

Propuesta de mejoramiento de la medición de la variable pH  
en el lazo de control de jugo amortiguado del área  
tratamiento de jugos en el Ingenio La Cabaña S.A.



Universidad  
del Cauca®

**Juan Sebastián Arrechea Zapata**

Universidad del Cauca  
Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones  
Programa de Ingeniería en Automática Industrial  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán, Abril 2023

**Propuesta de mejoramiento de la medición de la variable pH  
en el lazo de control de jugo amortiguado del área  
tratamiento de jugos en el Ingenio La Cabaña S.A.**

**Juan Sebastián Arrechea Zapata**

Monografía presentada como requisito  
para obtener el título de

**Ingeniero en Automática Industrial**

Director:

**MSc. Andrea Enríquez Zúñiga**

Co-Director:

**MSc. Juan Fernando Florez Marulanda**

Asesor de la empresa Ingenio La Cabaña S.A:

**MSc. Ing Hernan Estrada**

Universidad del Cauca

Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones

Programa de Ingeniería en Automática Industrial

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Popayán, Abril 2023

## Agradecimientos

Familia, amigos y personas especiales en nuestras vidas, no son nada mas y nada menos que un solo conjunto de seres queridos que suponen benefactores de importancia inimaginable en nuestras circunstancias de seres humanos, no podríamos sentirnos mas amenos con la confianza puesta sobre nosotros, especialmente cuando hemos contado con su apoyo desde que tenemos memoria.

Este nuevo logro es en parte gracias a ustedes; hemos logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio podría parecer tarea titánica e interminable, quisiéramos dedicar este trabajo de grado a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor, bienestar y los finos deleites de la vida.

Muchas gracias a aquellos seres queridos que siempre guardamos en nuestra alma.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Contenido</b>	<b>5</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>5</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>5</b>
1.1 Objetivos . . . . .	6
1.1.1 Objetivos General . . . . .	6
1.1.2 Objetivos Específicos . . . . .	6
1.2 Descripción del proceso . . . . .	6
1.2.1 Proceso de producción de azúcar blanca en Ingenio la Cabaña S.A.	7
1.3 Área de molienda . . . . .	8
1.3.1 Preparación (Mesas de caña) . . . . .	8
1.3.2 Extracción (Desfibradora, Picadora) . . . . .	8
1.3.3 Maceración (Molinos) . . . . .	8
1.4 Área de elaboración . . . . .	8
1.4.1 Etapa de tratamiento de jugo . . . . .	8
1.4.2 Etapa de fábrica de azúcar . . . . .	9
1.5 Subproceso de tratamiento de jugos: Sistema de control pH . . . . .	10
<b>2 Planteamiento del problema</b>	<b>12</b>
2.0.1 Sistema de control distribuido (DCS) del Ingenio La Cabaña S.A.	13
<b>3 Desarrollo de la metodología</b>	<b>15</b>
3.1 Ingeniería Conceptual . . . . .	15
3.1.1 Descripción del sistema de Control PH . . . . .	16
3.1.2 Problemática del sistema de control pH jugo amortiguado . . . . .	18
3.1.3 Requerimientos del cliente . . . . .	18
3.1.4 Objetivos . . . . .	19
3.1.5 Alternativas de solución . . . . .	19
3.2 Ingeniería básica . . . . .	20

---

3.2.1	Descripción del proceso . . . . .	20
3.2.2	Variables controladas y variables manipuladas . . . . .	21
3.2.3	Escenario de automatización . . . . .	21
3.2.4	Diagrama de flujo . . . . .	22
3.2.5	Lista de instrumentos . . . . .	22
3.3	Ingeniería detalle . . . . .	24
3.3.1	Diagrama eléctrico . . . . .	24
3.3.2	Diagrama P&ID bajo estándar ISA 5.1 . . . . .	24
3.4	Ejecución del proyecto: pruebas y cierre . . . . .	26
3.4.1	Instalación de tuberías y cableado . . . . .	26
3.4.2	Instalación de instrumentación . . . . .	29
3.4.3	Actualización de tendencias SCADA WinCC . . . . .	29
3.4.4	Actualización rutina de mantenimiento electrodos . . . . .	32
3.4.5	Pruebas y puestas en marcha . . . . .	34
3.5	Plan de mantenimiento . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>37</b>
4.1	Conclusiones . . . . .	37

# Índice de figuras

1.1	Diagrama de flujo proceso de producción de azúcar en Ingenio La Cabaña S.A. . . . . .	7
1.2	Punto de muestra lazo de control jugo encalado . . . . .	11
1.3	Punto de muestra Lazo de control jugo amortiguado . . . . .	11
2.1	Arquitectura DCS Ingenio la Cabaña S.A. . . . . .	14
3.1	Ciclo de vida proyecto de ingeniería . . . . .	15
3.2	Punto de muestreo pH jugo encalado . . . . .	17
3.3	Diagrama de flujo etapa de tratamiento de jugo. . . . .	22
3.4	Instrumentos existentes en lazo de control . . . . .	24
3.5	Diagrama eléctrico lazo de control pH jugo amortiguado. . . . .	25
3.6	Diagrama eléctrico lazo de control pH jugo amortiguado. . . . .	25
3.7	PHmetro jugo encalado, área sulfitación . . . . .	27
3.8	Gabinete departamento de elaboración. . . . .	27
3.9	Punto de muestra Ph. . . . .	28
3.10	Montaje pHmetros jugo amortiguado encalado. . . . .	29
3.11	Pantalla inicial SCADA Ingenio La Cabana . . . . .	30
3.12	Pantalla inicial SCADA Ingenio La Cabana . . . . .	31
3.13	Tendencias desde el WinCC. . . . .	32
3.14	Electrodo Lazo de control pH amortiguado. . . . .	33
3.15	Elementos rutina de mantenimiento. . . . .	33
3.16	Histograma comportamiento antes . . . . .	35
3.17	Histograma comportamiento después. . . . .	35

# Capítulo 1

## Introducción

El ingenio La Cabaña S.A. es una empresa agroindustrial con más de 70 años de trayectoria dedicada a la producción de azúcares y mieles, está ubicada en el municipio de Guachené del departamento del Cauca, perteneciente al sector azucarero, el cual representa para el suroccidente del país, una de las mayores actividades comerciales, contribuye con un 3,7% del PIB agrícola del país [1]. El Ingenio La Cabaña posee una capacidad de molienda de 5.200 t/Día de caña de azúcar, gracias a un tándem de 6 molinos para la producción de 4 masas, que producen más de 4.000.000 bultos de azúcar por año. Dentro de las políticas y la cultura empresarial de la organización, sobresalen la constante búsqueda de ofrecer un producto de mayor calidad y mejoras continuas en todas las etapas involucradas en el proceso [2][3]. El ingenio la Cabaña S.A. dentro de la fábrica tiene integrado gran parte de la instrumentación en un sistema de control distribuido (DCS), por sus características de flexibilidad, robustez y fiabilidad, permitiendo así realizar integraciones de nuevas tecnologías sin requerir un paro completo de la fábrica, con esto se logra identificar fácilmente cualquier punto susceptible a optimización durante toda la cadena de producción.

Durante el proceso de obtención del cristal de azúcar, se identificaron unas falencias en un punto crítico del proceso, respectivamente en la etapa de tratamiento de jugos donde está integrado el sistema control pH, siendo esta parte donde se presenta la inconformidad en su funcionamiento según lo reporta el laboratorio de calidad, partiendo por una mala lectura presentada por el instrumento de medición de pH en este caso un pHmetro con su respectivo electrodo.

El presente proyecto de automatización pretende desarrollar una propuesta de mejoramiento en la lectura de una variable relevante en uno de sus subprocesos del departamento de elaboración, e involucra reubicación de instrumentación, también ajustes en el sistema de supervisión, control y adquisición de datos del departamento

eléctrico. La gran parte de los proyectos de ingeniería, del área de automatización, suelen constituirse por una planificación y una ejecución, entre otras; esto con el fin de tener un alcance del proyecto y objetivos propuesto a obtener. Por lo tanto, en este tipo de empresas se logra evidenciar la necesidad constante de proyectos de automatización que contribuyan de manera directa en la calidad del producto buscando satisfacer las necesidades del consumidor y del mercado internacional [4].

Teniendo en cuenta lo anterior, este documento en el Capítulo I presenta una corta introducción, en el capítulo 2 se expone el planteamiento del problema, en el Capítulo III se realiza se desarrollan las etapas que comprenden la ejecución del proyecto de ingeniería y, en el capítulo IV se dan a conocer las conclusiones y las recomendaciones.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivos General

- Desarrollar una propuesta de mejoramiento en la medición de pH en el lazo de control de Jugo Amortiguado del área de tratamiento de jugos en el Ingenio La Cabaña S.A.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos de medición de pH en el área tratamiento jugó para la obtención de la azúcar blanca del Ingenio La Cabaña S.A.
- Proponer una estrategia para mejorar la desviación estándar de los valores de la diferencia de la lectura de pH del jugo amortiguado entre el laboratorio de calidad y el área de sulfitación.
- Implementar estrategia para incrementar el tiempo de ciclo de rotación de los electrodos en el pHmetro del jugo amortiguado.

## 1.2. Descripción del proceso

En la actualidad, Ingenio La Cabaña S.A. es una de las empresas más representativas de la agroindustria colombiana, cuenta con una capacidad de producir más de 4.000.000 bultos de azúcar por año [3]. Desde 2014, la empresa consolidó y colocó en operación el proyecto de cogeneración de energía eléctrica que le permitió ubicarse en el primer lugar de todo el gremio, con los mayores excedentes de energía inyectados a la red nacional, posicionando la energía como un producto importante del negocio.



Las metas a corto plazo son continuar con la optimización de los procesos de tal manera que se logren menores pérdidas de sacarosa, mayores excedentes de energía, menores tiempos perdidos y menores costos de producción; utilizando para ello la combustión del bagazo resultante de la molienda de la caña de azúcar.

En Ingenio La Cabaña S.A., el proceso de obtención del cristal de azúcar empieza desde el área de molinos encargada del lavado y extracción del jugo, el jugo obtenido de la molienda llega al departamento de elaboración y sufre transformaciones físico-químicas hasta obtener cristales de azúcar, que posteriormente son empaquetados y/o transportados a la planta de refinación de azúcar, desde donde posteriormente sale al mercado nacional e internacional, esto obliga a la empresa a elevar los criterios de calidad para la producción y obtención de certificaciones para la apertura de mercados [5].

La empresa cuenta con un departamento de energía y automatización con múltiples disciplinas dentro de la fábrica, resaltando, el diseño, planeación y ejecución de proyectos de sistemas de automatización con el fin de garantizar una mayor eficiencia, seguridad y calidad durante la operación de la fábrica. El actual proyecto se desarrolla dentro del departamento de energía y automatización.

