

## Aplicación de un controlador Proporcional, Integral y Derivativo en el sistema de producción de la empresa Azucarera Andahuasi

Application of a Proportional, Integral and Derivative Controller in the production system of the company Azucarera Andahuasi

Ernesto Díaz Ronceros<sup>1</sup>, Ronald Alex Cieza Muñoz

### RESUMEN

**Objetivos:** Mejorar la extracción de jugo en los molinos y disminuir la humedad y cantidad de sacarosa en el bagazo (pol) en el área de trapiche. **Métodos:** Tipo de investigación: aplicada - tecnológica. La población estuvo constituida por todos los Sistemas de control de nivel. La muestra fue Sistema de control de nivel basado en un controlador PID. Como instrumento para la recolección de datos se elaboró una ficha de registro de datos para molinos. **Resultados:** Se logró configurar parámetros del sistema de control de nivel de los molinos. Se disminuyó % pol de bagazo en 0.23 y la %humedad de bagazo en 0.4 puntos porcentuales. Se mejoró la combustión en la caldera y por consiguiente la producción de azúcar. **Conclusiones:** La configuración de parámetros del controlador proporcional, integral y derivativo mejora el sistema de control de nivel manteniendo un óptimo control de carga de caña desfibrada dentro de cada chute. Se logró optimizar el proceso de extracción de jugo de caña y por consiguiente disminuir el porcentaje de pol y humedad en el bagazo logrando mejorar la combustión de la caldera.

**Palabras clave:** Controlador PID, industria azucarera, bagazo.

### ABSTRACT

**Objectives:** To improve the extraction of juice in the mills and to decrease the humidity and bagasse pol in the area of trapiche. **Methods:** Type of research: applied - technological. The population consisted of all level control systems. The sample was Level Control System based on a PID controller. A data record sheet for mills was developed as a data collection tool. **Results:** Configuring parameters for the mill level control system was achieved. It decreased %pol of bagasse by 0.23 and %humidity of bagasse by 0.4 percentage points. Combustion in the boiler and hence sugar production were improved. **Conclusions:** The configuration of parameters of the PID controller improves the level control system while maintaining an optimal control of shredded rod load within each chute. It was possible to optimize the extraction process of cane juice and therefore to reduce the percentage of pol and humidity in the bagasse, thus improving the combustion of the boiler.

**Keywords:** PID controller, sugar industry, bagasse.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente la gran mayoría de procesos en las industrias se encuentran en una evolución tecnológica constante, dejando de lado los procesos manuales e implementando estrategias de control y automatización. Desde principios del siglo XX se empezaron a diseñar sistemas de control en los cuales los operarios presentes se encargaban de manipularlo e ingresar datos y variables para que los sistemas de control básicos empiecen a operar, conforme transcurren los años se han inventado nuevos equipos electrónicos y sensores que nos permite calibrar e ingresar datos de forma automática sin la necesidad de un personal calificado, finalmente todos estos sistemas independientes de cada proceso dentro de una planta industrial se pueden interconectar para finalmente ser monitoreados y controlados de un

solo ambiente a través de paneles e interfaces gráficas donde se representan todos los datos, indicadores y actuadores. En el Perú la automatización aún está en un proceso de desarrollo. El pequeño y mediano empresario aún piensa que automatizar es una técnica reservada para las grandes empresas. SMAR (2017).

Riaño (2011) menciona que un sensor capacitivo está especialmente diseñado para lograr detectar materiales aislantes tales como el plástico, el papel, la madera, entre otros, no obstante, también cuentan con la capacidad de detectar metales. Arista (2019) Un controlador PID es un mecanismo de control genérico sobre una realimentación de bucle cerrado, ampliamente usado en la industria para el control de sistemas. El PID es un sistema al que le entra un error ó desviación calculado a partir de la salida deseada ó set point (SP) menos la salida obtenida,

Recibido 22/04/2022 Aprobado 10/05/2022

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



<sup>1</sup>Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Huaura, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2841-7014>

medida ó de proceso (PV) y su valor de salida (OP) es utilizada como entrada en el sistema que queremos controlar. El controlador intenta minimizar el error ajustando la entrada del sistema. Esta es la razón por la cual los lazos PID fueron inventados. Para simplificar las labores de los operadores y ejercer un mejor control sobre las operaciones.

