

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **RESINTONIZACIÓN DE LOS PIDS, SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO DE LAS BANDAS ALIMENTADORAS DE YESO, PUZOLANA Y CLINKER PARA EL MOLINO DE CEMENTO DE LA CIA. INDUSTRIAS GUAPÁN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**ARGOTI ARCOS ROBERTH MIGUEL  
LOJA ROMERO ABRAHAM ISMAEL**

**DIRECTOR: ING. ALFREDO MORA  
CODIRECTORA: ING. ANA RODAS MBA.**

**Quito, Mayo 2014**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Roberth Miguel Argoti Arcos, y Abraham Ismael Loja Romero declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Roberth Miguel Argoti  
Arcos

---

Abraham Ismael Loja  
Romero

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Roberth Miguel Argoti Arcos, y por Abraham Ismael Loja Romero, bajo mi supervisión.

---

Ing. Alfredo Mora Erazo  
DIRECTOR

---

Ing. Ana Rodas MBA.  
CODIRECTORA

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a Dios y a mis padres Katalina y Xavier, quienes me han apoyado y aconsejado toda mi vida y por tener la paciencia y la sabiduría de guiarme por el camino correcto.

A mis hermanos ya que por ustedes quiero seguir superándome y ser un buen ejemplo para ustedes.

A la familia Loja Romero por darme acogida en su casa, tratarme como a un hijo más y por aconsejarme en el transcurso de este proyecto.

Al Ing. Alfredo Mora y a la Ing. Ana Rodas, mi director y codirectora de tesis, por toda su paciencia, dedicación y sus correcciones ya que sin ellos esta tesis no hubiera sido posible.

Al Ing. Jaime Cadme, al Ing. Pedro Baculima, al Ing. Patricio Ruiz, al Ing. Miguel Guillan y al Ing. Jhon Sánchez por colaborar y facilitarme la información necesaria para la realización de este proyecto.

A la empresa Cia. Industrias Guapán a si como a sus empleados por permitirnos acceder a sus instalaciones y siempre colaborar en la realización de este proyecto.

Al Ing. Patricio Burbano por ser práctico, sincero y ayudarnos a elegir un camino correcto en este proyecto.

A mi gata hermosa, Vicky, quien sin condiciones nos apoyo y ayudo a dar formato a esta tesis y nos aconsejo en la sintaxis de la misma.

A mis amigos por apoyarme y ayudarme sin condiciones.

Miguel

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar mis estudios universitarios, marcando siempre la luz de mi camino y fortaleciendo mi vida cada día.

Le agradezco a mi Papi por ser mi ejemplo a seguir y ser mi apoyo incondicional, por preocuparse cada momento de mi vida sin tener ninguna duda de su hijo.

A mi Mami por preocuparse tanto de mi, ser mi apoyo y tener siempre la confianza de sus ojos puestos en mi, por estar siempre encaminando mi vida y a mis hermanos por darme las fuerzas para superar los obstáculos que se me presentaron.

A mi primo Miguel Guillén por ser un apoyo y colaborar en todo momento en la realización mi proyecto.

Al Ing. Alfredo Mora por su apoyo, su paciencia y guía en la realización de mi proyecto, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible culminarlo y a la Ing. Ana Rodas por su apoyo, su comprensión y su carisma para guiar el desarrollo, culminación de mis estudios y proyecto de tesis.

A Paolita por ser mi apoyo y consejera a lo largo de mi vida universitaria.

A mi pana Marcos que siempre estuvo apoyandome y confiando en mi desde niños.

Al Ing. Patricio Burbano, al Ing. Jaime Cadme, al Ing. Pedro Baculima, al Ing. Patricio Ruiz y al Ing. Jhon Sánchez por colaborar y facilitarme la información necesaria para la realización del proyecto.

A la familia Argoti Arcos y a Victoria por brindarme su ayuda, sus consejos y colaboración en la realización de mi proyecto.

A mis mejores amigos por siempre tener la confianza y el apoyo incondicional.

Abraham

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a mis padres y hermanos por siempre estar a mi lado y apoyarme en las buenas y en las malas, por comprenderme y por su inmensa paciencia.

A mi abuelito por ser una persona luchadora que nunca se rinde y que espero puedas ver a tu primer nieto graduado.

Esto es para ustedes, los amo.

Miguel

## **DEDICATORIA**

Dedico mi tesis a mis padres por ser la razón por la que sigo adelante cada día, y quiero ser una de las razones por las que se sientan orgullosos del hijo que criaron, con buenos ejemplos y enseñanzas. A mis hermanos porque quiero darles el ejemplo a seguir, para que cumplan también sus sueños en la vida y quiero que sepan que siempre van a contar con mi apoyo. A mi familia entera, en especial a mis abuelitos que siempre me demostraron todo el esfuerzo que se debe hacer para ser alguien en la vida.

Los amo mucho.

Abraham

## CONTENIDO

CONTENIDO.....		i
RESUMEN.....		iv
PRESENTACIÓN.....		v
<b>1</b>	<b>CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO: .....</b>	<b>1</b>
1.2	<b>MOLIENDA DE CEMENTO.....</b>	<b>5</b>
1.3	<b>SEPARADOR DE ALTA EFICIENCIA (O-SEPA) PARA CEMENTO .....</b>	<b>6</b>
1.4	<b>CALIDAD DEL CEMENTO.....</b>	<b>8</b>
1.5	<b>CONTROLADOR PID .....</b>	<b>12</b>
1.5.1	<b>TIPOS DE DISCRETIZACIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.5.2	<b>ESTABILIDAD DE LAS APROXIMACIONES .....</b>	<b>19</b>
1.6	<b>HERRAMIENTAS DE SOFTWARE.....</b>	<b>20</b>
1.6.1	<b>MATLAB.....</b>	<b>20</b>
1.6.1.1	<b>Toolbox IDENT .....</b>	<b>20</b>
1.6.1.2	<b>Toolbox SISOTOOL .....</b>	<b>23</b>
1.6.2	<b>LABVIEW .....</b>	<b>23</b>
1.7	<b>PROYECTO A DESARROLLAR.....</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO: DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES .....</b>	<b>25</b>
2.1	<b>RESINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....</b>	<b>25</b>
2.1.1	<b>MODELADO DE LAS PLANTAS DE LAS BÁSCULAS PESADORAS – ALIMENTADORAS .....</b>	<b>25</b>
2.1.1.1	<b>Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Clinker (G3). .....</b>	<b>26</b>
2.1.1.2	<b>Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Yeso (G11). .....</b>	<b>36</b>
2.1.1.3	<b>Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Puzolana (G7).....</b>	<b>46</b>
2.1.2	<b>REQUISITOS PARA LA DISCRETIZACIÓN DE PIDs .....</b>	<b>57</b>
2.1.3	<b>ESTUDIO DE LOS CONTROLADORES PID IMPLANTADOS EN LAS PLANTAS DE LAS BÁSCULAS DE: CLINKER, YESO Y PUZOLANA .</b>	<b>59</b>

2.1.3.1	Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Clinker (G3) .....	60
2.1.3.2	Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Yeso (G11) .....	62
2.1.3.3	Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Puzolana (G7).....	64
2.1.4	<b>RESINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES DE LAS BÁSCULAS PESADORAS-ALIMENTADORAS DE: CLINKER, YESO Y PUZOLANA</b> .....	<b>66</b>
2.1.4.1	Resintonización del controlador de la báscula pesadora-alimentadora de clinker .....	67
2.1.4.2	Resintonización del controlador de la báscula pesadora-alimentadora de Yeso.....	75
2.1.4.3	Resintonización del controlador de la báscula pesadora-alimentadora de Puzolana .....	81
2.2	<b>ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN BLAINE Y RETENIDO DEL CEMENTO</b> .....	<b>87</b>
2.2.1	<b>ANÁLISIS DE LOS DATOS DE SETEO, ALIMENTACIÓN, BLAINE Y RETENIDO</b> .....	<b>87</b>
2.2.2	<b>MODELO DE CURVAS ESTÁTICAS</b> .....	<b>96</b>
2.3	<b>MODELADO DE LA RECAPTACIÓN DE CEMENTO</b> .....	<b>110</b>
2.4	<b>CONTROL PID DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN Y RECAPTACIÓN DEL MOLINO DE CEMENTO</b> .....	<b>113</b>
3	<b>CAPÍTULO: SIMULACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES</b> .....	<b>118</b>
3.1	<b>SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID ANTIGUOS</b> .....	<b>118</b>
3.2	<b>SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID RESINTONIZADOS</b> .... .....	<b>122</b>
3.3	<b>SIMULACIÓN DE LAS PLANTAS DE RECAPTACIÓN DE POLVO DE CEMENTO</b> .....	<b>126</b>
4	<b>CAPÍTULO: DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA</b> .....	<b>130</b>
4.1	<b>SIMULADOR DE LA RESPUESTA DE BLAINE Y DE RETENIDO</b> .....	<b>130</b>

<b>4.2</b>	<b>CONTROL PID GLOBAL .....</b>	<b>135</b>
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO: PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>139</b>
<b>5.1</b>	<b>COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES PID ANTIGUOS Y LOS RESINTONIZADOS .....</b>	<b>139</b>
<b>5.2</b>	<b>PRUEBA DEL SIMULADOR DE BLAINE Y RETENIDO .....</b>	<b>143</b>
<b>5.3</b>	<b>PRUEBA DEL SIMULADOR TOTAL EN LAZO ABIERTO .....</b>	<b>145</b>
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>147</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>147</b>
<b>6.2</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>149</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>151</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>153</b>

#### **ANEXO A**

##### **DIAGRAMA DE MOLIENDA DE CEMENTO**

#### **ANEXO B**

##### **DIAGRAMA DEL SEPARADOR DE ALTA EFICIENCIA**

#### **ANEXO C**

##### **GUÍA DE USO DE LA HERRAMIENTA IDENT**

#### **ANEXO D**

##### **INSTRUCCIONES DE USO PARA LA HERRAMIENTA SISOTOOL**

#### **ANEXO E**

##### **DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DE LAS BANDAS PESADORAS ALIMENTADORAS EN LAZO ABIERTO**

#### **ANEXO F**

##### **DATOS DE SETEO, ALIMENTACIÓN, BLAINE Y RETENIDO**

#### **ANEXO G**

##### **DATOS DE LAS PRUEBAS DE LAS VARIABLES DE FINURA DEL CEMENTO Y DEL SISTEMA O-SEPA**

**ANEXO H**

**PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA DE FUNCIONES DE BLAINE Y RETENIDO**

**ANEXO I**

**DIAGRAMA DE FUNCIONES DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN LAZO ABIERTO**

**ANEXO J**

**PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA DE FUNCIONES DEL SISTEMA GLOBAL EN LAZO CERRADO**

## RESUMEN

El presente proyecto contempla la resintonización de los controladores de las tres bandas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana para el molino de cemento de la Compañía Industrias Guapán, el estudio de la finura del cemento (blaine y retenido) y de las variables que intervienen, el diseño de un controlador PID global para la alimentación constante de los componentes que ingresan al molino de cemento, y la construcción de un simulador realizado en LabVIEW para el entrenamiento de futuros panelistas.

La resintonización de los controladores de las bandas pesadoras alimentadoras se realizó mediante datos adquiridos con un tiempo de muestreo estable por medio del PLC S7 300/400, los cuales fueron procesados en el toolbox IDENT de MATLAB con el objetivo de obtener la función de transferencia de cada banda, luego mediante el SISOTOOL de MATLAB se realizó la sintonización de los controladores PID y se procedió a su implementación obteniendo los respectivos parámetros a ser ingresados en el HMI de la industria.

El estudio de la finura del cemento y de las variables que intervienen se realizó mediante el modelo de curvas estáticas, las mismas que se utilizaron para la realización del simulador, siendo necesario obtener muestras de cemento con tiempo de muestreo mucho menor al utilizado normalmente por la industria; los valores de blaine y retenido se obtuvieron a partir de pruebas de laboratorio de las muestras ya mencionadas.

Para la construcción del simulador fue necesaria la unión de todas las plantas obtenidas anteriormente, lo que hizo posible la sintonización del controlador PID global mediante la obtención de datos simulados por el mismo y sintonizado con la herramienta SISOTOOL de MATLAB.

Con la finalización de este proyecto se logra mejorar la dosificación de componentes al molino de cemento, así también se posee una herramienta de entrenamiento para nuevos panelistas como es el simulador.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto describe la resintonización de los controladores PID de las bandas alimentadoras de yeso, puzolana y clinker, simulación y modelamiento de un control PID global para alimentación del molino de cemento de CIA. Industrias Guapán. Se lo ha dividido en seis capítulos los cuales se describen a continuación.

El primer capítulo describe las áreas de producción que posee CIA Industrias Guapán para la fabricación de cemento; también se realiza una explicación más detallada en el área de molienda de cemento en donde se centra el proyecto. En este capítulo se realiza un análisis de los posibles modelos matemáticos y las herramientas de software a utilizarse.

En el capítulo dos se obtiene las funciones de transferencia de las bandas alimentadoras, se estudia los modelos matemáticos para la discretización de los controladores PID. Así también se realiza la resintonización de los controladores PID para lo cual previamente se hace un estudio de los controladores inicialmente implantados. En este capítulo se realiza la recopilación de datos destinados al estudio del comportamiento de las variables de finura y retorno de polvo de cemento. Finalmente se recopila todos los modelos matemáticos desarrollados para el diseño de un controlador PID global en lo que corresponde al sistema de molienda y recaptación de cemento.

En el capítulo tres se realiza la simulación de los modelos matemáticos y controladores por medio del software MATLAB con la herramienta específica SISOTOOL, donde es posible obtener los parámetros y características que presenta cada planta y controlador desarrollado.

En el capítulo cuatro se desarrolla la interfaz gráfica en el software LabVIEW, introduciendo dentro de sus diagramas de funciones los modelos matemáticos de los estudios de finura de cemento y las plantas del sistema de dosificación, alimentación y recaptación de polvo de cemento.

En el capítulo cinco se realiza la comparación de los parámetros y características resultantes de la resintonización con relación a los parámetros inicialmente implantados; así también se obtiene los errores relativos de las variables calculadas por el simulador con respecto a los valores teóricos de la planta global.

En el capítulo seis se realizan las respectivas conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

# 1 CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO

## 1.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO:

Industrias Guapán tiene ocho áreas productivas, las cuales son necesarias para el proceso de fabricación y van desde el área A, extracción y transporte de materia prima hasta el área H, donde el cemento terminado tiene su despacho. Estas áreas son:

- **Área A: Explotación y Transporte**

Para la producción de cemento Portland es necesario contar con materia prima como: caliza, arcilla, yeso y puzolana.

Industria Guapán realiza la explotación en su cantera ubicada en Morona Santiago – Méndez, y además compra materia prima de canteras ubicadas en Guayaquil y Azuay.

El transporte de materiales principalmente de Caliza, Puzolana y Yeso, se lo realiza a través de camiones con una capacidad promedio de 40 toneladas; los mismos que son almacenados en bodegas dentro de la planta para su posterior utilización.

- **Área B: Trituración**

Las rocas de caliza son depositadas en el contenedor de la trituradora de martillos rotatorios, donde son reducidas de tamaño (1200mm × 900mm × 700mm máximo) en un 97% hasta llegar a un promedio de 25mm de diámetro, con una capacidad de 500 toneladas métricas por hora (t/h); para luego ser transportadas al domo de almacenaje mediante una banda transportadora.

- **Área C: Almacenaje y manejo de Materia Prima**

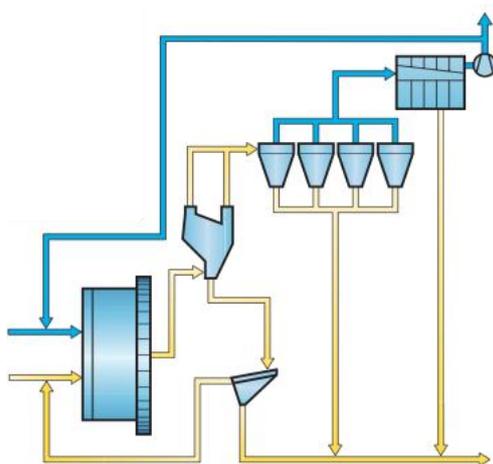
El material triturado es apilado en un domo con una capacidad máxima de 40.000 t; y es distribuido en tres pilas, las mismas que pasan por un sistema de prehomogenización; esta mezcla es analizada en el laboratorio para garantizar la calidad y proporción de sus componentes.

- **Área D: Molienda de Crudo**

La materia prima es pesada, dosificada, secada y molida, para luego pasar a la etapa de homogenización; en la cual se almacena en sendos silos la harina cruda obtenida para fabricar el Clinker de cemento.

El sistema de pesaje y dosificación se lo realiza mediante alimentadoras pesadoras cuyo funcionamiento se basa en elementos de deformación constituidos por celdas de cargas (conjunto de galgas extensiométricas) y sensores de velocidad (tacómetros).

El proceso de molienda de crudo se realiza en un molino de bolas de doble alimentación Aerofall, con diseño de cámara de secado mediante gases provenientes del precalentador de suspensión (dispositivo de intercambio de calor), así también posee dos cámaras de molienda donde el diámetro del material ingresado es reducido en un 80% de tamaño.



Molino Aerofall: posee dentro del cilindro listones levantadores y anillos de conducción llamados deflectores, los mismos que elevan el material por efecto de la rotación del cilindro. Los deflectores dirigen el material hacia el centro del cilindro para una mejor trituración; a continuación posee ciclones que separan el material fino del grueso.

**Figura 1** – Esquema de flujo de una instalación de molienda con molino AEROFALL

**Fuente:** (9)

- **Área E: Homogenización**

Consta de cuatro silos, dos de homogenización y dos de almacenamiento. En los silos de homogenización se prepara la harina cruda de acuerdo a los parámetros de calidad para fabricar el clinker de cemento. Los silos de almacenaje contienen la harina cruda preparada para alimentar al horno a

través del precalentador. La alimentación se realiza a través de una banda pesadora y dosificadora.

- **Área F: Clinkerización**

Esta área está constituida por cuatro sistemas:

1. Precalentador de cuatro etapas
2. Horno
3. Enfriadora
4. Enfriamiento de gases

La harina cruda proveniente del área de homogenización ingresa por la parte superior del precalentador, y a medida que desciende hacia el horno incrementa su temperatura entre 800°C - 900°C. En el horno se realiza varias reacciones químicas para obtener el clinker de cemento; el punto más alto de temperatura está entre 1450°C - 1500°C.

El clinker incandescente cae al enfriador en donde es inyectado aire frío proveniente de ventiladores, el mismo que posteriormente será conducido hacia el interior del horno como aire secundario de combustión; el aire residual no utilizado es retirado hacia el enfriador de gases para ser filtrado y expulsado a la atmósfera; luego el clinker frío es transportado por medio de cadenas hacia el área de almacenamiento.



**Figura 2** – Horno de cemento

**Fuente:** Cementos Industrias Guapán Cia. Ltda.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

- **Área G: Molienda de Cemento**

Dentro del área G se distingue tres sistemas: el de secado de puzolana, la premolienda y la molienda.

El secado de puzolana se realiza mediante un quemador donde se espera obtener un 4% de humedad relativa; luego va a la premolienda, la cual consiste en dosificar y mezclar: clinker, puzolana seca, caliza y yeso; esta mezcla es conducida a un triturador de impacto; lo obtenido va a través de dos cribas vibratorias donde luego se realimenta el material grueso al triturador de impacto.

En la molienda de Cemento el material premolido pasa al molino de bolas que consta de dos cámaras, en donde se reduce el tamaño de la mezcla entre 3800 – 4000 de Blaine o superficie específica; de forma que cumple aproximadamente 4% a 6% de retención en un tamiz de 45um. A la salida del molino se encuentra un separador de alta eficiencia, el cual realimenta el polvo grueso de cemento al mismo, mientras que el polvo fino es transportado por medio de una bomba a los silos de almacenamiento para despacho a granel, y también a través de una banda tubular hacia dos silos donde irá destinado para despacho en sacos; donde periódicamente se toman muestras para control de calidad en el laboratorio.

- **Área H: Almacenaje de cemento y despacho**

El cemento es almacenado en dos silos de capacidad de 3.000 toneladas cada uno, y ofrece dos opciones de entrega de producto; ya sea ensacado o a granel.

La sección de empacado posee dos ensacadores rotatorios que funcionan simultáneamente con la capacidad de enfundar alrededor de 4.200 sacos de cemento por hora, los sacos son llevados y etiquetados a través de bandas transportadoras hacia los camiones de despacho.

El despacho a granel posee una capacidad de 150 toneladas por hora, y es llevado desde los silos hasta los camiones por un transportador aerodeslizador, el cual es un equipo destinado a la transportación de cemento mediante flujo de aire.

## 1.2 MOLIENDA DE CEMENTO

El proyecto a desarrollar va destinado a optimizar la alimentación de clinker, puzolana y yeso al molino de cemento, por lo que se ampliará la descripción del proceso de molienda del área G.

Actualmente se cuenta con tres tolvas de alimentación y almacenamiento de clinker, yeso y puzolana, con capacidades de 900 [T], 300 [T], 300 [T] respectivamente. La proporción de estos componentes son determinados por resultados de calidad de Laboratorio, que generalmente están en el orden de entre el 70%-77,5% para Clinker; entre el 20%-26% para Puzolana; y entre 2,5%-4% para Yeso; los cuales son regulados por básculas pesadoras y dosificadoras. En el ANEXO A se encuentra el diagrama de la dosificación y alimentación al molino de cemento (área G); su nomenclatura se muestra a continuación:

**Tabla 1-** Códigos y referencias de maquinaria utilizada en el área G

CÓDIGO	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
<b>G208</b>	SL-1	Silo de Puzolana seca al 4%
<b>G209</b>	BD-2	Banda dosificadora de Puzolana
	TLE-2	Tolva de Clinker
	DPE-1	Dosificador de placas de Clinker
	TLE-3	Tolva de Yeso
	TLE-4	Tolva de Caliza
	DPE-2	Dosificadora de Placas de Yeso y Caliza
	BTE-1	Banda Transportadora del Mix
<b>G240</b>	EC-2	Elevador de Cadena 2
<b>G246</b>	SL-2	Silo de almacenamiento del Mix
	BT-4	Banda alimentadora (válvula rotatoria) de alimentación al Molino de Cemento
	P1G020	Molino de Cemento 3000HP

Autoría propia

El material pasa a la banda transportadora de la mezcla (mezcla de puzolana seca, clinker, yeso), para ser llevado al elevador de cadena que depositará el mismo en el proceso de premolienda compuesto por cribas vibratorias y el triturador de impacto.

La mezcla resultante de la premolienda es depositada en el silo de almacenamiento SL-2. Para la alimentación al molino de cemento se dispone de la banda alimentadora BT-4, la cual cuenta con un controlador PID que será diseñado para el control global de nuestro proyecto de maximización de carga al molino.

### **1.3 SEPARADOR DE ALTA EFICIENCIA (O-SEPA) PARA CEMENTO**

El proceso de molienda cuenta con realimentación por medio de un separador de polvo de alta eficiencia; por lo que una vez molido el cemento es llevado al elevador de cangilones de 75hp que tiene una capacidad promedio de 365 t/h, para ser depositado en un separador de alta eficiencia de 112kw. Su funcionamiento está basado en un disco de distribución situado sobre el rotor cilíndrico, con la necesidad de tres fuentes de aire para la correcta separación de polvo fino del grueso; dichas entradas son la primaria que consiste en el aire proveniente del molino y las otras dos entradas secundarias son de aire ambiente y aire realimentado, de 9800 m<sup>3</sup>/h a 18°C y de 65500 m<sup>3</sup>/h a 93°C respectivamente. El aire realimentado proviene de la salida a la chimenea de gases calientes lo que provoca un ahorro de energía.

La primera entrada del O-SEPA ingresa a una zona de dispersión y separación tangencialmente por las paletas verticales del mismo, luego van al rotor deslizando consigo los polvos finos hacia los ciclones y el filtro, en cambio las entradas secundarias ingresan al proceso de separación con el fin de limpiar nuevamente los polvos finos de los gruesos, los mismos que son controlados por la velocidad del rotor y ajustes de los flujos de aire.

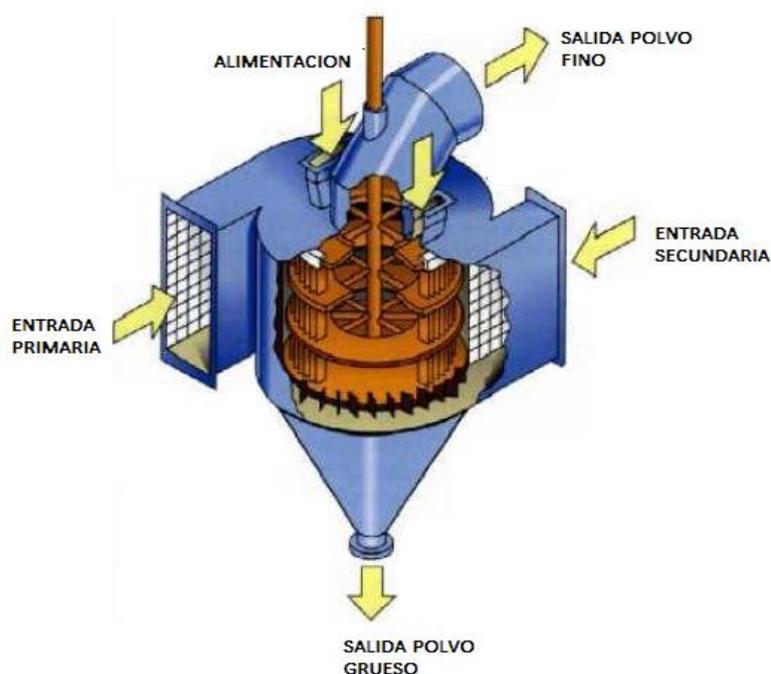
El O-SEPA se utiliza para el ahorro de energía y el mejoramiento de la calidad, debido a que aparta las partículas finas de las gruesas garantizando la calidad del producto; además se realiza una molienda en circuito cerrado, la cual tiene un control manual en la sección de aspiración de cantidad de polvo fino a través de la velocidad de los motores del ventilador G39 y ventilador G35.

Mediante un aero-deslizador (Airslide) el polvo fino de cemento es transportado hacia el área H para su correcto empaquetamiento y despacho; en cambio el polvo grueso es realimentado a la banda BT-4 para entrar con la mezcla nuevamente al molino de cemento (diagrama estructural ANEXO B).

**Tabla 2-** Referencias de maquinaria utilizada en el área G

CÓDIGO	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
	P1G038	Filtro de mangas de producto terminado
	P1G035	Separador de alta eficiencia
	P1G024	Filtro de mangas del sistema
	P1G020	Molino de bolas
	P1G036	Airslide de descarga
	P1G033	Trampa de bolas y aerodeslizador

Autoría propia



**Figura 3** – Separador de alta eficiencia O-SEPA

**Fuente: (1)**

## 1.4 CALIDAD DEL CEMENTO

Para garantizar la calidad del cemento producido, Industrias Guapán se rige bajo la Norma NTE INEN 490:2010 Quinta revisión, en la cual constan requisitos tanto químicos como físicos que deben de cumplir y éstos se describen a continuación:

**Tabla 3-** Requisitos Químicos

Propiedad	Unidad	INEN 490	Resultado
SiO <sub>2</sub>	%	N/A	31.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	N/A	6.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	N/A	2.37
CaO	%	N/A	53.89
MgO	%	6.0 máx.	1.31
SO <sub>3</sub>	%	4.0 máx.	1.96
Pérdida por calcinación	%	5.0 máx.	1.62
Residuo Insoluble	%	N/A	-

(2)

**Tabla 4-** Requisitos Físicos

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>INEN 490</b>	<b>Resultado</b>
Finura (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	N/A	3983
Retenido en 45 um (No. 325 )	%	N/A	2.94
Expansión en Autoclave	%	0.8 máx.	0.00017
Contracción en Autoclave	%	0.2 máx.	-
Fraguado Inicial	minutos	45 – 420	194.3
Fraguado Final	minutos	N/A	-
Contenido de aire en Mortero	%	12 máx.	3.72
Contenido Neto en la Funda	Kg	49.5 – 50.5	50.03

(2)

**Tabla 5-** Resistencia a la Compresión

1 Día	MPa	N/A	-
3 Días	MPa	13.0 mín.	18.82
7 Días	MPa	20.0 mín.	24.13
28 Días	MPa	25.0 mín.	36.26

(2)

**Tabla 6-** Puzolana: Requisitos Físicos

<b>Retenido en 45 um (No. 325 )</b>	<b>%</b>	<b>20 máx.</b>	<b>16</b>
<b>Índice de actividad puzolánica</b>	<b>%</b>	<b>75 mín.</b>	<b>87.6</b>

(2)

**Tabla 7-** Requisitos Opcionales

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>INEN 490</b>	<b>Resultado</b>
Expansión Barra de Mortero (14 Días)	%	0.02	N/D
Expansión Barra de Mortero (8 Semanas)	%	0.06	N/D
Resistencia a sulfatos. Expansión a 180 Días	%	0.10 máx.	N/D

(2)

Para garantizar el cumplimiento de estos requisitos la industria cuenta con un laboratorio equipado, lo que además garantiza la calidad del cemento, puesto que se le realizan toda clase de pruebas, desde ensayos en el polvo de cemento hasta ensayos en la pasta y el mortero.

Los principales ensayos que se realizan en el polvo de cemento son:

- **Prueba de Blaine (Superficie Específica)**

Se basa en un método de permeabilidad al aire, donde mediante el paso de una cantidad definida de aire por una muestra preparada en forma de disco, se puede obtener la superficie específica. La distribución de tamaños de las partículas define la cantidad de aire que pasa.

- **Determinación de la Densidad**

Consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier.

- **Finura por Tamizado (Retenido)**

Una muestra de cemento es sometida a un tamizado normalizado mediante lavado a presión constante, sobre un tamiz calibrado de 45  $\mu\text{m}$ . La finura del cemento se expresa en porcentaje del material que pasa el tamiz calibrado de 45  $\mu\text{m}$ .

- **Análisis Químico**

Aquí se realizan varios ensayos químicos los cuales nos permiten conocer la composición química del cemento producido.

Los principales ensayos que se realizan en la pasta son:

- **Tiempo de Fraguado**

Se realizan penetraciones periódicas en la pasta utilizando la aguja de Vicat de 1 mm de diámetro. El tiempo de fraguado inicial Vicat, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la penetración medida o calculada es de 25 mm. El tiempo de fraguado final Vicat, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la aguja no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta.

- **Calor de Hidratación**

El calor de hidratación del cemento hidráulico, es determinado calorimétricamente basándose en la diferencia en el calor de disolución entre el cemento no hidratado y el cemento hidratado en un período determinado de tiempo.

- **Expansión en Autoclave**

Para determinar la expansión del cemento hidráulico se debe fabricar una barra de longitud normalizada, dosificada y curada mediante un procedimiento normalizado por lo menos 20 horas. A una edad de 24 horas, se mide su longitud.

En el mortero los principales ensayos se realizan especialmente para determinar la variación de longitud de los mismos expuestos a diferentes condiciones y sustancias, uno de éstos es:

- **Resistencia a la compresión**

El mortero utilizado consiste de una parte de cemento y 2,75 partes de arena, dosificados en masa. Los cementos portland o cementos portland

con incorporado de aire son mezclados con relaciones agua cemento especificadas. El contenido de agua para otros cementos es el necesario para obtener una fluidez de  $110 \pm 5$  en 25 caídas de la mesa de fluidez. Los cubos de ensayo de 50 mm son compactados por apisonado en dos capas. Los cubos son curados un día en sus moldes y luego desencofrados y sumergidos en agua saturada con cal hasta ser ensayados, mediante la aplicación de una carga progresiva de compresión, para determinar su resistencia máxima admisible.

Como podemos darnos cuenta para tener un cemento de calidad se deben realizar ensayos de todo tipo y no sólo al producto terminado sino también a sus componentes es decir que se realizan también ensayos al clinker, yeso y puzolana. En el laboratorio se realizan ensayos cada hora, lo que permite hacer las debidas correcciones en las dosificaciones de los diferentes elementos si es que el producto final está bajando su calidad.

Para la dosificación de los componentes, la industria posee controladores PID implantados en las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana. A continuación se explica las características y tipos de dichos controladores.

## **1.5 CONTROLADOR PID**

Los controladores PID son muy utilizados en la industria debido a su factible implementación, así también ofrecen robustez frente al ruido proveniente de ambientes propiamente industriales.

El controlador PID es un tipo de controlador que incluye tres acciones: de control proporcional, Integral y derivativo; dependiendo de las acciones que se combinen podemos obtener 4 tipos: el de acción de control proporcional, el de acción de control proporcional Derivativo, el de acción de control proporcional Integral, y el de acción de control proporcional, derivativo e integral; las mismas que se explican a continuación:

- **Acción de Control Proporcional**

Este tipo de controlador nos da una salida proporcional al error; generalmente se denomina  $K_p$  a la constante o ganancia del controlador. Es la base de los controladores PID ya que no puede existir parte derivativa o integral sin la parte proporcional al error. Su función de transferencia está dada por:

$$P(s) = K_p \quad (1-1)$$

- **Acción de Control Proporcional Derivativo**

Tiene la capacidad de prever el incremento o decremento del error por lo que produce una acción de control más rápida, siendo útil en los periodos transitorios. A pesar de esto presenta desventajas como son la amplificación del ruido lo cual puede producir saturación en el actuador. Su función de transferencia está dada por:

$$PD(s) = K_p + sK_p T_D \quad (1-2)$$

Siendo  $K_p$  la acción proporcional y  $T_D$  una constante de tiempo derivativo.

- **Acción de Control Proporcional Integral**

La parte integral básicamente nos ofrece una salida del controlador proporcional al error acumulado, es decir que un error positivo nos dará una acción de control creciente mientras que un error negativo nos dará una acción de control decreciente; teniendo la desventaja de que su acción de control es muy lenta. Su función de transferencia está dada por:

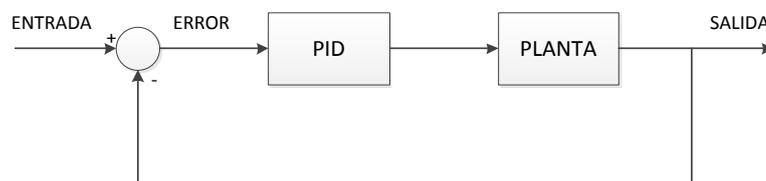
$$PI(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (1-3)$$

Siendo  $K_p$  la acción proporcional y  $T_I$  una constante de tiempo de ajuste de la acción integral.

- **Acción de Control Proporcional Integral Derivativo**

Esta acción de control reúne las tres propiedades en conjunto antes mencionadas; utilizándolo generalmente cuando el sistema a controlar posee además de error de posición, una respuesta oscilatoria. Su función de transferencia está dada por:

$$PID(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + s T_D \right) \quad (1-4)$$



**Figura 4** – Diagrama de bloques de un control PID  
Elaborado por: Argoti-Loja

Las constantes que se utilizan para desarrollar la ecuación del PID son:

$$K_D = K_p T_D \quad (1-5)$$

$$K_I = \frac{K_p}{T_I} \quad (1-6)$$

Donde  $K_D$  es la constante proporcional de la derivada del controlador y  $K_I$  es la constante proporcional de la Integral del controlador. Y la ecuación del controlador PID está expresada de la siguiente forma:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1-7)$$

Las funciones de transferencia de los controladores PID se encuentran en el dominio de "s", es decir, en tiempo continuo. Debido a que el control que se realiza dentro del PLC es digital, es necesario tener los modelos matemáticos en dominio de "z". A continuación se explica los tipos de discretización que se utiliza.

### 1.5.1 TIPOS DE DISCRETIZACIÓN

Los sistemas digitales que hoy en día se utilizan para el control automático están completamente ligados a procesar datos digitales o muestreados; lo que implica la necesidad de trasladar ecuaciones en tiempo continuo a ecuaciones en tiempo discreto. Utilizando la regla de diferencia hacia atrás se puede aproximar la derivada de una función con respecto al tiempo,  $f(t)$  definida en  $t=kT$ :

$$\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=kT} = \frac{1}{T} (f(kT) - f[(k-1)T]) \quad (1-8)$$

Aplicando la transformada  $z$  a los dos lados de la ecuación (1-8) se obtiene:

$$Z \left( \left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=kT} \right) = \frac{1}{T} (1 - z^{-1})F(z) = \frac{z-1}{Tz} F(z) \quad (1-9)$$

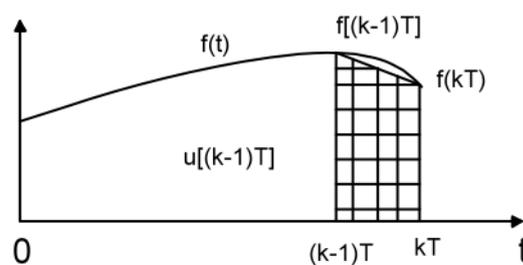
De la ecuación (1-9) la función del diferenciador del controlador en  $z$  es:

$$D(z) = K_D \frac{z-1}{Tz} \quad (1-10)$$

Además existen métodos de aproximación numérica del área de una función para el controlador integral digital como es el de

- **Integración bilineal (trapezoidal o Tustin):**

Ésta se basa en la aproximación del área bajo una curva mediante series de trapecoides como se muestra en la figura.



**Figura 5** –Integración trapezoidal

**Fuente:** (3)

Donde  $u(kT)$  es la integral de  $f(t)$  con  $t = kT$ ; entonces se tiene:

$$u(kT) = u[(k-1)T] + \frac{T}{2} \{f(kT) + f[(k-1)T]\} \quad (1-11)$$

Aplicamos la transformada  $z$  a la ecuación desarrollada (1-11):

$$\begin{aligned} Z(u(kT) - u[(k-1)T]) &= Z\left(\frac{T}{2}\{f(kT) + f[(k-1)T]\}\right) \\ U(z) - z^{-1}U(z) &= \frac{T}{2}\{F(z) + z^{-1}F(z)\} \\ U(z) &= \frac{T(z+1)}{2(z-1)}F(z) \end{aligned} \quad (1-12)$$

De la ecuación (1-12) la función del integrador del controlador en  $z$  es:

$$I(z) = K_I \frac{T(z+1)}{2(z-1)} \quad (1-13)$$

A continuación reemplazamos la función digital del diferenciador y del integrador en la ecuación (1-7), resultando:

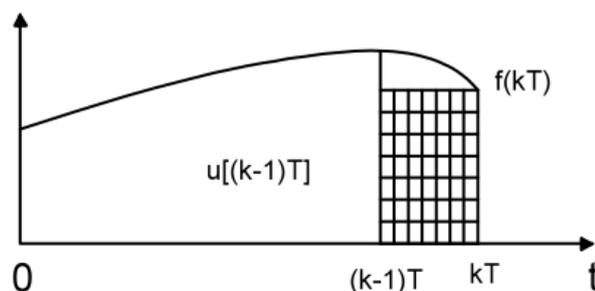
$$PID(z) = K_P + K_I \frac{T(z+1)}{2(z-1)} + K_D \frac{z-1}{Tz} \quad (1-14)$$

Desarrollando la ecuación (1-14) se tiene:

$$PID(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}\right)z^2 + \left(\frac{TK_I}{2} - K_P - \frac{2K_D}{T}\right)z + \frac{K_D}{T}}{z(z-1)} \quad (1-15)$$

- **Integración rectangular hacia adelante (Euler I):**

Para este tipo de integración se aproxima el área bajo la curva mediante rectángulos como se indica a continuación:



**Figura 6** – Integración rectangular hacia adelante

Fuente: (3)

Donde  $u(kT)$  es la integral de  $f(t)$  con  $t = kT$ ; entonces se tiene:

$$u(kT) = u[(k-1)T] + Tf(kT) \quad (1-16)$$

Aplicamos la transformada  $z$  a la ecuación desarrollada (1-16):

$$\begin{aligned} Z(u(kT) - u[(k-1)T]) &= Z(Tf(kT)) \\ U(z) - z^{-1}U(z) &= TF(z) \\ U(z) &= \frac{Tz}{z-1}F(z) \end{aligned} \quad (1-17)$$

De la ecuación (1-17) la función del integrador del controlador en  $z$  es:

$$I(z) = K_I \frac{Tz}{z-1} \quad (1-18)$$

A continuación reemplazamos la función digital del diferenciador y del integrador en la ecuación (1-7), resultando:

$$PID(z) = K_P + K_I \frac{Tz}{z-1} + K_D \frac{z-1}{Tz} \quad (1-19)$$

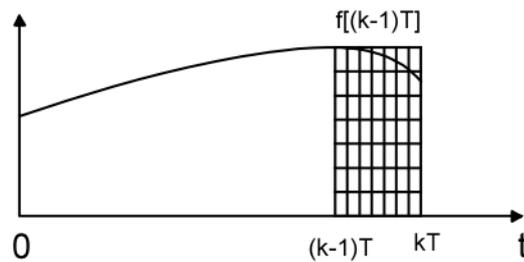
Y desarrollando la ecuación (1-19) se tiene:

$$PID(z) = \frac{(K_P + \frac{K_D}{T} + TK_I)z^2 - (K_P + \frac{2K_D}{T})z + \frac{K_D}{T}}{z(z-1)} \quad (1-20)$$

$$PID(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T} + TK_I\right) * \left[ z^2 - \left( \frac{K_P + \frac{2K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + TK_I} \right) * z + \frac{\frac{K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + TK_I} \right]}{z * (z - 1)}$$

- **Integración rectangular hacia atrás (Euler II):**

Para este tipo de integración se aproxima el área bajo la curva mediante rectángulos como se indica en la siguiente imagen:



**Figura 7** – Integración rectangular hacia atras  
Fuente: (3)

Donde  $u(kT)$  es la integral de  $f(t)$  con  $t = kT$ ; entonces se tiene:

$$u(kT) = u[(k-1)T] + Tf[(k-1)T] \quad (1-21)$$

Aplicamos la transformada  $z$  a la ecuación desarrollada (1-21):

$$Z(u(kT) - u[(k-1)T]) = Z(Tf[(k-1)T])$$

$$U(z) - z^{-1}U(z) = Tz^{-1}F(z)$$

$$U(z) = \frac{T}{z-1}F(z) \quad (1-22)$$

De la ecuación (1-22) la función del integrador del controlador en  $z$  es:

$$I(z) = K_I \frac{T}{z-1} \quad (1-23)$$

A continuación reemplazamos la función digital del diferenciador y del integrador en la ecuación (1-7), resultando:

$$PID(z) = K_P + K_I \frac{T}{z-1} + K_D \frac{z-1}{Tz} \quad (1-24)$$

Desarrollando la ecuación (1-24) se tiene:

$$PID(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T}\right)z^2 + \left(TK_I - K_P - \frac{2K_D}{T}\right)z + \frac{K_D}{T}}{z(z-1)}$$

$$PID(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T}\right) * \left[ z^2 + \left( \frac{TK_I - K_P - \frac{2K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T}} \right) * z + \frac{\frac{K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T}} \right]}{z * (z-1)}$$

(1-25)

### 1.5.2 ESTABILIDAD DE LAS APROXIMACIONES

En el proceso de muestreo las variables complejas  $z$  y  $s$  están relacionadas mediante:

$$z = e^{Ts}$$

Como “ $s$ ” está formado de una parte real y una imaginaria:

$$s = \sigma + j\omega$$

Por lo cual:

$$z = e^{T(\sigma+j\omega)} = e^{T\sigma}[\text{Cos}(\omega T) + j\text{Sen}(\omega T)] = e^{T\sigma} \langle \omega T$$

La condición de estabilidad en el plano  $s$ , define que  $\sigma$  sea negativo; lo que corresponde en el plano  $z$ :

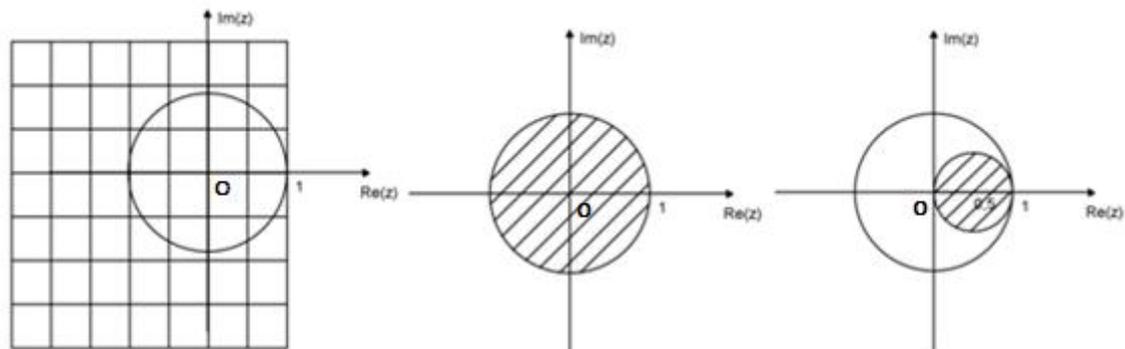
$$|z| = e^{-T\sigma} < 1$$

Es decir, la región de estabilidad en el plano  $z$  se encuentra dentro del círculo unitario como se observa a continuación.



**Figura 8** – Región de estabilidad en el plano  $z$   
Fuente: (4)

Según la aproximación se puede obtener diferentes regiones de estabilidad.



Integración rectangular  
hacia adelante

Integración trapezoidal

Integración rectangular  
hacia atrás

**Figura 9** – Regiones de estabilidad

**Fuente:** (5)

Como se puede observar en la figura anterior la región más estable se encuentra en la aproximación bilineal o trapezoidal, debido a que engloba el círculo unitario del plano  $z$ .

Para obtener los modelos matemáticos de las plantas, los controladores, y para el desarrollo de la interfaz gráfica, es necesario las herramientas de software como son: MATLAB y LabVIEW.

## 1.6 HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

### 1.6.1 MATLAB

#### 1.6.1.1 Toolbox IDENT

Es un sistema de identificación que permite construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de medición de datos; logrando con esto un ajuste de parámetros dentro de un modelo dado, hasta que la salida estimada coincida lo mejor posible con los datos de salida medidos. El manual de usuario de la herramienta IDENT se encuentra en el ANEXO C.

Existen algunos modelos de funciones de transferencia, sin embargo, los más utilizados son los modelos de caja negra, pues se puede modelar y parametrizar la planta en base a datos de entrada y salida, dentro de estos tenemos:

- **La estructura ARX:**

En esta estructura se describe el modelo como la relación entrada – salida en ecuación de diferencias dada por:

$$y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_{n_a}y(t - n_a) = b_1u(t - n_k) + \dots + b_{n_b}u(t - n_k - n_b + 1) + e(t) \quad (1-26)$$

Este modelo se lo conoce como modelo o estructura de ecuación de error debido a que el ruido blanco  $e(t)$  ingresa directamente en la ecuación; el ruido blanco es aquella señal aleatoria que posee todo el rango de frecuencias a una misma potencia, similar a la señal de la luz blanca, de ahí su nombre.

