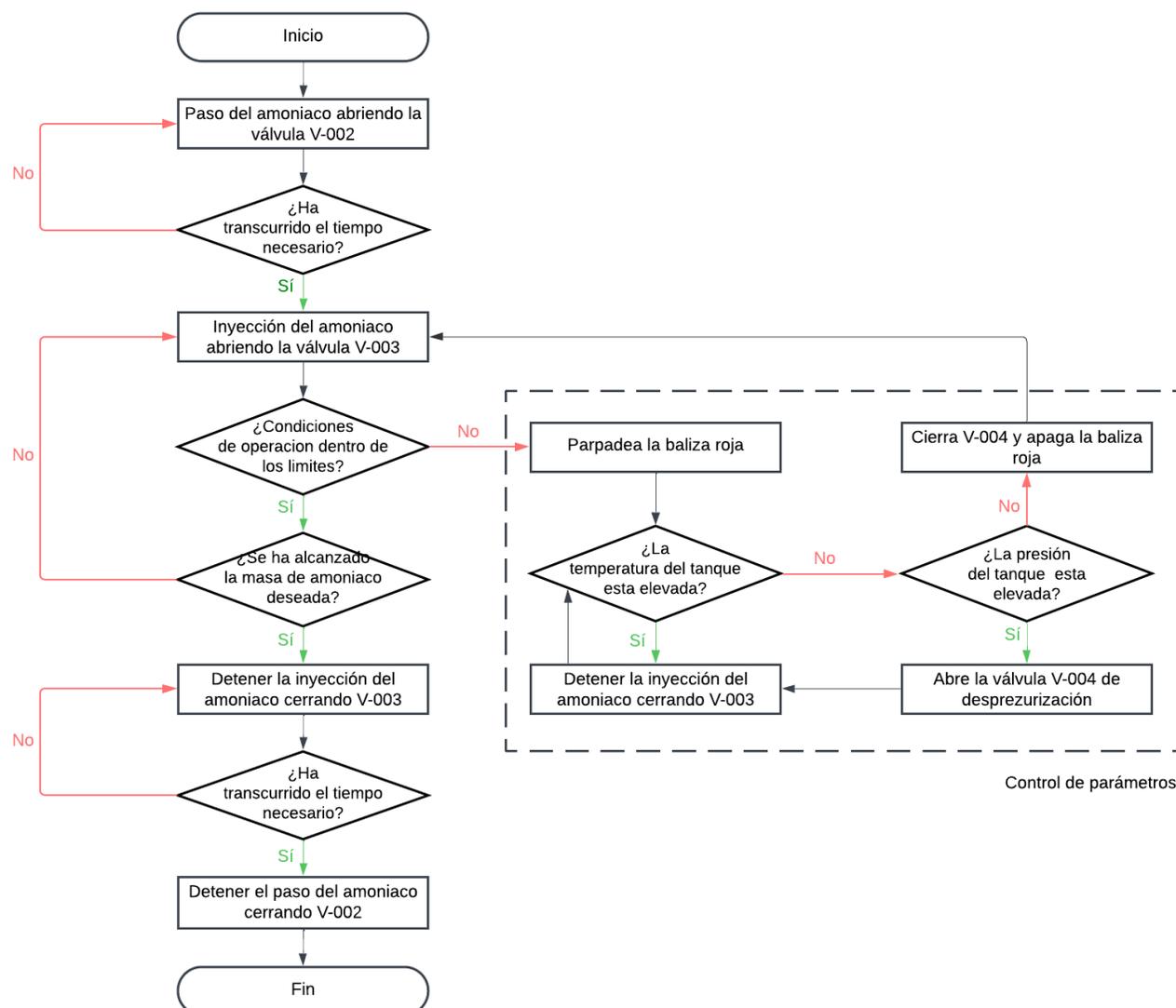


A continuación, en la tercera etapa (Figura 0.7), denominada *Inyección de amoníaco*, se acciona la válvula V-002, ubicada en la salida del depósito de amonio, permitiendo que el líquido fluya hacia el medidor FT-002, donde se empaqueta. Tras un tiempo determinado, se abre la válvula V-003, lo que permite su ingreso al tanque reactor hasta que el sensor verifique que se ha alcanzado la cantidad estipulada de masa.

Simultáneamente, se realiza la fase de *Control de parámetros*, en la cual se monitorean las variables de presión y temperatura, de modo que, si existe un desbordamiento fuera de los límites establecidos se cierran las válvulas V-003 y/o V-004 hasta que el sistema se estabilice. Durante este proceso, la baliza roja se enciende, indicando una anomalía en las condiciones de operación del proceso.

Figura 0.7

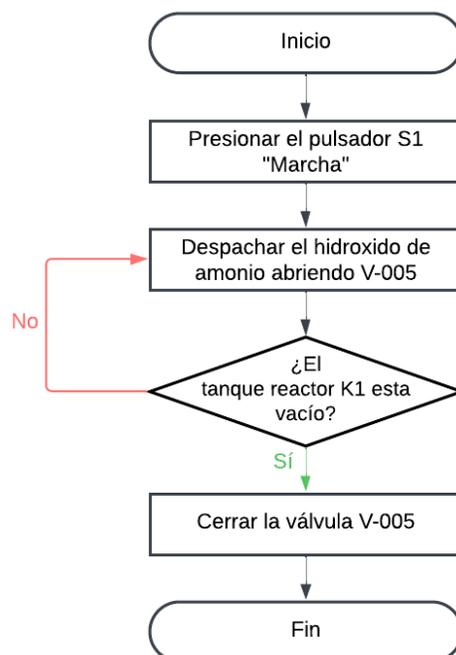
Diagrama de flujo de la programación – Inyección de amoniaco



Finalmente, en la etapa de *Despacho* (Figura 0.8), el operador activa el botón S1 para accionar la válvula V-005, permitiendo la descarga del hidróxido de amonio hasta que el tanque K1 se vacíe, es decir cuando la presión registrada en el sensor PT-001 sea aproximadamente 0 psi. Posteriormente, se procede al cierre del flujo con el actuador correspondiente, completando satisfactoriamente un lote.

Figura 0.8

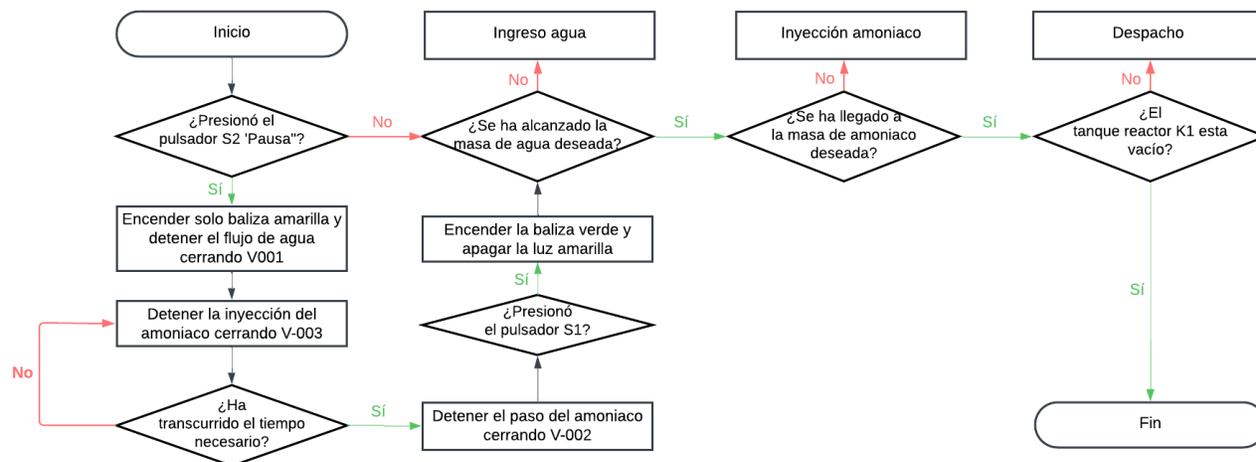
Diagrama de flujo de la programación – Inyección de amoniaco



Con respecto a la funcionalidad de *Pausa* (Figura 0.9), esta se activa al presionar el botón S2, lo cual enciende una baliza de color amarillo para indicar dicho estado. Simultáneamente, se interrumpe el flujo de agua mediante el cierre de la válvula V-001 y el flujo de amoníaco mediante el cierre de las válvulas V-003 y V-002. Para reanudar el proceso, es necesario presionar el pulsador S1, lo que permite continuar el funcionamiento desde el punto donde se detuvo, previa verificación de las condiciones operativas.

Figura 0.9

Diagrama de flujo de la programación – Pausa



2.8.2 Programación del PLC

En este contexto, para la programación del PLC se utilizó el software TIA Portal de Siemens, adoptando el lenguaje Ladder debido a su claridad y su prevalencia en la industria. Con la lógica definida del programa, se emplearon bloques de funciones que encapsulan las diferentes etapas del proceso y las condiciones asociadas, garantizando un control preciso y eficiente. Dicha estructura modular optimiza tanto el desarrollo como el mantenimiento del sistema, facilitando su implementación en entornos industriales.

2.8.3 Diseño Interfaz Hombre – Máquina

En cuanto a la interfaz HMI, se definieron las siguientes pantallas para el control del proceso:

- **Pantalla de Inicio:** Contiene las opciones de navegación, incluyendo botones interactivos y el título del proyecto, permitiendo al usuario acceder a las diferentes secciones del sistema.

- **Pantalla de Proceso:** Integra un diagrama representativo del proceso en curso, con indicadores visuales del estado actual. Además, ofrece acceso a dos sub-pantallas:
 - **Modo Automático:** Facilita el ingreso de parámetros operativos, permitiendo la configuración de los límites del proceso.
 - **Modo Manual:** Muestra la visualización del proceso en tiempo real, permitiendo la selección y control manual de las válvulas.
- **Pantalla de Instrucciones:** Proporciona la información necesaria para el manejo adecuado del sistema y la interpretación de los datos en cada una de las pantallas.
- **Pantalla de Información:** Muestra los detalles relevantes sobre la creación del proyecto, como los datos técnicos y de diseño.