Perú es considerado un país productor y exportador de azúcar tanto para el mercado interno como externo, por lo tanto, a las empresas que se dedican a este rubro les es indispensable mejorar sus etapas de producción para que sean mas eficientes, ello conlleva a que automaticen la mayor parte de sus procesos. Según Garro (2005) Es importante reconocer lo esencial de la existencia de un sistema de control en el proceso de producción de azúcar debido a lo complejo que resulta la producción.

En la empresa Andahuasi actualmente los sistemas de control que se utilizan tanto para la preparación como el control de transporte de materia prima, ocasionan problemas en la línea de alimentación provocando discontinuidad y atoramientos en los chutes donelly de los molinos, se cuentan con 3 molinos para los procesos en mención, estos problemas derivan en no poder tener una molienda continua y una extracción de jugo de caña de azúcar no tan eficiente. Otro problema que se presenta en la planta y tiene relación con los molinos es la humedad y alto pol que presentan los bagazos en la salida del último molino, originando que la caldera distral se vea afectada en el proceso de generación de vapor, esto resulta muy importar porque permite abastecer toda la planta, principalmente al turbo generador de 4 MW.

Los mayores grupos sucroenergéticos ya están substituyendo su tecnología de molienda para un mejor control de la extracción y el SLV se encaja en este perfil innovador, con una medición de nivel precisa y robusta, sin dolor de cabeza. Authomathika (2019).

La justificación del presente trabajo se basa en la necesidad de mejorar la calidad de extracción y producción del jugo de caña de azúcar, a su vez reducir la humedad y el pol del bagazo para no afectar el proceso de generación de vapor en la caldera distral.

Por lo tanto, nuestra hipótesis será: Un sistema de automatización basado en un controlador PID mejorará la calidad de producción del jugo de caña de azúcar y el proceso de generación de vapor de la caldera distral.

Los objetivos serán: Mejorar la extracción de jugo en los molinos y disminuir la humedad y pol de bagazo en el área de trapiche.

## MATERIAL Y MÉTODOS

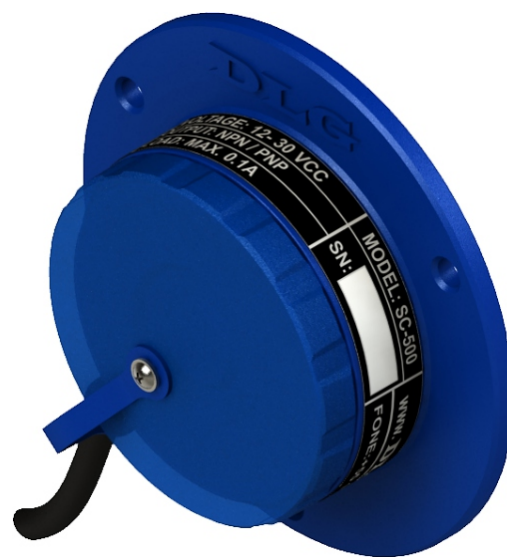
La investigación que se realizó es de nivel aplicativo ya que nos permite usar tecnologías ya conocidas sobre la electrónica para mejorar los procesos en la industria. Con respecto al enfoque de la investigación fue cuantitativo porque se realizaron mediciones de las señales de los sensores, conversores y controladores, así como también la cantidad de producción. La población estuvo

constituida por todos los Sistemas de control de nivel y la muestra fue Sistema de control de nivel basado en un controlador PID.

### Instrumentos para la recolección de datos

**SC-500:** Se uso el sensor capacitivo con ajuste de sensibilidad, desarrollado para detección de nivel de chute-donelly. Alta sensibilidad para instalación en acrílico no-perforado (externo).

Está diseñado para detectar materiales aislantes tales como el plástico, papel, madera, etc. Pero fue realmente desarrollado para la operación con caña de azúcar triturada, con el propósito de detección de nivel para chute donnelly. DLG Automacao (2014).