Los coeficientes dentro de nuestra estimación son parámetros a ser encontrados, por ende fijaremos un vector  $\theta$  conteniendo a los mismos:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n_b}]^T$$

Planteamos los polinomios  $A(q)$  y  $B(q)$ :

$$A(q) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots + a_{n_a} \cdot q^{-n_a}$$

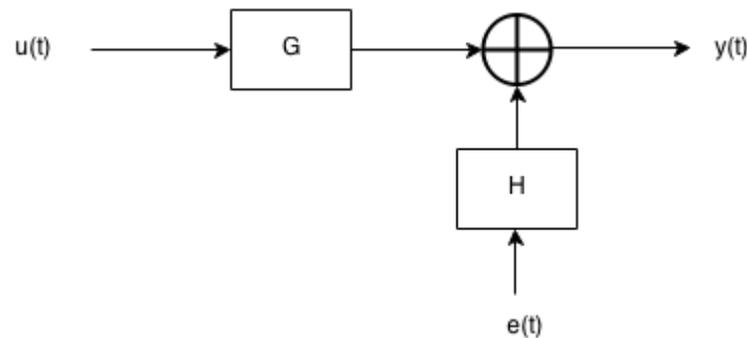
$$B(q) = b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + \dots + b_{n_b} \cdot q^{-n_b}$$

Por lo que podemos escribir:

$$A(q) \cdot y(t) = B(q) \cdot u(t) + e(t)$$

Y como la representación del modelo tenemos:

$$y(t, \theta) = G(q, \theta) \cdot u(t) + H(q, \theta) \cdot e(t)$$



**Figura 10** – Diagrama de bloques ARX  
Fuente: (6)

Donde G y H pueden ser escritos en función de los polinomios planteados

$$G(q, \theta) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad y \quad H(q, \theta) = \frac{1}{A(q)}$$

El nombre del modelo ARX proviene de: “AR” parte autoregresiva  $A(q) \cdot y(t)$  y “X” es la entrada extra  $B(q) \cdot u(t)$ .

- **Estructura ARMAX:**

En esta estructura se agrega mayor flexibilidad al modelo mediante un término denominado media en movimiento del ruido blanco, el cual da mayor libertad al término de la perturbación. La ecuación correspondiente sería la siguiente:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c) \quad (1-27)$$

Se plantea el siguiente polinomio extra:

$$C(q) = 1 + c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots + c_{n_c} \cdot q^{-n_c}$$

Por lo que podemos escribir:

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + C(q).e(t)$$

Ahora escribimos G Y H en función de los 3 polinomios plantados:

$$G(q, \theta) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad y \quad H(q, \theta) = \frac{C(q)}{A(q)}$$

Y los nuevos parámetros a ajustar serían:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n_b} \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{n_c}]^T$$

Este modelo toma el nombre de ARMAX debido al nuevo término de media en movimiento  $C(t) \cdot e(t)$ .

### 1.6.1.2 Toolbox SISOTOOL

Es una herramienta que permite el diseño de controladores en forma gráfica usando el método del lugar geométrico de las raíces que es la trayectoria generada en el plano “s” o “z” de la ecuación característica de un sistema cuando un parámetro cambia; y es muy útil porque se puede visualizar de manera inmediata cualquier cambio en la respuesta del sistema, que el usuario decida modificar en el LGR. Las instrucciones para el uso de la herramienta SISOTOOL se encuentran en el ANEXO D.

### 1.6.2 LABVIEW

El LABVIEW es un entorno de programación gráfica, que mediante el uso de diagrama de bloques se puede crear aplicaciones tanto para simulación como para implementación en procesos de control.

Los programas desarrollados en LabVIEW son denominados instrumentos virtuales (VI's), dentro de los cuales se ingresa los elementos de programación de

manera secuencial; también cuenta con VI's y funciones propias que facilitan la programación para adquisición, análisis y almacenamiento de datos.

## **1.7 PROYECTO A DESARROLLAR**

Se va a realizar la resintonización de los controladores PID existentes en las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana del molino de cemento con el fin de mejorar su dosificación; así también se realizará un estudio de las variables que influyen en la finura del cemento. Los modelos matemáticos que se obtendrán, estarán destinados al diseño de un controlador PID global para una alimentación constante al molino de cemento de Industrias Guapán, así como el desarrollo de un simulador de dicho controlador global.

Para obtener los modelos matemáticos de las plantas de cada báscula, se realizará las pruebas en lazo abierto por medio del PLC S7 300/400, a través del HMI que posee la industria. Los datos de dichas pruebas serán procesados por medio de la herramienta de software MATLAB.

Se analizará los parámetros más importantes de las respuestas de las simulaciones de los modelos matemáticos obtenidos, para el cumplimiento de los requerimientos de diseño.

Se va a desarrollar modelos de curvas estáticas para las variables que influyen en el sistema O-SEPA de recaptación de polvo fino, las cuales están directamente relacionadas con la calidad del cemento puzolánico, su Finura (Blaine) y Retenido.

Por último el diseño del controlador global para la alimentación constante al molino de cemento, tiene como fin la construcción de un simulador destinado al entrenamiento de nuevos panelistas.

## **2 CAPÍTULO: DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES**

### **2.1 RESINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN**

#### **2.1.1 MODELADO DE LAS PLANTAS DE LAS BÁSCULAS PESADORAS – ALIMENTADORAS**

El proceso que se va a modelar es un proceso difícil de modelar mediante pruebas a los motores de las bandas alimentadoras pesadoras por lo que se utilizará la herramienta IDENT, debido a que ésta nos permitirá construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada y salida del proceso. Para poder determinar los modelos es necesario:

1. Los datos de entrada-salida.
2. La estructura del modelo.
3. Un criterio para seleccionar un modelo.
4. Evaluar sus propiedades para observar si son satisfactorias.

Luego de lo cual los pasos a seguir en el desarrollo serían los siguientes:

1. Recoger los datos de entrada-salida de cada banda (Ver ANEXO E).
2. Examinar los datos, a fin de eliminar las tendencias y los valores atípicos, seleccionando partes útiles de los datos originales.
3. Definir un modelo dentro del conjunto de descripciones de los sistemas candidatos.
4. Calcular el mejor modelo en la estructura (métodos de estimación) con un criterio determinado de ajuste para obtener una aproximación adecuada.
5. Examinar las propiedades del modelo obtenido.
6. Si el modelo es lo suficientemente bueno, se lo elige, en caso contrario se debe volver al paso 3 para tratar con otro tipo de modelo.

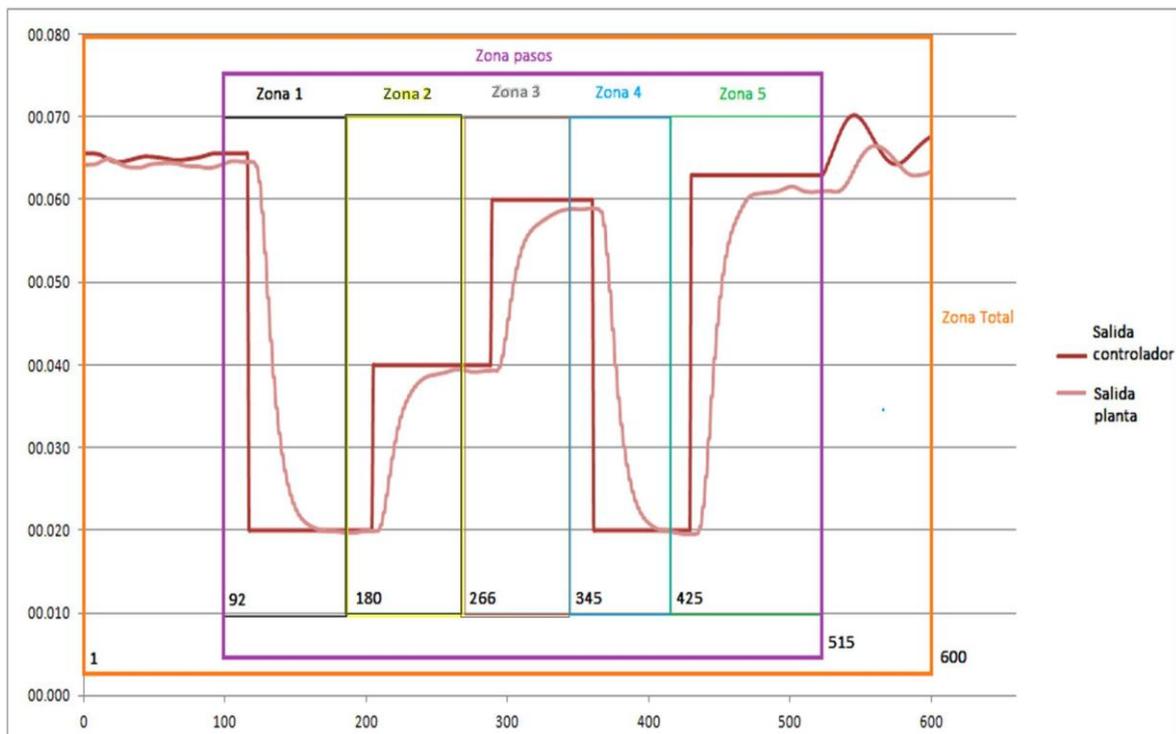
Los pasos mencionados se realizaron en tres básculas de industrias Guapán; en la de Clinker, de Yeso y de Puzolana; a continuación se describirá el proceso de

selección de la mejor planta estimada para cada una de estas básculas; utilizando la herramienta IDENT del programa MATLAB.

### 2.1.1.1 Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Clinker (G3).

La elección de la mejor planta estimada se realizará después de dividir los datos en zonas; de tal forma que de cada zona se obtenga una planta, la misma que será simulada en LabVIEW para la comparación de los valores reales y los estimados de la salida de la planta.

Los valores de salida del controlador están en porcentajes que van desde 0 a 100% de la velocidad, con la que la báscula G3 es accionada; mientras que los valores de la salida de la planta se encuentran en t/h.



**Figura 11 – Zonas de datos de clinker**  
Elaborado por: Argoti-Loja

En la zona 1 tenemos la siguiente estimación llamada “arx4120c1” que la definiremos como “clinker 1”:

$$\frac{5.6676e-005 (z+7.477) (z^2 - 1.009z + 1.059) (z^2 + 1.004z + 1.135) (z^2 - 0.05528z + 1.461) (z^2 - 3.363z + 4.618) (z^2 + 3.156z + 5.136)}{z^7 (z-0.8697) (z-0.8122) (z+0.9016) (z+0.744)}$$

**Tabla 8-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker 1.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,5384	0,01%
	20	19,7816	19,6713	0,56%
Zona 2	40	39,2572	39,3425	-0,22%
Zona 3	60	58,7731	59,0138	-0,41%
Zona 4	20	19,5537	19,6713	-0,60%
Zona 5	63	60,8652	61,9644	-1,81%

Autoría Propia

En la zona 2 tenemos la siguiente estimación llamada “arx3100c2” que la llamaremos como “clinker 2”:

$$\frac{0.00064753 (z+2.958) (z^2 - 1.084z + 0.8831) (z^2 + 0.4612z + 1.212) (z^2 - 2.994z + 3.623) (z^2 + 2.119z + 4.177)}{z^6 (z+0.9648) (z-0.905) (z-0.6471)}$$

**Tabla 9-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker 2.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,8228	-0,43%
	20	19,7816	19,7579	0,12%
Zona 2	40	39,2572	39,5159	-0,66%
Zona 3	60	58,7731	59,2738	-0,85%
Zona 4	20	19,5537	19,7579	-1,04%
Zona 5	63	60,8652	62,2375	-2,25%

Autoría Propia

En la zona 3 tenemos la siguiente estimación llamada “arx3100c3” que la definiremos como “clinker 3”:

$$\frac{0.00051817 (z+2.177) (z^2 - 1.06z + 0.9914) (z^2 - 3.864z + 5.133) (z^2 + 0.3815z + 1.688) (z^2 + 1.305z + 3.63)}{z^6 (z+0.9692) (z-0.8999) (z-0.6718)}$$

**Tabla 10-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker 3.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,2878	0,40%
	20	19,7816	19,5949	0,94%
Zona 2	40	39,2572	39,1897	0,17%
Zona 3	60	58,7731	58,7846	-0,02%
Zona 4	20	19,5537	19,5949	-0,21%
Zona 5	63	60,8652	61,7238	-1,41%

Autoría Propia

En la zona 4 tenemos la siguiente estimación llamada “arx4120c4” que la denominaremos como “clinker 4”:

$$\frac{0.00059037 (z+2.215) (z^2 - 0.03956z + 0.4607) (z^2 - 3.023z + 2.991) (z^2 + 0.0572z + 0.786) (z^2 + 2.334z + 3.013) (z^2 - 0.5122z + 2.082)}{z^7 (z-0.8664) (z-0.8234) (z+0.8801) (z+0.8017)}$$

**Tabla 11-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker 4.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,4546	0,14%
	20	19,7816	19,6457	0,69%
Zona 2	40	39,2572	39,2914	-0,09%
Zona 3	60	58,7731	58,9371	-0,28%
Zona 4	20	19,5537	19,6457	-0,47%
Zona 5	63	60,8652	61,884	-1,67%

Autoría Propia

En la zona 5 tenemos la siguiente estimación llamada “arx3120c5” que la definiremos como “clinker 5”:

$$\frac{0.00065448 (z-0.2837) (z^2 + 3.477z + 3.427) (z^2 - 2.615z + 2.155) (z^2 - 0.4625z + 0.783) (z^2 - 0.8255z + 2.463) (z^2 + 1.709z + 3.083)}{z^8 (z+0.9745) (z^2 - 1.718z + 0.7391)}$$

**Tabla 12-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker 5.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	63,5731	1,51%
	20	19,7816	19,377	2,05%
Zona 2	40	39,2572	38,7541	1,28%

Zona 3	60	58,7731	58,1311	1,09%
Zona 4	20	19,5537	19,377	0,90%
Zona 5	63	60,8652	61,0376	-0,28%

Autoría Propia

En la zona pasos tenemos la siguiente estimación llamada “arx3100pasos” que la definiremos como “clinker pasos”:

$$\frac{-0.00015015 (z-3.388) (z^2 + 3.08z + 3.536) (z^2 - 0.9538z + 1.505)}{(z^2 + 0.64z + 1.852) (z^2 - 2.439z + 4.506)}$$

$$z^6 (z+0.988) (z-0.8837) (z-0.7993)$$

**Tabla 13-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker pasos.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,1543	0,61%
	20	19,7816	19,5542	1,15%
Zona 2	40	39,2572	39,1084	0,38%
Zona 3	60	58,7731	58,6625	0,19%
Zona 4	20	19,5537	19,5542	0,00%
Zona 5	63	60,8652	61,5957	-1,20%

Autoría Propia

En la zona total tenemos la siguiente estimación llamada “arx3100t” que la definiremos como “clinker total”:

$$\frac{-0.00013517 (z-3.434) (z^2 + 3.171z + 3.733) (z^2 - 0.9397z + 1.48)}{(z^2 + 0.6331z + 1.867) (z^2 - 2.411z + 4.596)}$$

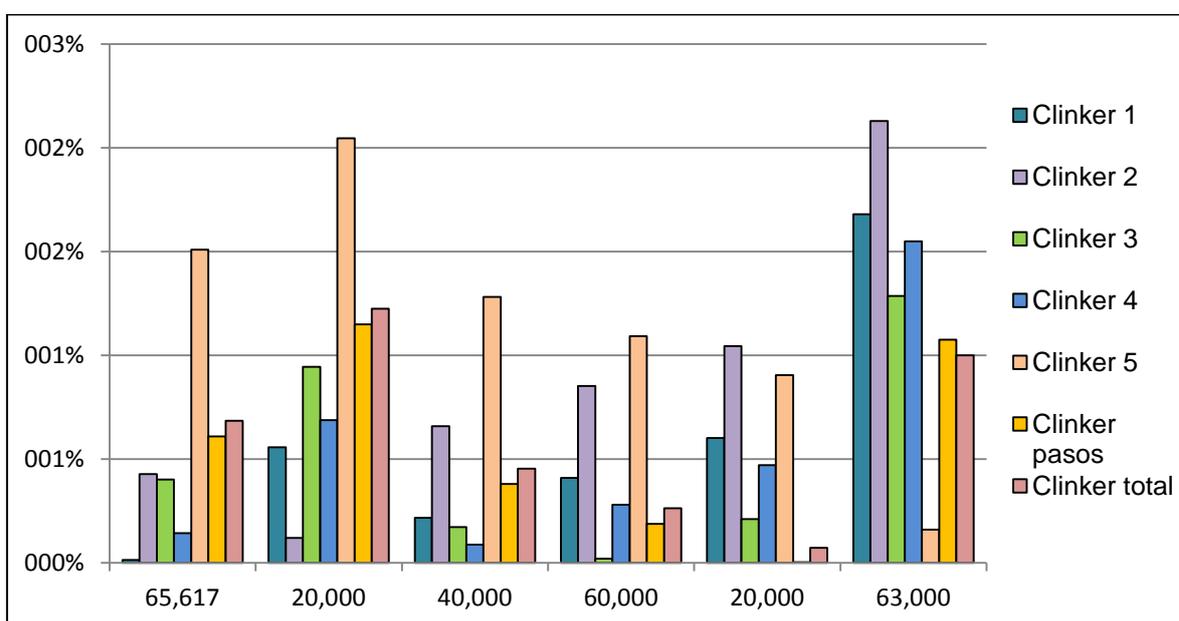
$$z^6 (z+0.988) (z-0.8808) (z-0.8071)$$

**Tabla 14-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada clinker total.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo
Zona 1	65,617	64,5473	64,1061	0,68%
	20	19,7816	19,5395	1,22%
Zona 2	40	39,2572	39,079	0,45%
Zona 3	60	58,7731	58,6184	0,26%
Zona 4	20	19,5537	19,5395	0,07%
Zona 5	63	60,8652	61,5494	-1,12%

Autoría Propia

A partir de las tablas comparativas obtenidas realizamos una gráfica donde relacionamos el error absoluto, para luego mediante una ponderación escoger el menor error.



**Figura 12** – Errores absolutos en las zonas de datos de clinker

Elaborado por: Argoti-Loja

Basándose en la figura anterior se procede a realizar una ponderación para cada prueba de salida del controlador donde en cada sección de la gráfica se asignan

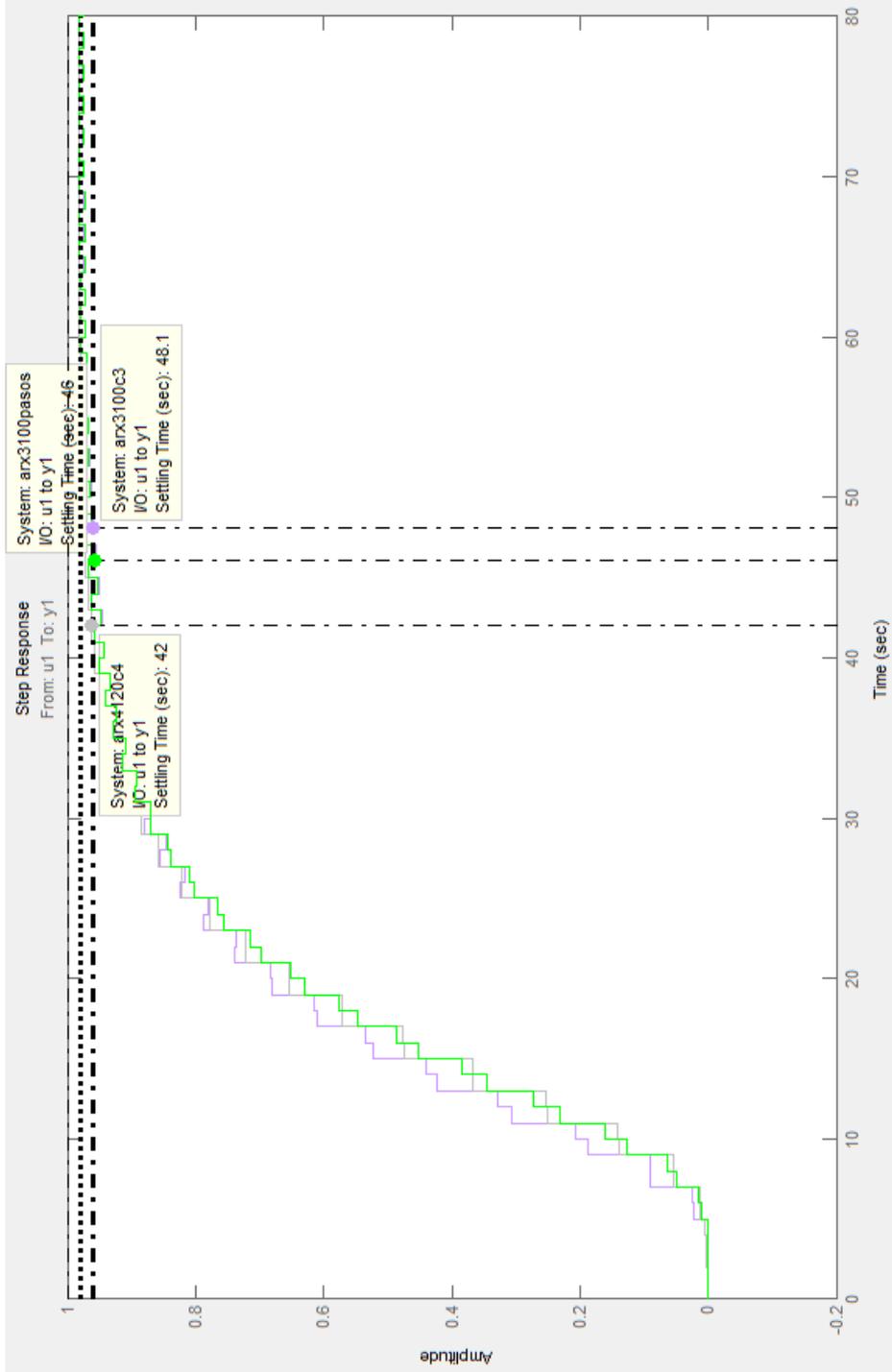
dígitos comprendidos entre 1 y 7, siendo 1 para el mayor error y 7 para el menor error.

**Tabla 15-** Ponderación de las pruebas de salida del controlador en las áreas de clinker.

Salida Controlador	Clinker 1	Clinker 2	Clinker 3	Clinker 4	Clinker 5	Clinker pasos	Clinker total
66	7	4	5	6	1	3	2
20	6	7	4	5	1	3	2
40	5	2	6	7	1	4	3
60	3	2	7	4	1	6	5
20	3	1	5	4	2	7	6
63	2	1	4	3	7	5	6
<b>SUMA</b>	26	17	31	29	13	28	24

Autoría Propia

Una vez realizada la ponderación podemos preseleccionar a las plantas de estimación: clinker 3, clinker 4 y clinker pasos, debido a que éstas obtuvieron los valores más bajos de error; después se realiza una comparación de las plantas de estimaciones preseleccionadas en base a los tiempos de respuesta obtenidos en la simulación de respuesta a la entrada paso en MATLAB y observamos los valores de tiempo de establecimiento de la planta.



**Figura 13** – Valores de tiempo de establecimiento de la planta  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

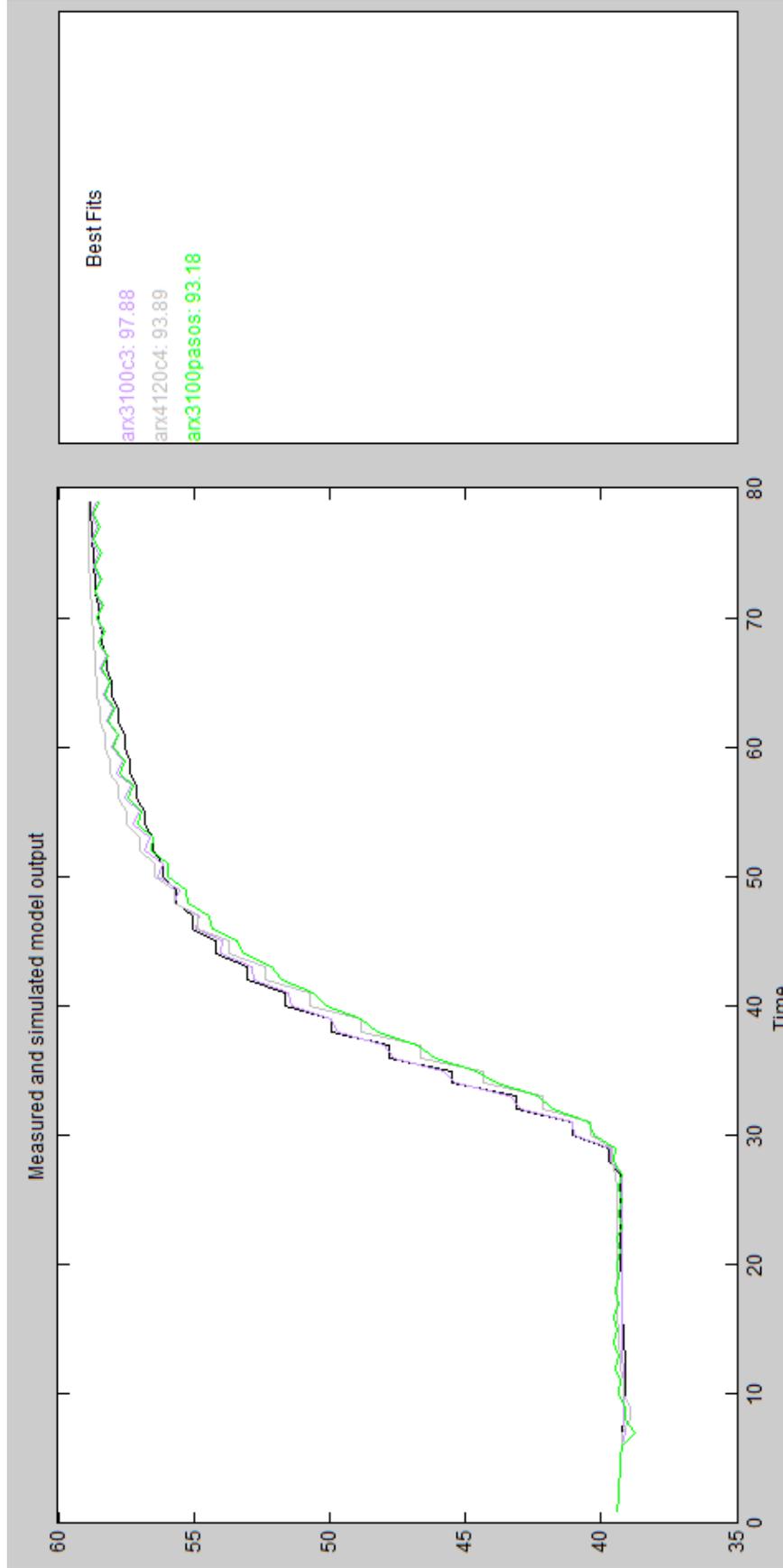
**Tabla 16-** Tiempos de Estabilización.

<b>Estimación</b>	<b>Clinker 3</b>	<b>Clinker 4</b>	<b>Clinker pasos</b>
<b>Tiempo de estabilización</b>	48,1 s	42 s	46 s

Autoría Propia

Obteniendo esta información se puede decir que se logra una mejor respuesta en la planta de estimación clinker 4.

Por último se realiza en las plantas de estimación preseleccionadas una comparación de la aproximación dada por la opción "Model output" del toolbox IDENT del MATLAB, en la zona 3 donde tenemos los valores normalmente más utilizados en la planta.



**Figura 14** – Comparación en la zona 3 de la aproximación de las plantas de estimación preseleccionadas.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

**Tabla 17-** Tabla de Aproximación.

<b>Estimación</b>	<b>Clinker 3</b>	<b>Clinker 4</b>	<b>Clinker pasos</b>
<b>Aproximación</b>	97,88%	93,89%	93,18%

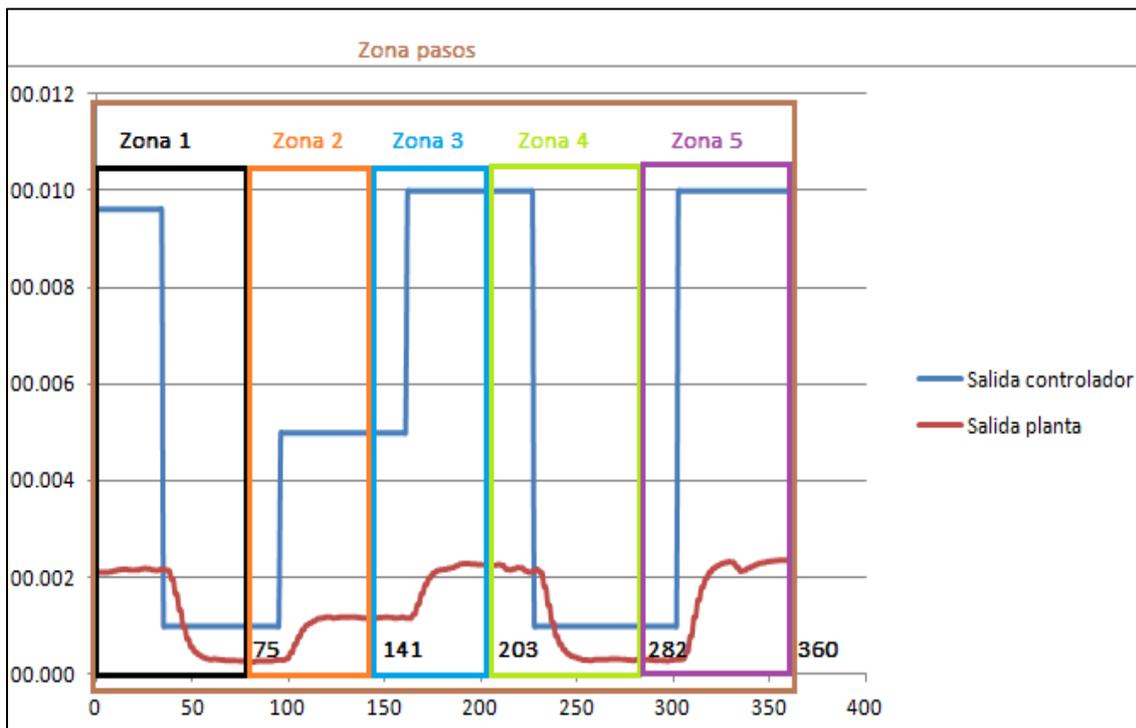
Autoría Propia

Al culminar las comparaciones podemos definir que la planta de estimación más conveniente es la planta de estimación clinker 3 (C3), debido a que tiene el valor de error más bajo y la mejor aproximación en comparación a los otros dos modelos de estimación en la zona normal de trabajo de la planta.

#### **2.1.1.2 Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Yeso (G11).**

La elección de la mejor planta estimada se realizará después de dividir los datos en zonas; de tal forma que de cada zona se obtenga una planta, la misma que será simulada en LabVIEW para la comparación de los valores reales y los estimados de la salida de la planta.

Los valores de salida del controlador están en porcentajes que van desde 0 a 100% de la velocidad, con la que la báscula G11 es accionada; mientras que los valores de la salida de la planta se encuentran en t/h.



**Figura 15** – Zonas de datos de yeso  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

En la zona 1 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2100y1” que la definiremos como “yeso 1”:

$$0.00038433 (z+0.5579) (z^2 - 1.151z + 0.9907) (z^2 + 0.6264z + 1.335) \\ (z^2 + 2.521z + 6.089) (z^2 - 2.544z + 6.202)$$

---


$$z^7 (z+0.8809) (z-0.8412)$$

**Tabla 18-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso 1.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,1474	-0,62%	0,62%
	1	0,2613	0,223143	14,59%	14,59%
Zona 2	5	1,1648	1,11572	4,22%	4,22%

<b>Zona 3</b>	10	2,2346	2,23143	0,14%	0,14%
<b>Zona 4</b>	1	0,2851	0,223143	21,72%	21,72%
<b>Zona 5</b>	10	2,3376	2,23143	4,54%	4,54%

Autoría Propia

En la zona 2 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2120y2” a la que denominaremos como “Yeso 2”:

$$\frac{0.0047982 (z+1.635) (z^2 - 1.174z + 0.6509) (z^2 + 1.229z + 0.8297) (z^2 - 2.357z + 2.206) (z^2 - 0.3423z + 0.9889) (z^2 + 0.6923z + 1.159)}{z^9 (z-0.8102) (z+0.6651)}$$

$$z^9 (z-0.8102) (z+0.6651)$$

**Tabla 19-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso 2.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,23866	-4,90%	4,90%
	1	0,2613	0,232626	10,96%	10,96%
Zona 2	5	1,1648	1,16313	0,15%	0,15%
Zona 3	10	2,2346	2,32626	-4,10%	4,10%
Zona 4	1	0,2851	0,232626	18,40%	18,40%
Zona 5	10	2,3376	2,32626	0,49%	0,49%

Autoría Propia

En la zona 3 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2110y3” la cual definiremos como “Yeso 3”:

$$\frac{-0.00059693 (z-4.491) (z-0.335) (z^2 - 0.9272z + 0.7764) (z^2 + 1.083z + 0.8646) (z^2 - 0.1019z + 1.333) (z^2 + 1.765z + 5.255)}{z^8 (z-0.8369) (z+0.6902)}$$

$$z^8 (z-0.8369) (z+0.6902)$$

**Tabla 20-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso 3.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,16669	-1,53%	1,53%
	1	0,2613	0,225148	13,82%	13,82%
Zona 2	5	1,1648	1,12574	3,36%	3,36%
Zona 3	10	2,2346	2,25148	-0,76%	0,76%
Zona 4	1	0,2851	0,225148	21,02%	21,02%
Zona 5	10	2,3376	2,25148	3,69%	3,69%

Autoría Propia

En la zona 4 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2110y4” la misma que definiremos como “Yeso 4”:

$$-0.00069808 (z-2.08) (z-0.2895) (z^2 - 0.8997z + 0.7969) (z^2 + 1.005z + 0.8896) (z^2 - 0.09799z + 1.373) (z^2 + 6.022z + 10.62)$$

---


$$z^8 (z-0.8434) (z+0.6798)$$

**Tabla 21-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso 4.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,04255	4,29%	4,29%
	1	0,2613	0,212248	18,76%	18,76%
Zona 2	5	1,1648	1,06124	8,89%	8,89%
Zona 3	10	2,2346	2,12248	5,02%	5,02%
Zona 4	1	0,2851	0,212248	25,55%	25,55%
Zona 5	10	2,3376	2,12248	9,20%	9,20%

Autoría Propia

En la zona 5 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2120y5” a la que la definiremos como “Yeso 5”:

$$\frac{0.001447 (z-0.3201) (z^2 - 1.073z + 0.9729) (z^2 + 1.199z + 1.162)}{(z^2 - 0.02291z + 1.207) (z^2 - 2.358z + 2.75) (z^2 + 2.612z + 3.205)}$$

$$z^9 (z-0.8298) (z+0.5797)$$

**Tabla 22-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso 5.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,20752	-3,44%	3,44%
	1	0,2613	0,22939	12,20%	12,20%
Zona 2	5	1,1648	1,14695	1,53%	1,53%
Zona 3	10	2,2346	2,2939	-2,66%	2,66%
Zona 4	1	0,2851	0,22939	19,53%	19,53%
Zona 5	10	2,3376	2,2939	1,87%	1,87%

Autoría Propia

En la zona pasos tenemos la estimación llamada “arx390pasos” misma que denominaremos como “Yeso pasos”:

$$\frac{0.00096614 (z^2 + 2.092z + 1.323) (z^2 - 0.6082z + 0.5346)}{(z^2 + 0.4829z + 1.147) (z^2 - 2.574z + 4.342)}$$

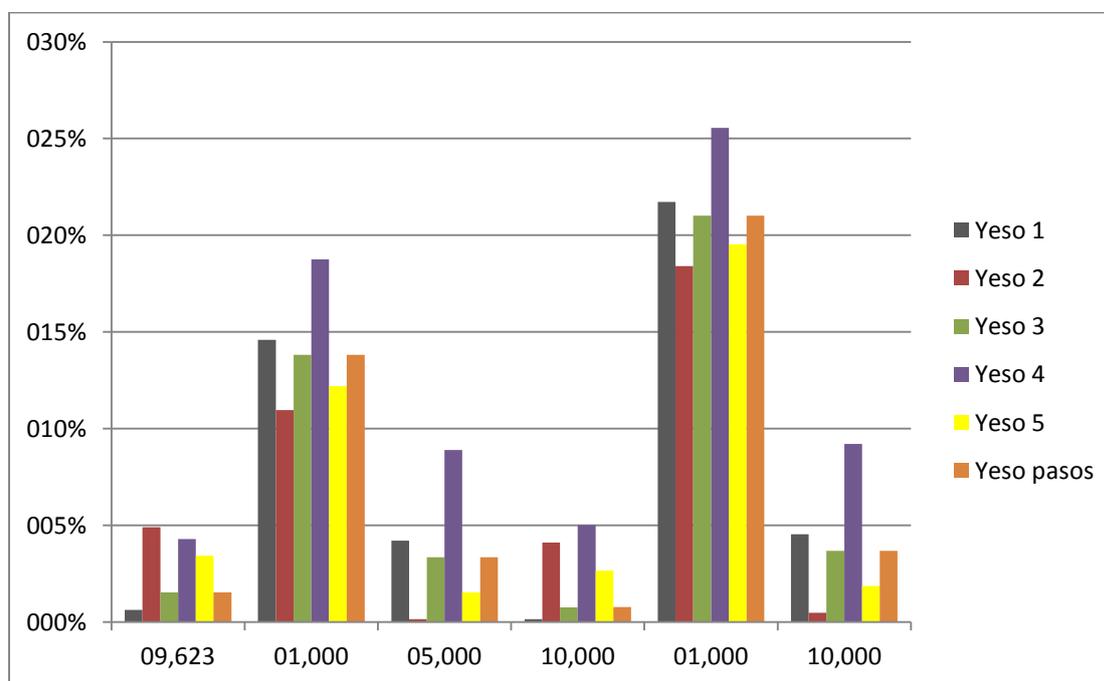
$$z^5 (z+0.9656) (z-0.7806) (z-0.7038)$$

**Tabla 23-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada yeso pasos.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	9,6234	2,1341	2,16697	-1,54%	1,54%
	1	0,2613	0,225177	13,81%	13,81%
Zona 2	5	1,1648	1,12588	3,34%	3,34%
Zona 3	10	2,2346	2,25177	-0,77%	0,77%
Zona 4	1	0,2851	0,225177	21,01%	21,01%
Zona 5	10	2,3376	2,25177	3,67%	3,67%

Autoría Propia

Tomando como base las tablas comparativas obtenidas se realiza una gráfica donde se relacionará el error absoluto, para luego mediante una ponderación escoger el menor error.



**Figura 16** – Errores absolutos en las zonas de datos de yeso  
Elaborado por: Argoti-Loja

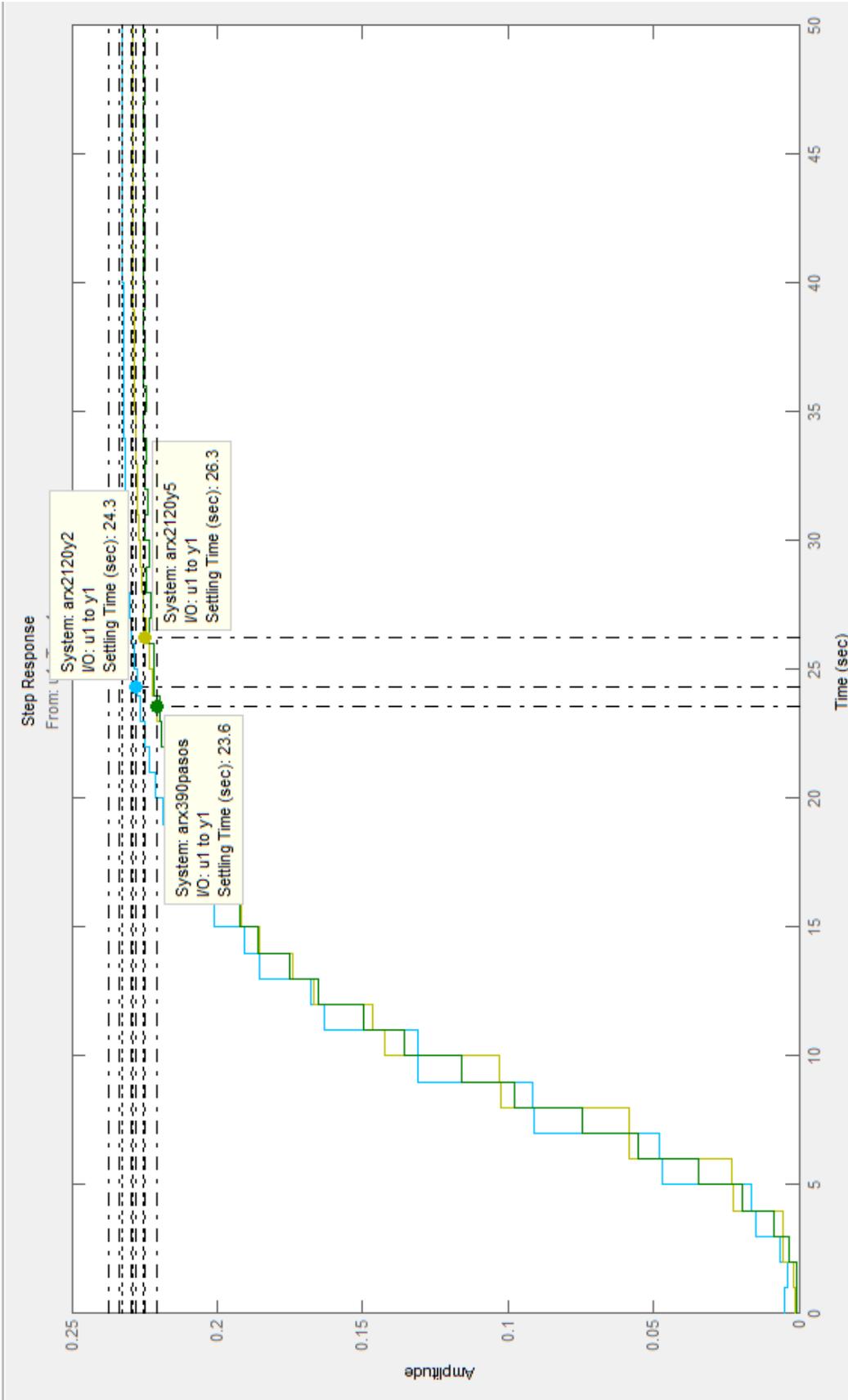
Basándose en la figura anterior se procede a realizar una ponderación para cada prueba de salida del controlador donde en cada sección de la gráfica se asignan dígitos comprendidos entre 1 y 6, siendo 1 para el mayor error y 6 para el menor error.

**Tabla 24-** Ponderación de las pruebas de salida del controlador en las áreas de yeso.

Salida Controlador	Yeso 1	Yeso 2	Yeso 3	Yeso 4	Yeso 5	Yeso pasos
9,6234	6	1	5	2	3	4
1	2	6	3	1	5	4
5	2	6	3	1	5	4
10	6	2	5	1	3	4
1	2	6	3	1	5	4
10	2	6	3	1	5	4
<b>SUMA</b>	20	27	22	7	26	24

Autoría Propia

Al realizar la ponderación se puede preseleccionar a las plantas de estimación: yeso 2, yeso 5 y yeso pasos, debido a que éstas obtuvieron los valores más bajos de error; luego se realiza una comparación de las plantas de estimaciones preseleccionadas en base a los tiempos de respuesta obtenidos en la simulación de respuesta a la entrada paso en MATLAB y observamos los valores de tiempo de establecimiento de la planta.



**Figura 17** – Valores de tiempo de establecimiento de la planta  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

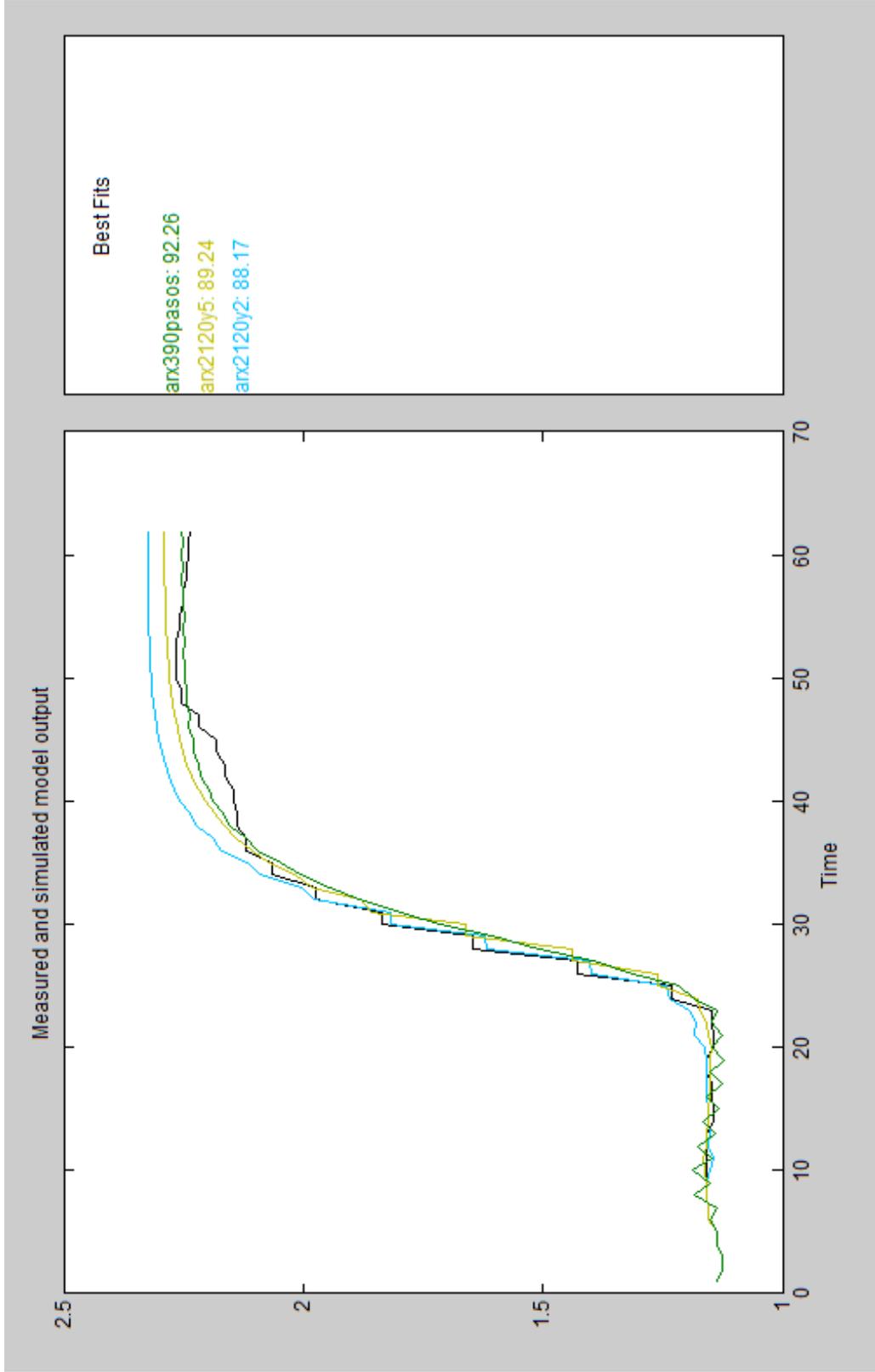
**Tabla 25-** Tiempos de Estabilización.

