



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA
AUTOMATIZAR EL PROCESO DE LECHADA DE CAL EN LA
EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMÁN**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

ELABORADO POR

Bach. Puse Guerrero Edward Fernando

Bach. Romero Napo Benji Jefferson

ASESOR

Mg. Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly

LAMBAYEQUE – PERÚ

2020

TESIS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA AUTOMATIZAR EL PROCESO DE LECHADA DE CAL EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMÁN

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES:




BACH. PUSE GUERRERO EDWARD FERNANDO



BACH. ROMERO NAPO BENJI JEFFERSON

ASESOR:



MG. ING. ROMERO CORTEZ OSCAR UCHELLY

TESIS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA AUTOMATIZAR EL
PROCESO DE LECHADA DE CAL EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL
TUMÁN

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



ING. RAMÍREZ CASTRO MANUEL
PRESIDENTE



MTRO. ING. OBLITAS VERA CARLOS LEONARDO
SECRETARIO



MG. ING. CHAMÁN CABRERA LUCÍA ISABEL
VOCAL



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N° 001-2021-D/FACFyM

Siendo las 11 am del día 05 de Enero del 2021, se reunieron vía plataforma virtual, <https://meet.google.com/oez-btap-dcylo> los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

Diseño de un Sistema de Control para Automatizar el Proceso de Lechada de Cal en la Empresa Agroindustrial Tumán.

Designados por Resolución N° 072-VIRTUAL-2020-D/FACFyM de fecha 06 de julio 2020.

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro	Presidente
Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera	Secretario
Mg. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez, nombrado por Resolución N° 058-2020-D/FACFyM de fecha 15 de Enero 2020

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 322-VIRTUAL-2020-D/FACFyM de fecha 28 de diciembre 2020.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: Puse Guerrero Edward Fernando y Romero Napo Benji Jefferson y tuvo una duración de 50 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de **(14) (Catorce)** en la escala vigesimal, mención **(Regular)**.

Por lo que queda (n) apto (s) para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Electrónico**, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12 m se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Secretario

Mg. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera
Vocal

Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez
Asesor

AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Electrónica por los conocimientos brindados a lo largo de la carrera lo cual hizo posible obtener varios logros incluyendo la culminación de este proyecto de investigación, en especial a nuestro asesor de tesis.

Los autores.

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, **Puse Guerrero Edward Fernando** y **Romero Napo Benji Jefferson**, investigadores principales, y el **Mg. Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly**, asesor de nuestro trabajo de investigación denominado **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA AUTOMATIZAR EL PROCESO DE LECHADA DE CAL EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMÁN”**, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado ni contiene datos falsos. En caso se demostrará lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y, por ende, el proceso administrativo necesario, que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 5 de diciembre del 2020

AUTORES:



BACH. PUSE GUERRERO EDWARD FERNANDO



BACH. ROMERO NAPO BENJI JEFFERSON

ASESOR:



MG. ING. ROMERO CORTEZ OSCAR UCHELLY

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo y los consejos brindados durante cada etapa de mi vida.

Bach. Romero Napo Benji Jefferson.

A mis padres por haberme forjado una persona de bien y acompañándome siempre en mis logros.

Bach. Puse Guerrero Edward Fernando.

RESUMEN

Este proyecto de tesis tuvo como objetivo principal diseñar un sistema de control para automatizar el proceso de lechada de cal o encalado en la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

Se realizaron visitas a la empresa azucarera con la finalidad de conocer el estado actual de los instrumentos de medición, transmisión, control y de los actuadores utilizados en el proceso de encalado. Al concluir las visitas, se pudo comprobar que el jugo mezclado, proveniente de la etapa de molienda, es almacenado en dos balanzas con capacidades de 120 y 140 t/h, respectivamente, además, los operarios utilizan papel tornasol para medir el valor de pH del jugo mezclado. Cuando no hay papel tornasol, los operarios llevan muestras de jugo mezclado a un laboratorio, generando pérdidas de tiempo debido al traslado y a la espera de resultados. Luego de recibir los resultados, los operarios regulan las válvulas de alimentación de cal de las balanzas para obtener el valor óptimo de pH (7). Después de conocer esta problemática, se establecieron los criterios de diseño del sistema de control para automatizar el proceso. El sistema de control contará con un PLC, un HMI, un sensor que se encargará de medir el pH del jugo mezclado y una válvula dosificadora de cal ubicada en la línea de alimentación de las balanzas, además, tendrá la capacidad de gestionar las alarmas e incidencias que puedan ocurrir en el proceso. De esta manera, los operarios conocerán la medida de pH sin tener que llevar muestras al laboratorio.

Palabras clave: Sistema de control, Automatización industrial, Lechada de cal.

ABSTRACT

The main objective of this thesis project was to design a control system to automate the lime milk or liming process at Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

Visits were made to the sugar company in order to know the current status of the measurement, transmission, control instruments and the actuators used in the liming process. At the end of the visits, it was possible to verify that the mixed juice, from the milling stage, is stored in two balances with capacities of 120 and 140 t / h, respectively, in addition, the operators use litmus paper to measure the pH value. of mixed juice. When litmus paper is not available, operators bring mixed juice samples to a laboratory, wasting time due to transport and waiting for results. After receiving the results, the operators adjust the scale's lime feed valves to obtain the optimum pH value (7). After learning about this problem, the control system design criteria were established to automate the process. The control system will have a PLC, an HMI, a sensor that will be in charge of measuring the pH of the mixed juice and a lime dosing valve located on the balance feed line, in addition, it will have the ability to manage alarms and incidents that may occur in the process. In this way, operators will know the pH measurement without having to take samples to the laboratory.

Keywords: *Control system, Industrial automation, Whitewash.*

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO I ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.1. Información General	10
1.1.1. Título.....	10
1.1.2. Personal Investigador.....	10
1.1.3. Línea de Investigación	10
1.1.4. Lugar de Ejecución	10
1.1.5. Duración Estimada del Proyecto.....	10
1.2. Planteamiento de la Investigación.....	11
1.2.1. Síntesis de la Situación Problemática	11
1.2.2. Formulación del Problema de Investigación.....	13
1.2.3. Hipótesis del Problema	13
1.2.4. Objetivos	14
1.3. Diseño Teórico	15
1.3.1. Antecedentes	15
1.3.2. Definición y Operacionalización de Variables	17
1.3.3. Diseño Metodológico.....	17
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.	19
2.1.1. Ubicación Geográfica	20

2.1.2.	Altura y Clima.....	20
2.1.3.	Suelo y Superficie.....	20
2.1.4.	Etapas de Producción.....	20
2.2.	Control de Procesos Industriales.....	23
2.2.1.	Sistemas de Control de Feedback.....	26
2.2.2.	Sistemas de Control de Feedforward.....	28
2.2.3.	Elementos de un Controlador Feedback.....	29
2.3.	Instrumentación Industrial.....	31
3.	CAPÍTULO III DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	34
3.1.	Filosofía de Control.....	34
3.1.1.	Lista de Equipos.....	35
3.1.2.	Bloques de Función.....	36
3.1.3.	Lista de Señales.....	37
3.1.4.	Descripción de la Lógica de Control.....	37
3.1.5.	Diagramas Lógicos de Control.....	38
3.1.6.	Función de Transferencia.....	40
3.2.	Selección de Dispositivos.....	45
3.2.1.	ITM Trifásico.....	45
3.2.2.	ITM monofásico.....	46
3.2.3.	ITM Unipolar.....	47

3.2.4.	Fuente de Alimentación	49
3.2.5.	Guardamotor	49
3.2.6.	Contactador.....	50
3.2.7.	Panel HMI.....	51
3.2.8.	Procesador.....	53
3.2.9.	Módulo de Entradas Digitales.....	54
3.2.10.	Módulo de Salidas Digitales	55
3.2.11.	Módulo de E/S analógicas.....	55
3.2.12.	Switch Ethernet	56
3.2.13.	Patch Cord.....	57
3.2.14.	Pulsadores.....	58
3.2.15.	Pilotos Luminosos.....	59
3.2.16.	Sensor de pH	60
3.2.17.	Transmisor de pH	61
3.2.18.	Válvula Modulante.....	62
3.3.	Diseño de Planos	63
3.3.1.	Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID).....	63
3.3.2.	Circuito de Potencia y Circuito de Control.....	64
3.3.3.	Detalles de Conexión de Instrumentos	68
3.4.	Diseño de la Lógica de Control.....	70

3.4.1.	Selección de CPU, Bastidor y Creación de E/S (digitales y analógicas).....	70
3.4.2.	Bloque de función para bombas centrífugas	73
3.4.3.	Escalamiento de E/S Analógicas y Controlador PID.....	74
3.5.	Diseño de la Interfaz Humano-Máquina	78
3.6.	Presupuesto.....	81
4.	CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	83
4.1.	Simulación del Sistema de Control	83
4.1.1.	Simulación del Control de Bomba.....	83
4.1.2.	Simulación de la Regulación de Cal	89
5.	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
5.1.	Conclusiones	95
5.2.	Recomendaciones.....	97
6.	CAPÍTULO VI BIBLIOGRAFÍA	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: P&ID del Proceso.....	12
Figura 2: Agroindustrial Tumán S.A.A.....	19
Figura 3: Intercambiador de Calor.....	24
Figura 4: Variables de un Sistema de Control.....	25
Figura 5: Sistema de Control Feedback.....	27
Figura 6: Sistema de Control Feedforward.....	28
Figura 7: Elementos de un Sistema de Control	30
Figura 8: P&ID	32
Figura 9: Bloque de Función para Bomba.....	36
Figura 10: Lógica de Control para Bloque de Función de Bomba.....	39
Figura 11: Medidas de pH Normalizadas	40
Figura 12: Ecuación para la Función de Transferencia	41
Figura 13: Parámetros de la Función de Transferencia	41
Figura 14: Configuración de Señal Escalón	42
Figura 15: Respuesta al Escalón.....	42
Figura 16: Respuesta con Control Proporcional.....	43
Figura 17: Respuesta con Control PID.....	44
Figura 18: Constantes y Ecuación del Controlador PID.....	45
Figura 19: ITM Trifásico.....	46
Figura 20: ITM Monofásico	47
Figura 21: ITM Unipolar	48
Figura 22: Fuente de Alimentación	49

Figura 23: Guardamotor	50
Figura 24: Contactor	51
Figura 25: HMI.....	52
Figura 26: CPU	53
Figura 27: Módulo de Entradas Digitales.....	54
Figura 28: Módulo de Salidas Digitales	55
Figura 29: Módulo de E/S Analógicas	56
Figura 30: Switch Ethernet.....	57
Figura 31: Patch Cord.....	58
Figura 32: Pulsadores	59
Figura 33: Pilotos Luminosos.....	60
Figura 34: Sensor de pH	61
Figura 35: Transmisor de pH.....	62
Figura 36: Válvula Modulante.....	62
Figura 37: P&ID para Control de pH	63
Figura 38: Circuito de Potencia.....	64
Figura 39: Circuito de Control – Entradas Digitales	65
Figura 40: Circuito de Control – Salidas Digitales.....	66
Figura 41: Circuito de Control – E/S Analógicas.....	67
Figura 42: Detalles de Conexión de Válvula Modulante	68
Figura 43: Detalles de Conexión de Sensor/Transmisor de pH.....	69
Figura 44: Selección del Procesador	70
Figura 45: Selección del Bastidor.....	71

Figura 46: Configuración del Bus PL.....	71
Figura 47: Creación de Entradas Digitales	71
Figura 48: Creación de Salidas Digitales	71
Figura 49: Creación de Entrada Analógica.....	72
Figura 50: Creación de Salida Analógica	72
Figura 51: Variables Adicionales	72
Figura 52: Dirección IP de CPU	72
Figura 53: E/S para Bloque de Función.....	723
Figura 54: Lógica de Bloque de Función	73
Figura 55: Lógica para Control de Bomba	734
Figura 56: Ecuación de Linealidad para Entrada Analógica	745
Figura 57: Escalamiento de Entrada Analógica en Software	75
Figura 58: Configuración del Controlador PID en Software.....	756
Figura 59: Ecuación de Linealidad para Salida Analógica.....	767
Figura 60: Escalamiento de Salida Analógica en Software.....	778
Figura 61: Pantalla Principal	78
Figura 62: Pantalla de Proceso	79
Figura 63: Ventana Emergente PID.....	80
Figura 64: Ventana Emergente FALLAS	80
Figura 65: Dirección IP HMI.....	81
Figura 66: Pantalla PRINCIPAL en Simulación	83
Figura 67: Permisivo de Marcha Desactivado.....	84
Figura 68: Permisivo de Marcha Activado	84

Figura 69: Bomba Activada.....	85
Figura 70: Bomba Desactivada sin Falla (PLC)	86
Figura 71: Bomba Desactivada sin Falla (HMI)	86
Figura 72: Bomba Desactivada por Falla (HMI).....	87
Figura 73: Bomba Desactivada por Falla (PLC)	88
Figura 74: Falla por Sobrecarga Persistente	88
Figura 75: Falla por Sobrecarga Reseteada	89
Figura 76: Ingreso de Parámetros del Controlador PID	90
Figura 77: Válvula Dosificadora Abierta al 100% en PLC	91
Figura 78: Válvula Dosificadora Abierta al 100% en HMI.....	91
Figura 79: Válvula Dosificadora Abierta al 80% en PLC	92
Figura 80: Válvula Dosificadora Abierta al 80% en HMI.....	93
Figura 81: Válvula Dosificadora Cerrada en PLC.....	94
Figura 82: Válvula Dosificadora Cerrada en HMI	94
Figura 83: Tiempo de Respuesta del Sistema Propuesto.....	946

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Instrumentación del Proceso.....	12
Tabla 2: Definición y Operacionalización de Variables	17
Tabla 3: Lista de Equipos	35
Tabla 4: Lista de Señales	37
Tabla 5: Medida de Flujo y pH de la Balanza N°1	40
Tabla 6: Instrumentación del P&ID Propuesto.....	63
Tabla 7: Lista de Entradas Digitales	65
Tabla 8: Lista de Salidas Digitales	66
Tabla 9: Lista de E/S Analógicas.....	67
Tabla 10: Lista de Materiales para Válvula Modulante.....	68
Tabla 11: Lista de Materiales para Sensor/Transmisor de pH.....	70
Tabla 12: Escalamiento de Entrada Analógica	74
Tabla 13: Escalamiento de Salida Analógica	77
Tabla 14: Precio de Equipos	81
Tabla 15: Precio de Montaje, Configuración y Puesta en Marcha	82
Tabla 16: Costo Total del Proyecto	82

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de tesis tuvo como objetivo principal diseñar un sistema de control para automatizar el proceso de lechada de cal o encalado en la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

En el Capítulo I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN, se presenta la situación problemática que aqueja a la empresa respecto al proceso de encalado, el estado actual de sus instrumentos de campo y la descripción de cómo los operarios toman muestras de jugo mezclado para ser analizadas en el laboratorio del ingenio azucarero.

En el Capítulo II: MARCO TEÓRICO, se describen brevemente las etapas para la producción de azúcar en la empresa agroindustrial Tumán S.A.A., las bases teóricas para entender el funcionamiento de los sistemas de control y la importancia de la automatización e instrumentación industrial.

En el Capítulo III: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL, se realiza la descripción general del proceso de lechada de cal y de sus falencias para proponer una solución factible. Luego, se muestra la filosofía de control, la selección de dispositivos, la elaboración de planos eléctricos y de instrumentación, el diseño de la interfaz gráfica y la lógica de control para el sistema.

En el Capítulo IV: RESULTADOS, se muestra la simulación realizada para comprobar el buen funcionamiento del sistema de control a través de los softwares Control Expert y Vijeo Designer. De esta manera, se pudo comprobar que el control de las bombas centrífugas y de la regulación de las válvulas dosificadoras es eficiente.

En el Capítulo V: CONCLUSIONES, se presentan las conclusiones obtenidas al terminar esta investigación.

CAPÍTULO I

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Información General

1.1.1. Título

Diseño de un Sistema de Control para Automatizar el Proceso de Lechada de Cal en la Empresa Agroindustrial Tumán.

1.1.2. Personal Investigador

1.1.2.1. Autores

Bach. Puse Guerrero Edward Fernando.

Bach. Romero Napo Benji Jefferson.

1.1.2.2. Asesor

Mg. Ing. Romero Cortez Óscar Uchelly.

1.1.3. Línea de Investigación

Esta investigación está orientada a la Especialidad de Automatización Industrial.

1.1.4. Lugar de Ejecución

Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A., Distrito de Tumán, Región Lambayeque.

1.1.5. Duración Estimada del Proyecto

La investigación tendrá una duración de 3 meses aproximadamente.

1.1.5.1. Fecha de inicio

La investigación se inició en agosto del 2020.

1.1.5.2. Fecha de término

La investigación se concluyó en noviembre del 2020.

1.2. Planteamiento de la Investigación

1.2.1. Síntesis de la Situación Problemática

La Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. se desenvuelve dentro del sector azucarero en las actividades del cultivo de caña, su transformación agroindustrial y comercialización de azúcar tanto en el mercado interno como en el externo (Agroindustrial Tumán S.A.A., 2015).

En la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A., el proceso de encalado o lechada de cal consiste en mezclar el jugo mezclado proveniente del trapiche de la etapa de molienda con el jugo de filtros (retroalimentación de clarificadores) e hidróxido de calcio (cal) con la finalidad de regular el valor de pH del jugo mezclado a 7. Según (Rein, 2012), los niveles considerados permitidos de pH oscilan entre 7 y 8,2.

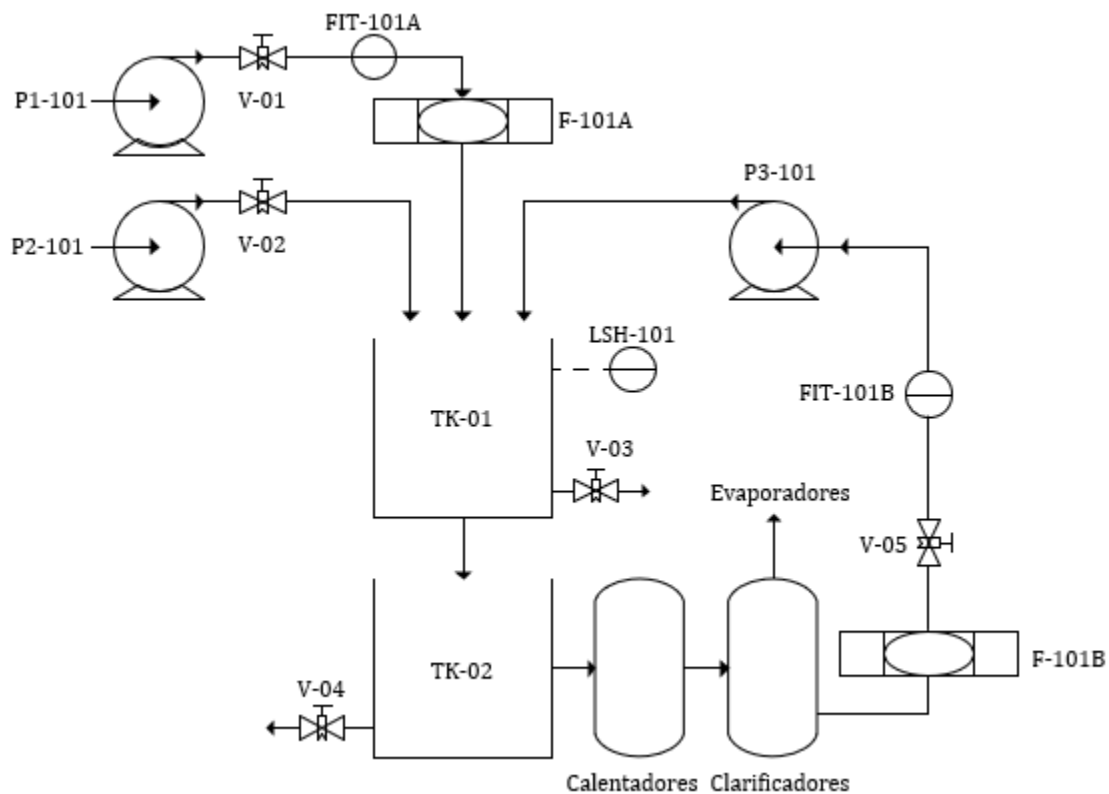
El peso del jugo mezclado es registrado por las balanzas mecánicas N°1 y N°2, cuyas capacidades son de 140 t/h y 120 t/h, respectivamente. El jugo antes de llegar a las balanzas pasa por un colador de jugo mezclado para disminuir la cantidad de bagacillos en suspensión y otras impurezas, el ingreso de jugo mezclado en las balanzas continua hasta que es detectado un nivel alto por una boya y se detiene la bomba de impulsión. En este momento, un operario realiza la medida de pH utilizando papel tornasol o lleva muestras a un laboratorio implementado dentro del ingenio azucarero para ser analizadas y determinar su grado de calidad. Luego de esto, otro operario se encarga de regular la válvula de ingreso de cal en las balanzas. La medida de pH y la regulación de válvulas se repiten hasta lograr el valor de pH deseado. La cal que será utilizada en el proceso llega a las balanzas por bombeo a través de una tubería. Al añadir la cal a las balanzas, esta neutraliza el jugo mezclado y actúa sobre los compuestos no-azúcares para precipitar una parte de ellos, y otros quedan en el jugo, evitando la cristalización de la sacarosa. Finalmente, luego de lograr neutralizar el pH del jugo mezclado, las compuertas de las balanzas son abiertas para

depositar el jugo en un tanque de almacenamiento hasta su posterior uso en los tanques clarificadores.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de instrumentación del proceso de lechada de cal.

Figura 1

P&ID del Proceso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1

Instrumentación del Proceso

TAG	Descripción
P1-101	Bomba de jugo mezclado (desde Molienda)
P2-101	Bomba de cal (desde Sala de preparación)
V-01	Válvula de jugo mezclado (tipo manual)
V-02	Válvula de cal (tipo manual)
FIT-101A	Transmisor Indicador de Flujo (jugo mezclado)
F-101A	Filtro colador de jugo mezclado
TK-01	Balanza N°1

LSH-101	Detector de nivel alto
V-03	Válvula para tomar muestras
TK-02	Tanque de almacenamiento
V-04	Válvula para tomar muestras
F-101B	Filtro colador de cachaza
FIT-101B	Transmisor Indicador de Flujo (jugo de filtros)
V-05	Válvula de filtro colador de cachaza
P3-101	Bomba de jugo filtrado

Fuente: Elaboración propia

Debido a la acción tardía de los operarios para obtener la medida de pH y a la pérdida de tiempo al trasladar muestras y esperar los resultados del análisis, el proceso se vuelve lento. Además, la cantidad de cal que se debe añadir al jugo mezclado debe ser regulada con precisión, pues un exceso de cal quema la glucosa y el azúcar sale negra, mientras que una disminución de esta aumenta la acidez y afecta su clarificación. Para solucionar esta problemática, se propone el diseño de un sistema de control con la capacidad de monitorear y controlar la medida de pH a través de un PLC y un sensor/transmisor de pH del jugo mezclado, con base a esta medida se pretende regular el porcentaje de apertura/cierre de una válvula dosificadora de cal hasta obtener el valor de pH deseado. Asimismo, se incluirá un indicador local de brix. De esta manera, se evitará la necesidad de llevar muestras hacia el laboratorio y perder tiempo de trabajo trasladándolas.

1.2.2. Formulación del Problema de Investigación

¿Cómo diseñar un sistema de control para automatizar el proceso de lechada de cal en la Empresa Agroindustrial Tumán?

1.2.3. Hipótesis del Problema

Si diseñamos un sistema de control formado por un sensor/transmisor de pH, un controlador programable y una válvula modulante, se podrá contrarrestar automáticamente la acidez del jugo mezclado almacenado en la balanza a través de la regulación de hidróxido de calcio

(cal) y se evitará que los operarios tomen muestras de forma manual, evitando de esta manera que se pierda tiempo llevando dichas muestras al laboratorio.

1.2.4. Objetivos

1.2.4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de control para automatizar el proceso de lechada de cal en la Empresa Agroindustrial Tumán.

1.2.4.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- Visitar las instalaciones de la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. para obtener información actual sobre el proceso de lechada de cal y establecer las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los equipos de instrumentación y control para el sistema de control.
- Utilizar las medidas de pH registradas por lo operarios para determinar la función de transferencia del proceso y determinar los parámetros del controlador PID (K_p , T_i , T_d) utilizando la herramienta PID Tuner de Matlab.
- Diseñar los planos eléctricos y los diagramas de tuberías e instrumentación del proceso (P&ID).
- Diseñar la lógica de control para implementarla en el PLC y la interfaz gráfica para visualizar las principales variables del proceso en el panel HMI.
- Seleccionar los sensores, transmisores, controladores y actuadores para supervisar y controlar el pH en los tanques de jugo mezclado, así como del control de las bombas y válvulas.
- Simular el funcionamiento del sistema de control.

1.3. Diseño Teórico

1.3.1. Antecedentes

A) Nacional

Título: Sistema de Control Automatizado para Optimizar el Proceso de Clarificación del Jugo de la Caña de Azúcar en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.

Institución: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.

Año de publicación: 2015.

Tesis para optar el TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO presentada por: Nieto Díaz, Luis Franco y Romero Navarro, Richard Rafael.

