



## DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN DEL PRIMER MOLINO DE EXTRACCIÓN DE JUGO DE CAÑA PARA MEJORAR LA CALIDAD DE PRODUCCIÓN (MALCA)

### *Design of a Control System for the Feed Hopper of the First Sugarcane Juice Extraction Mill to Improve Production Quality (MALCA)*

<b>Johanna Marivel Medina Palta<sup>1*</sup></b> <a href="mailto:maryaroma@hotmail.com">maryaroma@hotmail.com</a> <a href="https://orcid.org/0009-0008-6322-6783">https://orcid.org/0009-0008-6322-6783</a>	<b>Rommel Eusebio Suarez Vinueza<sup>2</sup></b> <a href="mailto:rommel.esv.86@gmail.com">rommel.esv.86@gmail.com</a> <a href="https://orcid.org/0009-0000-4319-9476">https://orcid.org/0009-0000-4319-9476</a>	<b>Laura Lucrecia Pilachanga Coronel<sup>3</sup></b> <a href="mailto:euris92010@hotmail.com">euris92010@hotmail.com</a> <a href="https://orcid.org/0009-0005-0149-625X">https://orcid.org/0009-0005-0149-625X</a>	<b>Kevin Andres Cajilema Guaman<sup>4</sup></b> <a href="mailto:kevin.a.cajilema@gmail.com">kevin.a.cajilema@gmail.com</a> <a href="https://orcid.org/0009-0008-3134-8196">https://orcid.org/0009-0008-3134-8196</a>
<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica del Chimborazo: Riobamba, Ecuador <sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica del Chimborazo: Riobamba, Ecuador <sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica del Chimborazo: Riobamba, Ecuador <sup>4</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi: Latacunga, Ecuador			

\*Autor de correspondencia

**Recibido 11 de julio de 2025 revisión aceptada 30 de julio de 2025**

#### RESUMEN:

En la industria azucarera, la extracción de jugo de caña es un proceso importante que puede verse afectado por problemas de discontinuidad en la alimentación de materia prima. Para garantizar una extracción óptima, es necesario mantener un nivel de caña óptimo en la tolva de alimentación. La velocidad del motor del transportador de caña y la velocidad del molino son las variables manipulables que se pueden utilizar para controlar el nivel de caña. Un análisis de diferentes estrategias de control mostró que la estrategia de control cerrado de par, velocidad angular y altura en la tolva de alimentación es la que ofrece el mejor rendimiento. Este trabajo concluye que es importante implementar una estrategia de control en el primer molino para mantener el nivel de caña. El trabajo compara el rendimiento de tres estrategias de control: PID, difuso y basado en predicción.

**Palabras clave:** Control predictivo de modelos, nivel de caña, ingenio azucarero.

#### ABSTRACT:

*In the sugar industry, the extraction of sugarcane juice is an important process that can be affected by problems of discontinuity in the feeding of raw materials. To guarantee optimal extraction, it is necessary to maintain an optimal level of sugarcane in the feed hopper. The speed of the sugarcane conveyor motor and the speed of the mill are the manipulated variables that can be used to control the level of sugarcane. An analysis of different control strategies showed that the closed-loop control strategy of torque, angular speed, and height in the feed hopper is the one that offers the best performance. This work concludes that it is important to implement a control strategy in the first mill to maintain the level of sugarcane. The work compares the performance of three control strategies: PID, fuzzy, and predictive.*



*Keywords: Predictive control of models, cane level, sugar mill.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria azucarera es un sector importante en la economía de muchos países. La extracción de jugo de caña es un proceso clave en la producción de azúcar, y la calidad del jugo extraído afecta directamente la calidad del azúcar producido [1][2]. El nivel de caña en la tolva de alimentación del primer molino es un factor que puede afectar la calidad del jugo extraído. Un nivel de caña demasiado alto puede provocar que el molino se atasque, mientras que un nivel de caña demasiado bajo puede provocar que el molino no extraiga todo el jugo de la caña [3][4].

En la actualidad, la mayoría de los ingenios azucareros utilizan sistemas de control manuales para mantener el nivel de caña en la tolva de alimentación [5]. Estos sistemas son ineficientes porque requieren la intervención humana para ajustar la velocidad del transportador de caña y la velocidad del molino. Esto puede provocar variaciones en el nivel de caña, lo que afecta negativamente la calidad del jugo extraído [6]. El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de control automático para el nivel de caña en la tolva de alimentación que mejore la calidad del jugo extraído. Para ello, se utilizará un modelo predictivo de la evolución del nivel de caña para ajustar la velocidad del transportador de caña y la velocidad del molino [7]. El sistema de control propuesto para este proceso permite mejorar la calidad del jugo extraído al mantener el nivel de caña en un valor óptimo, reducirá el desperdicio de caña y aumentará la eficiencia del proceso de extracción de jugo de caña.

La evaluación del sistema de control propuesto se realizará mediante simulaciones y experimentos en un ingenio azucarero. Los resultados de este trabajo serán de gran utilidad para la industria azucarera, ya que ayudarán a mejorar la calidad del jugo extraído y la eficiencia del proceso de producción de azúcar [8].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Revisión de literatura:** Se revisará la literatura existente sobre sistemas de control automático para el nivel de caña en la tolva de alimentación del primer molino de extracción de jugo de caña. Esto permitirá identificar los diferentes enfoques que se han utilizado para abordar este problema, así como los retos y oportunidades que existen [9].

**Modelado del proceso:** Se desarrollará un modelo matemático del proceso de extracción de jugo de caña. El modelo incluirá las variables que afectan al nivel de caña, como la velocidad del transportador de caña, la velocidad del molino, la densidad de la caña y la humedad de la caña [10].