<b>Estimación</b>	<b>Yeso 2</b>	<b>Yeso 5</b>	<b>Yeso pasos</b>
<b>Tiempo de estabilización</b>	24,3 s	26,3 s	23,6 s

Autoría Propia

Obteniendo esta información se puede decir que se logra una mejor respuesta en la planta de estimación yeso pasos.

Por último se realiza en las plantas de estimación preseleccionadas una comparación de la aproximación dada por la opción "Model output" del toolbox IDENT del MATLAB, en la zona 3 donde tenemos los valores normalmente más utilizados en la planta.



**Figura 18** – Comparación en la zona 3 de la aproximación de las plantas de estimación pre-seleccionadas.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

**Tabla 26-** Tabla de Aproximación.

<b>Estimación</b>	<b>Yeso 2</b>	<b>Yeso 5</b>	<b>Yeso pasos</b>
<b>Aproximación</b>	90,66%	91,88%	93,27%

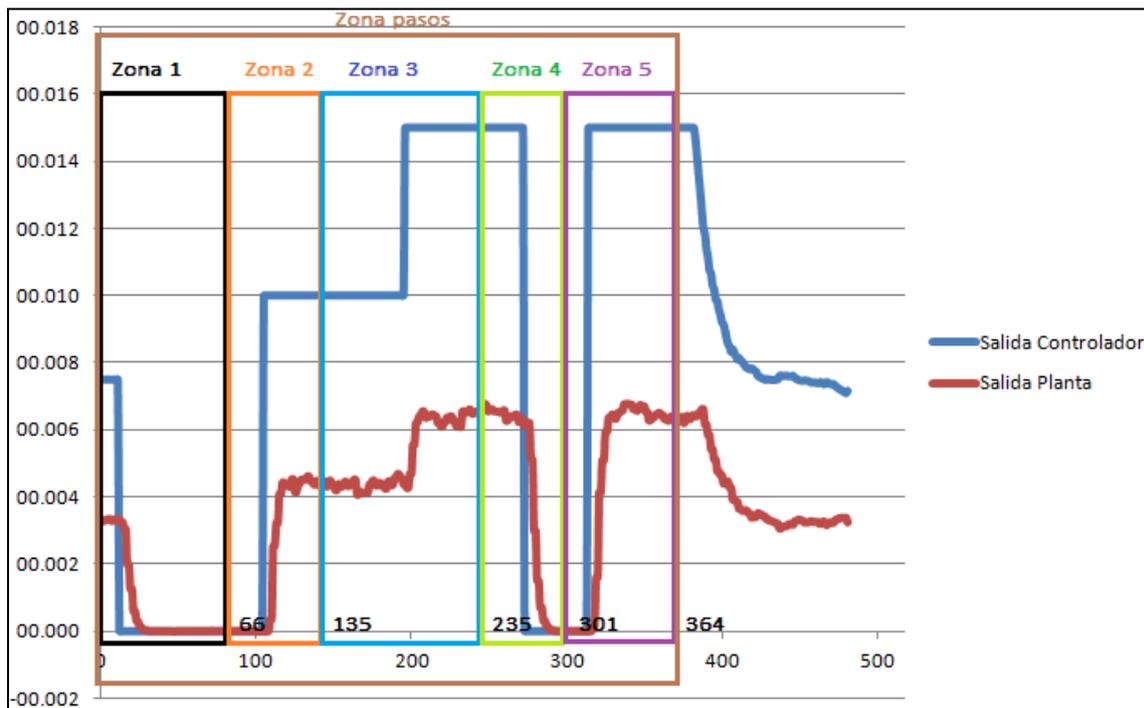
Autoría Propia

Al culminar las comparaciones podemos definir que la planta de estimación más conveniente es la planta de estimación yeso pasos (YP), debido a que tiene el valor de error más bajo y la mejor aproximación en comparación a los otros dos modelos de estimación en la zona normal de trabajo de la planta.

### **2.1.1.3 Planta de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Puzolana (G7).**

La elección de la mejor planta estimada se realizará después de dividir los datos en zonas; de tal forma que de cada zona se obtenga una planta, la misma que será simulada en LabVIEW para la comparación de los valores reales y los estimados de la salida de la planta.

Los valores de salida del controlador están en porcentajes que van desde 0 a 100% de la velocidad, con la que la báscula G7 es accionada; mientras que los valores de la salida de la planta se encuentran en t/h.



**Figura 19** – Zonas de datos de Puzolana  
Elaborado por: Argoti-Loja

En la zona 1 tenemos la estimación llamada “arx2100p1” a la que definiremos como “Puzolana 1”:

$$0.00080919 (z+16.46) (z^2 - 0.9825z + 0.5759) (z^2 + 0.9722z + 0.578) \\ (z^2 - 2.183z + 2.918)(z^2 + 2.085z + 3.043)$$

---


$$z^7 (z-0.7004) (z+0.6899)$$

**Tabla 27-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana 1.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,36642	-0,95%	0,95%
Zona 2	10	4,4777	4,48919	-0,26%	0,26%
Zona 3	15	6,5213	6,73378	-3,26%	3,26%

Zona 4	10	4,3222	4,48919	-3,86%	3,86%
Zona 5	15	6,7347	6,73378	0,01%	0,01%

Autoría Propia

En la zona 2 tenemos la estimación llamada “arx2120p2” la que definiremos como “Puzolana 2”:

$$\frac{-3.4685e-005 (z-16.73) (z+5.13) (z-0.3621) (z^2 - 1.071z + 0.6) (z^2 + 0.9855z + 0.6146) (z^2 + 1.142z + 6.874) (z^2 - 3.069z + 10.16)}{z^9 (z-0.5707) (z+0.122)}$$

**Tabla 28-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana 2.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,33309	0,05%	0,05%
Zona 2	10	4,4777	4,44475	0,74%	0,74%
Zona 3	15	6,5213	6,66712	-2,24%	2,24%
Zona 4	10	4,3222	4,44475	-2,84%	2,84%
Zona 5	15	6,7347	6,66712	1,00%	1,00%

Autoría Propia

En la zona 3 tenemos la estimación llamada “arx2110p3” que denominaremos como “Puzolana 3”:

$$\frac{0.0086109 (z+1.965) (z-0.7231) (z^2 - 0.5196z + 0.5274) (z^2 + 0.6948z + 0.8301) (z^2 - 0.2408z + 0.7383) (z^2 - 4.082z + 6.767)}{z^8 (z-0.7233) (z-0.1613)}$$

**Tabla 29-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana 3.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,20824	3,79%	3,79%
Zona 2	10	4,4777	4,27825	4,45%	4,45%
Zona 3	15	6,5213	6,41738	1,59%	1,59%
Zona 4	10	4,3222	4,27825	1,02%	1,02%
Zona 5	15	6,7347	6,41738	4,71%	4,71%

Autoría Propia

En la zona 4 tenemos la siguiente estimación “arx3120p4” que la definiremos como “Puzolana 4”:

$$\frac{0.016028 (z-0.6197) (z^2 - 0.7264z + 0.4588) (z^2 + 0.7719z + 0.5195) (z^2 + 2.672z + 2.579) (z^2 - 2.617z + 2.512) (z^2 - 0.01431z + 0.8975)}{z^8 (z+0.5175) (z-0.3734) (z-0.7354)}$$

**Tabla 30-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana 4.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,21174	3,69%	3,69%
Zona 2	10	4,4777	4,28292	4,35%	4,35%
Zona 3	15	6,5213	6,42438	1,49%	1,49%
Zona 4	10	4,3222	4,2829	0,91%	0,91%
Zona 5	15	6,7347	6,42438	4,61%	4,61%

Autoría Propia

En la zona 5 tenemos la siguiente estimación llamada “arx2120p5” que la definiremos como “Puzolana pasos”:

$$\frac{0.018706 (z+1.195) (z^2 - 1.487z + 0.804) (z^2 + 1.98z + 1.403) (z^2 - 1.223z + 0.8122) (z^2 + 0.914z + 1.325) (z^2 - 0.3795z + 1.174)}{z^9 (z-0.6487) (z+0.277)}$$

**Tabla 31-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana 5.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,26565	2,07%	2,07%
Zona 2	10	4,4777	4,35481	2,74%	2,74%
Zona 3	15	6,5213	6,53222	-0,17%	0,17%
Zona 4	10	4,3222	4,35481	-0,75%	0,75%
Zona 5	15	6,7347	6,53222	3,01%	3,01%

Autoría Propia

En la zona pasos tenemos la siguiente estimación “arx280pasos” que definiremos como “Puzolana pasos”:

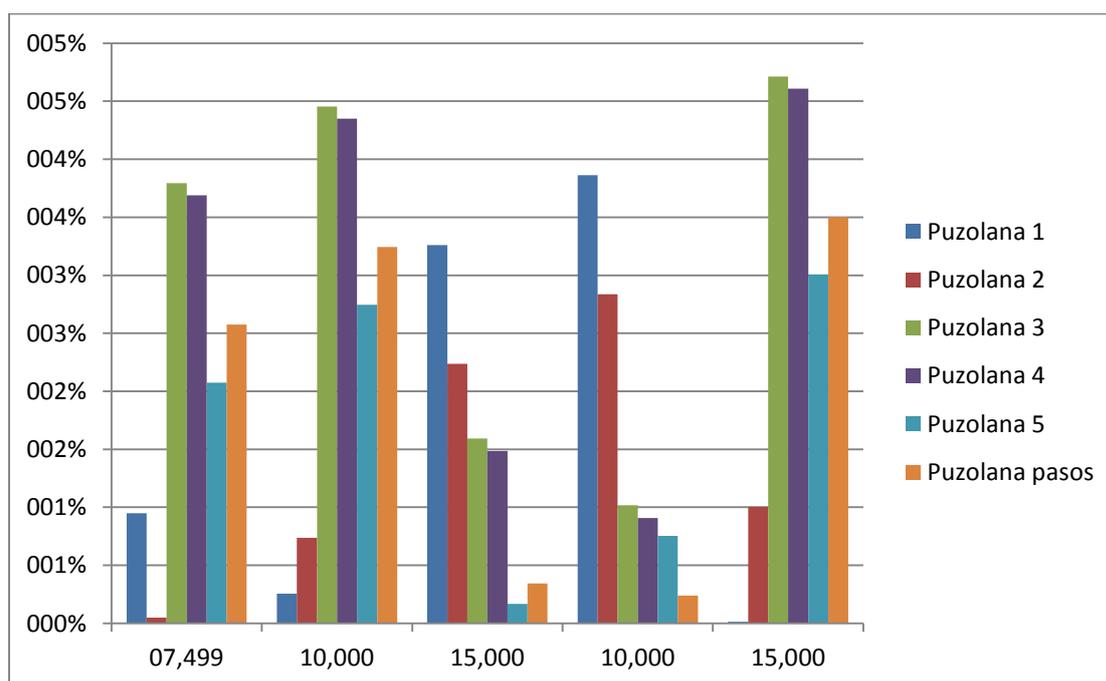
$$\frac{0.0059427 (z+0.9798) (z^2 + 2.077z + 1.512) (z^2 - 2.983z + 3.499) (z^2 + 0.07351z + 1.357)}{z^5 (z-0.7245) (z+0.6667)}$$

**Tabla 32-** Comparación entre los valores obtenidos de la simulación en LabVIEW de la Planta real y de la Planta estimada puzolana pasos.

Zona	Salida del controlador	Salida de la planta real	Salida de la planta estimada	Error relativo	Error absoluto
Zona 1	7,4989	3,3348	3,24894	2,57%	2,57%
Zona 2	10	4,4777	4,33253	3,24%	3,24%
Zona 3	15	6,5213	6,49879	0,34%	0,34%
Zona 4	10	4,3222	4,33253	-0,24%	0,24%
Zona 5	15	6,7347	6,49879	3,50%	3,50%

Autoría Propia

A partir de las tablas comparativas obtenidas realizamos una gráfica donde relacionamos el error absoluto, para luego mediante una ponderación escoger el menor error.



**Figura 20** – Errores absolutos en las zonas de datos de puzolana  
Elaborado por: Argoti-Loja

Basándose en la figura anterior se procede a realizar una ponderación para cada prueba de salida del controlador donde en cada sección de la gráfica se asignan

dígitos comprendidos entre 1 y 6, siendo 1 para el mayor error y 6 para el menor error.

**Tabla 33-** Ponderación de las pruebas de salida del controlador en las áreas de puzolana.

Salida Controlador	Puzolana 1	Puzolana 2	Puzolana 3	Puzolana 4	Puzolana 5	Puzolana pasos
7,4989	5	6	1	2	4	3
10	6	5	1	2	4	3
15	1	2	3	4	6	5
10	1	2	3	4	5	6
15	6	5	1	2	4	3
<b>SUMA</b>	19	20	9	14	23	20

Autoría Propia

Esta ponderación sirve para poder preseleccionar la estimación de puzolana 2, puzolana 5 y puzolana pasos, los cuales obtuvieron los valores más bajos de error. A continuación se considera con mayor ponderación a los valores que se encuentran más cerca de la zona de trabajo:

**Tabla 34-** Cercanía a la zona de trabajo.

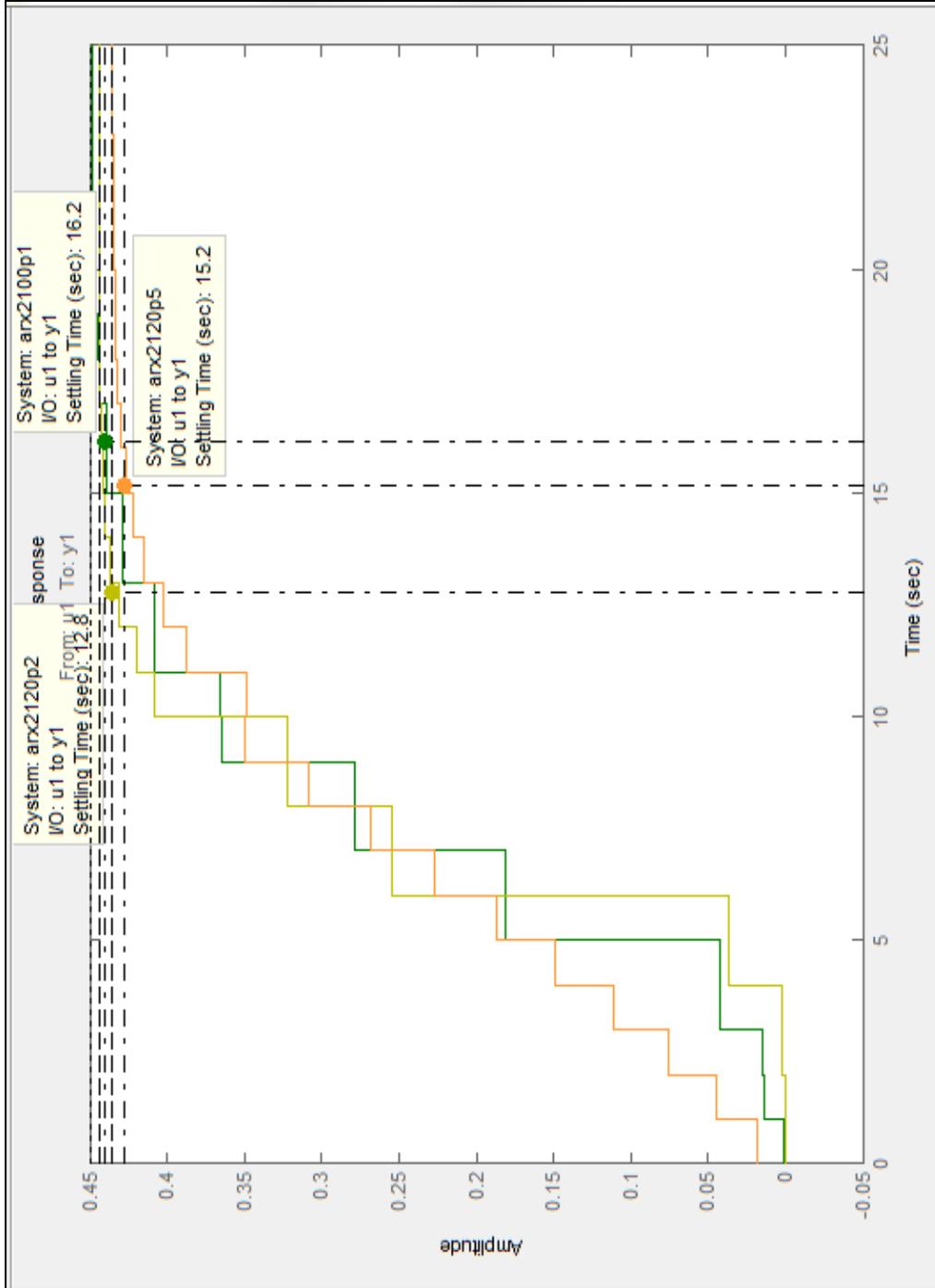
Razón	2
-------	---

Salida Controlador	Puzolana 1	Puzolana 2	Puzolana 3	Puzolana 4	Puzolana 5	Puzolana pasos
7,4989	10	12	2	4	8	6
10	6	5	1	2	4	3
15	1	2	3	4	6	5
10	1	2	3	4	5	6
15	6	5	1	2	4	3
<b>SUMA</b>	24	26	10	16	27	23

Autoría Propia

Ahora podemos preseleccionar la estimación de puzolana 1, puzolana 2 y puzolana 5, los cuales obtuvieron los valores más bajos de error y los más altos en cuanto a cercanía al área de trabajo.

Luego se realiza una comparación de las plantas de estimaciones preseleccionadas en base a los tiempos de respuesta obtenidos en la simulación de respuesta a la entrada paso en MATLAB y observamos los valores de tiempo de establecimiento de la planta.



**Figura 21** – Valores de tiempo de establecimiento de la planta  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

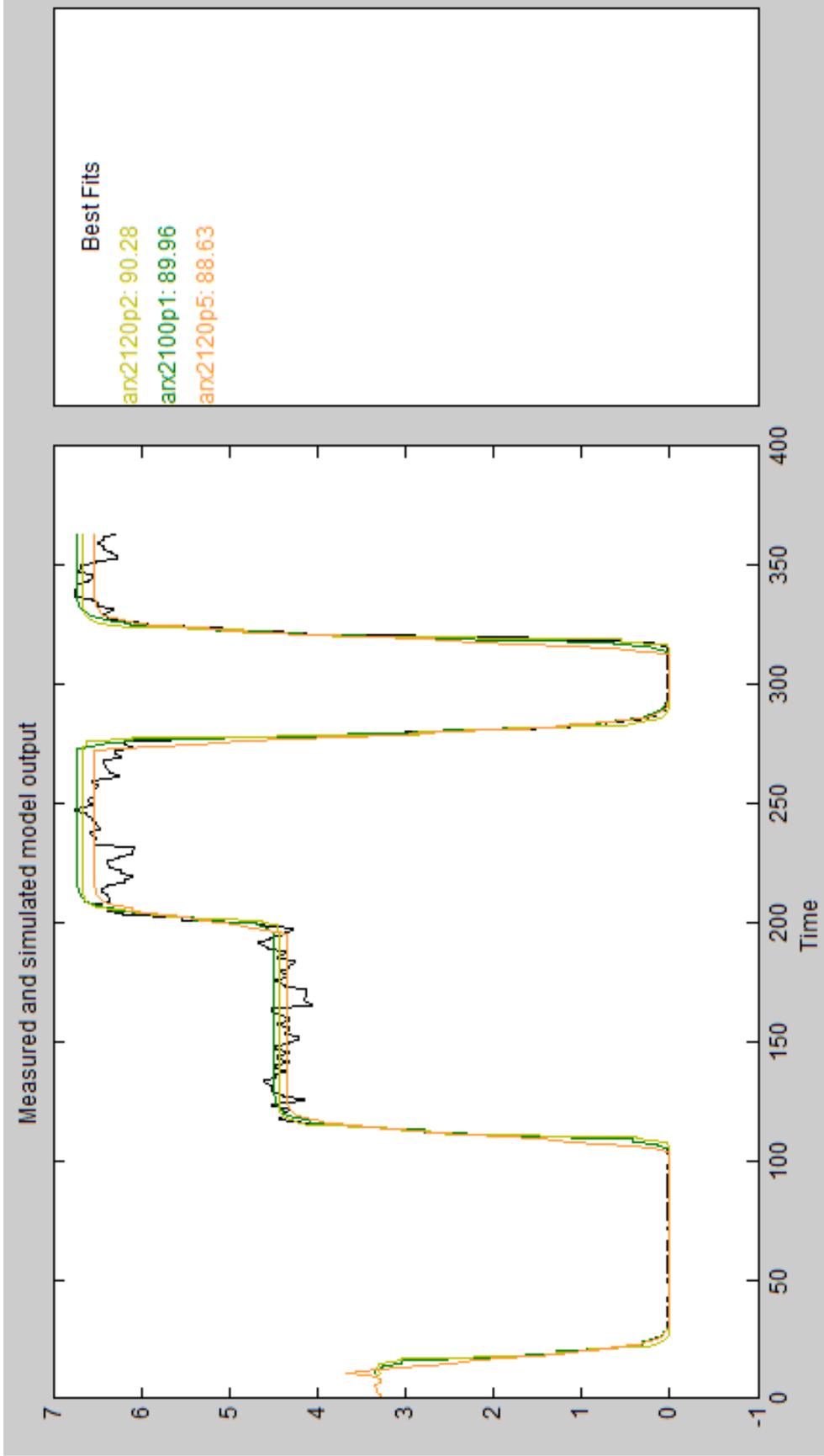
**Tabla 35-** Tiempos de Estabilización.

<b>Estimación</b>	<b>Puzolana 1</b>	<b>Puzolana 2</b>	<b>Puzolana 5</b>
<b>Tiempo de estabilización</b>	16,2 s	12,8 s	15,2 s

Autoría Propia

Obteniendo esta información se puede decir que se logra una mejor respuesta en la planta de estimación puzolana 2.

Por último se realiza en las plantas de estimación preseleccionadas una comparación de la aproximación dada por la opción "Model output" del toolbox IDENT del MATLAB, en la zona pasos donde tenemos los valores normalmente más utilizados en la planta.



**Figura 22** – Comparación en la zona 3 de la aproximación de las plantas de estimación pre-seleccionadas.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

**Tabla 36-** Tabla de Aproximación.

<b>Estimación</b>	<b>Puzolana 1</b>	<b>Puzolana 2</b>	<b>Puzolana 5</b>
<b>Aproximación</b>	89,96%	90,28%	88,63%

Autoría Propia

Al culminar las comparaciones podemos definir que la planta de estimación más conveniente es la planta de estimación puzolana 2, debido a que tiene el valor de error más bajo y la mejor aproximación en comparación a los otros dos modelos de estimación en la zona normal de trabajo de la planta.

De las comparaciones realizadas podemos definir la estimación más conveniente como es la de puzolana 2 (P2), debido a que tiene un valor de error más bajo, un tiempo de respuesta y aproximación mejor en comparación a los otros dos modelos de estimación.

### **2.1.2 REQUISITOS PARA LA DISCRETIZACIÓN DE PIDs**

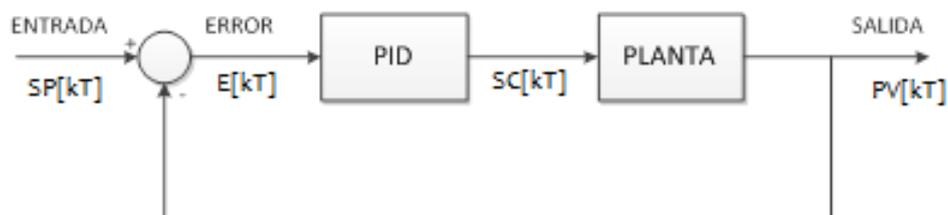
El sistema decodificado de programación del PLC de industrias Guapán fue diseñado por la empresa SIEMENS por lo que no es posible tener acceso al código de discretización, razón por la cual se va a utilizar un modelo de discretización de un PID y aproximar sus coeficientes a la función de transferencia de la planta estimada del controlador.

Al utilizar este procedimiento es necesario optar por el mejor modelo de discretización por lo que se utilizará la aproximación de discretización con el método de integración trapezoidal, ya que la estabilidad que presenta es la adecuada y así mismo brinda una mejor integración de la curva.

La función de transferencia de la planta estimada del controlador se obtendrá mediante datos de entrada y salida del controlador en funcionamiento normal con

sus parámetros actuales, luego de lo cual los datos serán procesados en el toolbox IDENT.

Los datos fueron adquiridos del sistema SCADA que utiliza industrias Guapán, el cual nos permite obtener datos de las diferentes variables que intervienen en el proceso, con un tiempo de muestreo de 0,1s. Las variables necesarias para estimar la planta PID son  $E[kT]$  y  $SC[kT]$  como entrada y salida del controlador respectivamente.



**Figura 23** – Proceso de dosificación de las básculas pesadoras-alimentadoras de: Clinker, Yeso y Puzolana

**Elaborado por:** Argoti-Loja

**Tabla 37-** Variables del proceso de dosificación de las básculas pesadoras-alimentadoras de: Clinker, Yeso y Puzolana.

Nombre	Variable	Definición
Entrada	SP[kT]	Set-point de dosificación
Salida controlador	SC[kT]	Señal de control
Salida	PV[kT]	Variable de proceso

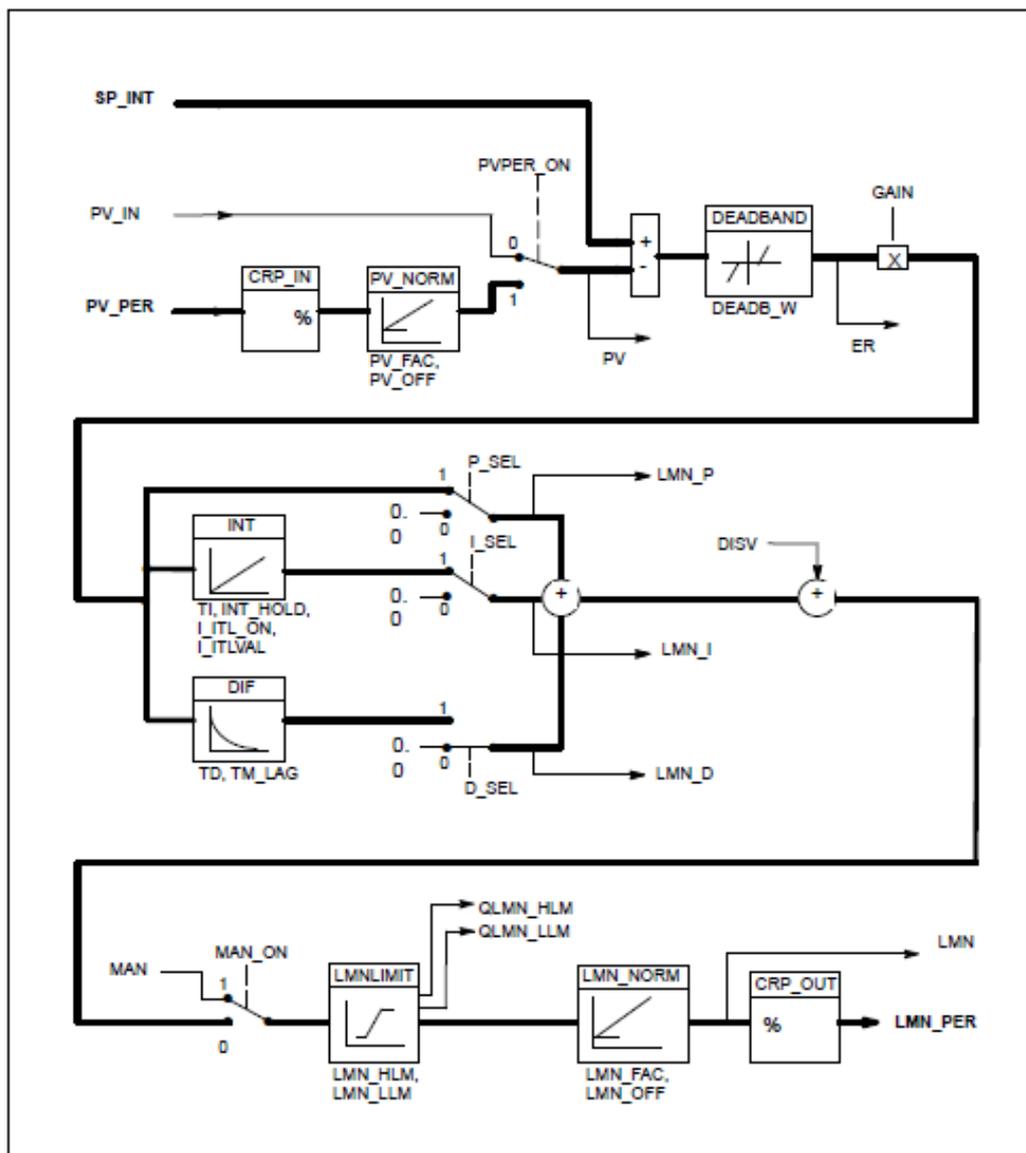
Autoría Propia

El sistema SCADA no nos permite conseguir datos de la variable  $E[kT]$  (error) por lo que para calcular el error se utilizará la siguiente ecuación:

$$E[kT] = SP[kT] - PV[kT]$$

### 2.1.3 ESTUDIO DE LOS CONTROLADORES PID IMPLANTADOS EN LAS PLANTAS DE LAS BÁSCULAS DE: CLINKER, YESO Y PUZOLANA

Los controladores PID de las básculas pesadoras-alimentadoras se encuentran implantados mediante PLC's Siemens S7-300/400 individuales con un tiempo de muestreo  $T = 0,1[s]$ . El tipo de controlador implementado es un PID en paralelo.



**Figura 24** – Esquema de Bloques del control PID que realiza el PLC S7-300/400

**Fuente:** (7)

**Tabla 38-** Parámetros utilizados por el programa del PLC dentro de su propia discretización implantada.

Variable	Nomenclatura	Tipo de Variable	Precisión
Ganancia	GAIN	Real	0,001
Tiempo de acción derivativa	$T_D$	Tiempo	$\geq 1$ ms
Tiempo de acción integral	$T_I$	Tiempo	$\geq 1$ ms
Ancho de banda muerta	DEADB_W	Real <sup>+</sup>	$\geq 0,1$ %
Retardo a la acción derivativa	TM_LAG	Tiempo	$\geq 1$ ms

Autoría Propia

### 2.1.3.1 Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Clinker (G3)

Al comenzar con el estudio del controlador PID es necesario encontrar el modelo matemático del controlador para lo cual se utiliza la herramienta IDENT, donde se ingresan 148 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 30 a 50 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s].

**Tabla 39-** Parámetros digitados de Clinker

GAIN	0,15
$T_I$	0,8
$T_D$	0
Lag time	1
Dead band	0

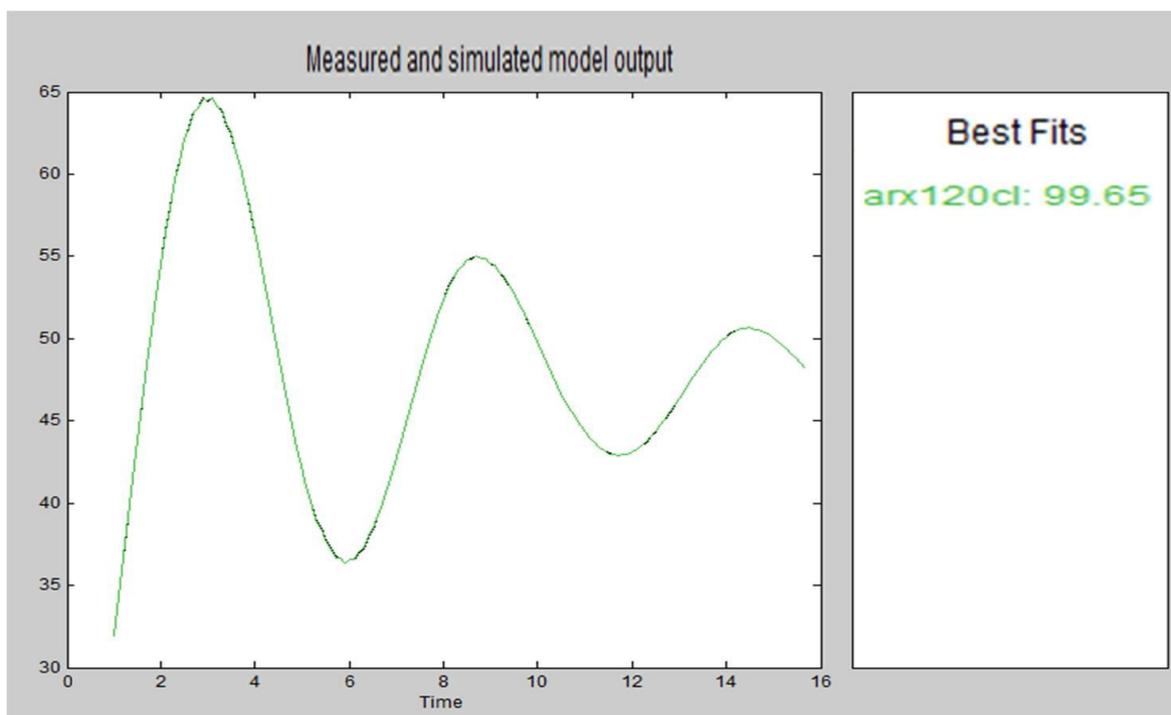
Autoría Propia

Para la estimación del modelo matemático del controlador se utiliza el modelo ARX, de parámetros [1 2 0] es decir, un polo y un cero con un tiempo de retardo

de cero, debido a que por los parámetros de GAIN,  $T_I$  y  $T_D$  indican claramente un control PI ( $T_D = 0$ ); resultando la siguiente función en z del controlador:

$$CG3 = \frac{0,2472*(z-0,4587)}{z-1} \quad (2-1)$$

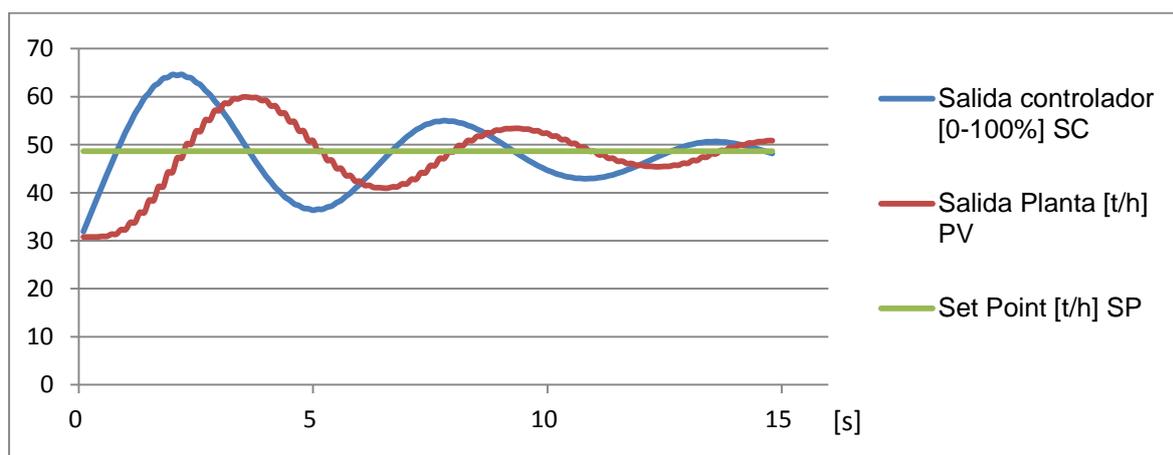
La aproximación de estimación de la planta del controlador PID es de un 99,65% como se puede observar a continuación:



**Figura 25** – Aproximación de respuesta del controlador PID de la banda pesadora-alimentadora de clinker.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

En la gráfica siguiente podemos observar la respuesta que presenta la planta de la banda G3 ante un escalón de 30 t/h a 50t/h; denotándose claramente la oscilación del sistema, con una estabilización de tiempo alto.



**Figura 26** – Respuesta PID implantado en la banda pesadora-alimentadora de clinker  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

### 2.1.3.2 Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Yeso (G11)

Al comenzar con el estudio del controlador PID es necesario encontrar el modelo matemático del controlador para lo cual se utiliza la herramienta IDENT, donde se ingresan 127 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 1 a 3 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s].

**Tabla 40-** Parámetros digitados de Yeso

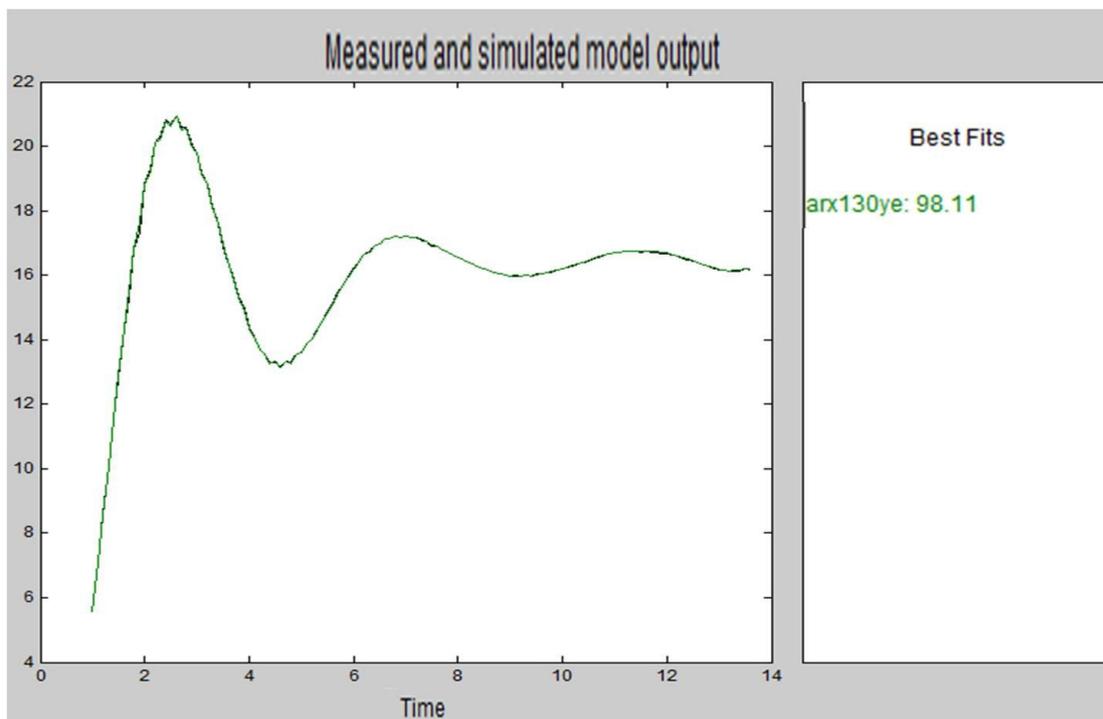
<b>GAIN</b>	<b>0,15</b>
<b>T<sub>I</sub></b>	<b>1</b>
<b>T<sub>D</sub></b>	<b>0,1</b>
<b>Lag time</b>	<b>1</b>
<b>Dead band</b>	<b>0</b>

Autoría Propia

Para la estimación del modelo matemático del controlador se utiliza el modelo ARX de parámetros [1 3 0], es decir, va a tener un polo y dos ceros con un tiempo de retardo de cero, dado que los parámetros de GAIN, T<sub>I</sub> y T<sub>D</sub> indican claramente un control PID; se tiene como resultado la siguiente función en z del controlador:

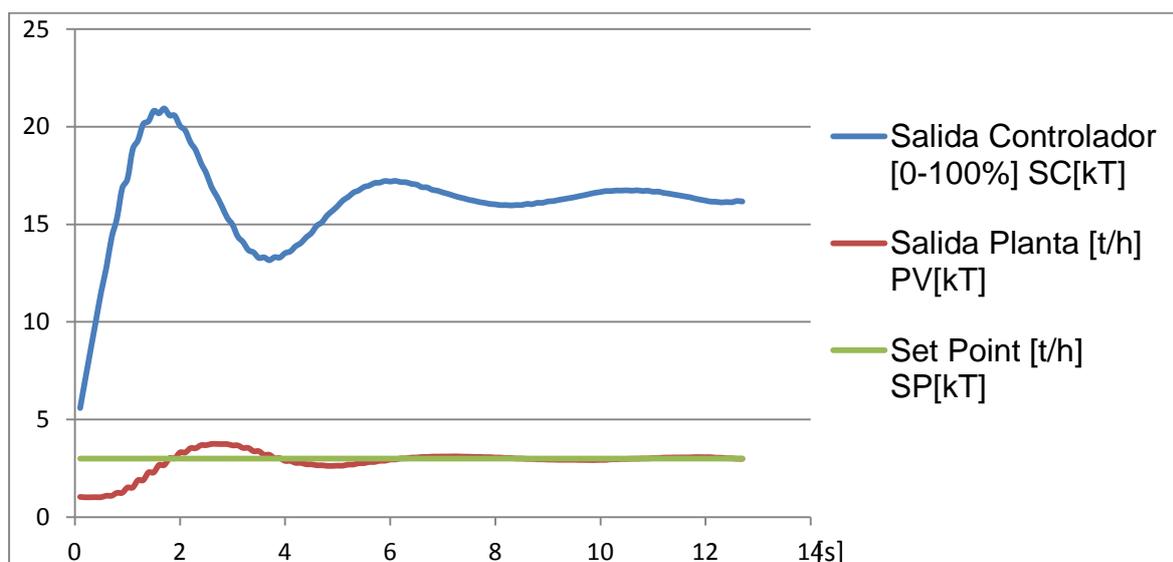
$$CG11 = \frac{1,8872*(z-0,5189)*(z-0,171)}{z*(z-1)} \quad (2-2)$$

La aproximación de estimación de la planta del controlador PID es de un 98,11% como se puede observar:



**Figura 27** – Aproximación de respuesta del controlador PID de la banda pesadora-alimentadora de yeso  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

En la gráfica siguiente podemos observar la respuesta que presenta la planta de la banda G11 ante un escalón de 1 t/h a 3t/h; denotándose claramente la oscilación del sistema, con una estabilización de tiempo alto.



**Figura 28** – Respuesta PID implantado en la banda pesadora-alimentadora de yeso  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

### 2.1.3.3 Estudio del controlador PID de la Báscula Pesadora-Alimentadora de Puzolana (G7)

Al comenzar con el estudio del controlador PID es necesario encontrar el modelo matemático del controlador para lo cual se utiliza la herramienta IDENT, donde se ingresan 114 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 1 a 3 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s].

**Tabla 41-** Parámetros digitados de Puzolana

GAIN	0,15
$T_I$	2
$T_D$	0,15
Lag time	1
Dead band	0

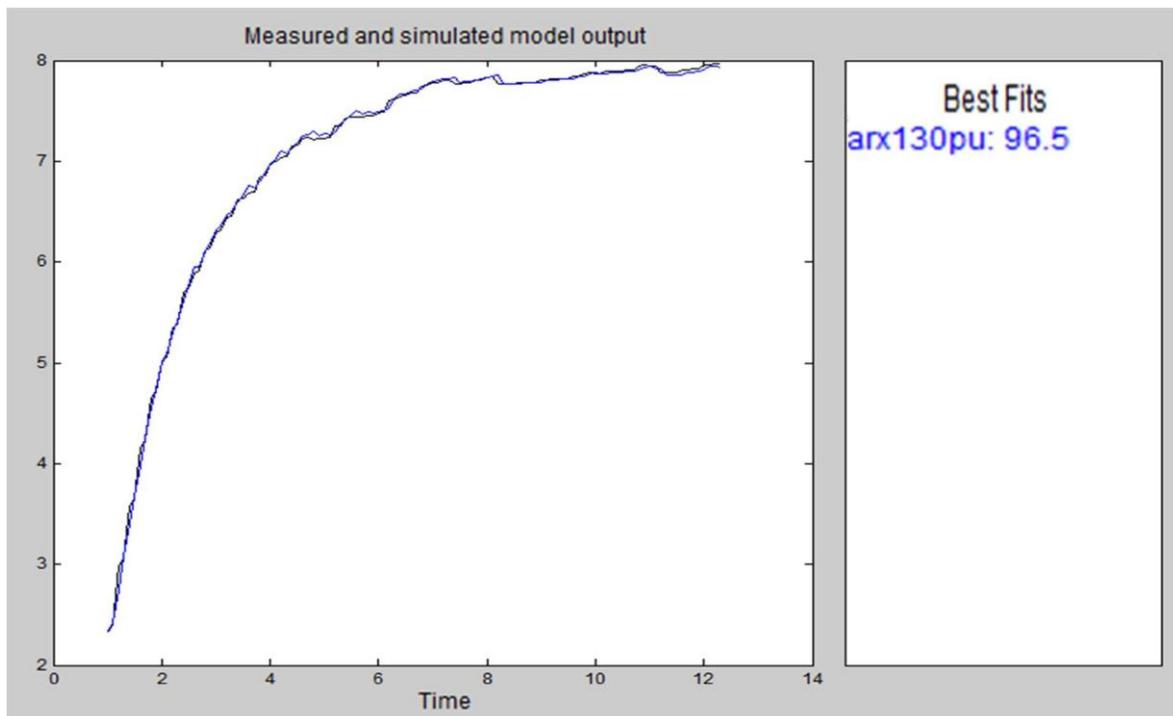
Autoría Propia

Para la estimación del modelo matemático del controlador se utiliza el modelo ARX de parámetros [1 3 0], es decir que tiene un polo y dos ceros con un tiempo

de retardo de cero, dado que los parámetros de GAIN,  $T_I$  y  $T_D$  indican claramente un control PID y tenemos como resultado la siguiente función en z del controlador:

$$CG7 = \frac{0,0273*(z+27,33)*(z-0,8053)}{z*(z-1)} \quad (2-3)$$

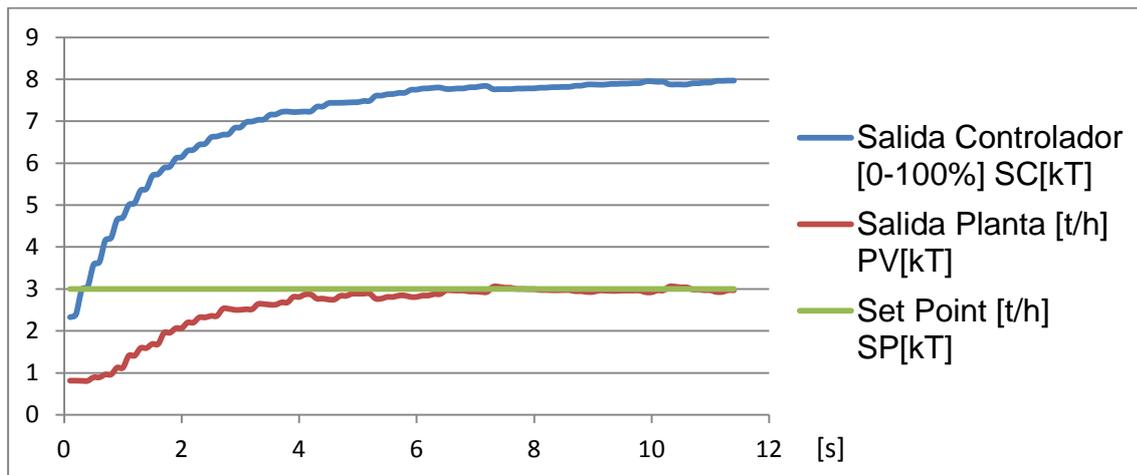
La aproximación de estimación de la planta del controlador PID es de un 96,5% como se puede observar a continuación:



**Figura 29** – Aproximación de respuesta del controlador PID de la banda pesadora-alimentadora de puzolana.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

En la siguiente gráfica podemos observar la respuesta que presenta la planta de la banda G7 ante un escalón de 1 t/h a 3t/h; denotándose un control sin sobreimpulso pero lento.