**Figura 1.** Sensor Capacitivo DLG Modelo SC-500

**XS-110:** Se aplicó el Conversor / Sumador de Señales Microprocesado XS-110, que cuenta con entradas digitales (configurable) y salida con señal estándar de 0 - 20, 4 - 20 mA o 0 - 10 Vdc proporcional a las entradas digitales activadas opto-aisladas.



**Figura 2.** Conversor Sumador de Señal para Sensores Capacitivos XS-100

**El ControlMaster CM10:** Se utilizó un controlador flexible, universal de proceso PID 1/8 DIN flexible. La información detallada sobre el proceso se representa con claridad en la pantalla TFT a todo color del CM10 y una interfaz de operador intuitiva simplifica la configuración y el funcionamiento. Tanto el hardware como el software presentan una gran capacidad de ampliación, gracias a la cual el CM10 puede adaptarse con facilidad a las necesidades de los requisitos de sus aplicaciones. ABB (2012).



**Figura 3.** ABB ControlMaster CM10

**Ficha de registro:** Se elaboró una ficha de registro de datos la cual será llenado una vez realizada la medición respectiva según el nivel que este en cada chute donelly.

**Tabla 1.**

*Ficha de registro de datos para molinos*

FICHA DE REGISTRO DE DATOS					
Molino	Sensor Capacitivo	Conversor	Controlador		
		Sumador	PV	SP	OP (Manual o automático)
#1	LED1	D/A			
	LED2				
	LED3				
	LED4				
	LED5				
	LED6				
#3	LED1	D/A			
	LED2				
	LED3				
	LED4				
	LED5				
	LED6				
#5	LED1	D/A			
	LED2				
	LED3				
	LED4				
	LED5				
	LED6				

#### **Técnicas para el procesamiento de la información**

Para el procesamiento de datos, se utilizará la estadística cuyos pasos son:

- **Recolección de datos:** A partir que cada sensor detecte el nivel dado se obtendrán los valores indicados del conversor de señales D/A y del controlador PID para el llenado respectivo de la ficha de registro de datos para organizar los datos obtenidos.

- **Corrección y tabulación de datos:** Luego de la aplicación de la observación, se procederá a la corrección y tabulación de los datos obtenidos con el apoyo del programa Microsoft Excel, con el propósito de agrupar toda la información, de acuerdo a la necesidad que impone el trabajo de investigación.
- **Elaboración de cuadros y gráficos estadísticos:** Se procede a graficarlos estadísticamente a través de cuadros y figuras estadísticas.

- Análisis e interpretación de datos: Realizar los respectivos análisis e interpretaciones, primero de las cifras acumuladas y ordenadas y en seguida desde el punto de vista de la investigación para validar y contrastar la hipótesis.

**Tabla 2.***Configuración de parámetros del controlador*

PARÁMETROS	1er Molino	3er Molino	5to Molino
<b>Ajuste del dispositivo</b>			
Plantilla de aplicación	Lazo simple	Lazo simple	Lazo simple
Tipo salida Laza 1	Entrada	Entrada	Entrada
Frecuencia de red	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Configurar acción	Continuar	Continuar	Continuar
<b>Entrada /Salida</b>			
<b>Entrada analógica 1</b>			
Tipos de entrada	Miliamperios	Miliamperios	Miliamperios
Elect. Baja	4 mA	4 mA	4 mA
Elect. Alta	20 mA	20 mA	20 mA
Linealizador	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Unidades ingeniería	%	%	%
Dispositivos téc.	X.X	X.X	X.X
Tec. Baja	0.0	0.0	0.0
Tec. Alta	100.0	100.0	100.0
Sensor abierto	Escala ascendente	Escala ascendente	Escala ascendente
<b>Salida analógica 1</b>			
Tipo de salida	Entrada	Entrada	Entrada
Fuente	Control OP Lazo1	Control OP Lazo1	Control OP Lazo1
Elec. Baja	4 mA	4 mA	4 mA
Elec. Alta	20 mA	20 mA	20 mA
Linealizador	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Autorango téc.	Activado	Activado	Activado
Téc. Bajo	0.0	0.0	0.0
Téc.Aalto	100.0	100.0	100.0
<b>Control</b>			
<b>Puntos consig lazo 1</b>			
Límite bajo	0.0%	0.0%	0.0%
Límite alto	100.0%	100.0%	100.0%
N° de SPs locales	1	1	1
Punto consig local 1	30.0%	33.3%	33.6%
Modo de seguimiento	Desactivado	Desactivado	Desactivado
Modo rampa	Desactivado	Desactivado	Desactivado
<b>Control Lazo 1</b>			
Tipo de control	PID	PID	PID
Acción de control	Directo	Directo	Directo
<b>Autoajuste</b>			
Modo	Desactivado	Desactivado	Desactivado
Primer paso	10%	10%	10%
Dinámica	Normal	Normal	Normal
<b>PID</b>			
Band proporcional 1	100.0%	100.0%	100.0%
Tiempo integral 1	10000s	60s	10000s
Tiempo Derivativo 1	0.0s	0.0s	0.0s
Reposición manual	50.0%	50.0%	50.0%