**Diseño del sistema de control:** Se diseñará el sistema de control automático utilizando el modelo del proceso. El sistema de control utilizará un modelo predictivo para estimar el nivel de caña en el futuro [11].

**Validación del sistema de control:** Se validará el sistema de control mediante simulaciones. Las simulaciones se realizarán utilizando datos reales del proceso de extracción de jugo de caña [12].

**Implementación y evaluación del sistema de control:** El sistema de control se implementará en un ingenio azucarero. Se evaluará el rendimiento del sistema de control en comparación con un sistema de control manual [13].

Para el análisis y modelo matemático se utilizó el software de MATLAB sobre el cual vamos a



implementar el entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, y cálculo numérico, necesarios para obtener la solución matemática y gráfica, considerando las siguientes variables de entrada, salida más relevantes y perturbaciones [14].

Variables de entrada: Posición de Sensores de Nivel en la tolva (F), Parámetro del variador de frecuencia (V)  
Variables de salida: Cantidad de jugo generado (F), Velocidad angular de los rodillos (V)

Perturbaciones: Ruido eléctrico

En la tabla 1, se muestra los valores de operación del molino nro. 1: el brix; abertura de entrada entre la maza cañera y la masa superior; abertura de salida entre la maza superior y la maza bagacera; presión de aceite que se inyecta a la salida del molino (maza superior); velocidad del motor; relación de transmisión de los reductores tanto de alta y baja.

**Tabla 1.** Valores de operación del molino nro. 1

Equipo	Abertura Entrada	Abertura salida	Presión Hidráulica	Velocidad	Reductor alta	Reductor baja	Longitud masas	Diámetro masas
Molino	2"	1"	2500 psi	1785rpm	1-25	1-15	106 m	0.61 m

En la tabla 2; se observa las medidas de construcción de la tolva donde; H es la altura total, A es ancho, X es la altura media, h es la altura máxima de llenado del colchón de caña y ángulo de entrada de la tolva que recibe el bagazo por el conductor o banda.

**Tabla 2.** Medidas interiores y exteriores de la tolva.

Equipo	H(m)	A(m)	X (m)	H (m)	Ángulo
Tolva ò chute	1.95	0.48	0.83	1.70	45

Las funciones de transferencia G y G' se las usa para crear el modelamiento de control de lazo cerrado usando el esquema de predictor de Smith, para definir las funciones de transferencia y el bloque de control proporcional K, además del filtro X, se tomó la referencia de la investigación [15]; en la que se modela un molino con características muy similares al que se usara en la presente investigación.

### 2.1. Definición de parámetros del control PID

El sistema del controlador PID para controlar el sistema de extracción de jugo de caña en el primer molino. Se sintonizó mediante tres métodos los cuales son: el primero con el método con respuesta al escalón unitario control agresivo; el segundo con el método con respuesta al escalón unitario con control robusto y el tercer método se sintonizó con el método de Ziegler-Nichols mediante oscilaciones sostenidas, con el único fin de determinar los valores de la ganancia proporcional Kp, del tiempo integral Ti y del tiempo derivativo Td [16].

- **Sintonización del control PID**

Para el control del molino, se debe tomar en cuenta un sistema de control con dos entradas y dos salidas, las cuales se definen a continuación.

**Variables de Entrada:** Posición Sensores de Nivel en la tolva (F), Parámetro del variador de frecuencia (V)

**Variables de salida:** Salida Cantidad de jugo generado (F), Velocidad angular de los rodillos (V)

Gracias a los datos de operación adquiridos por el personal del ingenio azucarero, se tienen mediciones que relacionan las entradas y las salidas.

Con vista a obtener los modelos del sistema se utilizó la herramienta IDENT del Matlab. Donde para procesar los datos de entrada y salida, los cuales son medidas reales, se usó para encontrar la función de

transferencia a través del código que se ilustra en la figura 1.

```
FT.m x +
1 - clear
2 - clc
3 - PVA=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','B3:B27') %Parametro variador
4 - RPM=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','C3:C27') %Revoluciones del motor
5 - MC=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','D3:D27') %Maceracion Kg/Hora
6 - MA=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','E3:E27') %Agua
7 - T=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','F3:F27') %Temperatura
8 - SJ=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','G3:G27') %Ton de jugo
9 - SC=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','H3:H27') %Ton caña
10 - BS=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','I3:I27') %Sacarosa
11 - BH=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','J3:J27') %Humedad
12 - ST=xlsread('FT.xlsx','15 diciembre2021 (4)','K3:K27') %sensor tolva
13 - ENTRADA=[PVA ST]
14 - SALIDA=[RPM SJ]
15 - ident
```

Figura 1. Código para importar datos de operaciones a Matlab

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las funciones de transferencia se obtuvieron a partir de la herramienta IDENT de MatLab, una vez que se definen las variables de entrada y salida para el modelo con el ajuste adecuado. Para analizar el comportamiento de la función de transferencia se aplica un impulso que tiende a un valor estacionario como se observa en la figura 2.