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

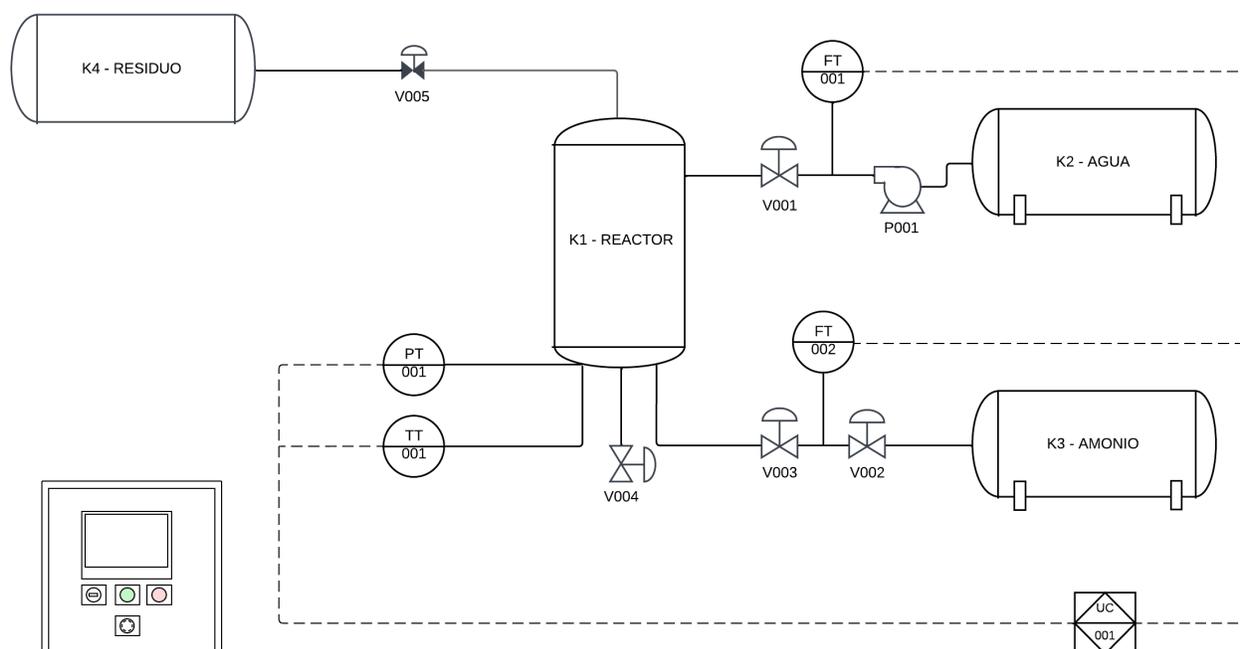
En la siguiente sección se exponen los resultados del diseño de control y electrónico del sistema propuesto, así como la validación de la lógica de programación.

3.2 Diseño electrónico

El sistema automatizado mostrado en la se compone de un flujómetro de turbina FT-001 para la medición del flujo de agua y un medidor de Coriolis FT-002 para la cuantificación del flujo de amoníaco. Además, se encuentran instalados un transmisor de temperatura TT-001 y un transmisor de presión PT-001 en el tanque reactor. De esta manera, las señales generadas por estos instrumentos son transmitidas al controlador, a través de su conexión eléctrica, lo que permite gestionar el control de los actuadores en función de las variables monitoreadas. Todos los dispositivos incorporan características antiexplosivas, conforme a las normativas de seguridad vigentes.

Figura0.1

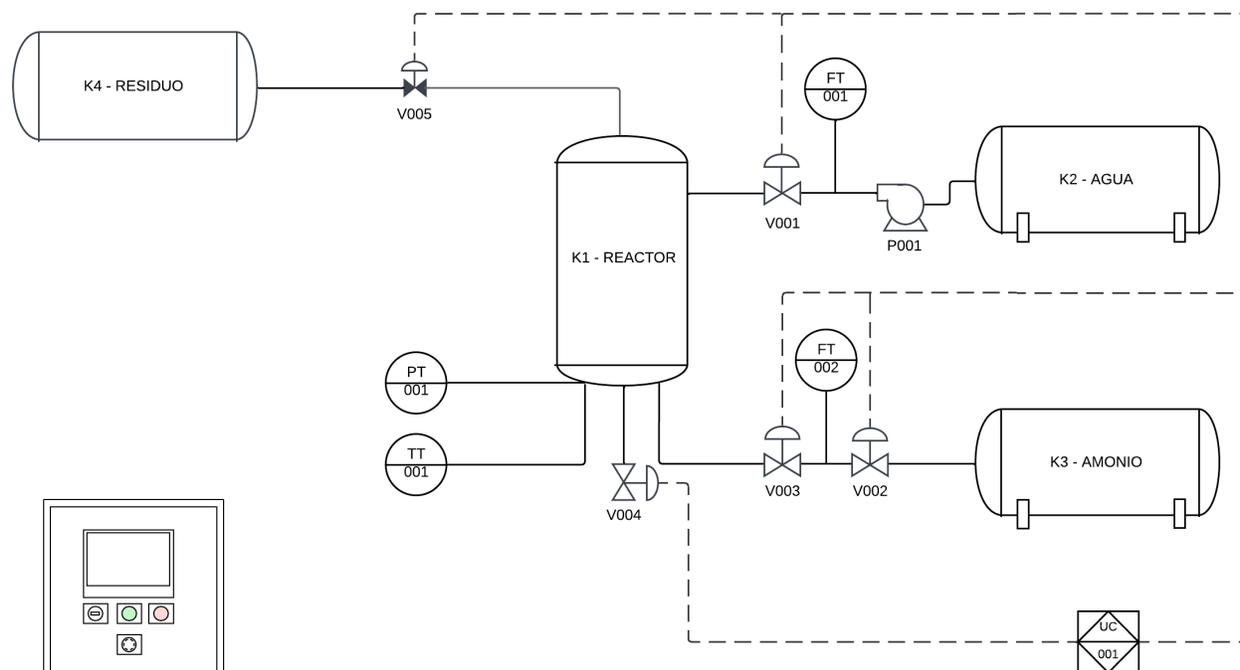
Diagrama P&ID – sistema automatizado (sensores)



Por otro lado, se emplearon válvulas de control (Figura 0.2) que reciben las señales del controlador UC-001 para regular el flujo de agua a través de V-001, y posteriormente, el flujo de amoníaco mediante V-002 y V-003. Además, en función de los límites de temperatura y presión, se opera la válvula V-005 para gestionar el manejo de los residuos.

Figura 0.2

Diagrama P&ID – sistema automatizado (actuadores)



Adicionalmente, las conexiones eléctricas detalladas de los dispositivos utilizados, incluyendo las especificaciones de cables, terminales, y puntos de interconexión, se encuentran en el **Apéndice** .

3.3 Diseño de control

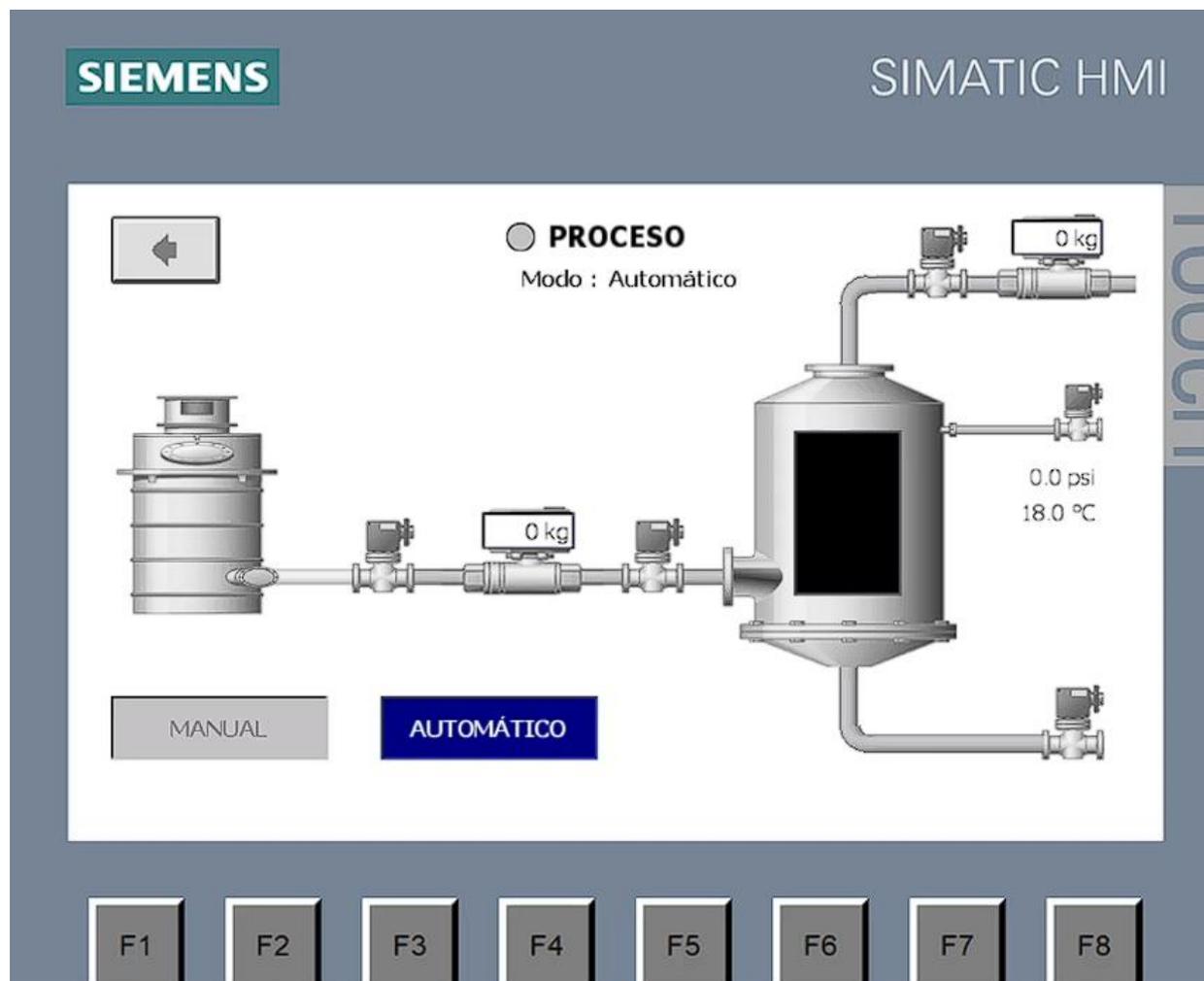
A continuación, se describen resultados del apartado de control siguiendo el proceso de diseño.