**Figura 30** – Respuesta PID implantado en la banda pesadora-alimentadora de puzolana.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

#### 2.1.4 RESINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES DE LAS BÁSCULAS PESADORAS–ALIMENTADORAS DE: CLINKER, YESO Y PUZOLANA

Al resintonizar las básculas es necesario elegir primero el tipo de controlador a utilizar según el comportamiento de cada planta, pues dicho comportamiento está representado por la respuesta a una entrada paso donde se puede tener diferentes combinaciones dependiendo de ciertos factores, así:

- Si se obtiene una respuesta sin error de posición en estado estable y sin sobreimpulso; se utiliza un controlador proporcional (P), debido a que necesita ajustarse la velocidad con la que se estabiliza la planta.
- Si se obtiene una respuesta con error de posición en estado estable y sin sobreimpulso; se utiliza un controlador proporcional integral (PI), puesto que se necesita corregir dicho error y la velocidad de respuesta con la que el sistema se estabiliza.
- Si se obtiene una respuesta con oscilación y sin error de posición en estado estable; se utiliza un controlador proporcional derivativo (PD), debido a que la acción derivativa corregirá la oscilación producida por el sobreimpulso y la parte proporcional mejorará la velocidad de respuesta con la que el sistema se estabiliza.

- Si se obtiene una respuesta con error de posición en estado estable y con sobreimpulso; se utiliza un controlador proporcional integral derivativo (PID), debido a que necesita corregir el error de posición compensando la oscilación del sistema debido al sobreimpulso mediante la acción derivativa.

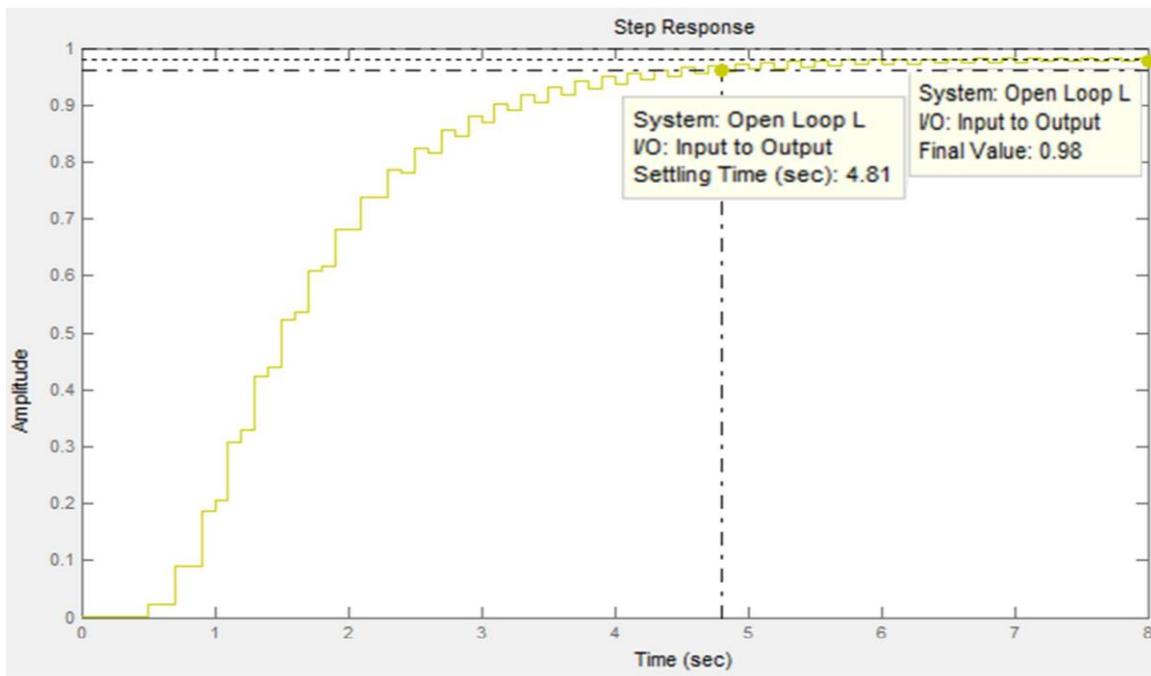
Una vez escogido el controlador se procede a la sintonización partiendo de los ceros ya implantados y modificándolos utilizando el programa MATLAB, en específico la herramienta toolbox “SISOTOOL” y su opción del lugar geométrico de las raíces, ya que así se puede calibrar la ganancia del controlador y en conjunto trabajar con la respuesta paso del sistema en lazo cerrado; para conseguir una respuesta óptima teniendo en cuenta los parámetros de cero sobreimpulso, tiempo de establecimiento bajo y sin error en régimen permanente.

#### **2.1.4.1 Resintonización del controlador de la báscula pesadora–alimentadora de clinker**

La planta de estimación más conveniente seleccionada en apartados anteriores fue la planta de estimación clinker 3 o C3, la cual tiene como función de transferencia la siguiente:

$$C3 = \frac{0,00051817(z + 2.177)(z^2 - 1.06z + 0.9914)(z^2 - 3.864z + 5.133)}{(z^2 + 0.3815z + 1.688)(z^2 + 1.305z + 3.63)z^6(z + 0.9692)(z - 0.8999)(z - 0.6718)} \quad (2-4)$$

Utilizando la herramienta “SISOTOOL” se ingresa la función de transferencia C3 y se la analiza ante una entrada paso en lazo abierto.



**Figura 31** – Respuesta paso en lazo abierto de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Clinker.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Al analizar la figura anterior se puede observar que la planta posee un tiempo de establecimiento de 4,81[s], que no presenta sobreimpulso; pero que posee error de posición en estado estable, debido a esto se opta por sintonizar un controlador PI.

La aproximación de ecuaciones de diseño y ecuaciones de implementación se encuentra al calcular las constantes de integración y derivación del PID, mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6) conjuntamente con los parámetros digitados de Clinker de la tabla 39.

$$K_p = 0,15$$

$$K_D = 0,15 * 0 = 0$$

$$K_I = \frac{0,15}{0,8} = 0,188$$

Reemplazamos las constantes del PID en la ecuación (1-15):

$$PID(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}\right) \left[ z^2 + \left( \frac{\frac{TK_I}{2} - K_P - \frac{2K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}} \right) z + \frac{\frac{K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}} \right]}{z * (z-1)} \quad (2-5)$$

Posteriormente aplicamos la integración trapezoidal con reemplazo de constantes, así:

$$PID_3(z) = \frac{\left(0,15 + \frac{0}{0,1} + \frac{0,1 * 0,188}{2}\right) \left[ z^2 + \left( \frac{\frac{0,1 * 0,188}{2} - 0,15 - \frac{2 * 0}{0,1}}{0,15 + \frac{0}{0,1} + \frac{0,1 * 0,188}{2}} \right) z + \frac{\frac{0}{0,1}}{0,15 + \frac{0}{0,1} + \frac{0,1 * 0,188}{2}} \right]}{z * (z-1)}$$

$$PID_3(z) = \frac{0,1594 * (z - 0,8824)}{(z-1)} \quad (2-6)$$

A continuación comparamos la estimación de la planta del controlador del PID implantado con la discretización trapezoidal:

$$CG_3(z) = \frac{0,2472 * (z - 0,4587)}{z - 1} \quad PID_3(z) = \frac{0,1594 * (z - 0,8824)}{(z - 1)}$$

Luego se procede a realizar una aproximación proporcional en la ganancia del controlador del PID, y una aproximación aritmética en el cero del mismo.

**Tabla 42-** Aproximación entre controladores

	<b>CG<sub>3</sub>(z)</b>	<b>PID<sub>3</sub>(z)</b>	<b>Factores</b>
<b>Ganancia</b>	0,2472	0,1594	0,6447
<b>Cero</b>	-0,4587	-0,8824	-0,4237

Autoría Propia

Estos factores de aproximación se conservan para valores de cero cercanos en las funciones de transferencia de los controladores diseñados. Para finalmente obtener una función de transferencia que cumpla los requerimientos óptimos de diseño es necesario realizar mayor número de pruebas, sin embargo en este caso no es necesario dado que existe una función de transferencia misma que no se conoce pero que posteriormente se encontrará, la cual es utilizada por un diseño “autotuning” del controlador implementado por Industrias Guapán.

Utilizando la función del autotuning se obtienen nuevos parámetros, los cuales se ingresan en el HMI del sistema SCADA para conseguir nuevos datos del controlador del PID.

**Tabla 43-** Parámetros de la planta de clinker arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI.

<b>GAIN</b>	0,237
<b>T<sub>I</sub></b>	3,024
<b>T<sub>D</sub></b>	0
<b>Lag time</b>	1
<b>Dead band</b>	0

Autoría Propia

Al proceder con la estimación de la función de transferencia del “autotuning” del controlador se utiliza 533 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 30 a 50 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], y con ayuda de la herramienta IDENT se obtiene la siguiente función de transferencia del “autotuning”:

$$PID_{\text{auto}}(z) = \frac{0,35137*(z-0,8407)}{(z-1)} \quad (2-7)$$

El cálculo de las constantes de integración y derivación del PID se realiza mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6) conjuntamente con los parámetros arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI de la tabla 43.

$$K_p = 0,237$$

$$K_D = 0,237 * 0 = 0$$

$$K_I = \frac{0,237}{3,024} = 0,078$$

Reemplazamos las anteriores constantes en la ecuación (1-15) para obtener la función de transferencia, utilizando la aproximación mediante integración trapezoidal:

$$PID_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,2409 * (z - 0,9675)}{(z - 1)} \quad (2-8)$$

A continuación se compara la función de transferencia del “autotuning” (2-7), con la discretización trapezoidal (2-8), así:

$$PID_{\text{auto}}(z) = \frac{0,35137 * (z - 0,8407)}{(z - 1)} \quad PID_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,2409 * (z - 0,9675)}{(z - 1)}$$

Luego se procede nuevamente a realizar una aproximación proporcional en la ganancia del controlador del PID, y una aproximación aritmética en el cero del mismo.

**Tabla 44-** Actual aproximación entre controladores de la planta de clinker

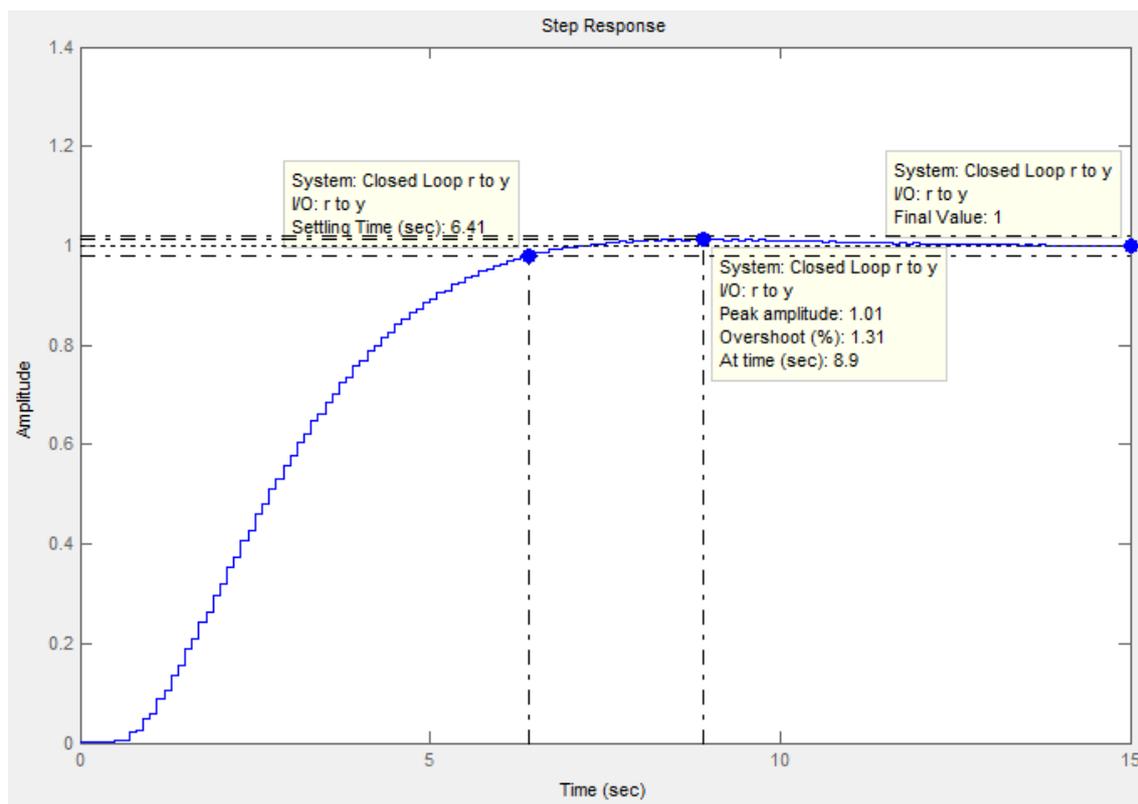
	<b>PID<sub>auto</sub> (z)</b>	<b>PID<sub>autoT</sub> (z)</b>	<b>Factores</b>
<b>Ganancia</b>	0,35137	0,2409	0,6857
<b>Cero</b>	-0,8407	-0,9675	-0,1268

Autoría Propia

La sintonización se realiza mediante el movimiento del cero del controlador en el diagrama de Bode en lazo abierto, y la ganancia mediante el LGR partiendo del controlador instalado CG3 que se ingresa en la ventana “Control and Estimation Tools Manager” de la herramienta “SISOTOOL”; hasta llegar a un punto de equilibrio que cumpla los requerimientos de control siguientes:

- Valor bajo de tiempo de estabilización  $t_s < 8[s]$
- Sobreimpulso menor al 2%, y
- Error de posición en estado estable cero.

Al utilizar el proceso de sintonización mediante la herramienta “SISOTOOL”, se obtiene una respuesta del sistema ante una entrada paso con sus respectivos parámetros de diseño los cuales se muestran a continuación:



**Figura 32** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado del diseño de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Clinker.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Y también se obtiene la función de transferencia del controlador diseñado, la cual se presenta de la siguiente manera:

$$PI_{G3} = \frac{0,22*(z-0,8407)}{(z-1)} \quad (2-9)$$

Después se realiza una comprobación de los parámetros del diseño de la planta con los parámetros de requerimiento dados por la empresa dando como resultado un cumplimiento total de los mismos. Los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 45-** Comparación de los parámetros del diseño con los de requerimiento para la planta de clinker.

Parámetros	Requerimiento	Del diseño (Sintonizado)
<b>ts [s]</b>	< 8	6,41
<b>Mp [%]</b>	< 2	1,31
<b>Ep [unidades]</b>	0	0

Autoría Propia

Mediante el uso de los factores de la Tabla 44 se transforma la función de transferencia del controlador resintonizado (diseñado), en una función de transferencia del controlador a implementar en el PLC; mediante la ecuación (2-7):

$$PID_{res} = \frac{0,22*0,6857*(z-0,8407+(-0,1268))}{(z-1)} = \frac{0,1508*(z-0,9675)}{(z-1)} \quad (2-10)$$

Teniendo la planta del controlador diseñado se procede al traspaso de ecuaciones para obtener los parámetros que se ingresarán en el PLC; de la ecuación (2-5) se realiza el despeje de los parámetros  $K_P$ ,  $K_D$  y  $K_I$  por igualación de términos como se observa a continuación:

$$\frac{K*[z^2+B*z+C]}{z*(z-1)} = \frac{\left(K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}\right) \left[ z^2 + \left( \frac{TK_I - K_P - \frac{2K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}} \right) * z + \frac{\frac{K_D}{T}}{K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2}} \right]}{z*(z-1)} \quad (2-11)$$

Por lo tanto se tiene las ecuaciones siguientes:

$$K = K_P + \frac{K_D}{T} + \frac{TK_I}{2} \quad (2-12)$$

$$B = \frac{\frac{TK_I - K_P - \frac{2K_D}{T}}{K}}{K} \quad (2-13)$$

$$C = \frac{\frac{K_D}{T}}{K} \quad (2-14)$$

De la ecuación (2-14) se despeja  $K_D$  por lo que se obtiene:

$$K_D = CKT \quad (2-15)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones entre (2-12) y (2-13), y reemplazando la ecuación (2-15) se llega a la relación siguiente:

$$K_I = \frac{K(1+B)+CK}{T} \quad (2-16)$$

Finalmente para encontrar  $K_P$ , reemplazamos las ecuaciones (2-15) y (2-16) en la ecuación (2-12).

$$K_P = K - \frac{K(1+B)}{2} - \frac{3CK}{2} \quad (2-17)$$

Se utiliza las ecuaciones (2-15), (2-16) y (2-17) para encontrar los parámetros de integración, derivación y proporcional del PID resintonizado:

**Tabla 46-** Parámetros PID.

<b>K</b>	0,1508	$K_D$	0
<b>B</b>	-0,9675	$K_T$	0,0491
<b>C</b>	0	$K_P$	0,1484

Autoría Propia

Para obtener los parámetros a ingresar en el HMI se despejan los valores de  $T_D$  y  $T_I$  mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6), de donde resultan las siguientes ecuaciones:

$$T_D = \frac{K_D}{K_P} \quad (1-5)$$

$$T_I = \frac{K_p}{K_I} \quad (1-6)$$

Dando como resultado los siguientes valores a ingresar en el HMI:

**Tabla 47-** Parámetros HMI - PID.

<b><math>T_D</math></b>	0
<b><math>T_I</math></b>	3,024
<b><math>K_P</math></b>	0,1484

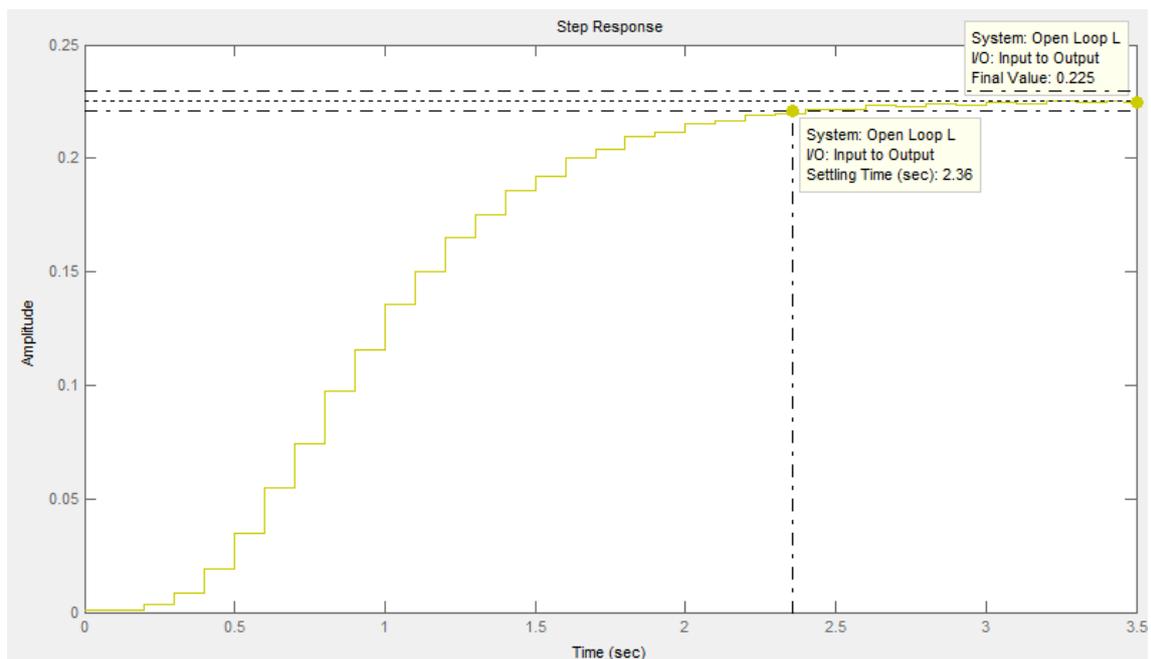
Autoría Propia

#### 2.1.4.2 Resintonización del controlador de la báscula pesadora–alimentadora de Yeso.

La planta de estimación más conveniente seleccionada en apartados anteriores fue la planta de estimación Yeso pasos, la cual tiene como función de transferencia la siguiente:

$$Y_P = \frac{0,00096614 (z^2 + 2,092z + 1,323)(z^2 - 0,6082z + 0,5346)}{(z^2 + 0,4829z + 1,147)(z^2 - 2,574z + 4,342)} \frac{1}{z^5(z + 0,9656)(z - 0,7806)(z - 0,7038)} \quad (2-18)$$

Utilizando la herramienta “SISOTOOL” se ingresa la función de transferencia YP y se la analiza ante una entrada paso en lazo abierto.



**Figura 33** – Respuesta paso en lazo abierto de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Yeso

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Al analizar la figura anterior se puede observar que la planta posee un tiempo de establecimiento de 2,36[s], que no presenta sobreimpulso; pero que posee error de posición en estado estable, debido a esto se opta por sintonizar un controlador PI.

Utilizando la función del autotuning se obtienen nuevos parámetros, los cuales se ingresan en el HMI del sistema SCADA para conseguir nuevos datos del controlador del PID.

**Tabla 48-** Parámetros de la planta de yeso arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI.

<b>GAIN</b>	0,15
<b>TI</b>	2,566
<b>T<sub>D</sub></b>	0
<b>Lag time</b>	1
<b>Dead band</b>	0

Autoría Propia

Al proceder con la estimación de la función de transferencia del “autotuning” del controlador se utiliza 101 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 1 a 3 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], y con ayuda de la herramienta IDENT se obtiene la siguiente función de transferencia del “autotuning”:

$$PID_{\text{auto}}(z) = \frac{1,524*(z-0,8187)}{(z-1)} \quad (2-19)$$

El cálculo de las constantes de integración y derivación del PID se realiza mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6) conjuntamente con los parámetros de la planta de yeso, arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI de la tabla 48.

$$K_P = 0,15$$

$$K_D = 0,15 * 0 = 0$$

$$K_I = \frac{0,15}{2,566} = 0,058$$

Reemplazamos las anteriores constantes en la ecuación (1-15) para obtener la función de transferencia, utilizando la aproximación mediante integración trapezoidal:

$$PID_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,1529*(z-0,9618)}{(z-1)} \quad (2-20)$$

A continuación se compara la función de transferencia del “autotuning” (2-19), con la discretización trapezoidal (2-20), así:

$$\text{PID}_{\text{auto}}(z) = \frac{1,524 * (z - 0,8187)}{(z - 1)} \qquad \text{PID}_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,1529 * (z - 0,9618)}{(z - 1)}$$

Luego se procede nuevamente a realizar una aproximación proporcional en la ganancia del controlador del PID, y una aproximación aritmética en el cero del mismo.

**Tabla 49-** Aproximación actual entre controladores de la planta de Yeso

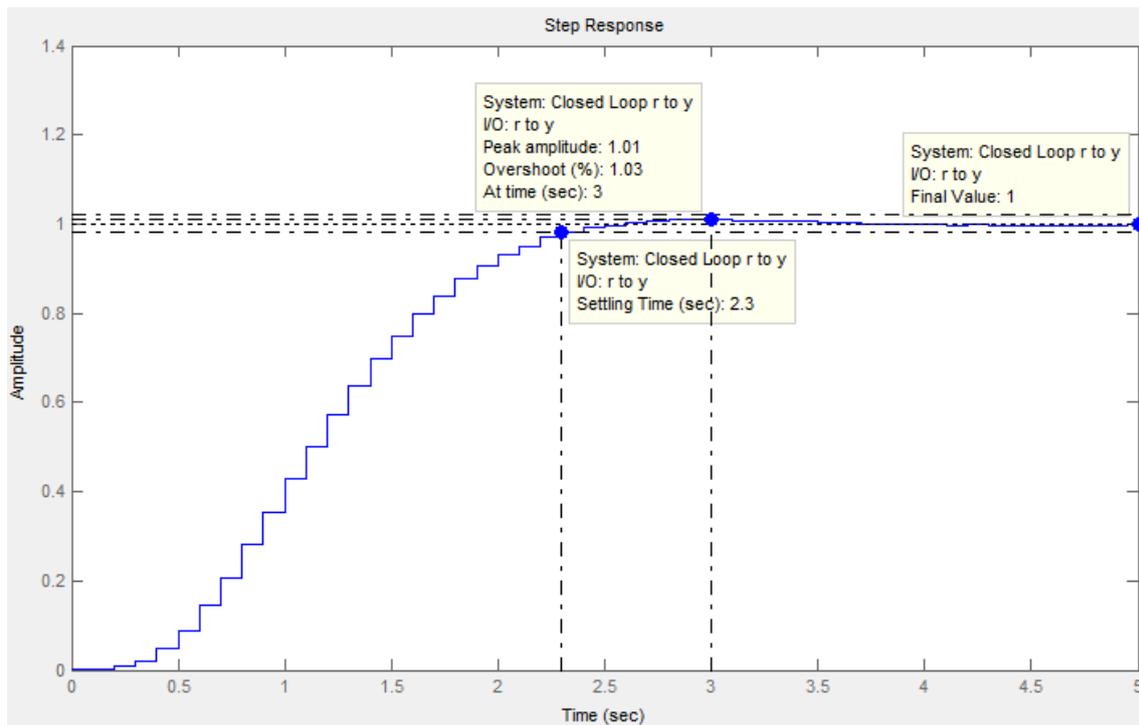
	<b>PID<sub>auto</sub> (z)</b>	<b>PID<sub>autoT</sub> (z)</b>	<b>Factores</b>
<b>Ganancia</b>	1,524	0,1529	0,1003
<b>Cero</b>	-0,8187	-0,9618	-0,1431

Autoría Propia

La sintonización se realiza mediante el movimiento del cero del controlador en el diagrama de Bode en lazo abierto, y la ganancia mediante el LGR partiendo del controlador instalado CG11 que se ingresa en la ventana “Control and Estimation Tools Manager” de la herramienta “SISOTOOL”; hasta llegar a un punto de equilibrio que cumpla los requerimientos de control siguientes:

- Valor bajo de tiempo de estabilización  $t_s < 5[s]$
- Sobreimpulso menor al 2%, y
- Error de posición en estado estable cero.

Al utilizar el proceso de sintonización mediante la herramienta “SISOTOOL”, se obtiene una respuesta del sistema ante una entrada paso con sus respectivos parámetros de diseño los cuales se muestran a continuación:



**Figura 34** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado del diseño de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Yeso.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Y también se obtiene la función de transferencia del controlador diseñado, la cual se presenta de la siguiente manera:

$$PI_{G11} = \frac{2,18*(z-0,83)}{(z-1)} \quad (2-21)$$

Después se realiza una comprobación de los parámetros del diseño de la planta con los parámetros de requerimiento dados por la empresa dando como resultado un cumplimiento total de los mismos.

**Tabla 50-** Comparación de los parámetros del diseño con los de requerimiento para la planta de yeso.

Parámetros	Requerimiento	Del diseño (Sintonizado)
<b>ts [s]</b>	< 5	2,3
<b>Mp [%]</b>	< 2	1,03
<b>Ep [unidades]</b>	0	0

Autoría Propia

Mediante el uso de los factores de la Tabla 49 se transforma la función de transferencia del controlador resintonizado (diseñado), en una función de transferencia del controlador a implementar en el PLC; mediante la ecuación (2-7):

$$PID_{res} = \frac{2,18*0,1003*(z-0,83+(-0,1431))}{(z-1)} = \frac{0,2187*(z-0,9731)}{(z-1)} \quad (2-22)$$

Teniendo la planta del controlador diseñado se procede al traspaso de ecuaciones para obtener los parámetros que se ingresarán en el PLC. Se utiliza las ecuaciones (2-15), (2-16) y (2-17) para encontrar los parámetros de integración, derivación y proporcional del PID resintonizado:

**Tabla 51-** Parámetros PID.

<b>K</b>	0,2187	<b>K<sub>D</sub></b>	0
<b>B</b>	-0,9731	<b>K<sub>I</sub></b>	0,0589
<b>C</b>	0	<b>K<sub>P</sub></b>	0,2158

Autoría Propia

Para obtener los parámetros a ingresar en el HMI se despejan los valores de  $T_D$  y  $T_I$  mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6), dando como resultado los siguientes valores a ingresar en el HMI:

**Tabla 52-** Parámetros HMI - PID.

<b>T<sub>D</sub></b>	0
<b>T<sub>I</sub></b>	3,664
<b>K<sub>P</sub></b>	0,216

Autoría Propia

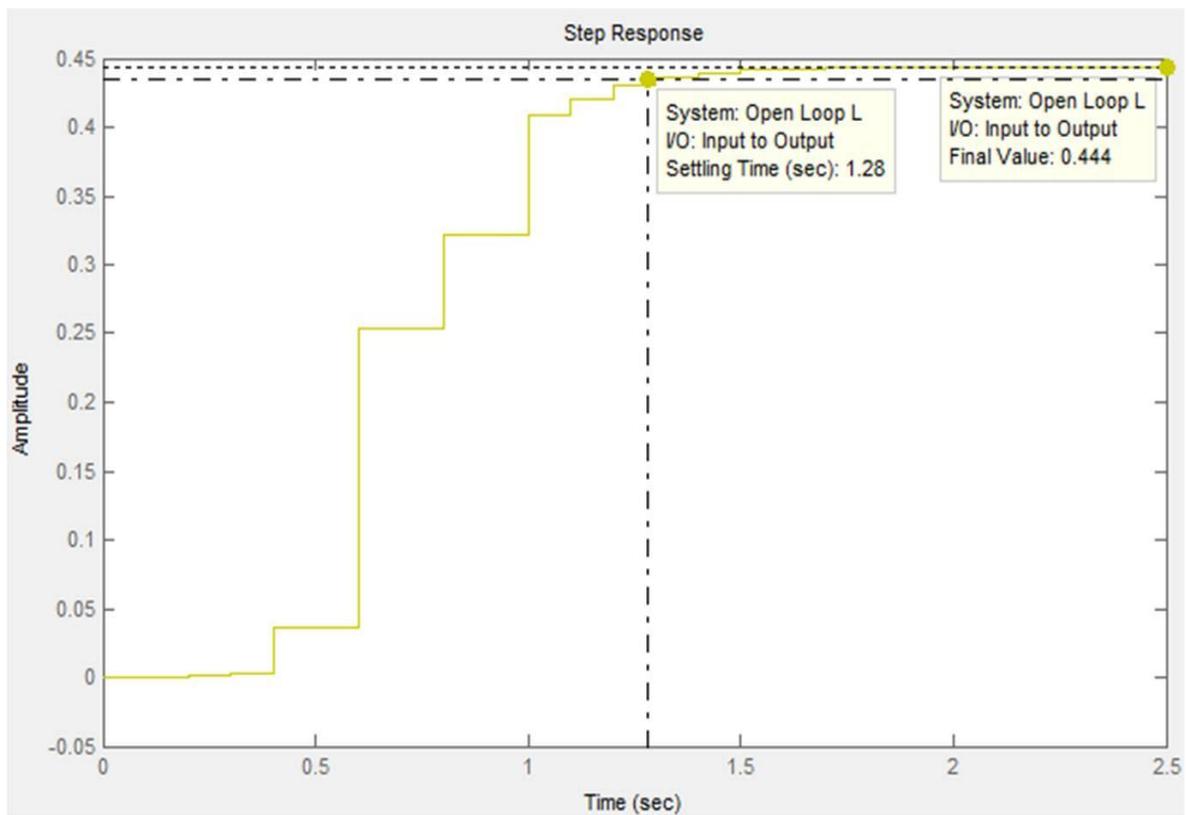
### 2.1.4.3 Resintonización del controlador de la báscula pesadora–alimentadora de Puzolana

La planta de estimación más conveniente seleccionada en apartados anteriores fue la planta de estimación Puzolana 2 o P2, la cual tiene como función de transferencia la siguiente:

$$P2 = \frac{-3.4685e - 005 (z - 16,73)(z + 5,13)(z - 0,3621)(z^2 - 1,071z + 0,6)}{(z^2 + 0,9855z + 0,6146)(z^2 + 1,142z + 6,874)(z^2 - 3,069z + 10,16)} \cdot \frac{1}{z^9(z - 0,5707)(z + 0,122)}$$

(2-23)

Utilizando la herramienta “SISOTOOL” se ingresa la función de transferencia YP y se la analiza ante una entrada paso en lazo abierto.



**Figura 35** – Respuesta paso en lazo abierto de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Puzolana.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Al analizar la figura anterior se puede observar que la planta posee un tiempo de establecimiento de 1,26[s], que no presenta sobreimpulso; pero que posee error de posición en estado estable, debido a esto se opta por sintonizar un controlador PI.

Utilizando la función del autotuning se obtienen nuevos parámetros, los cuales se ingresan en el HMI del sistema SCADA para conseguir nuevos datos del controlador del PID.

**Tabla 53-** Parámetros de la planta de puzolana arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI.

<b>GAIN</b>	0,189
<b>T<sub>I</sub></b>	1,822
<b>T<sub>D</sub></b>	0
<b>Lag time</b>	1
<b>Dead band</b>	0

Autoría Propia

Al proceder con la estimación de la función de transferencia del “autotuning” del controlador se utiliza 71 datos tomados de la planta del controlador en lazo cerrado, en un paso de 1 a 3 [t/h], con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], y con ayuda de la herramienta IDENT se obtiene la siguiente función de transferencia del “autotuning”:

$$PID_{\text{auto}}(z) = \frac{1,1819*(z-0,8161)}{(z-1)} \quad (2-24)$$

El cálculo de las constantes de integración y derivación del PID se realiza mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6) conjuntamente con los parámetros de la planta de yeso, arrojados por el autotuning e ingresados en el HMI de la tabla 53.

$$K_P = 0,189$$

$$K_D = 0,189 * 0 = 0$$

$$K_I = \frac{0,189}{1,822} = 0,104$$

Reemplazamos las anteriores constantes en la ecuación (1-15) para obtener la función de transferencia, utilizando la aproximación mediante integración trapezoidal:

$$PID_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,1942*(z-0,9466)}{(z-1)} \quad (2-25)$$

A continuación se compara la función de transferencia del “autotuning” (2-24), con la discretización trapezoidal (2-25), así:

$$\text{PID}_{\text{auto}}(z) = \frac{1,1819 * (z - 0,8161)}{(z - 1)} \qquad \text{PID}_{\text{autoT}}(z) = \frac{0,1942 * (z - 0,9466)}{(z - 1)}$$

Luego se procede nuevamente a realizar una aproximación proporcional en la ganancia del controlador del PID, y una aproximación aritmética en el cero del mismo.

**Tabla 54-** Aproximación actual entre controladores de la planta de Yeso

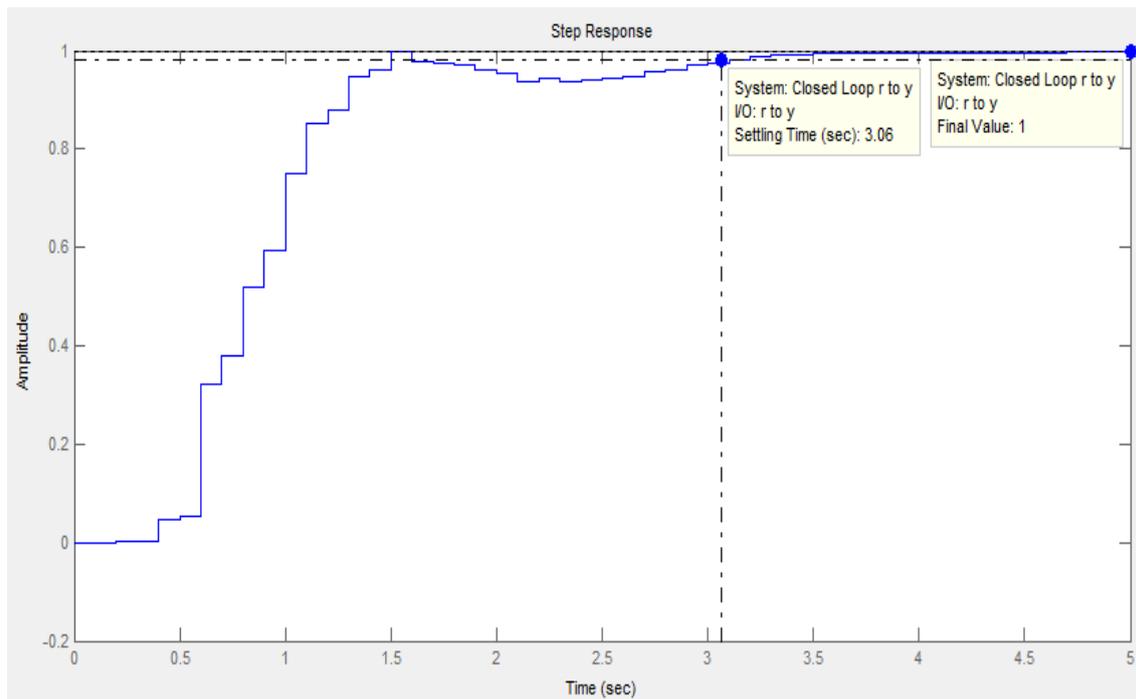
	<b>PID<sub>auto</sub> (z)</b>	<b>PID<sub>autoT</sub> (z)</b>	<b>Factores</b>
<b>Ganancia</b>	1,1819	0,1942	0,1643
<b>Cero</b>	-0,8161	-0,9466	-0,1305

Autoría Propia

La sintonización se realiza mediante el movimiento del cero del controlador en el diagrama de Bode en lazo abierto, y la ganancia mediante el LGR partiendo del controlador instalado CG7 que se ingresa en la ventana “Control and Estimation Tools Manager” de la herramienta “SISOTOOL”; hasta llegar a un punto de equilibrio que cumpla los requerimientos de control siguientes:

- Valor bajo de tiempo de estabilización  $t_s < 5[s]$
- Sobreimpulso menor al 2%, y
- Error de posición en estado estable cero.

Al utilizar el proceso de sintonización mediante la herramienta “SISOTOOL”, se obtiene una respuesta del sistema ante una entrada paso con sus respectivos parámetros de diseño los cuales se muestran a continuación:



**Figura 36** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado del diseño de la planta de la banda pesadora-alimentadora de Puzolana.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Y también se obtiene la función de transferencia del controlador diseñado, la cual se presenta de la siguiente manera:

$$PI_{G7} = \frac{1,19*(z-0,8)}{(z-1)} \quad (2-26)$$

Después se realiza una comprobación de los parámetros del diseño de la planta con los parámetros de requerimiento dados por la empresa dando como resultado un cumplimiento total de los mismos.

**Tabla 55-** Comparación de los parámetros del diseño con los de requerimiento para la planta de puzolana.

Parámetros	Requerimiento	Del diseño (Sintonizado)
<b>ts [s]</b>	< 5	3,06
<b>Mp [%]</b>	< 2	0
<b>Ep [unidades]</b>	0	0

Autoría Propia

Mediante el uso de los factores de la Tabla 54 se transforma la función de transferencia del controlador resintonizado (diseñado), en una función de transferencia del controlador a implementar en el PLC; mediante la ecuación (2-7):

$$PID_{res} = \frac{1,19*0,1643*(z-0,8+(-0,1305))}{(z-1)} = \frac{0,1955*(z-0,9305)}{(z-1)} \quad (2-27)$$

Teniendo la planta del controlador diseñado se procede al traspaso de ecuaciones para obtener los parámetros que se ingresarán en el PLC. Se utiliza las ecuaciones (2-15), (2-16) y (2-17) para encontrar los parámetros de integración, derivación y proporcional del PID resintonizado:

**Tabla 56-** Parámetros PID.

<b>K</b>	0,1955	<b>K<sub>D</sub></b>	0
<b>B</b>	-0,9305	<b>K<sub>I</sub></b>	0,136
<b>C</b>	0	<b>K<sub>P</sub></b>	0,189

Autoría Propia

Para obtener los parámetros a ingresar en el HMI se despejan los valores de  $T_D$  y  $T_I$  mediante las ecuaciones (1-5) y (1-6), dando como resultado los siguientes valores a ingresar en el HMI:

**Tabla 57-** Parámetros HMI - PID.

<b>T<sub>D</sub></b>	0
<b>T<sub>I</sub></b>	1,388
<b>K<sub>P</sub></b>	0,139

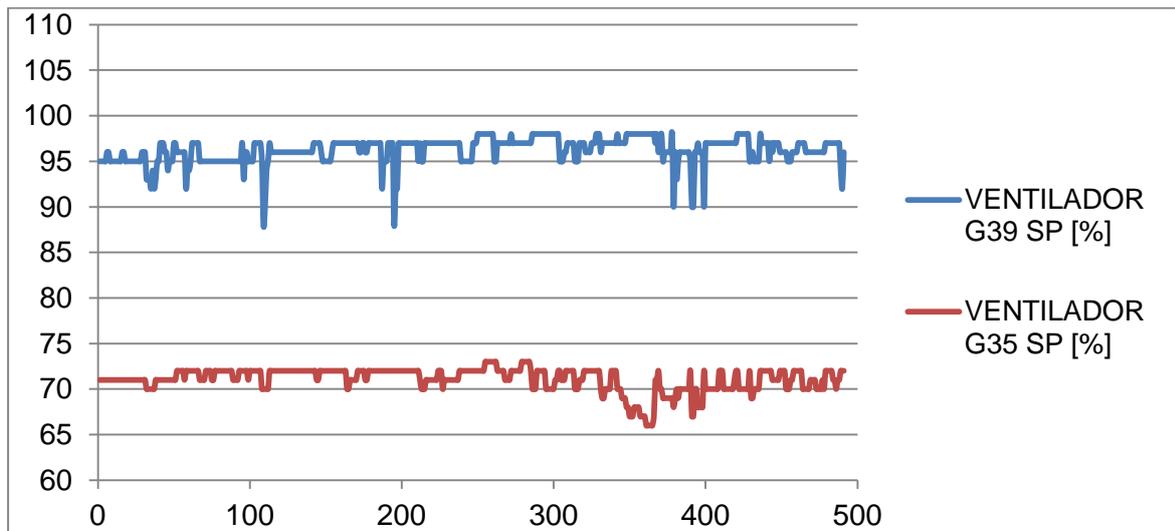
Autoría Propia

## **2.2 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS INFLUYENTES EN BLAINE Y RETENIDO DEL CEMENTO**

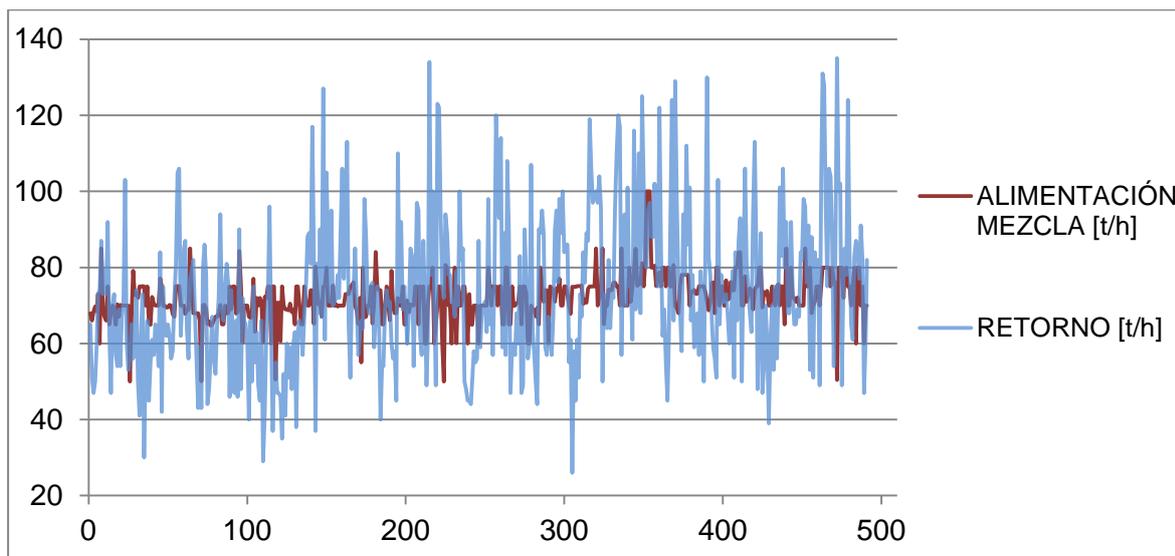
El Blaine y Retenido son variables de finura del cemento, las cuales están influenciadas por la cantidad de material de retorno y alimentación que se tiene en el molino de cemento; para el cambio en el valor del retorno los panelistas tienen la necesidad de variar los valores de seteo de velocidad de los ventiladores G39 y G35; para el análisis de los valores de los seteos de velocidad de los ventiladores se procede a ubicar un rango de variación para los mismos.