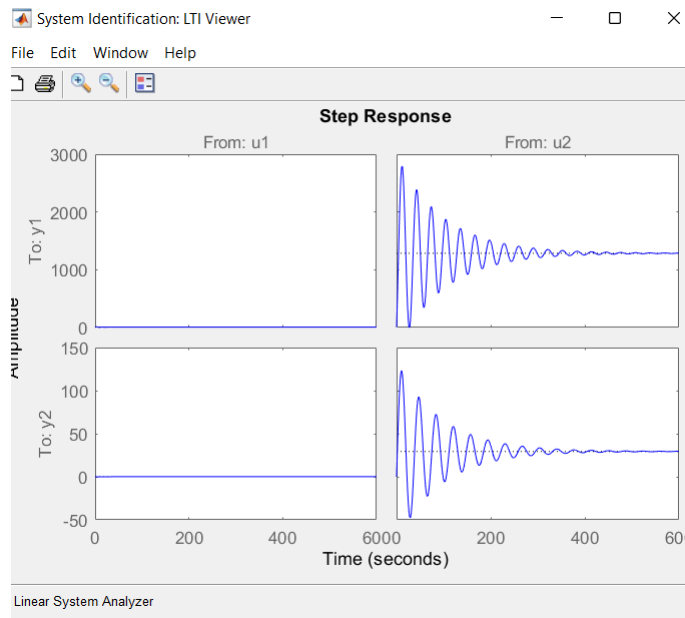


Figura 2. Respuesta del modelo estimado a un impulso

A continuación, se observa los resultados y se tienen las siguientes funciones de transferencia (*tf1*):

Desde U1

$$y1 = \frac{5.701s - 0.4019}{s^2 + 0.1827s + 0.2711}$$

$$y2 = \frac{-0.04279s - 0.002185}{s^2 + 0.3546s + 0.02283}$$

Desde U2

$$y1 = \frac{244.1s - 52.85}{s^2 + 0.02126s + 0.02949}$$

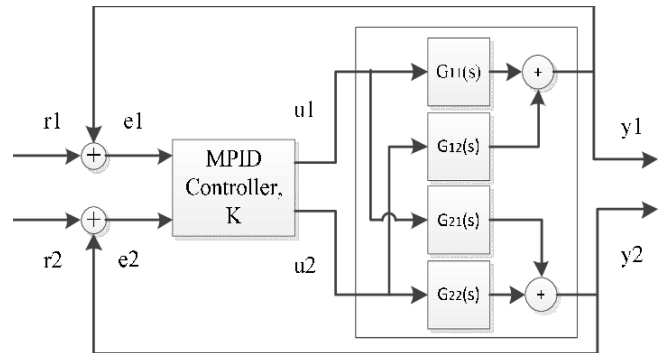
$$y2 = \frac{17.64s - 0.8672}{s^2 + 0.02126s + 0.02949}$$

Una vez obtenido el sistema, se utiliza un esquema de control de lazo cerrado multivariable como se observa en la Figura 3, además se detalla a continuación las entradas y salidas consideradas en el sistema.

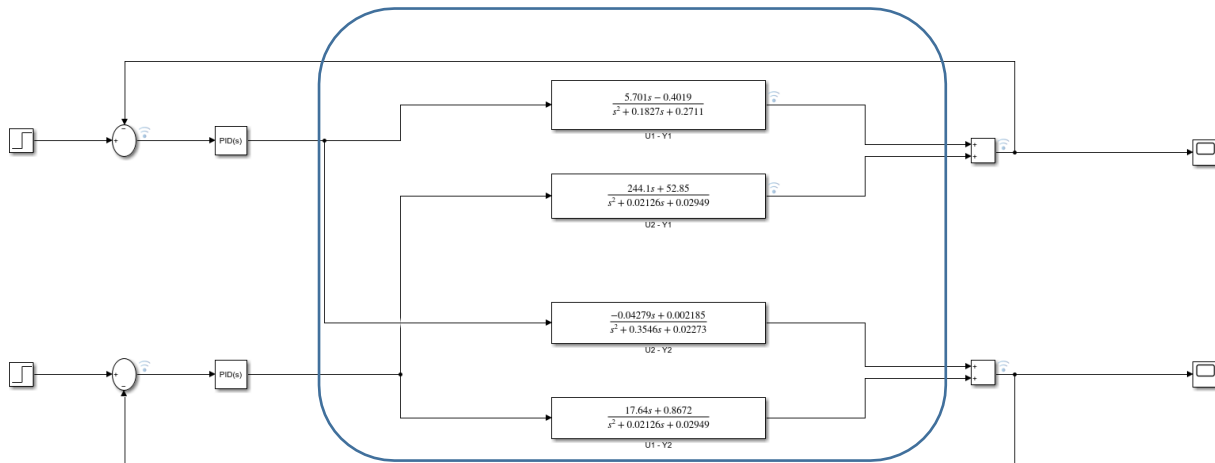
El sistema modelado, usando controlador PID es el que se muestra en la figura 4, tomando en consideración las entradas y salidas detalladas en la tabla 3.

**Tabla 3.** Descripción de entradas y salidas consideradas

Entradas	Descripción
Posición de Sensores de Nivel en la tolva (F)	U1
Parámetro del variador de frecuencia (V)	U2
Salidas	Descripción
Cantidad de Caña Tolva (L)	Y1
Velocidad angular de los rodillos (T)	Y2



**Figura 3.** Control multivariable de lazo cerrado



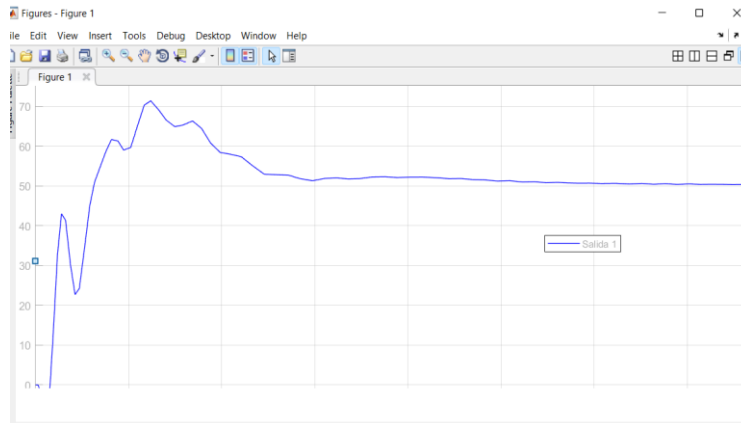
**Figura 4.** Sistema modelado en Simulink

Tal como se puede apreciar en la tabla 4, se modela el sistema usando 2 controladores PID, uno para cada entrada, y se busca estabilizar el sistema mediante ellos en el menor tiempo posible, para esto se usa la herramienta de sintonización presente en Matlab que determinó los coeficientes, el proporcional, integral y derivativo.