<b>Misceláneo</b>			
Monitor de lazo	Desactivado	Activado	Desactivado
<b>Salida Lazo 1</b>			
<b>Límites</b>			
Limitar acción	Auto + Manual	Solo auto	Solo auto
Límite bajo	20.0	0.0	30.0
Límite alto	100.0	100.0	100.0
<b>Acciones de fallo:</b>			
Recup. Alimentación	Modo final	Modo final	Modo final
Acción de fallo PV	Sin acción	Sin acción	Sin acción
Salida predefinida	0.0	0.0	0.0
<b>Alarma de proceso</b>			
<b>Alarma 1</b>			
Tipo	Proceso alto		Proceso alto
Nombre	ALTO NIVEL		ALTO NIVEL
Fuente	PV LAZO 1		PV LAZO 1
Disparo	85.9		85.0
Histéresis	0.0		0.0
Tiempo de histéresis	0		0
Activar pantalla	Activado		Activado

## CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

### *Configuración de parámetros del controlador CM10 del 1er Molino*

El lazo esta implementado para controlar la velocidad del primer molino de acuerdo a la carga que haya en el chute y por ende detener el 3er conductor de caña cuando el controlador detecte alto nivel ya sea en modo manual o automático para evitar atoros de caña desfibrada.

### *Configuración de parámetros del controlador CM10 del 3er Molino*

Este segundo lazo esta implementado para controlar la velocidad del tercer molino de acuerdo a la carga que haya en el chute para así lograr una buena extracción de jugo de caña desfibrada y obtener una adecuada distribución en todo el tándem a través de un variador en la cual va a regular la velocidad del motor eléctrico; según la corriente de salida proporcional (4-20 mA) enviada del controlador Cm10.

### *Configuración de parámetros del controlador CM10 del 3to Molino*

Este tercer lazo esta implementado para controlar la velocidad del quinto molino de acuerdo a la carga que haya en el chute para así lograr una buena extracción de jugo de caña desfibrada, además de disminuir la pol y humedad de bagazo para así beneficiar la combustión de la caldera, todo este control se logra a través del comando de velocidad remota del spider en la cual va a regular la velocidad del motor hidráulico Hagglunds; según la corriente de salida proporcional (4-20 mA) enviada del controlador Cm10.

## RESULTADOS

Se presenta los resultados obtenidos de las mediciones de los sensores, el conversor y el controlador PID.

### *Configuración de parámetros de un controlador PID para la mejora del sistema de control de nivel*

Sistema propuesto

- Usa la señal estándar de 4-20 ma.
- Cuenta con entradas y salidas analógicas
- Configuración salida RELÉ.
- Cuenta con 6 sensores capacitivos.
- Conversión digital/ analógica.
- Cuenta con alarma de proceso.
- Acceso a modo manual /automático