3.3.1 *Prueba de la interfaz de usuario*

Se tomaron en cuenta partes fundamentales del proceso y se incorporaron gráficamente en la interfaz, permitiendo al operador llevar a cabo un seguimiento en tiempo real del estado de los tanques e instrumentación utilizada para la dilución del producto. Se implementaron características como alarmas, una vista de tendencia para variables, instrucciones e información del proyecto las cuales se pueden acceder desde la pantalla de inicio como se muestra en la Figura 0.3

Figura 0.3*Interfaz gráfica – Pantalla de inicio*

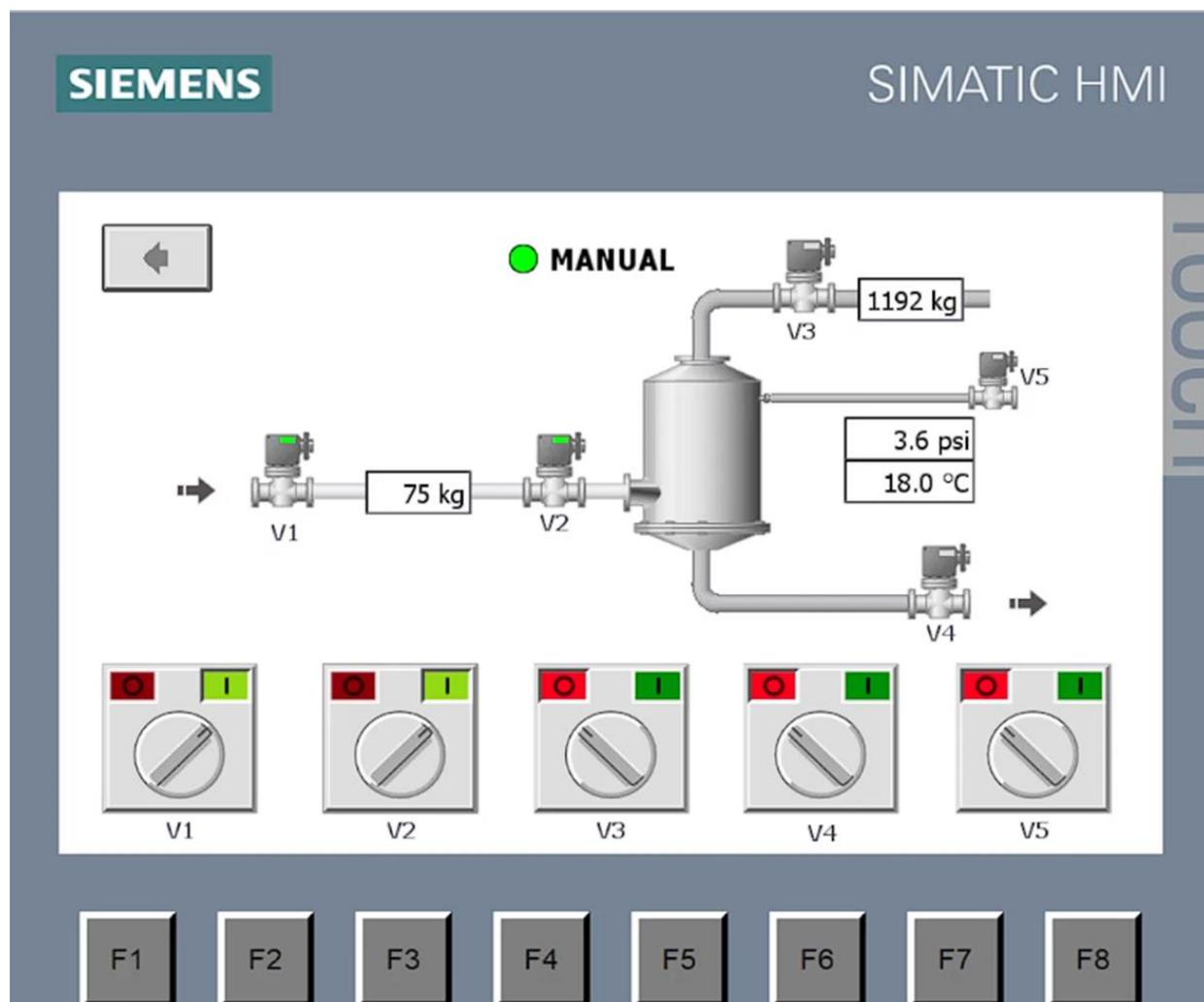
Debido a que el sistema cuenta con dos modos: automático y manual, se consideró incluir botones que dirijan al operador hacia pantallas respectivas dependiendo de la posición del selector físico colocado en el tablero de control. Las partes más importantes como el estado de las válvulas, valores de temperatura y presión, estado en tiempo real de la baliza e indicadores para los totalizadores de los flujómetros se encuentran presentes en esta pantalla, como se visualiza en la Figura 0.4.

Figura 0.4*Interfaz gráfica – Pantalla de proceso*

La interfaz gráfica de modo manual Figura 0.5 permite al usuario accionar individualmente cada válvula del sistema utilizando selectores virtuales claramente identificados con el nombre de la respectiva válvula. Al accionar por primera vez el selector virtual, la válvula se abrirá y permanecerá abierta hasta que el usuario la desactive o se presione el botón de paro de emergencia. En esta pantalla es posible visualizar las variables de temperatura, presión y totalizadores de agua y amoniaco.

Figura 0.5

Interfaz gráfica – Pantalla modo manual



El modo automático es accedido activando la pantalla de proceso y posicionando el selector en modo automático, lo que activará el botón “automático” que redirigirá al usuario a la pantalla mostrada en la Figura 0.6 donde se podrá parametrizar el lote de producción. Aquí, se ingresa la cantidad de hidróxido amónico (producto final) y el porcentaje de concentración de amoniaco en la solución acuosa, mostrando en pantalla la cantidad de agua y amoniaco requerida para calificar el lote como completado. Además, se definen los límites superiores de presión y temperatura del proceso, es decir los valores en los que el sistema cierra la válvula de ingreso de amoniaco al tanque de mezcla hasta que el sistema se regule.

Figura 0.6

Interfaz gráfica – Pantalla modo automático

SIEMENS SIMATIC HMI

AUTOMÁTICO

REQUERIMIENTOS

Hidróxido Amónico	<input type="text" value="5000 kg"/>
Concetración NH3	<input type="text" value="25 %"/>
Presión Máxima	<input type="text" value="30 PSI"/>
Temperatura Máxima	<input type="text" value="28 °C"/>

DATOS PRODUCCIÓN

Estado :	No Iniciado
H2O :	3750 kg
NH3:	1250 kg
Presión:	25 - 30 PSI
Temperatura:	23 - 28 °C

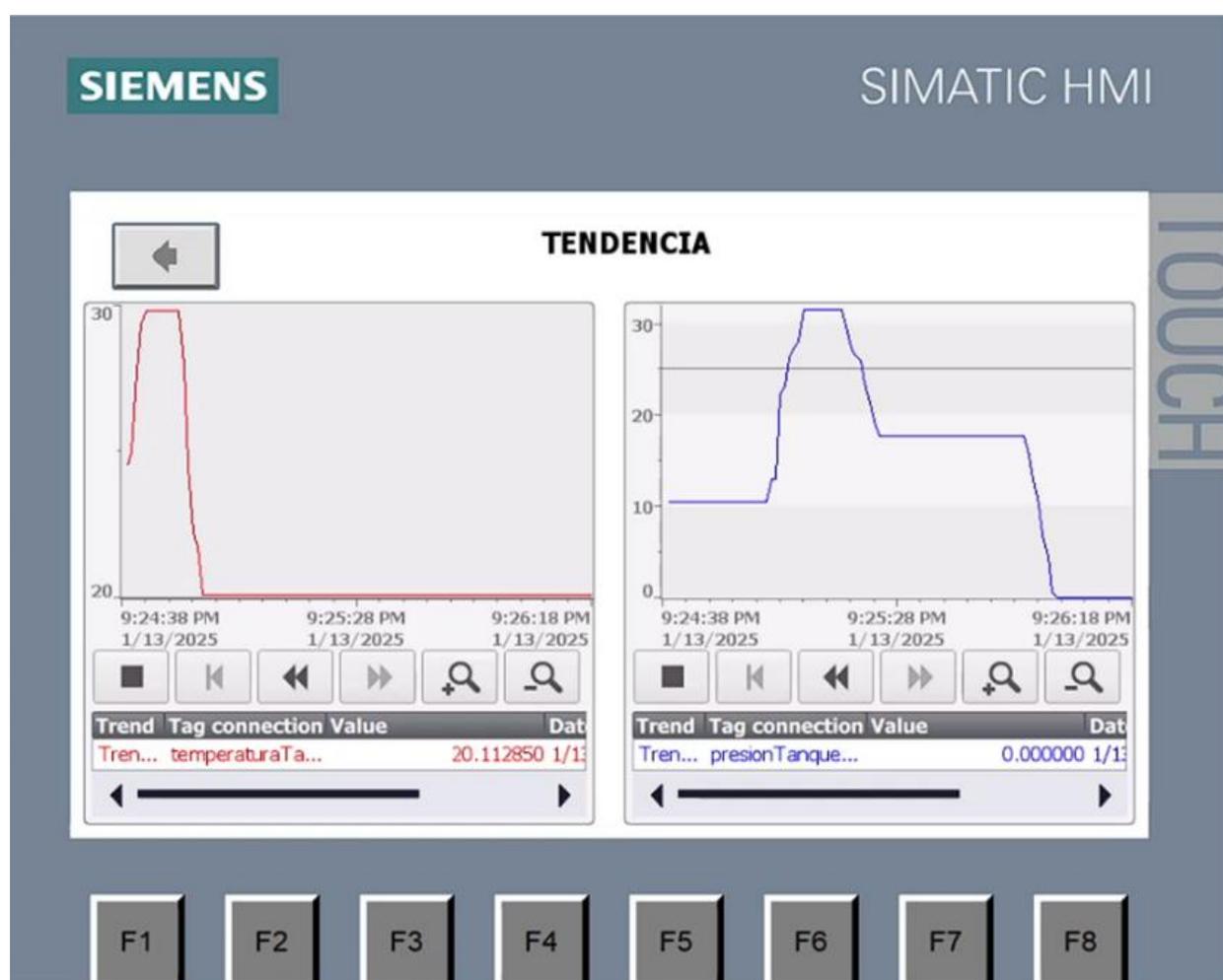
INGRESAR

F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F8

Utilizando la pantalla de tendencias como muestra la Figura 0.7, es posible utilizar la evolución de las variables temperatura y presión en el tiempo para denotar los valores óptimos de ingresar en los límites máximos, permitiendo disminuir aún más los tiempos muertos por parar la inyección al incrementar las variables del sistema.

Figura 0.7

Interfaz gráfica – Pantalla tendencias



Finalmente, en la pantalla de instrucciones de la Figura 0.8 se muestran los pasos a seguir para la producción de hidróxido amónico con asistencia del sistema para el modo automático y manual, así como el significado de las luces, mientras en la Figura 0.9 muestra la pantalla información del proyecto con el nombre del proyecto en el ambiente de programación, una descripción del mismo, los autores y un campo adicional indicando que es proyecto de materia integradora.