Resumen: Este proyecto de tesis se diseñó un sistema de control automatizado en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A. En este ingenio azucarero existen dos sub procesos automatizados en dos etapas diferentes cuyo fin es mantener estable el pH. El sistema de control propuesto por los investigadores está formado de un Transmisor Inteligente de Concentración/ Densidad Smar – DT301 controladores, un PLC Siemens 1200 (CPU 1215C), una válvula Bray Serie 40-45, un Sensor Diferencial y Analizador y una Válvula Bray Serie 20 / 21 Con el primer sub proceso se espera obtener una lectura del grado de concentración en un rango de 24-25 grados Brix del transmisor en la preparación de cal, esto con la finalidad de neutralizar el pH de jugo mezclado que tiene un grado de acidez inadecuado para la producción de azúcar. En el segundo sub proceso se realiza la clarificación para lograr un nivel de pH óptimo, de esta manera, se logran reducir las pérdidas de sacarosa y se incrementa el rendimiento en todo el proceso. Asimismo, con el sistema propuesto se ha intentado evitar pérdidas económicas, aumentar la vida útil de los equipos y reducir posibles errores en el muestreo manual.

B) Internacional

Título: Diseño de un Sistema de Monitoreo y Control para la Clarificación y Evaporación del Jugo de la Caña de Azúcar (“Meladura”).

Institución: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil – Ecuador.

Año de publicación: 2016.

Tesis para optar el TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD con especialización en ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL presentada por: Cruz Lavayen, Norma Kattiuska y Parrales Bernabé, Eduardo Fabián.

Resumen: En este proyecto de tesis se realizó un estudio del proceso de producción del jarabe de azúcar que abarca la etapa de trapiche donde se registra el peso del jugo mezclado hasta la obtención de jarabe, hasta llegar a los procesos de depuración y evaporación. En este proyecto de tesis se utilizaron Válvulas mariposa Keystone, un posicionador de válvula inteligente FY301, celdas de carga tipo BENDING BEAM, Electroválvulas tipo GN6, un Sensor de nivel capacitivo CG – 2N, un Sensor inductivo tipo E2E 3-WIRE DC, un Transmisor de Presión LD291, Transmisor de pH 870PH, Bombas HS/Whirl Flo, Bombas SP 3298, un Transmisor de Temperatura TT301 y un Trasmisor de densidad y concentración para poder realizar la simulación del proceso que permite obtener la meladura de azúcar. Los softwares e Cimplicity e InTouch fueron utilizados por los investigadores para monitorear y controlar todas las variables involucradas en los procesos.

1.3.2. Definición y Operacionalización de Variables

En este proyecto de investigación se distinguen las siguientes variables:

Tabla 2

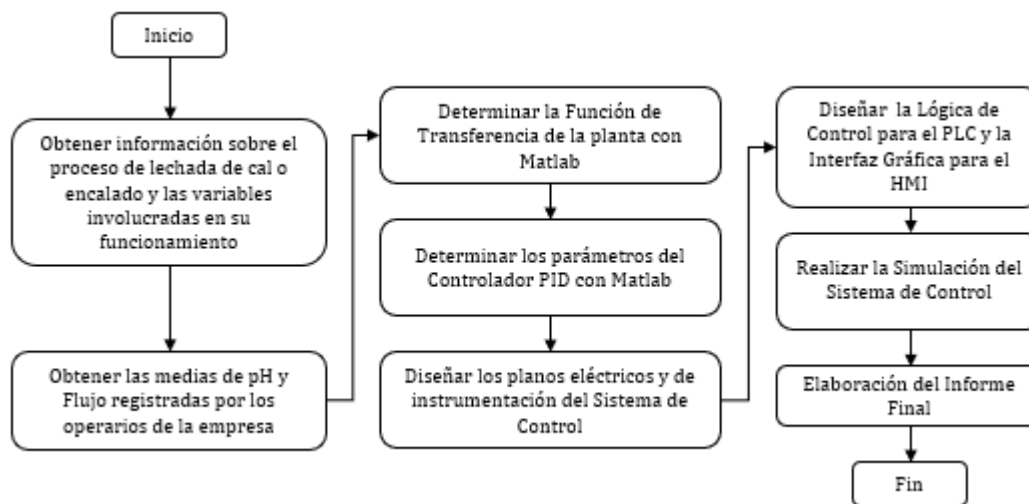
Definición y Operacionalización de Variables

Variables	Definición Operacional	Indicadores
Independiente		
Diseño de un sistema de control	El sistema se encargará de supervisar y controlar el pH del jugo mezclado, además detectará el nivel alto en la balanza mediante una boya, y mostrará el valor de flujo de jugo entrante, el brix, el porcentaje de regulación de la válvula dosificadora y el estado de la bomba de cal.	pH Flujo Brix Regulación de Válvula
Automatizar el proceso de lechada de cal	Automatizando el proceso de lechada de cal, los operarios podrán observar el valor de pH del jugo mezclado a través de un panel HMI. De esta manera, se evitará llevar muestras de meladura hacia el laboratorio y esperar entre 20 a 30 minutos para obtener los resultados de calidad y proceder a enviar el jugo mezclado hacia los calentadores.	Tiempo (horas) Producción (toneladas)

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3. Diseño Metodológico

1.3.3.1. Diseño de Contrastación de Hipótesis



Fuente: Elaboración propia.

1.3.3.2. Población

Las principales empresas azucareras de la región Lambayeque son 05:

- Empresa Agroindustrial Pomalca.
- Empresa Agropucalá S.A.A.
- Azucarera del Norte S.A.C.
- Empresa Agroindustrial Cayaltí.
- Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

1.3.3.3. Muestra

Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

1.3.3.4. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales

En esta investigación se utilizarán los siguientes recursos:

- Bibliografía sobre los procesos de producción de azúcar, sistemas de control automatizados e instrumentación industrial.
- Software de programación de PLC: Control Expert v14.1 (Schneider Electric).
- Software de programación de interfaces humano-máquina (HMI): Vijeo Designer v6.2 (Schneider Electric).
- Software de diseño de planos eléctricos: AutoCAD Electrical 2018 (versión de estudiante).
- Software para estimar funciones de transferencia a partir de datos experimentales: PID Tuner de Matlab.
- Catálogos y libros de instrumentos de medición, transmisión y control.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.

Agroindustrial Tumán S.A.A es un ingenio azucarero ubicado en el distrito de Tumán, provincia de Chiclayo, región de Lambayeque. La empresa se dedica a la producción de azúcar a partir del cultivo de la caña de azúcar. La empresa azucarera continúa esforzándose por cumplir con los más altos estándares en organización industrial, calidad productiva y ética de trabajo, así como el cumplimiento de las regulaciones que lo posicionan de acuerdo con los requisitos del marketing internacional (Agroindustrial Tumán S.A.A., 2015)

Figura 2

Agroindustrial Tumán S.A.A.



Fuente: <https://andina.pe/agencia/noticia.aspx?id=202426>

2.1.1. Ubicación Geográfica

La ciudad de Tumán está ubicada a 19 km de la ciudad de Chiclayo, su territorio está formado por tierras cultivadas con caña de azúcar, en su gran mayoría propiedad de Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. Tumán se encuentra ubicada entre las coordenadas 6 ° 44 "47" de latitud sur y 79 ° 42 "16" de longitud oeste (ProInversión, 2012).

2.1.2. Altura y Clima

Tumán está a 56 metros sobre el nivel del mar. a la altura del valle de Chancay regado por los ríos: Taymi, Lambayeque y Reque. La temperatura promedio anual oscila entre 24 y 32 ° C y cae a 17 ° C en invierno (Portal Lambayeque, 2018).

2.1.3. Suelo y Superficie

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de la tierra están asociadas con el cultivo, el agua, el medio ambiente, la flora y la fauna, es por ello que afectan en gran medida la producción de caña de azúcar. Se ha confirmado científicamente que la siembra de caña de azúcar necesita grandes cantidades de agua por hectárea, debido a que sus raíces absorben este elemento en grandes cantidades. El área de Tumán 11 723.03 ha (Gobierno Regional de Lambayeque, 2012).

2.1.4. Etapas de Producción

A continuación, se muestran las etapas del proceso de producción de azúcar en la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. (Agroindustrial Tumán S.A.A., 2018):

PESADO DE CAÑA: Los tráileres trasladan la caña de azúcar desde el campo hacia las instalaciones de la fábrica. Luego se procede a pesar la caña mediante una balanza, la cual tiene una capacidad de 60 t y unas dimensiones de 18 m de largo y 4 m de ancho.

DESCARGADO DE CAÑA: Después del pesaje de la caña de azúcar, los tráileres se ubican debajo de una grúa de hilo, la cual tiene una capacidad de 28 t. La grúa de hilo levanta la caña y la traslada hasta las mesas alimentadoras, las cuales tienen una capacidad de 80 t. Las mesas alimentadoras sirven como almacenamiento temporal de la caña.

PREPARACIÓN Y LAVADO: Debido a que la caña viene desde el campo, se encuentra mezclada con tierra y cogollo. La finalidad del lavado es quitar las impurezas de la caña, para lo cual cuenta con dos sistemas:

Sistema de lavado en seco: Está formado por 7 rodillos de 22 cm de diámetro, los cuales son activados por un motor de 20 HP y giran a 85 RPM.

Sistema de aire comprimido: Está formado por 2 ventiladores con una capacidad de 150 pie³/m por los que circula aire a gran presión.

Cuando la caña está limpia, es cortada en trozos de 4 a 8 pulgadas por 22 machetes que gira a 550 RPM, los cuales son accionados por un motor de 280 HP. Los trozos de caña van hacia un desfibrador de 78 pulgadas de ancho.

MOLIENDA DE CAÑA: En esta etapa se obtiene el jugo de la caña. Para lograr esto, la caña es trasladada al trapiche, el cual está formado por 5 molinos de 3 rodillos y son accionados por 3 turbinas a vapor: la turbina N° 1 mueve el molino N° 1, la turbina N° 2 mueve los molinos N° 2 y N° 3, la turbina N° 3 mueve los molinos N° 4 y N° 5. El jugo que se obtiene del primer molino se denomina jugo mezclado y es llevado hacia las balanzas por un sistema de bombas y tuberías. En el último molino se agrega agua al bagazo para poder obtener la mayor cantidad de sacarosa. El bagazo sobrante representa un 2,8% de pérdida de sacarosa y es trasladado hacia los calderos para ser usado como combustible.

PESAJE DE JUGO: En esta etapa se pesa el jugo mezclado que llega desde el trapiche. El peso es registrado por las balanzas N°1 y N°2, cuya capacidad es de 140 t/h y 120 t/h, respectivamente. En esta etapa también se realiza el encalado del jugo mezclado. El encalado consiste en mezclar la cal con el jugo mezclado hasta obtener un pH de 7. La reacción química que se produce logra absorber las impurezas que se encuentran en el jugo.

CALENTADORES DE JUGO: Después de agregar la cal, el jugo mezclado es trasladado hacia 4 tanques calentadores que elevan su temperatura hasta 105°C. La finalidad de este proceso es acelerar la clarificación del jugo mezclado, el cual es de color turbio y contiene agua, tierra, bagacillos en suspensión y otros elementos propios del jugo.

CLARIFICACIÓN: El jugo encalado y calentado a 105°C es trasladado hacia 2 tanques cilíndricos, los cuales tienen una capacidad individual de 360 t y 168 t, respectivamente. Dentro de los tanques, se produce el efecto de sedimentación gracias a la cal y el calor del jugo. De esta manera, las impurezas van hacia el fondo de los tanques y el jugo sale de los clarificadores con un color cristalino, a una temperatura de 98°C y con un pH que varía de 6,8 a 7. Después de esto, el jugo clarificado pasa a la etapa de evaporación. Los desechos extraídos del tanque se denominan cachaza. La cachaza es mezclada con bagacillo pulverizado y trasladada hacia un filtro. El filtro succiona el jugo que aún pueda quedar en la cachaza para trasladarlo hacia el encalado. En la superficie del filtro se forma un desecho denominado torta de cachaza, la cual debe ser limpiada con una cuchilla antes de ingresar más cachaza al filtro. Este desecho es llevado al campo y utilizado como abono para el cultivo de caña.

EVAPORADORES: El jugo clarificado antes de entrar al proceso de evaporación es llevado hacia 2 precalentadores que elevan su temperatura de 98°C a 125°C. Para que el jugo clarificado pueda ser evaluado, es necesario que el vapor tenga una temperatura de 105°C, es decir

mayor a la temperatura de entrada del jugo. El proceso de evaporación tiene como objetivo eliminar el agua y otros elementos para obtener un jugo puro y concentrado, el cual es denominado jarabe.

CRISTALIZACIÓN: La cristalización tiene como objetivo eliminar el agua que aún se encuentra en el jarabe para facilitar la formación de cristales de azúcar. El jarabe se almacena en los 9 tachos o vacumpanes para cocer el jarabe y eliminar el agua con el vapor proveniente de los calderos. Este proceso tiene una duración de 11 horas aproximadamente. El producto que resulta de del proceso de cristalización se denomina masa cocida. Este producto debe ser trasladado hacia los tanques cristalizadores para enfriarlo y mejorar su cristalización.

CRISTALIZADORES: Los tanques cristalizadores completan la cristalización que se empezó en los tachos. En estos tanques se enfría la masa cocida para aumentar el tamaño de los cristales producidos en los vacumpanes. Además, cuentan con unas paletas que giran continuamente para que el crecimiento de los granos de azúcar sea uniforme.

CENTRIFUGACIÓN: Estas máquinas giran a una velocidad determinada para lograr que la separación de azúcar y miel sea exitosa. Finalmente, las centrífugas descargan el azúcar sobre un espiral sin fin, el cual traslada el azúcar hasta el área de envasado.

ENVASADO: En esta el azúcar se envasa en bolsas para ser distribuidas en el mercado interno y externo. El primer operario se encarga de pesar el azúcar, el segundo se encarga de cocer la bolsa y el tercero traslada la parihuela con 45 bolsas sobre ella.

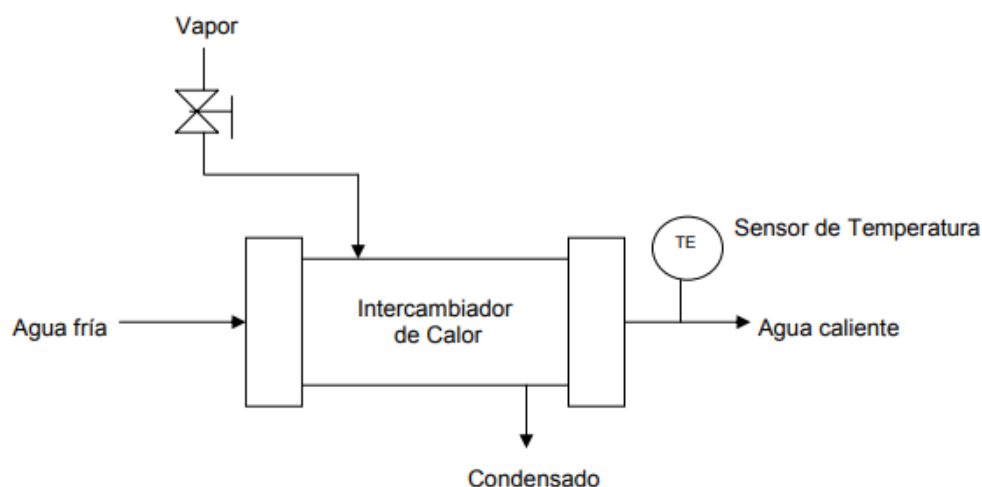
2.2. Control de Procesos Industriales

Un proceso es un conjunto o cadena de fenómenos, asociados con los seres humanos o la naturaleza, que se desarrollan durante un período de tiempo finito o infinito y cuyas fases sucesivas generalmente conducen a un fin específico (Torres, 2018).

Examinando desde la perspectiva de la producción, se considera un proceso a un lugar donde las materias primas y cierta forma de energía (mecánica, eléctrica, hidráulica, etc.) se unen para producir un producto. Desde la perspectiva del control industrial, un proceso está formado por un conjunto de sistemas y sub sistemas que cuentan con una o más variables de importancia cuyos valores es necesario supervisar y mantener un control sobre ellas (Pérez, 2008). Por ejemplo, para preservar la temperatura constante del producto (agua caliente), un intercambiador de calor emplea otra variable con la capacidad de alterar la variable controlada y que puede ser dirigida por el sistema de control. En un intercambiador de calor, el sistema de control altera el estado de una válvula de vapor. No obstante, la temperatura del agua no depende únicamente del estado de esta válvula, sino además del flujo de agua, así como la temperatura del agua entrante, el nivel de suciedad del intercambiador de calor y la temperatura ambiental (Casas, 2019)..

Figura 3

Intercambiador de Calor



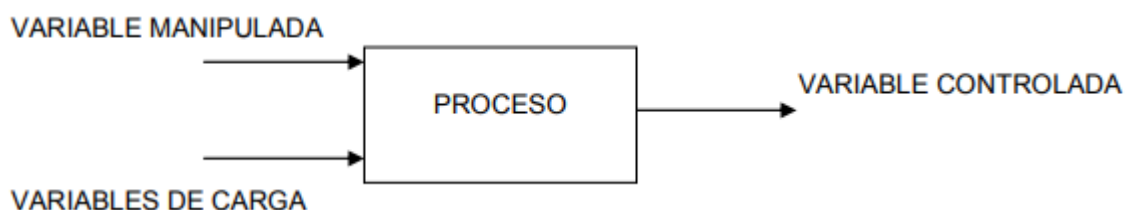
Fuente: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000300005

Las variables que se controlan en un proceso indican o señalan la calidad del producto o el estado y evolución del proceso, algunos ejemplos de estas variables son la temperatura, nivel, velocidad, flujo, posición. Las variables manipuladas son las encargadas de la alteración para de

esta manera inducir un cambio en la variable controlada, algunos ejemplos de estas variables son el accionamiento de un interruptor, estado de una válvula, celeridad de un motor. Las variables de carga son aquellas que alteran a la variable controlada, excluyendo a las que se manipulan, por ejemplo: temperatura ambiental o suciedad en el intercambiador de calor (Prada, 2017).

Figura 4

Variable de un Sistema de Control



Fuente: <https://sites.google.com/site/tecindus2obachadriandonate/home/tema-10>

Tanto las variables de carga, así como la variable manipulada son capaces de generar una variación en la variable controlada dependiendo de las características del proceso. Con respecto al intercambiador de calor, la temperatura del producto (salida de agua) tiende a presentar un acrecentamiento debido al aumento del ángulo de apertura de la válvula de vapor, así como la elevación de la temperatura ambiente y la temperatura de entrada, por lo que disminuye debido a la mayor velocidad de flujo y suciedad del intercambiador de calor. La temperatura de salida se ve alterada debido al resultado total de estas influencias (Ayala, 2014).

En el caso en que haya más influencias positivas que negativas, se aprecia un aumento de la temperatura, caso contrario, se presenta un descenso la temperatura. En caso todas las variables de carga se mantienen constantes, se puede manipular la válvula de vapor hasta lograr que la temperatura del producto sea constante al valor que se desea obtener, y mantenerse allí de forma indefinida (Villajulca, 2019).

La instrumentación de control de proceso es imprescindible debido a que estas variables no se mantienen en estados constantes. Por ejemplo, las fluctuaciones tanto en la temperatura de entrada, así como en la celeridad de flujo alteran la temperatura del producto, y se necesita un ángulo de apertura distinto en la válvula de vapor para mantener en el valor deseado la temperatura del agua. La tarea del sistema de control es establecer y actualizar de forma continua este ángulo de apertura en la válvula cuando se ven alteradas las condiciones de carga (Fortuny, 2014).

En resumen, el problema de control es determinar el único valor de la variable manipulada que equilibra las influencias en la variable controlada y mantiene la variable estacionaria en el valor deseado. No importa lo difícil que esto resulte, todo sistema de control resuelve la misma problemática básica, y para un proceso y condiciones de carga dados, se deben lograr los mismos resultados. El problema de control solo se puede resolver de dos formas, cada una basándose en una filosofía básica del diseño del sistema de control (Durand, 2016):

- Control Feedback o realimentado.
- Control Feedforward o de anticipación.

Los sistemas feedback producen la señal de control basada en la discrepancia de los valores en las mediciones reales y los valores nominales. En los sistemas de feedforward, la señal de control es producida basándose en los valores de las diversas variables de carga, ya que ellas tienen una gran influencia sobre el proceso. Además, los sistemas de control feedback son más populares que los sistemas de feedforward (Suárez, 2016).

2.2.1. Sistemas de Control de Feedback

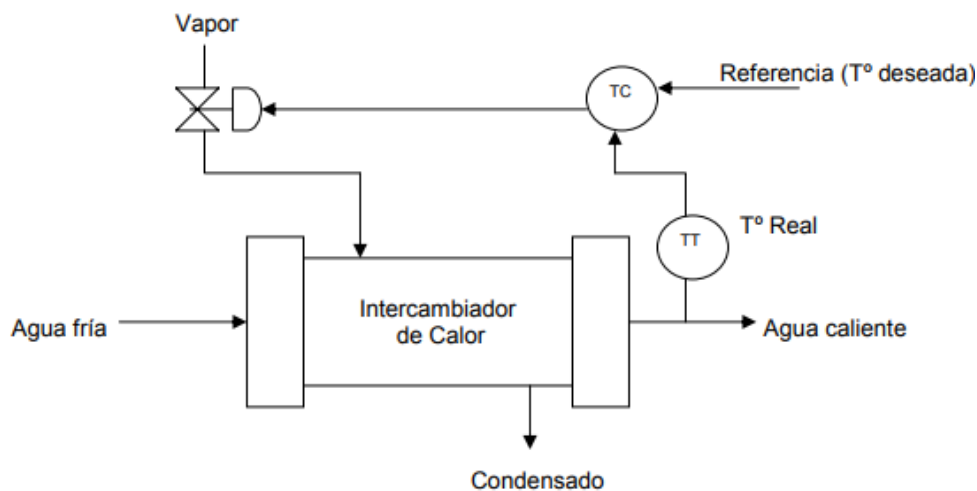
En estos sistemas, la variable controlada reacciona tanto a la variable manipulada, así como al impacto neto de las cargas. Un sensor / transmisor cuantifica el valor de la variable controlada en tiempo real y expide una señal al controlador feedback, donde la señal es comparada con un

valor referencial. La función de control en un controlador produce una señal de salida que altera la posición de una válvula según el signo y el tamaño de la discrepancia entre los valores medidos y de referencia (Mutazzi, 2017).

En un intercambiador de calor, un transmisor de temperatura produce de forma continua una señal representativa para la temperatura del agua caliente. En el controlador, dicha señal se resta del valor establecido por el operador, el cual representa la temperatura que se desea. En caso se detecte una igualdad en estos valores, la ubicación actual de la válvula es correcta y el controlador no alterará su salida. Caso contrario, puedes observarse dos casos, el primero en que el valor real se encuentre abajo del valor de referencia, el controlador alterará su salida para de esta manera abrir la válvula de vapor y esto aumentará la temperatura de salida, el segundo, cuando la temperatura real está elevado con referencia del valor deseado, el controlador alterará su salida para de esta manera cerrar la válvula de vapor, para lograr una disminución de la temperatura de salida. De esta manera, un controlador de feedback soluciona la problemática de control a través un método de prueba y error (VAM Industry, 2018).

Figura 5

Sistema de Control Feedback



Fuente: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000300005

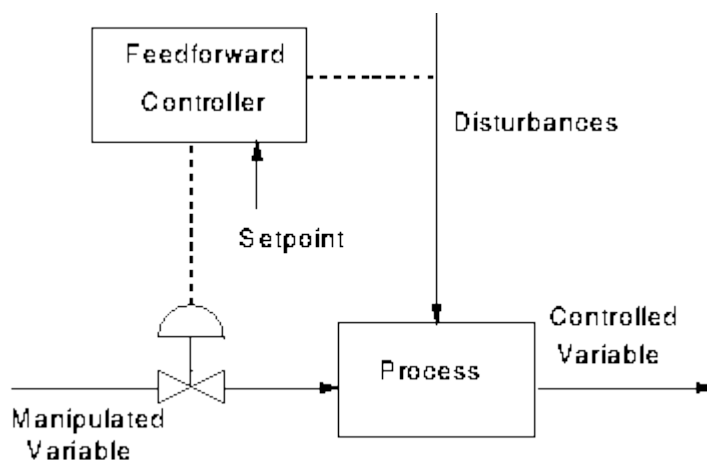
2.2.2. *Sistemas de Control de Feedforward*

El control feedback es de naturaleza reactiva y responde ante la presencia de una perturbación en el sistema de control, sin embargo, el control feedforward responden directamente a las perturbaciones, por lo tanto, ofrece un control más eficiente (Castaño, 2019).

Los transductores captan y envían los valores de las variables de carga hasta una unidad de cálculo, la cual se encarga de enviar la señal de control para lograr el valor deseado y a las condiciones de carga existentes, es por ello que los cambios en las variables de carga generan un cambio en la señal de control sin que se haya un cambio en la variable controlada. Esta estrategia de control es más difícil de implementar y económicamente más cara, debido a que se requiere un conocimiento avanzando del proceso. Por estos motivos, el control feedforward es utilizado solo en procesos complejos y críticos (Sepulveda, 2013).