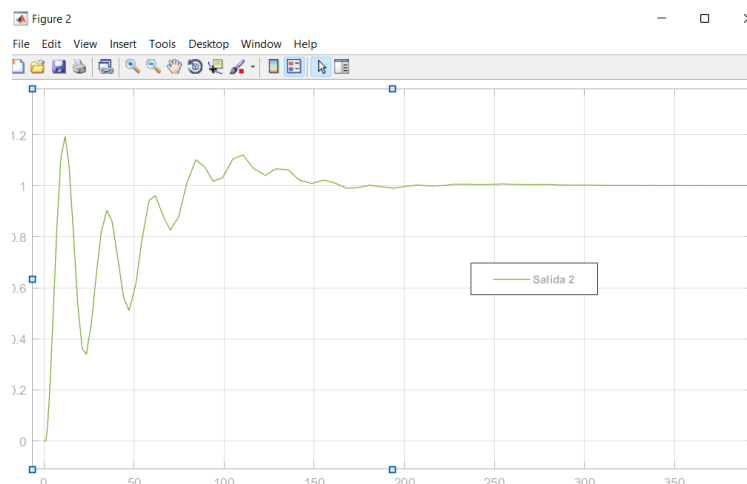
**Tabla 4.** Coeficiente de ajuste de los controladores

Controlador	kp	ki	kd
PID(entrada 1)	-0.1396	-0.0024	1.7138
PID(entrada 2)	0.0018	0.0019	0

Una vez determinados los parámetros del controlador para el lazo cerrado multivariable, se tienen las siguientes gráficas mostradas en las figuras 5 y 6 para determinar la estabilidad del sistema:



**Figura 5.** Respuesta de la salida 1



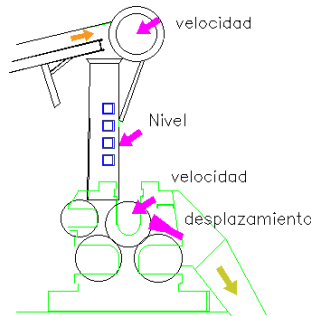
**Figura 6.** Respuesta de la salida 2

En la figura 5 y figura 6 se observa las respuestas del sistema frente a una función escalón con amplitud de 50 en la entrada 1 y una amplitud de 1 en la entrada 2.

Dando como resultado el punto de estabilización del sistema, y tomando en cuenta que los sensores para monitorear los datos de salida están disponibles en el molino, se debe configurar el PLC con los parámetros calculados en Matlab para que este controle de forma automática los valores de las entradas y de esa manera optimizar el sistema.

### 3.1. Selección de equipamiento

La selección de equipamiento de campo surge como respuesta a las variables identificadas dentro del proceso, las cuales son supervisadas por el sistema de control, para mejor comprensión realizaremos esta selección según las áreas seleccionadas en la figura 7.



**Figura 7.** Variable identificada dentro del proceso de extracción del primer molino

- **Selección del sensor de nivel de sólido (en el donelly)**

Como se detalló en el capítulo 1 existen dos formas de medir o controlar sólido como son: continua y de punto fijo existen cuatro sensores de punto fijo ubicados en el primer donelly de marca Fertron que permiten saber el nivel de fibra de caña dentro del mismo.

El sensor capacitivo STF 2500C es usado para la detección de diversos materiales sólidos o líquidos, en ambientes agresivos o en aplicaciones donde los sensores conductivos no sean indicados debido a la presencia de humedad, corrosión, etc.

- **Selección del convertidor de frecuencia**

Para seleccionar un variador de frecuencia se lo realiza tomando en cuenta la corriente nominal y la potencia del motor. En esta aplicación la corriente nominal es de 13.3 Am y la potencia es 7 Hp.

Después de revisar variador de frecuencia de las diferentes casas comerciales que se cse escogió el variador de frecuencia CFW MXCFW090024T3848SSZ de la marca WEG. Se escogió este equipo por su economía, compatibilidad con equipo de otras, gamas, fiabilidad, su facilidad de programación y calidad.

Cuyo variador, es un dispositivo electrónico que permite variar la velocidad, convirtiendo las magnitudes de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables, es un convertidor de frecuencia preparado para trabajar con motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla.

### **3.3. Descripción de los diagramas eléctricos de control**

A continuación, se describirá detalladamente los diagramas de flujo, fuerza y control de todos los elementos importantes que intervienen en el proceso del primer molino de extracción de jugo de caña.