Figura 0.8

Interfaz gráfica – Pantalla instrucciones

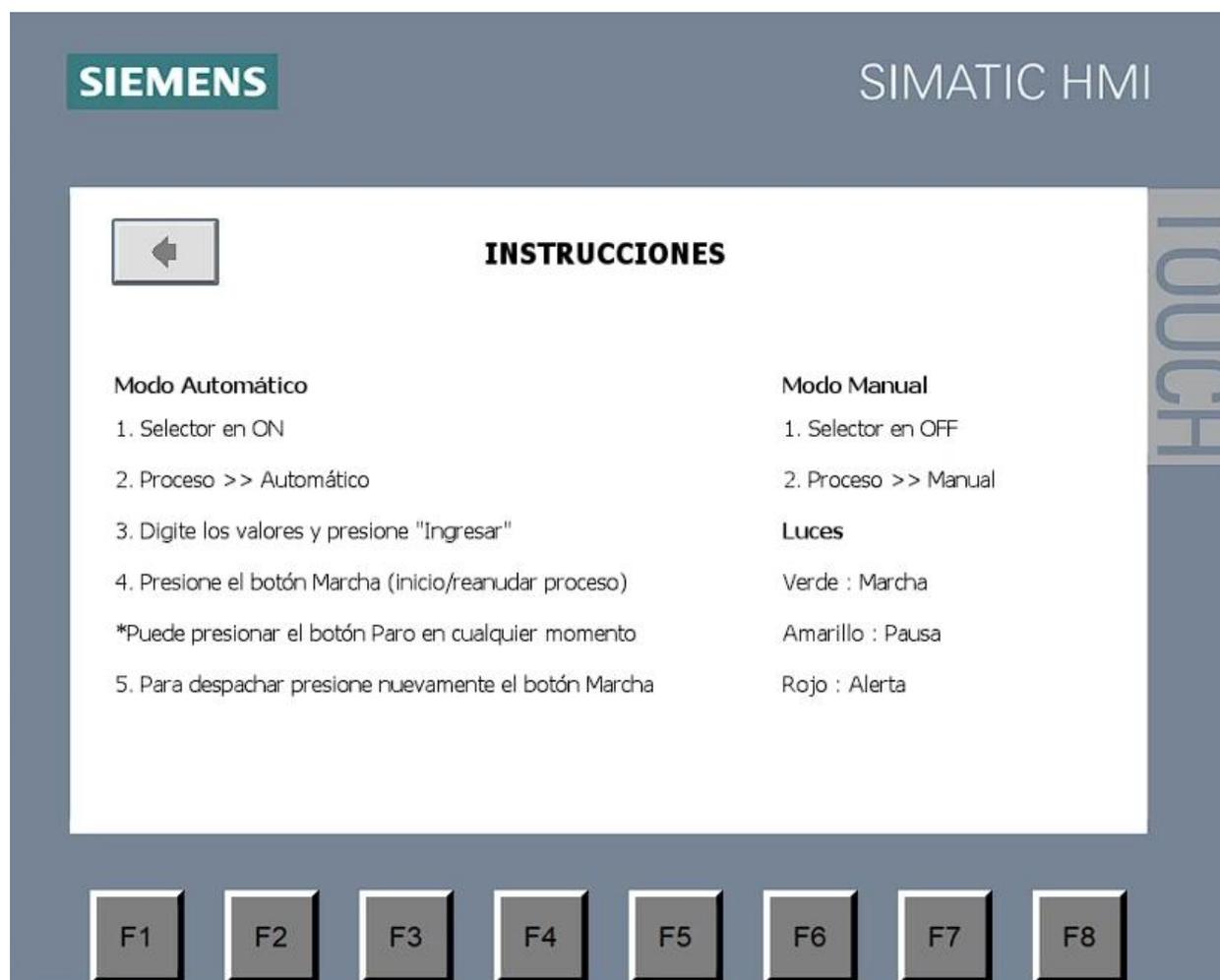


Figura 0.9

Interfaz gráfica – Pantalla información de proyecto

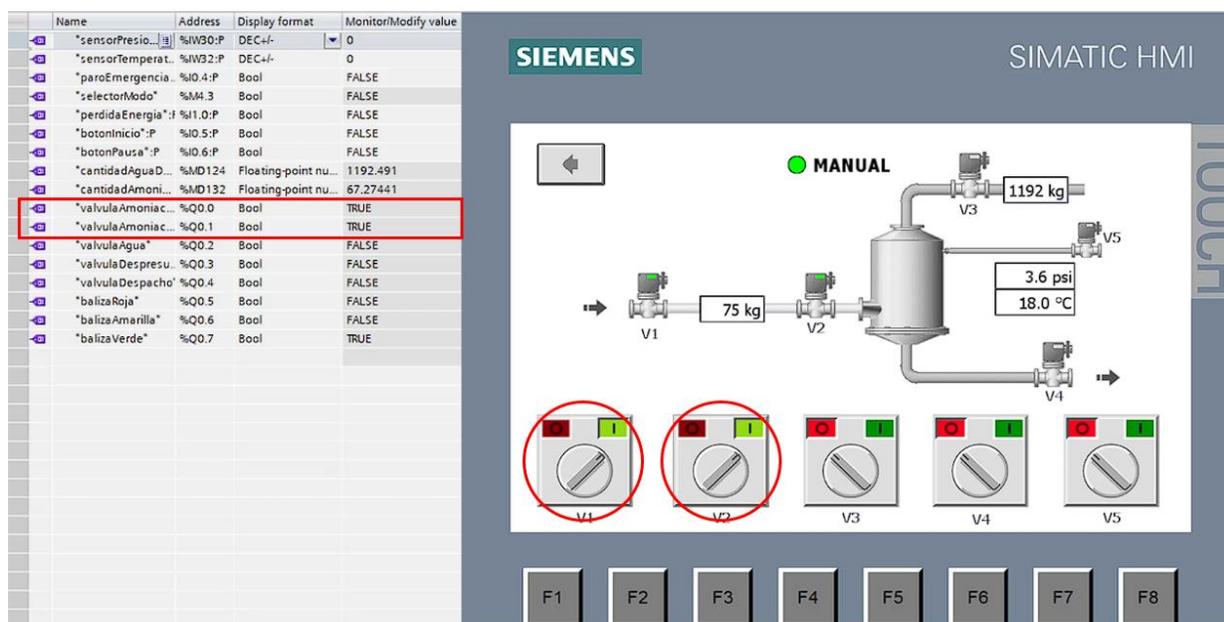


3.3.2 Simulación de la lógica de control

Para comprobar la correcta ejecución de la programación sobre las etapas del proceso y la lógica de control para las variables del tanque reactor, se simuló el controlador lógico programable y la interfaz humano-máquina. El modo manual se comprobó accionando los selectores virtuales, mientras se inspeccionaba el estado de las salidas que abren y cierran las válvulas neumáticas como se muestra en la Figura 0.10.

Figura 0.10

Simulación del controlador – Comprobación modo manual



Por otro lado, se comprobó que el modo automático se ejecutaba correctamente al realizar un lote desde la primera etapa, la inyección de agua la cual es controlada por el flujómetro de agua que envía una señal de pulsos hacia el controlador para totalizar la masa (equivalente al volumen interpretado por el sistema) y la válvula 3 que permite el paso de fluido desde el tanque de agua hacia el tanque reactor. La simulación de la señal de pulsos y la salida hacia la válvula neumática se muestra en la Figura 0.11.

Figura 0.11

Simulación del controlador – Inyección de agua en modo automático

The image shows a SIMATIC HMI interface for a process simulation. On the left, a table lists variables with their names, addresses, bit widths, and monitor/modify status. Two rows are highlighted with red boxes: 'cantidadAguaDespachada' and 'valvulaAgua'. The main display area shows a schematic of a process with a tank, a flow meter, and a valve. The flow meter displays '0 kg' and the tank displays '1366 kg'. The process is in 'Modo: Automático' and shows '2.8 psi' and '18.0 °C'. Below the schematic are buttons for 'MANUAL' and 'AUTOMÁTICO', and a row of function keys F1 through F8.

Name	Address	Bits	Monitor/Modify
sensorPresion:P	%IW30:P	0	0
sensorTemperatura:P	%IW32:P	0	0
paroEmergencia:P	%IO.4:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
selectorModo	%M.3	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
perdidaEnergia:P	%I.0:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
botonInicio:P	%IO.5:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
botonPausa:P	%IO.6:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
cantidadAguaDespachada	%MD124	1331.814	1015:108
cantidadAmoniacoDespachada	%MD132	1015:108	1015:108
valvulaAmoniacol	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	FALSE
valvulaAmoniacoa	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	FALSE
valvulaAgua	%Q0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
valvulaDespresurizacion	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	FALSE
valvulaDespacho	%Q0.4	<input type="checkbox"/>	FALSE
balizaRoja	%Q0.5	<input type="checkbox"/>	FALSE
balizaAmarilla	%Q0.6	<input type="checkbox"/>	FALSE
balizaVerde	%Q0.7	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE

Una vez se completa la inyección de la masa de agua requerida, se abrieron las válvulas aguas abajo y arriba del medidor de flujo para amoniaco y se simularon pulsos representando el paso de este producto como se muestra en la Figura 0.12. En esta etapa, se ejecutó el algoritmo de control de presión y temperatura donde al aumentar esta última variable hasta el valor máximo ingresado por el usuario al inicio del lote se detuvo la inyección cerrando la válvula antes del tanque reactor y activando el encendido de la baliza, hasta que la temperatura alcance un diferencial de 5 °C respecto al límite máximo como se muestra en la Figura 0.13.

Figura 0.12

Simulación del controlador – Inyección de amoníaco en modo automático

Name	Address	Bits	Monitor/Modify
"sensorPresion":P	%IW30:P	0	0
"sensorTemperatura":P	%IW32:P	0	0
"paroEmergencia":P	%IO.4:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"selectorModo"	%M4.3	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
"perdidaEnergia":P	%I1.0:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"botonInicio":P	%IO.5:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"botonPausa":P	%IO.6:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"cantidadAguaDespachada"	%MD124	0	0
"cantidadAmoníacoDespac..."	%MD132	332.6821	332.6821
"valvulaAmoníaco1"	%Q0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
"valvulaAmoníaco2"	%Q0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
"valvulaAgua"	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	FALSE
"valvulaDespresurizacion"	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	FALSE
"valvulaDespacho"	%Q0.4	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaRoja"	%Q0.5	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaAmarilla"	%Q0.6	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaVerde"	%Q0.7	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE

Figura 0.13

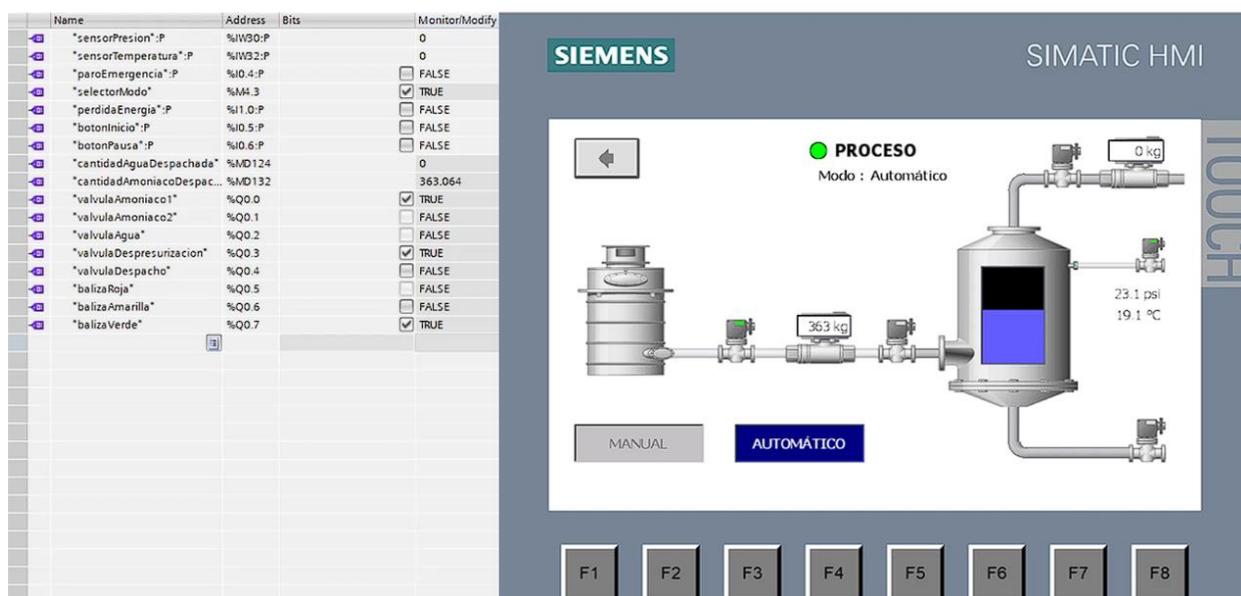
Simulación del controlador – Alarma por temperatura alta en modo automático

Name	Address	Bits	Monitor/Modify
"sensorPresion":P	%IW30:P	0	0
"sensorTemperatura":P	%IW32:P	0	0
"paroEmergencia":P	%IO.4:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"selectorModo"	%M4.3	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
"perdidaEnergia":P	%I1.0:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"botonInicio":P	%IO.5:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"botonPausa":P	%IO.6:P	<input type="checkbox"/>	FALSE
"cantidadAguaDespachada"	%MD124	0	0
"cantidadAmoníacoDespac..."	%MD132	665.3647	665.3647
"valvulaAmoníaco1"	%Q0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE
"valvulaAmoníaco2"	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	FALSE
"valvulaAgua"	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	FALSE
"valvulaDespresurizacion"	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	FALSE
"valvulaDespacho"	%Q0.4	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaRoja"	%Q0.5	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaAmarilla"	%Q0.6	<input type="checkbox"/>	FALSE
"balizaVerde"	%Q0.7	<input checked="" type="checkbox"/>	TRUE

Asimismo, el algoritmo de control supervisa la presión del tanque reactor, y al superar el valor máximo impide el paso de amoniaco cerrando la válvula de inyección y apertura la válvula de alivio despresurizando al tanque hasta que el valor de presión tenga una diferencia de 5 psi con respecto al valor de alarma, donde en el que el controlador cerró la válvula de alivio y reanudó la dilución abriendo la válvula de inyección, como se observa en la Figura 0.14.

Figura 0.14

Simulación del controlador – Alarma por presión alta en modo automático



Finalmente, al completar la inyección el sistema cerró todas las válvulas en el orden programado y cambió a un estatus de espera encendiendo la baliza amarilla y comenzando la despresurización del tanque reactor. Una vez la presión bajó a un valor establecido, se continuó simulando el tiempo necesario para que el operador conecte las mangueras necesarias para descargar el tanque con producto hacia los contenedores respectivos visualizable en la Figura 0.15. Al presionar el botón de inicio, se abrió la válvula de despacho permitiendo que el tanque nivel del tanque se vacíe tomando como medida la presión interna del tanque. En la sección Apéndices, se encuentran videos de la simulación utilizando un entorno 3D y conexión al controlador emulado.

Figura 0.15

Simulación del controlador – Sistema en espera para despacho modo automático

Name	Address	Bits	Monitor/Modify
sensorPresion:P	%IW30:P	0	0
sensorTemperatura:P	%IW32:P	0	0
paroEmergencia:P	%IO.4:P		<input type="checkbox"/> FALSE
selectorModo	%M4.3		<input checked="" type="checkbox"/> TRUE
perdidaEnergia:P	%I1.0:P		<input type="checkbox"/> FALSE
botonInicio:P	%IO.5:P		<input type="checkbox"/> FALSE
botonPausa:P	%IO.6:P		<input type="checkbox"/> FALSE
cantidadAguaDespachada	%MD124	0	0
*cantidadAmoniacDespac...	%MD132	0	0
valvulaAmoniacco1	%Q0.0		<input type="checkbox"/> FALSE
valvulaAmoniacco2	%Q0.1		<input type="checkbox"/> FALSE
valvulaAgua	%Q0.2		<input type="checkbox"/> FALSE
valvulaDespresurizacion	%Q0.3		<input type="checkbox"/> FALSE
valvulaDespacho	%Q0.4		<input type="checkbox"/> FALSE
balizaRoja	%Q0.5		<input type="checkbox"/> FALSE
balizaAmarilla	%Q0.6		<input checked="" type="checkbox"/> TRUE
balizaVerde	%Q0.7		<input checked="" type="checkbox"/> TRUE

3.4 Análisis de costos

En relación con la inversión requerida para el sistema de automatización previamente descrito, se presenta el rubro correspondiente a los materiales en la Tabla 0.1, en la cual se detallan los componentes de control, electrónicos y neumáticos de mayor relevancia para el diseño del sistema.

Tabla 0.1*Costos de Materiales*

Dispositivo	Cantidad	Precio [USD]
S7-1200 1214C DC/DC/DC	1	943
KTP700 Basic panel	1	1 683
Módulo de entrada analógica 6ES7231-4HD32-0XB0	1	226
Transmisor de turbina	1	1800
Transmisor de flujo Datamate 2200	1	15 000
Válvula direccional actuada por solenoide – neumáticas	5	60
Válvula de ángulo neumática JXPC – Con accionamiento neumático	5	150
Transmisor temperatura PCT401	1	330
Transmisor de presión PCM401	1	480
Forza UPS FX-1500LCD	1	251
Disyuntor monofásico	1	1.24
Relé acoplador de interfaz 24VAC/DC	8	11.57
Relé de alimentación	1	5.4
Pulsador verde N.O.	1	1.02
Pulsador Rojo N.C	1	1.02
Switch	1	3.42

Pulsador de emergencia con retención	1	5.32
Baliza	1	49.86
Ventilador	2	31.64
Luminaria LED	1	5
Total		21 991.12

Nota. Los precios de los componentes adicionales fueron obtenidos mediante una cotización de una empresa proveedora.

Con respecto a los costos indirectos, que incluyen la mano de obra para la programación, instalación y comisionamiento del sistema automatizado, los precios presentados en la Tabla 0.2 fueron determinados a partir de las valoraciones de expertos en el área.

Tabla 0.2

Costos Indirectos

Trabajo	Precio [USD]
Programación del PLC y HMI	2 500
Comisionamiento	1 500
Instalación hidráulica	3800
Instalación neumática	1500
Instalación eléctrica	4800
Total	14 100

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

A continuación, se presentan conclusiones obtenidas durante el diseño de la modernización del sistema de control para la producción de hidróxido amónico detallando el desarrollo del algoritmo de control, la simulación del controlador lógico, la selección de equipos y la documentación del sistema.

- El algoritmo de control desarrollado se basa en la programación por estados, correspondiendo a las etapas de producción de hidróxido de amonio. En la fase de dilución, regula la inyección de agua y amoníaco, ajustando la temperatura y presión del reactor según los parámetros configurados por el usuario al inicio de cada lote. Además, se configura una respuesta a anomalías en las variables críticas, activando una secuencia específica de válvulas para estabilizar el sistema y preservar la calidad del producto.
- La simulación del controlador lógico verificó la correcta ejecución de la secuencia programada en los modos manual y automático, demostrando la respuesta del algoritmo ante desviaciones de temperatura y presión mediante la activación de las válvulas correspondientes, la generación de alarmas y dispositivos de señalización según los límites establecidos para cada lote. Asimismo, en condiciones nominales, el sistema reguló la inyección de insumos conforme a los parámetros de producción.
- La selección de equipos para la modernización del sistema manual se basó en los requerimientos del cliente y un buen entendimiento del proceso productivo del hidróxido amónico, específicamente de la volatilidad del amoniaco.
- Se realizó la selección de equipos para la modernización de un sistema manual basándose en los requerimientos del cliente y un buen entendimiento del proceso productivo del hidróxido

amónico, específicamente de la volatilidad del amoniaco. Debido a esto, se seleccionó un flujómetro de Coriolis para un control preciso de amonio y transmisores que cumplen normativas explosion-proof. Por otro lado, el controlador y la HMI fueron elegidos por su capacidad y escalabilidad para futuras expansiones e integraciones.

4.1.2 Recomendaciones

Finalmente, al culminar los objetivos planteados en este documento, se identificaron áreas de mejora para el sistema de automatización para el mejor control de las variables, así como oportunidades para optimizar el proceso productivo en futuros alcances de la implementación del sistema.

- Instalar sensores de concentración de oxígeno en la planta para detectar posibles fugas químicas y mejorar la seguridad contra explosiones puesto que la solución presentada se centra únicamente en la selección de dispositivos a prueba de explosiones conforme a la normativa ATEX.
- Automatizar el proceso de bombeo de agua hacia el tanque reactor, incorporando el arranque y paro del motor, así como el monitoreo de señales de control (como relé térmico, guardamotor y presostatos), para integrar todos los dispositivos de las distintas etapas del proceso y hacer el sistema más eficiente.
- Desarrollar e integrar una dashboard capaz de visualizar y almacenar los datos en tiempo real obtenidos por el controlador, así como alertar y notificar ante eventos críticos del sistema desde cualquier computador que se encuentre en la misma red.
- Implementar un sistema de control a lazo cerrado en conjunto con una válvula proporcional para regular el flujo de amoniaco con respecto a la tasa de aumento de temperatura del tanque reactor, permitiendo estudiar el comportamiento del sistema ante perturbaciones.