Figura 6

Sistema de Control Feedforward



Fuente <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-feedforward>

2.2.3. *Elementos de un Controlador Feedback*

Independientemente del hardware utilizado para la implementación, el concepto de control con retroalimentación es siempre el mismo. El primer mecanismo de retroalimentación se conectó mecánicamente directamente al proceso y a la variable manipulada.

Los más modernos actualmente son los "DCS" o sistemas de control distribuido, con controladores ya implementados en software. Estos dispositivos cuentan con una gran de propiedades, entre las que podemos resaltar (Rockwell Automation, 2016):

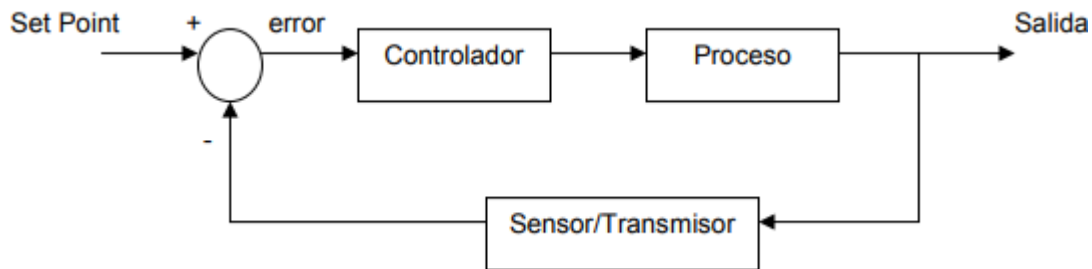
- Enclavamientos de salida y linealización.
- Alarmas automáticas.
- Compensación de señales incorporadas, etc.

No obstante, estas características no alteran la función principal del controlador feedback, solucionar la problemática de control. La función de control feedback cuenta con dos entradas como mínimo y una salida. Una entrada se usa para ingresar los valores de medición que llegan desde el transmisor; la otra, se usa para el valor de referencia. Para este tipo de controladores, el valor de referencia es llamado punto de ajuste (setpoint), el cual simboliza el valor deseado de la medición (Hernández, 2010).

Para lazos simples, el set point se puede ingresar directamente por el operario y se le llama punto de ajuste "local". En esquemas con mayor complicación, es posible que la señal venga de otro instrumento, y es conocida como punto de ajuste "remoto". Por lo general, es posible que el controlador acepte ambos tipos de ajuste, pues cuenta con un conmutador remoto/local el cual le permite al operario escoger el modo de operación que empleará. Los valores reales y de set point son confrontados, en el interior del controlador, a través de la sustracción. La diferencia obtenida es llamada "error" y representa la entrada al algoritmo que da origen a la salida (Macías, 2018).

Figura 7

Elementos de un Sistema de Control



Fuente <https://www.lymcapacitacion.com/blog/15011/sistema>

Una vez colocado el controlador feedback dentro de un proceso y posicionado en “automático”, se genera un lazo cerrado. La señal de salida del controlador altera la medición y sucede lo mismo, al contrario. Este lazo cerrado posibilita el control mediante la realimentación, la única posibilidad que se genere este tipo de control es que se garantice la continuidad de este efecto en cualquier dirección, caso contrario se considera un lazo abierto, y desaparece el control con realimentación. (Ferreira, Rodríguez, & Rodríguez, 2017).

Un lazo de realimentación se puede abrir por varias causas (Gil, 2010):

- Disposición en manual del controlador, lo que origina que la salida se mantenga constante (si no es alterada por el operario) aun cuando cambie la medición.
- Fallos en el sensor o el transmisor, lo cual incapacita que el controlador pueda observar la variable controlada.
- Saturación de la salida del controlador (0 o 100%) de la escala, esto no permite que el controlador influya en el proceso.
- Fallos en el actuador de la válvula causados por la fricción, suciedad o remanentes en la válvula.

2.3. Instrumentación Industrial

La instrumentación industrial es el conjunto de equipos y dispositivos que se utilizan para medir, convertir y registrar las variables de un proceso, para luego transmitirlos, analizarlos y controlarlos para tales fines específicos. Los elementos de control y medición utilizados en procesos industriales miden características físicas, tales como presión, nivel, temperatura, flujo, o variables analíticas como el pH y la conductividad. Actualmente, en el mercado hay productos especiales para la adquisición de datos, logrando que los procesos de medición y control se realicen con mayor rapidez y eficiencia, a menores costos.

Los componentes de un lazo de control son (Flóres, 2016):

Los elementos primarios o sensores: Son aquellos que se encuentran directamente en contacto con la variable controlada, además de ser los encargados de inspeccionar y cuantificar lo que se desea controlar, algunos ejemplos son: placa de orificio, bimetales, tubo de Bourdon.

Transductor: Dispositivo o instrumento que recibe datos o señales y los convierte en otra forma de información, manteniendo la mayoría de veces la magnitud o cantidad, unos ejemplos de transductor son: un transformador, un parlante, un sensor.

Transmisor: Es un transductor que recoge la variable de proceso por medio de un sensor y la transmite a distancia en forma normalizada, puede ser una señal neumática de margen 3 a 15 psi, o una electrónica de 4 a 20 mA en corriente continua o incluso digital mediante el uso de algunos transmisores inteligentes que van directamente conectados a los PLC, ejemplos de transmisores tenemos: transmisores de temperatura, transmisores de caudal, transmisores de nivel.

Controladores: Contratan la variable a controlar (nivel, presión, temperatura) con un valor requerido y generan una acción correctiva a razón de la desviación. La variable a controlar se puede obtener directamente, como es el caso de los controladores locales, pero también puede

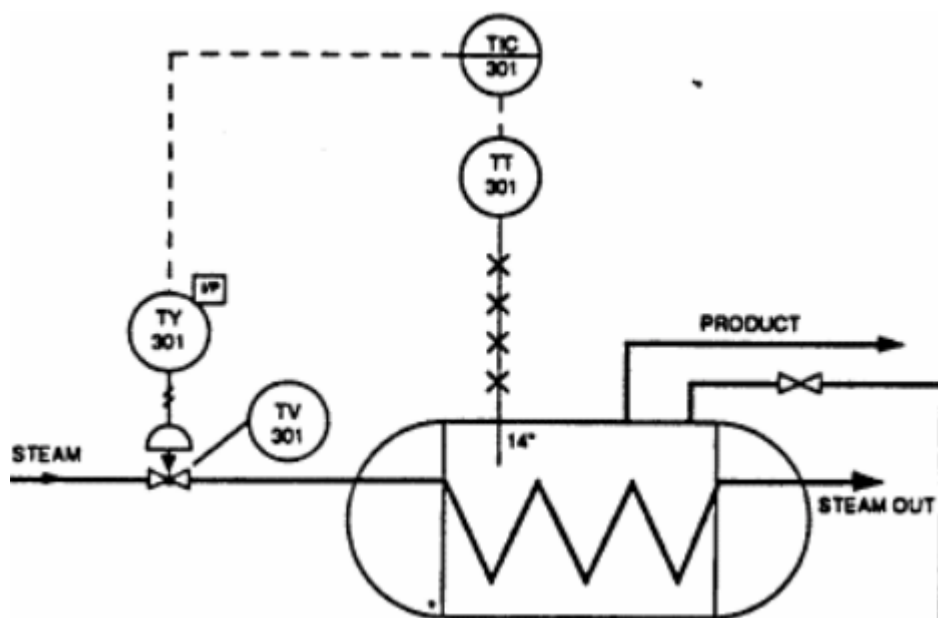
ser acogida de forma indirecta como una señal electrónica, neumática o digital proveniente de un transmisor, algunos ejemplos son: Controladores Lógicos Programables (PLC), controladores PID.

Elemento final de control: obtiene la señal del controlador y ejerce una acción directamente en la variable manipulada con la finalidad de que sea modificada, ejemplos de este tipo de dispositivos son: actuadores de válvulas, motores, relés, solenoides.

Las plantas industriales tienen instalaciones de grandes dimensiones y con una gran multitud de elementos, materiales e instrumentos que componen dicha planta. Para la identificación de los equipos e instrumentos se utilizan una herramienta conocida como P&ID o diagrama de tuberías e instrumentación. El P&ID permite identificar los equipos e instrumentos de una forma fácil, además, brinda una idea general de las condiciones y características de diseño del sistema de control. Por ejemplo, para el bucle de la Fig. 8, hay un número de identificación o TAG 301 (Lobatón, 2017).

Figura 8

P&ID



Fuente: Imagen tomada de <http://www.alphainstrumentacion.com.mx>

Con el número y la letra inicial “T” correspondiente a la temperatura es posible establecer que el objetivo principal de este lazo es cuantificar y controlar la temperatura de un intercambiador de calor. El lazo está compuesto por componentes tales como un controlador, un transmisor de temperatura, además de una válvula. Cada una de esas funciones es denotada en la identificación por la segunda o tercera letra. Al examinar el símbolo del transmisor podemos intuir que está montado en terreno, se puede llegar a esta conclusión debido a que carece de una línea dentro del círculo. La línea que contiene las ‘X’ nos señala que el transmisor se encuentra conectado al proceso a través de un tubo capilar. La línea fraccionada informa que la señal del transmisor hacia el controlador es una señal del tipo eléctrica. La línea que se encuentra en el interior del círculo del controlador señala que este dispositivo se ubica en un panel. La señal eléctrica proveniente del controlador es captada por un transductor, el cual convierte la señal. Este a su vez envía una señal al dispositivo final, el cual es una válvula, que al inspeccionar la ubicación de la flecha nos señala que, si en caso la válvula pierde la señal, esta se cerrara automáticamente (Lobatón, 2017).

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1. Filosofía de Control

Para automatizar el proceso de lechada de cal o encalado, se realizaron visitas de campo a las instalaciones de la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. con el objetivo de observar detalladamente el trabajo realizado por los operarios, quienes son los encargados de llevar las muestras al laboratorio y de regular las válvulas de alimentación de lechada de cal en las balanzas de jugo mezclado.

Para la preparación del floculante, se adiciona la cal en agua para convertirla en “lechada de cal”. Esta lechada de cal se produce en dos tanques pequeños, uno de ellos se vacía mientras el otro se llena. Ambos tanques cuentan con un agitador con velocidades de 8 a 10 RPM, respectivamente. Según su diámetro, la capacidad de los tanques se alcanza en 1h 30 min o 2 h desde la marcha de fábrica. El ingreso de cal en los tanques se realiza de forma manual mediante sacos de 75 kg/h o 600 kg por turno.

La lechada de cal se agrega al jugo mezclado, la cual es dosificada por los operarios en la tubería del proceso mediante válvulas, tratando de realizar esta labor en el menor tiempo posible para evitar la pérdida de azúcares reductores. En algunas ocasiones, se adicionan 25 kg en cada turno (8 horas) de lechada de cal directamente al jugo de caña de azúcar.

Luego de realizar las visitas técnicas, se establecieron los criterios de diseño para el sistema de control de la Balanza N°1:

- 1) El lazo de control con realimentación debe estar formado por los siguientes dispositivos: PLC, HMI, sensor/transmisor de pH y una válvula modulante.

- 2) El PLC y el panel HMI estarán conectados al Switch Ethernet no administrable mediante cable UTP Cat. 6 para formar una Red de Área Local (LAN).
- 3) El sensor/transmisor de pH estará sumergido dentro de la balanza de jugo mezclado a través de una varilla.
- 4) Las conexiones de salida del sensor/transmisor de pH se conectarán en una bornera ubicada dentro de una caja de pase, desde donde partirán hacia el sistema de control.
- 5) La válvula modulante debe ser montada en la tubería de alimentación de cal de la balanza.
- 6) El sistema de control tendrá la capacidad de generar alarmas y detener el proceso cuando ocurra una falla por sobrecarga térmica en la bomba centrífuga.

De esta manera, el sistema de control evitará que los operarios tengan que trasladar muestras al laboratorio de análisis de la empresa, gracias a que los instrumentos de campo tendrán la capacidad de medir el pH del jugo mezclado y mostrarlo través del panel HMI.

3.1.1. Lista de Equipos

El primer paso para desarrollar la lógica de control, es determinar la cantidad de equipos que se necesitan controlar. Para lograrlo, se ha optado por elaborar una lista para poder contabilizarlos.

Tabla 3

Lista de Equipos

Balanza	Equipo	Tag
	Bomba de cal	P2-101
N° 1	Válvula modulante	AY-101
	Transmisor Indicador de pH	AIT-101

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Bloques de Función

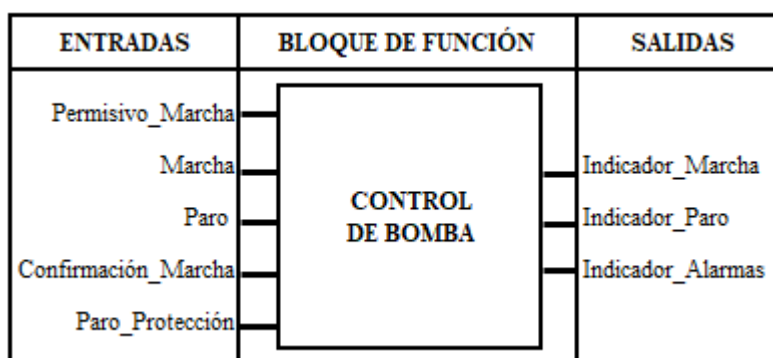
Los bloques de función tienen como objetivo estandarizar y simplificar el control de equipos. Por ejemplo, si la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A. tiene la necesidad de crear una nueva línea de alimentación de cal, deberá adquirir bombas centrífugas, válvulas y otros equipos necesarios para el desarrollo del proceso, sin embargo, los ingenieros y técnicos ya no tendrán que establecer la cantidad y que tipo de señales se deben usar para controlar los nuevos equipos, porque gran parte de este trabajo estará definido en el bloque de función.

Los diseños de los bloques de función para el escalamiento de E/S analógicas (válvula modulante y transmisor de pH) y para el controlador PID no se realizarán en esta investigación, debido a que estos bloques de función están integrados en la mayoría de softwares para programar PLC, por ende, tampoco se diseñará la lógica de control para dichos bloques de función.

En la Fig. 9 se muestra el diseño del bloque de función de la bomba de cal.

Figura 9

Bloque de Función para Bomba



Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Lista de Señales

Si ya conocemos la cantidad de equipos que debemos controlar, y hemos asociado un bloque de función a cada uno, entonces podemos calcular la cantidad de señales de E/S (digitales y analógicas) que se necesitan para monitorear y controlar el proceso.

Tabla 4

Lista de Señales

Equipo	Tag	Descripción
Bomba	Enable	Confirmación de energía eléctrica, Contacto NO, 24 VCC
	Start	Pulsador de marcha, Contacto NO, 24 VCC
	Stop	Pulsador de paro, Contacto NC, 24 VCC
	Pump_Rdy	Confirmación de marcha, Contacto NO, 24 VCC
	Overload	Falla por sobrecarga térmica, Contacto NO, 24 VCC
	Pump_Run	Indicador de marcha, Relé, 220 VCA
	Pump_Stop	Indicador de paro, Relé, 220 VCA
	Fail	Indicador de falla, Relé, 220 VCA
Válvula modulante	Val_Output	Señal de 4 a 20 mA
Transmisor de pH	pH_Input	Señal de 4 a 20 mA

Fuente: Elaboración propia

De la lista de señales podemos concluir que para controlar la Balanza N°1 se requieren: 5 entradas digitales con común negativo (24 VCC), 3 salidas digitales a relé (220 VCA), 1 entrada analógica de 4 a 20 mA y 1 salidas analógica de 4 a 20 mA.

3.1.4. Descripción de la Lógica de Control

En la descripción de la lógica control se intenta explicar cómo se pretende que funcionen y respondan los equipos ante distintas situaciones posibles.

Bomba de cal (P2-101):

- 1) Tendrá “Permisivo de Marcha” siempre y cuando se cumplan con las siguientes condiciones: el contacto auxiliar del guardamotor indique que existe presencia de energía eléctrica, no debe haber falla por sobrecarga térmica.

- 2) Si existe “Permisivo de Marcha”, se debe accionar el pulsador de “Marcha” para arrancar bomba.
- 3) La bomba se detendrá cuando se accione el pulsador de “Paro”.
- 4) La señal “Confirmación de Marcha” indicará si realmente la bomba está funcionando.
- 5) Se provocará un “Paro por Protección” cuando haya falla por sobrecarga térmica en la bomba.
- 6) Luego de solucionar una falla, la bomba no entrará en funcionamiento inmediatamente, sino hasta que se le dé la orden desde el sistema de control (“Reset”).

Válvula modulante (AY-101) y Transmisor de pH (AIT-101):

- 1) Si la medida de la variable de proceso (pH) es menor al Set Point ingresado (7) en el panel HMI, la válvula modulante de cal deberá incrementar su porcentaje de apertura (0 a 100 %) de acuerdo con la señal de corriente (4 a 20 mA) generada por el PLC.
- 2) Si la medida de la variable de proceso (pH) es mayor al Set Point ingresado (7) en el panel HMI, la válvula modulante de cal deberá disminuir su porcentaje (0 a 100 %) de apertura de acuerdo con la señal de corriente (4 a 20 mA) generada por el PLC.

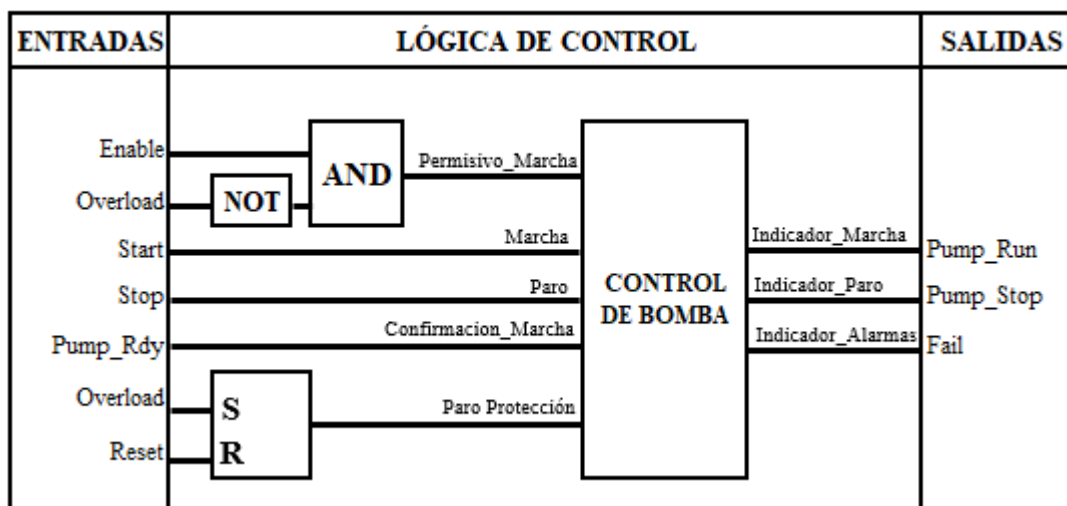
3.1.5. Diagramas Lógicos de Control

Luego que hemos definido lo que debemos controlar y como lo vamos a hacer, procedemos al desarrollo de los diagramas lógicos de control, donde se especificará de forma detallada como se debe programar la lógica en el software del sistema de control.

El diagrama lógico de control para la bomba de cal se elaborará usando gráficos sencillos que representen a las distintas compuertas y funciones lógicas (AND, OR, NOT, SET-RESET, etc.), tal como se muestra en la Fig. 10.

Figura 10

Lógica de Control para Bloqueo de Función de Bomba



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 10 se puede observar que la señal de entrada “Permisivo_Marcha” tendrá un valor lógico “1” solo cuando la señal “Enable” asociada al contacto auxiliar del guardamotor este en “1” y no exista falla por sobrecarga térmica en la bomba (función lógica AND). También se puede apreciar que la señal de entrada “Paro por Protección” tendrá un valor lógico “1” cuando exista falla por sobrecarga térmica en las bombas. La señal de entrada “Reset” es una señal lógica virtual, cuya función es mantener activa la señal de entrada “Paro_Protección” hasta que el operador cambie su valor a través del sistema de control (función lógica SR). La señal de salida “Pump_Run” tendrá un valor lógico “1” cuando la señal de entrada “Marcha” este activada, mientras que la señal de salida “Pump_Stop” tendrá un valor lógico “1” cuando la señal de entrada “Paro” este activada. La señal de salida “Fail” indica falla por sobrecarga térmica en la bomba.

3.1.6. Función de Transferencia

En la Tabla 5 se muestran las medidas de flujo y pH solicitadas al personal técnico de la Empresa Agroindustrial Tumán. Las medidas de pH se utilizarán para obtener la Función de Transferencia de la planta utilizando el software Matlab.

Tabla 5

Medidas de Flujo y pH de la Balanza N°1

Hora	Flujo (m³/h)	pH
7:00 a. m.	202.6	7.09
8:00 a. m.	268.1	7.86
9:00 a. m.	275.3	7.89
10:00 a. m.	305.2	7.81
11:00 a. m.	289.4	7.8
12:00 p. m.	326.8	7.56
1:00 p. m.	365.4	7.6
2:00 p. m.	208.5	6.26
3:00 p. m.	237.2	7.59
4:00 p. m.	160.5	5.93

Fuente: Elaboración propia

Las medidas de pH fueron normalizadas para poder obtener la respuesta al escalón.

Figura 11

Medidas de pH Normalizadas

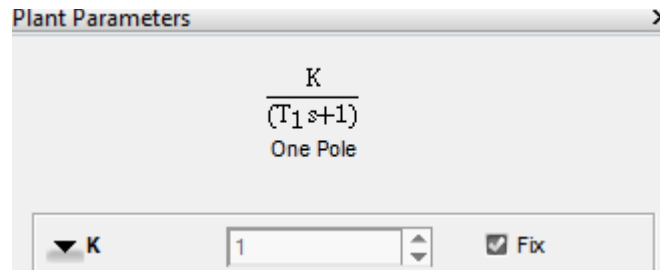
	Tiempo	pH	pH_Normali...
	Number	Number	Number
1	1	7.0900	1.0129
2	2	7.8600	1.1229
3	3	7.8900	1.1271
4	4	7.8100	1.1157
5	5	7.8000	1.1143
6	6	7.5600	1.0800
7	7	7.6000	1.0857
8	8	6.2600	0.8943
9	9	7.5900	1.0843
10	10	5.9300	0.8471

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 12 se muestra la ecuación de la función de transferencia. Como se puede observar se ha fijado el valor de la ganancia (K) con el valor 1, esto debido a que ese es el valor máximo de la señal escalón que se configurará posteriormente.

Figura 12

Ecuación para la Función de Transferencia



Fuente: Elaboración propia

Al estimar la función de transferencia, se obtiene el valor de la constante de tiempo T_1 , tal como se muestra en la siguiente Fig. 13.

Figura 13

Parámetros de la Función de Transferencia

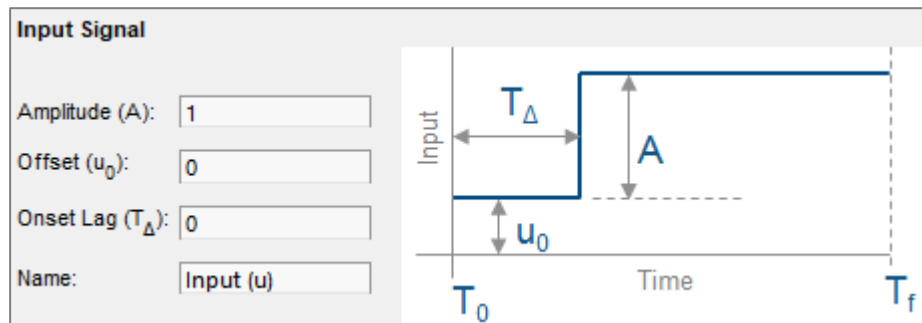
Plant Parameters: K = 1, $T_1 = 3240$

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la función de transferencia estimada por el software Matlab para este sistema es:

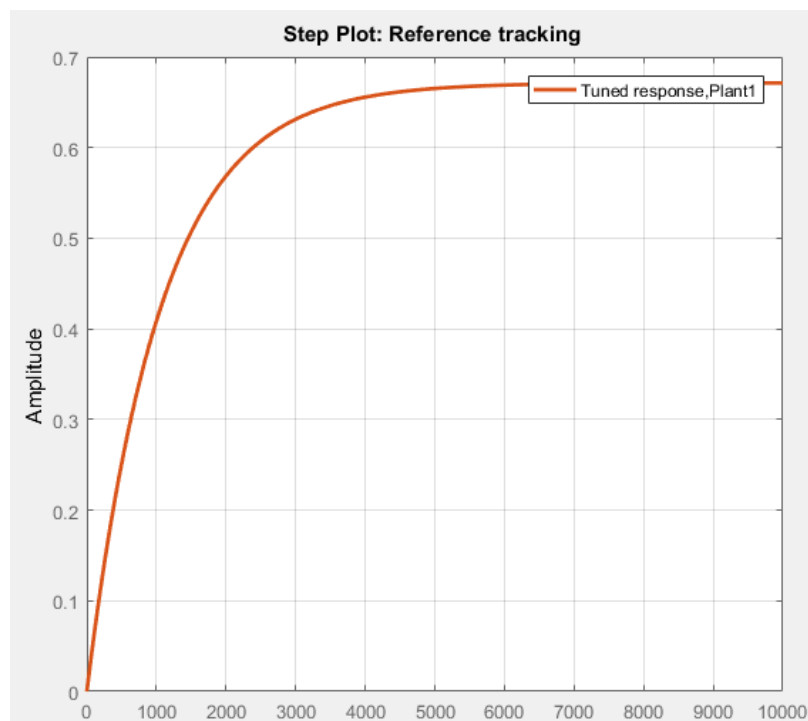
$$FT = \frac{1}{3240s + 1}$$

Para encontrar las constantes de controlador PID, primero que debemos configurar es la amplitud de la señal escalón de prueba con el valor de 1.