**Registro de datos del Sistema****Tabla 3.***Ficha de registro de datos del sistema*

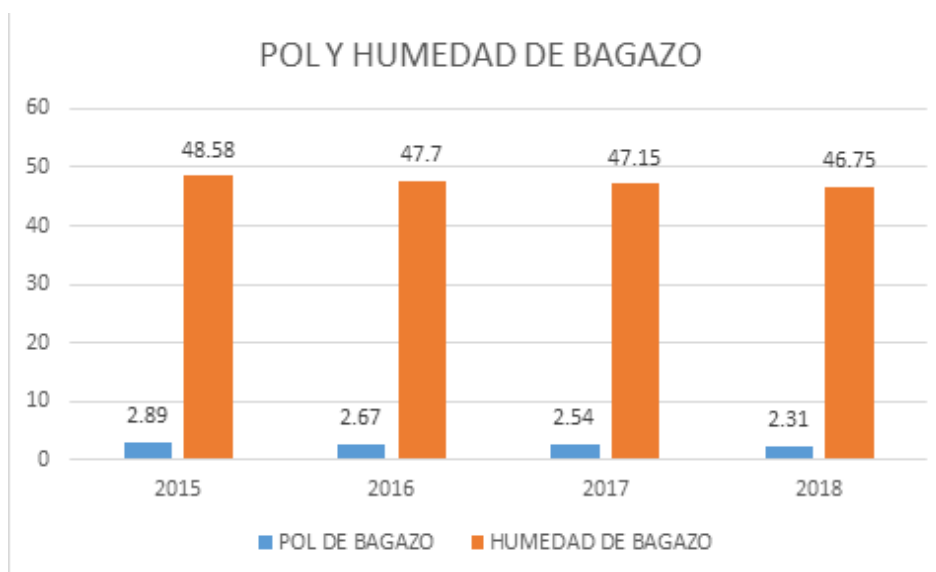
FICHA DE REGISTRO DE DATOS						
Molino	Sensor Capacitivo		Conversor Sumador D/A	Controlador		
				PV	SP	OP (Manual o automático)
#1	LED1	ENCENDIDO	7.335 mA (18.3%)	18.6	30.0	35.0% (Manual)
	LED2	ENCENDIDO	9.380 mA (33.5%)	33.9	30.0	35.0% (Manual)
	LED3	ENCENDIDO	12.019 mA (50.1%)	50.6	30.0	35.0% (Manual)
	LED4	ENCENDIDO	14.513 mA (66.0%)	66.6	30.0	35.0% (Manual)
	LED5	ENCENDIDO	16.445 mA (79.1%)	79.8	30.0	35.0% (Manual)
	LED6	ENCENDIDO	20.410 mA (102.1%)	102.9	30.0	35.0% (Manual)
#3	LED1	ENCENDIDO	7.175 mA (17.9%)	18.2	33.3	35.0% (Manual)
	LED2	ENCENDIDO	8.064 mA (28.8%)	30.2	33.3	35.0% (Manual)
	LED3	ENCENDIDO	12.715 mA (53.0%)	53.5	33.3	35.0% (Manual)
	LED4	ENCENDIDO	15.524 mA (70.6%)	71.2	33.3	35.0% (Manual)
	LED5	ENCENDIDO	18.005 mA (86.6%)	87.3	33.3	35.0% (Manual)
	LED6	ENCENDIDO	20.390 mA (102.0%)	102.8	33.3	35.0% (Manual)
#5	LED1	ENCENDIDO	6.654 mA (16.6%)	16.9	33.6	35.0% (Manual)
	LED2	ENCENDIDO	9.324 mA (33.3%)	33.7	33.6	35.0% (Manual)
	LED3	ENCENDIDO	11.996 mA (50.0%)	50.5	33.6	35.0% (Manual)
	LED4	ENCENDIDO	14.667 mA (66.7%)	67.3	33.6	35.0% (Manual)
	LED5	ENCENDIDO	17.340 mA (83.4%)	84.1	33.6	35.0% (Manual)
	LED6	ENCENDIDO	20.011 mA (100.1%)	100.9	33.6	35.0% (Manual)