### **2.2.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE SETEO, ALIMENTACIÓN, BLAINE Y RETENIDO.**

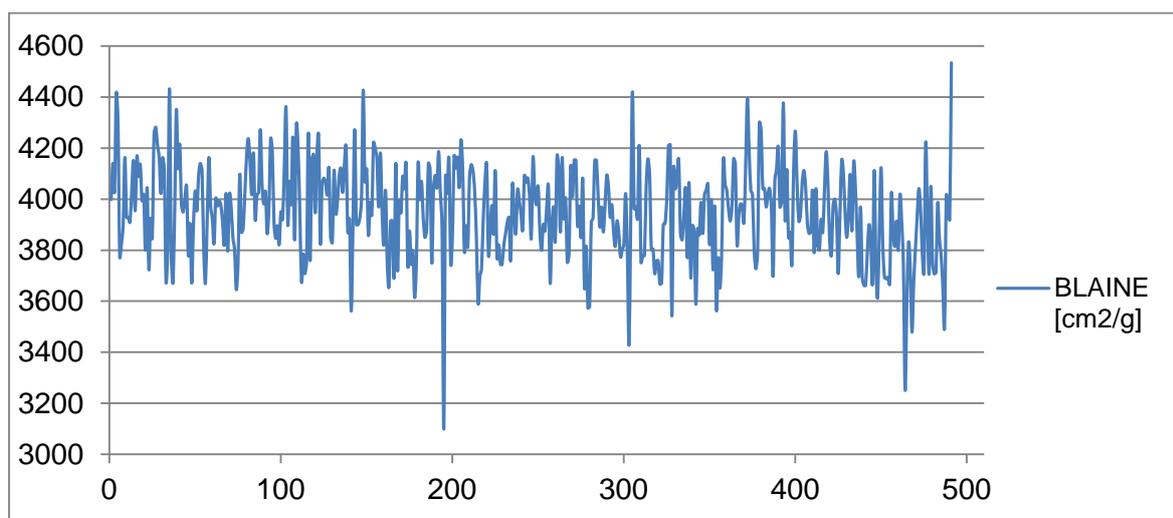
Se tomaron 491 datos en un periodo de 3 meses cada 2 horas, en horas normales y estables de trabajo como se puede observar en el ANEXO F; con estos datos se pueden obtener las siguientes gráficas:



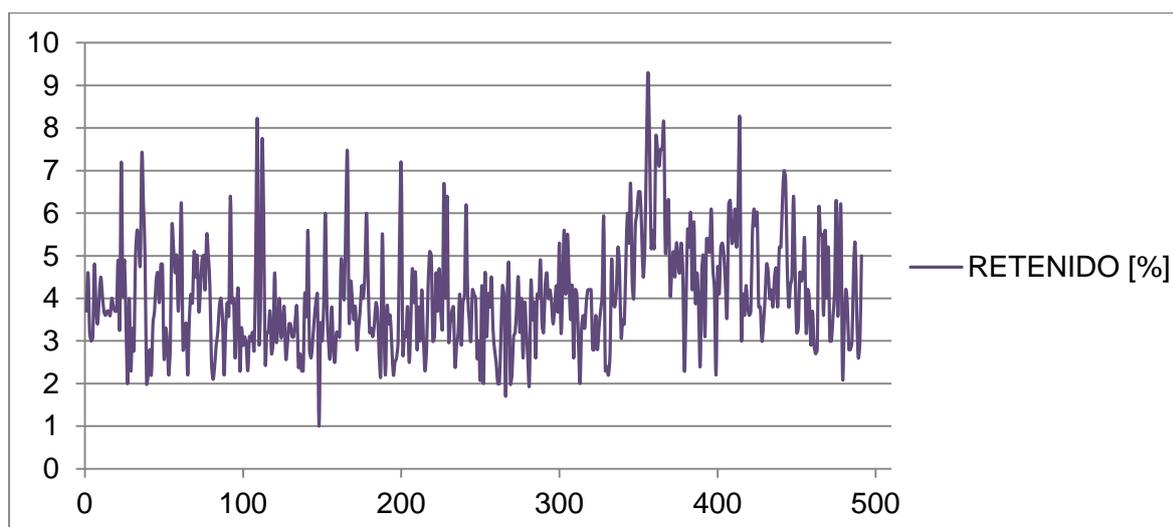
**Figura 37** – Datos de los seteos de velocidad de los ventiladores G39 y G35.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 38** – Datos de la alimentación y el retorno del molino de cemento.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 39** – Datos de Blaine obtenidos mediante pruebas de laboratorio.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

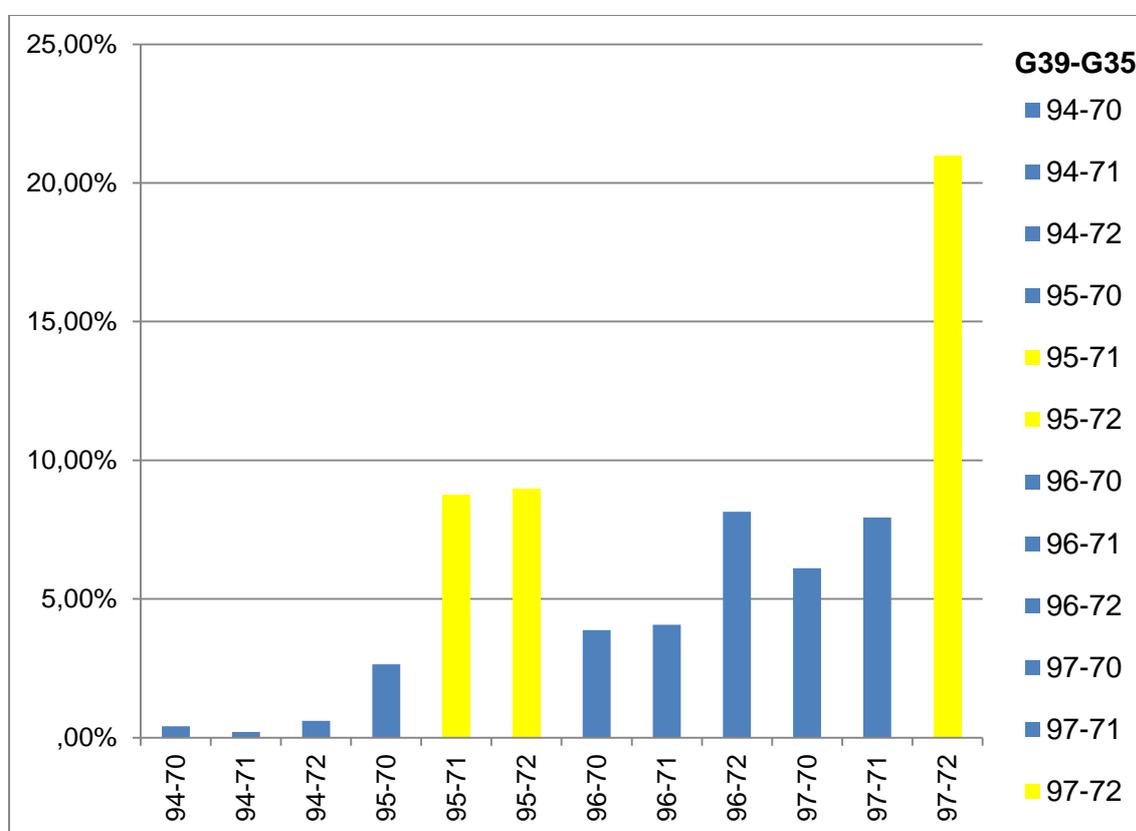


**Figura 40** – Datos de Retenido obtenidos mediante pruebas de laboratorio.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Las figuras anteriores demuestran que con el actual sistema de muestreo de datos (toma de muestras cada dos horas) no se puede definir un comportamiento coherente en respuesta a cambios de las variables de los seteos de velocidad de los ventiladores G39 y G35, debido a que el tiempo para la toma de una muestra es muy amplio; por esta razón se ve la necesidad de realizar una nueva toma de

datos con un periodo de tiempo menor al actual el cual será de 2 minutos durante tres horas.

Antes de comenzar con la nueva toma de datos se realiza un análisis de las combinaciones más utilizadas en los valores de seteo de los ventiladores G39 y G35, para determinar rangos de variación tolerables; luego se realiza una ponderación de las combinaciones de seteo más utilizadas, y de los 491 datos obtenidos se contabiliza la recurrencia de cada combinación, obteniendo la siguiente figura:



**Figura 41** – Ponderación combinaciones seteos de velocidad.

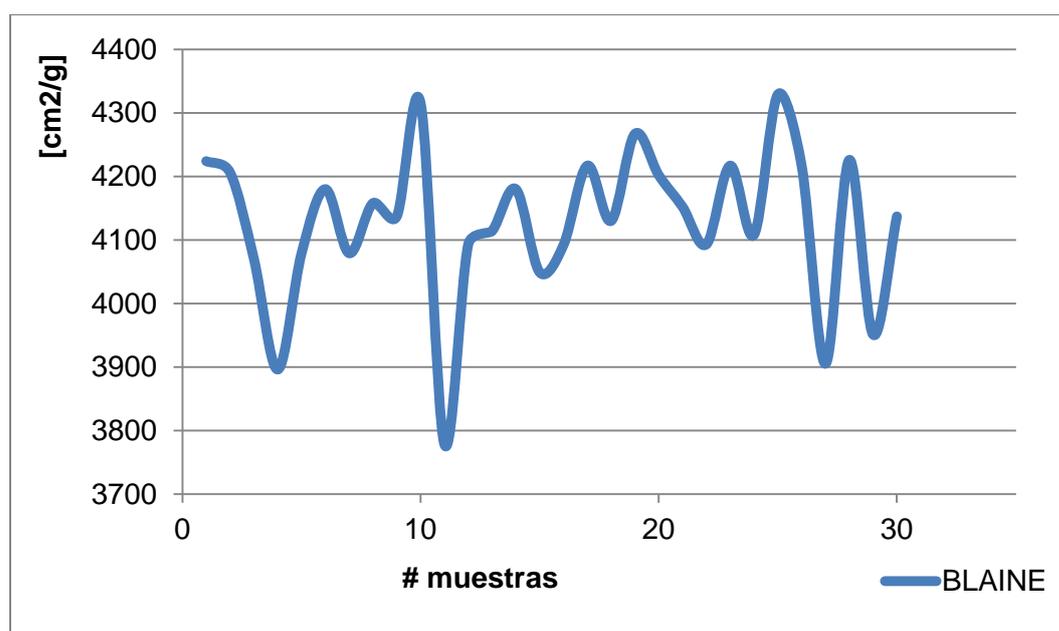
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Al observar la figura anterior se distinguen tres combinaciones que son las más utilizadas, siendo éstas los valores de seteo de velocidad, 97-72, 95-72 y 95-71, de los ventiladores G39 y G35 respectivamente.

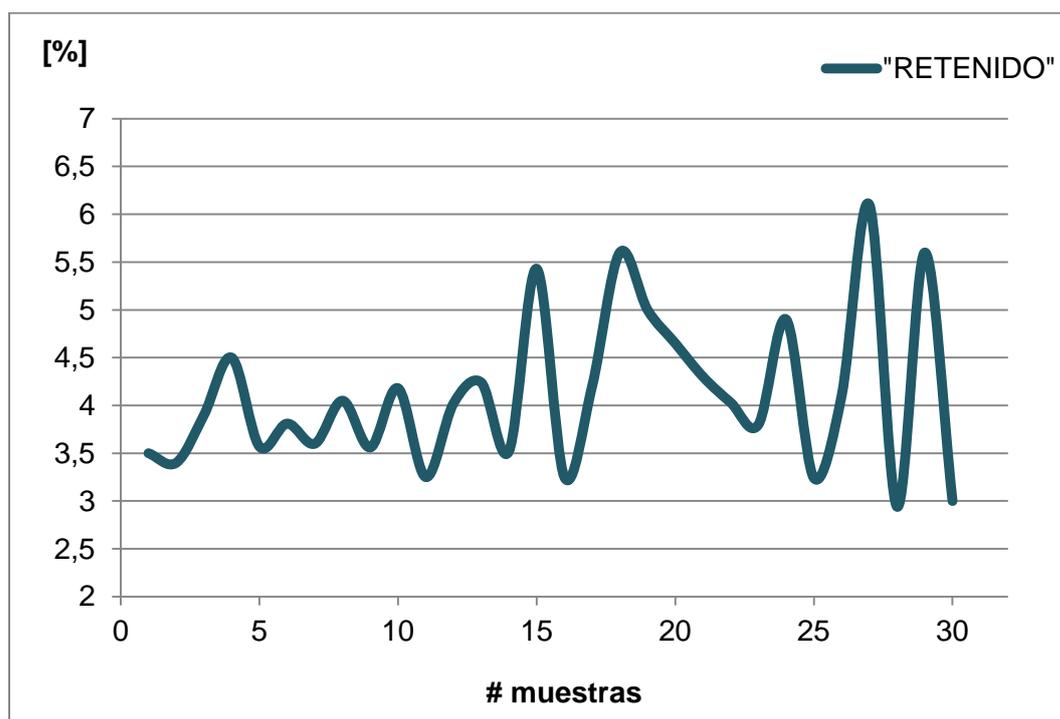
Las pruebas se realizaron mediante la toma de muestra de polvo de cemento en la banda de despacho cada dos minutos, de tal manera que al mismo instante de tiempo se obtenía los datos de alimentación y retorno en el molino de cemento (ANEXO G).

Los valores de Blaine y Retenido se obtienen al llevar las muestras al laboratorio de calidad, donde a cada muestra debidamente etiquetada se divide en dos fracciones: la primera de 2,7458 g. y la segunda de 1g. A la primera fracción se le realiza la prueba de Blaine procesándola en un aparato de Blaine, y a la segunda fracción se le realiza la prueba de retenido en una malla normalizada de 45 [um].

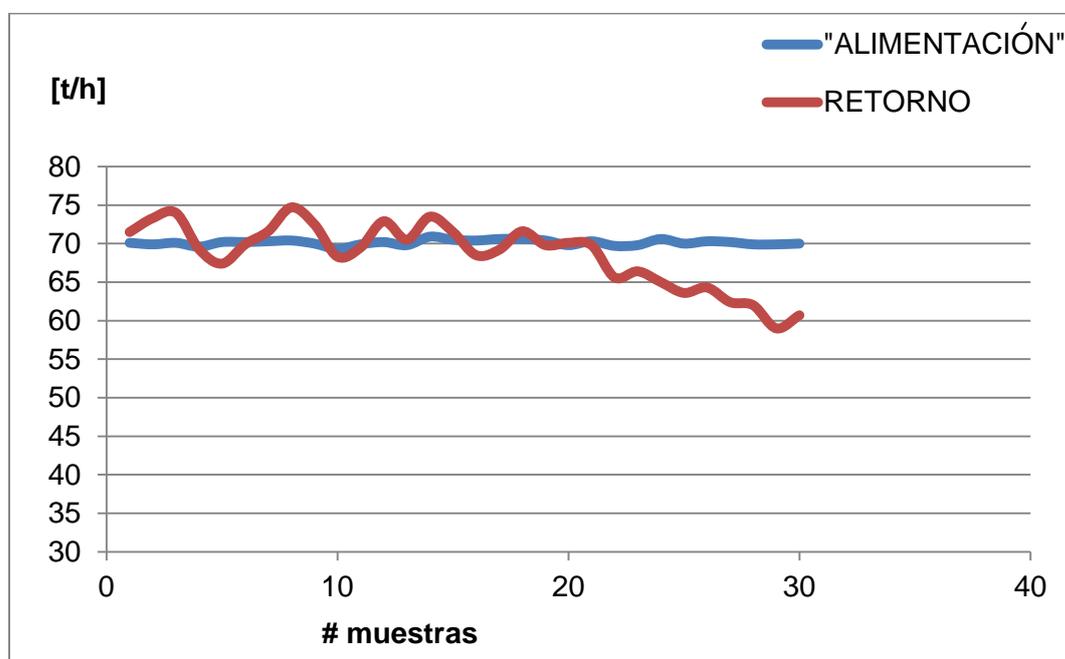
Una vez realizado esto se procede con la toma de datos la cual se divide en tres etapas correspondiente a las tres combinaciones seleccionadas; en la primera etapa donde  $G39=95$  y  $G35=72$  se pueden observar las siguientes gráficas:



**Figura 42** – Datos de Blaine en la etapa 1, obtenidos mediante pruebas de laboratorio.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja



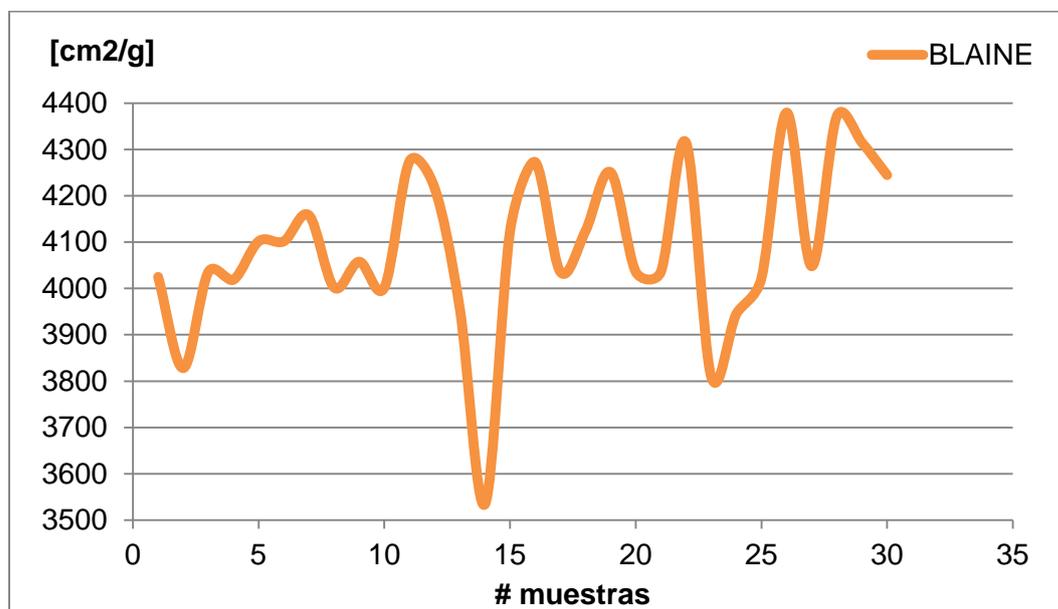
**Figura 43** – Datos de Retenido obtenidos en la etapa 1 mediante pruebas de laboratorio.  
Elaborado por: Argoti-Loja



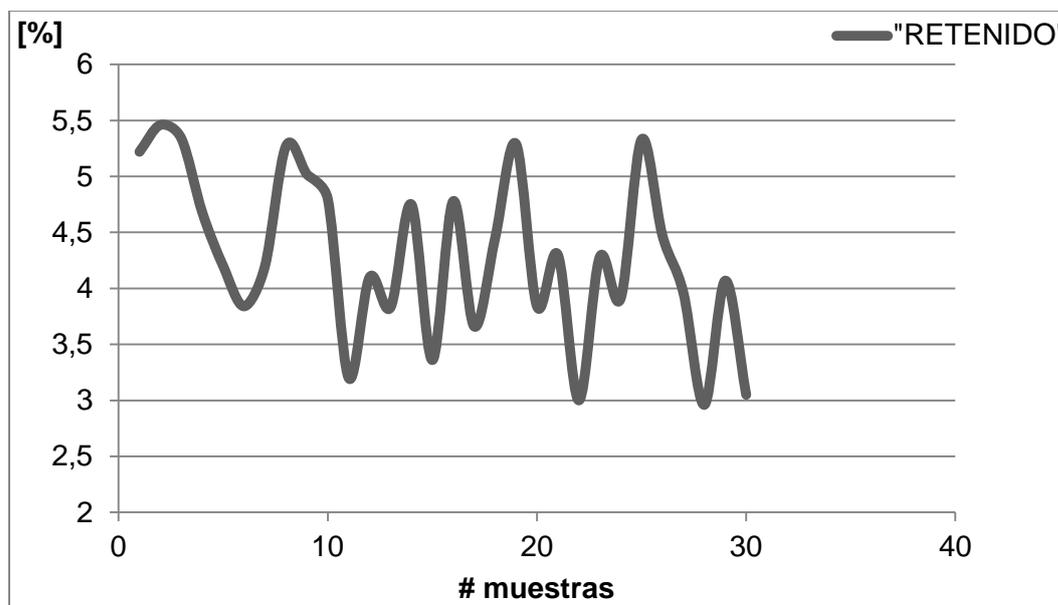
**Figura 44** – Datos de la alimentación y el retorno del molino de cemento obtenidos en la etapa 1.

Elaborado por: Argoti-Loja

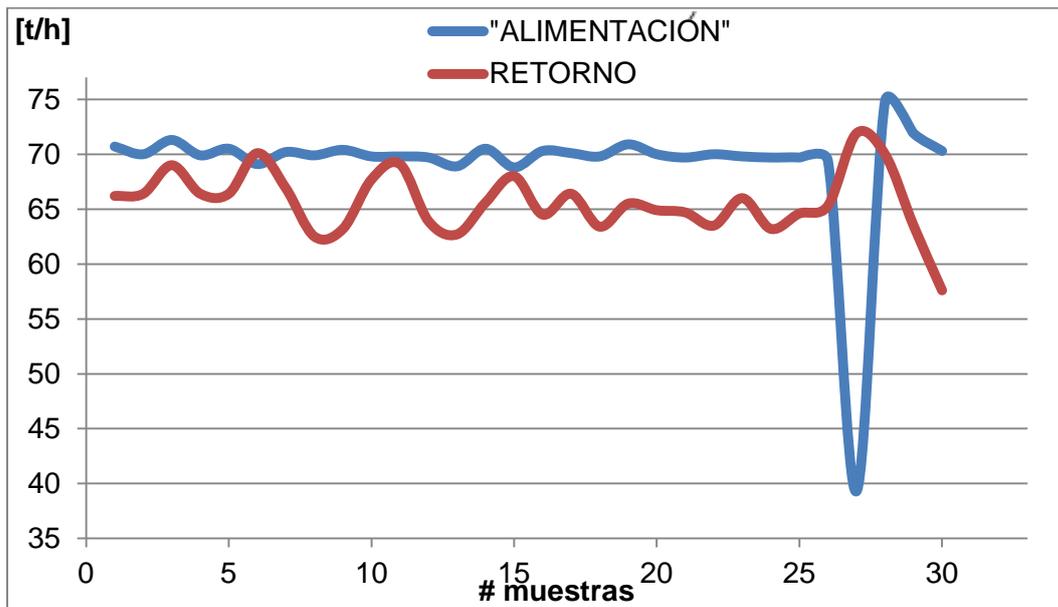
En la segunda etapa donde  $G_{39} = 95$  y  $G_{35} = 71$  se pueden observar en cambio las siguientes gráficas:



**Figura 45** – Datos de Blaine en la etapa 2, obtenidos mediante pruebas de laboratorio.  
Elaborado por: Argoti-Loja



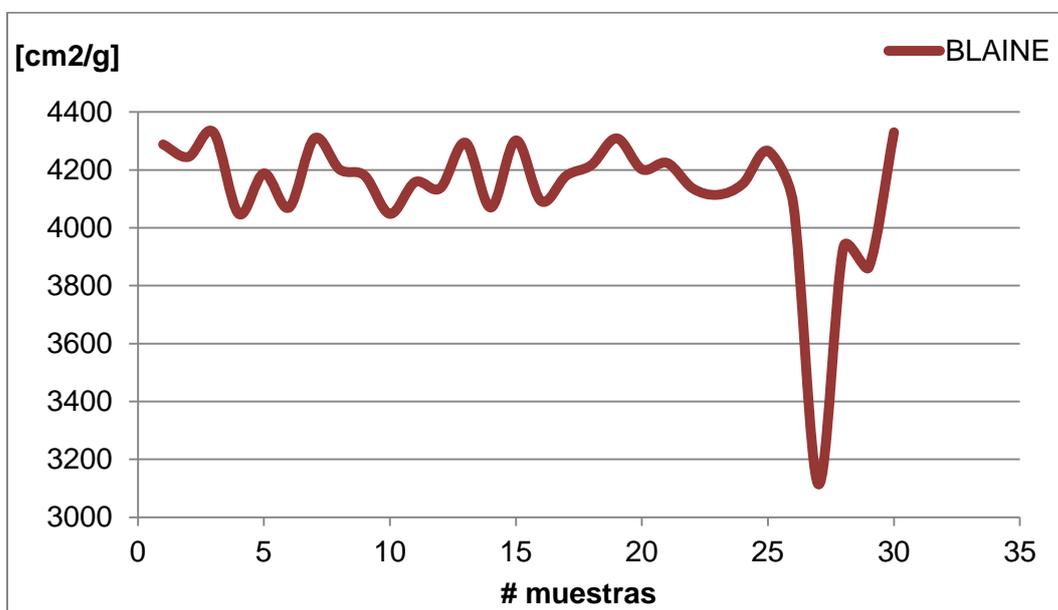
**Figura 46** – Datos de Retenido obtenidos en la etapa 2 mediante pruebas de laboratorio.  
Elaborado por: Argoti-Loja



**Figura 47** – Datos de la alimentación y el retorno del molino de cemento obtenidos en la etapa 2.

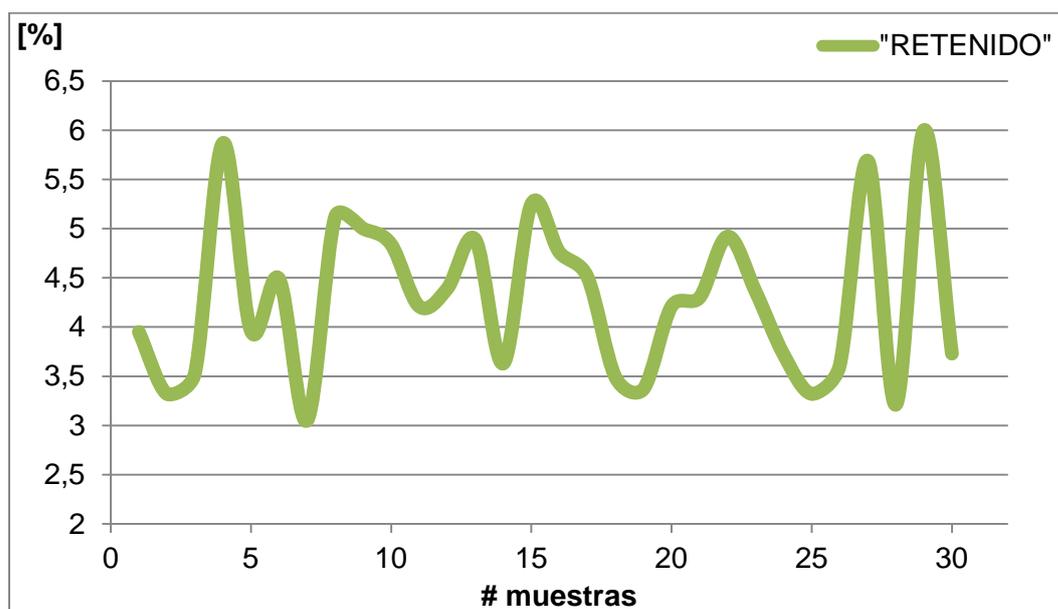
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Y en la tercera etapa donde  $G39=97$  y  $G35=72$  se pueden observar las siguientes gráficas:

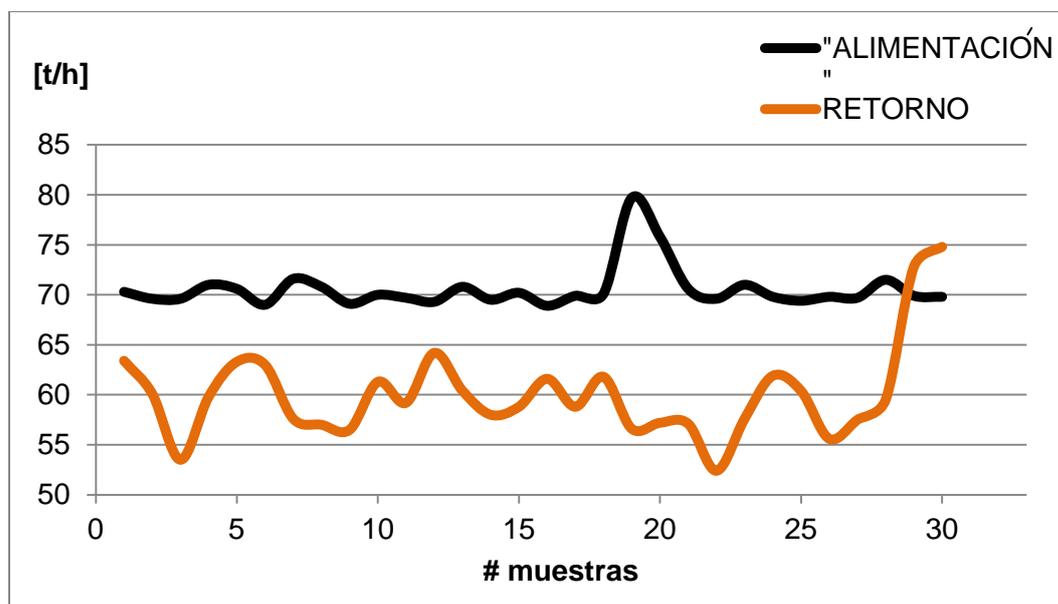


**Figura 48** – Datos de Blaine en la etapa 3, obtenidos mediante pruebas de laboratorio.

**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 49** – Datos de Retenido obtenidos en la etapa 3 mediante pruebas de laboratorio.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 50** – Datos de la alimentación y el retorno del molino de cemento obtenidos en la etapa 3.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

En las figuras correspondientes a las tres etapas de prueba se puede observar que para la respuesta de Blaine y Retenido resulta no viable encontrar la planta mediante el sistema de identificación IDENT; ya que sus variaciones están

directamente ligadas a la apreciación del operador de las pruebas del laboratorio, así también a la calidad y limpieza de las mallas con que se realiza las pruebas de retenido; por lo que se ve que es necesario utilizar el método de curvas estáticas para obtener la relación de comportamiento de blaine y retenido ante cambios de parámetros de alimentación.

## 2.2.2 MODELO DE CURVAS ESTÁTICAS

Al desarrollar la relación de curva estática es necesario filtrar los datos y colocarlos en forma ascendente con respecto a la alimentación, dado que ésta será la variable principal; cada valor de alimentación puede corresponder a uno o varios valores de retenido y blaine por lo que se realiza una tabla para cada etapa definida en el numeral anterior. En cada valor de alimentación se realiza el promedio de los valores de muestras de blaine y retenido que presente, respectivamente.

A continuación se presenta el modelado para cada una de las etapas.

- **Etapa I:** Esta etapa es donde G39 es 95 y G35 es 72; una vez obtenidos los datos necesarios, se filtraron y después de ordenarlos se obtiene la siguiente tabla:

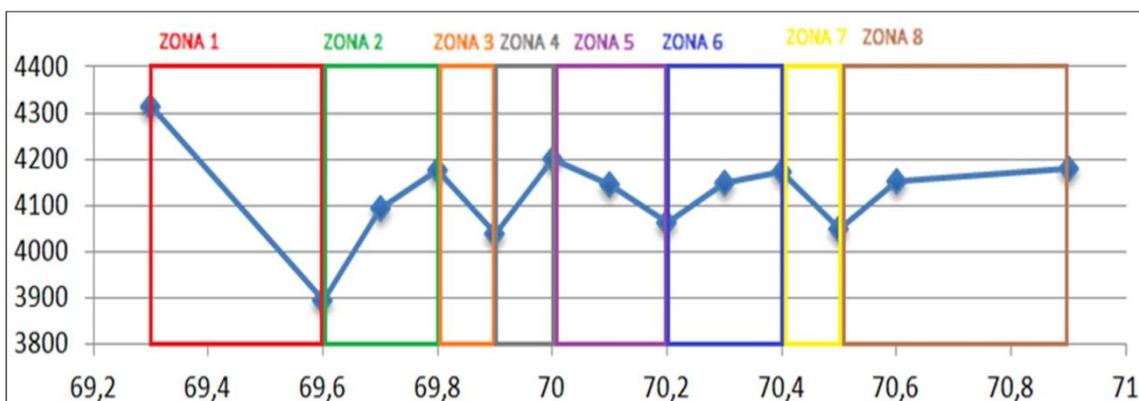
**Tabla 58-** Pruebas de laboratorio de la etapa I, ordenadas de acuerdo a la variable alimentación.

ALIMENTACIÓN	BLAINE	RETENIDO
69,3	4315	4,18
69,6	3896	4,5
69,7	4093	4,03
69,8	4178	4,23
69,9	4040	3,8
70	4201	3,27
70,1	4147	3,7
70,2	4064	4,38
70,3	4149	4

70,4	4172	4,1
70,5	4049	5,43
70,6	4152	4,9
70,9	4180	3,52

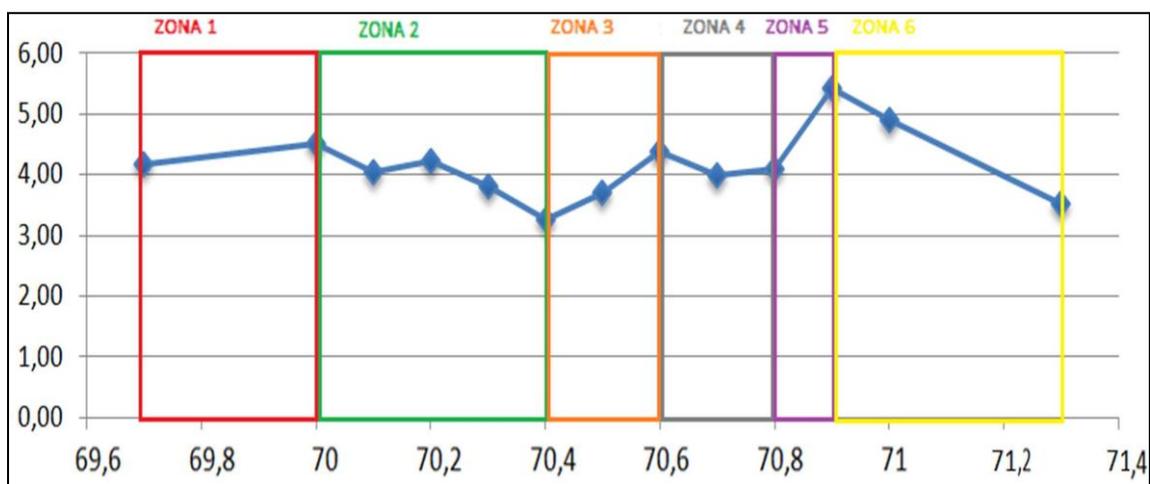
Autoría Propia

Los datos filtrados y ordenados se dividen en zonas para realizar una regresión lineal o polinomial de la curva estática, dando como resultado una división en 8 zonas para Blaine y 6 zonas para Retenido, mismas que se muestran a continuación:



**Figura 51** – División en zonas para Blaine de la Etapa I.

**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 52** – División en zonas para Retenido de la Etapa I.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Continuando con el proceso se realizan las regresiones lineales correspondientes a cada zona de Blaine y de retenido de la etapa I, mismas que se muestran a continuación:

**Tabla 59-** Regresiones lineales de cada zona de Blaine en la Etapa I.

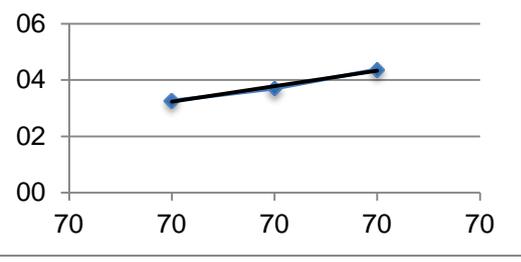
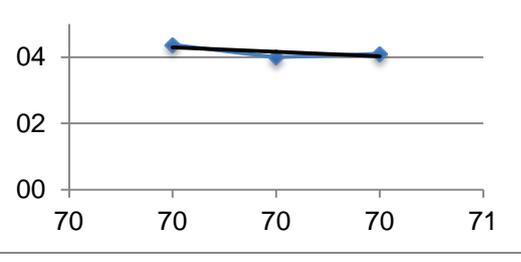
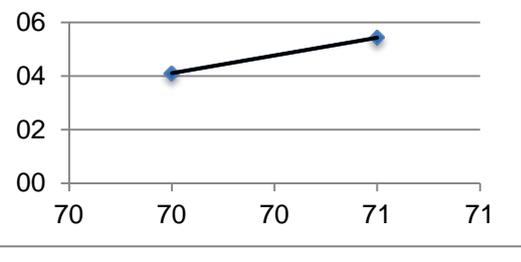
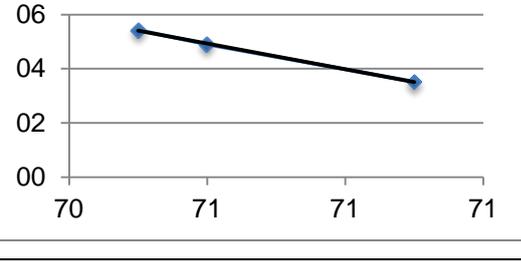
ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = -1396,7x + 101104$	
2	$y = 1408,3x - 94105$	
3	$y = -1374,2x + 100094$	
4	$y = 1607,5x - 108324$	
5	$y = -683,75x + 52068$	

6	$y = 540,42x - 33863$	
7	$y = -1233,3x + 90999$	
8	$y = 273,72x - 15216$	

Autoría Propia

**Tabla 60-** Regresiones lineales de cada zona de Retenido en la Etapa I.

ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = 1,0667x - 69,74$	
2	$y = -2,6992x + 192,37$	

3	$y = 5,5417x - 384,69$	
4	$y = -1,375x + 100,82$	
5	$y = 13,3x - 932,22$	
6	$y = -4,7346x + 339,2$	

Autoría Propia

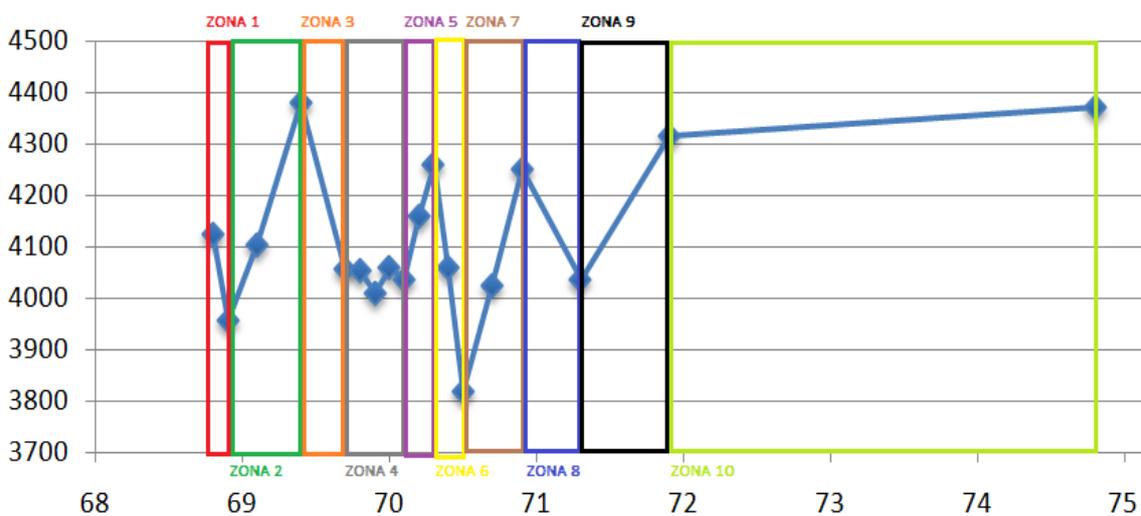
- **Etapla II:** Esta etapa es donde G39 es 95 y G35 es 71; una vez obtenidos los datos necesarios, se filtraron y después de ordenarlos se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 61-** Pruebas de laboratorio de la etapa II, ordenadas de acuerdo a la variable alimentación.

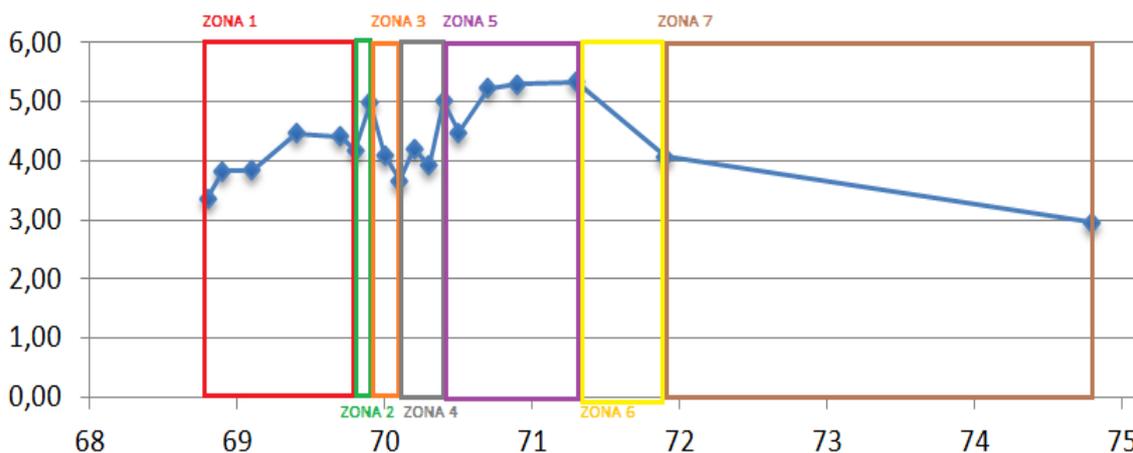
<b>ALIMENTACIÓN</b>	<b>BLAINE</b>	<b>RETENIDO</b>
68,8	4124	3,36
68,9	3957	3,83
69,1	4102	3,84
69,4	4380	4,47
69,7	4055	4,41
69,8	4053	4,18
69,9	4011	4,98
70,0	4060	4,10
70,1	4036	3,66
70,2	4158	4,20
70,3	4259	3,92
70,4	4058	5,02
70,5	3818	4,48
70,7	4025	5,22
70,9	4251	5,29
71,3	4036	5,34
71,9	4315	4,07
74,8	4372	2,96

Autoría Propia

Los datos filtrados y ordenados se dividen en zonas para realizar una regresión lineal o polinomial de la curva estática, dando como resultado una división en 10 zonas para Blaine y 7 zonas para Retenido, las mismas que se muestran a continuación:



**Figura 53** – División en zonas para Blaine de la Etapa II  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

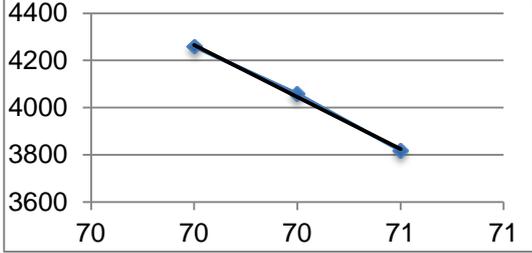
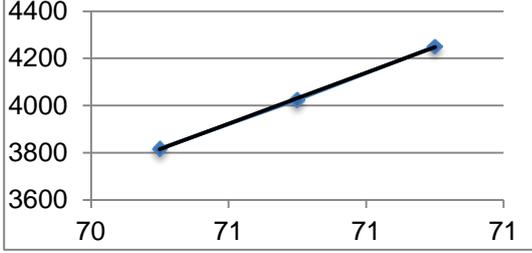
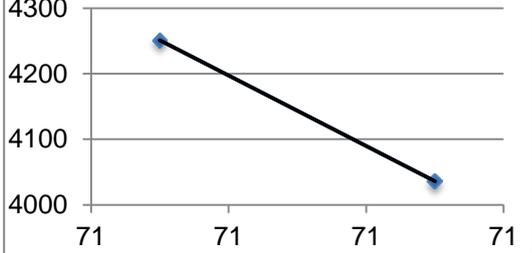
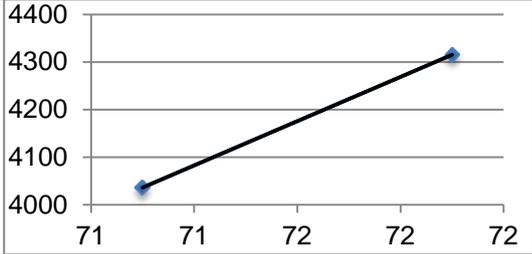
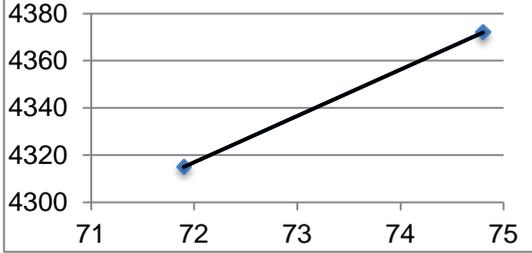


**Figura 54** – División en zonas para Retenido de la Etapa II.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Enseguida se procede a realizar las respectivas regresiones lineales que corresponderán a cada zona de Blaine y retenido, mismas que se muestran a continuación:

**Tabla 62-** Regresiones lineales de cada zona de Blaine en la etapa II.

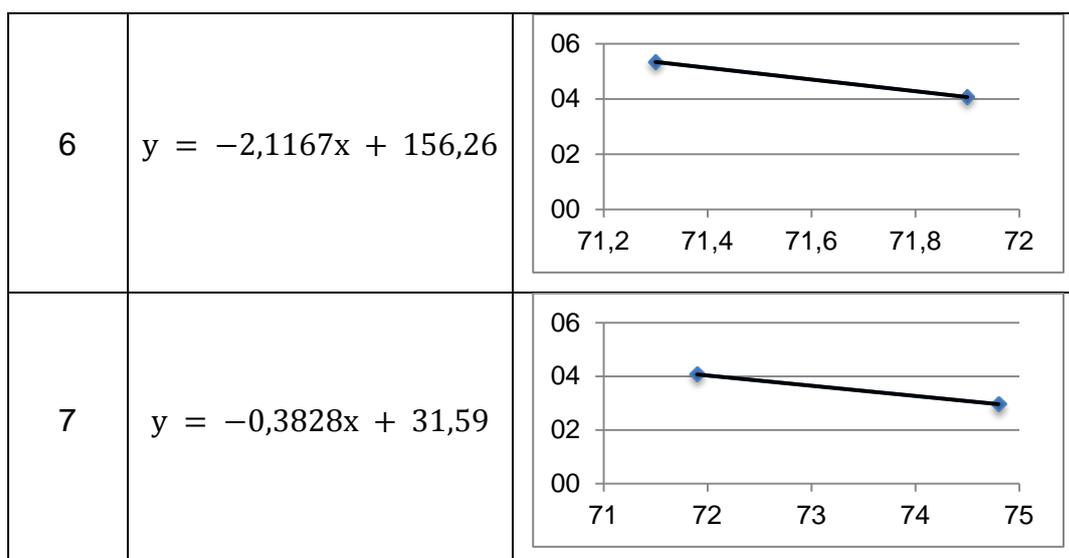
ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = -1670x + 119020$	
2	$y = 852,37x - 54781$	
3	$y = -1083,3x + 79563$	
4	$y = -31,083x + 6215,5$	
5	$y = 1115x - 74122$	

6	$y = -2205x + 159277$	
7	$y = 1082,5x - 72501$	
8	$y = -537,5x + 42360$	
9	$y = 465x - 29118$	
10	$y = 19,655x + 2901,8$	

Autoría Propia

**Tabla 63-** Regresiones lineales de cada zona de Retenido en la etapa II.

ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = 0,8335x - 53,735$	
2	$y = 7,925x - 548,98$	
3	$y = -6,575x + 464,5$	
4	$y = 3,795x - 262,4$	
5	$y = 0,6646x - 41,962$	



Autoría Propia

- **Etapa III:** Esta etapa es donde G39 es 97 y G35 es 72; una vez obtenidos los datos necesarios, se filtraron y después de ordenarlos se obtiene la siguiente tabla:

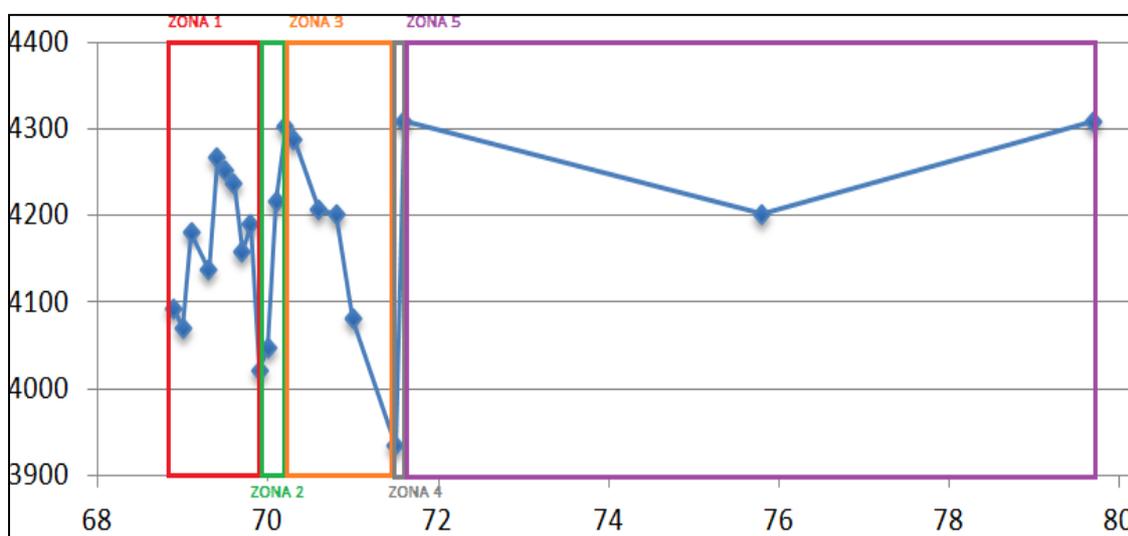
**Tabla 64-** Pruebas de laboratorio de la etapa III, ordenadas de acuerdo a la variable alimentación.