Figura 14*Configuración de Señal Escalón*

Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la señal escalón de prueba al sistema, se obtiene la respuesta mostrada en la Fig. 15. Como se puede observar, nunca se alcanza el valor deseado, por lo tanto, se realizarán los ajustes necesarios para lograrlo.

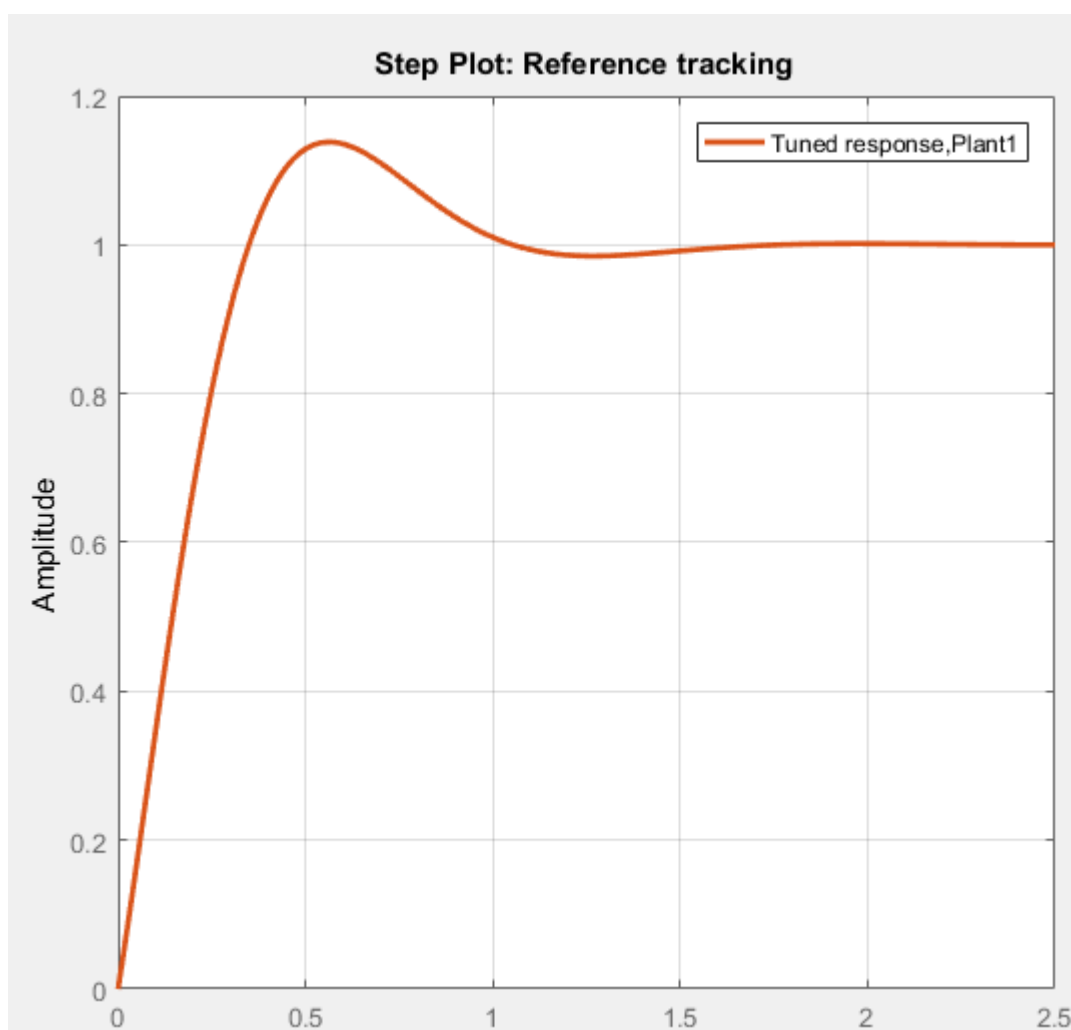
Figura 15*Respuesta al Escalón*

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 16 se observa la respuesta al escalón del sistema con un controlador proporcional con ganancia K_p igual a 1. Se puede apreciar que el sistema alcanza a estabilizarse en un tiempo mayor a 1.5×10^4 segundos, o lo que es lo mismo, 4.16 horas. Se optó por descartar este controlador, pues incrementar esta ganancia significa producir un gran sobre impulso. Además, con este tipo de controlador nunca alcanzaríamos la referencia deseada.

Figura 16

Respuesta con Control Proporcional

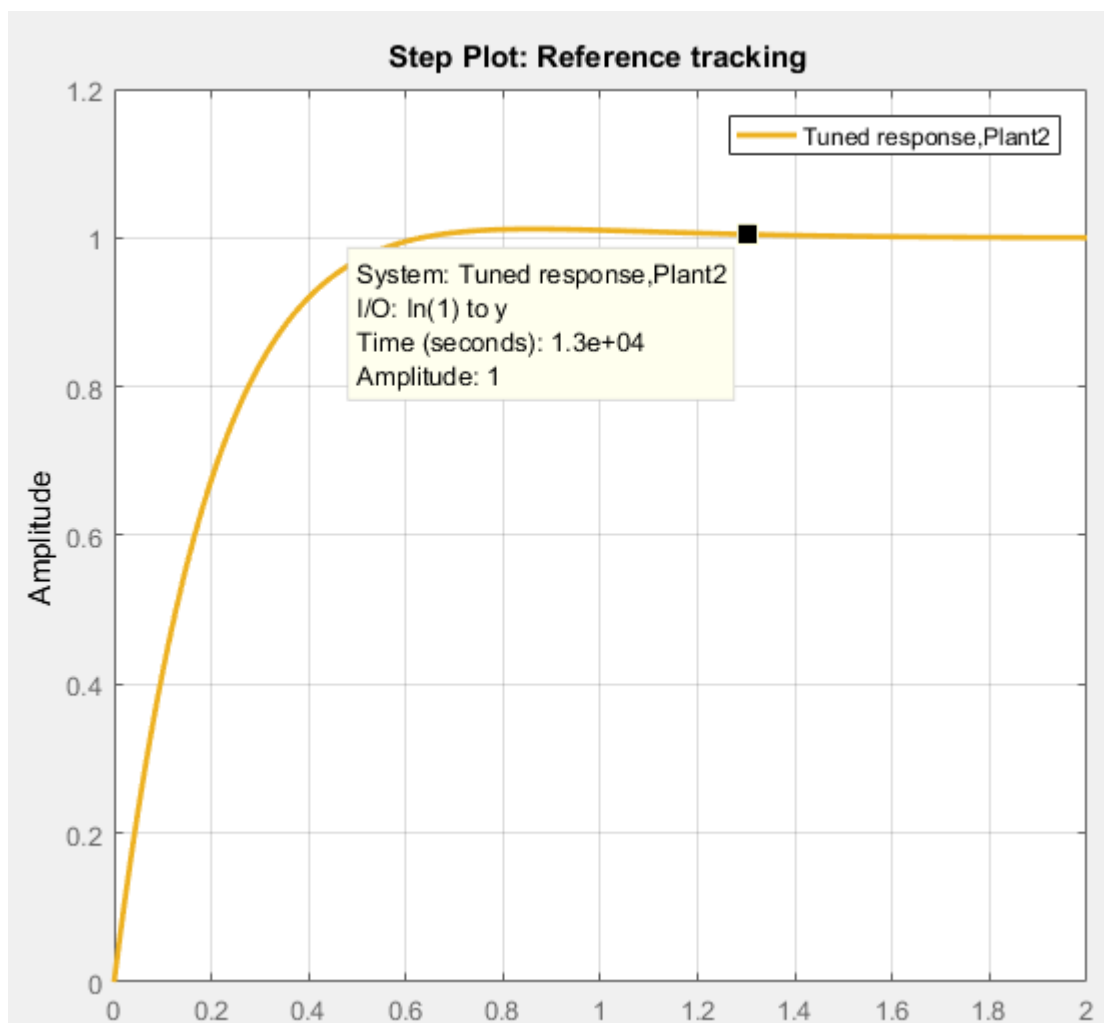


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 17 se observa la respuesta al escalón del sistema con un controlador PID. Se aprecia que el sobre impulso a disminuido considerablemente, además, el sistema se estabiliza en 1.3×10^4 segundos, o lo que es lo mismo, 3.6 horas. Mientras que el sistema intenta estabilizarse en el valor ideal de pH (7), oscilará entre los valores permitidos 7 y 8,2 de acuerdo a (Rein, 2012).

Figura 17

Respuesta con Control PID



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 18 se muestran los valores de los parámetros del controlador PID. Se puede ver que la ganancia derivativa K_d es igual a cero, esto significa que el control aplicado fue netamente

PI. Estos valores se adaptarán al momento de simular el funcionamiento del sistema de control con el PLC y el HMI.

Figura 18

Constantes y Ecuación del Controlador PID

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	1.6871
Ki	0.00063293
Kd	0
Tf	n/a

$$K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

with $K_p = 1.69$, $K_i = 0.000633$

Fuente: Elaboración propia

3.2. Selección de Dispositivos

3.2.1. ITM Trifásico

Características principales:

- Gama de producto: Easy9.
- Referencia: EZ9F56316.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Aplicaciones: Distribución de energía.
- Producto: Interruptor termomagnético.
- Número de polo: 3P.
- Corriente nominal (In): 16 A.
- Red: CA.

- Protección: Térmico – magnético.
- Código de curva: C.
- Tipo de montaje: Riel DIN.
- Poder de corte: 10 kA (I_{cn}) en 220 VCA 50/60 Hz acorde a IEC 60898-1.
- Tensión asignada de empleo: 220 VCA, 400 VCA, 50/60 Hz.
- Límite de enlace magnético: 5...10 In.

Figura 19

ITM Trifásico



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/EZ9F56316/interruptor-termomagnético-riel-easy9-3p-16a-10ka-curva-c/>

3.2.2. ITM monofásico

Características principales:

- Gama de producto: Easy9.
- Referencia: EZ9F56210.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Aplicaciones: Distribución de energía.
- Producto: Interruptor termomagnético.
- Número de polo: 2P.

- Corriente nominal (In): 10 A.
- Red: CA.
- Protección: Térmico – magnético.
- Código de curva: C.
- Tipo de montaje: Riel DIN.
- Poder de corte: 10 kA (Icn) en 220 VCA 50/60 Hz acorde a IEC 60898-1, 6 kA (Icn) en 400 VCA 50/60 Hz acorde a IEC 60898-1.
- Tensión asignada de empleo: 220 VCA, 400 VCA, 50/60 Hz.
- Límite de enlace magnético: 5...10 In.

Figura 20

ITM Monofásico



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/EZ9F56210/interruptor-termomagnético-riel-easy9-2p-10a-10ka-curva-c/>

3.2.3. ITM Unipolar

Características principales:

- Gama de producto: Easy9.
- Referencia: EZ9F56110.
- Marca del producto: Schneider Electric.

- Aplicaciones: Distribución de energía.
- Producto: Interruptor termomagnético.
- Número de polo: 1P.
- Corriente nominal (In): 10 A.
- Red: CA.
- Protección: Térmico – magnético.
- Código de curva: C.
- Tipo de montaje: Riel DIN.
- Poder de corte: 6 kA (Icn) en 230 VCA 50/60 Hz acorde a IEC 60898-1, 10 kA (Icn) en 127 VCA 50/60 Hz acorde a IEC 60898-1.
- Tensión asignada de empleo: 230 VCA, 127 VCA, 50/60 Hz.
- Límite de enlace magnético: 5...10 In.

Figura 21

ITM Unipolar



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/EZ9F56210/interruptor-termomagnético-riel-easy9-2p-10a-10ka-curva-c/>

3.2.4. Fuente de Alimentación

Características principales:

- Gama de producto: Modicon X80.
- Referencia: BMXCPS3500.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Tipo de producto o componente: Alimentación regulada.
- Tensión de entrada (Un): 100...240 VCA
- Frecuencia: 50/60 Hz.
- Potencia de salida: 31,2 W a 24 VCC.
- Tipo de protección de salida: Contra sobrecarga y contra cortocircuitos.

Figura 22

Fuente de Alimentación



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/BMXCPS3500/power-supply-module-x80---100.240-v-ac---36-w/>

3.2.5. Guardamotor

Características principales:

- Gama de producto: TeSys.
- Referencia: GV2ME10.

- Marca del producto: TeSys GV2.
- Aplicación del contactor: Protección térmica y magnética.
- Categoría de utilización: AC-3 conforme a IEC 60947-4-1.
- Número de polos: 3P.
- Potencia de motor: 2,2 kW a 400/415 VCA 50/60 Hz, 3 kW a 500 VCA 50/60 Hz, 4 kW a 690 VCA 50/60 Hz.
- Poder de corte: 100 kA Icu a 230/240 VCA 50/60 Hz, 100 kA Icu a 400/415 VCA 50/60 Hz, 3 kA Icu a 690 VCA 50/60 Hz, 50 kA Icu a 440 VCA 50/60 Hz.

Figura 23

Guardamotor



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/GV2ME10/guardamotor-gv2-me-termomagnético---ac-3---4-6%2C3---100ka---3p3d/>

3.2.6. Contactor

Características principales:

- Gama de producto: TeSys.
- Referencia: LC1D12P7.
- Marca del producto: TeSys D.
- Tipo de producto: Contactor.

- Aplicación: Carga resistiva / Control de motor.
- Categoría de empleo: AC-3, AC-1, AC-4.
- Número de polos: 3P.
- Tensión del circuito de control: 230 VCA, 50/60 Hz.
- Potencia de motor: 0.5 HP en 115 VCA 50/60 Hz para 1 fase, 2 HP en 230/240 VCA 50/60 Hz para 1 fase, 3 HP en 200/208 VCA 50/60 Hz para 3 fases, 3 HP en 230/240 VCA 50/60 Hz para 3 fases, 7.5 HP en 460/480 VCA 50/60 Hz para 3 fases.
- Corriente asignada de empleo: 25 A en ≤ 440 V CA AC-1 para circuito de alimentación, 12 A en ≤ 440 V CA AC-3 para circuito de alimentación.

Figura 24

Contactor



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/LC1D12P7/tesys-d-contactor---3p%283-no%29---ac-3---<3D-440-v-12-a---230-v-ac-coil/>

3.2.7. Panel HMI

Características principales:

- Gama del producto: Magelis STO & STU.
- Referencia: HMISTU855.

- Marca del producto: Schneider Electric.
- Tipo de producto o componente: Pantalla táctil a color QVGA.
- Tamaña de pantalla: 5,7”.
- Color de pantalla: 65,536 colores.
- Resolución 320 x 240 pixeles QVGA.
- Tensión nominal: 24 VCC (Fuente externa).
- Corriente de entrada: 30 A.
- Consumo de potencia: 6,8 W.
- Descripción de memoria: Memoria de aplicación, 16 MB y copia de seguridad de los datos, 64 KB.
- Tipo de conexión integrada: Puerto USB 2.0 tipo mini B (1), Puerto USB 2.0 tipo A (1), conector de bloque de terminales de la fuente de alimentación, enlace serial COM1 con conector RJ-45 hembra con interfaz RS232C / RS485 a $\leq 115,2$ Kbps.

Figura 25

HMI



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/HMISTU855/touch-panel-screen-5%27%277-color/>

3.2.8. *Procesador*

Características principales:

- Gama del producto: Plataforma autom. Modicon M340.
- Referencia: BMXP342020.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Tipo de producto o componente: Módulo procesador.
- Tensión de alimentación asignada: 24 VCC.
- Capacidad de E/S digitales: 1024.
- Capacidad de E/S analógicas: 256.
- Límites de tensión de alimentación: 20,4 – 28,8 VCC.
- Comunicaciones: Enlace serie sin aislar RJ45, maestro / esclavo Modbus, RTU/ASCII, asíncrono en banda base, RS232C, 1 par trenzado blindado en 0,3...19,2 kbit/s dúplex; enlace serie sin aislar RJ45, maestro/esclavo Modbus, RTU/ASCII, asíncrono en banda base, RS485, 1 par trenzado blindado en 0,3...19,2 kbit/s dúplex; USB en 12 Mbit/s; Ethernet TCP/IP RJ45, 1 par trenzado en 10/100 Mbit/s.

Figura 26

CPU



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/BMXP342020/processor-module-m340---max-1024-discrete-%2B-256-analog-i-o---modbus---ethernet/>

3.2.9. *Módulo de Entradas Digitales*

Características principales:

- Gama de producto: Modicon X80.
- Referencia: BMXDDI1602.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Producto: Módulo de entradas discretas.
- Tipo de entrada: Colector de corriente (lógica positiva).
- Tensión de entrada: 24 VCC.
- Corriente de entrada: 3,5 mA.
- Capacidad: 16 canales.

Figura 27

Módulo de Entradas Digitales



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/BMXP342020/processor-module-m340---max-1024-discrete-%2B-256-analog-i-o---modbus---ethernet/>

3.2.10. Módulo de Salidas Digitales

Características principales:

- Gama de producto: Modicon X80.
- Referencia: BMXDRA1605.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Producto: Módulo de salidas discretas.
- Tipo de salida: Relé.
- Tensión de salida: 24 VCC (19...30 VCC) / 220 VCA (19...264 VCA).
- Corriente de salida: 3 A (plena carga).
- Capacidad: 16 canales.

Figura 28

Módulo de Salidas Digitales



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/BMXDRA1605/discrete-output-module-x80---16-outputs---relay---24-v-dc-or-24...240-v-ac/>

3.2.11. Módulo de E/S analógicas

Características principales:

- Gama de producto: Modicon X80.

- Referencia: BMXAMM0600.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Producto: Módulo de E/S analógicas.
- Tipo de entrada: corriente (0...20 mA, 4...20 mA), tensión (+/-10 V, 0...10 V, 0...5 V 1...5 V).
- Capacidad de entrada: 4 canales.
- Tipo de salida: corriente (0...20 mA, 4...20 mA), tensión (+/-10 V).
- Capacidad de salida: 2 canales.
- Resolución de entrada: 12 bits 0...20 mA, 12 bits 0...5 V, 12 bits 1...5 V, 12 bits 4...20mA, 13 bits 0...10 V, 14 bits +/- 10 V.
- Resolución de salida: 11 bits 0...20 mA, 11 bits 4...20 mA, 12 bits +/- 10 V.

Figura 29

Módulo de E/S Analógicas



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/BMXAMM0600/mixed-analog-i-o-module-x80---4-inputs---2-outputs/>

3.2.12. Switch Ethernet

Características principales:

- Gama de producto: ConneXium.

- Producto: Switch Ethernet TCP/IP no gestionable.
- Referencia: TCSESU053FN0.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Potencia: 2,2 W a 24 VCC.
- Tipo de conexión integrada: 5 puertos RJ-45 (10BASE-T/100BASE-TX).
- Protocolos del puerto de comunicación: SNMP, TCP, UDP, Ethernet IP, Modbus TCP/IP.

Figura 30

Switch Ethernet



Fuente: <https://www.se.com/pe/es/product/TCSESU053FN0/ethernet-tcp-ip-switch---connexium---5-ports-for-copper/>

3.2.13. Patch Cord

Características principales:

- Gama del producto: Digilink.
- Referencia: DC6PCURJ02YLM.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Producto: Patch cord de cobre.
- Tipo de blindaje de cable: UTP.

- Categoría: 6.
- Color: Amarillo.
- Longitud: 2 m.

Figura 31

Patch Cord



Fuente: <https://www.se.com/ww/en/product/DC6PCURJ02YLM/category-6%2C-patch-cord%2C-utp%2C-2m%2C-yellow/>

3.2.14. Pulsadores

Características principales:

- Gama del producto: Harmony XB4.
- Referencia: XB4BA31/ XB4BA42.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Tipo de producto o componente: Pulsador completo.
- Material del bisel: Metal cromado plateado.
- Material del anillo de fijación: Zamak.
- Diámetro de montaje: 22 mm.
- Forma de la cabeza de señalización: Circular.
- Tipo de operador: Retorno por muelle.
- Perfil del operador: Verde/Rojo.
- Tipo y composición de contactos: 1 NA/1 NC.

- Funcionamiento del contacto: Ruptura lenta.
- Conexiones – Terminales: Bornas tornillo (pedido por separado) $\leq 2 \times 1.5 \text{ mm}^2$ con terminal acorde a EN/IEC 60947-1, Bornas tornillo (pedido por separado) $1 \times 0,22-2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ sin terminal acorde a EN/IEC 60947-1.
- Protección contra cortocircuito: 10 A fusible de cartuchos tipo gG de acuerdo con EN/IEC 60947-5-1.
- Corriente térmica convencional: 10 A acorde a EN/IEC 60947-5-1.

Figura 32

Pulsadores



Fuente: <https://www.se.com/ww/en/product/XB4BA31/push-button%2C-metal%2C-flush%2C-green%2C-φ22%2C-spring-return%2C-unmarked%2C-1-no/>

3.2.15. Pilotos Luminosos

Características:

- Gama del producto: Harmony XB4.
- Referencias: XB4BVM3/ XB4BVM4.
- Marca del producto: Schneider Electric.
- Tipo de producto o componente: Piloto luminoso.
- Material del bisel: Metal cromado plateado.

- Material del anillo de fijación: Zamak.
- Diámetro de montaje: 22 mm.
- Forma de la cabeza de señalización: Circular.
- Colores: Verde/ Rojo.
- Tensión nominal: 230 – 240 VCA, 50/60 Hz.
- Límites de tensión de alimentación: 195 – 264 VCA.
- Consumo de corriente: 14 mA.

Figura 33

Pilotos Luminosos



Fuente: <https://www.se.com/ww/en/product/XB4BVM3/pilot-light-metal-green-ø22-plain-lens-with-integral-led-230...240-vac/>

3.2.16. Sensor de pH

Características principales:

- Tipo de producto o componente: Sensor de pH.
- Gama del producto: Orbisint.
- Referencia: CPS11D.
- Marca del producto: Endress + Hauser.
- Principio de medición: Electrodo de vidrio.
- Rango de medición: 0 – 14.

- Temperatura del proceso: Máxima 135°C (247 °F).
- Presión del proceso: Máxima 16 bar (230 psi).
- Conexión: Cabezal de conexión inductiva con tecnología Memosens.
- Protección contra ingreso: IP68.
- Requiere bajo mantenimiento gracias a su gran diafragma anular de politetrafluoetileno (PTFE) repelente a la suciedad.

Figura 34

Sensor de pH



Fuente: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-vidrio-pH-orbisint>

3.2.17. Transmisor de pH

Características principales:

- Tipo de producto o componente: Transmisor de pH.
- Gama del producto: Liquiline Compact.
- Referencia: CM82.
- Marca del producto: Endress + Hauser.
- Principio de medición: Electrodo de vidrio.
- Conexión: Transmisor de dos hilos.
- Protección contra ingreso: IP67, IP68, NEMA Tipo 6.
- Entrada: Un canal transmisor.
- Salida: 4 – 20 mA, HART.

Figura 35

Transmisor de pH



Fuente: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/transmisor-monocal-liquiline-compact-cm82>

3.2.18. Válvula Modulante

Características principales:

- Tipo de producto o componente: Válvula neumática de dos vías.
- Marca del producto: GENEBRE.
- Material del cuerpo: ASTM A216 WCB.
- Límite de presión: agua 19 bar a 100°C, vapor 13 bar a 200°C.
- Temperatura de trabajo -20°C / + 230°C.
- Características del actuador: Tipo diafragma.
- Comando: 4-20 mA con posicionador electro-neumático.