## RESULTADOS

### Resultados del comportamiento de la pol y humedad de bagazo

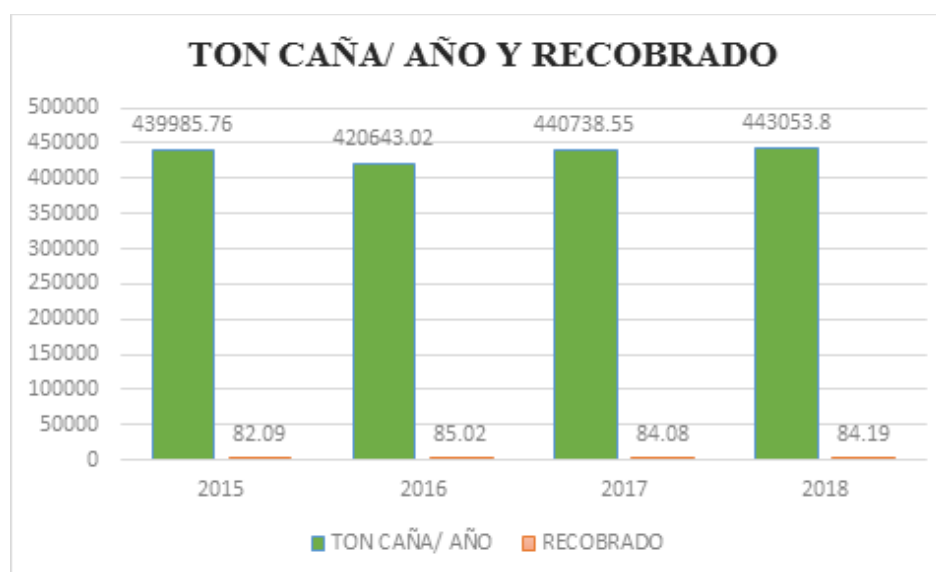
Para obtener los resultados se solicitó los datos a la jefatura de laboratorio de la azucarera Andahuasi



**Figura 4.** Cantidad de pol y humedad de bagazo

### Resultados del comportamiento de la producción de azúcar

Para obtener los resultados se solicitó los datos a la jefatura de laboratorio de la azucarera Andahuasi.



**Figura 5.** Producción de azúcar en toneladas

Datos obtenidos a partir de la figura 11 y 12:

- Ton caña (2018) = 443 053.8 ton/año
- %Pol bagazo/caña= (%Pol bagazo (2017)- %Pol bagazo (2018)) = 0.23
- Recobrado= 84.19
- %Pol de azúcar= 98.5

Aplicando la siguiente fórmula

$$TON\ AZUCAR = \frac{TON\ CAÑA}{100} \times \left[ \frac{\%Pol\ \frac{bagazo}{caña} \times Recobrado}{\%Pol\ azúcar} \right]$$

$$TON\ AZÚCAR = \frac{443\ 053,8}{100} \times \left[ \frac{0,23 \times 84,19}{98,5} \right]$$

$$TON\ AZÚCAR = 870,98\ ton\ azúcar$$

Convirtiendo ton azúcar a N° de bolsas de azúcar se obtiene el siguiente promedio::

$$870,98 \text{ ton azúcar} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ Kg}}$$

870,98 ton azúcar = 17 419,6 bolsas de azúcar/año

870,98 ton azúcar = 1 451,63 bolsas de azúcar/ mensual

870,98 ton azúcar = 48,38 bolsas de azúcar/diario

## DISCUSIÓN

En el molino #1: al poner en el controlador en modo manual OP= 35.0% (6.2 rpm) para comandar la velocidad del motor, este mantiene un adecuado nivel y por ende una buena extracción de jugo de caña y además al ponerlo en modo automático aumenta o disminuye la velocidad del motor en un intervalo de 4-10 rpm, según el nivel dado y en ambas configuraciones se activa la salida relé (ORI), cuando detecte el controlador el alto nivel por encima de los 85% de PV en el chute del molino, de manera que se detiene el 3° conductor de caña y por consiguiente el conductor 2° y 1°, para así ya no seguir alimentando a los molinos y de esta manera se evita los posibles atoros por parada de molienda.