### 1.2.1. Proceso de producción de azúcar blanca en Ingenio la Cabaña S.A.

El proceso de obtención del cristal de azúcar realizado en la fábrica del Ingenio la cabaña S.A, consta de las etapas de molienda, tratamiento de jugo, fábrica de azúcar y empaque (ver Figura 1.1), las cuales están divididas en dos áreas principalmente: área de molienda y área de elaboración [6].

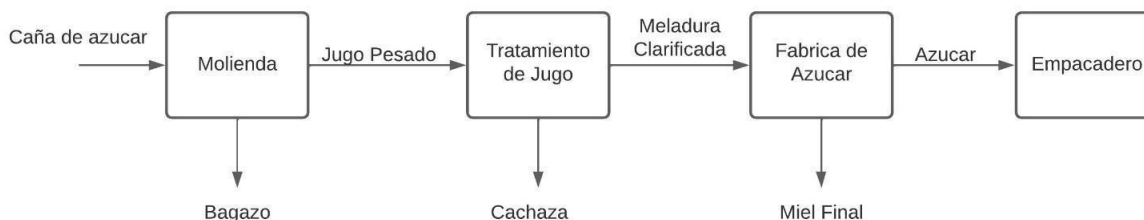


Figura 1.1: Diagrama de flujo proceso de producción de azúcar en Ingenio La Cabaña S.A.

Fuente: Adaptación propia.

### 1.3. Área de molienda

En el área de Molienda se obtiene la materia prima para su transformación físico-química, en este caso, de la caña de azúcar proveniente de las zonas de cosechas donde su tiempo oscila entre 12 y 16 meses, se obtienen jugo de caña con las características deseadas [7].

#### 1.3.1. Preparación (Mesas de caña)

Se realiza un censo del peso de la materia prima durante el ingreso del tren cañero, con el fin de determinar el tipo de caña, su pureza y la cantidad de sacarosa del lote. Se dispone en las mesas de caña mediante grúas hilo la materia prima, ingresando a la zona de extracción mediante una banda transportadora, siendo previamente ubicada mediante un nivelador.

#### 1.3.2. Extracción (Desfibradora, Picadora)

La caña de azúcar ingresa por la picadora y la desfibradora para realizar una de las últimas transformaciones físicas, antes de proseguir con la maceración.

#### 1.3.3. Maceración (Molinos)

Durante la maceración, por medio de 6 molinos se realiza la extracción de jugo de caña con agua caliente, con el objetivo de obtener la mayor cantidad de sacarosa de la caña de azúcar. Este jugo diluido, pasa mediante un filtro trommel para almacenarlo en el tanque de jugo pesado, el cual es conducido por medio de bombas al área de tratamiento de jugo. El bagazo generado se lleva a un almacén para su utilización en la cogeneración de energía, por medio de turbo generadores alimentados por el vapor producido dentro de la caldera. Es de anotar que, el proyecto de cogeneración de energía es uno de los proyectos insignias del ingenio de la cabaña por el impacto que ha producido en el gremio [8].

### 1.4. Área de elaboración

El área de elaboración está integrada por dos etapas, tratamiento de jugo y fábrica de azúcar.

#### 1.4.1. Etapa de tratamiento de jugo

El jugo pesado proveniente de molienda, ingresa al área de tratamiento de jugo con el objetivo de regular el pH del jugo de caña, agregar brillo a través de la sulfitación,

y obtener una meladura con las condiciones ideales de pureza, pH y sacarosa para tener un buen rendimiento durante la cristalización.

### **Sulfatación**

Culminada la etapa de tratamiento de jugo, se prosigue con una parte del proceso llamada sulfitación, la cual consiste en bombear el jugo con dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) con el fin de combatir la decoloración en el proceso de obtención de azúcar. Aquí, el jugo de caña llega con pH de 5-6, la reacción del jugo con la sulfitación genera una precipitación del pH, con el fin de lograr un pH en los rangos establecidos, se somete el jugo a un proceso de alcalinización, el cual consiste en agregar lechada de cal al jugo que ha sido sulfatado, con el fin de neutralizar el pH y disminuir pérdidas por posible inversión de sacarosa [8].

### **Clarificadores de jugo**

El jugo amortiguado es calentado hasta llevarlo a una temperatura de 75 °C, donde al jugo caliente se le adiciona floculante y se envía a los clarificadores, para lograr la separación de los sólidos insolubles que se precipitan formando un lodo. Al lodo por filtración se le recupera el jugo y se transforma en cachaza, y el jugo clarificado obtenido ingresa a los evaporadores [9].

### **Evaporación**

En esta etapa el jugo clarificado contiene una alta cantidad de agua, que es necesaria retirar del proceso, los evaporadores de múltiple efecto reciben jugo con contenido de sólidos disueltos de aproximadamente 15 % y deben llevarlos a 65 % - 68 %. para obtener meladura cruda.

### **Clarificadores de meladura**

La meladura cruda que proviene de los evaporadores es sometida a un proceso de mejora turbiedad y color, a través de la fosfoflotación con sulfitación, en un clarificador con alimentación central [6]. Además, se adiciona ácido fosfórico, sacarato de calcio y diversos floculantes para remover impurezas. El resultado de esta etapa es meladura clarificada para la etapa fábrica de azúcar.

## **1.4.2. Etapa de fábrica de azúcar**

### **Cristalización**

Este proceso se realiza en los tachos para el cocimiento de la meladura al vacío adicionando núcleos cristalinos y semillas, para la obtención de tres tipos de masas,

que contienen miel y cristales de azúcar logrando el máximo aprovechamiento de la sacarosa.

### **Centrifugación y secadora**

Las masas generadas por los tachos llegan a las centrífugas encargadas de separar la miel y los cristales de azúcar, mediante un movimiento centrípeto aplicado a tambores rotatorios compuestos de mallas para la separación de los materiales integrados en la masa, los cristales obtenidos pasan a la secadora y la miel, a los tanques de miel final para su comercialización. El azúcar húmedo llega a la secadora para eliminar el exceso de humedad mediante un intercambiador por aire caliente en contracorriente en un cilindro rotatorio inclinado [10].

### **Sistema de transporte de azúcar y empaque**

El sistema de transporte de azúcar blanca se encarga de llevar el producto terminado desde el proceso de secado hasta el área de empaqueo mediante bandas transportadoras para garantizar la inocuidad del producto terminado para ser empaquetado según las demandas del cliente.

## **1.5. Subproceso de tratamiento de jugos: Sistema de control pH**

El sistema de control pH del ingenio La Cabaña S.A. está ubicado en el subproceso de sulfitación de la etapa de tratamiento de jugo, y está integrado por dos lazos de control respectivamente: Lazo de control pH jugo encalado (ver Figura 1.2) y lazo de control pH jugo amortiguado (ver Figura 1.3).

El lazo de control de pH de jugo encalado tiene como objetivo elevar el pH del jugo mixto proveniente de molinos, que está alrededor de 5-4.5, hasta un nivel de 6.5 pH, y después almacenarlo en el tanque de encalado. Este jugo almacenado pasa un proceso de alcalinización antes de ingresar a los clarificadores de jugo, mediante bombas centrífugas, donde mediante el lazo de control de jugo amortiguado se realiza el ajuste de la adición de lechada de cal o sacarato al jugo, con la finalidad de elevar el pH de 6.5 a 7.5, que son los niveles requeridos por el departamento de elaboración y calidad [11].



Figura 1.2: Punto de muestra lazo de control jugo encalado  
Fuente: Adaptación propia.



Figura 1.3: Punto de muestra Lazo de control jugo amortiguado  
Fuente: Adaptación propia.

# Capítulo 2

## Planteamiento del problema

En el proceso de obtención de azúcar se realiza una transformación físico-química del jugo de caña para obtener cristales libres de impurezas para el consumo humano, y consta de los subprocesos: recepción y alistamiento materia prima, molienda, tratamiento de jugos, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación, secado y finalmente, empaquetado y embalaje. La etapa de tratamiento de jugo está integrada por los subprocesos: sulfitación, filtración, clarificadores de jugo y meladura, evaporadores. En la sulfitación, se encuentran integrados 2 lazos de control pH; lazo de control jugo amortiguado y lazo de control jugo encalado.

El lazo de control de pH jugo encalado, se encuentra en modo local con una apertura del 20 % de las bombas centrífugas, para elevar el pH hasta 6,5. Este lazo de control se utiliza de referencia para el departamento de elaboración con el fin de visualizar el pH con que ingresa el jugo proveniente de molienda, al ser el primer punto de monitoreo de pH durante el proceso de obtención de cristal de azúcar.

Específicamente, en el lazo de control el jugo amortiguado se debe garantizar que la variable pH se encuentre dentro de los rangos aceptados por el departamento de elaboración y calidad, para que el jugo de caña pueda continuar con las etapas de clarificación, evaporación, cristalización, y finalmente, transporte y empaquetado. Actualmente, el sistema de control de pH de jugo amortiguado presenta dificultades en las labores de operación y de mantenimiento, debido a que la medición de la variable pH está muy lejos de los estándares estipulados por el departamento de calidad, ocasionando un control deficiente del pH, mayor intervención de los operarios y un aumento de las pérdidas indeterminadas durante el proceso de fabricación de azúcar [12]. Por otro lado, las intervenciones constantes a los instrumentos de medición del lazo de control de pH logran reducir su vida útil, ocasionando mayor demanda de dichos instrumentos y por tanto más gastos para el departamento.

Debido a los mencionados problemas de productividad, es para el ingenio la Cabaña una prioridad realizar una intervención al lazo de control pH de Jugo amortiguado del sistema de control distribuido en la empresa, a través de la ejecución del presente proyecto de práctica profesional.

### **2.0.1. Sistema de control distribuido (DCS) del Ingenio La Cabaña S.A.**

Un sistema de control distribuido es un sistema moderno con la capacidad de controlar diferentes procesos en paralelo, con un controlador central que funciona como el cerebro, unidades terminales remotas, entre otros elementos de control que permiten tomar la información, procesarla y actuar sin importar si los sensores y actuadores no se encuentran cerca del controlador [13] tiene tres cualidades principales; la primera es la distribución de varias funciones de control en conjuntos relativamente pequeños denominados subsistemas que son semiautónomos y están interconectados a través de buses de comunicación, en este caso los subsistemas están por departamentos que integran toda la fábrica. El segundo atributo es la flexibilidad para la automatización de procesos de fabricación mediante la integración de estrategias de control avanzada, y la última, organizar toda la estructura de control como un solo sistema de automatización integrados por varios subsistemas a través de un algoritmo de comando y flujo de información adecuados [14].

Un sistema de control distribuido está compuesto principalmente por estaciones de trabajo, estaciones de operación o HMI, Unidad de control de procesos de DCS y Sistemas de comunicación. Una estación de trabajo de ingeniería, consiste en un ordenador donde se almacena el software de ingeniería dedicado al ecosistema en que se encuentre nuestro control distribuido, ésta estación ofrece grandes herramientas de configuración, manejo de usuarios, funciones ingenieriles como creación y modificación de lazos, protocolos de comunicación , entre otros.