Referencias

- [1] N. Montes-Valencia, “La industria química: Importancia y Retos,” Grupo Qualipro, Medellín, 2015. [Accedido: 9-oct-2024]
- [2] A. M. V. T. M. F. & F. C. Sánchez, “Evolución de la industria química en Ecuador,” Banco Central del Ecuador, 2020. [Accedido: 11-oct-2024]
- [3] S. Sharma, “Jaysons Chemical Industries,” Julio 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ammoniagas.com/ammonium-hydroxide-applications-in-industry/>. [Accedido: 9-oct-2024]
- [4] UDAX, “Innovación y Eficiencia: Descubriendo las Tendencias en Automatización de Procesos Químicos,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://udax.edu.mx/experiencia/industria/innovacion-y-eficiencia-descubriendo-las-tendencias-en-automatizacion-de-procesos-quimicos>. [Accedido: 12-oct-2024]
- [5] AiChe, “Valve position errors can cause serious incidents,” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20210518.pdf>. [Accedido: 9-oct-2024].
- [6] Okura Flexible Automation Systems Pte Ltd, “5 Key advantages of automation in chemical industry,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://okura.com.sg/5-key-advantages-of-automation-in-chemical-industry/>. [Accedido: 16-oct-2024]
- [7] S. Dale E, Automation and control of chemical and petrochemical plants, Santa Barbara: University of California, 2010. [Accedido: 16-oct-2024]

- [8] A. f. T. S. a. D. R. (ATSDR), “ Toxicological profile for Ammonia,” 2004. [En línea].
Dsiponible en:
<https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=11&tid=2>.
[Accedido: 12-oct-2024]
- [9] PwC, “Innovation for a sustainable world,” 2022. [En línea]. Dsiponible en:
<https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/industries/chemicals/esg-driven-innovation-in-the-chemical-industry/strategyand-esg-innovation-chemicals.pdf>.
[Accedido: 18-oct-2024]
- [10] Ministerio del Ambiente, “Código Orgánico del Ambiente,” 2017. [En línea]. Dsiponible
en:https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf.
[Accedido: 14-oct-2024]
- [11] H. Anne Marie, “Ammonium Hydroxide Facts and Formula,” 2020. [En línea]. Dsiponible
en: <https://www.thoughtco.com/ammonium-hydroxide-facts-603864>. [Accedido:
14-oct-2024]
- [12] N. Fransisco, “Simulación y propuesta de mejora de una planta de producción de amoniaco
a partir de gas de síntesis,” 2020. [En línea]. Dsiponible en:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/102047/1/TFG-Francisco-Javier-Navarro-Rico.pdf>. [Accedido: 16-oct-2024]
- [13] M. Ariel, Teoría de mecánica de fluidos, San Rafael: UNCUYO, 2017.

- [14] Safety Culture, “Guía esencial para el cumplimiento de la normativa ATEX,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://safetyculture.com/es/temas/atex/>. [Accedido: 20-oct-2024]
- [15] General Instruments, “Explosion-Proof Instrumentation: Ensuring Safety in Hazardous Environments,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.generalinstruments.net/explosion-proof-instrumentation-ensuring-safety-in-hazardous-environments/#:~:text=Explosion-proof%20instrumentation%20is%20specifically%20engineered%20to%20operate%20safely,heat%20from%20igniting%20external%20gases%2C%20>. [Accedido: 20-oct-2024]
- [16] M. T. Orviz, “Automatización de un Proceso Industrial de una Empresa del Sector Químico,” 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/36835680/Automatizaci%C3%B3n_de_un_Proceso_Industrial_de_una_Empresa_del_Sector_Qu%C3%ADmico. [Accedido: 10-nov-2024]
- [17] Highleap Electronic, “PLC Basics: Understanding Programmable Logic Controllers,” [En línea]. Disponible en: <https://hilelectronic.com/programmable-logic-controllers/>. [Accedido: 10-nov-2024]
- [18] SIEMENS, “Lista de Precios Productos Industriales Eléctricos,” 2024. [En línea]. Disponible en: Catálogo en línea. [Accedido: 12-nov-2024]
- [19] AUTEXOPEN, “¿Qué es una HMI (Interfaz Hombre-Máquina) y cuáles son sus principales características?,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autex->

open.com/sistemas-mes/que-es-una-hmi-interfaz-hombre-maquina-y-cuales-son-sus-principales-caracteristicas/. [Accedido: 12-nov-2024]

- [20] Badge Meter, “Badge Meter,” 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.flowcontrols.com/files/MakingtheRightFlowMeterDecision\(IND-BR-02129-EN\).pdf](https://www.flowcontrols.com/files/MakingtheRightFlowMeterDecision(IND-BR-02129-EN).pdf). [Accedido: 16-nov-2024]
- [21] Alibaba, “Alibaba,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alibaba.com/>. [Accedido: 16-nov-2024]
- [22] LIANKE, “Actuated Valves: Their Working Principle and Types,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pinchlinedvalves.com/blog/actuated-valve-working-principle-type/>. [Accedido: 16-nov-2024]
- [23] D.-A. Jaime, H.-D. Jorge, B.-M. Ana, S.-C. Samuel, A. Isidro y A.-L. Jeferson, “Navigating Digital Transformation and Technology Adoption: A Literature Review from Small and Medium-Sized Enterprises in Developing Countries,” Departamento de Ciencias de la Computación e Informática. Universidad de La Frontera. Temuco. Chile. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/14/5946> [Accedido: 10-nov-2024]
- [24] Ogenica Tech School, “¿Conoces los 5 lenguajes de programación para PLCs según la normativa IEC 61131-3?,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ogenica.com/gestion/los-5-lenguajes-de-programacion-estandarizados-para-plcs-segun-la-normativa-iec-61131-3/#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20normativa%20IEC%2061131->

3%2C%20los%205%20lenguajes,funcional%20%28FBD%29.%20Lenguaje%20de%20programaci%C3%B3n%20. [Accedido: 10-nov-2024]

- [25] S. Srujal, “Liquor Ammonia in Agriculture: Fertilizer and Soil Amendment Applications,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ammoniagas.com/liquor-ammonia-in-agriculture/>. [Accedido: 20-oct-2024]

Apéndices

Apéndice A

En este apéndice, se adjuntan enlaces para visualizar los videos correspondientes a la simulación, primero un recorrido de un lote normal sin condiciones adversas y segundo un lote con alto incremento de presión y temperatura lo que conlleva que salten las alarmas por las respectivas variables.

- Simulación de un lote de producción sin alarmas:

[Lote_normal.mp4](#)

- Simulación de un lote de producción con alarma por sobrepresión y sobretemperatura:

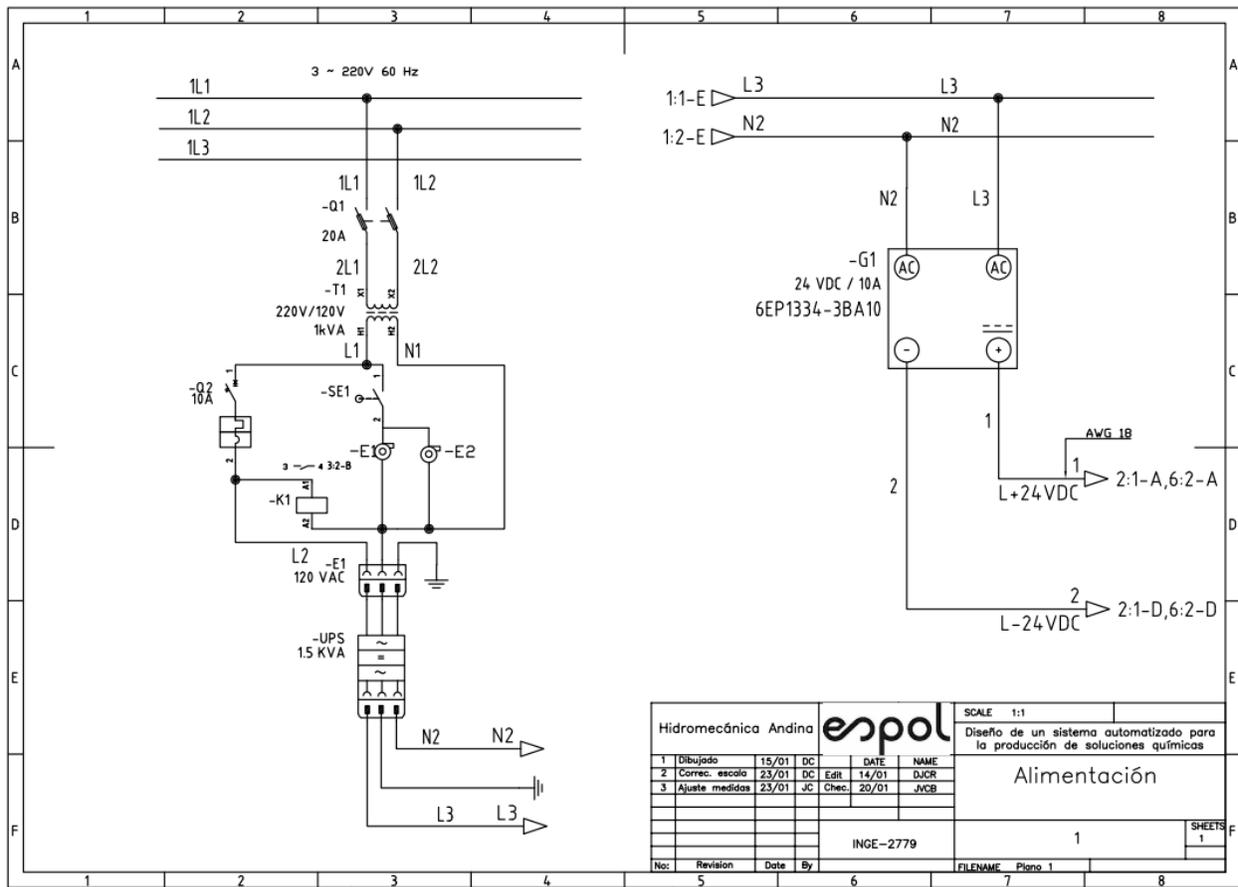
[Lote_alarma_Presion_Temperatura.mp4](#)

Apéndice B

En este apéndice, se muestran los planos realizados en un software CAD, donde se consideró la alimentación eléctrica desde la acometida trifásica de planta, hasta la alimentación del controlador, elementos de mando y señalización, y actuadores.