#### **Diagrama de flujo de la extracción de Jugo de Caña del Primer molino**

**Tolva:** En el proceso de la tolva, están instalado 4 sensores capacitivos (213-LE), cuya finalidad es medir la cantidad de caña preparada dentro de la tolva en un rango de 0 al 24 mA convirtiéndose en porcentaje 0 a 100 por ciento, que indicaran los niveles bajo, medio, alto y máximo. La información de estos rangos va al convertidor de señal (213-LY) y posteriormente al controlador indicador de nivel (213-LIC). En este mismo proceso, está instalado un interruptor de nivel muy alto (213-LSHH), que se accionara, sí y solo sí el nivel de caña preparada de la tolva llega a este nivel umbral, si en caso que se llegue a este punto enviara una señal al Controlador Lógico Programable PLC (I) el cual activara una alerta pertinente.

Finalmente, el proceso termina con un enlace de información que va desde el controlador indicador de nivel (213-LIC) hacia el controlador de velocidad (212-SY) que, dependiendo de los niveles medidos



estará activado para que continúe el proceso o por el contrario hará que el proceso se detenga.

**Molinos:** Los datos de la Unidad "F - Extracción - (B1)" ingresan hacia el Controlador Lógico Programable con parámetros que servirán para este proceso, combinados con los datos de la unidad "G - Tratamiento - (A2)" que tiene una entrada en el controlador de velocidad (213-SC), donde una nueva señal saldrá e ingresará en el transmisor indicador de velocidad (213-SIT). la salida de este dispositivo va hacia el acople entre el motor y el reductor alta. Además, en este mismo punto está conectado transmisor indicador de temperatura (213-TT) y consecutivamente se conecta al Indicador de temperatura (213-TI) para la visualización de estos datos.

En el motor del molino 1, se encuentra instalado un sensor capacitivo de temperatura (213- TT), cuya señal ingresa en el PLC, luego de supervisar el rango programado activa o desactiva (213-TI) el motor ventilador. Entre el acople que une al motor con el reductor de alta se encuentra instalado un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI). Entre el acople de reductor de alta con el reductor de baja se encuentra instalado un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI). Entre el acople reductor de baja con la transmisión principal se encuentra instalado un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI). Entre el acople de la transmisión principal y eje de la masa cañera se encuentra instalado un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI).

En la entrada de la caña entre la masa cuarta y la masa cañera se encuentra instalado un sensor de posición (213-ZT) con el fin de medir la distancia de separación que existe entre las dos masas mencionadas anteriormente. Además, se halla instalado un sensor de posición (213-ZT) entre masa superior y la masa bagacera con el propósito de medir la distancia de separación a la salida de las mismas.

En el proceso de reducción de velocidad tanto de alta como de baja se encuentran instaladas una bomba de aceite con el fin de otorgar refrigeración al sistema mecánico, en dichas bombas se hallan instalados un sensor de humedad (213-M), un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI). Existe instalada una sola bomba de aceite tanto para el mecanismo de reducción de baja (A) y transmisión principal (B), la misma que se cuenta un sensor de humedad (213-M), un sensor de temperatura (213-TT) y transmisor indicador de temperatura (213-TI).

### 3.4. Diagrama de fuerza y control del variador del molino

La alimentación de tensión del diagrama de fuerza se realiza con 460 V 60 Hz, mientras el circuito de control se encuentra alimentado por una tensión de 220 V 60 Hz y 24 Vcc respectivamente.

Al motor se lo puede controlar por dos paneles o tableros de control. El primer panel de control (B) se encuentra en una caja o cajón al lado del motor. El otro tablero (A) de control se encuentra ubicado en la parte frontal del variador el mismo que se halla en un cuarto de variadores.

#### Contactores

El diagrama de mando presenta cinco contactores, **KA1M** (Contactor del termostato), **KA3M** (Contactor de la botonera de pulsador de emergencia S1), **KA5M** (Contactor de protección o sin error RL1), **KA1M** (Contactor de la manivela de sentido de giro horario / antihorario S7) y **KA4M** (Contactor del motor del molino)

#### Termostato

El poseer un sensor de temperatura como es el termostato en los elementos del variador, debido que se encuentra más expuesto a que se eleve su temperatura, es uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta cuando se ha echado andar el proceso en el variador.

Mediante las entradas y salidas que se posee en la regleta X10, el variador se puede enterar si ha existido



un aumento de temperatura no deseado y se debe parar el proceso.

**Luces Indicadoras**

En el panel Ay B, se encuentra lámparas indicadoras tanto de falla del variador (H2- H2.1) como de encendido del motor (H1- H1.1). Estas luces se encuentran en el diagrama de control y se alimentan a una tensión de 120 Vac y se activan cuando se active su respectiva salida.

Las lámparas de falla (H2- H2.1) están conectada una salida de relé (RL1 21) SIN ERROR, esta salida se activará cuando haya ocurrido una acción no deseada que dañara al variador, porque se ha considerado que es una acción que puede generar mayor peligro en el variador. Por lo cual, cuando ocurre una falla en el variador, se para el motor y la lámpara permanece activada mientras persista la falla.

Las lámparas de marcha o de encendido (H1- H1.1) están conectas en serie con el contacto NA de la bobina de Arranque y parada del motor KA4M (23-24). Las cuales tienen la función de indicar si el motor se encuentra girando o trabajando.

El diseño planteado en el presente proyecto es de modo adaptativo, es decir utilizaremos transmisores, sensores, y actuadores que ya se encuentran montadas en la planta para poder realizar los lazos de control requerido, así mismo solicitar la adquisición de algún instrumento en caso de ser necesario.

La mayoría de dispositivos instalados y funcionales en la planta se manejan mediante tecnología convencional HART (Highway Addressable Remote Transduce), de 4 a 20 mA, por lo que se requiere la compra inmediata de un equipo que lea y controle dichos transmisores y su tecnología.