ALIMENTACIÓN	BLAINE	RETENIDO
68,9	4092	4,76
69,0	4070	4,49
69,1	4180	5,00
69,3	4137	4,39
69,4	4266	3,32
69,5	4252	3,63
69,6	4237	3,92
69,7	4158	4,95
69,8	4189	3,69
69,9	4022	5,26
70,0	4048	4,84

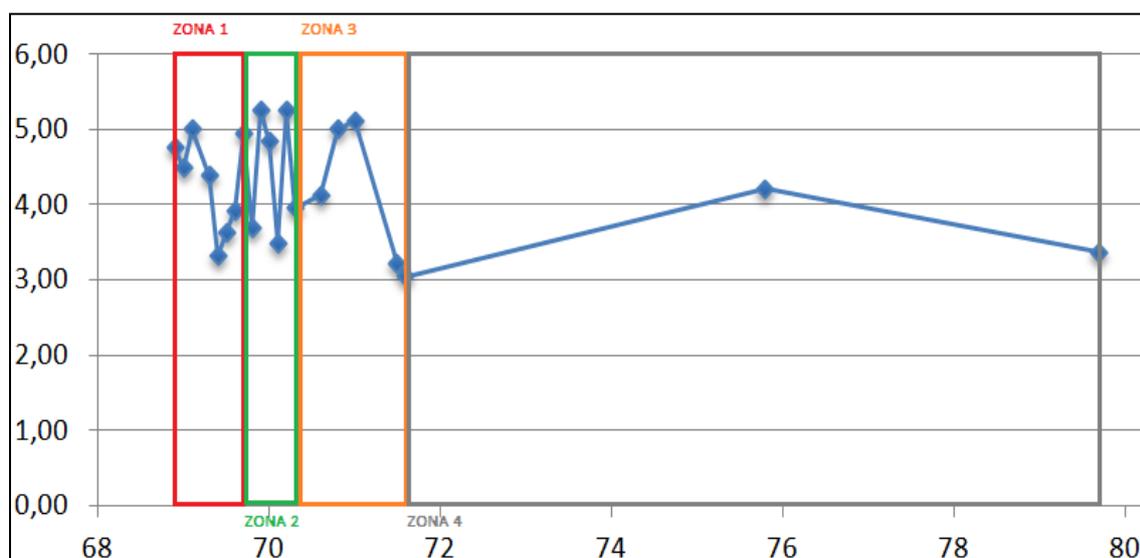
70,1	4217	3,49
70,2	4302	5,25
70,3	4288	3,95
70,6	4206	4,13
70,8	4202	5,01
71,0	4081	5,12
71,5	3934	3,21
71,6	4309	3,05
75,8	4202	4,21
79,7	4309	3,37

Autoría Propia

Los datos filtrados y ordenados se dividen en zonas para realizar una regresión lineal o polinomial de la curva estática, dando como resultado una división en 5 zonas para Blaine y 4 zonas para Retenido, las mismas que se muestran a continuación:



**Figura 55** – División en zonas para Blaine de la Etapa III  
**Elaborado por:** Argoti-Loja



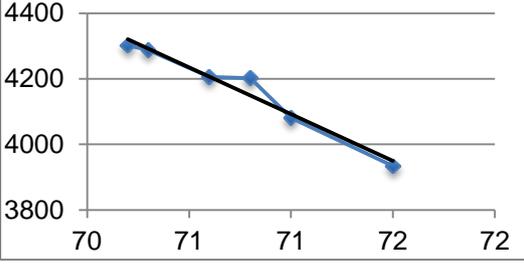
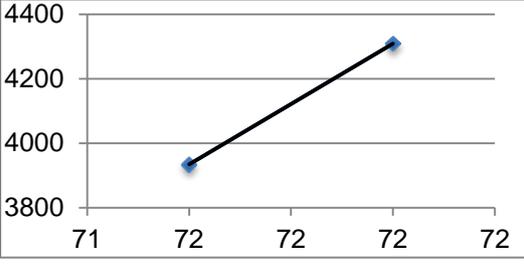
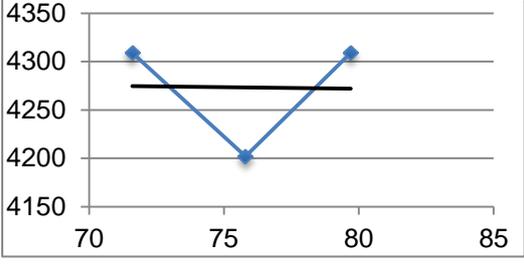
**Figura 56** – División en zonas para Retenido de la Etapa III.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Enseguida se procede a realizar las respectivas regresiones lineales que corresponderán a cada zona de Blaine y retenido, mismas que se muestran a continuación:

**Tabla 65-** Regresiones de cada zona de Blaine en la etapa III.

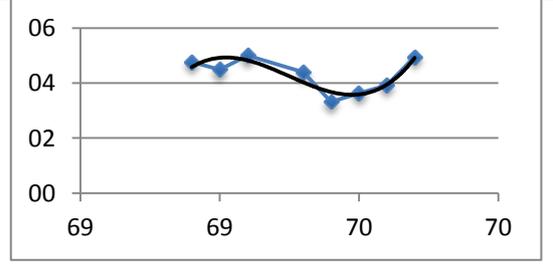
ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = -1.095,08242x^3$ $+ 227.338,1321x^2$ $- 15.731.375,0863x$ $+ 362.856.569,4142$	
2	$y = 1010,5x - 66638$	

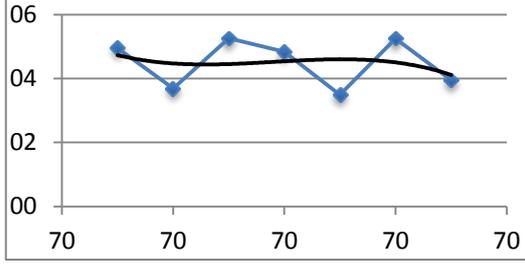
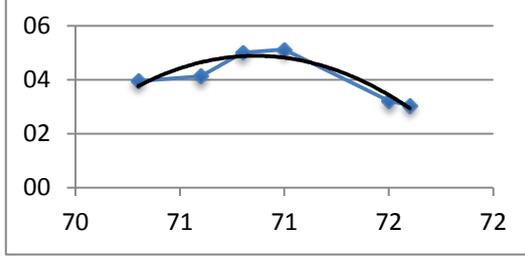
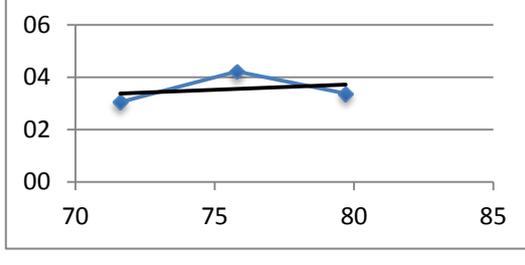
3	$y = -285,14x + 24338$	
4	$y = 3750x - 264191$	
5	$y = -0,326x + 4298$	

Autoría Propia

Enseguida se muestra la siguiente tabla con las respectivas regresiones polinomiales correspondientes a cada zona, y regresión lineal en la zona 4 de Retenido:

**Tabla 66-** Regresiones de cada zona de Retenido en la etapa III.

ZONA	ECUACIÓN	REGRESIÓN
1	$y = 29,2612x^3 - 6.078,8971x^2 + 420.951,6909x - 9.716.584,901$	

2	$y = -22,1759x^3 + 4.655,6409x^2 - 325.802,6439x + 7.599.891,9298$	
3	$y = -3,5612x^2 + 504,7x - 17877$	
4	$y = 0,0425x + 0,3234$	

Autoría Propia

Mediante el uso de regresiones lineales y polinomiales es posible obtener un modelo de curva estática fraccionada gracias a las ecuaciones de cada zona, para su posterior implementación en el simulador.

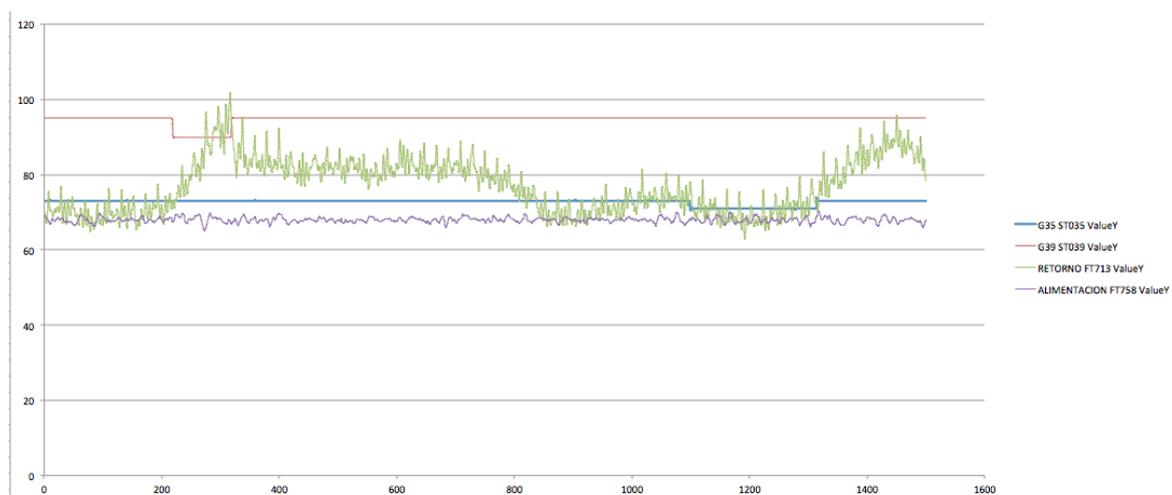
### 2.3 MODELADO DE LA RECAPTACIÓN DE CEMENTO

En el sistema O-SEPA que posee Industrias Guapán, los valores de blaine, retenido y retorno dependen directamente de los seteos de las variables de velocidad de los ventiladores G39 y G35; así también el retorno depende directamente de la dosificación de alimentación.

Se obtuvieron 15000 datos para la modelación de la recaptación de polvo de cemento, con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], dichos datos se obtienen mediante pruebas de escalón a los valores de seteo de los ventiladores G39 de 95% a 90% y G35 de 73% a 71%.

A continuación se define un sistema multivariable con tres entradas correspondientes a G35, G39 y alimentación y una salida que corresponde al retorno del material en el molino de cemento; conservando el orden de las variables.

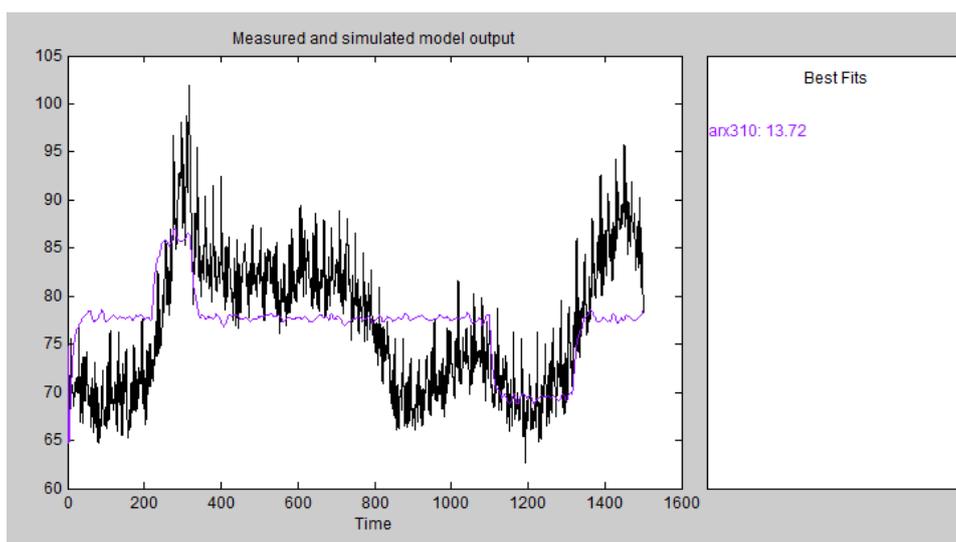
En la figura 57 se muestra los pasos realizados a los seteos de velocidad de G35 y G39, también la reacción en retorno con su respectiva alimentación.



**Figura 57** – Datos de la planta de recaptación de polvo de cemento.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante la herramienta IDENT se estima la planta del sistema multivariable de recaptación, considerando la tendencia que posee el retorno ante cambios de alimentación, G35 y G39.

Luego de realizada la estimación se escoge la mejor aproximación, la que corresponde a las funciones de transferencia entre la salida y cada entrada con tres polos y tres ceros; a continuación se muestra la gráfica de aproximación de la estimación con la tendencia de la respuesta.



**Figura 58** – Estimación de la tendencia del Retorno.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Las funciones de transferencia obtenidas son las siguientes:

Retorno con respecto a G35

$$R_{G35} = \frac{0.0087445 (z+5.814e-006) (z^2 - 5.814e-006z + 3.381e-011)}{(z+0.893) (z-0.9032) (z-0.9883)} \quad (2-28)$$

Retorno con respecto a G39

$$R_{G39} = \frac{-0.0035785 (z+5.814e-006) (z^2 - 5.814e-006z + 3.381e-011)}{(z+0.893) (z-0.9032) (z-0.9883)} \quad (2-29)$$

Retorno con respecto a la alimentación

$$R_{AL} = \frac{-0.0019452 (z+5.814e-006) (z^2 - 5.814e-006z + 3.381e-011)}{(z+0.893) (z-0.9032) (z-0.9883)} \quad (2-30)$$

## **2.4 CONTROL PID DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN Y RECAPTACIÓN DEL MOLINO DE CEMENTO**

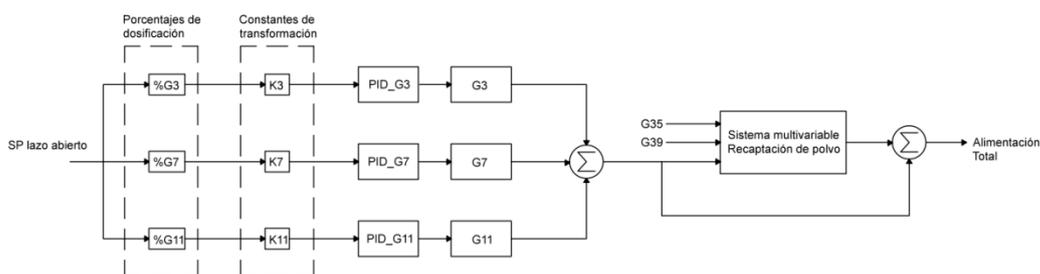
Para el diseño del controlador global es necesaria la unión de las plantas del proceso de recaptación de polvo, con las plantas de las básculas pesadoras alimentadoras, con sus respectivos controladores independientes.

Los controladores PID de las básculas alimentadoras son colocados en paralelo, con un valor de seteo individual determinado por los porcentajes de dosificación de clinker, yeso y puzolana; resultando un valor de dosificación que ingresa al molino. El seteo general se distribuye a los PID de las básculas según su porcentaje de dosificación que ingrese el usuario.

La dosificación se ingresa como entrada al modelo multivariable de recaptación de polvo, así también los valores de seteo de porcentajes de velocidad de los ventiladores G39 y G35; resultando un valor de retorno que será realimentado a la dosificación que ingresa al molino de cemento. El valor total de ingreso de material al molino de cemento es la salida del control PID global.

La construcción del sistema global en LabVIEW se muestra detalladamente en el capítulo cuatro que es el desarrollo de la interfaz gráfica.

Para la sintonización del PID global es necesaria la identificación de la función de transferencia de la planta global en lazo abierto. Por lo que se utiliza la adquisición de datos mediante un arreglo de las variables de seteo en lazo abierto como entrada y alimentación total como salida, con un tiempo de muestreo de 0,1 [s]. El sistema en lazo abierto se muestra en la figura 59.

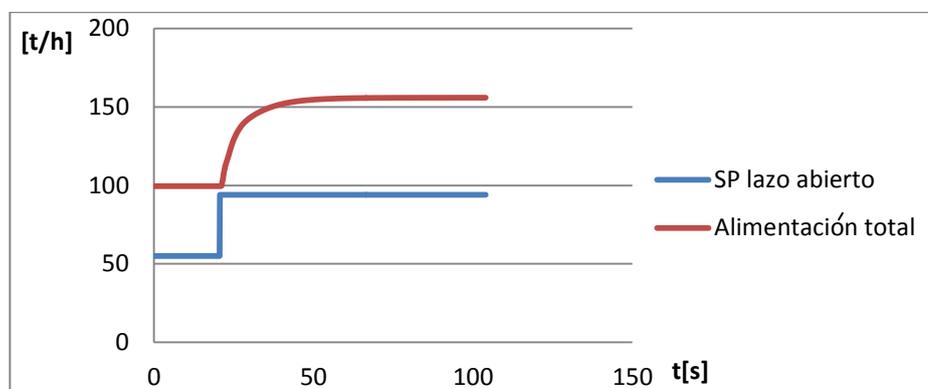


**Figura 59** – Sistema global en lazo abierto.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Se obtienen 2750 datos con un tiempo de muestreo de 0.1 [s] en un archivo de Excel por medio de la función “Write to sheetstreet” de LabVIEW.

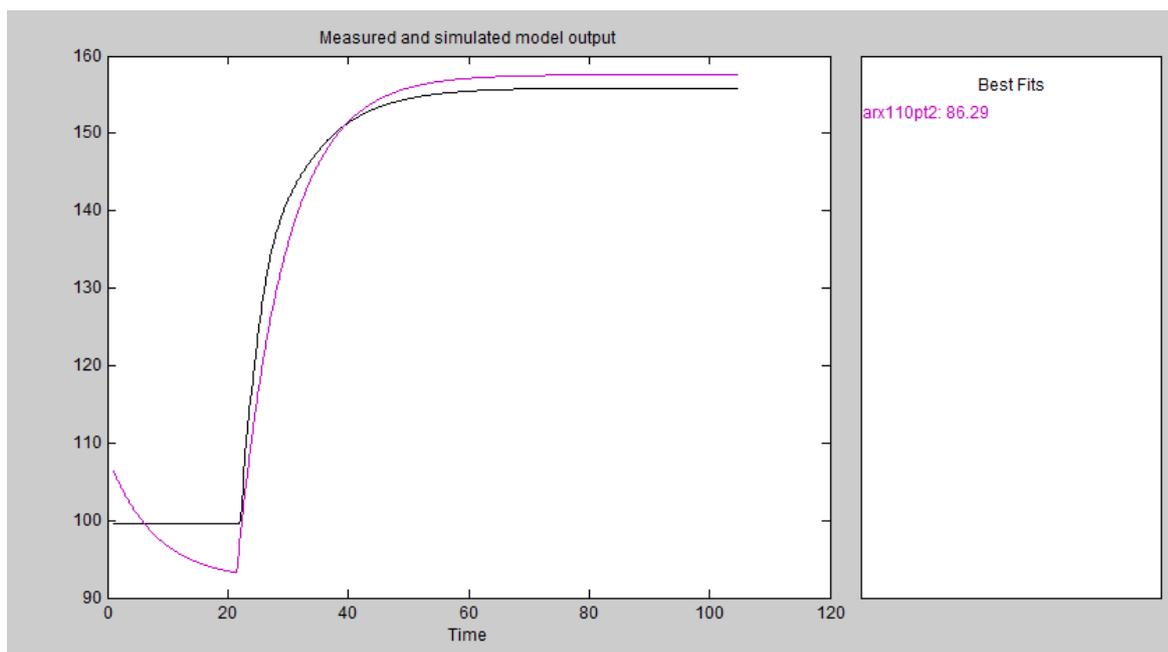
Las constantes de transformación que se muestran en la figura 59 representan el cambio de un valor de seteo de porcentaje a un valor de seteo de toneladas por hora de dosificación.

En la figura 60 se muestra la respuesta de la simulación en lazo abierto para valores normales de funcionamiento de la planta global.



**Figura 60** – Respuesta del Sistema global en lazo abierto ante una entrada escalón.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Con ayuda de la herramienta IDENT del MATLAB se estima la planta global donde se escoge la mejor aproximación y menor complejidad, con un valor de 86,29% de aproximación como se indica en la figura 61.

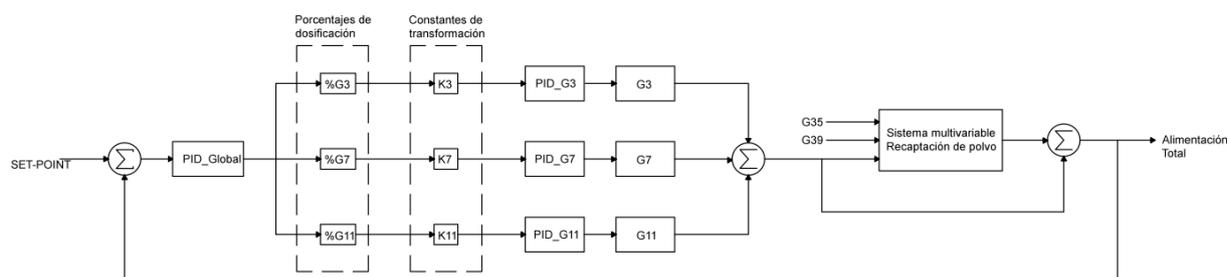


**Figura 61** – Aproximación de la estimación de la planta global.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

La planta estimada resultante del sistema global es la siguiente:

$$GT = \frac{0,02116z}{z-0,9874} \quad (2-31)$$

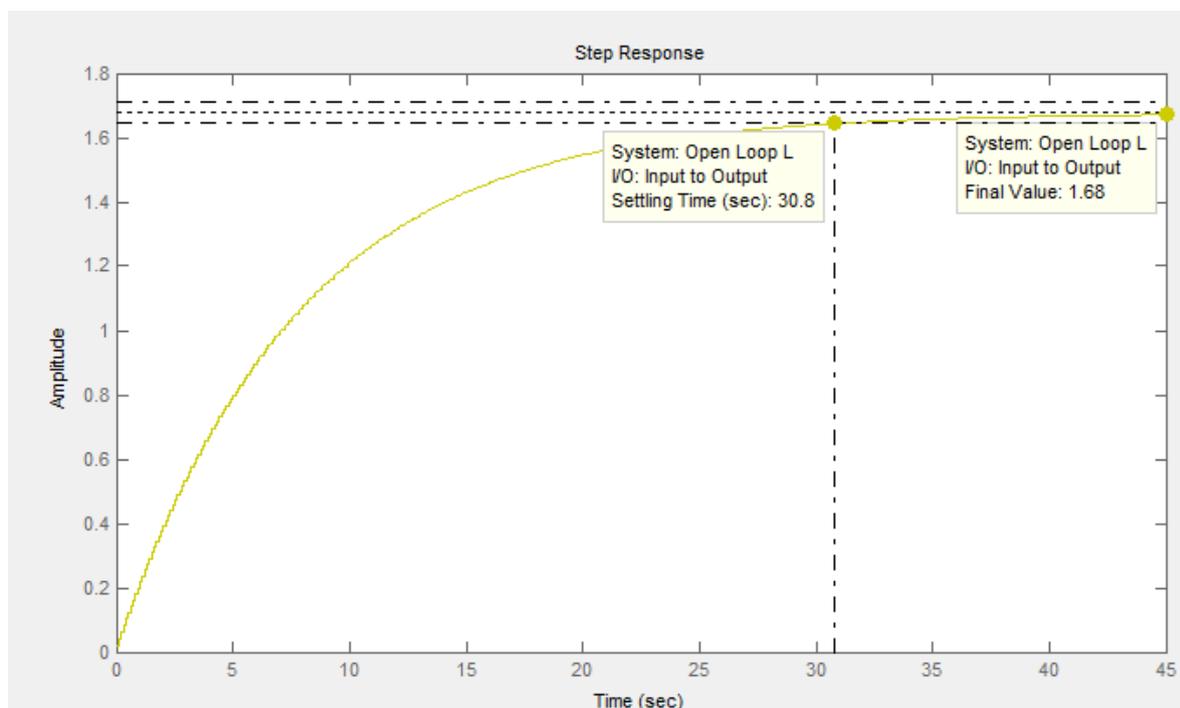
En la figura 62 se muestra el diagrama de bloques del control PID global a diseñar:



**Figura 62** – Control PID global del sistema de molienda de cemento.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

A continuación se ingresa la planta (2-31) en la herramienta “SISOTOOL” para el diseño del controlador, luego se procede a analizar la respuesta en lazo abierto.

En la respuesta de lazo abierto la planta no posee sobre impulso, como se observa en la figura 63; pero sí error de posición, por lo que es necesario aplicar un controlador PI para satisfacer los requerimientos de diseño.

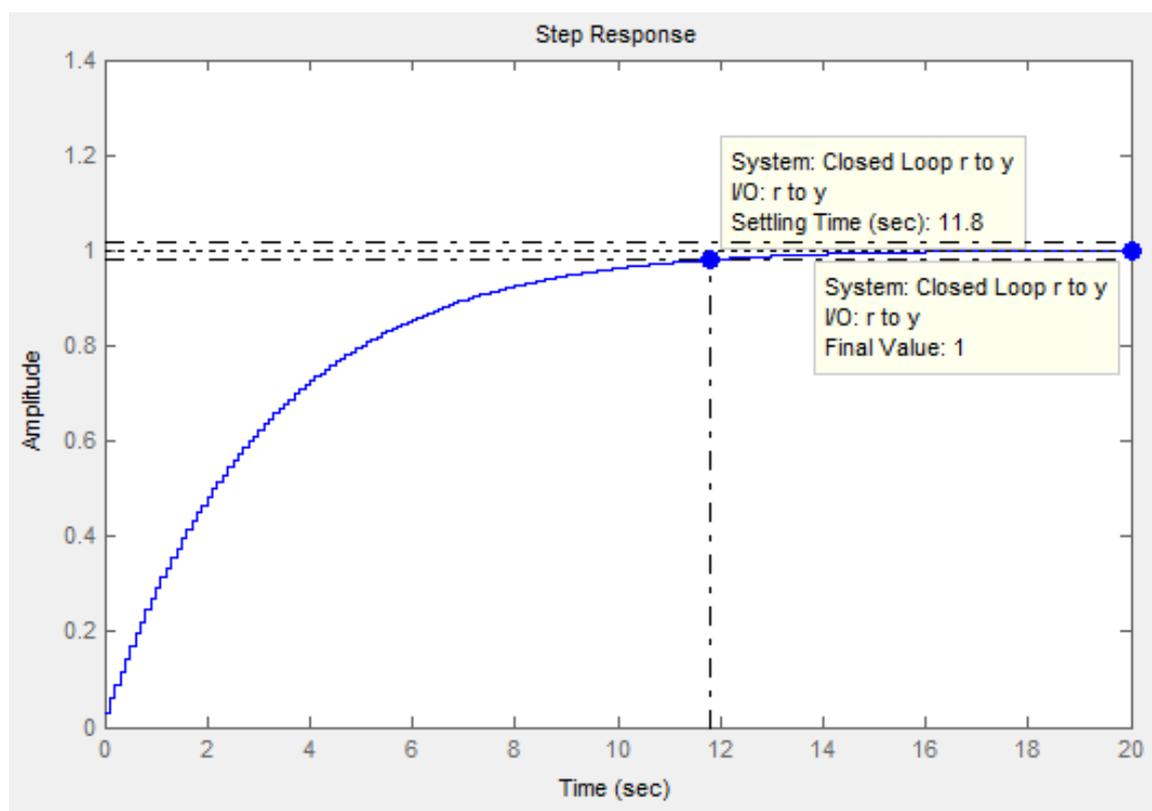


**Figura 63** – Respuesta en lazo abierto del sistema global.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Los requerimientos de diseño del controlador adecuados para la empresa se presentan con un valor bajo de tiempo de estabilización  $t_s < 20[s]$ ; sobreimpulso menor al 2%, error de posición en estado estable cero.

La respuesta del sistema ante una entrada paso en lazo cerrado se muestra en la figura 64; los parámetros de diseño se muestran en la tabla 67.



**Figura 64** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado del diseño del controlador PI del sistema global.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

**Tabla 67-** Requerimientos de diseño para el controlador PI.

Parámetros	De diseño	Sintonizados
ts [s]	< 20	11,8
Mp [%]	< 2	0
Ep [unidades]	0	0

Autoría Propia

La función de transferencia del controlador PI diseñado del sistema global se presenta a continuación:

$$PI_{GT} = \frac{1,5 \cdot (z - 0,987)}{(z - 1)} \quad (2-32)$$

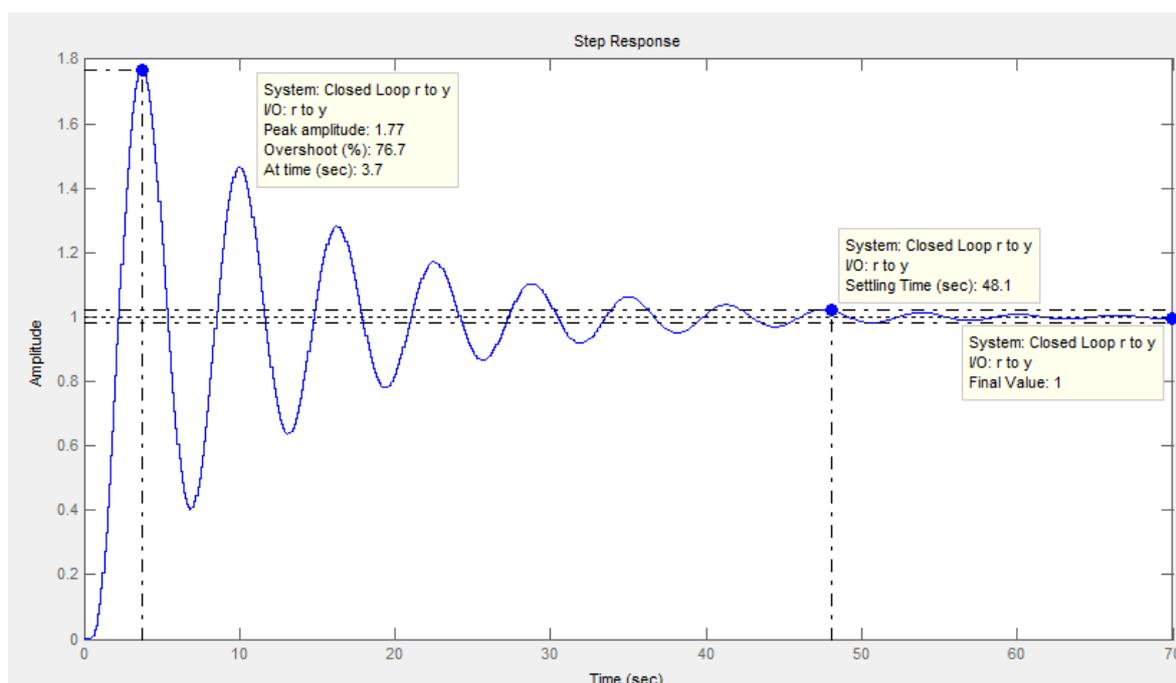
### **3 CAPÍTULO: SIMULACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES**

#### **3.1 SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID ANTIGUOS**

Mediante la herramienta “SISOTOOL” es posible visualizar la respuesta paso de la planta más el controlador antiguo en lazo cerrado. A continuación se realiza la simulación de la respuesta de los sistemas de las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana ante una entrada paso.

- **Controlador PID antiguo de la banda alimentadora pesadora de clinker**

Se utiliza la planta estimada del PID antiguo (CG3) que se encuentra en la ecuación (2-1), en conjunto con la función de transferencia de la planta de clinker C3 que se encuentra en la ecuación (2-4), para realizar la simulación ante una entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de clinker, como se muestra en la figura 65.



**Figura 65** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PID antiguo de la planta de clinker.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 68-** Parámetros antiguos de la báscula pesadora alimentadora de clinker.

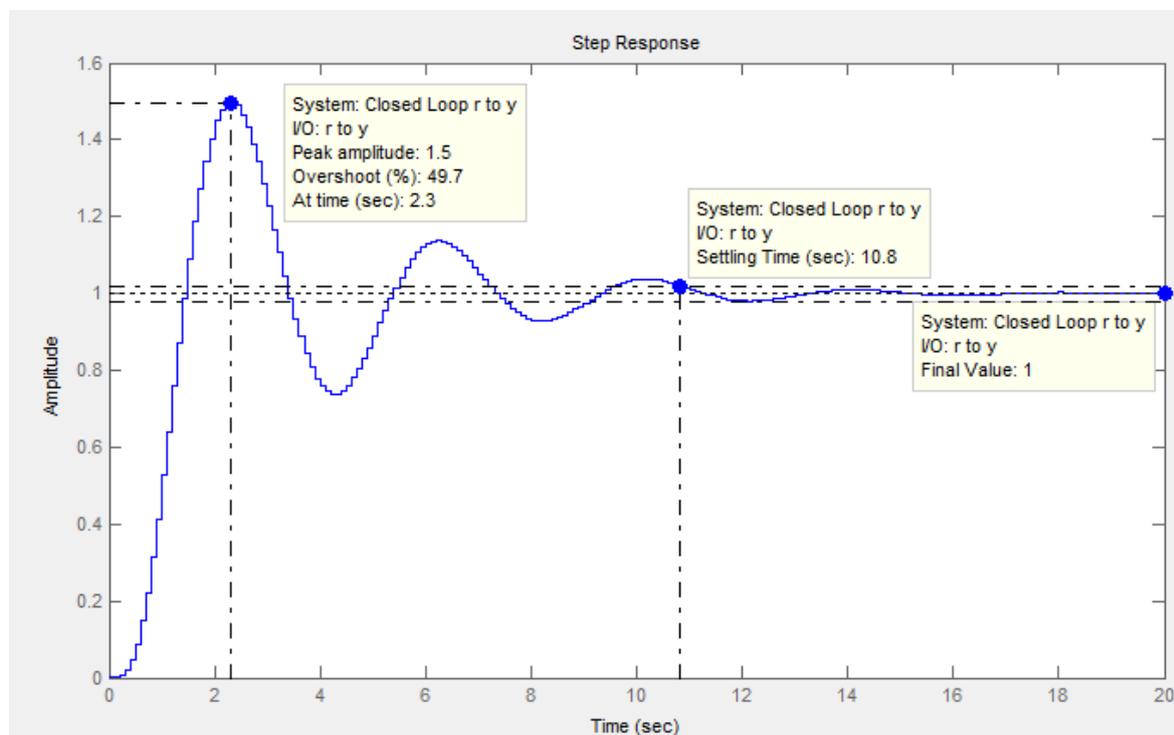
Parámetros	Antiguos
ts [s]	48,1
Mp [%]	76,7
Ep [unidades]	0

Autoría Propia

- **Controlador PID antiguo de la banda alimentadora pesadora de yeso**

Se utiliza la planta estimada del PID antiguo (CG11) que se encuentra en la ecuación (2-2), en conjunto con la función de transferencia de la planta de yeso (YP) que se encuentra en la ecuación (2-18), para realizar la simulación ante una

entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de yeso, como se muestra en la figura 66.



**Figura 66** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PID antiguo de la planta de yeso.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

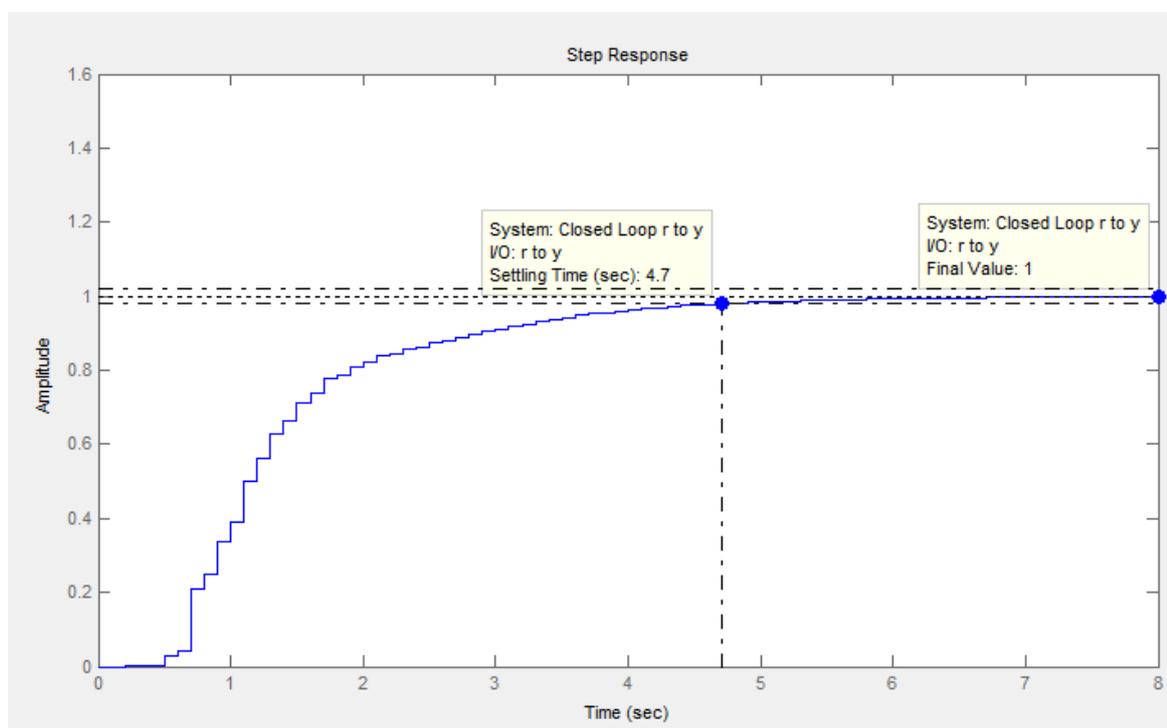
**Tabla 69-** Parámetros antiguos de la báscula pesadora alimentadora de yeso.

Parámetros	Antiguos
ts [s]	10,8
Mp [%]	49,7
Ep [unidades]	0

Autoría Propia

- **Controlador PID antiguo de la banda alimentadora pesadora de puzolana**

Se utiliza la planta estimada del PID antiguo (CG7) que se encuentra en la ecuación (2-3), en conjunto con la función de transferencia de la planta de puzolana (P2) que se encuentra en la ecuación (2-23), para realizar la simulación ante una entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de puzolana, como se muestra en la figura 67.



**Figura 67** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PID antiguo de la planta de puzolana.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 70-** Parámetros antiguos de la báscula pesadora alimentadora de puzolana.

Parámetros	Antiguos
ts [s]	4,7
Mp [%]	0
Ep [unidades]	0

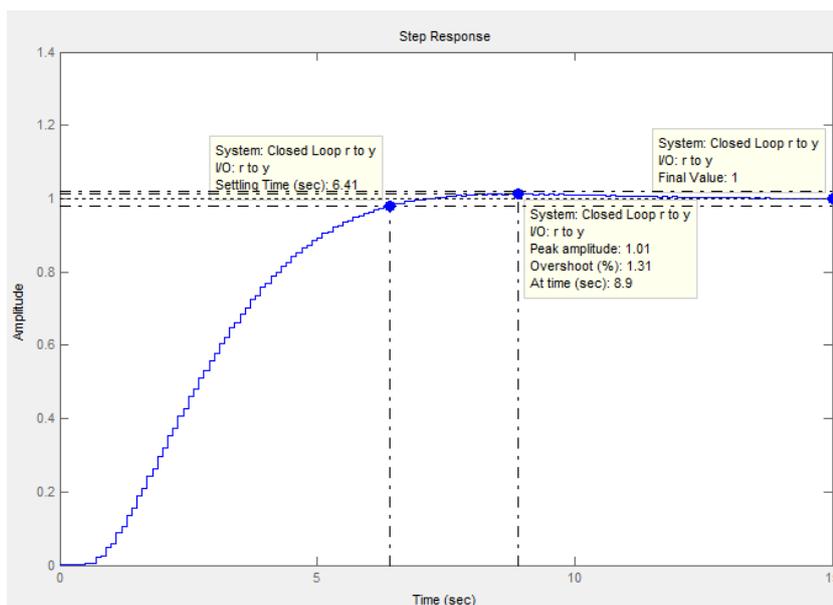
Autoría Propia

### 3.2 SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID RESINTONIZADOS

Con la ayuda de la herramienta “SISOTOOL” es posible visualizar la respuesta paso de la planta más el controlador resintonizado en lazo cerrado. A continuación se realiza la simulación de la respuesta de clinker, yeso y puzolana ante una entrada paso.

- **Controlador PI resintonizado de la banda alimentadora pesadora de clinker**

Se utiliza la planta del PI diseñado ( $PI_{G3}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-9), en conjunto con la función de transferencia de la planta de clinker (C3) que se encuentra en la ecuación (2-4), para realizar la simulación ante una entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de clinker, como se muestra en la figura 68.



**Figura 68** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PI resintonizado de la planta de clinker.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

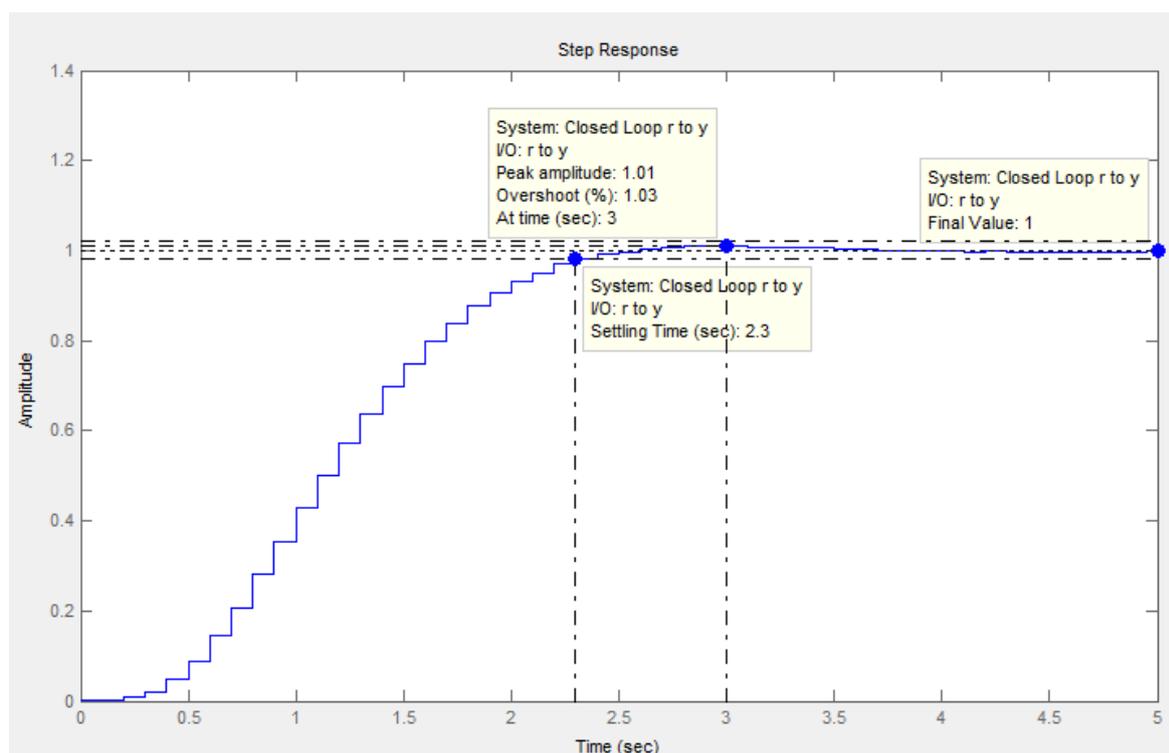
**Tabla 71-** Requerimientos de diseño para el controlador PI de la planta de clinker.

Parámetros	De diseño	Sintonizados
ts [s]	< 8	6,41
Mp [%]	< 2	1,31
Ep [unidades]	0	0

Autoría Propia

- **Controlador PI resintonizado de la banda alimentadora pesadora de yeso**

Se utiliza la planta del PI diseñado ( $PI_{G11}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-21), en conjunto con la función de transferencia de la planta de yeso (YP) que se encuentra en la ecuación (2-18), para realizar la simulación ante una entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de yeso, como se muestra en la figura 69.



**Figura 69** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PI resintonizado de la planta de yeso.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 72-** Requerimientos de diseño para el controlador PI de la planta de yeso.