Una estación de operación o HMI suele utilizarse para el monitoreo, operación y control de los parámetros implicados en el proceso, puede estar en un computador o un dispositivo inteligente integrado al sistema de control por medio de un protocolo de comunicación. La unidad de control de procesos de DCS, también es conocida como la unidad de control local, y en la gran mayoría de casos donde se implementa un DCS es común encontrar más de una unidad de control de procesos, compuestas por unidades de E/S, potentes módulos de CPU, buses de campo o módulos de comunicación. Finalmente, los sistemas de comunicación, interconectan todos los niveles del proceso desde la estación de ingeniería hasta la instrumentación en campo, llevando

la información de una estación de operación a otra. Los protocolos más utilizados son Ethernet, profibus; Foundation Fieldbus, DeviceNet, entre otros [14].

Existen diferentes proveedores de soluciones DCS, en la industria colombiana los sistemas DCS de Siemens son una alternativa de gran cotidianidad en diferentes empresas del sector azucarero como lo es el ingenio Providencia, Mayagüez y fábricas de papel como Propal, empresas con soluciones empresariales y de producción en el ecosistema Siemens [15]. En el Ingenio la Cabaña se utiliza un sistema control basado en SIEMENS de la serie S7 de autómatas programables y varias periféricas descentralizadas ET-200 que alberga una cantidad alrededor de 100.000 señales de instrumentos distribuidos en todo el campo mediante protocolo de comunicación Profibus para la elaboración de azúcar orgánica, refinada, mieles y cogeneración de energía. El sistema de control cuenta con cuatro cuartos de control para cada departamento y uno de integración para la operación de todo el sistema SCADA basado en el ambiente SIMATIC S7.

Este sistema de control permite una interacción continua con la información que se adquiere de las tareas de cada parte del proceso y también otorga la ventaja de recibir instrucciones del operador facilitando el control manual por parte del operador para inferir en la apertura de una válvula o instrumento dentro del proceso, interfaz Hombre-máquina (HMI) y visualización de las tendencias.

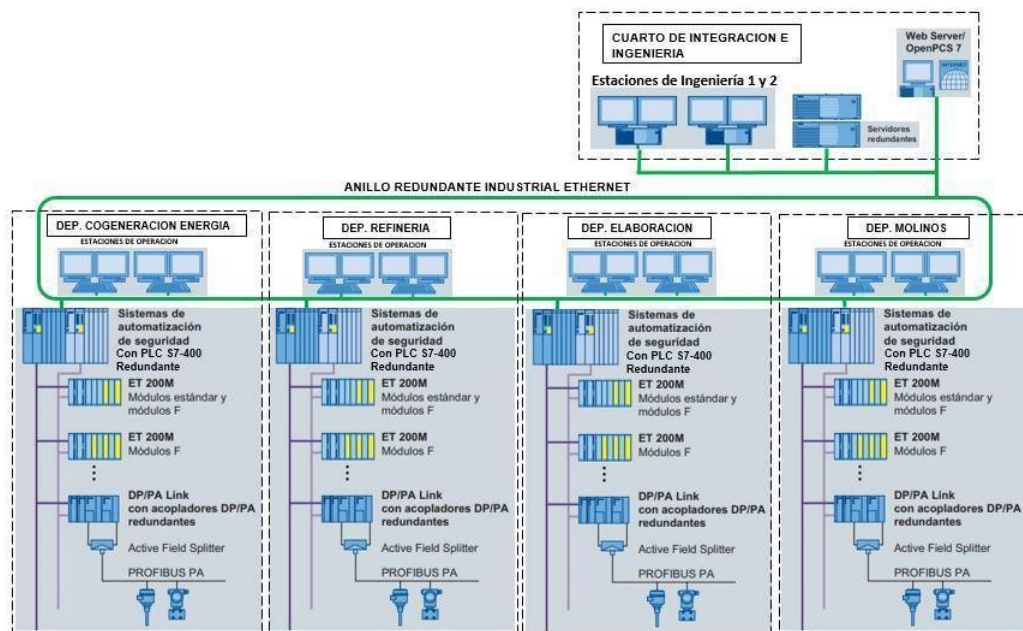


Figura 2.1: Arquitectura DCS Ingenio la Cabaña S.A.  
Fuente: Tomada de Ingenio la Cabaña S.A.



# Capítulo 3

## Desarrollo de la metodología

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó la metodología del ciclo de vida de ingeniería, que se desarrolla en seis etapas: Ingeniería conceptual, Ingeniería Básica, Ingeniería de detalle, ejecución del proyecto, pruebas y puesta en marcha, concluyendo con el cierre del proyecto [16].

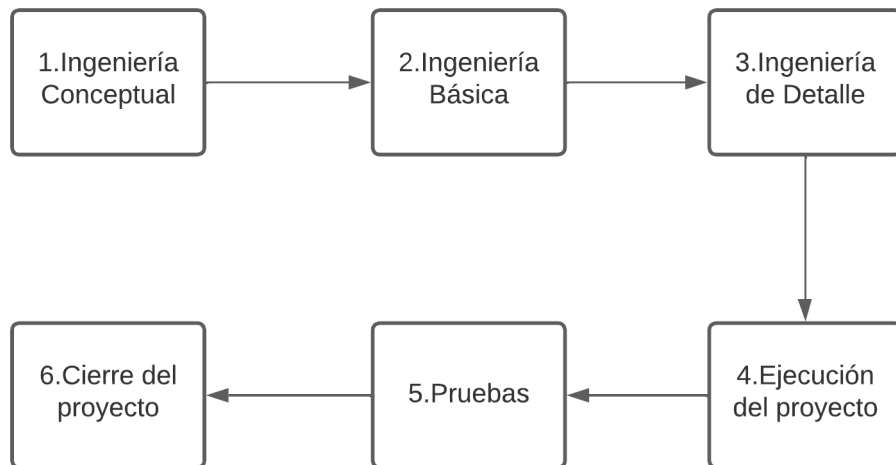


Figura 3.1: Ciclo de vida proyecto de ingeniería

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Ingeniería Conceptual

Esta primera fase comprende las condiciones del proceso, problemática y necesidades del cliente, concibiendo diferentes alternativas de solución, se evalúan dichas alternativas bajo criterios técnicos, económicos y alcance del proyecto [17].

### 3.1.1. Descripción del sistema de Control PH

El sistema de control de pH del área de tratamiento de jugo, es el encargado de monitorear, registrar y controlar el pH del jugo proveniente del área de molienda, y está compuesto por 2 pHmetros, 2 bombas de suministro de cal hidratada, un PLC siemens S7-400. Cada uno de los medidores de PH posee un electrodo en contacto con el líquido, gracias a un punto de muestra que permite tener un flujo laminar para una adecuada medición de la variable.

Las bombas de suministro de CAL hidratada están conectadas al tubo madre de suministro de jugo, con el objetivo de generar una reacción química que eleve o disminuya el nivel de pH según lo requiera el proceso, la apertura de las bombas la puede realizar el operario del área de tratamiento de jugo o bien, se controlan desde el lazo de control PID jugo amortiguado para mantener la variable en el punto deseado, basándose en la lectura generada por el pHmetro. El pH es verificado en varios puntos a tener en cuenta como el ph del jugo sulfitado, tanque jugo encalado, tanque jugo amortiguado y tanque jugo amortiguado línea por el laboratorio de calidad por medio de muestras registradas cada hora por un encargado a mano, el valor de jugo amortiguado línea hace referencia al visualizado por la interfaz gráfica del pHmetro, véase tabla 3.2, siendo los valores registrados en las dos últimas columnas los evaluados por el laboratorio de calidad para diagnosticar el funcionamiento del lazo de control pH, mediante la diferencia entre ellos dos, esperando que se encuentre en un rango de valor aceptado. Debido a la implicación que tiene en la etapa de cristalización, aportando al seguimiento estricto de los grados de Brix y en el rendimiento de la obtención del producto final, haciendo una evaluación de las pérdidas indeterminadas de sacarosa por inversión durante el proceso de obtención del cristal de azúcar.

Datos pH				
JUGOS				
Hora	Sulf	Encal	T.Amort	T.Amort.Lin
7AM	4,00	5,58	8,90	7,60
8AM	4,00	5,61	8,74	7,57
9AM	4,80	5,36	8,08	7,59
10AM	4,86	5,90	8,96	7,64
11AM	4,90	5,79	7,90	7,59
12AM	4,84	5,85	7,85	7,62

Tabla 3.2: Formato de datos pH registrados  
Fuente: Toma de laboratorio de calidad.

Con la información suministrada por la base de datos del laboratorio de calidad, se realiza un análisis estadístico a los valores evaluados, con el fin de determinar si se están cumpliendo con los objetivos del usuario. El lazo de control jugo amortiguado tiene como estrategia el control PID realizado en el ecosistema Siemens del PLC S7-400, durante la caracterización del proceso para la obtención del cristal de azúcar se evidencia que el control PID del lazo del lazo de control jugo amortiguado está inhabilitado por presentar anomalías en su funcionamiento, cabe anotar que, en el departamento eléctrico se habían realizado anteriormente actividades para lograr la operación normal del control PID del jugo amortiguado, debido a la relevancia en la etapa de tratamiento de jugos.

Sin embargo, al inicio de esta práctica profesional, el control de pH se realizaba de forma manual, es decir los instrumentos estaban siendo operados de modo local por los operarios y supervisores del departamento de elaboración, debido a que la diferencia presentada en los valores de pH del jugo amortiguado entre el valor del laboratorio de calidad y el pHmetro localizado en campo, se encontraba fuera de los rangos tolerables por el laboratorio calidad y el departamento eléctrico. El control manual de pH de jugo amortiguado incrementa el riesgo de errores humanos en este punto del proceso, que es el único donde se puede realizar una acción correctiva de pH durante todo el proceso de obtención del cristal de azúcar. Aquí, es de vital importancia tener un adecuado control operativo de las bombas suministradoras de CAL hidratada, porque los efectos de un valor de pH en rangos no deseados se ven reflejados en la etapa de cristalización, influyendo en las pérdidas indeterminadas.



Figura 3.2: Punto de muestreo pH jugo encalado  
Fuente: Elaboración Propia (Lazo P&ID).

En la ejecución de las rutinas de mantenimiento de los instrumentistas, se detectaron varias falencias en el plan de mantenimiento de los electrodos; la intervención para calibración y mantenimiento se realizaba de manera reiterativa al transcurrir el proceso en el día, generando así paradas constantes del lazo de control de pH; además, existía rotación excesiva de los electrodos, éstas situaciones estaban lejos de cumplir las expectativas de calidad exigidas por el departamento eléctrico.