Figura 36

Válvula Modulante



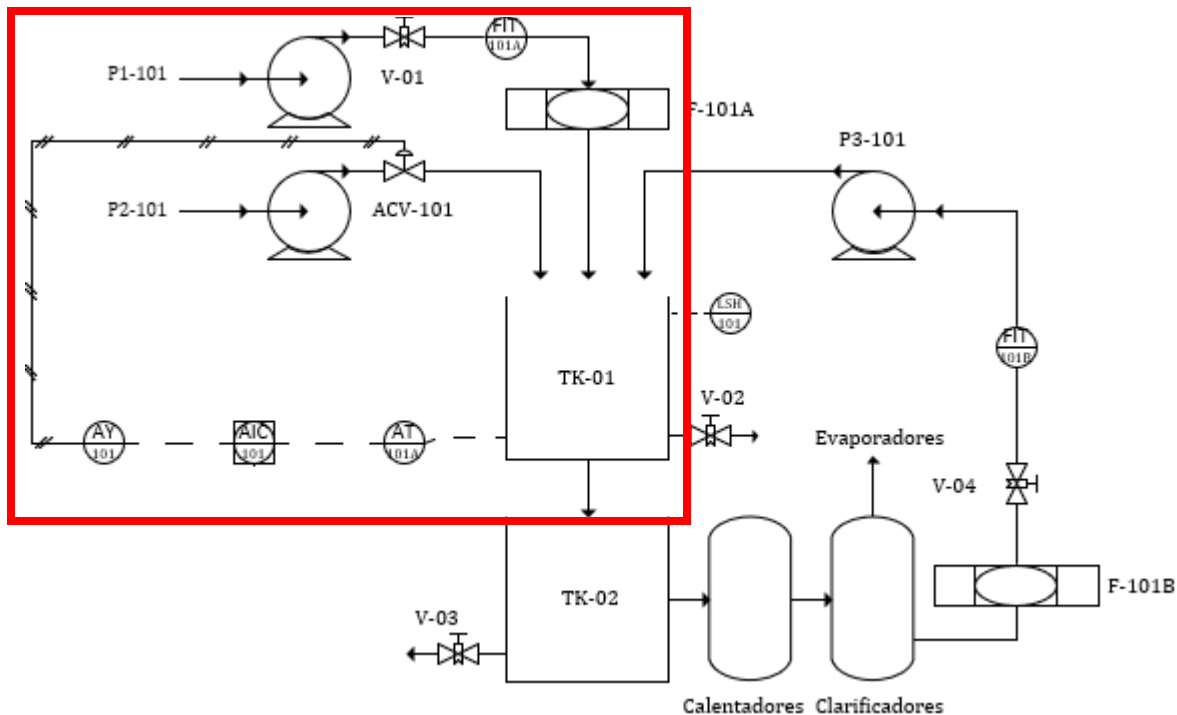
Fuente: <https://www.genebre.es/valvula-neumatica-2-vias-modulante>

3.3. Diseño de Planos

3.3.1. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

Figura 37

P&ID para Control de pH



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Instrumentación del P&ID Propuesto

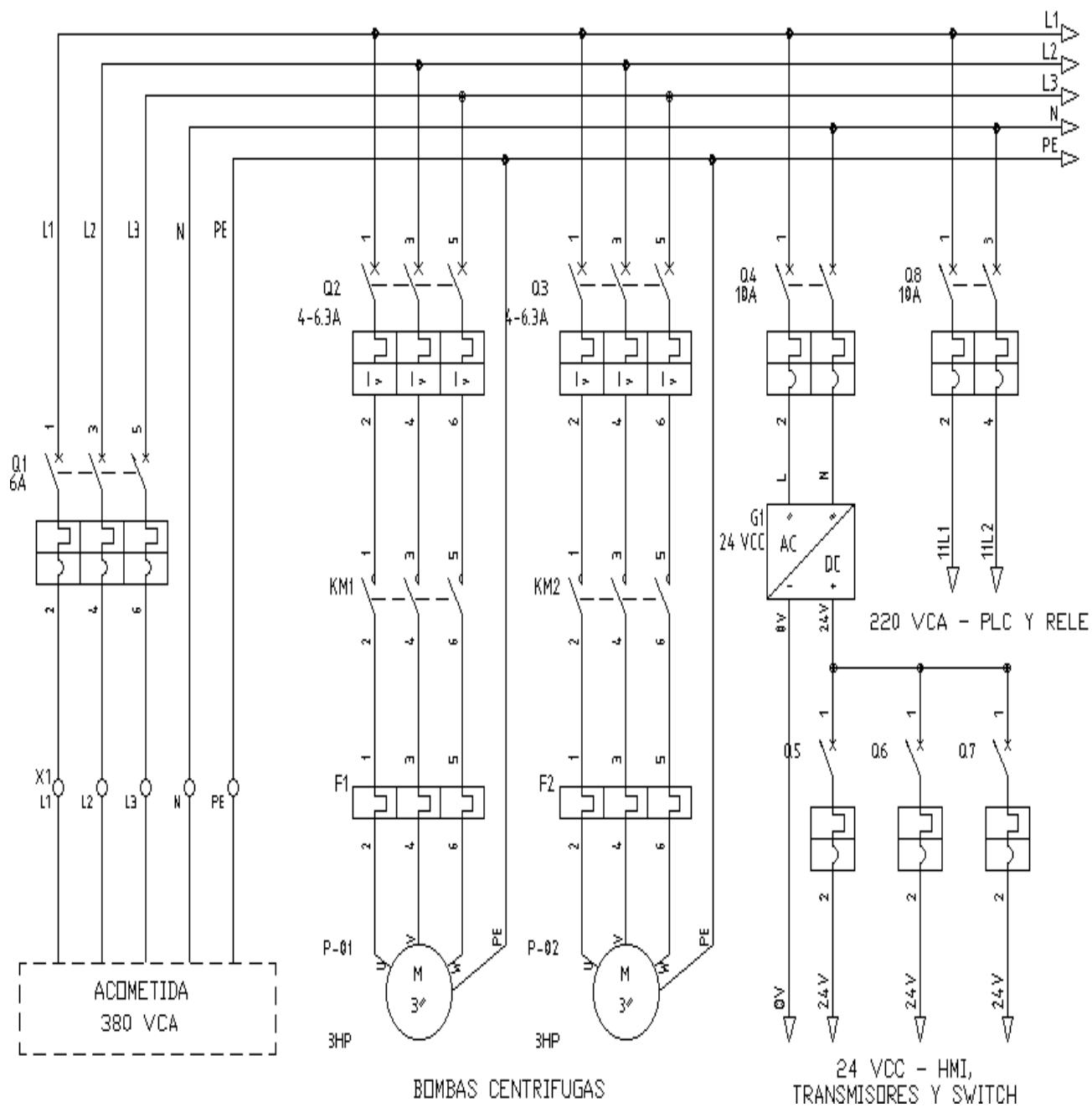
TAG	Descripción
AIC-101	Controlador Indicador de pH
AT-101A	Transmisor de pH
ACV-101	Válvula de control de pH
AY-101	Posicionador de Válvula Modulante
P1-101	Bomba de jugo mezclado (desde Molienda)
P2-101	Bomba de cal (desde Sala de preparación)
TK-01	Balanza N°1

Fuente: Elaboración propia

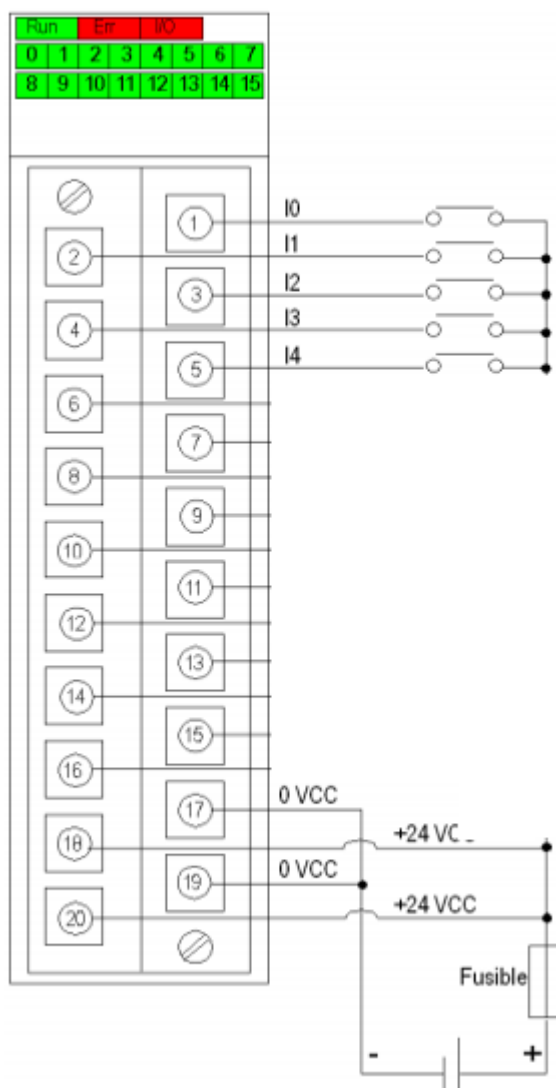
3.3.2. Circuito de Potencia y Circuito de Control

Figura 38

Circuito de Potencia



Fuente: Elaboración propia

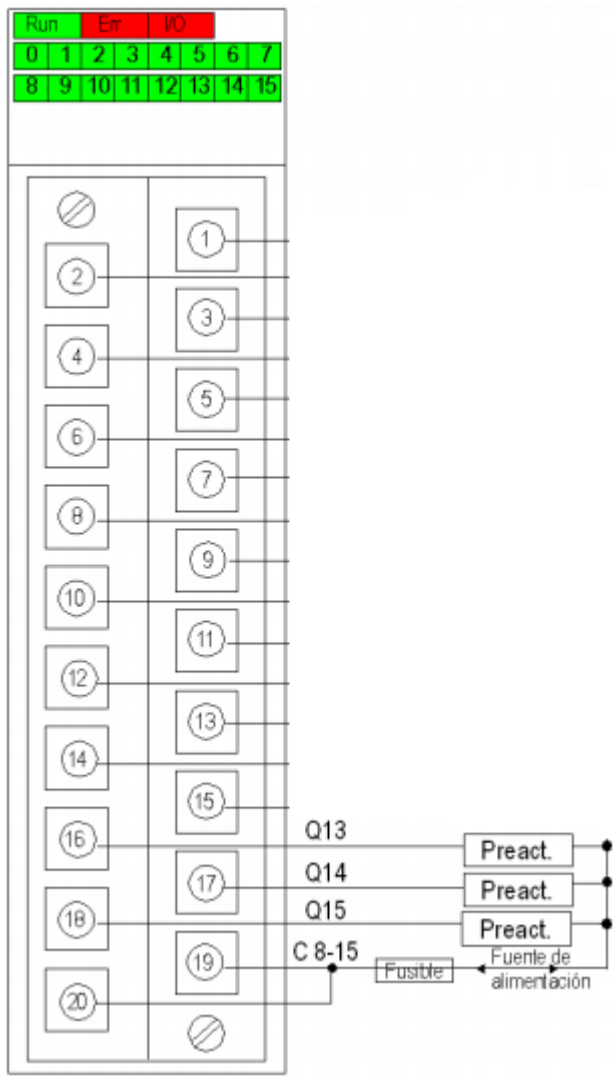
Figura 39*Circuito de Control - Entradas Digitales**Fuente: Elaboración propia***Tabla 7***Lista de Entradas Digitales*

Equipo	Tag	Canal	Descripción
Bomba	Enable	I0	Confirmación de energía eléctrica, Contacto NO, 24 VCC
	Start	I1	Pulsador de marcha, Contacto NO, 24 VCC
	Stop	I2	Pulsador de paro, Contacto NC, 24 VCC
	Pump_Rdy	I3	Confirmación de marcha, Contacto NO, 24 VCC
	Overload	I4	Falla por sobrecarga térmica, Contacto NO, 24 VCC

Fuente: Elaboración propia

Figura 40

Circuito de Control - Salidas Digitales



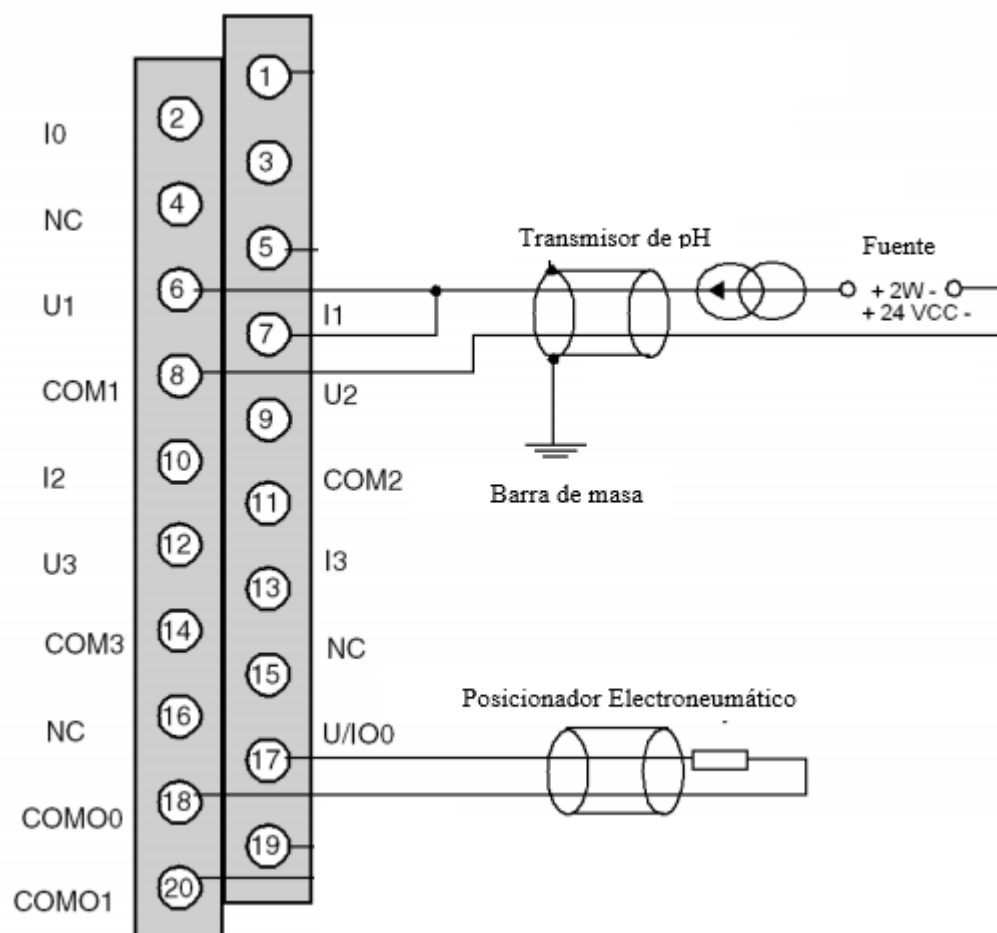
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Lista de Salidas Digitales

Equipo	Tag	Canal	Descripción
Bomba	Pump_Run	Q15	Indicador de marcha, Relé, 220 VCA
	Pump_Stop	Q14	Indicador de paro, Relé, 220 VCA
	Fail	Q13	Indicador de falla, Relé, 220 VCA

Fuente: Elaboración propia

Figura 41*Circuito de Control – E/S Analógicas**Fuente: Schneider Electric***Tabla 9***Lista de E/S Analógicas*

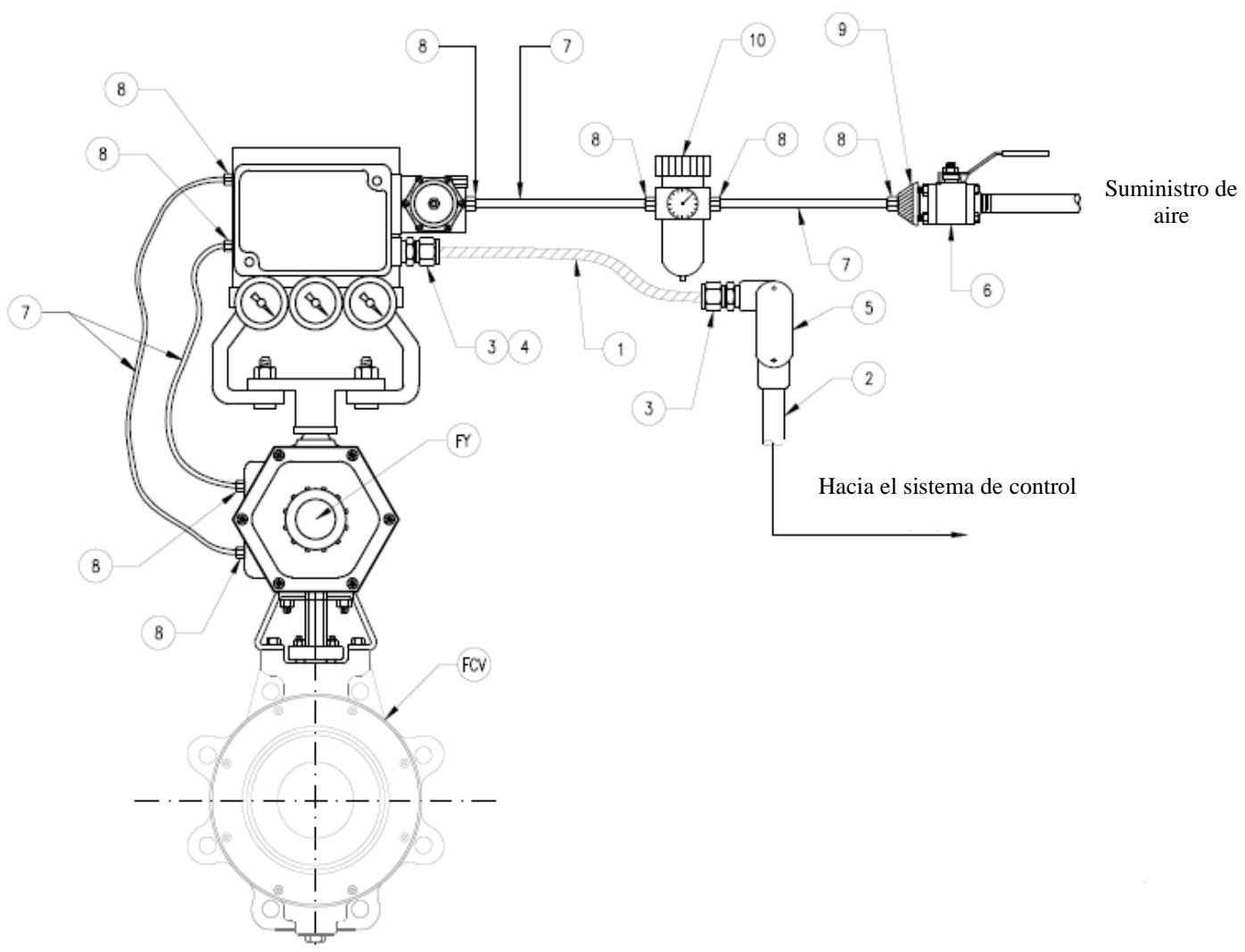
Equipo	Tag	Canal	Descripción
Válvula modulante	Val_Output	U1, I1	Señal de 4 a 20 mA
Transmisor de pH	pH_Input	U/IO0	Señal de 4 a 20 mA

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. *Detalles de Conexión de Instrumentos*

Figura 42

Detalles de Conexión de Válvula Modulante



Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 10

Lista de Materiales para Válvula Modulante

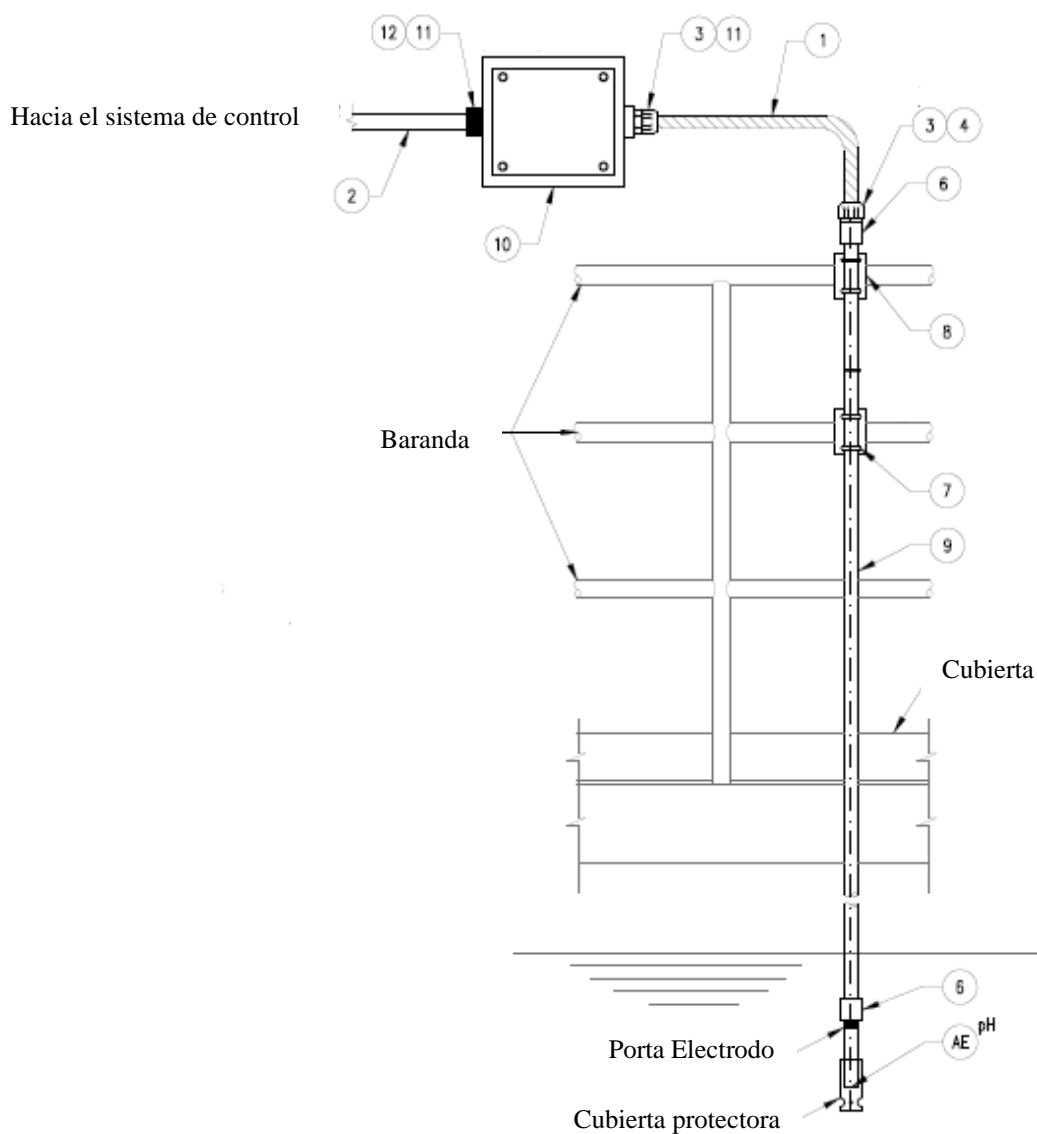
Ítem	Tamaño	Descripción
1	3/4"	Tubería metálica flexible de acero galvanizado
2	1"	Tubería metálica rígida de acero galvanizado
3	3/4"	Conector recto hermético de acero galvanizado

4	1/2" x 3/4"	Adaptador macho/hembra roscado
5	3/4"	Caja condulet tipo "LB"
6	1/2"	Válvula de corte tipo bola
7	1/4"	Manguera de poliuretano color azul, 120 psi, protección UV
8	1/4"	Conector macho con hexágono exterior
9	1/2" x 3/4"	Adaptador macho/hembra roscado con conector macho con hexágono exterior
10	3/4"	Filtro de aire de instrumentación

Fuente: Elaboración propia

Figura 43

Detalles de Conexión de Sensor/Transmisor de pH



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Lista de Materiales para Sensor/Transmisor de pH*

Ítem	Tamaño	Descripción
1	¾"	Tubería metálica flexible de acero galvanizado
2	¾"	Tubería metálica rígida de acero galvanizado
3	¾"	Conector recto hermético de acero galvanizado
4	½" x ¾"	Adaptador macho/hembra roscado
5	¾"	Caja conduit tipo "C"
6	¾"	Niple roscado NTP con tuerca hexagonal intermedia
7	¾"	Abrazadera U-BOLT para conduit (incluye pernos, arandelas, tuercas)
8	¾"	Plancha de acero de ¼" de espesor
9	¾"	Tubería PVC
10	10" x 10" x 10"	Enclosure de acero galvanizado, IP 68, ¾", para el transmisor de pH
11	¾"	Bushing conduit con aislamiento de nylon
12	¾"	Contratuercas conduit roscada

Fuente: *Elaboración propia*

3.4. Diseño de la Lógica de Control

En este apartado se mostrará la metodología utilizada para diseñar la lógica del sistema control. La lógica de control para el bloque de función de las bombas centrífugas y la regulación de pH ha sido desarrollada el software Control Expert v14.1 de Schneider Electric.

3.4.1. Selección de CPU, Bastidor y Creación de E/S (digitales y analógicas)

A continuación, se muestra la configuración del Bus PLC y la creación de E/S digitales y analógicas.