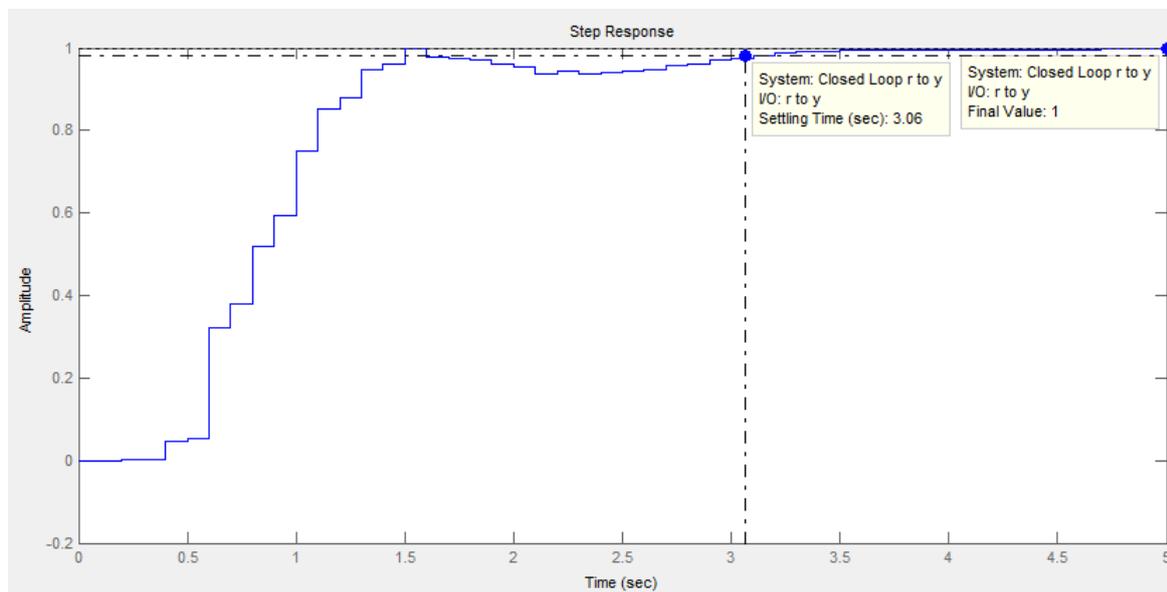
Parámetros	De diseño	Sintonizados
ts [s]	< 5	2,3
Mp [%]	< 2	1,03
Ep [unidades]	0	0

Autoría Propia

- **Controlador PI resintonizado de la banda alimentadora pesadora de puzolana**

Se utiliza la planta del PI diseñado ( $PI_{G7}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-26), en conjunto con la función de transferencia de la planta de puzolana ( $P2$ ) que se

encuentra en la ecuación (2-23), para realizar la simulación ante una entrada paso del sistema de la báscula pesadora alimentadora de puzolana, como se muestra en la figura 70.



**Figura 70** – Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con el controlador PI resintonizado de la planta de puzolana.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 73-** Requerimientos de diseño para el controlador PI de la planta de puzolana.

Parámetros	De diseño	Sintonizados
ts [s]	< 5	3,06
Mp [%]	< 2	0
Ep [unidades]	0	0

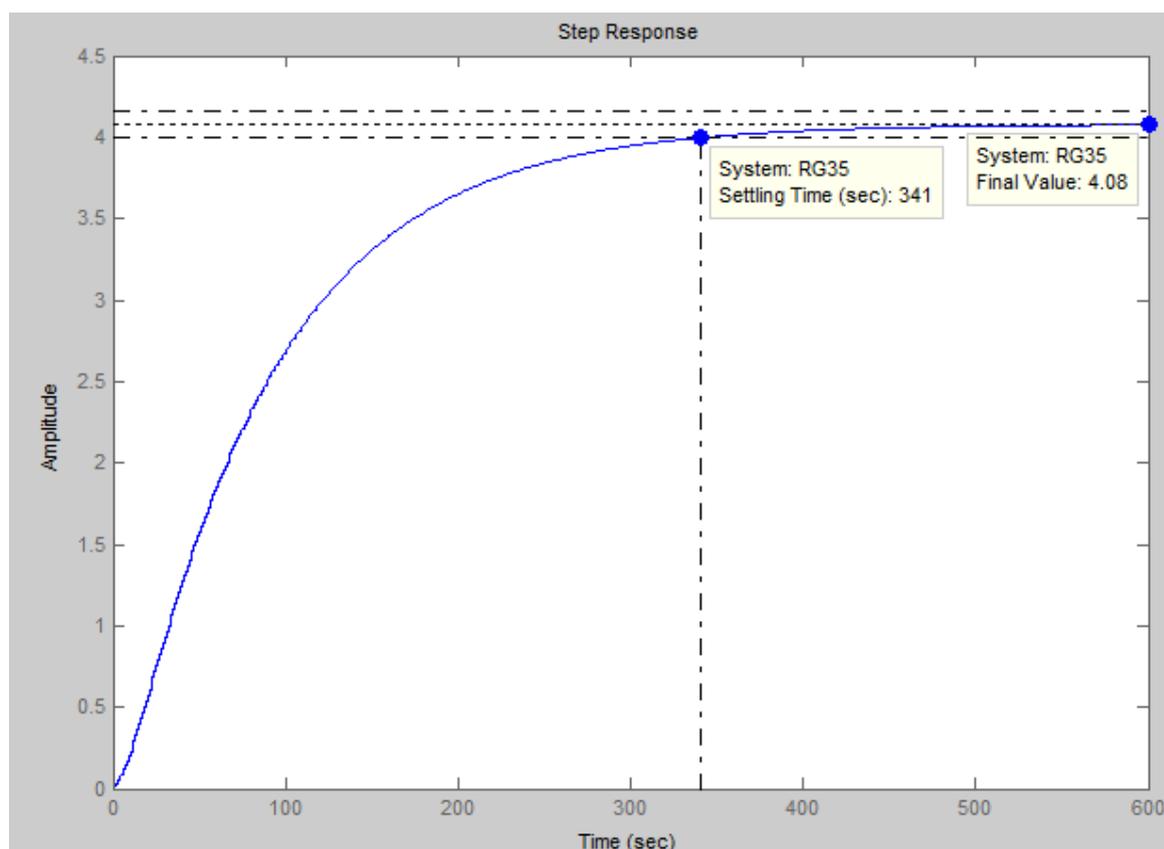
Autoría Propia

### 3.3 SIMULACIÓN DE LAS PLANTAS DE RECAPTACIÓN DE POLVO DE CEMENTO

Para la simulación se requiere las funciones de transferencia que relacionan cada entrada con la salida de retorno, siendo sus entradas: G35, G39 y Alimentación. Mediante la herramienta “SISOTOOL” se realiza la respuesta ante una entrada paso.

- **Retorno con respecto al ventilador G35**

Se utiliza la planta estimada ( $R_{G35}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-28), con la cual se obtiene la siguiente respuesta paso:



**Figura 71** – Respuesta a una entrada paso en lazo abierto del retorno con respecto al ventilador G35.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

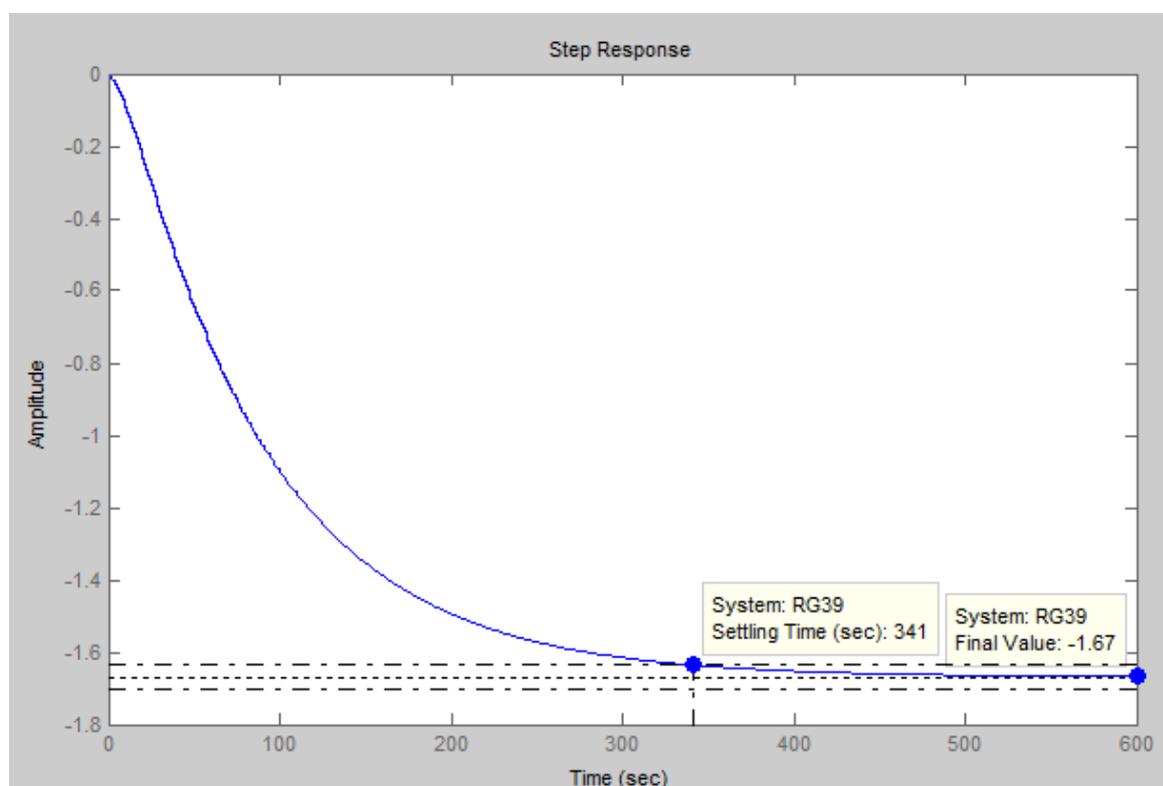
**Tabla 74-** Características de la respuesta paso en lazo abierto del retorno con respecto al ventilador G35.

Parámetros	Valor
ts [s]	341
Mp [%]	0
Ep [unidades]	-3,08

Autoría Propia

- **Retorno con respecto al ventilador G39**

Se utiliza la planta estimada ( $R_{G39}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-29), con la cual se obtiene la siguiente respuesta paso:



**Figura 72** – Respuesta a una entrada paso en lazo abierto del retorno con respecto al ventilador G39.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

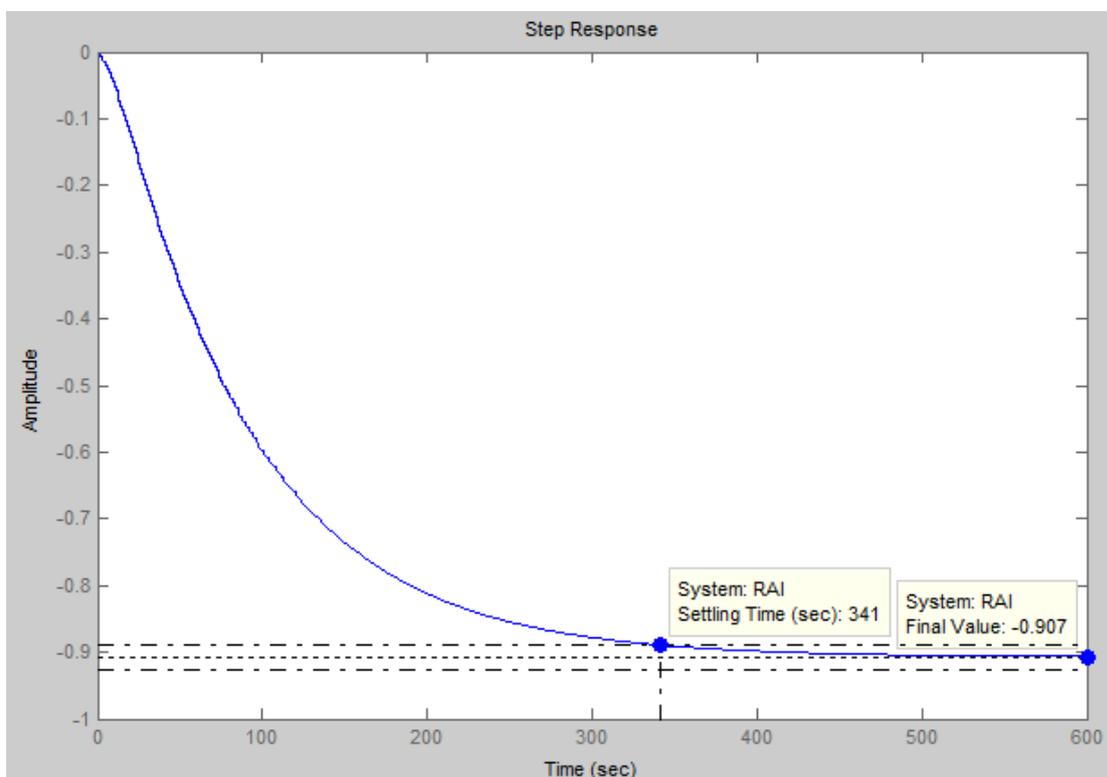
**Tabla 75-** Características de la respuesta paso en lazo abierto del retorno con respecto al ventilador G39.

Parámetros	Valor
ts [s]	341
Mp [%]	0
Ep [unidades]	2,67

Autoría Propia

- **Retorno con respecto a la Alimentación**

Se utiliza la planta estimada ( $R_{AL}$ ) que se encuentra en la ecuación (2-30), con la cual se obtiene la siguiente respuesta paso:



**Figura 73** – Respuesta a una entrada paso en lazo abierto del retorno con respecto a la alimentación.

**Elaborado por:** Argoti-Loja

Mediante el análisis de las características que presenta la respuesta ante una entrada paso se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 76-** Características de la respuesta paso en lazo abierto del retorno con respecto a la alimentación.

Parámetros	Valor
ts [s]	341
Mp [%]	0
Ep [unidades]	1,907

Autoría Propia

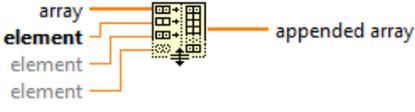
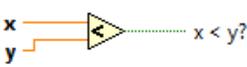
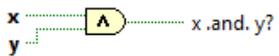
## 4 CAPÍTULO: DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

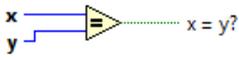
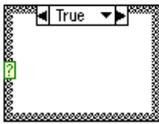
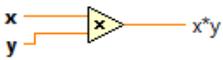
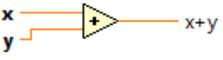
Para el desarrollo del simulador destinado al entrenamiento de panelistas se utiliza el software LabVIEW y se parte de los estudios de las plantas de la dosificación, alimentación y retorno ya realizados en el molino de cemento. Dicho simulador consta de dos partes principales que son: control PID global de alimentación al molino de cemento y, respuesta de blaine y retenido.

### 4.1 SIMULADOR DE LA RESPUESTA DE BLAINE Y DE RETENIDO

Las funciones necesarias para la construcción del simulador se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 77-**Funciones del simulador de blaine y retenido.

Nombre	Descripción	Imagen
Build Array	Concatena varias matrices o añade elementos a una matriz n-dimensional.	
Boolean Array to Number	Convierte una matriz booleana a un número.	
Greater Or Equal?	Devuelve verdadero si "x" es mayor que o igual que "y"; de lo contrario esta función devuelve falso.	
Less?	Devuelve verdadero si "x" es menor que "y"; de lo contrario esta función devuelve falso.	
	Calcula la respuesta lógica AND de las entradas. Ambas entradas deben	

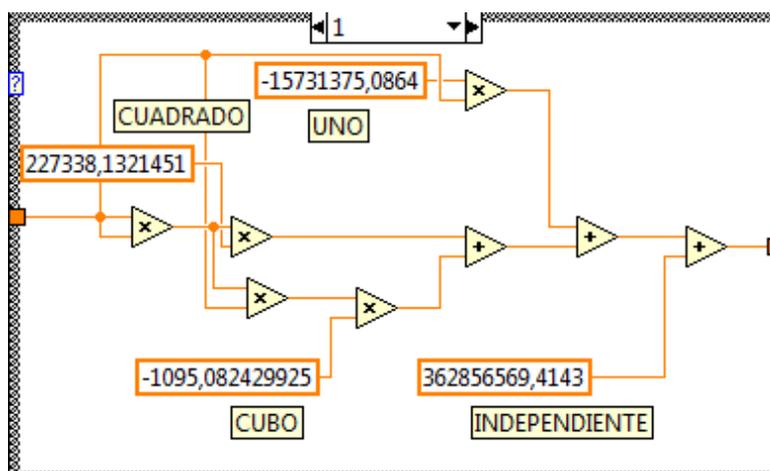
And	ser valores booleanos o numéricos. Si ambas entradas son verdaderas, la función devuelve verdadero; de lo contrario devuelve falso	
Equal?	Devuelve verdadero si “x” es igual a “y”; de lo contrario esta función devuelve falso.	
Case Structura	Tiene uno o más sub-diagramas, o casos, dependiendo del caso se ejecuta en la estructura el correspondiente diagrama. El selector puede funcionar con variables booleanas, cadena de caracteres, enteros y tipo enumerados.	
Multiply	Calcula la multiplicación de las entradas.	
Add	Calcula la suma de las entradas.	

(8)

De las curvas estáticas de blaine y retenido en función del tonelaje por hora de alimentación, se procede a introducir las regresiones lineales y polinomiales respectivas, dentro de una estructura “case” en el desarrollo de la interfaz. Como por ejemplo la ecuación (4-1) se ingresa como se indica en la figura 74.

$$y = -1.095,08242x^3 + 227.338,1321x^2 - 15.731.375,0863x + 362.856.569,4142$$

(4-1)



**Figura 74** – Ejemplo de regresión polinomial.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

El número de casos para blaine y retenido está determinado por el número de zonas establecidas en cada etapa de prueba realizada para la determinación de sus curvas estáticas como se indica en el punto 2.2.2. A continuación se muestran los casos establecidos para cada etapa de prueba de laboratorio:

**Tabla 78**-Rango de alimentación de etapas en cada zona de prueba de blaine y de retenido.

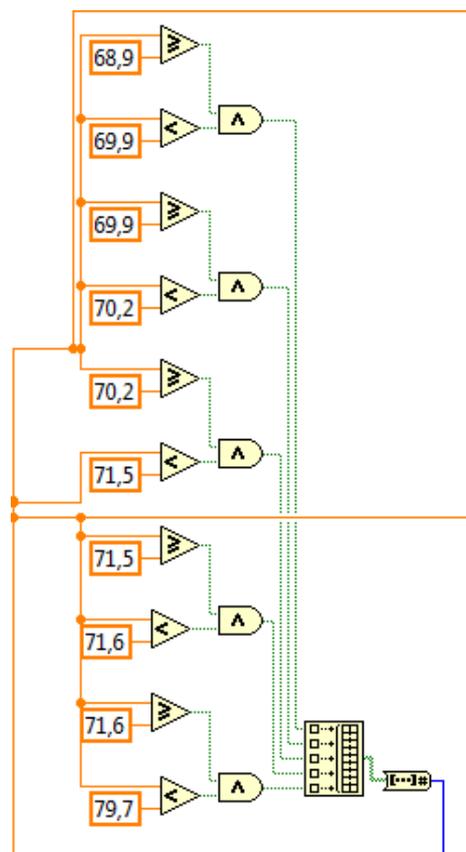
Etapa	Zonas		Rango [t/h]
	Blaine	Retenido	
I	1	1	[69,3 - 69,6)
	2	2	[69,6-69,8)
	3		[69,8 - 69,9)
	4	[69,9-70)	
	5	3	[70 - 70,2)
	6	4	[70,2 - 70,4)
	7	5	[70,4 - 70,5)
	8	6	[70,5 - 70,9)
II	1	1	[68,8 - 68,9)
	2		[68,9-69,4)
	3	2	[69,4 - 69,7)

	4	3	[69,7-70,1)
	5	4	[70,1 - 70,3)
	6		[70,3 - 70,5)
	7	5	[70,5 - 70,9)
	8		[70,9 - 71,3)
	9	6	[71,3 - 71,9)
	10	7	[71,9 - 74,8)
III	1	1	[68,9 - 69,7)
	2	2	[69,7 - 70,2)
	3	3	[70,2 - 71,5)
	4		[71,5 - 71,6)
	5	4	[71,6 - 79,7)

Auditoría propia

Estos casos son ingresados mediante una función “Enum” dependiendo de la combinación de Etapa-zona de prueba con el rango de alimentación que se muestra en la tabla 78; siendo los valores de blaine y retenido independientes entre sí para el cálculo mediante la ecuación respectiva de la regresión.

Se realiza una comparación con cada límite de rango de alimentación, formando un arreglo que luego es transformado a un tipo de variable “Number-Integer” el cuál será el selector del “case structure”, como se indica en la figura 75.



**Figura 75** – Ejemplo de selección de rango de alimentación.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Para la selección del caso de etapa de prueba, se utiliza combinaciones de variables “Integer”, donde el valor de los ventiladores G35 y G39 se compara y se convierte en un arreglo, el cual es transformado a “Number” y selecciona el “case structure” para cada etapa. Como resultado se obtiene la interfaz correspondiente al modelamiento de blaine y retenido dependiendo del valor de alimentación. Para que el lazo de simulación sea repetitivo, se lo ingresa dentro de una estructura “while”.

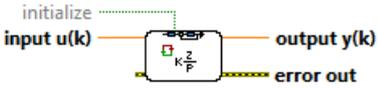
Las variables de selección son los seteos de velocidad de los ventiladores G35 y G39; la variable de entrada es la alimentación; y las variables de salida son los valores de blaine y retenido.

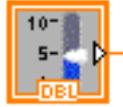
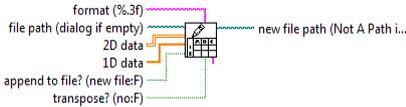
El panel frontal y el diagrama de funciones de Blaine – Retenido se encuentra en el ANEXO H.

## 4.2 CONTROL PID GLOBAL

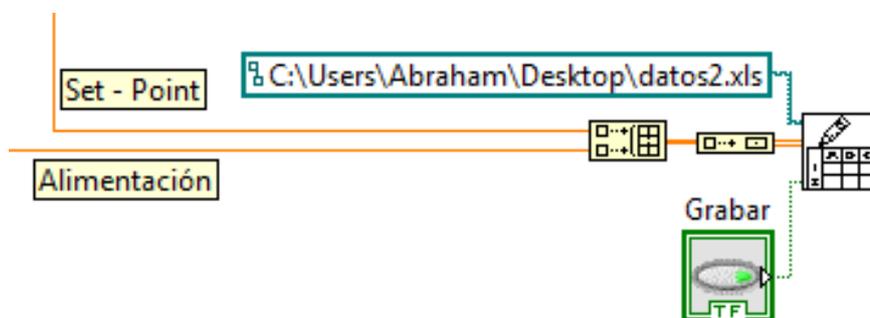
Las funciones necesarias para la construcción del simulador se encuentran en la tabla 77 y la tabla 79:

**Tabla 79**-Funciones del simulador para el PID global.

Nombre	Descripción	Imagen
While Loop	Repite el sub-diagrama de su interior hasta que ocurra una condición terminal.	
Discrete Zero-Pole-Gain	Implementa un modelo de sistema en tiempo discreto de la forma $zpk$ . Se define el modelo del sistema especificando los ceros, polos y ganancia.	
Tab Control	Se puede usar para sobreponer controles e indicadores del panel frontal en un área más pequeña. Consta de páginas y pestañas; en las páginas se añade los objetos del panel frontal mientras que con las pestañas se selecciona la página que se quiera visualizar.	
Wait Until Next ms Multiple	Espera hasta que el valor del temporizador de milisegundos se convierta en un múltiplo de los milisegundos especificados. Se puede llamar a esta función en un bucle para controlar la velocidad	

	de ejecución del bucle.	
Slide Controls	Los controles deslizantes son objetos numéricos que constan de una escala. Conforme se desliza el control a cierto valor comunica al VI que valor numérico tomar.	
Numeric Indicator	Indica el valor numérico de la variable conectada a su entrada	
Waveform Charts	Muestra uno o más gráficos de mediciones uniformemente muestreadas. Se puede graficar sólo funciones de un solo valor, como en $y = f(x)$ , con puntos uniformemente distribuidos a lo largo del eje x, tal como las formas de onda son adquiridas en el tiempo.	
Feedback Node	Se usa para almacenar un dato de una ejecución previa de un diagrama de bloques o de una iteración de un lazo.	
Write To Spreadsheet File.vi	Convierte un arreglo de cadenas de enteros con signo o números de doble precisión, de 2D o 1D a una cadena de texto y escribe la cadena en un archivo de Excel.	
Boolean	Es un control que puede seleccionar entre verdadero y falso.	

Para el desarrollo de la interfaz gráfica del PID global se parte del diagrama de bloques establecido en la figura 59 y se agrega una función de adquisición de datos como se indica en la figura 76:



**Figura 76** – Diagrama para adquisición de datos en LabVIEW.  
Elaborado por: Argoti-Loja

Para el cálculo de las constantes de transformación, es necesario obtener las equivalencias entre el seteo de porcentaje y un valor de dosificación en toneladas por hora, las mismas que se indican en la tabla 80.

**Tabla 80**-Equivalencias de las constantes de transformación.

Variable	Porcentaje	t/h
Clinker	73%	54,3
Yeso	20%	16
Puzolana	4%	3,2

Autoría propia

En el ANEXO I se muestra el diagrama de funciones resultante para la adquisición de datos en lazo abierto.

Luego de la adquisición de datos y posterior diseño del controlador PID global mediante la herramienta "SISOTOOL" de MATLAB; se realimenta el diagrama de funciones en lazo abierto, junto con la función de transferencia del PID como se muestra en el ANEXO J.

Luego se une las dos simulaciones mediante un bloque de pestañas para la interacción del usuario.

## 5 CAPÍTULO: PRUEBAS Y RESULTADOS

Para la verificación del funcionamiento de los modelos matemáticos y simuladores, son necesarios los siguientes puntos:

### 5.1 COMPARACIÓN ENTRE LOS CONTROLADORES PID ANTIGUOS Y LOS RESINTONIZADOS

De las respuestas de los sistemas con los controladores PID antiguos de las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana respectivamente, se realiza la comparación con la respuesta de los sistemas con los controladores PID resintonizados.

- **Báscula pesadora alimentadora de clinker**

Se puede realizar una tabla comparativa a partir de las tablas 68 y 71, entre las características de las respuestas ante una entrada paso entre la planta con el controlador PID antiguo y el controlador PID resintonizado:

**Tabla 81**-Comparación de los controladores PID de clinker.

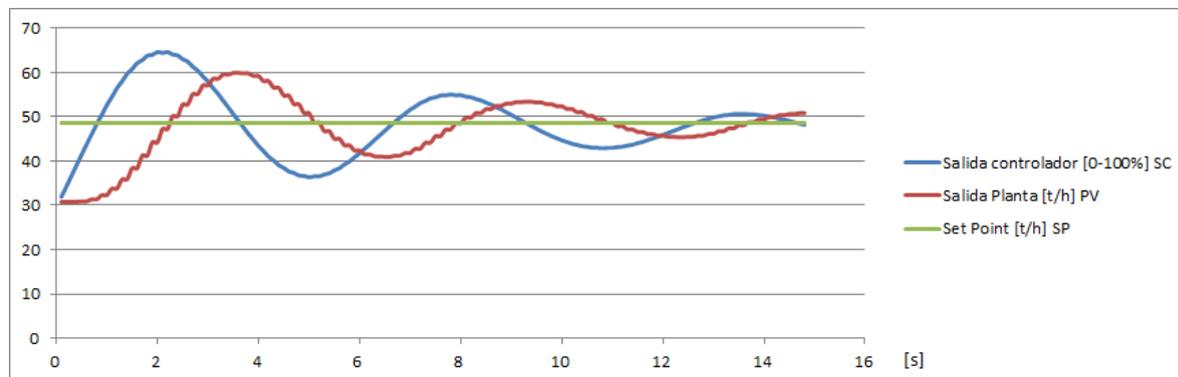
Parámetros	Antiguo	Resintonizado
ts [s]	48,1	6,41
Mp [%]	76,7	1,31
Ep [unidades]	0	0

Autoría propia

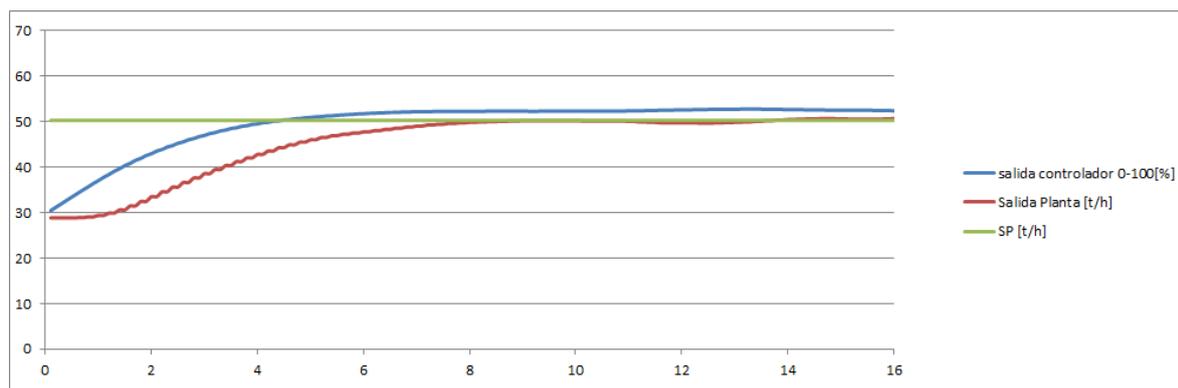
En la tabla 81 se observa claramente el mejoramiento de los parámetros del sistema después de la resintonización del controlador PID.

Así también se compara las respuestas reales en un tiempo de 16[s] con un cambio de tonelaje de seteo de 30 [t/h] a 50 [t/h], la figura 77 muestra la respuesta con el controlador PID antiguo; mientras que la figura 78 muestra la respuesta con

el controlador PID resintonizado. Para el controlador resintonizado se tomó 160 datos con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], en un paso de 30 [t/h] a 50 [t/h].



**Figura 77 – Respuesta del control antiguo en lazo cerrado de la planta de clinker.**  
Elaborado por: Argoti-Loja



**Figura 78 – Diagrama Respuesta del control resintonizado en lazo cerrado de la planta de clinker.**  
Elaborado por: Argoti-Loja

Las gráficas reales demuestran que las simulaciones son correctas, ya que comprueban el mejoramiento del controlador, disminuyendo drásticamente las oscilaciones, así también el tiempo de establecimiento.

- **Báscula pesadora alimentadora de yeso**

Se puede realizar una tabla comparativa a partir de las tablas 69 y 72, entre las características de las respuestas ante una entrada paso entre la planta con el controlador PID antiguo y el controlador PID resintonizado:

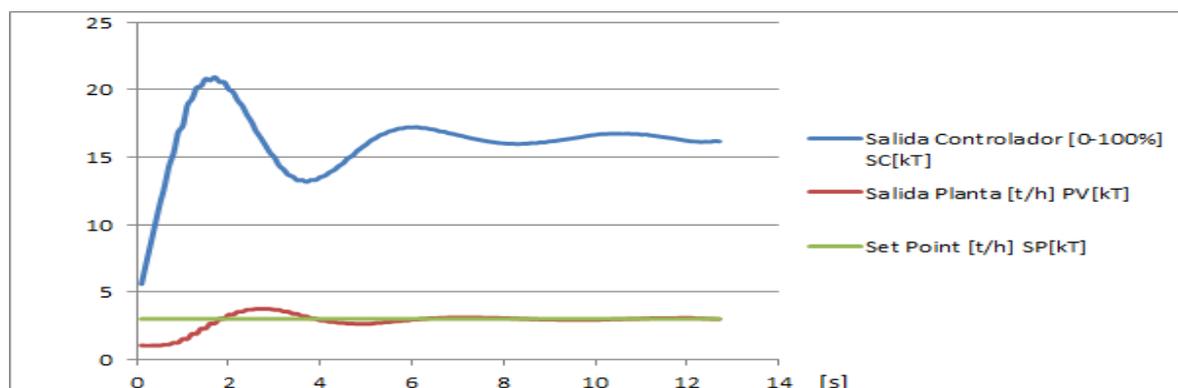
**Tabla 82-** Comparación de los controladores PID de yeso.

Parámetros	Antiguo	Resintonizado
ts [s]	10,8	2,3
Mp [%]	49,7	1,03
Ep [unidades]	0	0

Autoría propia

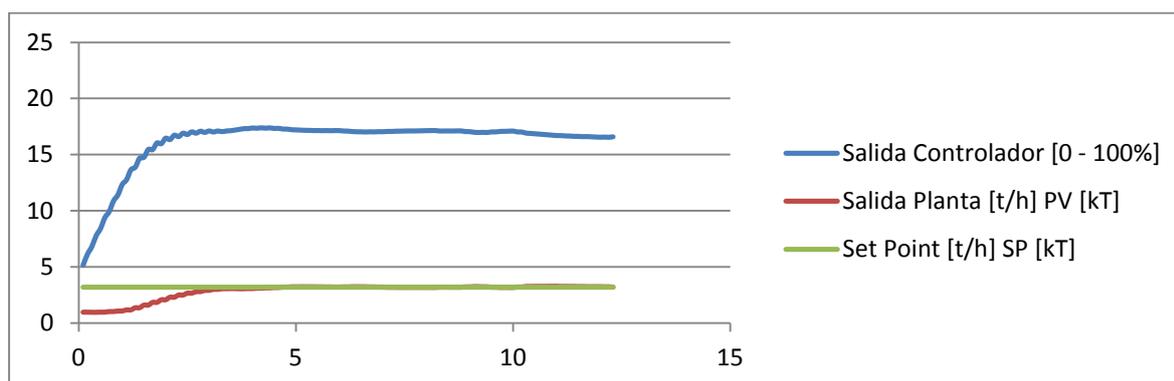
En la tabla 82 se observa claramente el mejoramiento de los parámetros del sistema después de la resintonización del controlador PID.

Así también se compara las respuestas reales en un tiempo de 12[s] con un cambio de tonelaje de seteo de 1 [t/h] a 3 [t/h], la figura 79 muestra la respuesta con el controlador PID antiguo; mientras que la figura 80 muestra la respuesta con el controlador PID resintonizado. Para el controlador resintonizado se tomó 120 datos con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], en un paso de 1 [t/h] a 3 [t/h].



**Figura 79** – Respuesta del control antiguo en lazo cerrado de la planta de yeso.

**Elaborado por:** Argoti-Loja



**Figura 80** – Respuesta del control resintonizado en lazo cerrado de la planta de yeso.  
**Elaborado por:** Argoti-Loja

Las gráficas reales demuestran que las simulaciones son correctas, ya que comprueban el mejoramiento del controlador, disminuyendo las oscilaciones, así también el tiempo de establecimiento.

- **Báscula pesadora alimentadora de puzolana**

Se puede realizar una tabla comparativa a partir de las tablas 70 y 73, entre las características de las respuestas ante una entrada paso entre la planta con el controlador PID antiguo y el controlador PID resintonizado:

**Tabla 83-** Comparación de los controladores PID de puzolana.

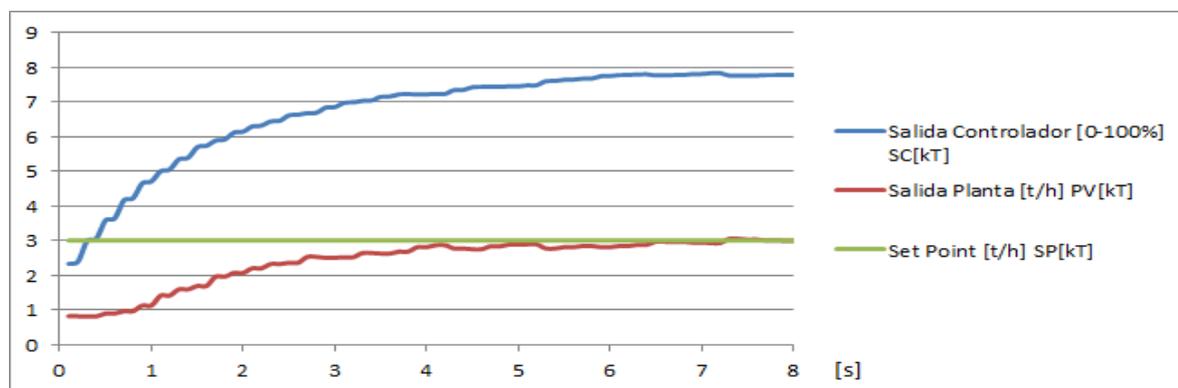
Parámetros	Antiguo	Resintonizado
ts [s]	4,7	3,06
Mp [%]	0	0
Ep [unidades]	0	0

Autoría propia

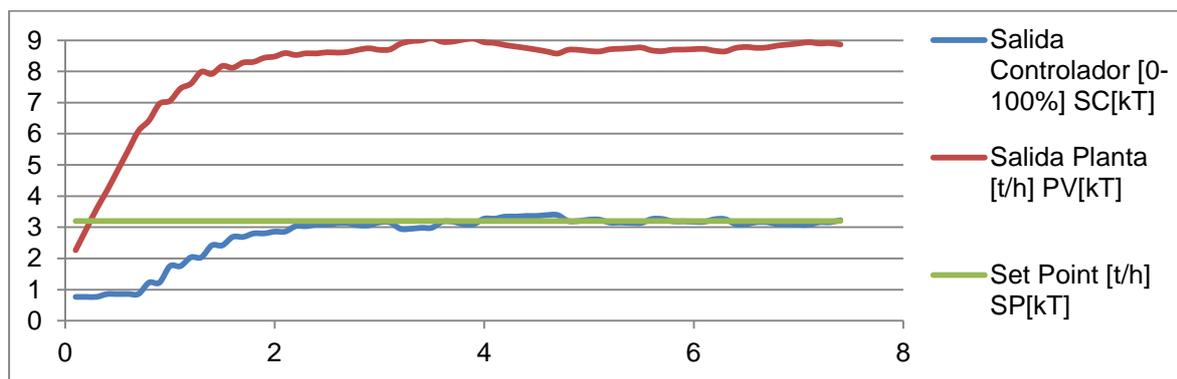
En la tabla 83 se observa claramente el mejoramiento de los parámetros del sistema después de la resintonización del controlador PID.

Así también se compara las respuestas reales en un tiempo de 8[s] con un cambio de tonelaje de seteo de 1 [t/h] a 3 [t/h], la figura 81 muestra la respuesta

con el controlador PID antiguo; mientras que la figura 82 muestra la respuesta con el controlador PID resintonizado. Para el controlador resintonizado se tomó 80 datos con un tiempo de muestreo de 0,1 [s], en un paso de 1 [t/h] a 3 [t/h].



**Figura 81** – Respuesta del control antiguo en lazo cerrado de la planta de puzolana.  
Elaborado por: Argoti-Loja



**Figura 82** – Respuesta del control resintonizado en lazo cerrado de la planta de puzolana.  
Elaborado por: Argoti-Loja

Las gráficas reales demuestran que las simulaciones son correctas, ya que comprueban el mejoramiento del controlador, con una disminución considerable en el tiempo de establecimiento.

## 5.2 PRUEBA DEL SIMULADOR DE BLAINE Y RETENIDO

Para la comprobación de la respuesta que presenta los modelos de curvas estáticas dentro del simulador de LabVIEW, se compara dichas respuestas con valores medidos de blaine y retenido del laboratorio de calidad (ANEXO F). A

continuación se presenta una tabla comparativa con sus respectivos errores relativos.

**Tabla 84-**Valores medidos y teóricos de Blaine y Retenido.

G35	G39	Alimentación	Blaine			Retenido		
			Teórico	Medido	Error	Teórico	Medido	Error
71	95	69	4033	4032	0,00%	3,8	3,2	15,8%
		70	4040	4163	3,00%	4,2	4,0	4,8%
		71	4198	4213	0,40%	5,2	4,3	17,3%
		72	4317	4121	-4,50%	4	3,2	20,0%
		73	4337	4405	1,60%	3,6	3,3	8,3%
		74	4356	4320	-0,80%	3,3	3,1	6,1%
		74,7	4370	4402	0,70%	3	2,7	10,0%
72	95	69,7	4054	3800	-6,30%	4,2	4,1	2,4%
		69,9	4040	4017	-0,60%	3,7	4,0	-8,1%
		70,1	4137	3850	-6,90%	3,8	3,7	2,6%
		70,3	4129	4200	1,70%	4,2	4,5	-7,1%
		70,5	4081	4150	1,70%	5,4	4,8	11,1%
		70,7	4136	3980	-3,80%	4,5	3,7	17,8%
		70,9	4191	3870	-7,70%	3,5	2,9	17,1%
72	97	69	4102	3998	-2,50%	4,9	4,0	18,4%
		70	4097	4209	2,70%	4,5	3,7	17,8%
		71	4093	4140	1,10%	4,7	4,1	12,8%
		72	4275	4088	-4,40%	3,4	3,8	-11,8%
		73	4274	4080	-4,50%	3,4	4,0	-17,6%
		74	4274	3925	-8,20%	3,5	3,4	2,9%
		79	4272	4011	-6,10%	3,7	3,2	13,5%

Autoría propia

Como se demuestra en la tabla 84 el error relativo para blaine se encuentra por debajo del 9%, mientras que el error relativo del retenido se encuentra por debajo del 20%; dicha tolerancia es aceptable para el simulador desarrollado.

### 5.3 PRUEBA DEL SIMULADOR TOTAL EN LAZO ABIERTO

Para la prueba del simulador, se compara la respuesta que presenta el simulador total en lazo abierto con los datos reales del ANEXO F, teniendo en cuenta la variable retorno. A continuación se presenta una tabla con sus respectivos errores relativos.

**Tabla 85**-Valores medidos y teóricos de Blaine y Retenido.

G35	G39	Alimentación	Retorno		
			Teórico	Medido	Error
71	95	66,0	73	75,0	2,8%
		67,0	79	75,9	-3,9%
		68,0	81	77,1	-4,9%
		69,0	73	77,8	6,5%
		70,0	75	79,0	5,3%
72	95	66,1	76	77,6	2,0%
		68,0	75	79,3	5,7%
		69,2	78	80,3	3,0%
		70,1	80	81,2	1,5%
		75,0	87	85,6	-1,6%
72	97	65,0	75	73,2	-2,4%
		65,3	76	73,5	-3,3%
		69,7	78	77,5	-0,7%
		70,0	77	77,8	1,0%
		80,0	89	86,8	-2,4%

Autoría propia

Como se demuestra en la tabla 85 el error relativo para el retorno se encuentra por debajo del 7%, dicha tolerancia es aceptable para el simulador desarrollado.

## 6 CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Una vez realizado el presente trabajo se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Al realizar el modelamiento de las plantas de las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana utilizando los datos registrados por la empresa durante la jornada normal de trabajo, los valores de aproximación de las plantas oscilaban entre 30% y 60%, siendo valores muy bajos; por lo que se hizo necesario realizar pruebas de escalón en lazo abierto a cada báscula para obtener datos directamente del HMI con un tiempo de muestreo constante de 0,1[s], lo que permitió obtener valores de aproximación en la planta muy cercanas al 100%.
- Al definir las ecuaciones de los modelos matemáticos de los controladores PI resintonizados, se aproximó sus discretizaciones mediante la integración trapezoidal, y además una aproximación de los valores de sus ceros y ganancias, ya que el modelo matemático discretizado que utilizan los PLC SIEMENS son patentados.
- Se obtuvieron modelos de funciones de transferencia del sistema de recaptación de polvo de cemento y de las plantas de las básculas pesadoras alimentadoras de clinker, yeso y puzolana con sus respectivos controladores; y no fue posible la función de transferencia de la respuesta de blaine y retenido; debido a que dichos valores de respuesta son muy variantes y dependientes de la apreciación humana que se realiza en el laboratorio de calidad; por lo que se optó por realizar un modelo de curvas estáticas con nuevos datos obtenidos con tiempo de toma de muestras de dos minutos.

- Al realizar la prueba de retenido de una misma muestra en dos mallas de  $45\mu\text{m}$  diferentes previamente limpiadas, se observa que el valor de retenido es diferente debido al desgaste que ha sufrido cada malla por el número de veces que se ha usado; por lo que se usó una sola malla al momento de realizar las pruebas en el laboratorio.
- En el momento de arranque del sistema de molienda y recaptación de cemento es posible obtener los datos de la planta ante una entrada escalón; pero el sistema responde de manera distinta en relación a su comportamiento normal de trabajo ante cambios del seteo de velocidad de los ventiladores G39 y G35, por tal motivo se modeló el sistema de recaptación con datos obtenidos después de 40 minutos de estabilización.
- Cuando el sistema de molienda y recaptación de cemento se encuentra en estado estable, la variación del retorno es muy amplia, dificultando la obtención de un modelo matemático de su comportamiento exacto; además al variar los seteos de velocidad de los ventiladores G39 y G35 así como la alimentación, el retorno presenta cierta tendencia ante estos cambios, por lo que el modelo matemático que se obtuvo fue en base a dichas tendencias.
- El diseño del PID global para la alimentación constante de material al molino de cemento se realizó gracias al simulador que incorpora todos los modelos matemáticos de plantas y controladores desarrollados por este proyecto; dándole así una mayor aproximación al comportamiento real del sistema total.
- Se mejoró notablemente el sistema de dosificación de materiales, ya que el sistema actual posee tiempos de estabilización mínimos para cada báscula pesadora alimentadora, además de sobre impulsos menores al 2%; ya que

a una dosificación más exacta de los materiales la calidad del producto mejora.

- La puesta en marcha del simulador representa una gran ayuda para el entrenamiento de nuevos panelistas frente a decisiones que se deban tomar, cuando los requerimientos de calidad del laboratorio obliguen el cambio de alguna variable en el panel central.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Una vez realizado el presente trabajo se ha podido llegar a las siguientes recomendaciones:

- Para realizar un estudio más exacto de la variable de retenido del cemento es necesario limpiar adecuadamente la malla de 45  $\mu\text{m}$  cada tres pruebas realizadas como máximo, y de preferencia usar una sola malla para una serie de pruebas de un experimento en particular; ya que tras cada prueba se puede acumular partículas que afectarán notablemente en el valor de retenido.
- Que para realizar un estudio más aproximado de las variables de finura del cemento (Blaine y Retenido) se podría enfocar la investigación desde un punto de vista físico de las partículas, es decir su granulometría, tanto a la entrada del molino de cemento como a la salida del separador de alta eficiencia, lo cual representaría un nuevo proyecto de investigación debido a la complejidad del proceso.
- Que el método de adquisición de datos debería ser de manera automática mediante un software que tome las variables necesarias directamente de la comunicación con el PLC, para el reporte diario que realiza el panel central, lo cual facilitará a la empresa la realización de futuros proyectos en automatización y control industrial.