### 3.1.2. Problemática del sistema de control pH jugo amortiguado

Al realizar un análisis en campo del sistema de control pH de forma conjunta con los operadores del área, se identificaron falencias durante la realización de dos actividades: regulación de pH y limpieza de electrodos, tal como se detalla en la (Tabla 3.3). De las situaciones presentadas, se concluye que las actividades tienen afectación directa en la calidad del cristal de azúcar y su obtención en la cristalización.

ACTIVIDAD	PROBLEMA
Regulación de pH	Persistente diferencia entre los datos obtenidos por el laboratorio de calidad y los datos entregados por los pHmetros en campo. Deficiencia en la lectura del instrumento integrado en el lazo de control pH influyendo en la respuesta del lazo.
Limpieza de electrodos	Interrupción de la acción de control PID de jugo amortiguado del controlador, a causa de la intervención constante del instrumentista en el proceso de medición de pH. Alta rotación de electrodos generando un desgaste elevado del instrumento.

Tabla 3.3: Problemáticas del sistema de control pH jugo amortiguado

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3. Requerimientos del cliente

En reuniones con el departamento de Elaboración y el departamento de Energía y Automatización del Ingenio la Cabaña S.A., se definieron los siguientes requerimientos:

- Implementar estrategia para garantizar una mejor lectura de la variable pH del lazo de control pH jugo amortiguado mediante el sistema de control distribuido del Ingenio la Cabaña S.A.

- Realizar adecuación del punto de muestra de Jugo Amortiguado(Figura) siguiendo las recomendaciones de Cenicaña al permitir una mayor distancia entre el punto de aplicación de la lechada de cal y el punto de muestra.
- Implementar un plan de mantenimiento que permita una rehabilitación del sensor y un tiempo de ciclo de rotación de los electrodos superior a los 7 días.

#### 3.1.4. Objetivos

- Disminuir sustancialmente la diferencia de los valores de la lectura de pH que se realiza entre los valores obtenidos en el laboratorio de calidad y el pHmetro de jugo amortiguado
- Disminuir diferencia de los valores de la lectura de pH que se realiza entre los valores obtenidos en el laboratorio de calidad y el pHmetro de jugo amortiguado
- Prolongar en días el ciclo de rotación de los electrodos que integran el sistema de Control Ph
- Obtener información en tiempo real y sin alteraciones del sistema de control pH Jugo Amortiguado del área de tratamiento jugó.

#### 3.1.5. Alternativas de solución

Basados en los requerimientos del cliente, alcance de la ejecución del proyecto y recursos disponibles para la inversión en el sistema de control pH, se requería de una estrategia capaz de abarcar la problemática con un periodo de prueba y correcciones para alcanzar los objetivos propuestos, se pudo establecer después plantearse las condiciones actuales del sistema con los ingenieros Jefes del departamento eléctrico y del departamento de elaboración que la estrategia debería de incluir una reubicación del punto de muestra, evaluación de los instrumentos y reubicación de ellos con el fin de lograr un mejor lectura de la variable pH del jugo amortiguado perteneciente al sistema de control pH. Culminando esta fase de ingeniería conceptual se logra concluir con el primer objetivo de este proyecto siendo la caracterización del proceso de medición de pH implementado en el ingenio la cabaña y una parte del segundo objetivo donde se proponer una estrategia para mejorar la desviación estándar de los valores de la diferencia de la lectura de pH del Jugo Amortiguado entre el Laboratorio de Calidad y el área de Sulfitación donde se utilizara una herramienta estadística basada en los datos recolectados por parte del laboratorio de calidad, con el propósito de dar una una conclusión estadística del impacto que se quiere lograr en los datos..

## 3.2. Ingeniería básica

En la ingeniería básica, se desarrolla la alternativa seleccionada durante la etapa conceptual, permitiendo diligenciar con una idea más clara de la ruta a seguir para la obtención de los objetivos, planteamiento de diagramas PI&D, características de los instrumentos que intervienen, escenarios de automatización, planes de mantenimiento entre otros ítems.

### 3.2.1. Descripción del proceso

Considerando los requerimientos del cliente, se tienen dos situaciones a tratar en el proceso: La primera es la situación planteada por los departamentos de automatización y el departamento de calidad, donde para mantener los estándares de la calidad del producto fabricado, se exige que la medición de la variable pH entregada por los pHmetros ubicados en los puntos de muestra y la registrada por el laboratorio de Calidad cada hora debe tener una diferencia menor a 0,5 pH [18]. Actualmente, la base de datos registrada por el departamento de calidad deja en evidencia que la media de esta diferencia supera los 0,5 pH, incumpliendo así con los requisitos mínimos de calidad definidos por la empresa. En este punto se propone intervenir el lazo de control de pH y reubicar el punto de muestra de jugo amortiguado.

La segunda es la ausencia de un plan de mantenimiento para rehabilitar la membrana de los electrodos; el instrumentista tenía integrado en su ruta de inspección de los instrumentos de la planta una actividad que constaba de limpieza y puesta en marcha de los electrodos que integran al pHmetro, esta actividad presentaba fallencias en su ejecución, no tenían en cuenta estrategias para extender la vida útil del instrumento. Por lo tanto, siempre que se realizaba la inspección de los pHmetros, era necesario la desactivación del sistema de control pH de jugo amortiguado dejando durante su realización el sistema de control en modo local, como ésta acción se realizaba constantemente tenía implicaciones directas sobre el proceso, debido a que dejaba a consideración del operario la apertura o cierre manual de la válvula que permitía regular el pH; de modo que, éste proceso era demasiado susceptible a errores humanos y desaprovecha los recursos tecnológicos con los que cuenta la planta (DCS) para realizar un control automatizado de pH en el jugo amortiguado [19].

La ruta de inspección de los pHmetros que se realizaba día a día por los instrumentistas, estaba consignada en una bitácora donde se registra información como la fecha, rotación de sensores, calibración, observaciones. Este documento debía ser

respaldado por la firma del operador del área de tratamiento de jugos, en la bitácora se podría encontrar quejas de los supervisores y ingenieros con respecto al ciclo de rotación de los electrodos, donde cada 2 o 3 días era necesaria la rotación de los electrodos, generando un desgaste al instrumento mayor al estipulado por el departamento y una mayor demanda de gasto por la importancia del sensor en la etapa de tratamiento de jugo. Considerando esta situación, se propone cambiar los implementos de mantenimiento de los electrodos e implementar una rutina de rehabilitación de las membranas.

### 3.2.2. Variables controladas y variables manipuladas

En todo proceso industrial, es necesario realizar un estudio de las diferentes variables que intervienen en el proceso descrito, e identificar los posibles lazos de control existentes. Por tanto, en la (Tabla 3.4) se describen las variables identificadas.

Operación	Variables Controlada	Variable Manipulada	Esquema de Control
Lectura pH jugo amortiguado	pH jugo amortiguado	Flujo lechada de CAL	Lazo abierto con instrumentos

Tabla 3.4: Variables controladas y manipuladas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la operación lectura pH jugo amortiguado, se identifica un lazo de control, en el cual están programadas las acciones que se debe realizar para llevar el pH al punto deseado, en este caso, el porcentaje de apertura de la bomba de lechada de CAL, manipulando el flujo de lechada de CAL que ingresa al tubo que alimenta los clarificadores de jugo.

### 3.2.3. Escenario de automatización

El proyecto de automatización del sistema de control pH jugo amortiguado se encuentra asociado al área de elaboración, que cuenta con un sistema de control distribuido Siemens (Ver figura 8). Elaboración está compuesta por un cuarto de operaciones, que contiene una estación de operaciones (WS – Estación de trabajo) y dos racks, el primero con un PLC S7-400 y el segundo donde llegan todas las señales provenientes de la periferia descentralizada e instrumentación asociada a elaboración. En la estación de trabajo se encuentra instalado el software SCADA de supervisión, adquisición y almacenamiento de datos, usando el paquete SIMATIC WinCC, esta estación se comunica con el sistema mediante un anillo redundante de industrial ethernet, haciendo uso del paquete de software Step 7 instalado en los servidores

redundantes localizados en la estación de ingeniería se podrá realizar la reprogramación que requiera el lazo de control pH para el área de elaboración. En el sistema DCS, fue necesario actualizar las tendencias existentes del sistema SCADA por requerimiento del departamento eléctrico para realizar un seguimiento a las mejoras realizadas, haciendo referencias al Set point del control PID, variable pH del jugo amortiguado y variable del flujo que ingresa a los tanques clarificadores.

### 3.2.4. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo del proceso por etapas (ver Figura 3.3), representa el trayecto del producto proveniente del área de molinos, en este caso, el jugo pesado ingresa a la etapa de jugo encalado, posteriormente a la etapa de tratamiento de jugo, partiendo jugo amortiguado, después prosigue a los clarificadores, obteniendo jugo clarificado, el cual finalmente va hacia la fábrica de azúcar, donde se obtiene el cristal de azúcar para su culminar con su empaquetado y distribución en sus respectivos canales.



Figura 3.3: Diagrama de flujo etapa de tratamiento de jugo.

Fuente: Diseño propio.

### 3.2.5. Lista de instrumentos

En la planta se encuentran los siguientes instrumentos que integran los dos lazos de control pH: jugo encalado y jugo amortiguado. Un lazo de control está integrado generalmente por un dispositivo de medición (sensor), controlador y un elemento final control (actuador), en este punto se establecen los criterios de selección de instrumentos, en común acuerdo con el jefe del departamento de energía y automatización del ingenio la Cabaña S.A., tal como se indica en la (Tabla 3.5)



Ítem	Criterios de selección	Ponderación
1	Facilidad de montaje	20 %
2	Operación	7 %
3	Confiabilidad y seguridad	30 %
4	Calibración	15 %
5	Precisión	15 %
6	Costo	13 %

Tabla 3.5: Porcentaje de criterios de evaluación.

Fuente: Departamento eléctrico.

Bajo éstos criterios de evaluación, el departamento eléctrico realizó la prueba en campo de diferentes instrumentos de marcas variadas para dejar los de mejor respuesta y fiabilidad ante los cambios de la variable pH y mayor durabilidad en el ambiente industrial, Esta evaluación de los diferentes instrumentos fue una alternativa tomada por el departamento sin lograr dar una solución a la problemática antes mencionada, por ende, cuando se iba realizar la intervención del lazo estos instrumentos presentados posteriormente, ya se encontraban en el lazo de control pH jugo amortiguado en el área de elaboración con algunas de sus características principales:

Ítem	Instrumento	Cant.	Observación
1	PHmetro ABB	3	Alimentación 110Vdc, Salida 4-20mA.IP66 Nema 4X
2	Electrodo ABB	3	Cúpula de cristal poroso
3	Motobomba Weg	4	Alimentación 220V, Variador de frecuencia

Tabla 3.6: Listado de instrumentos.

Fuente: Elaboración propia.