Figura 44

Selección del Procesador

Modicon M340		
BMX P34 1000	03.20	CPU 340-10 Modbus
BMX P34 2000	03.20	CPU 340-20 Modbus
BMX P34 2010	02.00	CPU 340-20 Modbus CANopen
BMX P34 20102	03.20	CPU 340-20 Modbus CANopen2
BMX P34 2020	03.20	CPU 340-20 Modbus Ethernet
BMX P34 2030	02.00	CPU 340-20 Ethernet CANopen

Fuente: *Elaboración propia*

Figura 45

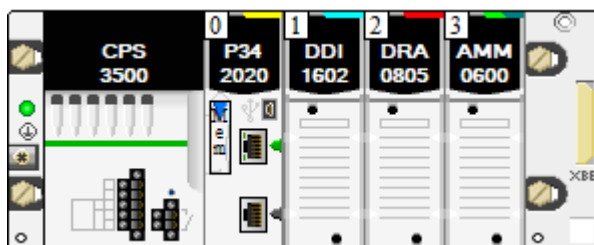
Selección del Bastidor

Bastidor	Descripción
BME XBP 1002	PLACA DE CONEXIONES ETHERNET REDUNDANTE DE 10 SLOTS
BME XBP 1200	PLACA DE CONEXIONES ETHERNET DE 12 SLOTS
BMX XBP 0400	BASTIDOR PRINCIPAL DE 4 SLOTS
BMX XBP 0600	BASTIDOR PRINCIPAL DE 6 SLOTS
BMX XBP 0800	BASTIDOR PRINCIPAL DE 8 SLOTS
BMX XBP 1200	BASTIDOR PRINCIPAL DE 12 SLOTS

Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Configuración del Bus PLC



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

Creación de Entradas Digitales

1	%I0.1.0	Enable	EBOOL	Contacto Aux Guardamotor
2	%I0.1.1	Start	EBOOL	Pulsador Marcha
3	%I0.1.2	Stop	EBOOL	Pulsador Paro
4	%I0.1.3	Pump_Rdy	EBOOL	Confirmación Marcha
5	%I0.1.4	Overload	EBOOL	Sobrecarga Térmica

Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Creación de Salidas Digitales

1	%Q0.2.0	Pump_Run	EBOOL	Indicador Marcha Bomba
2	%Q0.2.1	Pump_Stop	EBOOL	Indicador Paro Bomba
3	%Q0.2.2	Fail	EBOOL	Falla Sobrecarga Térmica

Fuente: Elaboración propia

Figura 49*Creación de Entrada Analógica*

1	%IW0.3.0	pH_Input	INT	Transmisor pH 4-20 mA
2	%IW0.3.0.1		INT	
3	%IW0.3.0.2		INT	

Fuente: Elaboración propia

Figura 50*Creación de Salida Analógica*

1	%QW0.3.0	Val_Output	INT	Señal Válvula 0-100 %
2	%QW0.3.0.1		INT	
3	%QW0.3.1		INT	

Fuente: Elaboración propia

Figura 51*Variables Adicionales*

 Regulacion_Simulacion	REAL		REGULACION (Simulacion)	%MW200
 pH_Simulacion	REAL		MEDIDA DE pH (Simulacion)	%MW100
 Td	TIME		Tiempo Derivativo	%MW10
 Ti	TIME		Tiempo Integral	%MW8
 Kp	INT		Ganancia Proporcional	%MW6
 SetPoint	INT		Set Point de pH	%MW5
 Regulacion_HMI	INT			%MW4
 pH_HMI	INT		pH para panel HMI	%MW3

Fuente: Elaboración propia

Figura 52*Dirección IP de CPU*

<input checked="" type="radio"/> Configurada	
Dirección IP	<input type="text" value="192 . 168 . 0 . 10"/>
Máscara de subred	<input type="text" value="255 . 255 . 255 . 0"/>
Dirección de pasarela	<input type="text" value="0 . 0 . 0 . 0"/>

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Bloque de función para bombas centrífugas

En la Fig. 53 se muestra la creación de E/S y de la sección de programación para el bloque de función (DFB) denominado “CONTROL_BOMBAS”.

Figura 53

E/S para Bloque de Función

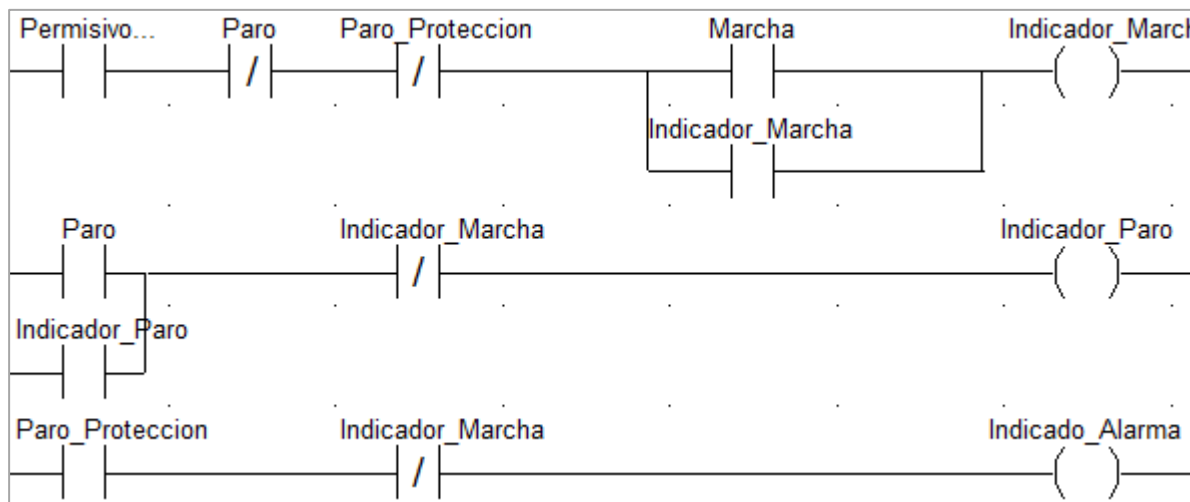
CONTROL_BOMBAS				<DFB>
<entradas>				
●	Pemisisvo_Marcha	1	BOOL	
●	Marcha	2	BOOL	
●	Paro	3	BOOL	
●	Confirmacion_Marcha	4	BOOL	
●	Paro_Proteccion	5	BOOL	
<salidas>				
●	Indicador_Marcha	1	BOOL	
●	Indicador_Paro	2	BOOL	
●	Indicador_Alarma	3	BOOL	

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 54 se muestra la lógica de control interna del DFB “CONTROL_BOMBAS”.

Figura 54

Lógica de Bloque de Función

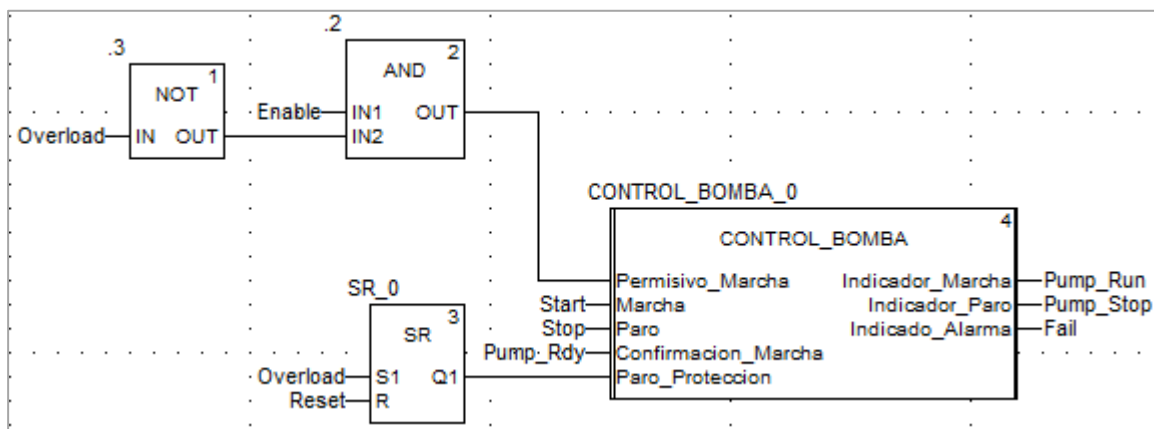


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 55 se muestra la lógica de control final para el control de la bomba.

Figura 55

Lógica para Control de Bomba



Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Escalamiento de E/S Analógicas y Controlador PID

Teniendo en cuenta que el sensor/transmisor de pH seleccionado tiene un rango de medida de 0 a 14 con un rango de salida de 4 a 20 mA, y conociendo que en el proceso de conversión analógica-digital (ADC) el PLC utiliza valores en el rango de 0 a 10.000 para representar las señales de 4 a 20 mA, se determinó la ecuación de linealidad para el escalamiento de la entrada analógica.

Tabla 12

Escalamiento de Entrada Analógica

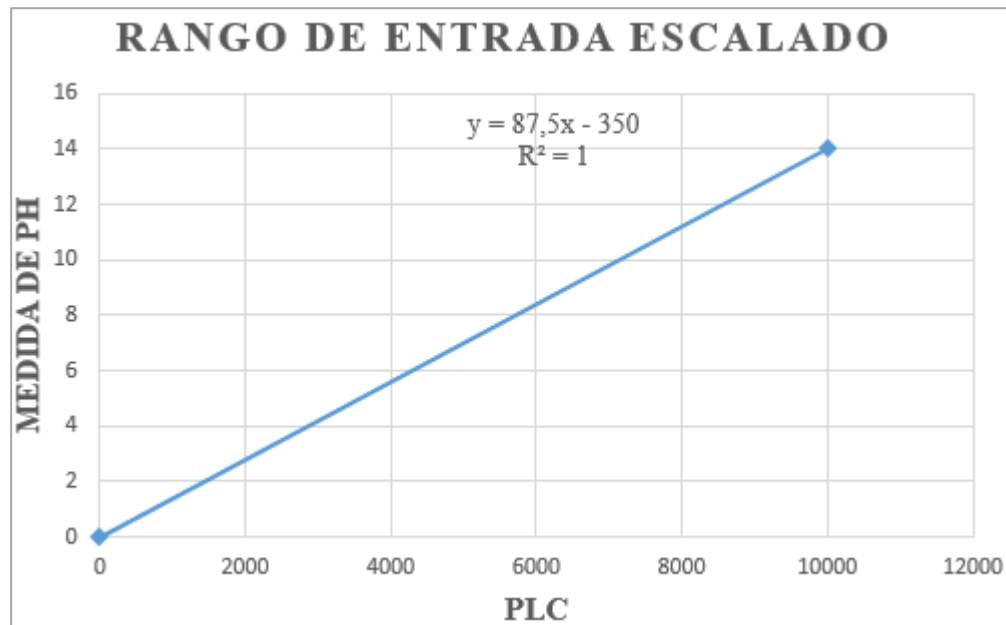
Parámetro	Sensor (pH)	Corriente (mA)	PLC
Valor mínimo	0	4	0
Valor máximo	14	20	10.000

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 56 se muestra la ecuación de linealidad calculada para obtener los valores de la medida de pH.

Figura 56

Ecuación de Linealidad para Entrada Analógica

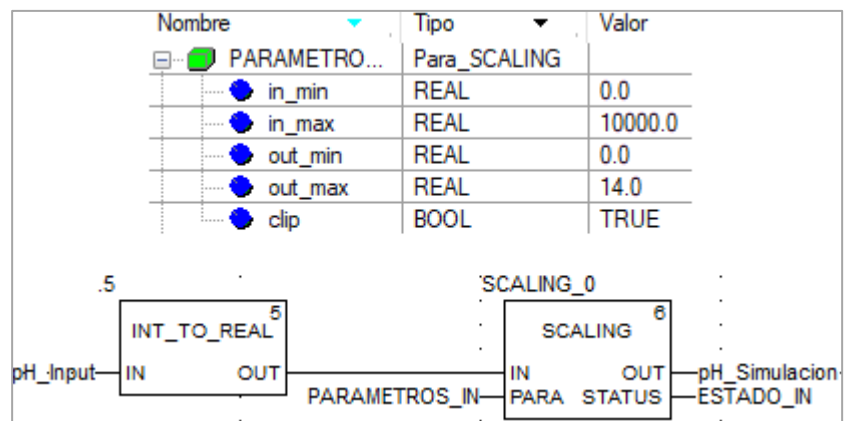


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 57 se muestra la lógica de control implementada en el software para escalar la entrada analógica.

Figura 57

Escalamiento de Entrada Analógica en Software



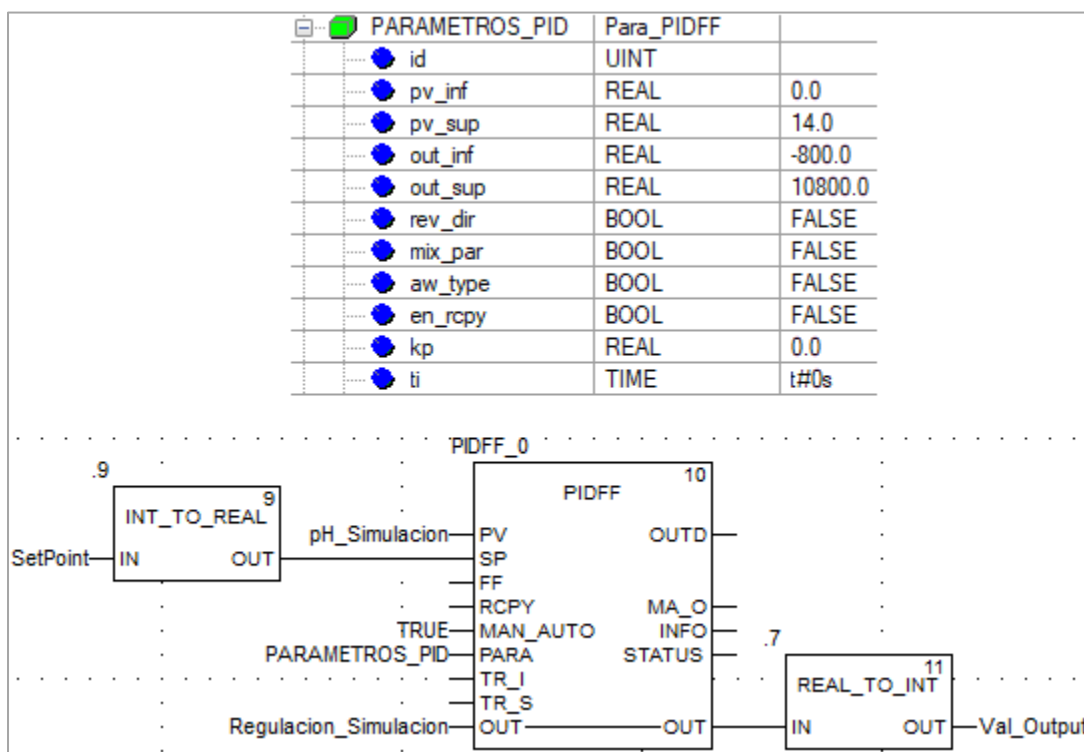
Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 58 se muestra la configuración del bloque de función del controlador PID. En este bloque se deben ingresar los parámetros necesarios para generar el algoritmo de control: Set point (SP), medida de pH (PV), PARA (SP, Kp, Ti, Td) y OUT.

Según las especificaciones técnicas del módulo de salidas analógicas, el rango de salida es de -800 a 10.800 para representar señales de 4 a 20 mA, por lo tanto, la señal de salida del controlador PID debe oscilar en ese rango para su posterior escalamiento.

Figura 58

Configuración de Controlador PID en Software



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que el rango de la válvula modulante de cal varía de 0 a 100 % para señales de 4 a 20 mA en el posicionador, y conociendo que en el proceso de conversión digital-analógica (DAC) el PLC utiliza valores en el rango de -800 a 10.800 para representar señales de 4 a 20 mA, se determinó la ecuación de linealidad para el escalamiento de la salida analógica.

Tabla 13

Escalamiento de Salida Analógica

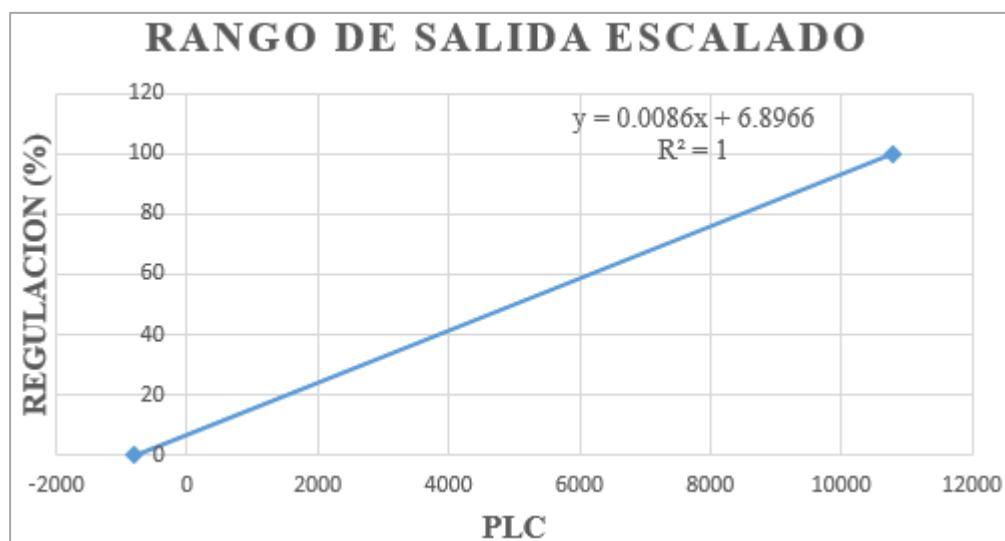
Parámetro	Válvula (%)	Módulo de salida (mA)	PLC
Valor mínimo	0	4	-800
Valor máximo	100	20	10.800

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 59 se muestra la ecuación de linealidad diseñada para obtener los valores del porcentaje de regulación de la válvula dosificadora de lechada de cal.

Figura 59

Ecuación de Linealidad para Salida Analógica

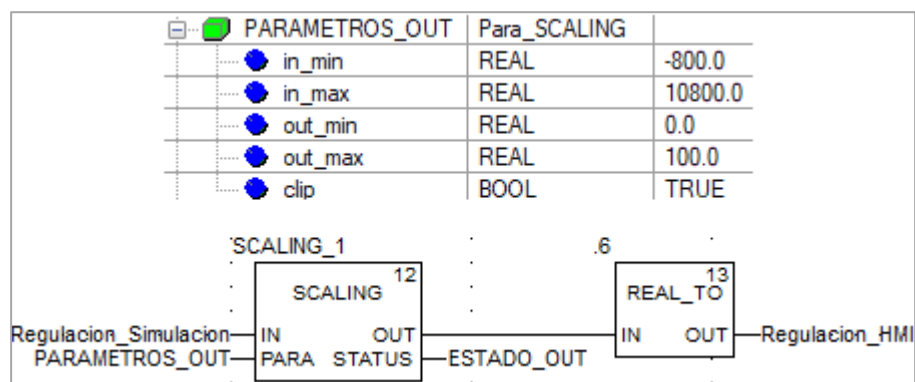


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 60 se muestra la lógica de control implementada en el software para escalar la salida analógica.

Figura 60

Escalamiento de Salida Analógica en Software



Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño de la Interfaz Humano-Máquina

La interfaz gráfica se desarrolló el software Vijeo Designer v6.2. Está formada dos pantallas estáticas: PRINCIPAL, PROCESO y por dos ventanas emergentes: PID y FALLAS.

Figura 61

Pantalla Principal

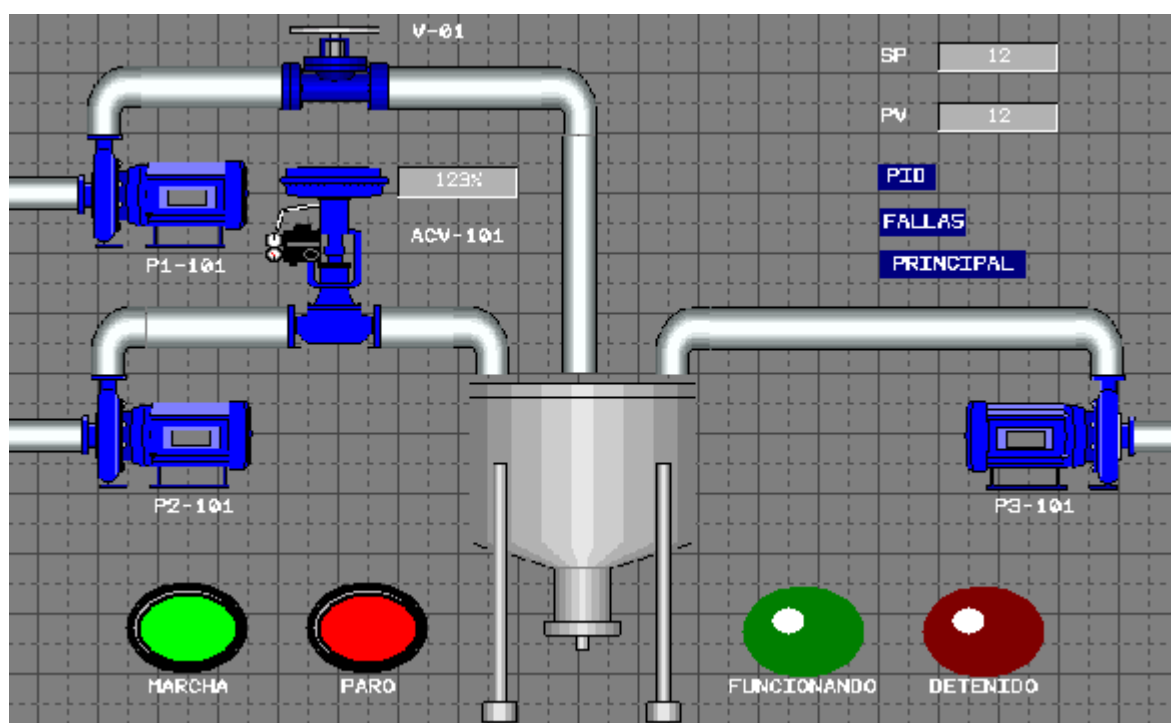


Fuente: Elaboración propia

En la pantalla de PROCESO se encuentran los dispositivos que forman parte del lazo de control de pH en la balanza de jugo mezclado. Los pilotos luminosos indicarán el estado del proceso (Verde: Funcionando / Rojo: Detenido). Los operarios podrán observar la medida de pH y el porcentaje de regulación de la válvula dosificadora de cal. Adicionalmente, existen tres botones, dos son para ir hacia las ventanas emergentes de configuración del PID y FALLAS y uno para regresar a la pantalla PRINCIPAL.

Figura 62

Pantalla de Proceso



Fuente: Elaboración propia

Al presionar el botón virtual PID de la pantalla de PROCESO, el operario ingresará a la pantalla de configuración de parámetros, tal como se muestra en la Fig. 63. En la pantalla de configuración del controlador PID, el operador debe ingresar los valores de: Set Point, K_p , T_i s y

Td, estos valores fueron calculados a base de pruebas, teniendo en cuenta el efecto que produce el aumento o disminución del valor de cada parámetro sobre la dinámica del proceso.

Figura 63

Ventana Emergente PID



Fuente: Elaboración propia

Al presionar el botón virtual FALLAS de la pantalla de PROCESO, el operario ingresará a la pantalla de falla del sistema para resetearla, tal como se muestra en la Fig. 64.

Figura 64

Ventana Emergente FALLAS

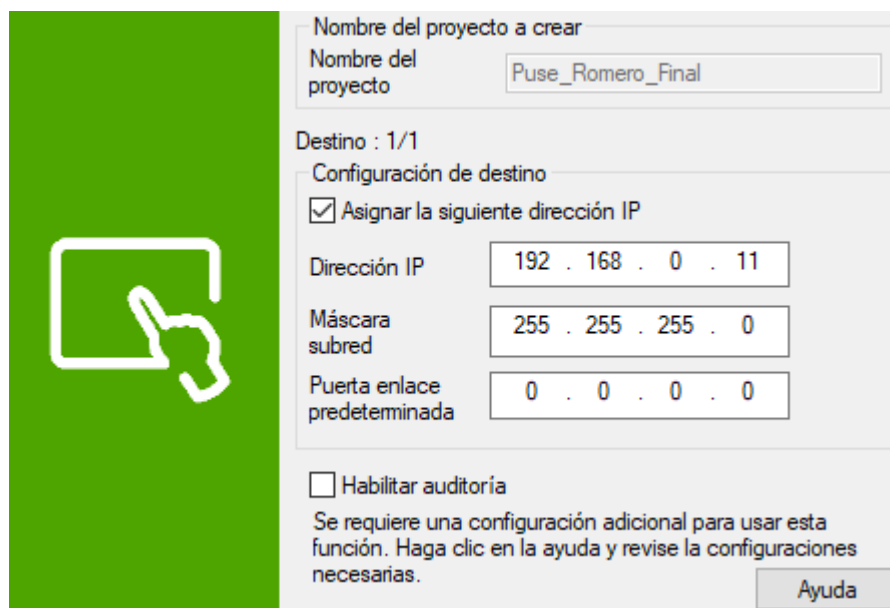


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 65 se muestra la configuración de la dirección IP del panel HMI.

Figura 65

Dirección IP HMI



The screenshot shows a configuration window for an HMI panel. On the left is a green vertical bar with a white icon of a hand pointing at a screen. The main area is a light gray form with the following fields:

- Nombre del proyecto a crear:** Nombre del proyecto: Puse_Romero_Final
- Destino : 1/1**
- Configuración de destino:**
 - Asignar la siguiente dirección IP
 - Dirección IP: 192 . 168 . 0 . 11
 - Máscara subred: 255 . 255 . 255 . 0
 - Puerta enlace predeterminada: 0 . 0 . 0 . 0
- Habilitar auditoría
- Se requiere una configuración adicional para usar esta función. Haga clic en la ayuda y revise la configuraciones necesarias.
- Ayuda** button

Fuente: Elaboración propia

3.6. Presupuesto

El presupuesto está basado en la lista de precios de productos de la marca Schneider Electric del 2019/20.