Para poder determinar los módulos necesarios del equipo controlador a implementar, así como el software de interfaz para interactuar, es primordial identificar la totalidad de las variables tanto de lectura como de control para poder procesar, como se observa en la tabla 5.

**Tabla 5.** Variables de control.

MODULO	ENTRADAS	DESCRIPCIÓN
1769- IF16C/A	IN0	Entrada analógica control de nivel de chute 1
1769-IF16C/C	IN1	Entrada analógica control de nivel en el tanque de jugo crudo
1769-0F8C/D	Out 0.0+	Salida Analógica de control de velocidad angular del motor del molino.
1769-0F8C/D	Out 0.1+	Salida Analógica de control de velocidad angular del transportador dosificador de fibra de caña al chute 1

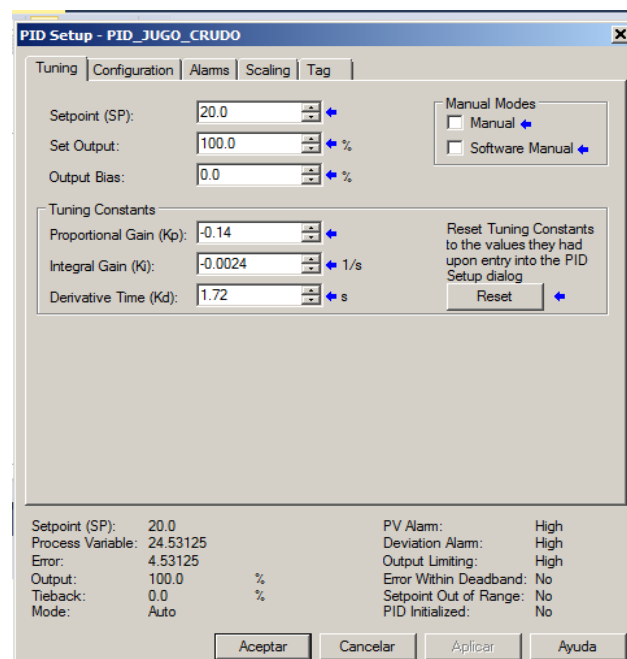
A continuación, se describe en la Tabla 6, los equipos necesarios para el diseño de control de nivel en el primer molino, luego de identificar las variables de control.

**Tabla 6.** Equipos a implementar en control de nivel de chute

ITEM	EQUIPO ALLEN BRADLEY	CANT.	CODIGO AB
1	PLC AB-1769L36ERM	1	1769-L36ERM
2	Fuente de voltaje A. BRADLEY	1	1769-PB4
3	Módulo de entrada 4 A 20 mA	1	1769-IF16C
4	Módulo de salida de 4 A 20 mA	1	1769-OF8C
5	Software STUDIO 5000 LOGIX DESIGNER	1	9324-RLD300ENE
6	El sensor capacitivo	4	STF 2500C
7	Sumador 4 A 20 mA	1	CD40

Para la programación del PLC se utiliza el Software estudio 500 versión que da una gran factibilidad de uso, además de visualización de estado, existen varios lenguajes de programación que podemos usar dependiendo de nuestra preferencia y conocimiento como son: AWL (lista de instrucciones), KOP (diagrama de contactos), FUP (El diagrama de funciones) y LADDER (diagrama de contactos). Para realizar el proyecto se realizó con el lenguaje de programación ladder, permitiendo desarrollar de forma fácil y cómoda el programa de control del proceso de extracción de jugo de caña en el primer molino.

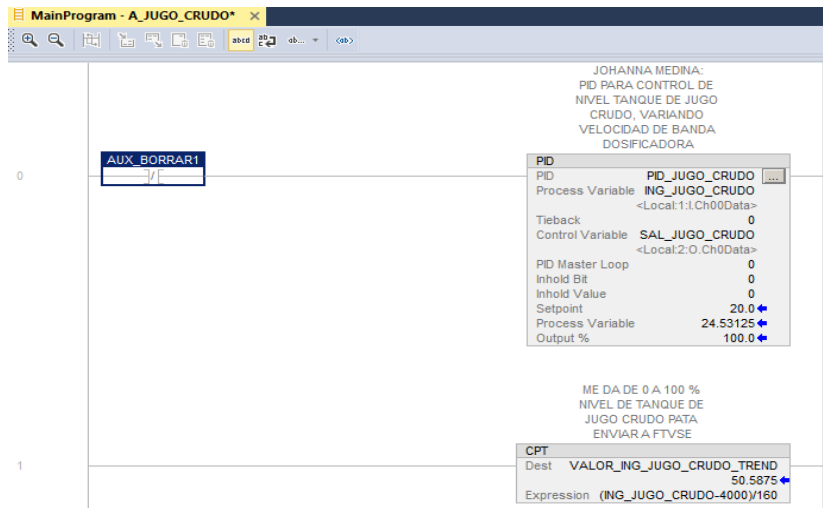
Se implementa el control Proporcional-Integral Derivativo (PID) con los parámetros determinados en la Figura 5 y 6, con el fin de estabilizar el sistema en el menor tiempo posible como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Parámetro del controlador del PID de jugo crudo