El pHmetro AX400 de ABB que hace presencia en los tres lazos de control pH permite una integración ideal con los sistemas descentralizados de entradas y salidas de señales del departamento de Elaboración, dispone de una interfaz de visualización que permite una programación fácil y segura en campo, además el instrumento está avalado con las normas IP66 Nema 4X garantizando funcionalidad en entornos llenos de polvo, agua y altas temperaturas. La medición en línea de pH requiere también de un Electrodo TB556 de ABB, ubicado estratégicamente que permita la medición adecuada del fluido, es decir un punto donde el fluido esté en movimiento para captar las variaciones del pH de fluido y este dato ser transmitido por el pHmetro AX400 en este caso. El electrodo está compuesto por dos sensores, uno de referencia para establecer el nivel cero basado en bloques de madera sumergidos en Ag/Ag y el sensor de medición que junto la referencia produce cambios en milivoltios como respuesta a un pH determinado, adicionalmente un sensor de temperatura para la compensación



(a) ABB pHmetro AX400.



(b) ABB Electrodo AX400.



(c) Motor Siemens 220-440 Vac.

Figura 3.4: Instrumentos existentes en lazo de control .  
Tomada de: ABB [20], QuickTime[21], Siemens Colombia [22].

de la medición. El actuador del lazo del control pH Jugo Amortiguado se realiza mediante los variadores de velocidad para los Motores Siemens 440V de 160 HP, para el suministro del Sacarato que se le adiciona al jugo para mantenerlo en los niveles de pH deseados.

### 3.3. Ingeniería detalle

En esta fase, se desarrolla toda la documentación técnica necesaria para la ejecución y evaluación del proyecto, incluyendo documentación técnica de los instrumentos, el dimensionamiento de tuberías e instalaciones eléctricas. Además, se detallan los diseños de los planos y diagramas eléctricos de todas las conexiones, con el fin de obtener el visto bueno de la operación y su posterior realización.

#### 3.3.1. Diagrama eléctrico

En la figura 3.5, se ilustra el diagrama de conexiones eléctricas acerca del lazo de control de pH jugo amortiguado y las conexiones hacia el cuarto de control eléctrico (CCE).

#### 3.3.2. Diagrama P&ID bajo estándar ISA 5.1

La norma ISA 5.1 aplicada ampliamente en el campo industrial, establece de manera uniforme la identificación y funciones propias de los instrumentos o dispositivos de un proceso descrito sobre algún plano de ingeniería como el que utilizamos actualmente, P&ID (Piping and Instruments Drawings). En la tabla 3.6 se puede verificar el listado

de etiquetas de los diferentes instrumentos y elementos dentro del PID realizado para el lazo de control pH jugo amortiguado (Ver figura 3.6).

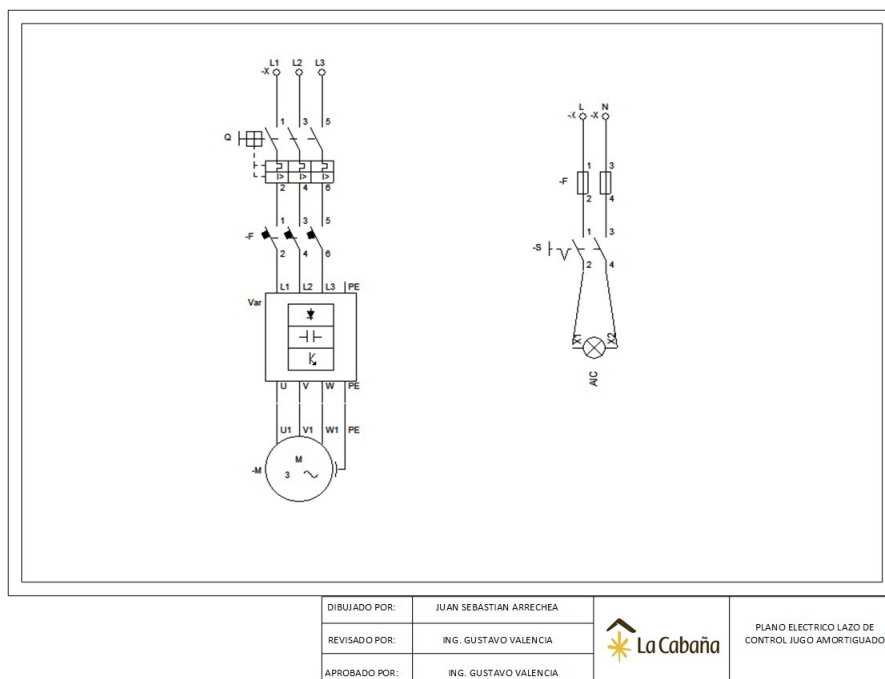


Figura 3.5: Diagrama eléctrico lazo de control pH jugo amortiguado.  
Fuente: Elaboración Propia.

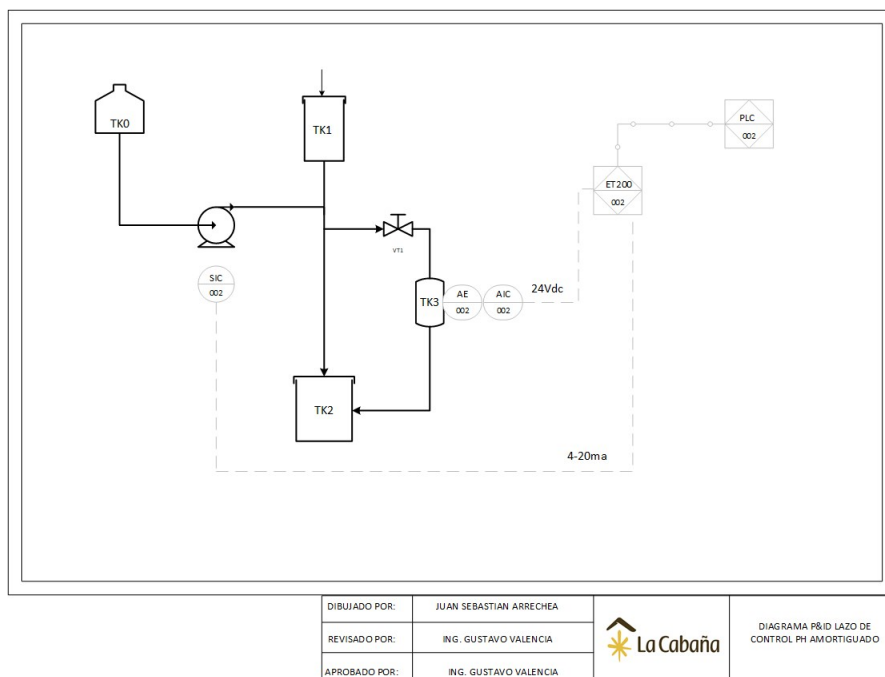


Figura 3.6: Diagrama eléctrico lazo de control pH jugo amortiguado.  
Fuente: Elaboración Propia.

Identificación funcional según ISA 5.1	
TAG	Descripción
TK2	Tanque amortiguado
TK1	Tanque encalado
TK0	Tanque Lechada de Cal
AIC002	Controlador jugo amortiguado
SIC002	Variador Bomba de jugo amortiguado

Tabla 3.8: Identificación funcional

### 3.4. Ejecución del proyecto: pruebas y cierre

Después de obtener la aprobación de los jefes del departamento eléctrico y de elaboración, de disponer de los elementos necesarios en el almacén, se procedió a realizar la ejecución del proyecto según lo establecido en el cronograma y los requerimientos del departamento. Se Interviene el lazo de control pH jugo amortiguado realizando una reubicación del punto de muestra jugó amortiguado, reubicación de la instrumentación y posterior toma de datos para registrar la información, con el fin de determinar estadísticamente la mejora de la medida de pH jugo amortiguado. Además, se realizó cambio en los implementos de mantenimientos de los electrodos y se implementó una rutina de rehabilitación de membrana.

#### 3.4.1. Instalación de tuberías y cableado

Estableciendo con los ingenieros y supervisores de ingenio la Cabaña, la zona donde se traslada el pHmetro de Jugo Amortiguado, siguiendo los requerimientos del departamento. El área asignada fue cerca del pHmetro de jugo encalado (ver Figura 3.7), cuenta con las condiciones ideales para la conexión, mejor punto de muestreo y de ambiente dentro del área de sulfitación.

Luego de verificar las condiciones del sitio, se procedió con la instalación de tuberías de acero galvanizado con la ayuda del taller mecánico según la ruta establecida por el departamento, teniendo como propósito facilitar la toma de una mejor calidad de muestra, tratando de mantener un flujo rápido y constante en la toma muestra que es donde termina nuestra tubería.

Posteriormente, el tendido eléctrico del pHmetro de jugo amortiguado se reorientó desde el tablero eléctrico del departamento de Elaboración, donde se encuentran ubicados los puertos de periferia descentralizada del ecosistema SIEMENS con el PLC S7-400 donde se procesan más de 600 señales de I/O tipo Análogas y Digitales,

hasta el área donde se encuentra ubicado el pHmetro de jugo encalado (ver Figura 3.8).



Figura 3.7: PHmetro jugo encalado, área sulfitación  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.8: Gabinete departamento de elaboración.  
Fuente: Elaboración Propia.

Fue necesaria la adecuación de una válvula manual para el tubo de alimentación al punto de muestra de jugo amortiguado para lograr regular el flujo constante de ingreso a la caja de muestreo, siendo éste un requerimiento de gran impacto, debido a que el flujo laminar que se genera en el contacto con el sensor debe ser constante y con buen flujo para un tiempo de reacción menor para percibir el cambio de pH del líquido de caña en este caso.

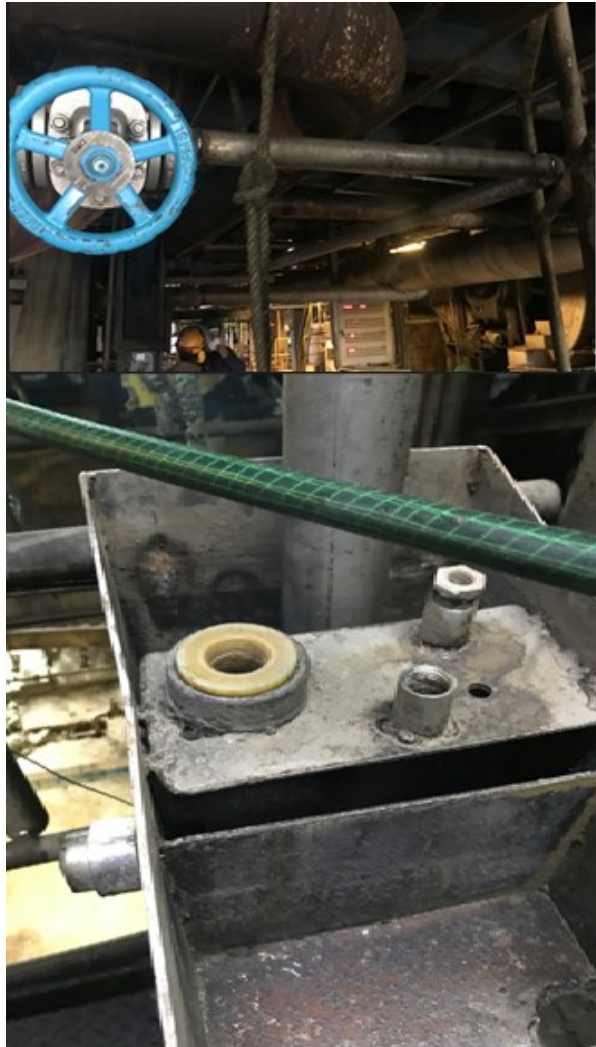


Figura 3.9: Punto de muestra Ph.  
Fuente: Elaboración Propia.