Tabla 14

Precio de Equipos

ÍTEM	EQUIPO	CANTIDAD	P. UNITARIO (S/)	P. TOTAL (S/)
1	ITM trifásico	1	49.99	49.99
2	ITM monofásico	1	29.99	29.99
3	ITM unipolar	1	24.99	24.99
4	Fuente de alimentación	1	599.99	599.99
5	Guardamotor	1	124.99	124.99
6	Contactador	1	224.99	224.99
7	Panel HMI	1	2080	2080
8	CPU	1	1200	1200
9	Módulo de entradas digitales	1	875	875

10	Módulo de salidas digitales	1	850	850
11	Módulo E/S analógicas	1	1250	1250
12	Switch de 5 puertos	1	425	425
13	Patch cord CAT 6A	1	89.9	89.9
14	Pulsadores	2	35.5	71
15	Pilotos luminosos	2	35.5	71
16	Sensor de pH	1	674.9	674.9
17	Transmisor de pH	1	1374.9	1374.9
18	Válvula modulante	1	3574.9	3574.9
TOTAL				13591.54

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

Precio de Montaje, Configuración y Puesta en Marcha

ÍTEM	TAREA	P. TOTAL (S/)
1	Montaje de Equipos	1500.00
2	Configuración y Puesta en Marcha	2500.00
TOTAL		4000.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Costo Total del Proyecto

ÍTEM	TAREA	P. TOTAL (S/)
1	Precio de Equipos	13591.54
2	Montaje, Configuración y Puesta en Marcha	4000.00
TOTAL		17591.54

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Simulación del Sistema de Control

4.1.1. Simulación del Control de Bomba

Al iniciar la simulación, la primera pantalla de operación que se muestra en el panel HMI es la PRINCIPAL. Esta pantalla cuenta un botón virtual para redireccionar al operario hacia la pantalla de PROCESO.

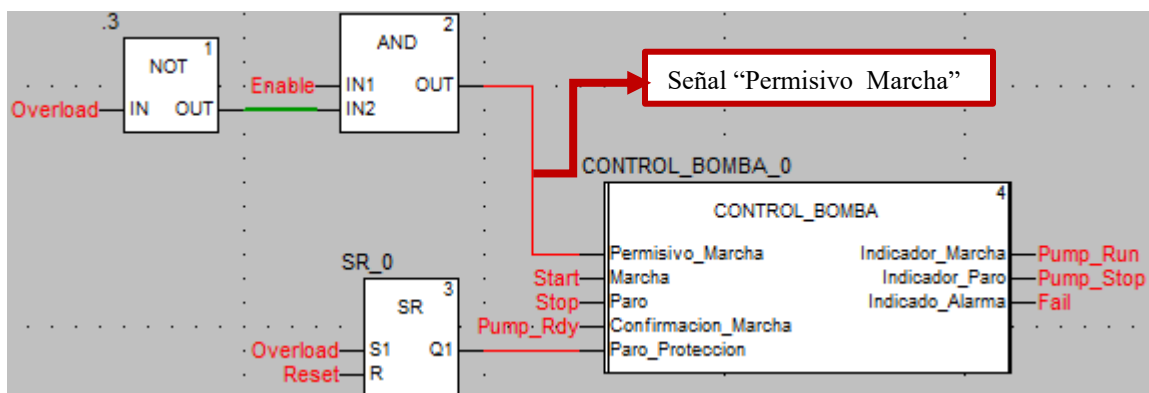
Figura 66

Pantalla PRINCIPAL en Simulación

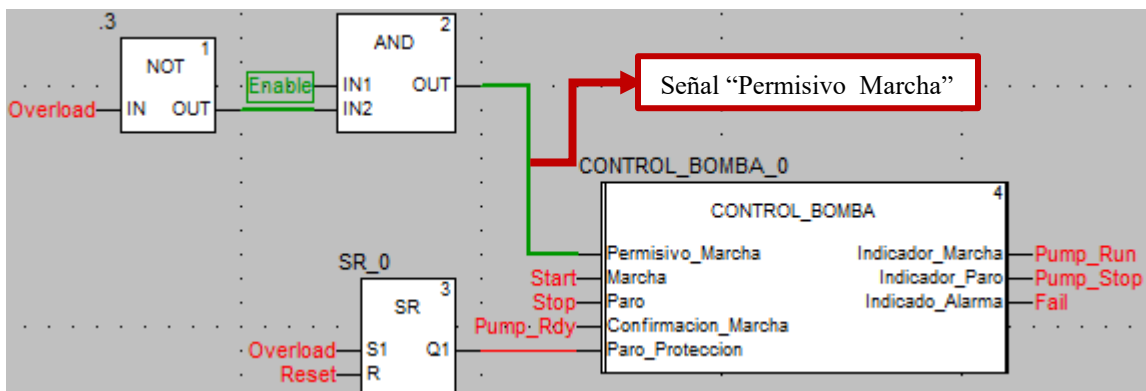


Fuente: Elaboración propia

La simulación en el PLC nos indica que la bomba se encuentra desactivada, tal como se muestra en la Fig. 67. Esto se debe a que la señal “Permisivo de Marcha” tiene un estado lógico igual a 0 (color rojo), lo que impide que la bomba entre en funcionamiento.

Figura 67*Permisivo de Marcha Desactivado**Fuente: Elaboración propia*

Se ha forzado el estado lógico de la señal "Enable" a 1 (contacto NO del guardamotor), además, se debe verificar que no exista sobrecarga, de esta manera el estado lógico de la señal "Permisivo de Marcha" cambiará a 1, tal como se muestra en la Fig. 68.

Figura 68*Permisivo de Marcha Activado**Fuente: Elaboración propia*

En el panel HMI se podrá ingresar a la ventana emergente FALLAS para verificar que realmente no existe sobrecarga térmica en la bomba centrífuga (piloto de emergencia apagado). De esta manera, el operario entenderá que el permisivo de marcha está habilitado e iniciará el proceso a través del botón virtual de “Marcha” para activar la bomba (piloto de color verde).

Figura 69

Bomba Activada

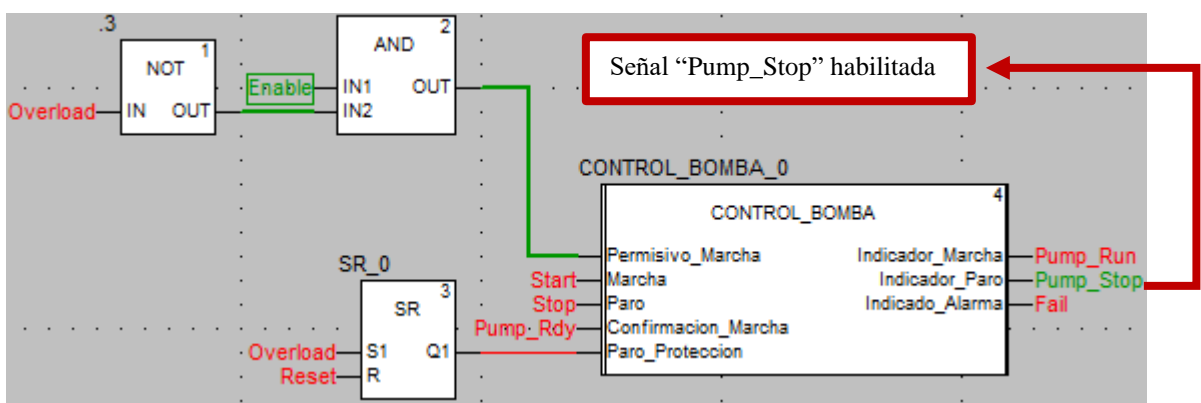


Fuente: Elaboración propia

Si se detiene la bomba a través del botón virtual de “Paro”, se activará el piloto luminoso de color rojo, indicando que se ha detenido (sin falla). En el PLC, esto se representa con un estado lógico 1 en la señal de salida “Pump_Stop”.

Figura 70

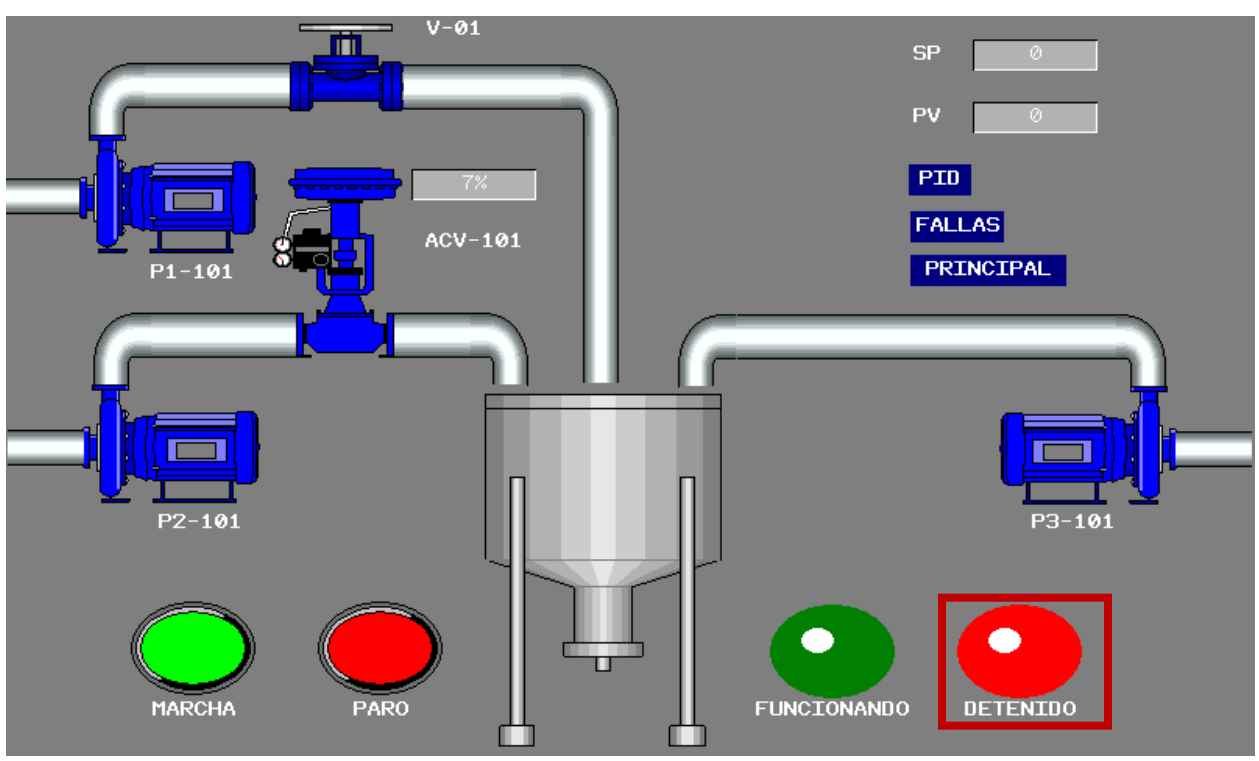
Bomba Desactivada sin Falla (PLC)



Fuente: Elaboración propia

Figura 71

Bomba Desactivada sin Falla (HMI)

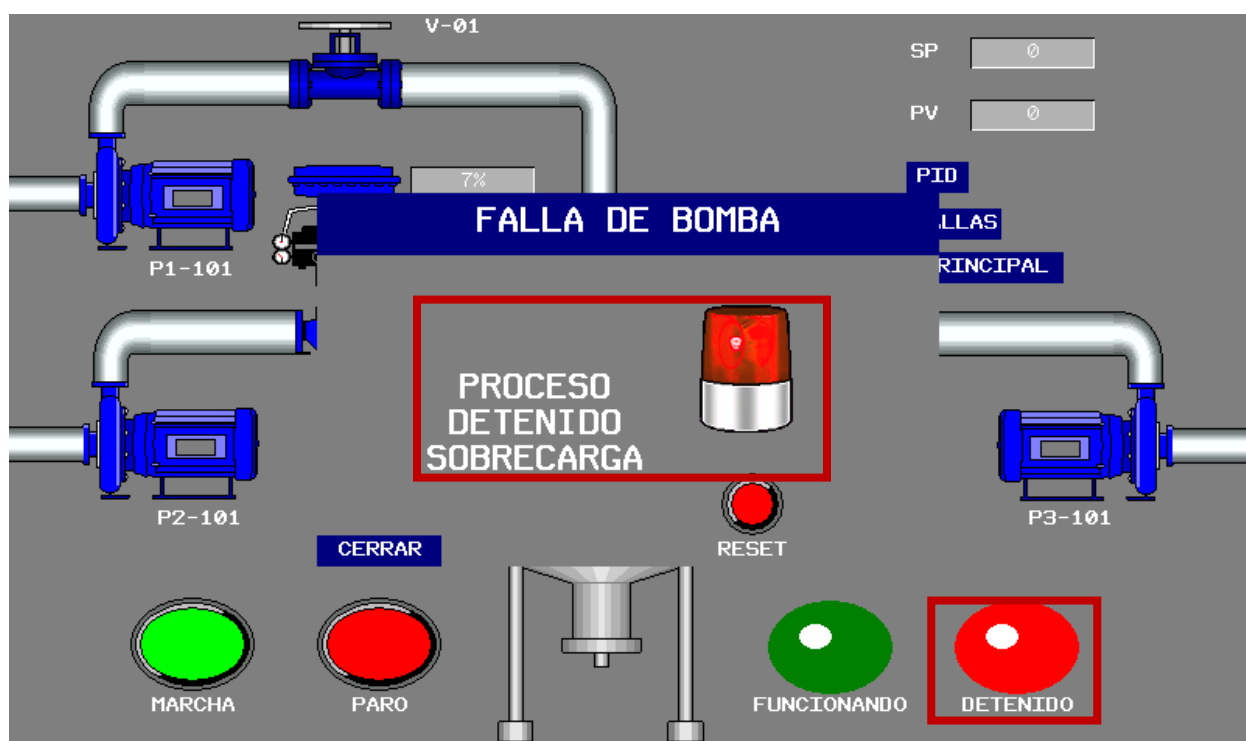


Fuente: Elaboración propia

Para simular una falla por sobrecarga térmica, se ha forzado el estado lógico de la señal de entrada Overload a 1, lo que originará que se active la señal “Paro por Protección”. Esta acción, a su vez, causa que se deshabilite el “Permisivo de Marcha” y señal “Pump_Run”, indicando que el proceso se ha detenido por sobrecarga térmica. En el PLC, esto se representa con un estado lógico 1 en la señal de salida “Fail”.

Figura 72

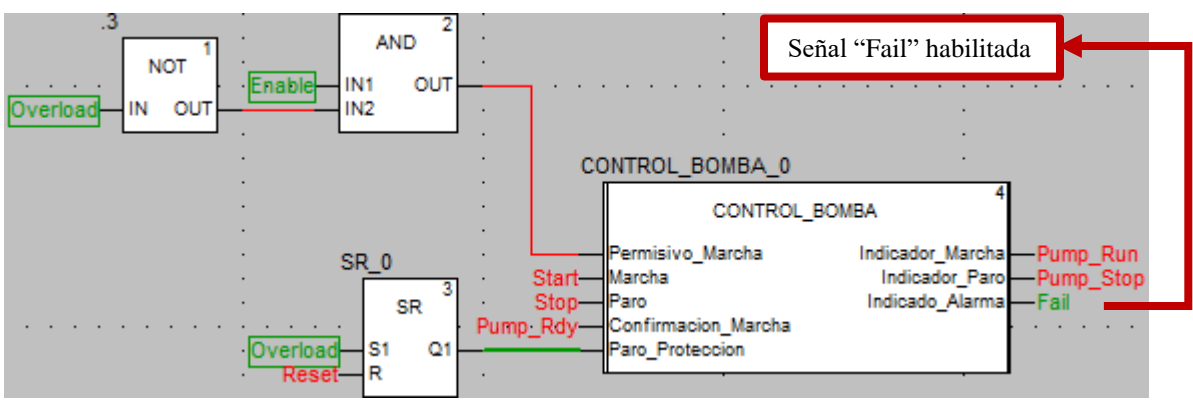
Bomba Desactivada por Falla (HMI)



Fuente: Elaboración propia

Figura 73

Bomba Desactivada por Falla (PLC)

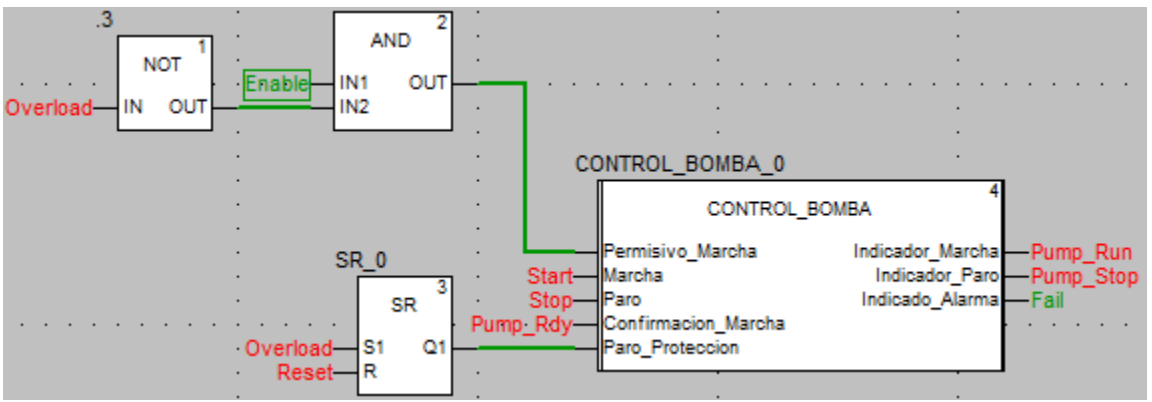


Fuente: Elaboración propia

Luego de quitar el forzado de la señal de entrada “Overload”, se puede observar que el proceso sigue detenido. Esta acción se realiza por motivos de seguridad, pues podría ocurrir que la sobrecarga haya provocado daños a otros equipos del sistema.

Figura 74

Falla por Sobrecarga Persistente

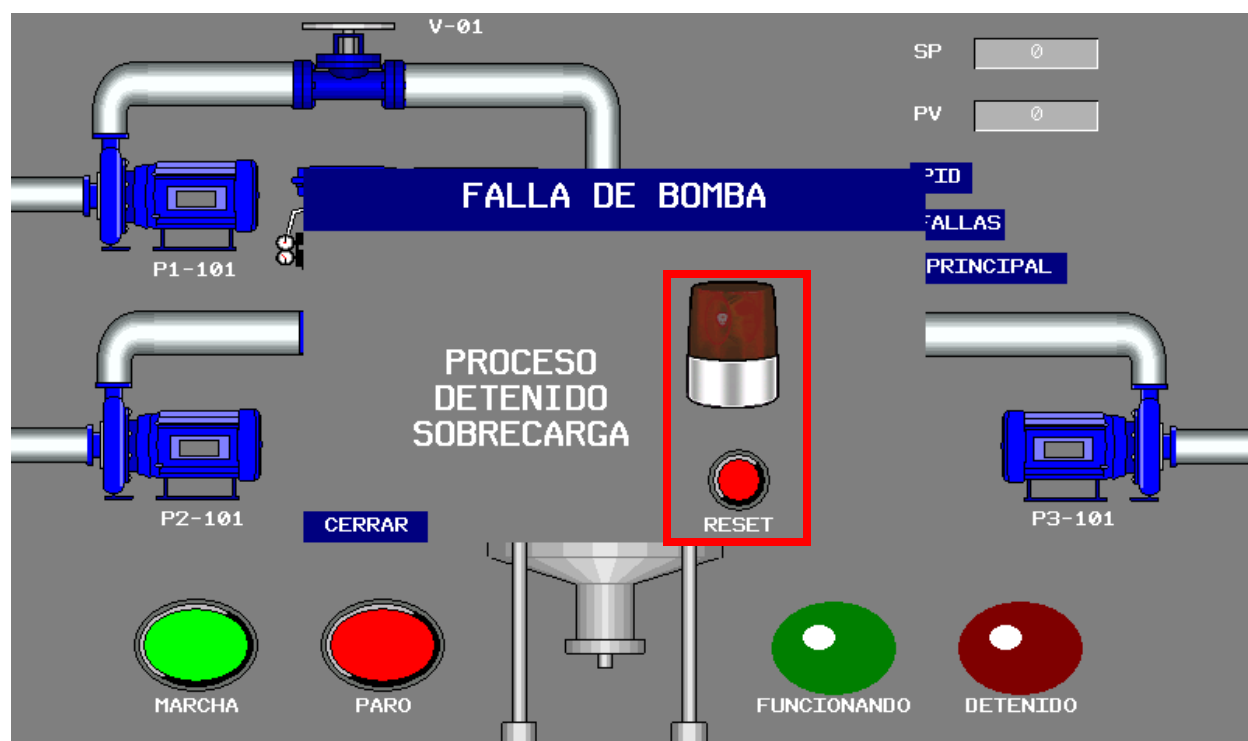


Fuente: Elaboración propia

Para que la bomba centrífuga reanude sus funciones con normalidad, el operario debe activar la señal de “Reset” desde el panel HMI. De esta manera, el piloto de emergencia se apaga.

Figura 75

Falla por Sobrecarga Reseteada



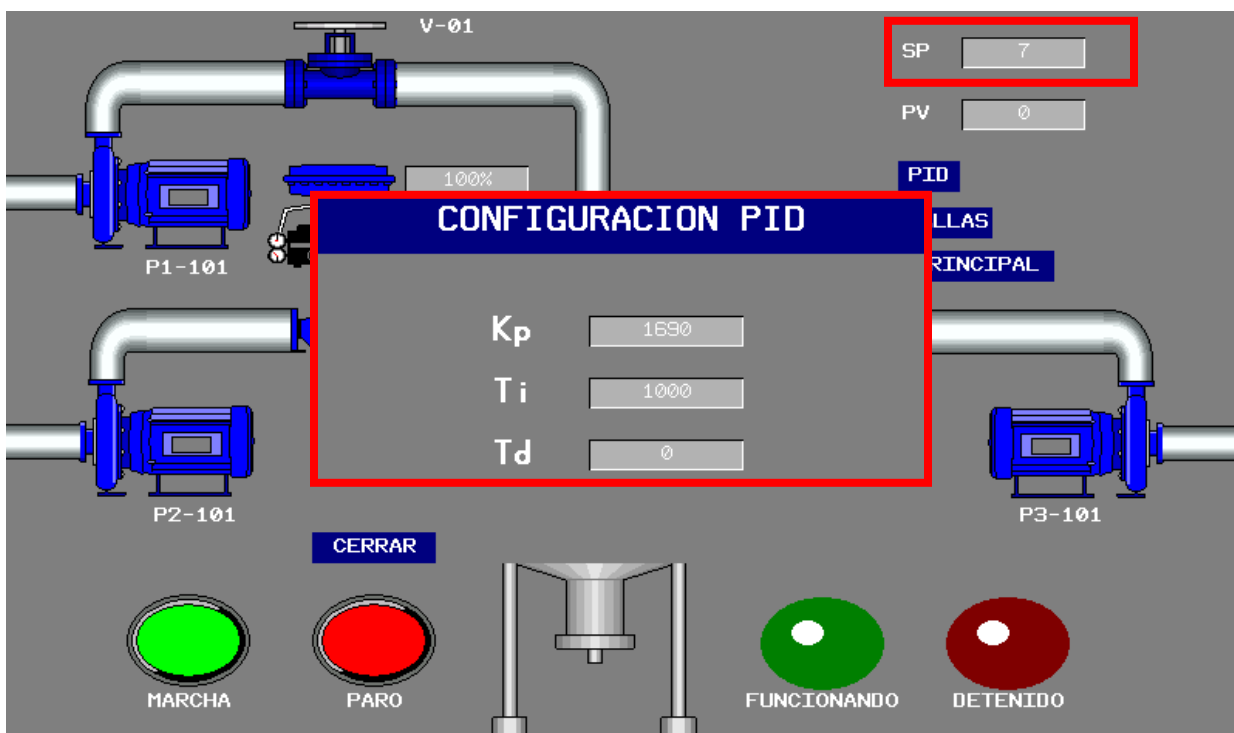
Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Simulación de la Regulación de Cal

Como se explicó anteriormente, en la etapa de molienda a la caña de azúcar triturada se le agrega agua para formar un jugo concentrado que tiene un pH ácido (mayor a 5,5). Para obtener el valor de pH óptimo (7) en el jugo mezclado, la primera acción que debemos realizar es ingresar los parámetros del controlador PID: $SP = 7$, $K_p = 1,69$, $T_i = 0,000633$ s, $T_d = 0$ s, estos valores fueron calculados por Matlab, sin embargo, estos valores representan el punto de partida para lograr una sintonización eficiente. Es por ello que, para realizar la simulación, los valores de las constantes K_p , T_i y T_d , se han multiplicado por un factor de 1000: $K_p = 1690$, $T_i = 0,633$ s = 633 ms, $T_d = 0$ s, todo esto con el fin de acelerar el tiempo de respuesta de controlador. Finalmente, mediante pruebas de ensayo, se optó por asignarle el valor de $T_i = 1000$ ms.