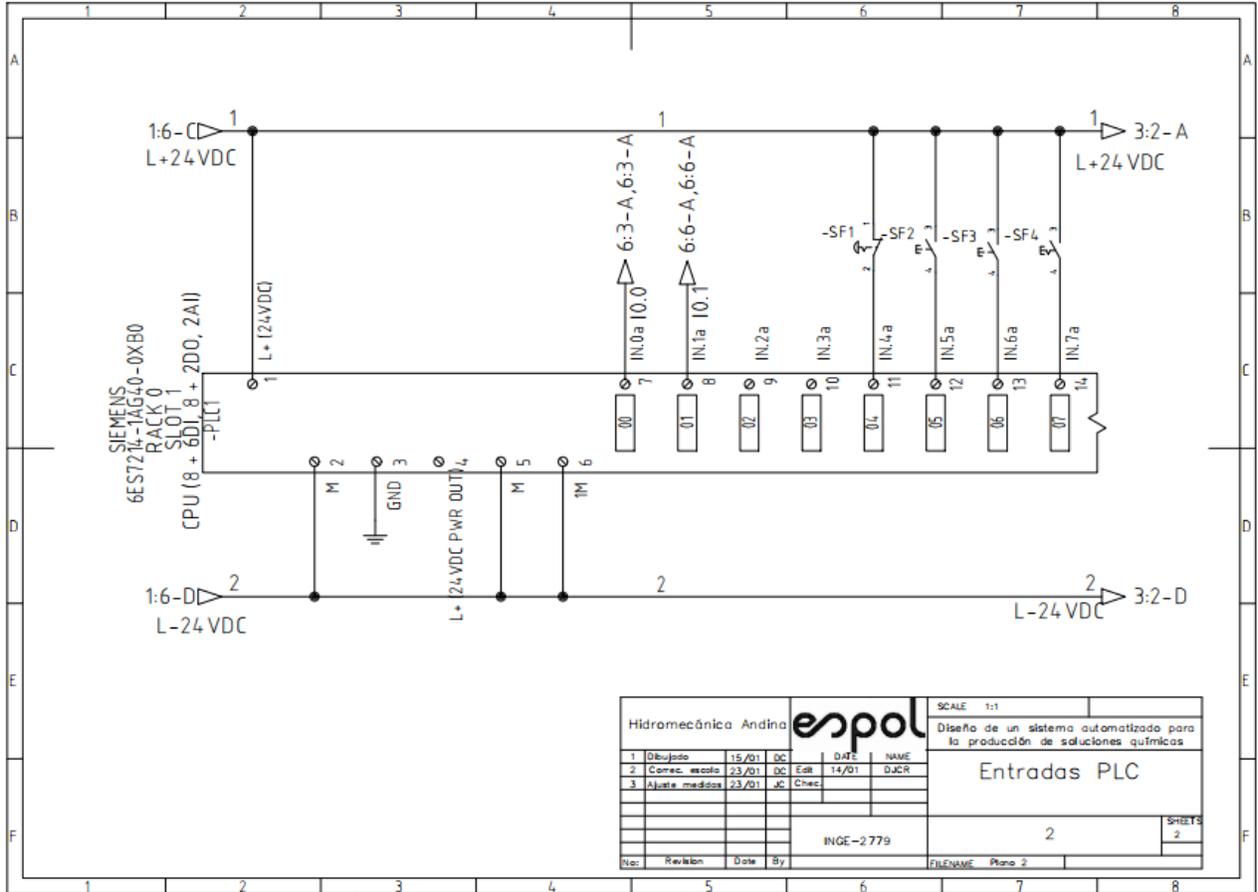
PLANO 1

Alimentación



PLANO 2

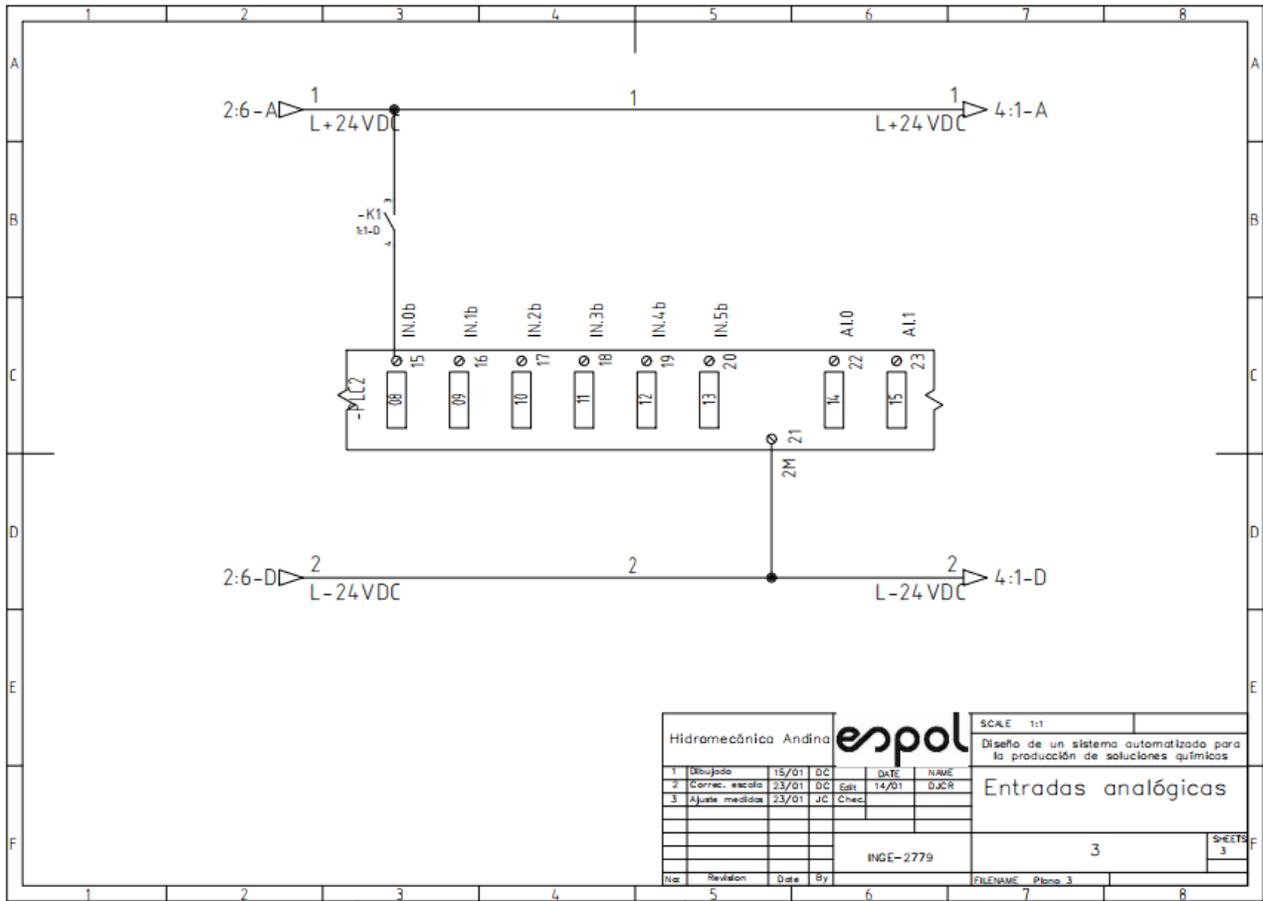
Entradas PLC



Hidromecánica Andina		espol		SCALE	1:1
1 Dibujo		15/01	DC	DATE	NAME
2 Correc. escala		23/01	DC	Edr	14/01
3 Ajuste medidas		23/01	JC	Chec	
				Diseño de un sistema automatizado para la producción de soluciones químicas	
				Entradas PLC	
				2	
				SHEETS 2	
				INGE-2779	
No:	Revision	Date	By	FILENAME	Plano 2

PLANO 3

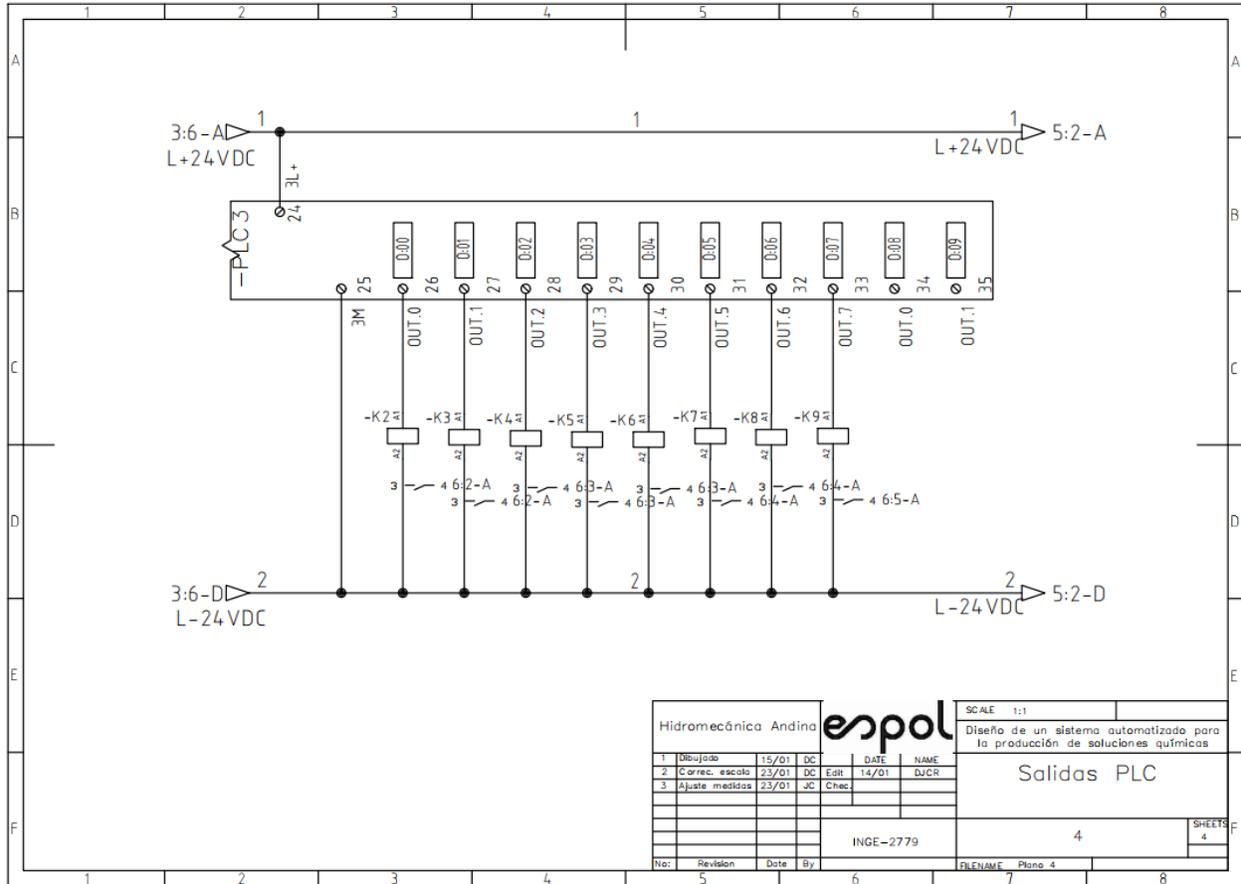
Entradas analógicas



Hidromecánica Andina		espol		SCALE 1:1	
Diseño de un sistema automatizado para la producción de soluciones químicas					
1	Dibujado	15/01	DC	DATE	NAME
2	Correc. escala	23/01	DC	Edi	DJCR
3	Ajuste medidas	23/01	JC	Chec	
Entradas analógicas					
INGE-2779				3	
No.	Revision	Date	By	FILENAME	Plano 3
					SHEETS 3