Una vez finalizada la instalación de tubería y adecuación del área designada, se procedió con la instalación de los instrumentos y reubicación del cableado respectivo para la señal que llegaría al tablero del departamento de elaboración.

### 3.4.2. Instalación de instrumentación

Se realizó un proceso de identificación del cableado desde el tablero eléctrico ubicado en el cuarto del departamento de elaboración, para reorientarse hacia el área requerida, luego se instalaron los pHmetros, dejando habilitada la conexión de la alimentación 110v y la comunicación 4-20 mA, se efectuaron las comprobaciones del funcionamiento de la señal en el puerto de conexión de la periferia descentralizada del área de sulfitación.



Figura 3.10: Montaje pHmetros jugo amortiguado encalado.  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4.3. Actualización de tendencias SCADA WinCC

El sistema SCADA del ingenio La Cabaña está basado en el sistema de control de procesos SIMATIC PCS7 siendo un entorno que nos ofrece muchas ventajas en términos de fiabilidad, flexibilidad y escalabilidad con el desarrollo de cualquier proyecto de automatización en la planta [23]. En la interfaz gráfica se logra destacar todo el proceso en cinco áreas: generación de vapor, molienda, tratamiento de jugo, fábrica de azúcar y refinería (ver Figura 3.11), cada área está integrada por los subprocesos que lo componen, por ejemplo: El área de tratamiento de Jugo tiene los subprocesos sulfitación, filtración, clarificación de jugo, entre otros. Esto permite dar una segmentación clara de los lazos de control, E/S e instrumentos que integran cada área desde la obtención de la caña de azúcar hasta el empaquetado para el usuario final.



Figura 3.11: Pantalla inicial SCADA Ingenio La Cabana  
Fuente: Tomado de cuarto de ingeniería La Cabaña S.A

Las tendencias se encargan de registrar los datos de las variables de interés para el operario sobre tiempo permitiendo hacer un diagnóstico en tiempo real de lo que está sucediendo en la planta, la actualización de las tendencias se realiza en el SCADA dentro del área de tratamiento de jugo, especialmente en sulfitación, donde se encuentra ubicado nuestro lazo de control de jugo amortiguado, como lo ilustra la figura 20. El ajuste se realizó haciendo un reintegro las variables monitoreadas nuevamente a una tendencia, las variables monitoreadas serían el Set point, la señal de entrada del transmisor de pH jugo amortiguado y la señal del transmisor de flujo del jugo que se dirige por tuberías hacia los calentadores y posteriormente hacia los clarificadores de Jugo. Toda la reprogramación de la tendencia se realiza en un software que compone una de las utilidades del SIMATIC llamado WinCC, el editor gráfico nos permite integrar los valores obtenidos del editor CFC; para ser visualizados mediante el SCADA.



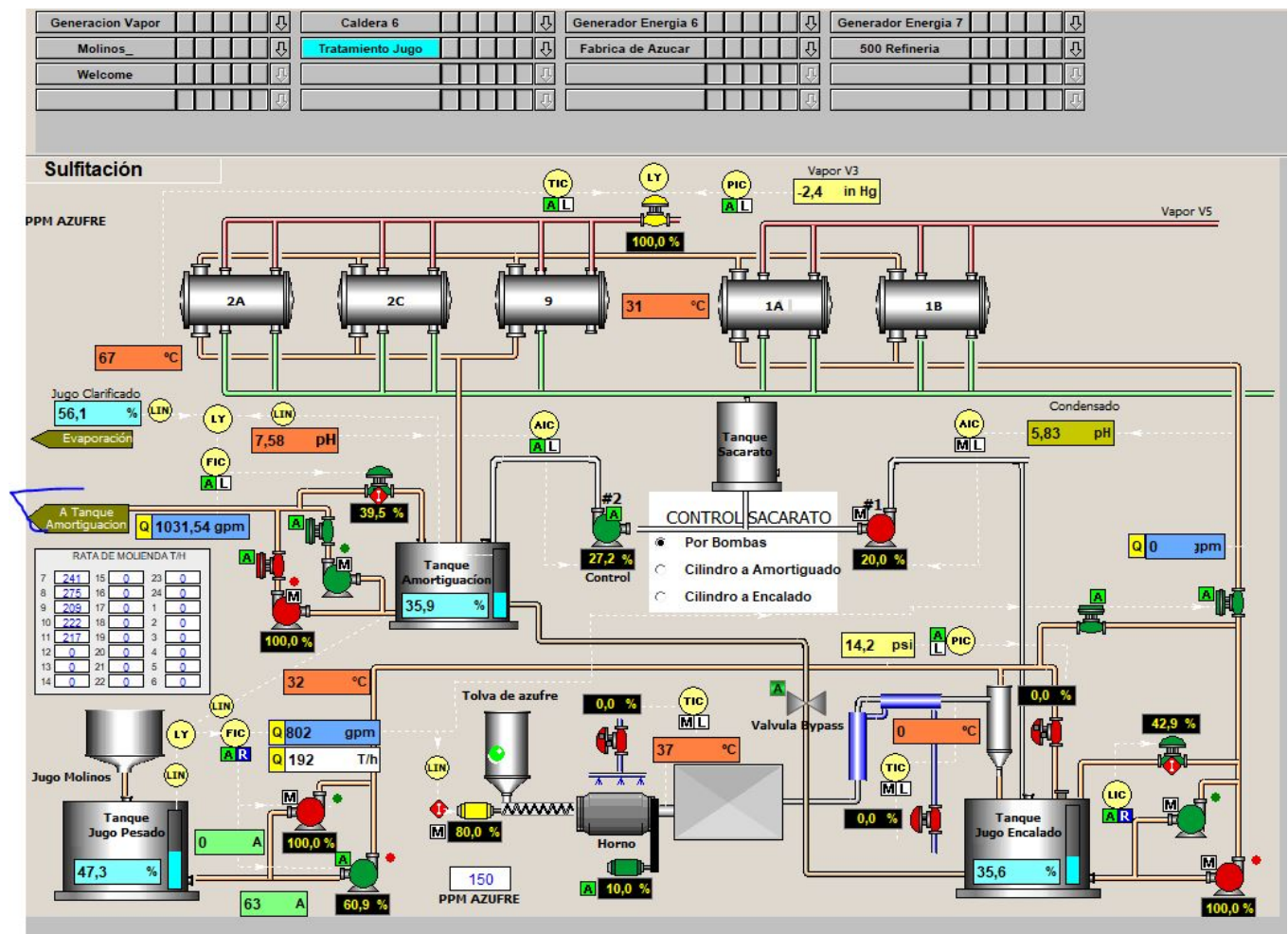


Figura 3.12: Pantalla inicial SCADA Ingenio La Cabana  
Fuente: Tomado de cuarto de ingeniería La Cabaña S.A

El editor CFC de Simatic 7 permite programar toda la lógica de control de los instrumentos que hacen parte del proceso para la obtención del cristal de azúcar, mediante bloques funcionales. La programación del sistema completo de control, definir Entradas/Salidas de toda la instrumentación que involucra el pH ya se encuentra realizado por parte del departamento, luego de ubicar, las I/O del CFC AIC del jugo amortiguado. Se seleccionan las señales requeridas y se integran a la tendencia nueva (ver Figura 3.13).

También, se evidencia la red de instrumentos que se encuentran en el sistema de control distribuido del Ingenio la Cabaña, a través, de la herramienta HW Config, permitiendo configurar cada uno de los hardware, como sensores, controladores y actuadores mediante un catálogo digital, para el tratamiento de la señal recibida, asignaciones de periféricas y el tipo de conexión [24].



Figura 3.13: Tendencias desde el WinCC.

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.4.4. Actualización rutina de mantenimiento electrodos

Las industrias requieren rutinas de mantenimiento para sus instrumentos, éstas tareas son generalmente realizadas por los instrumentistas, en el caso del ingenio la Cabaña S.A se ejecutan rutinas de mantenimiento de equipos e instrumentos, para extender la vida útil de ellos, obtener el máximo rendimiento, alta disponibilidad y reducción de costos de mantenimiento correctivo [25]. Al realizar un diagnóstico de los componentes utilizados durante la rutina de mantenimiento y calibración de los electrodos pertenecientes a cada lazo de control, se encontró que los elementos disponibles en el departamento eléctrico son los normalmente utilizados en la industria para limpieza de electrodos, haciendo referencia al agua destilada y servilletas de papel para la limpieza del electrodo, buffers de solución de pH para calibración y puesta en marcha del lazo de control (ver Figura 3.15). Estos electrodos están compuestos principalmente por una membrana de vidrio poroso que permite un mejor contacto con el líquido a medir, en este caso jugo de caña (ver Figura 3.14).

Aunque los elementos son los correctos, la manera en que se realizaba la rutina de mantenimiento de ellos no era la ideal, presentaba falencia respecto al requerimiento de presión del líquido con el que se limpiaban las impurezas incrustadas en el electrodo, en este caso, agua destilada, decidiendo así modificar los pasos de la rutina agregando la presión necesaria, a la hora de aplicar el líquido para retirar con mayor

eficiencia las impurezas y disminución del tiempo de calibración por electrodo. Luego de recibir una capacitación por la empresa proveedora de los electrodos, se dejó documentada una rutina de rehabilitación de la membrana que consisten en dejar los electrodos durante un tiempo de 1-4 Horas sumergido en KCL, cloruro de potasio, para obtener un rendimiento óptimo del instrumento, manteniendo un flujo libre de iones a través del vidrio poroso, de lo contrario el electrodo de referencia no responde apropiadamente a los cambios de pH de la muestra [26].



Figura 3.14: Electrodo Lazo de control pH amortiguado.  
Fuente: Estación de ingeniera.