Figura 76

Ingreso de Parámetros del Controlador

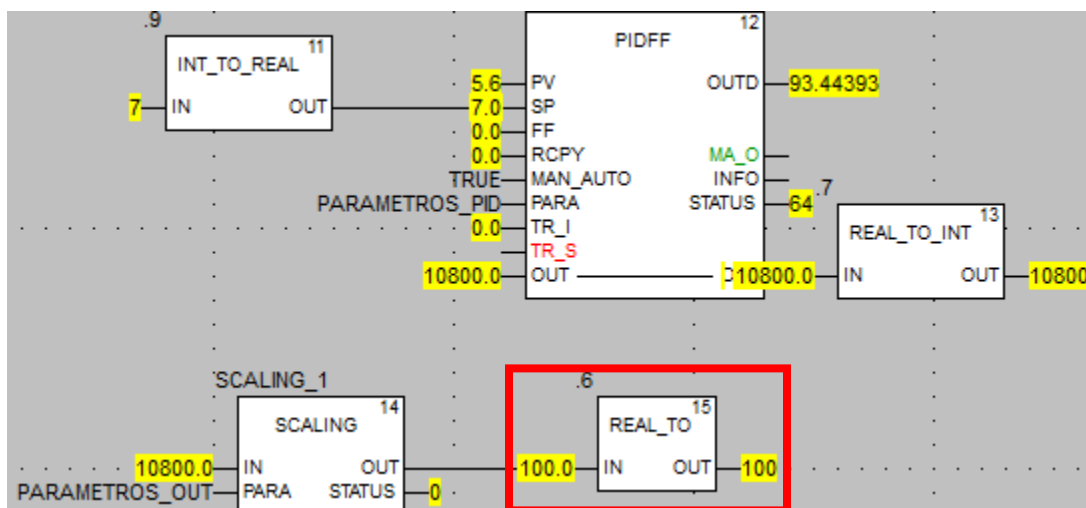


Fuente: Elaboración propia

Para simular las condiciones reales del proceso, se ha forzado el valor de la medida de pH (PV) a 5,6 desde la tabla de animación del PLC en el software Control Expert. De esta manera, el controlador compara el valor deseado o SP (7) con el valor de la variable de proceso o PV (5,6) para obtener una desviación o señal de error (SP-PV). Como la medida de pH es menor que el valor deseado, el controlador genera una señal correctora para incrementar el porcentaje de apertura de la válvula dosificadora a 100 %, tal como se muestra en las Figs. 77 y 78.

Figura 77

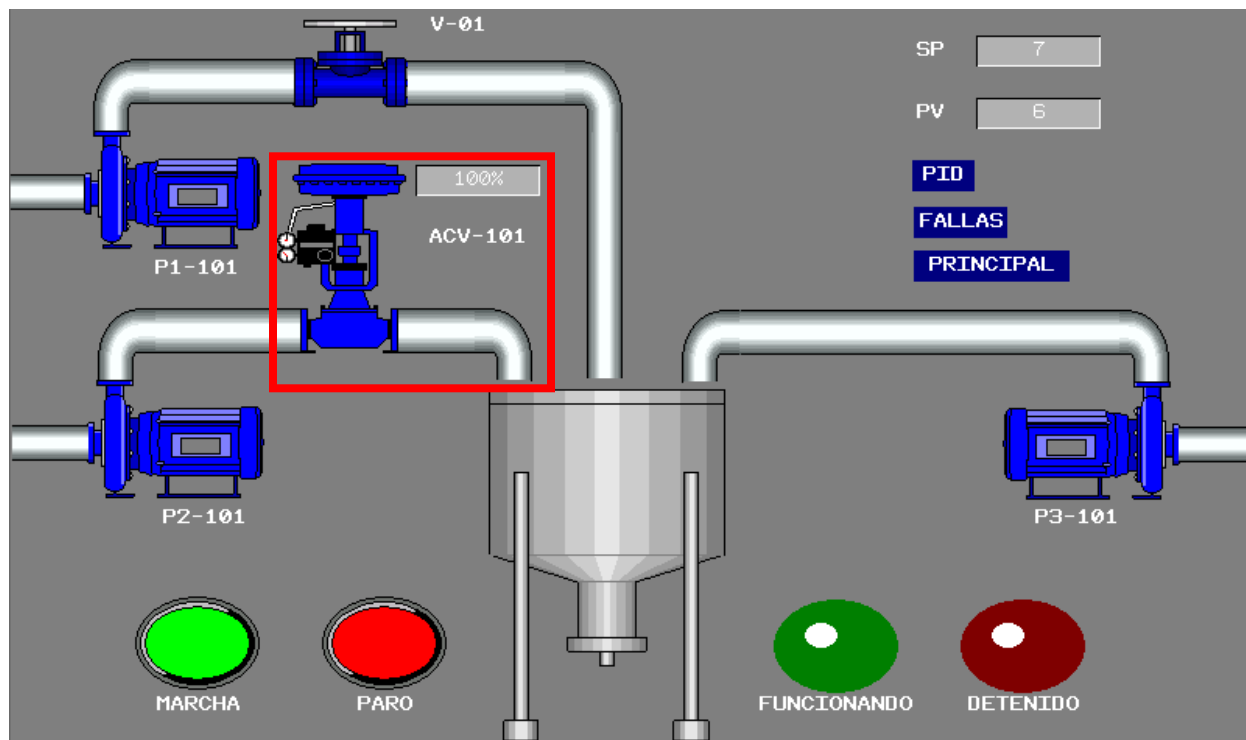
Válvula Dosificadora Abierta al 100 % en PLC



Fuente: Elaboración propia

Figura 78

Válvula Dosificadora Abierta al 100 % en HMI



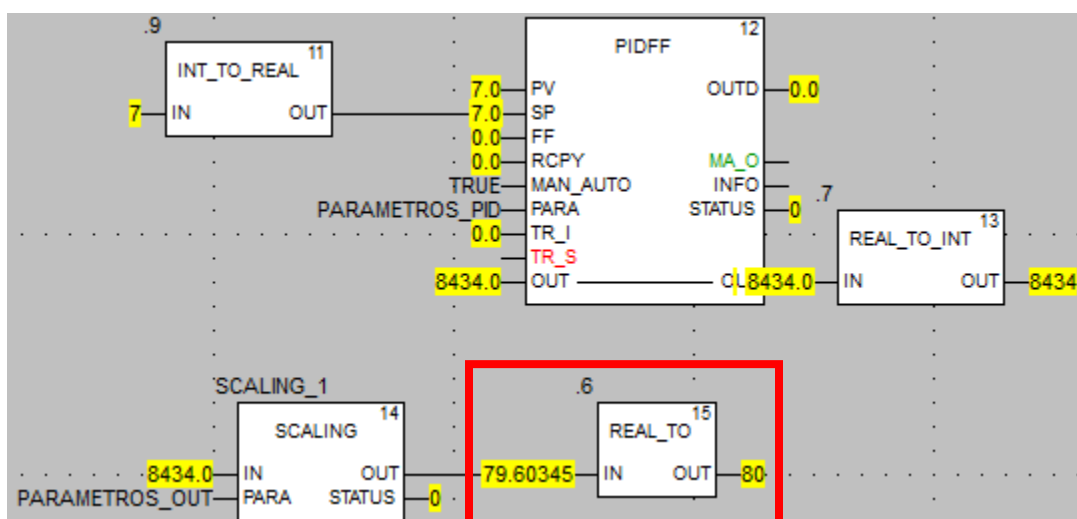
Fuente: Elaboración propia

El proceso de regulación continuará hasta que la medida de pH coincida con el valor deseado ($SP-PV=0$). Para lograr esto, se ha forzado el valor de la medida de pH o PV a 7 desde la tabla de animación del software Control Expert. En estas condiciones, el porcentaje de apertura de la válvula dosificadora se estabiliza en 79,6 %, tal como se muestra en las Figs. 79 y 80.

También es importante mencionar que en el panel HMI los valores de la medida de pH o PV y el porcentaje de apertura/cierra de la válvula dosificadora de cal, se mostrarán como números enteros.

Figura 79

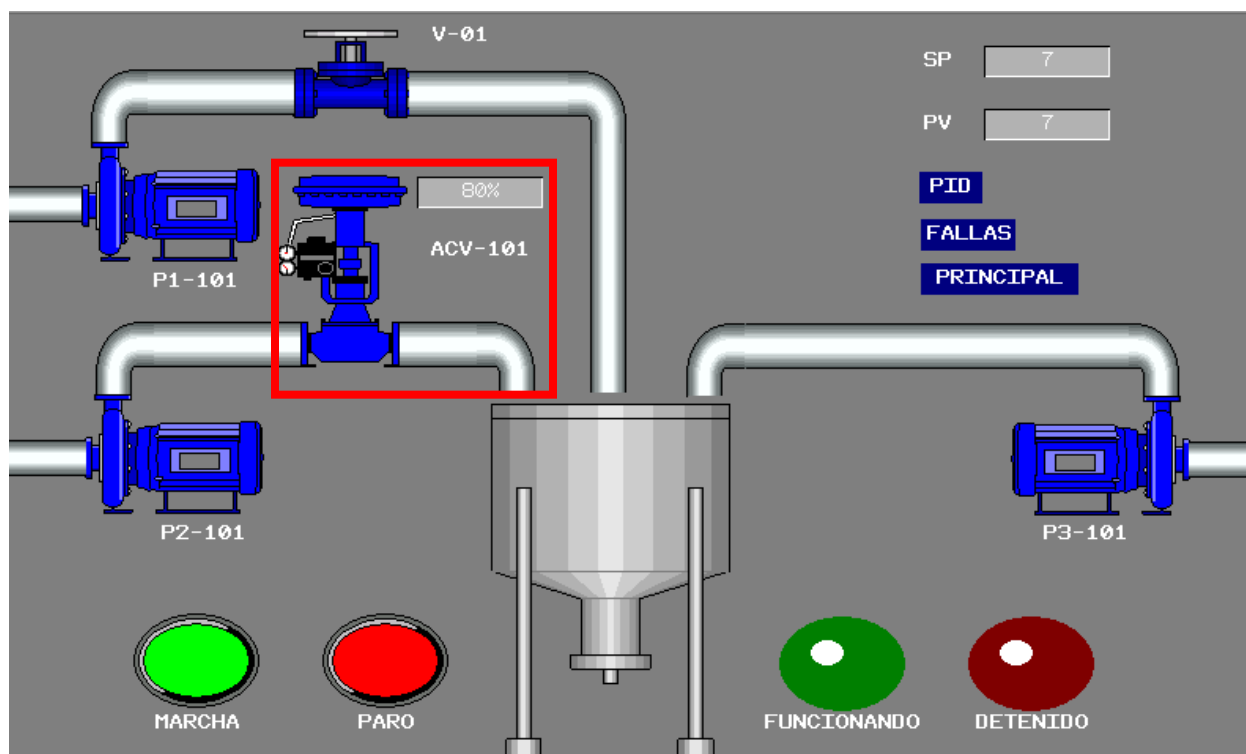
Válvula Dosificadora Abierta al 80 % en PLC



Fuente: Elaboración propia

Figura 80

Válvula Dosificadora Abierta al 80 % en HMI

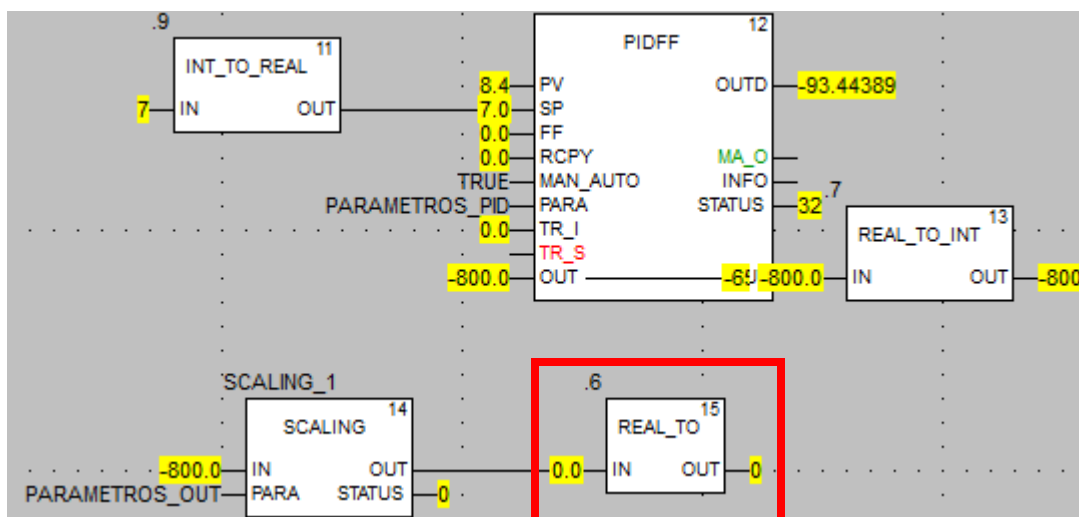


Fuente: Elaboración propia

Si el valor de la medida de pH llegará a ser mayor al valor deseado, el algoritmo del controlador PID hace que la válvula dosificadora se cierra completamente (0 %), tal como se muestra en las Figs. 81 y 82.

Figura 81

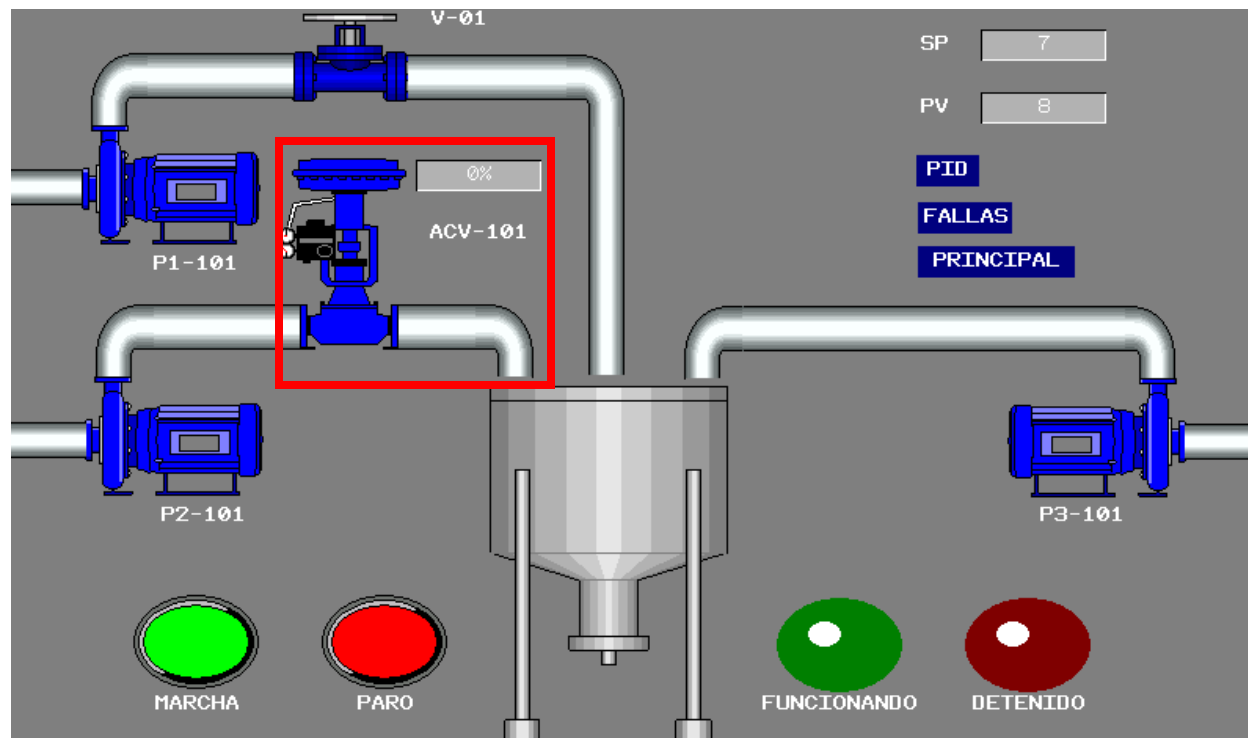
Válvula Dosificadora Cerrada en PLC



Fuente: Elaboración propia

Figura 82

Válvula Dosificadora Cerrada en HMI



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se desarrolló satisfactoriamente el diseño de un sistema automatizado para controlar el pH de jugo mezclado a través de la regulación de cal. Con este sistema, los operarios podrán visualizar el valor de la medida de pH del jugo mezclado en tiempo real en un panel HMI, así como identificar el motivo de las fallas que puedan producirse en el desarrollo del proceso a través de ventanas emergentes. Además, el sistema de control evitará que los operarios tengan que trasladar muestras al laboratorio y perder tiempo valioso de trabajo esperando los resultados.

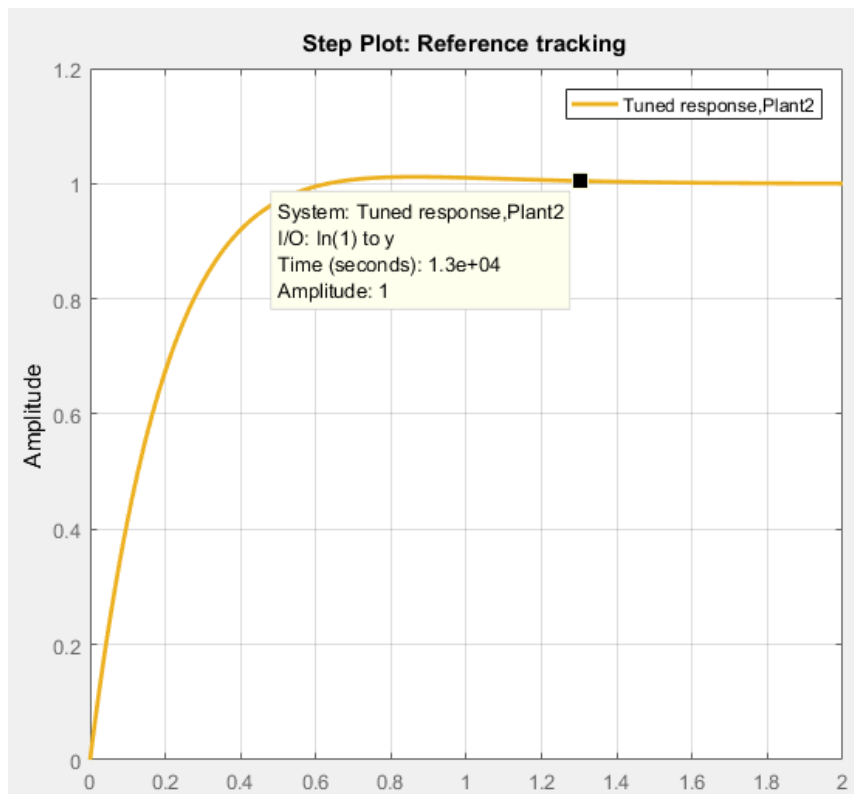
El registro de las medidas de pH tomadas por los operarios sirvió para estimar la función de transferencia del sistema y los parámetros del controlador PID. Se descataron los modelos matemáticos que generaban mucho sobre impulso en la etapa transitoria y a los que les tomaba mucho tiempo estabilizarse. Al final, fue suficiente un controlador PI para mantener estable la dinámica de proceso.

Respecto a la simulación, fue necesario incrementar el tiempo de respuesta del controlador frente a los cambios forzados que se realizaron en la variable de medida de pH o PV. Los valores finales fueron: $K_p = 1690$, $T_i = 1000$ ms, $T_d = 0$ s, de esta manera se logró acelerar la dinámica del proceso y lograr los resultados esperados.

Como se puede apreciar en la Tabla 17, con el sistema actual el valor de pH no alcanza el valor óptimo para neutralizar la acidez del jugo mezclado. Sin embargo, con el sistema de control de control propuesto, se lograría estabilizar la medida de pH en el valor de 7 en 3,6 horas, como se muestra en la curva de la Fig. 83 obtenida con Matlab.

Tabla 17*Medidas de pH de la Balanza N°1*

Hora	pH
7:00 a. m.	7.09
8:00 a. m.	7.86
9:00 a. m.	7.89
10:00 a. m.	7.81
11:00 a. m.	7.8
12:00 p. m.	7.56
1:00 p. m.	7.6
2:00 p. m.	6.26
3:00 p. m.	7.59
4:00 p. m.	5.93

*Fuente: Elaboración propia***Figura 83***Tiempo de Respuesta del Sistema Propuesto**Fuente: Elaboración propia*

5.2. Recomendaciones

Se recomienda integrar las medidas de los flujos de entrada de jugo mezclado y del jugo que recircula de los clarificadores al sistema de control propuesto en esta investigación.

Se recomienda montar la instrumentación necesaria para obtener las medidas de brix del jugo mezclado, así como el volumen y el nivel de la Balanza N°1 para integrar estas señales al sistema de control propuesto en esta investigación.

Para llevar un registro diario de las mediciones, se recomienda habilitar la función de exportación de informes en Excel del controlador del sistema de control.

Para la segunda Balanza N°2, se recomienda aplicar la misma filosofía de control de esta investigación, sin embargo, la función de transferencia calculada para la Balanza N°1 no tiene por qué ser la misma para la Balanza N°2, lo que se debe hacer es obtener las medidas de pH y estimar el modelo matemático del sistema utilizando el software Matlab.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Agroindustrial Tumán S.A.A. (2015). *¿Quiénes somos?* Obtenido de <http://empresatumán.blogspot.com/p/quienes-somos.html>
- Agroindustrial Tumán S.A.A. (2018). *PRODUCTOS DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL TUMAN S.A.A.* Obtenido de <http://empresatumán.blogspot.com/p/productos.html>
- Ayala, C. (2014). *Introducción al control automático*. Obtenido de <https://www.docsity.com/pt/control-automatico-introduccion/5260250/>
- Casas, J. (2019). *CONTROL E INSTRUMENTACIÓN*. Obtenido de https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168450/TFG_FormicIndustries_v03.pdf
- Castaño, S. (2019). *Control FeedForward o Control Anticipativo*. Obtenido de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-feedforward-o-control-anticipativo/>
- Durand, J. (2016). *Automatización y control de procesos*. Obtenido de https://www.academia.edu/29688688/AUTOMATIZACION_Y_CONTROL_DE_PROCESOS
- Ferreira, F., Rodríguez, S., & Rodríguez, P. (2017). *Planta Piloto para Control de Procesos*. Obtenido de <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2008/FRR08/FRR08.pdf>
- Flóres, C. (2016). *Conceptos Básicos de Control e Instrumentación de Procesos*. Obtenido de https://www.academia.edu/33147750/Conceptos_Básicos_de_Control_e_Instrumentacion_de_Procesos_Agroindustriales

- Fortuny, C. (2014). *Modelización y control de temperatura de un reactor "Batch" para un proceso químico exotérmico*. Obtenido de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/675pub.pdf>
- Gil, J. (2010). *FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO DE SISTEMAS CONTINUOS Y MUESTREADOS*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/83559623.pdf>
- Gobierno Regional de Lambayeque. (2012). *ESTUDIO DE SUELOS CON FINES DE ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA ECONÓMICA*. Obtenido de http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/Lambayeque/Memoria_Descriptiva_Suelos.pdf
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. Obtenido de <http://lcr.uns.edu.ar/fcr/images/Introduccion%20a%20Los%20Sistemas%20de%20Control.pdf>
- Lobatón, L. (2017). *Simbología y Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)*. Obtenido de https://www.academia.edu/11637282/Simbología_y_Diagrama_de_Tuberías_e_Instrumentación_P_and_ID
- Macías, E. (2018). *Conceptos básicos, terminología y técnicas para control de procesos*. Obtenido de <https://docplayer.es/56541957-Conceptos-basicos-terminologia-y-tecnicas-para-control-de-procesos.html>
- Mutazzi, E. (2017). *Apuntes de Cátedra de Control Automático de Procesos*. Obtenido de <http://ceutn.apuntec.com/data/tps/5712.pdf>

- Pérez, M. (2008). *INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO*. Obtenido de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>
- Portal Lambayeque. (14 de Abril de 2018). *TUMÁN*. Obtenido de <https://www.lambayeque.net/chiclayo/tuman/>
- Prada, C. (2017). *nstrumentación para Control de Procesos*. Obtenido de <http://www.isa.cie.uva.es/~prada/Instrumentacion.pdf>
- ProInversión. (Abril de 2012). *Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A*. Obtenido de https://www.proyectosapp.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/PR_TUMAN_DOCS_FOLLETO/FOLLETO_INFORMATIVO_TUMAN.pdf
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Berlín, Alemania: Elbe Druckerei Wittenberg.
- Sepulveda, M. (2013). *Instrumentación y calibración - Teoría* . Obtenido de https://issuu.com/madaseit/docs/instrumentacion_y_calibracion-p2
- Suárez, E. (2016). *PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CLOROBENCENO*. Obtenido de
CAPÍTULO 3: Control e instrumentación:
https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2017/183732/TFG_CHRORBEN_part03.pdf
- Torres, I. (2018). *¿Qué es un proceso?* Obtenido de <https://iveconsultores.com/que-es-un-proceso/>
- VAM Industry. (2018). *Instrumentación y Control*. Obtenido de https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/148700/TFG_VamIndustry_v03.pdf
- Villajulca, C. (20 de Septiembre de 2019). *Control de Calderas Industriales*. Obtenido de <https://instrumentacionycontrol.net/cap-1-3-control-de-calderas-industriales/>