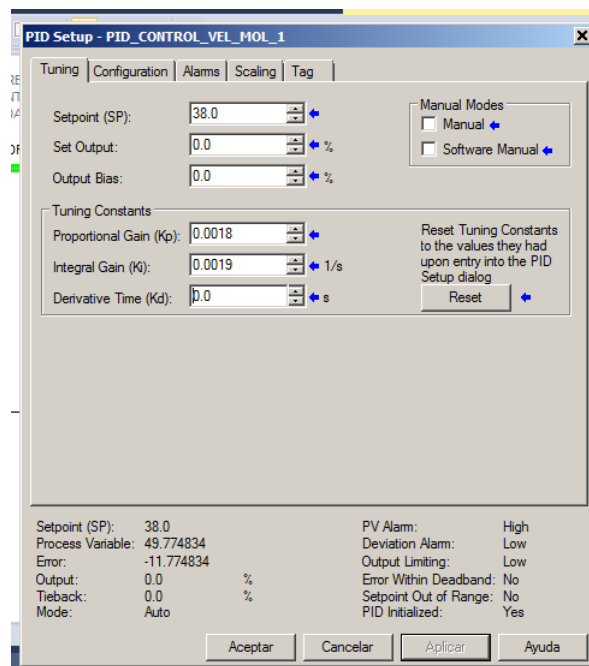
Se genera la rutina de control PID\_ JUGO\_ CRUDO de variable de proceso o la entrada ING\_JUGO\_CRUDO, que es la cantidad de jugo crudo extraído, la variable de control o salida (SAL\_JUGO\_CRUDO) es la velocidad angular del transportador dosificador de fibra de caña al chute 1. (Figura 9)

Luego de aplicar el control PID al controlador, se ha dejado que la maquina funcione en modo automático para evaluar si existe una mejora en el proceso, y se han obtenido los resultados mostrados a continuación.



**Figura 9.** Rutina generada PID\_ JUGO\_CRUDO

Se definen los parámetros del controlador Proporcional-Integral (PI), para el control de velocidad del molino 1, con el fin de estabilizar el sistema en el menor tiempo posible como se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Parámetro del controlador del PID control de Velocidad 1

Se establece la rutina PI\_ Control de Velocidad del motor del molino 1 de variable de proceso o entrada; (NIVEL\_CHUTE\_1) control de nivel de chute 1, la variable de control o salida velocidad angular del motor de molino 1 (SALIDA\_VARIADOR\_MOL\_1) mostrado en la figura 11.



Figura 11. Rutina generada PID\_ CONTROL\_VEL\_MOL\_1

### 3.5. Reducción de consumo energético

Luego de dejar en funcionamiento la máquina durante 24 horas, se evidencia una reducción del consumo energético de los motores en un 2.88% del total consumido, quedando los valores comparados en la siguiente tabla 7 para los casos con control PID y si él:

Tabla 7. Consumo antes y después del control PID

Hora	RPM motor SC	RPM motor PID	Consumo Motor SC [KWh]	Consumo Motor PID [KWh]	Pago SC [USD]	Pago PID [USD]
8:00	640	668	298,1429228	285,6459141	\$2,83	\$2,71
9:00	640	662	298,1429228	288,2348498	\$2,83	\$2,74
10:00	640	664	298,1429228	287,3666726	\$2,83	\$2,73
11:00	640	668	298,1429228	285,6459141	\$2,83	\$2,71
12:00	640	661	298,1429228	288,6709086	\$2,83	\$2,74
13:00	640	666	298,1429228	286,5037096	\$2,83	\$2,72
14:00	640	665	298,1429228	286,9345422	\$2,83	\$2,73
15:00	624	666	305,7876131	286,5037096	\$2,90	\$2,72
16:00	544	664	350,7563798	287,3666726	\$3,33	\$2,73
17:00	544	663	350,7563798	287,8001065	\$3,33	\$2,73
18:00	544	665	350,7563798	286,9345422	\$3,33	\$2,73
19:00	576	668	331,2699142	285,6459141	\$3,15	\$2,71
20:00	640	661	298,1429228	288,6709086	\$2,83	\$2,74
21:00	672	665	283,9456408	286,9345422	\$2,70	\$2,73
22:00	672	666	283,9456408	286,5037096	\$2,70	\$2,72
23:00	672	662	283,9456408	288,2348498	\$2,19	\$2,22
0:00	672	667	283,9456408	286,0741688	\$2,19	\$2,20
1:00	672	668	283,9456408	285,6459141	\$2,19	\$2,20



2:00	640	665	298,1429228	286,9345422	\$2,30	\$2,21
3:00	720	663	265,0159314	287,8001065	\$2,04	\$2,22
4:00	720	667	265,0159314	286,0741688	\$2,04	\$2,20
5:00	720	660	265,0159314	289,1082888	\$2,04	\$2,23
6:00	720	662	265,0159314	288,2348498	\$2,04	\$2,22
7:00	720	665	265,0159314	286,9345422	\$2,04	\$2,21
8:00	720	669	265,0159314	285,2189396	\$2,04	\$2,20
Total			7382,436764	7175,622987	\$65,20	\$63,00
Ahorro			2,88%		\$2,20	

Tomando en cuenta los datos de la tabla anterior, se tiene un 2.88% de ahorro al usar el control PID, esto implica una reducción del consumo energético, lo que implica un ahorro en el pago de la planilla eléctrica, lo cual se evidencia en los ahorros totales mostrados.

Tal como se puede ver en la tabla 8, se genera un ahorro anual de 802,66 dólares al año, lo que representa un 0,84% del valor total que se paga por concepto de energía eléctrica en el ingenio azucarero, tomando en cuenta que es una mejora que no requiere una inversión inicial, no existen costos que amortizar, en el caso de la implementación, esta investigación plasma el trabajo de implementación del control en el PLC por parte del personal técnico de la empresa, y al no recurrir a terceros para dicha implementación, no se han generado costos adicionales.