En el molino #3: al estar en modo automático este va tratar de ajustar el nivel deseado a través del SP=33.3, conforme detecte cada sensor el nivel en el chute, el OP (salida de proceso); bien aumenta o disminuye la velocidad del motor en un intervalo de 4-10 rpm de acuerdo a la corriente estándar de 4-20 mA enviada desde el controlador va variando proporcionalmente hasta llegar al punto de consigna seteado en el controlador.

Solo se configura en modo manual cuando la fibra de caña esta alta, es decir por encima de los 16%, y cuando se haya cambiado de molino o masa superior.

En el molino #5: mayormente se trabaja en modo automático con un SP=33.6, es decir que de acuerdo al valor seteado este va a tratar de mantener un nivel a la altura del 2° sensor dentro del chute y de acuerdo al nivel donde se posiciona, el controlador enviará la corriente estándar de 4-20 mA y tomará la acción adecuada para variar la velocidad del motor hidráulico entre el intervalo de 3-8 rpm, esto según la configuración de limite bajo 30% (SALIDA DE LAZO 1) en la cual se puso en el controlador para asegurar una velocidad mínima cuando recién empieza la molienda donde muchas veces se envía buen colchón de fibra de caña y de esta manera no le gane la carga al molino, además cuenta con una salida de alarma de proceso, a partir del PV=85% para adelante detecta ALTO NIVEL. Pero este solo se muestra como visualización en la pantalla del controlador.

En la figura 4: se puede observar la disminución del %POL de bagazo en 0.23 y la %HUMEDAD de bagazo en 0.4 puntos porcentuales, esto en comparación del año 2017 con el año 2018 en la cual se realizó la mejora del sistema de control de nivel de cada chute.

En la figura 5: con los datos de ton caña/año 2018, el recobrado, en comparación con el año 2017 nos dio una

diferencia de % 0.23, de esta manera mejoró la combustión en la caldera y por consiguiente la producción ya que claramente se muestra que se recuperó % 0.23 Pol para entrar a proceso de azúcar, obteniéndose la cantidad de 17 419.6 bolsas de azúcar en el año 2018 aproximadamente.

Por otra parte, queda demostrado lo que menciona por Arista (2019) sobre la importancia de los controladores PID en la industria y lo que Garro (2005) propone sobre lo esencial de contar con un sistema de control de proceso de la producción de azúcar.

Podemos concluir que la configuración de parámetros del controlador PID mejora el sistema de control de nivel manteniendo un óptimo control de carga de caña desfibrada dentro de cada chute.

La instalación del sistema de control de nivel simplifica las labores de los operadores ya que ejerce un mejor control sobre las operaciones de manejo de nivel y extracción de jugo en cada molino.

Se logró optimizar el proceso de extracción de jugo de caña y por consiguiente disminuir el porcentaje de pol y humedad en el bagazo logrando mejorar la combustión de la caldera.

## AGRADECIMIENTO

A la Azucarera Andahuasi y a sus dignos representantes quienes, al conocer las metas de mi trabajo, me brindaron su compromiso y facilidades que la presente investigación requirió.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arista, V. (2019). *CONTROL PID, METODOLOGÍA Y APLICACIONES*. Recuperado de [https://www.academia.edu/7955070/CONTROL\\_PID-METODOLOG%C3%8DA\\_Y\\_APLICACIONES](https://www.academia.edu/7955070/CONTROL_PID-METODOLOG%C3%8DA_Y_APLICACIONES)
- Authomathika. (2019). *Medidor de Nivel de Chute Donelly inteligente*. Recuperado de <http://www.authomathika.com.br/es/articulos-tecnicos-detalle/slv-1a-medidor-de-nivel-de-chute-donelly-inteligente>
- Garro, M., Meza, J., Jenkins, C. (2005). *Aplicaciones de los Sistemas de Control en la Industria del Azúcar*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/323992009/Control-Automatico-en-La-Industria-Azucarera>
- Riaño, C. (2011). *Sensores y temporizadores*. Recuperado de <http://sensoresyttemporizadores.blogspot.pe/2011/03/un-sensor-o-captador-como-prefiera.html>
- SMAR. (2017). *Transmisor de Posición SMAR en la Molienda*. Recuperado de <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/transmisor-de-posicion-smar-en-la-molienda>