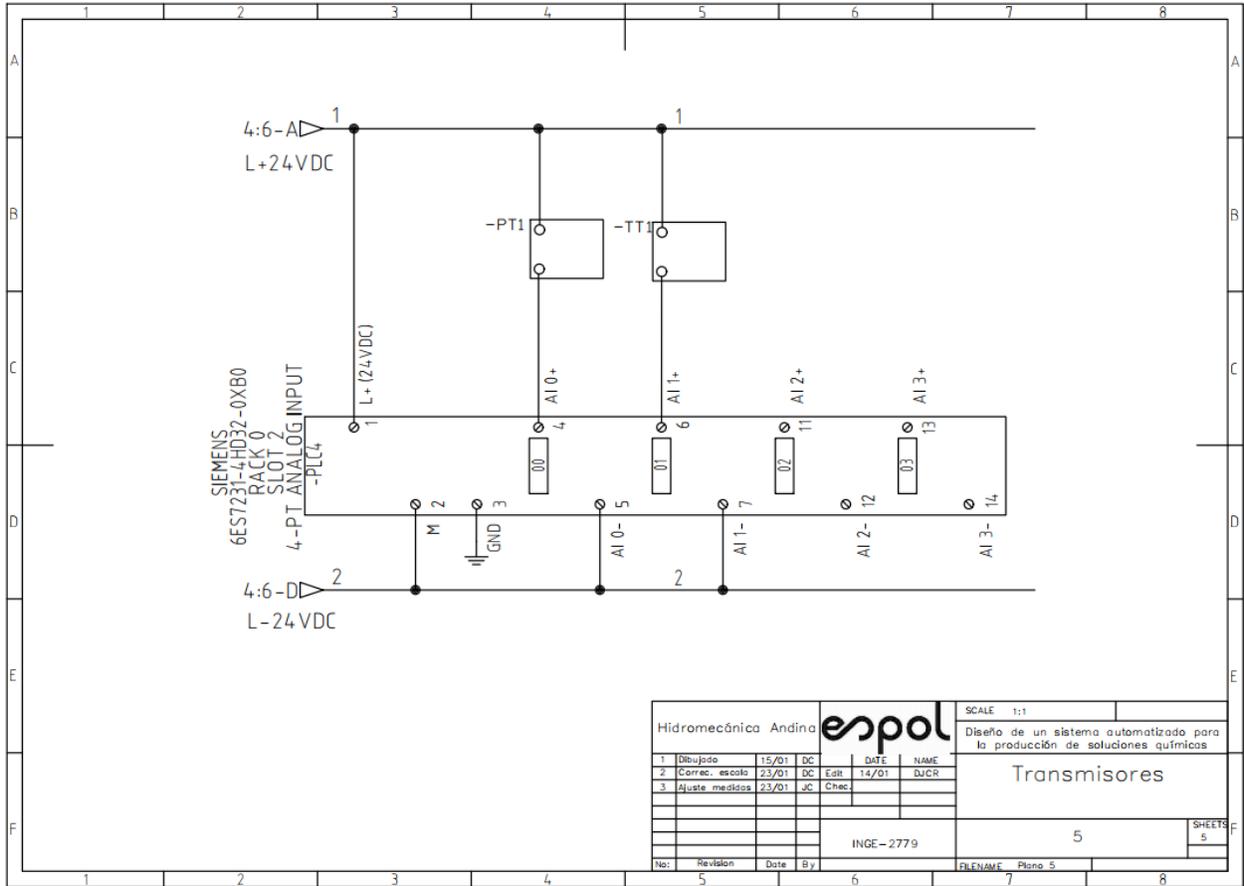
PLANO 4

Salidas PLC



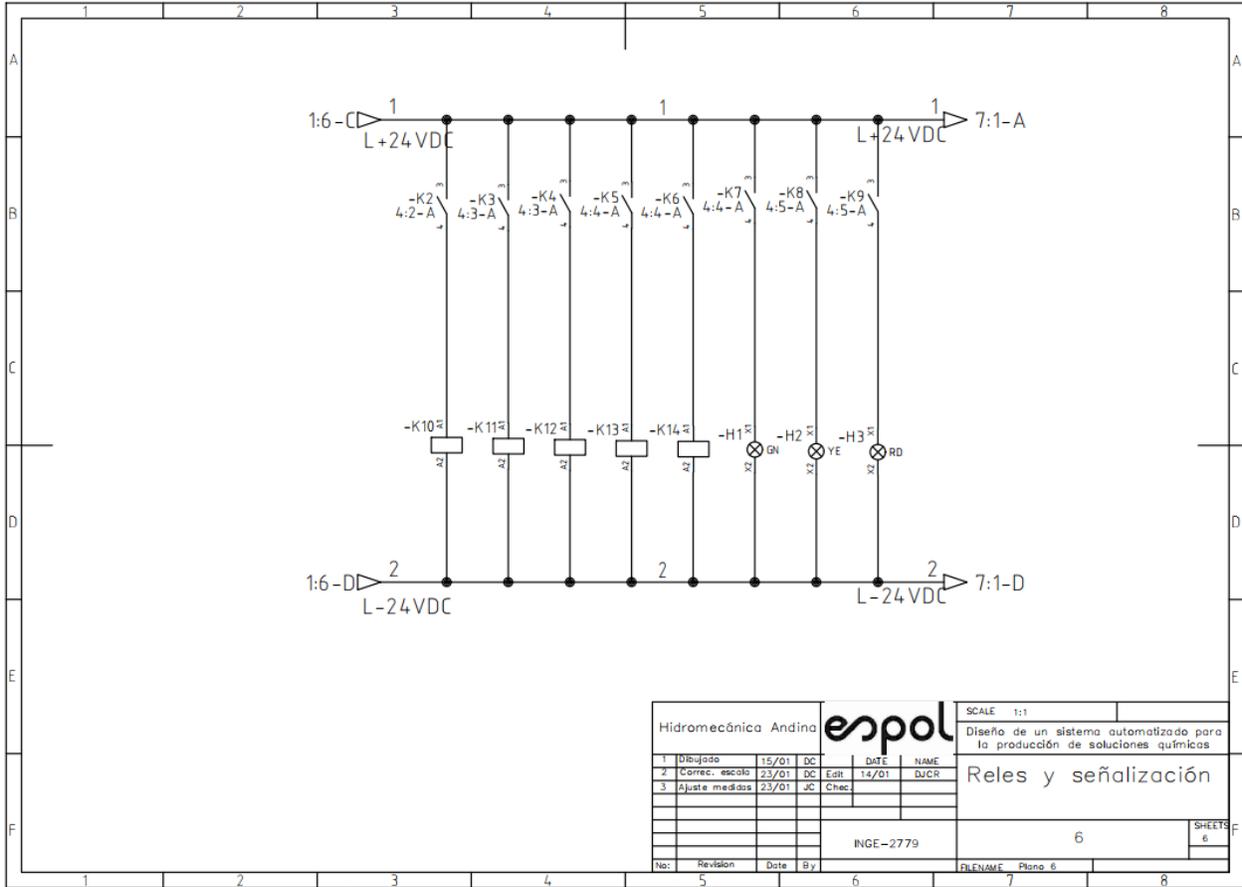
PLANO 5

Transmisores



PLANO 6

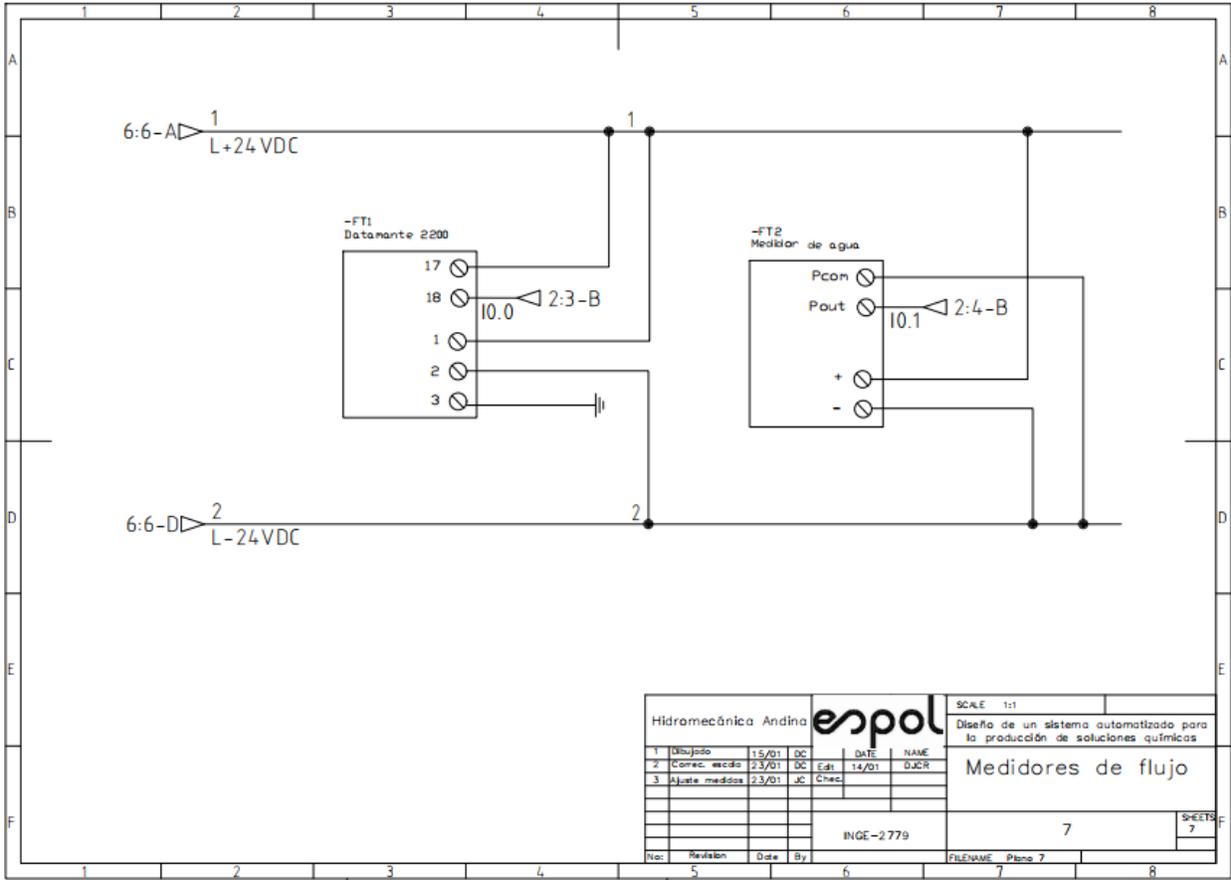
Relés y señalización



Hidromecánica Andina		espol		SCALE 1:1
Diseño de un sistema automatizado para la producción de soluciones químicas				
1	Dibujado	15/01	DC	
2	Correc. escala	23/01	DC	Edi 14/01 DJCR
3	Ajuste medidas	23/01	JC	Chec
				Reles y señalización
INGE-2779				6
				SHEETS 6
No:	Revision	Date	By	FILENAME Plano 6

PLANO 7

Medidores de flujo



Hidromecánica Andina		espol		SCALE 1:1
Diseño de un sistema automatizado para la producción de soluciones químicas				
1	Dibujado	15/01	DC	
2	Correc. escafo	23/01	DC	Edi 14/01 DJCR
3	Ajuste medidas	23/01	JC	Chec
				Medidores de flujo
INGE-2779				7
No:	Revisión	Date	By	FILENAME Plano 7
				SHEET 7