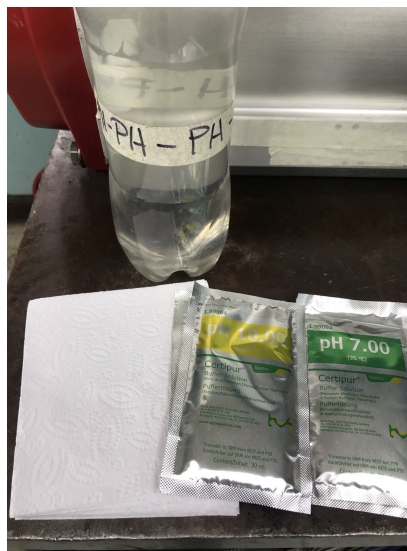


Figura 3.15: Elementos rutina de mantenimiento.  
Fuente: Estación de ingeniera.

### 3.4.5. Pruebas y puestas en marcha

Esta parte consta de realizar pruebas de funcionamiento a los instrumentos que integran el lazo de control pH jugo amortiguado, emisión y recepción de las señales generada por los instrumentos, con el fin de realizar los ajustes finales para posteriormente dejar en operación y supervisión durante un tiempo prudente de 20 a 30 días. Durante este tiempo, se realizó una recolección de los datos con respecto al pH Jugo Amortiguado para realizar un análisis estadístico con el fin de obtener una conclusión de la mejora de la lectura de la variable pH.

#### Desviación estándar entre los valores de pH medidos en campo y en laboratorio de calidad

El mundo de la estadística y probabilidad nos ofrecen múltiples herramientas que se utilizan a modo de criterio de evaluación en la ejecución de un proyecto para obtener una afirmación estadística respalda por los métodos conocidos, en este caso se aplicará la prueba "t student" para grupos de muestras pareadas, debido a que las muestras pertenecen a un mismo grupo, pero con una línea temporal diferente y el tamaño de la muestra de 100 datos, Esta información fue suministrada por la base de datos manejada por el laboratorio de calidad, dentro de en un rango de horas de 7 a.m. a 12 p.m. durante 25 días laborales [27]. Nuestro objetivo es comprobar si hay una diferencia mayor a 0.1 entre las mediciones, por lo que se realizó una prueba de hipótesis de diferencias. Para esto definimos nuestra hipótesis nula, la que se piensa comprobar de la siguiente manera  $H_0: \mu = 0.1$  donde  $\mu$  es la diferencia a comprobar. En la hipótesis alternativa,  $H_1: \mu > 0.1$  siendo esta la hipótesis a alcanzar durante el desarrollo de la prueba de hipótesis de diferencia.

Con los resultados de la diferencia\_antes, podemos observar que la media de las mediciones antes es de 0.5505, con una desviación estándar de 0.2815. (ver Tabla 3.10). Por otro lado, la media de las mediciones diferencia después es de 0.3861, con una desviación estándar de 0.2352 (ver Tabla 3.10).

Variable	N	Media	Des. Est.
Difere_ Antes	100	0.5505	0.2815
Difere_ Despues	100	0.3861	0.2352

Tabla 3.10: Estadísticas  
Fuente: Elaboración propia.

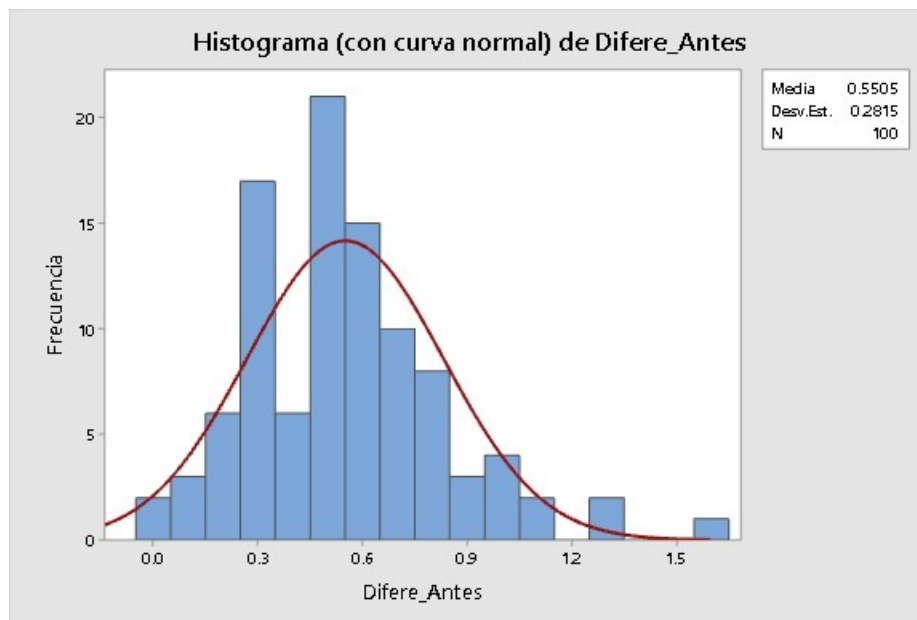


Figura 3.16: Histograma comportamiento antes  
Fuente: Elaboración propia.

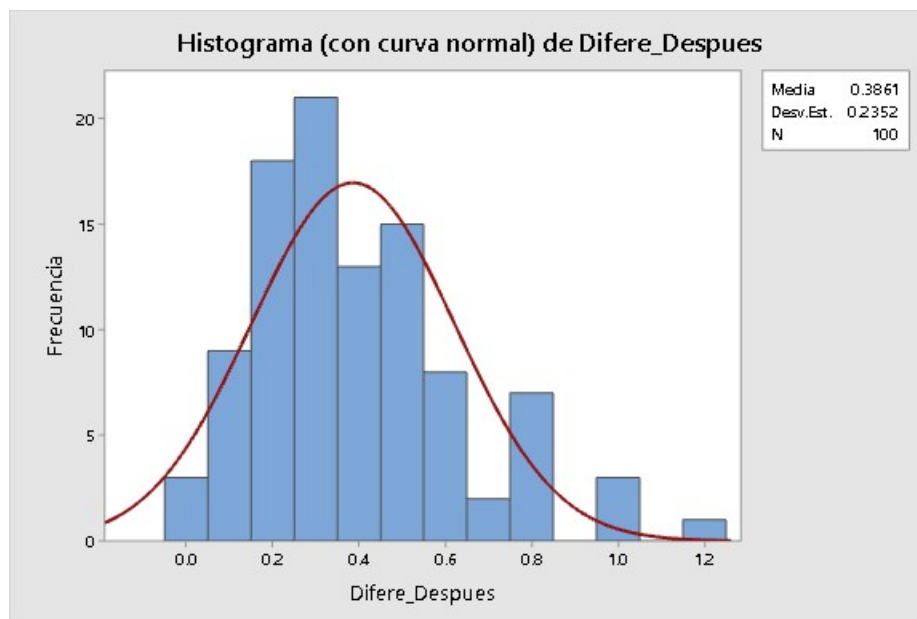


Figura 3.17: Histograma comportamiento después.  
Fuente: Elaboración propia.

Representando la distribución de los datos de antes (ver figura 3.16) y después (ver figura 3.17) de la intervención en histogramas; es posible ver que, antes de la intervención la gran mayoría de los valores se encuentran en un rango de 0.3-0.9, siendo un rango de valores bastante elevado para el departamento de calidad y eléctrico (ver figura 3.16). En la figura 3.17, los valores de mayor frecuencia están ubicados

en el rango 0.2-0.5. Por lo tanto, que las mediciones de antes y después presentan un pequeño sesgo positivo, indicando que los datos se encuentran más concentrados en un rango de menor valor en los valores de diferencia después.

En la tabla 3.12, se plantea la hipótesis para la diferencia de medias de las dos mediciones pareadas y obtenemos un valor-p de la prueba de 0.019, obtenido mediante la herramienta excel, utilizando la regla de la decisión de rechazo de hipótesis  $H_0$  donde se expresa que si el valor-p es menor que el nivel de significancia utilizado, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  [28]. En este caso siendo el valor-p 0.019 menor al nivel de significancia del 5%, indicando esto que, si existen diferencias significativas de más de 0.1 en las diferencias de las mediciones, por tanto, podemos concluir que la intervención del lazo de control pH jugo amortiguado si redujo las diferencias. Con esta base se puede dar por cumplido el segundo objetivo de nuestro trabajo donde se enfatiza en una mejora de la desviación estándar de la diferencia entre la lectura de pH del jugo amortiguado entre el laboratorio de calidad y el área de sulfitación.

Hipótesis nula	$H_0$ :diferencia $\mu = 0.1$
Hipótesis alterna	$H_1$ :diferencia $\mu >0.1$
Valor p	0.019

Tabla 3.12: Resultados T Student  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Plan de mantenimiento

Posteriormente de haber recopilado los datos, entrarán en vigencia los cambios a la rutina de mantenimiento de los electrodos. Se pudo evidenciar en la bitácora de la rutina de mantenimiento de pHmetros, que desde el 5 de octubre que se realizó la intervención del lazo de control pH, el cambio de electrodo se realizó el 8 de noviembre, pasando de una rotación de cada 3 o 7 días de electrodo, a lograr garantizar un normal funcionamiento del lazo de control pH Jugo Amortiguado durante 1 mes, vale recalcar que se determinó con el departamento realizar la rotación cada 15 días. Con esta evidencia se da por concluido el último objetivo propuesto que constaba en implementar estrategia para incrementar el tiempo de ciclo de rotación de los electrodos en el pHmetro del Jugo Amortiguado.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Conclusiones

La intervención del sistema de control pH permitió mejorar los estándares de producción y calidad del producto final durante la etapa de cristalización, debido a la disminución de la desviación estándar de los datos recopilados por el laboratorio en relación con el pH jugo amortiguado, una mejor estabilidad en la variabilidad del pH, reducción de la intervención del instrumentista y/o operarios en el funcionamiento del sistema de control.

Los proyectos de ingeniería se emplean para generar soluciones tecnológicas a necesidades requeridas durante la producción y obtención de un producto y/o servicio. La metodología utilizada del ciclo de vida de un proyecto de ingeniería nos permitió alcanzar cada uno de los objetivos planteados, resultando útiles para la ejecución en relación con la planificación, diseño y ejecución del proyecto donde se deja evidencia consolidada como diagramas eléctricos, diagramas PID y lazo, manuales de usuario y actualización del SCADA del sistema DCS.

La implementación de este nuevo plan de mantenimiento permitió pasar de 7 días a 15 días el ciclo de rotación de los electrodos siendo en medida un gran aporte para el departamento Eléctrico, debido a la estrategia de rehabilitación de la membrana de los electrodos donde se logra extender su vida útil, por ende, una disminución en la frecuencia de adquisición de estos instrumentos para el departamento y extensión en días de los ciclos de rote de los electrodos.