**Tabla 8.** Ahorros totales generados a la empresa

Ahorro diario	\$2,20
Ahorro mensual	\$65,97
Ahorro anual	\$802,66
Pago mensual Total	\$7.855,89
Porcentaje de ahorro a la planilla	0,84%

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante la investigación en distintas fuentes bibliográficas, se determinó que varios autores han estudiado el modelo matemático de un sistema de extracción de caña similar al nuestro, lo que ha servido como punto de partida para expandir la presente investigación.

En la presente investigación se ha propuesto un sistema de control en base a un control PID usando dos entradas para el control de dos salidas, tomando en cuenta su implementación en el controlador instalado en el molino con el objetivo de optimizar el proceso productivo.

El modelamiento de la función de transferencia del molino se tomó como base para desarrollar un control PID, el cual se puede implementar en el molino ya que el controlador de dicho molino permite su programación, dando como resultado resultados bastante alentadores en cuanto a la optimización del proceso. Según el análisis económico presentado, la implementación del control optimiza el consumo energético del molino en hasta 3% del consumo energético total, lo cual es un beneficio económico para la empresa ya que una reducción en el consumo energético implica un ahorro en los costos de energía eléctrica.

Los resultados de la investigación sobre el diseño de un sistema de control en la tolva de alimentación



del primer molino de extracción de jugo de caña para mejorar la calidad de producción son alentadores. El sistema de control propuesto, basado en un control PID con dos entradas y dos salidas, es factible de implementar y tiene el potencial de mejorar la calidad del jugo extraído y reducir el consumo energético del molino.

Para la continuidad de esta investigación se sugiere realizar una evaluación más exhaustiva del rendimiento del sistema de control, incluyendo la calidad del jugo extraído, el consumo energético del molino y otros factores relevantes y desarrollar un sistema de control más sofisticado que pueda ajustarse automáticamente a las condiciones cambiantes del proceso.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] E. M. Tubay Figueroa, "Prácticas de manufactura y calidad de los productos derivados de la caña de azúcar elaborados en el sitio San Carlos," Proyecto de investigación, Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM), Jipijapa, Ecuador, 2025.
- [2] "Z-Shell: máquina para descortezar caña de azúcar (optimización en la extracción del jugo de la caña de azúcar)," [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12495/8536>.
- [3] J. M. Medina Palta, "Diseño de un sistema de control en la tolva de alimentación del primer molino de extracción de jugo de caña para mejorar la calidad de producción," M.S. Proyecto de investigación, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 2022.
- [4] O. A. Tigreros, "Mejoramiento del proceso de elaboración de jugo de caña en un ingenio azucarero," [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/21066>.
- [5] H. M. Debernardi Aldana, "Comparación de dos sistemas de plantación de caña de azúcar, en el área de influencia del Grupo Azucarero San Pedro, S.A de C.V.," M.S. thesis, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Región Orizaba-Córdoba, Peñuela, Mpio. de Amatlán de los Reyes, Ver., México, Nov. 2020.
- [6] L. Escobar Bahos and C. A. Rodríguez Arrieta, "Diseño de un modelo de control estadístico para el proceso de fabricación de panela en los trapiches de San Marcos – Sucre," Tesis de grado, Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura, Corporación Universitaria del Caribe (CECAR), Sincelejo, Sucre, Colombia, 2025.
- [7] M. Valverde Chero, "Mejora continua y eficiencia de gestión del mantenimiento en la fábrica de azúcar de la Empresa Andahuasi S.A.A.," Tesis de grado, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería Industrial, Sistemas e Informática, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2024.
- [8] E. R. Orrala Yagual, "Análisis y diseño de un sistema automatizado para el proceso de evaporación en la elaboración de azúcar," Componente práctico, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Electrónica y Automatización, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, 2024.
- [9] M. Bazán de los Santos, A. Giralt Sánchez, M. Garbey Torres, y Y. Andrial Mora, "Diseño de un sistema de control automático para la alimentación de caña del tándem en el central 'Argeo Martínez'



/ Design of an automatic control system for the tandem cane feeding at the 'Argeo Martínez,'" Revista RIEMAT, vol. 6, no. 2, Art. 4, Jul.–Dec. 2021.

[10] S. I. Pomavilla Guaminga, "Optimización del proceso de obtención de miel de caña de azúcar," Proyecto de innovación, Magister en Agroindustria, Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador, 2020.

[11] M. Castro Serna, J. M. Perez Muñoz, y G. E. Rodríguez Fajardo, "Diseño de un sistema de automatización de un reactor anaeróbico de conversión de biomasa (RACB) para el control de variables de proceso," Proyecto de grado, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad EAN, Bogotá D.C., Colombia, 2024.

[12] J. S. Castillo Cabezas y D. A. Tenganán Palacios, "Desarrollo de un sistema de monitoreo y control de una destiladora de bioetanol," Tesis de grado, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia, 2024.

[13] O. G. Castro Torres, "Diseño de un controlador de coeficiente de sobresaturación en el proceso cristalización de azúcar utilizando control predictivo," Trabajo de titulación, Magíster en Automatización y Control Industrial, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador, 2021.

[14] S. E. Colmenares Gámez y A. Escobar Dias, "MATLAB for Data Science: A Qualitative Review of Applications in Data Analysis and Machine Learning" Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

[15] S. K. Sunori, "Mathematical model determination and control of juice extraction process of sugar mill," in Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), 2020.

[16] R. A. Cieza Muñoz y E. Díaz Ronceros, "Aplicación de un controlador Proporcional, Integral y Derivativo en el sistema de producción de la empresa Azucarera Andahuasi," Big Bang Faustiniiano, vol. 11, no. 2, 2023. doi: 10.51431/bbf.v11i02.768.