# Bibliografía

- [1] Asocaña Sector Agroindustrial de la Caña. *Caña de azúcar, el gran motor de la economía en el Valle del Cauca*. [Web; accedido el 18-02-2022]. URL: <https://www.asocana.org/modules/documentos/14167.aspx>.
- [2] Desarrollo Rural. *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. 2006.
- [3] *I.L, Çonozcanos*". [Web; accedido 2020]. URL: <http://www.ingeniolacabana.com/nosotros/>.
- [4] L Bernal. "Una Visión del Sistema de Certificación en Inocuidad de Alimentos". En: *Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional Abierta ya Distancia* (2013).
- [5] Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios UGRA Vicepresidencia de Garantías y Riesgos Agropecuarios. *Ficha de inteligencia: Caña de azúcar*.
- [6] Ingenio la Cabaña. *Proceso - Ingenio la Cabaña*.
- [7] Jesús E Larrahondo. "Calidad de la caña de azúcar". En: *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Eds. Cassalett, C (1995), págs. 337-354.
- [8] Ángela María Buitrago Valencia. "Optimización Del Proceso De Sulfitacion En La Producción De Azúcar En El Ingenio Providencia SA". En: (2010).
- [9] Ingenio la Cabaña. *Procesos / Ingenio Providencia S.A.*
- [10] J.S. Luna-W.Ojeda. "Avances en la estrategia de operación y mantenimiento en el área de centrifugación". En: *Cenicaña* (2021).
- [11] Leidy Jhoana Pino Pérez, Juliana Andrea Mena Valencia et al. "Criterios de implementación ISO 14001: 2015, caso de estudio Ingenio la Cabaña." En: (2015).
- [12] *Supervisor Departamento de Elaboración Ingenio La cabaña*. (Comunicación personal), 2022.
- [13] Carlos Germán Pillajo Angos et al. "Implementación de un controlador predictivo basado en eventos para un sistema de control en red inalámbrico". En: (2017).
- [14] *What is Distributed Control System (DCS)? - ELECTRICAL TECHNOLOGY*. URL: <https://www.electricaltechnology.org/2016/08/distributed-control-system-dcs.html>.
- [15] K.LTA. *Presentación kamati ltda. automatización y scada*. 2011.
- [16] CODELCO. *Etapas de un proyecto*. 2020.
- [17] Faiber Isain Gamboa Parra. "Método del ciclo de vida de un proyecto de ingeniería en el diseño de un sistema fotovoltaico para atender necesidades eléctricas de escuelas rurales ubicadas en el corregimiento de la Gabarra, Norte de Santander". En: (2013).
- [18] Jefe departamento Eléctrico Ing. Hernan Dario. [(Comunicación personal), 2022].



- [19] Freddy Hernán Barco Jiménez et al. “Evaluación de pérdidas indeterminadas de sacarosa por inversión en el proceso de clarificación en el Ingenio Castilla Industrial”. En: (2006).
- [20] *AX400 4-wire, dual input transmitter | Manufacturer | Supplier*. URL: <https://new.abb.com/products/measurement-products/analytical/continuous-water-analysis/transmitters/ax400>.
- [21] *ABB TB556 pH/Redox (ORP) Kynar Sensor: TB556J3D15T10*. URL: <https://www.quicktimeonline.com/tb556j3d15t10>.
- [22] *Motores bajo voltaje | motors | Siemens Colombia*. URL: <https://new.siemens.com/co/es/productos/accionamientos/motors/motores-bajo-voltaje.html>.
- [23] *Sistema de Control de Procesos SIMATIC PCS 7*. URL: <https://new.siemens.com/es/es/productos/automatizacion/sistemas/control-distribuido/simatic-pcs-7.html>.
- [24] Babak Rooholahi y P Lokender Reddy. “Concept and application of PID control and implementation of continuous PID controller in Siemens PLCs”. En: *Indian Journal of Science and Technology* 8.35 (2015), págs. 1-9.
- [25] Jose Alonso Vidal-Rojas. “Establecimiento de rutinas de mantenimiento preventivo para el proyecto de ampliación de la planta; sistema de control eléctrico-neumático para mejorar el proceso de envase del CONCREMIX y PEGAMIX en el edificio de complementarios”. En: (2004).
- [26] Mireya Belén Sánchez Sarango. “Cuantificación electroquímica simultánea de pb (ii), cd (ii) y zn (ii) en sedimentos marinos superficiales utilizando microelectrodo de carbono.” B.S. thesis. Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2022.
- [27] Eric Flores-Ruiz, María Guadalupe Miranda-Novales y Miguel Ángel Villasís-Keever. “El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial”. En: *Revista Alergia México* 64.3 (2017), págs. 364-370.
- [28] Mark L Berenson, David M Levine y Timothy C Krehbiel. *Estadística para administración*. Pearson Educación, 2006.

## **Anexos**

### **Anexo A: Manual de fabricante**

El anexo A corresponde a los manuales y hojas técnicas de los instrumentos proporcionados por las empresas fabricantes.

- Ficha técnica PHmetro AX400 ABB
- Ficha técnica electrodo AP300 ABB
- Manual de usuario phmetro

### **Anexo B: Diagramas Lazo de control**

El anexo B comprende 1 archivo en formato PDF correspondiente al lazo de control pH jugo amortiguado de la etapa de tratamiento de jugo, en ellos se muestran los dispositivos de medición, el controlador, el elemento final de control y el propio proceso

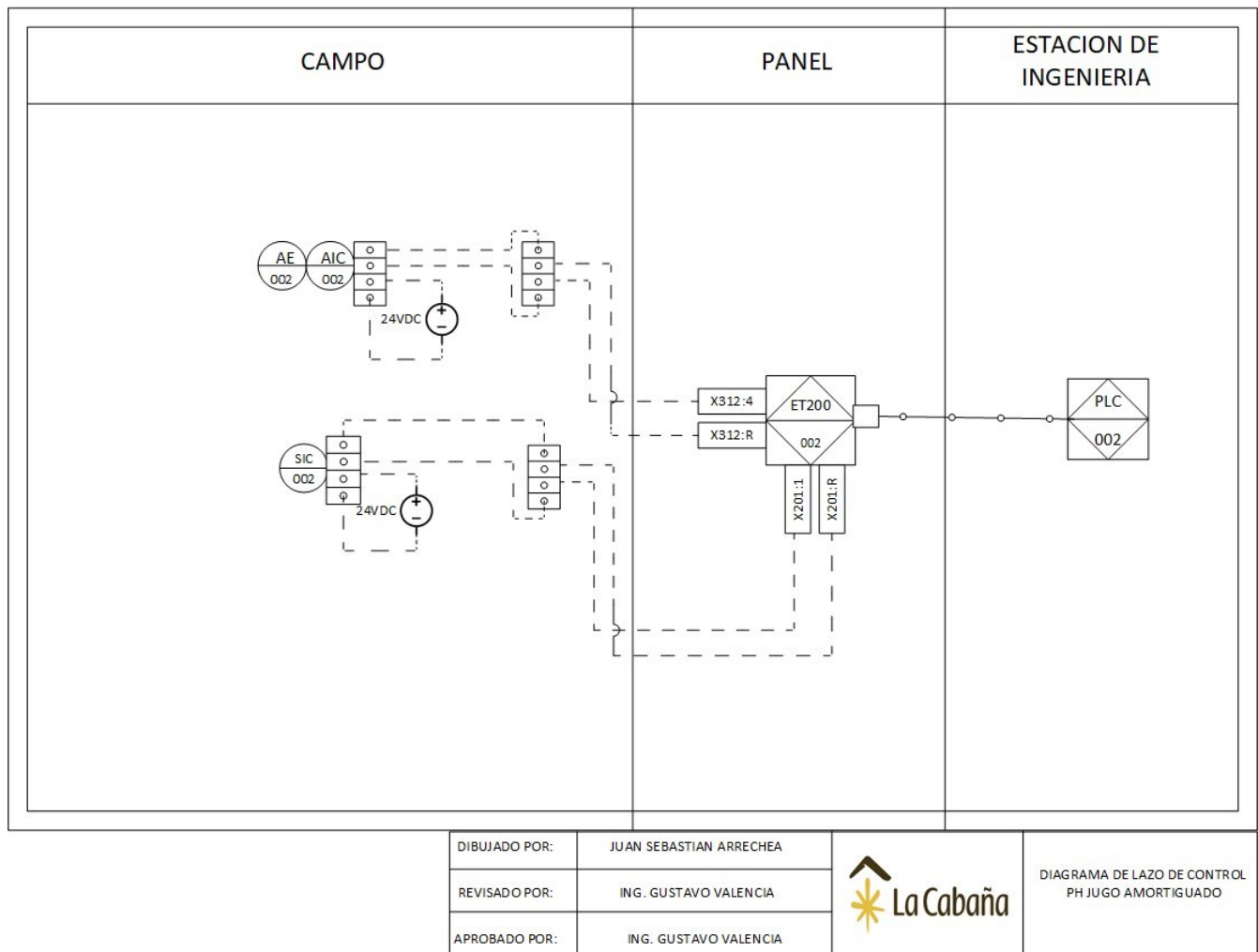


Figura B.1: Lazo de control amortiguado  
 Fuente: Adaptación propia.

Datos obtenidos en las observaciones

Secuencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
pHAmorLab_1	7.8	7.9	7.7	7.7	7.6	7.8	7.8	8	7.7	7.8	7.8	7.7	7.7	7.9	7.7	7.7	7.9	8.1	7.5	7.7	7.9	7.8	8.2	7.8	7.5
pHAmorLIN_1	7.8	7.7	7.6	7.5	7.4	7.4	7.5	7.8	7.1	7.1	7.3	7.2	7.2	7.3	7.2	7.4	7.2	7.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.3	7.2

Secuencia	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
pHAmorLab_1	7.7	7.9	7.9	7.8	7.7	7.9	8.9	8.2	8.8	7.7	7.8	7.9	8	7.9	8.9	8.2	8.8	7.7	7.8	7.9	8	7.9	7.6	8	7.9
pHAmorLIN_1	7.3	7.4	7.4	7.2	7.3	7.5	7.2	7.2	7.5	7.4	7.4	7.4	7.2	7.5	7.2	7.2	7.5	7.4	7.4	7.4	7.2	7.5	7.4	7.4	7.4

Secuencia	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
pHAmorLab_1	7.9	8	8	7.8	8	7.5	7.5	7.8	7.6	7.9	7.9	7.7	7.7	7.5	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	7.8	7.9	8	7.9	8	7.9
pHAmorLIN_1	7.2	7.4	7.7	7.5	7.8	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.2	7.7	7.2	7.3	7.2	7.2	7.4	7.3	7.4	7.4	7.7	7.4	7.5	7.4	7.3

Secuencia	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
pHAmorLab_1	7.9	7.9	7.8	7.8	8.6	8.6	8.7	7.8	8.7	8.5	8.4	8.5	8.5	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4	8.5	8.5	8.4	8.3	8.2
pHAmorLIN_1	7.4	7.4	7.3	7.4	7.6	7.6	7.6	7.6	7	7.7	7.7	7.7	7.6	7.5	7.5	7.5	7.6	7.7	7.7	7.6	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6