- La unión en una misma plataforma de comunicación de los sensores y actuadores del área G para la implementación del control PID global del sistema de molienda y recaptación de cemento, así también el cambio de la banda de alimentación al molino de cemento de válvula rotatoria por una banda pesadora alimentadora.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

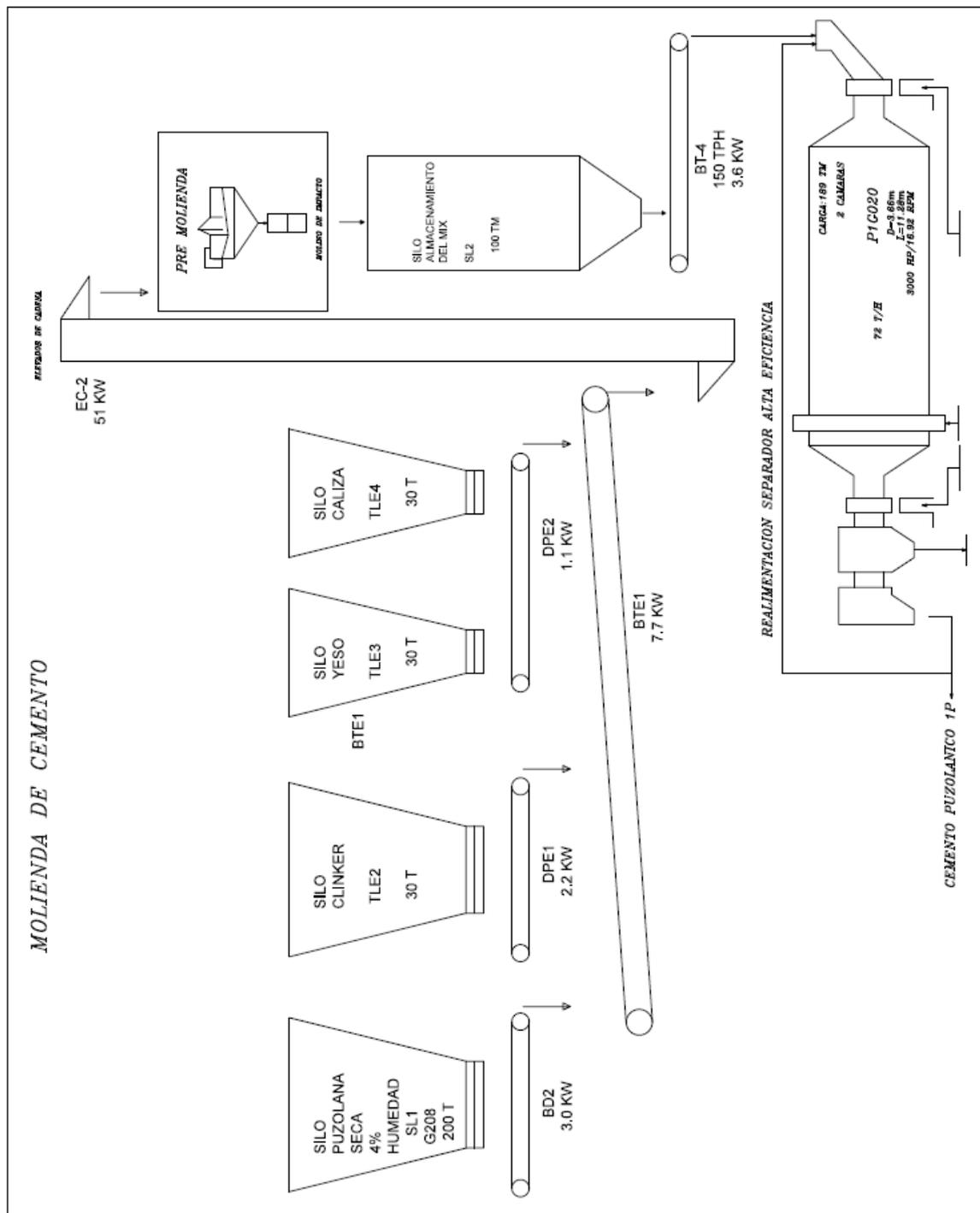
- [1] CEMENTOS  
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion16.CEMENTOS.SeparadoresAire.TIPOS.pdf>, pag 42.
- [2] Instituto Nacional de Normalización. Norma NTE INEN 490:2010 Quinta revisión. Quito, 2010.
- [3] Kuo, Benjamin. Sistemas de Control Automatico. México : Prentice Hall Hispanoamericana S. A., 1996.
- [4] Respuesta de sistemas de control y estabilidad.  
<http://www.isa.uma.es/C14/Presentaciones%20de%20Clase%20%28ppt%29/Document%20Library/RESPUESTA%20DE%20SISTEMAS%20DE%20CONTROL%20DISCRETO%20Y%20ESTABILIDAD.pdf>.
- [5] Rodríguez, Daniel y Alamo, Teodoro. Diseño de controladores discretos. Quito.
- [6] Vallejo, Eric. Identificación Paramétrica de sistemas dinámicos. Ingeniería & Desarrollo, 1997.
- [7] SIEMENS. Manual de Usuario Siemens S7-300/400. 1994.
- [8] National Instruments Inc. Ayuda de Usuario LabVIEW.
- [9] ThyssenKrupp Industrial Solutions GmbH. ThyssenKrupp Industrial Solutions. Service for the cement-industry.  
<http://www.thyssenkrupp-resource-technologies.com/fileadmin/documents/brochures/1554%20-%20Spanien.pdf>.

- [10] Majid, Abdul. Handbook for Cement Engineers. Johar Town, Lahore-Pakistan: Institute for Professional Advancement.
- [11] Alsop, Philip. Cement Plant Operations Handbook. Ucrania: Octubre, 2007. Quinta Edición.

# **ANEXOS**

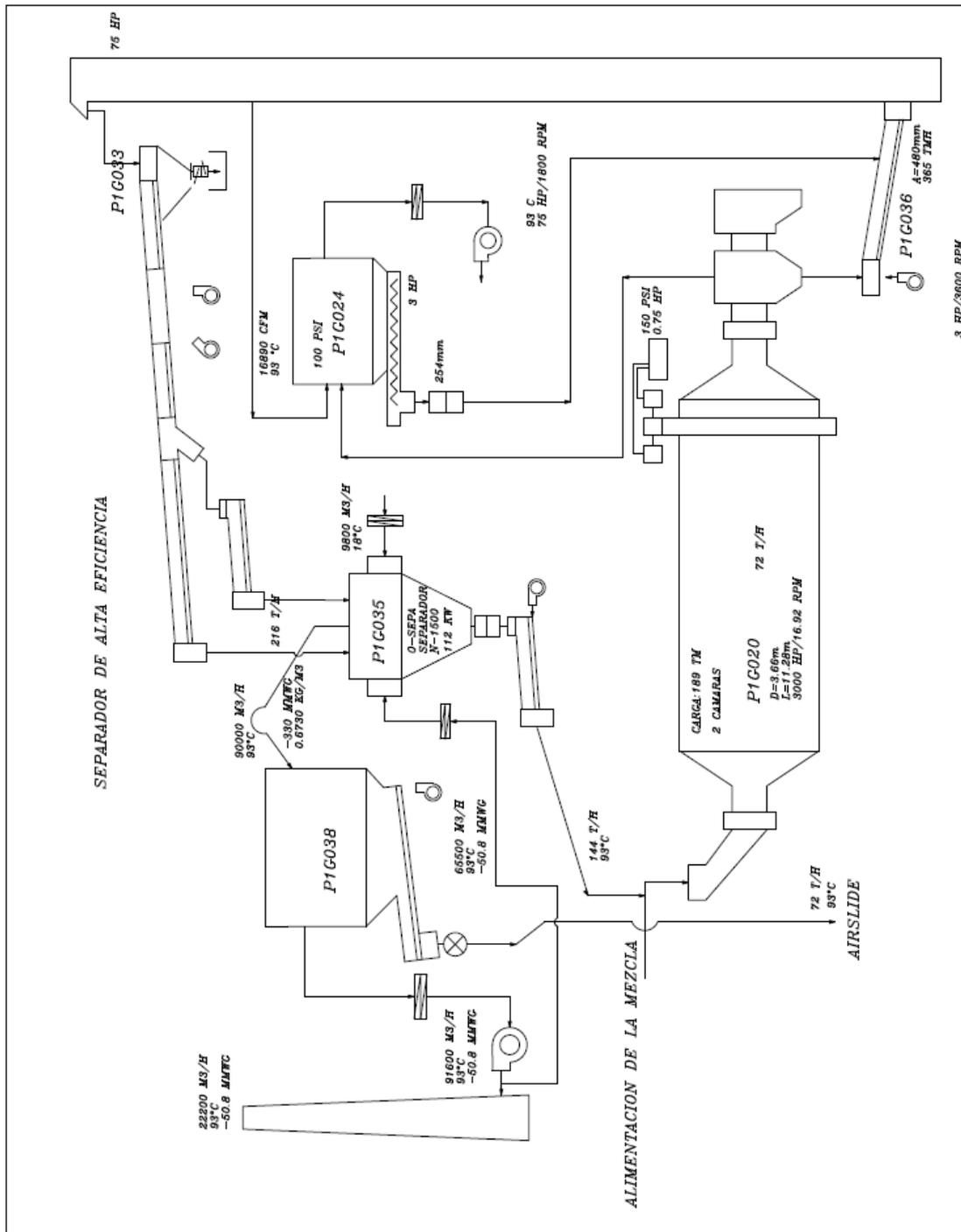
# **ANEXO A**

## **DIAGRAMA DE MOLIENDA DE CEMENTO**



# **ANEXO B**

## **DIAGRAMA DEL SEPARADOR DE ALTA EFICIENCIA**



# **ANEXO C**

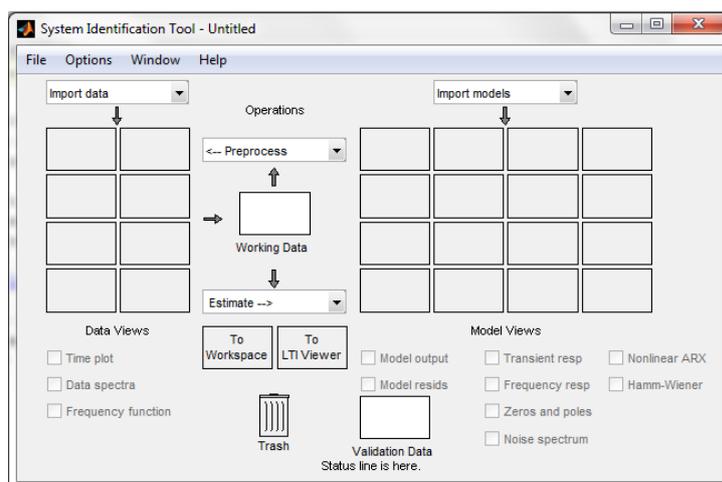
## **GUÍA DE USO DE LA HERRAMIENTA IDENT**

En el programa MATLAB en la barra de menús damos clic en “Desktop” y activamos la ventana “Workspace”. En esta ventana creamos una variable presionando el botón “new variable” a la cual le asignamos un nombre, tanto para el conjunto de datos de entrada y salida, para nuestro caso indicaremos la nomenclatura utilizada a continuación:

Descripción	Variable	Tipo
Entrada Puzolana Set-point	puzolana_in	vector
Salida Puzolana	puzolana_out	vector
Entrada Yeso Set-point	outc_yeso	vector
Salida Yeso Set-point	outp_yeso	vector
Entrada Clinker Set-point	outc_clinker	vector
Salida Clinker Set-point	outp_clinker	vector

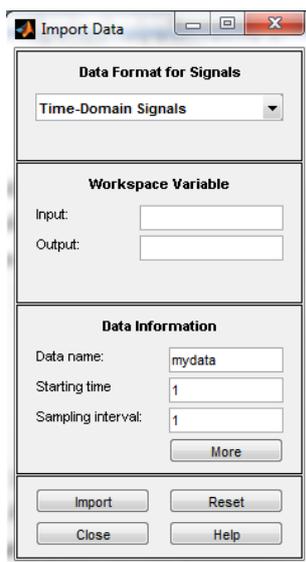
Al dar doble clic sobre la variable creada, se despliega una hoja de Excel en la cual podemos ingresar los datos previamente tabulados. Luego procedemos a abrir el “IDENT”

En la ventana de comandos escribimos “IDENT”, de inmediato nos presentará la siguiente ventana:



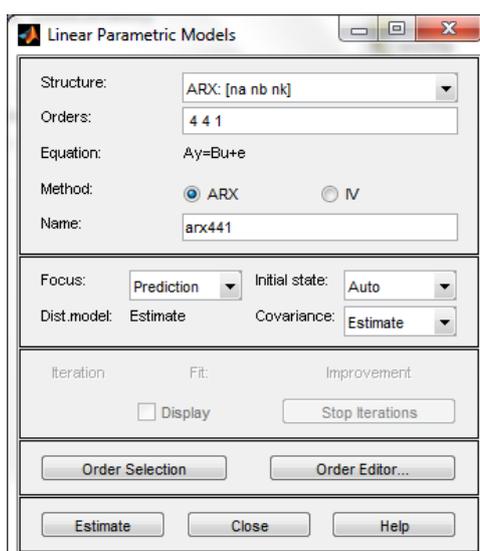
**Figura C.1** – Ventana principal de la herramienta IDENT.

Se escoge en la pestaña “Import data” la opción “Time domain data”, con lo cual se desplegará una ventana en la cual podremos importar las variables de entrada y salida al colocar sus respectivos nombres; así como también podremos colocar el tiempo de muestreo y tiempo de inicio:



**Figura C.2** – Ventana de importación de datos de la herramienta IDENT.

Luego se presiona el botón “Import”, y a continuación se carga nuestro paquete de trabajo en la ventana principal del IDENT; después se selecciona en la pestaña “Estimate” la opción “Lineal parametrics models” donde para nuestro caso elegiremos la estructura ARX:



**Figura C.3** – Ventana de selección del modelo de estimación de la herramienta IDENT.

**Estructura:** Dentro de esta pestaña podremos elegir diferentes tipos de estructura para estimar, donde las más comunes son: ARX y ARMAX.

**Orden:** En este cuadro definiremos el valor de na, nb y nk siendo na el número de polos, nb – 1 el número de ceros y nk el retardo.

**Método:** Podemos elegir entre el método ARX y el método IV

- **ARX:** minimiza la suma de los cuadrados del lado derecho menos el izquierdo de la expresión (1-26), con respecto a “a” y “b”.
- **IV:** Determina a y b de modo que el error entre la parte derecha y la parte izquierda de la ecuación (1-26) llegue a ser no correlacionada con alguna combinación lineal de las entradas.

**Nombre:** Se asigna un nombre a la estimación.

A continuación presionamos el botón “Estimate” con lo cual se mostrará la estimación de nuestro modelo en un cuadro de la parte derecha de la ventana principal del IDENT.

Para examinar nuestros modelos estimados en la ventana principal del IDENT existen varias opciones que son:

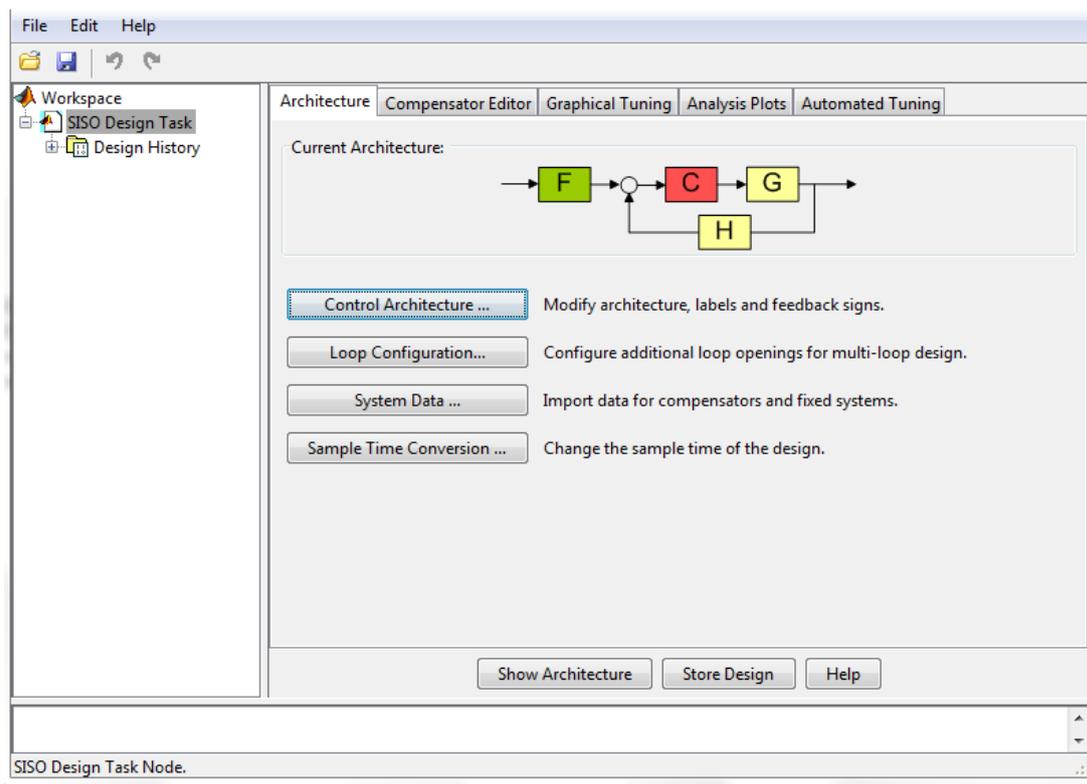
- Respuesta de Frecuencia (Frequency response)
- Respuesta transitoria a una entrada impulso (Transient response)
- Diagrama de polos y ceros (Zeros and poles)
- Espectro de ruido (Noise spectrum)
- Model Resids: realiza una función de correlación entre entrada y los residuos  $e(t)$  (valores que no han podido ser descritos por el modelo), y así mostrar la región de confianza para el modelo.
- Model output: es una de las mejores maneras de obtener la relación entre los datos de entrada y la salida simulada del modelo, lo que nos da una idea de la calidad del modelo mediante un porcentaje de aproximación entre los mismos.

Por último para trabajar con nuestro modelo estimado mediante los demás Toolbox de MATLAB sólo hace falta arrastrar dentro de la pantalla principal de "IDENT", nuestro modelo hacia el cuadro "To Workspace"; así también de la misma manera para utilizar en "To LTI Viewer". Si algún modelo queremos desecharlo, lo arrastramos hacia "Trash" en la ventana principal (Figura C.1).

# **ANEXO D**

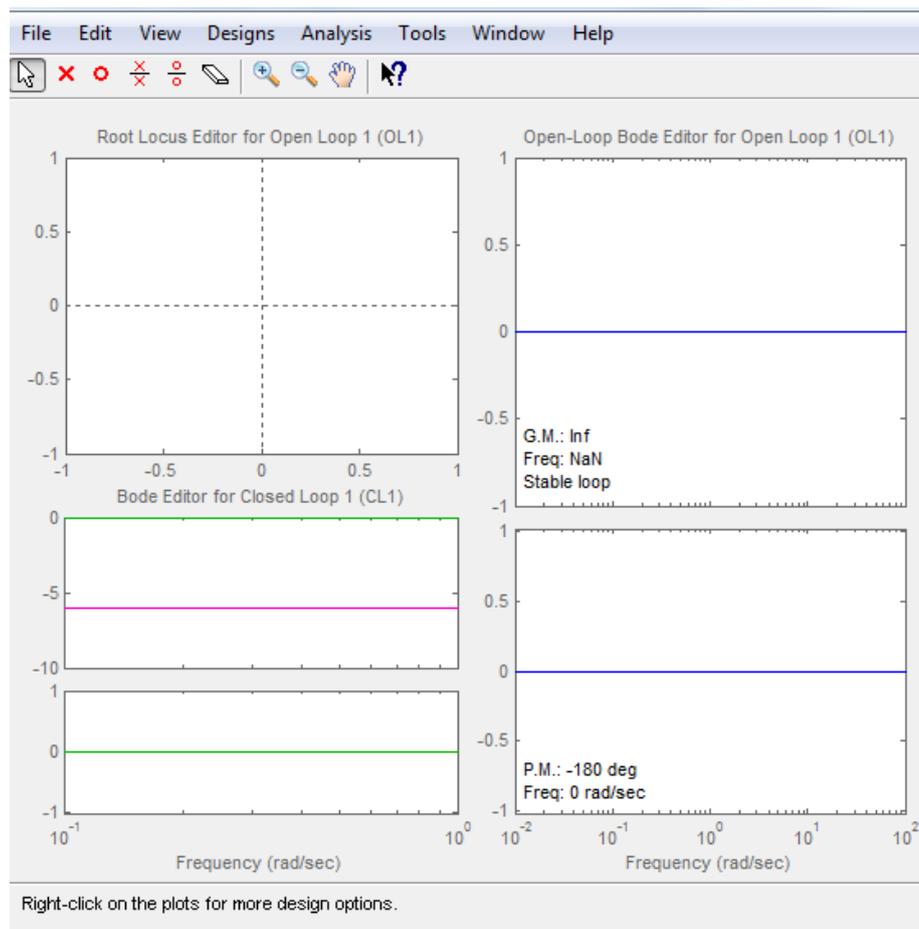
**INSTRUCCIONES DE USO PARA  
LA HERRAMIENTA SISOTOOL**

Al comenzar a utilizar SISOTOOL se debe definir la planta a ser controlada como función de transferencia, luego se activa al escribir el comando “sisotool” en la línea de comandos de MATLAB. De inmediato se despliega dos ventanas llamadas “Control and Estimation Tool Manager” y “SISO Design for SISO Design Task”.



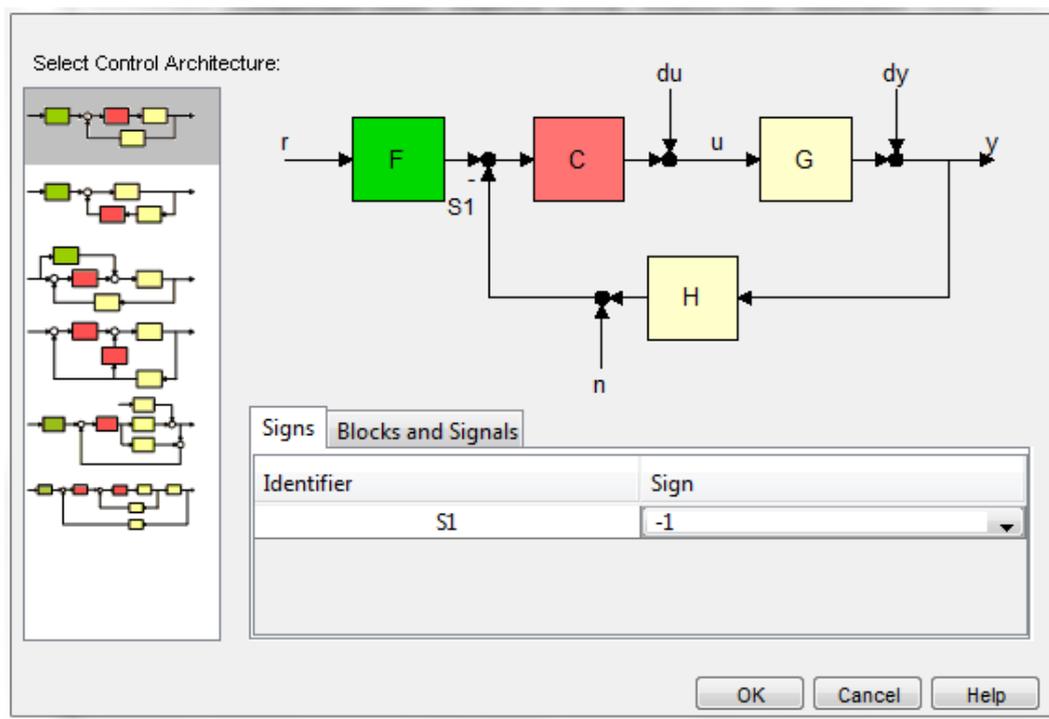
**Figura D.1** – Ventana “Control and Estimation Tool Manager” de la herramienta SISOTOOL.

En la ventana de “Control and Estimation Tool Manager” se puede cambiar de un dominio de tiempo continuo en “s” a dominio en tiempo discreto en “z” o viceversa, para esto sólo es necesario dar clic en el botón “Sample Time Conversion” digitando el tiempo de muestreo necesario y eligiendo el tipo de aproximación de discretización de la función.



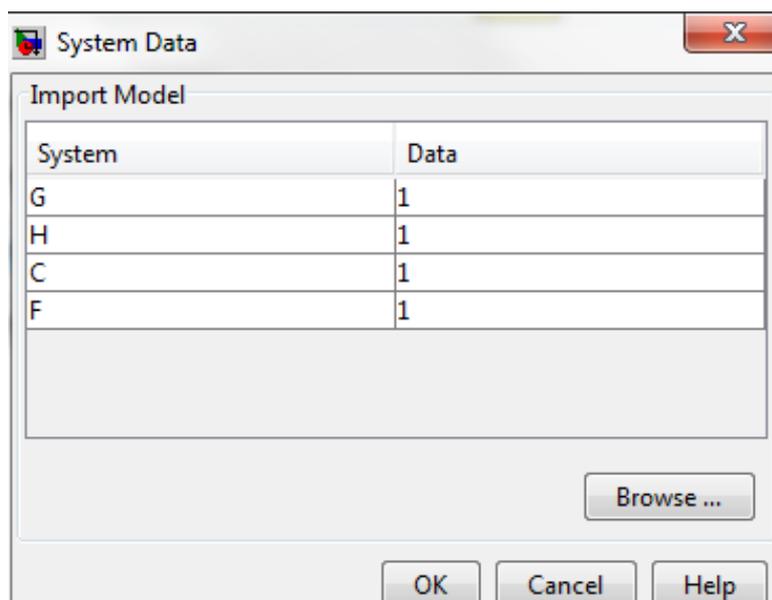
**Figura D.2** – Ventana “SISO Design for SISO Design Task” de la herramienta SISOTOOL.

En “Control and Estimation Tool Manager” se puede elegir la arquitectura de control con la cual se trabajará. Basta con dar clic en el botón “Control Architecture” de la pestaña “Architecture” como se muestra en la Fig. D.3.



**Figura D.3** – Ventana “Architecture” de la herramienta SISOTOOL.

Luego de elegir el tipo de estructura se procede a importar la función de transferencia de la planta, para lo cual damos clic en el botón “System Data” donde se despliega la siguiente ventana:



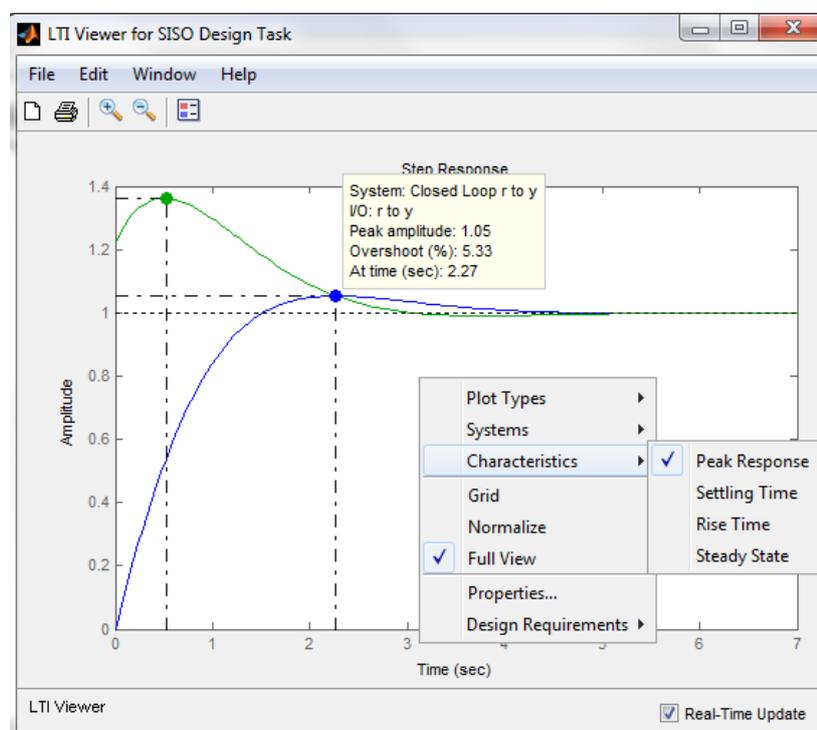
**Figura D.4** – Datos del sistema de la herramienta SISOTOOL.

Se da clic en el botón “Browse” y se escoge la función de transferencia deseada para la planta y luego clic en el botón “Import”, se cierra la ventana y por último clic en “OK”.

En este instante se visualiza automáticamente en la ventana de “SISO Design for SISO Design Task” las gráficas del LGR, Diagrama de Bode en lazo abierto y en lazo cerrado; sin el controlador.

Una utilidad importante de esta herramienta es la visualización de la respuesta paso del sistema, esto se logra mediante un clic en el menú “Analysis” y seleccionando “Response to Step Command”; así también podemos visualizar la respuesta de rechazo a la perturbación de un escalón, diagrama de Bode en lazo cerrado, diagrama de Nyquist entre otros.

Dentro de la gráfica de la respuesta ante una entrada paso, se puede observar las características tanto en régimen permanente como en respuesta transitoria como se observa en la Fig. D.5.



**Figura D.5** – Vista de la respuesta paso de la herramienta SISOTOOL.

Para iniciar la sintonización de un controlador existen dos formas básicas; la primera es diseñándola de manera teórica e ingresando la función de transferencia del controlador en la pestaña “Compensator Editor” y la segunda es utilizar “Automated Tuning” de la ventana Control and Estimation Tool Manager”.

En la pestaña “Compensator Editor” mediante la utilización de clic derecho se puede ingresar los ceros y polos deseados, así también el valor de la ganancia, es aconsejable ingresar los parámetros en el orden explicado.

En la pestaña “Automated Tuning” se puede escoger entre varios métodos de diseño como por ejemplo: “PID Tuning”, “Internal Model Control” (IMC), “Optimization Based Tuning”, “LQG Synthesis” y “Loop Shaping”.

Para el diseño de un PID se puede elegir entre control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo; se puede utilizar también un filtro. Dentro de este diseño se puede elegir varios tipos de sintonización como son: “Robust response time”, “Ziegler-Nichols” en lazo abierto y cerrado, entre otros. Luego basta con un clic en el botón “Updater Compensator” para que el controlador sintonizado se presente en la pestaña “Compensator Editor”.

Como paso final para una sintonización óptima se recurre al trabajo conjunto entre el diagrama del LGR y la respuesta paso, moviendo la ganancia y los ceros si es necesario; también en el diagrama de Bode de lazo abierto se puede mover los ceros hasta obtener una respuesta con parámetros de sobreimpulso, tiempo de establecimiento y tiempo de crecimiento deseado.

# **ANEXO E**

**DATOS DE ENTRADA Y SALIDA  
DE LAS BANDAS PESADORAS  
ALIMENTADORAS EN LAZO  
ABIERTO**

### DATOS DE LAS BANDA PESADORA ALIMENTADORA DE CLINKER

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
0,1	65,63	64,13
0,2	65,62	64,15
0,3	65,62	64,15
0,4	65,62	64,17
0,5	65,62	64,17
0,6	65,61	64,19
0,7	65,61	64,19
0,8	65,59	64,23
0,9	65,58	64,23
1	65,54	64,37
1,1	65,51	64,37
1,2	65,43	64,55
1,3	65,37	64,55
1,4	65,24	64,72
1,5	65,20	64,72
1,6	65,05	64,82
1,7	65,00	64,82
1,8	64,87	64,84
1,9	64,81	64,84
2	64,72	64,74
2,1	64,68	64,74
2,2	64,63	64,56
2,3	64,60	64,56
2,4	64,59	64,36
2,5	64,58	64,36
2,6	64,60	64,19
2,7	64,60	64,19
2,8	64,64	64,03
2,9	64,65	64,03
3	64,72	63,92
3,1	64,73	63,92
3,2	64,81	63,84
3,3	64,83	63,84
3,4	64,90	63,82

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
3,5	64,93	63,82
3,6	65,00	63,81
3,7	65,02	63,81
3,8	65,09	63,82
3,9	65,12	63,82
4	65,17	63,84
4,1	65,19	63,84
4,2	65,23	63,92
4,3	65,25	63,92
4,4	65,25	64,04
4,5	65,26	64,04
4,6	65,24	64,16
4,7	65,24	64,16
4,8	65,21	64,24
4,9	65,21	64,24
5	65,18	64,28
5,1	65,17	64,28
5,2	65,14	64,30
5,3	65,13	64,30
5,4	65,10	64,32
5,5	65,08	64,32
5,6	65,05	64,34
5,7	65,03	64,34
5,8	64,99	64,37
5,9	64,97	64,37
6	64,92	64,39
6,1	64,91	64,39
6,2	64,87	64,37
6,3	64,85	64,37
6,4	64,83	64,33
6,5	64,81	64,33
6,6	64,81	64,25
6,7	64,80	64,25
6,8	64,82	64,15

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
6,9	64,82	64,15
7	64,84	64,08
7,1	64,85	64,08
7,2	64,89	64,02
7,3	64,90	64,02
7,4	64,94	63,98
7,5	64,95	63,98
7,6	64,99	63,97
7,7	65,00	63,97
7,8	65,04	63,97
7,9	65,06	63,97
8	65,10	63,95
8,1	65,11	63,95
8,2	65,17	63,90
8,3	65,19	63,90
8,4	65,26	63,84
8,5	65,29	63,84
8,6	65,37	63,79
8,7	65,40	63,79
8,8	65,47	63,76
8,9	65,51	63,76
9	65,57	63,79
9,1	65,60	63,79
9,2	65,62	63,87
9,3	65,62	63,87
9,4	65,62	63,97
9,5	65,62	63,97
9,6	65,62	64,10
9,7	65,62	64,10
9,8	65,62	64,23
9,9	65,62	64,23
10	65,62	64,36
10,1	65,62	64,36
10,2	65,62	64,48
10,3	65,62	64,48
10,4	65,62	64,57

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
10,5	65,62	64,57
10,6	65,62	64,58
10,7	65,62	64,58
10,8	65,62	64,57
10,9	65,62	64,57
11	65,62	64,55
11,1	65,62	64,55
11,2	65,62	64,52
11,3	65,62	64,52
11,4	65,62	64,51
11,5	65,62	64,51
11,6	65,62	64,51
11,7	20,00	64,51
11,8	20,00	64,49
11,9	20,00	64,49
12	20,00	64,45
12,1	20,00	64,45
12,2	20,00	63,94
12,3	20,00	63,94
12,4	20,00	62,08
12,5	20,00	62,08
12,6	20,00	58,43
12,7	20,00	58,43
12,8	20,00	53,52
12,9	20,00	53,52
13	20,00	48,09
13,1	20,00	48,09
13,2	20,00	42,94
13,3	20,00	42,94
13,4	20,00	38,54
13,5	20,00	38,54
13,6	20,00	34,80
13,7	20,00	34,80
13,8	20,00	31,72
13,9	20,00	31,72
14	20,00	29,22

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
14,1	20,00	29,22
14,2	20,00	27,20
14,3	20,00	27,20
14,4	20,00	25,56
14,5	20,00	25,56
14,6	20,00	24,27
14,7	20,00	24,27
14,8	20,00	23,25
14,9	20,00	23,25
15	20,00	22,46
15,1	20,00	22,46
15,2	20,00	21,83
15,3	20,00	21,83
15,4	20,00	21,36
15,5	20,00	21,36
15,6	20,00	21,00
15,7	20,00	21,00
15,8	20,00	20,73
15,9	20,00	20,73
16	20,00	20,53
16,1	20,00	20,53
16,2	20,00	20,37
16,3	20,00	20,37
16,4	20,00	20,21
16,5	20,00	20,21
16,6	20,00	20,08
16,7	20,00	20,08
16,8	20,00	19,97
16,9	20,00	19,97
17	20,00	19,90
17,1	20,00	19,90
17,2	20,00	19,87
17,3	20,00	19,87
17,4	20,00	19,86
17,5	20,00	19,86
17,6	20,00	19,85

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
17,7	20,00	19,85
17,8	20,00	19,84
17,9	20,00	19,84
18	20,00	19,81
18,1	20,00	19,81
18,2	20,00	19,77
18,3	20,00	19,77
18,4	20,00	19,71
18,5	20,00	19,71
18,6	20,00	19,67
18,7	20,00	19,67
18,8	20,00	19,67
18,9	20,00	19,67
19	20,00	19,69
19,1	20,00	19,69
19,2	20,00	19,73
19,3	20,00	19,73
19,4	20,00	19,78
19,5	20,00	19,78
19,6	20,00	19,83
19,7	20,00	19,83
19,8	20,00	19,86
19,9	20,00	19,86
20	20,00	19,88
20,1	20,00	19,88
20,2	20,00	19,89
20,3	20,00	19,89
20,4	20,00	19,90
20,5	40,00	19,90
20,6	40,00	19,93
20,7	40,00	19,93
20,8	40,00	19,98
20,9	40,00	19,98
21	40,00	20,64
21,1	40,00	20,64
21,2	40,00	22,15

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
21,3	40,00	22,15
21,4	40,00	24,25
21,5	40,00	24,25
21,6	40,00	26,56
21,7	40,00	26,56
21,8	40,00	28,71
21,9	40,00	28,71
22	40,00	30,67
22,1	40,00	30,67
22,2	40,00	32,34
22,3	40,00	32,34
22,4	40,00	33,67
22,5	40,00	33,67
22,6	40,00	34,73
22,7	40,00	34,73
22,8	40,00	35,56
22,9	40,00	35,56
23	40,00	36,25
23,1	40,00	36,25
23,2	40,00	36,85
23,3	40,00	36,85
23,4	40,00	37,34
23,5	40,00	37,34
23,6	40,00	37,73
23,7	40,00	37,73
23,8	40,00	38,05
23,9	40,00	38,05
24	40,00	38,32
24,1	40,00	38,32
24,2	40,00	38,51
24,3	40,00	38,51
24,4	40,00	38,63
24,5	40,00	38,63
24,6	40,00	38,71
24,7	40,00	38,71
24,8	40,00	38,79

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
24,9	40,00	38,79
25	40,00	38,86
25,1	40,00	38,86
25,2	40,00	38,93
25,3	40,00	38,93
25,4	40,00	39,01
25,5	40,00	39,01
25,6	40,00	39,09
25,7	40,00	39,09
25,8	40,00	39,20
25,9	40,00	39,20
26	40,00	39,30
26,1	40,00	39,30
26,2	40,00	39,38
26,3	40,00	39,38
26,4	40,00	39,42
26,5	40,00	39,42
26,6	40,00	39,41
26,7	40,00	39,41
26,8	40,00	39,37
26,9	40,00	39,37
27	40,00	39,29
27,1	40,00	39,29
27,2	40,00	39,20
27,3	40,00	39,20
27,4	40,00	39,14
27,5	40,00	39,14
27,6	40,00	39,12
27,7	40,00	39,12
27,8	40,00	39,13
27,9	40,00	39,13
28	40,00	39,16
28,1	40,00	39,16
28,2	40,00	39,21
28,3	40,00	39,21
28,4	40,00	39,26

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
28,5	40,00	39,26
28,6	40,00	39,27
28,7	40,00	39,27
28,8	40,00	39,29
28,9	60,00	39,29
29	60,00	39,29
29,1	60,00	39,29
29,2	60,00	39,29
29,3	60,00	39,29
29,4	60,00	39,73
29,5	60,00	39,73
29,6	60,00	41,06
29,7	60,00	41,06
29,8	60,00	43,12
29,9	60,00	43,12
30	60,00	45,48
30,1	60,00	45,48
30,2	60,00	47,80
30,3	60,00	47,80
30,4	60,00	49,90
30,5	60,00	49,90
30,6	60,00	51,66
30,7	60,00	51,66
30,8	60,00	53,06
30,9	60,00	53,06
31	60,00	54,17
31,1	60,00	54,17
31,2	60,00	55,02
31,3	60,00	55,02
31,4	60,00	55,65
31,5	60,00	55,65
31,6	60,00	56,14
31,7	60,00	56,14
31,8	60,00	56,52
31,9	60,00	56,52
32	60,00	56,84

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
32,1	60,00	56,84
32,2	60,00	57,09
32,3	60,00	57,09
32,4	60,00	57,33
32,5	60,00	57,33
32,6	60,00	57,56
32,7	60,00	57,56
32,8	60,00	57,78
32,9	60,00	57,78
33	60,00	57,99
33,1	60,00	57,99
33,2	60,00	58,18
33,3	60,00	58,18
33,4	60,00	58,36
33,5	60,00	58,36
33,6	60,00	58,52
33,7	60,00	58,52
33,8	60,00	58,64
33,9	60,00	58,64
34	60,00	58,71
34,1	60,00	58,71
34,2	60,00	58,75
34,3	60,00	58,75
34,4	60,00	58,78
34,5	60,00	58,78
34,6	60,00	58,80
34,7	60,00	58,80
34,8	60,00	58,79
34,9	60,00	58,79
35	60,00	58,77
35,1	60,00	58,77
35,2	60,00	58,76
35,3	60,00	58,76
35,4	60,00	58,78
35,5	60,00	58,78
35,6	60,00	58,84

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
35,7	60,00	58,84
35,8	60,00	58,88
35,9	60,00	58,88
36	60,00	58,88
36,1	20,00	58,88
36,2	20,00	58,84
36,3	20,00	58,84
36,4	20,00	58,75
36,5	20,00	58,75
36,6	20,00	58,43
36,7	20,00	58,43
36,8	20,00	56,79
36,9	20,00	56,79
37	20,00	53,33
37,1	20,00	53,33
37,2	20,00	48,90
37,3	20,00	48,90
37,4	20,00	44,25
37,5	20,00	44,25
37,6	20,00	39,88
37,7	20,00	39,88
37,8	20,00	36,03
37,9	20,00	36,03
38	20,00	32,78
38,1	20,00	32,78
38,2	20,00	30,10
38,3	20,00	30,10
38,4	20,00	27,90
38,5	20,00	27,90
38,6	20,00	26,11
38,7	20,00	26,11
38,8	20,00	24,69
38,9	20,00	24,69
39	20,00	23,57
39,1	20,00	23,57
39,2	20,00	22,69

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
39,3	20,00	22,69
39,4	20,00	22,01
39,5	20,00	22,01
39,6	20,00	21,48
39,7	20,00	21,48
39,8	20,00	21,09
39,9	20,00	21,09
40	20,00	20,77
40,1	20,00	20,77
40,2	20,00	20,51
40,3	20,00	20,51
40,4	20,00	20,31
40,5	20,00	20,31
40,6	20,00	20,15
40,7	20,00	20,15
40,8	20,00	20,04
40,9	20,00	20,04
41	20,00	19,96
41,1	20,00	19,96
41,2	20,00	19,89
41,3	20,00	19,89
41,4	20,00	19,85
41,5	20,00	19,85
41,6	20,00	19,79
41,7	20,00	19,79
41,8	20,00	19,72
41,9	20,00	19,72
42	20,00	19,65
42,1	20,00	19,65
42,2	20,00	19,59
42,3	20,00	19,59
42,4	20,00	19,56
42,5	20,00	19,56
42,6	20,00	19,55
42,7	20,00	19,55
42,8	20,00	19,55

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
42,9	20,00	19,55
43	63,00	19,55
43,1	63,00	19,55
43,2	63,00	19,54
43,3	63,00	19,54
43,4	63,00	19,65
43,5	63,00	19,65
43,6	63,00	20,48
43,7	63,00	20,48
43,8	63,00	22,84
43,9	63,00	22,84
44	63,00	26,48
44,1	63,00	26,48
44,2	63,00	31,08
44,3	63,00	31,08
44,4	63,00	36,13
44,5	63,00	36,13
44,6	63,00	40,77
44,7	63,00	40,77
44,8	63,00	44,80
44,9	63,00	44,80
45	63,00	48,16
45,1	63,00	48,16
45,2	63,00	50,89
45,3	63,00	50,89
45,4	63,00	53,06
45,5	63,00	53,06
45,6	63,00	54,72
45,7	63,00	54,72
45,8	63,00	55,98
45,9	63,00	55,98
46	63,00	56,95
46,1	63,00	56,95
46,2	63,00	57,75
46,3	63,00	57,75
46,4	63,00	58,48

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
46,5	63,00	58,48
46,6	63,00	59,14
46,7	63,00	59,14
46,8	63,00	59,72
46,9	63,00	59,72
47	63,00	60,17
47,1	63,00	60,17
47,2	63,00	60,43
47,3	63,00	60,43
47,4	63,00	60,57
47,5	63,00	60,57
47,6	63,00	60,64
47,7	63,00	60,64
47,8	63,00	60,68
47,9	63,00	60,68
48	63,00	60,72
48,1	63,00	60,72
48,2	63,00	60,76
48,3	63,00	60,76
48,4	63,00	60,78
48,5	63,00	60,78
48,6	63,00	60,81
48,7	63,00	60,81
48,8	63,00	60,85
48,9	63,00	60,85
49	63,00	60,90
49,1	63,00	60,90
49,2	63,00	61,00
49,3	63,00	61,00
49,4	63,00	61,14
49,5	63,00	61,14
49,6	63,00	61,29
49,7	63,00	61,29
49,8	63,00	61,44
49,9	63,00	61,44
50	63,00	61,52

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
50,1	63,00	61,52
50,2	63,00	61,49
50,3	63,00	61,49
50,4	63,00	61,37
50,5	63,00	61,37
50,6	63,00	61,20
50,7	63,00	61,20
50,8	63,00	61,03
50,9	63,00	61,03
51	63,00	60,92
51,1	63,00	60,92
51,2	63,00	60,87
51,3	63,00	60,87
51,4	63,00	60,85
51,5	63,00	60,85
51,6	63,00	60,87
51,7	63,00	60,87
51,8	63,00	60,90
51,9	63,00	60,90
52	63,00	60,92
52,1	63,00	60,92
52,2	63,00	60,94
52,3	63,00	60,94
52,4	63,34	60,98
52,5	63,60	60,98
52,6	64,19	60,99
52,7	64,44	60,99
52,8	65,05	60,96
52,9	65,31	60,96
53	65,93	60,90
53,1	66,19	60,90
53,2	66,81	60,88
53,3	67,07	60,88
53,4	67,66	60,95
53,5	67,92	60,95
53,6	68,44	61,16

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
53,7	68,68	61,16
53,8	69,12	61,52
53,9	69,33	61,52
54	69,65	62,00
54,1	69,83	62,00
54,2	70,01	62,61
54,3	70,13	62,61
54,4	70,19	63,30
54,5	70,26	63,30
54,6	70,19	63,98
54,7	70,21	63,98
54,8	70,03	64,62
54,9	69,99	64,62
55	69,72	65,18
55,1	69,63	65,18
55,2	69,29	65,65
55,3	69,17	65,65
55,4	68,76	66,02
55,5	68,61	66,02
55,6	68,17	66,27
55,7	68,00	66,27
55,8	67,56	66,40
55,9	67,38	66,40
56	66,95	66,41
56,1	66,77	66,41
56,2	66,36	66,37
56,3	66,19	66,37
56,4	65,81	66,24
56,5	65,65	66,24
56,6	65,33	66,02
56,7	65,18	66,02
56,8	64,93	65,73
56,9	64,80	65,73
57	64,62	65,40
57,1	64,52	65,40
57,2	64,43	65,02

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
57,3	64,36	65,02
57,4	64,34	64,62
57,5	64,30	64,62
57,6	64,36	64,22
57,7	64,35	64,22
57,8	64,48	63,84
57,9	64,51	63,84
58	64,69	63,49
58,1	64,75	63,49
58,2	64,98	63,19
58,3	65,06	63,19
58,4	65,31	62,98
58,5	65,41	62,98
58,6	65,67	62,87
58,7	65,77	62,87
58,8	66,02	62,85
58,9	66,13	62,85
59	66,36	62,88
59,1	66,47	62,88
59,2	66,69	62,92
59,3	66,79	62,92
59,4	67,00	62,99
59,5	67,09	62,99
59,6	67,28	63,09
59,7	67,36	63,09
59,8	67,51	63,24
59,9	67,58	63,24
60	67,68	63,44

### DATOS DE LAS BANDA PESADORA ALIMENTADORA DE YESO

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
0,1	9,62	2,09
0,2	9,62	2,09
0,3	9,62	2,08
0,4	9,62	2,08
0,5	9,62	2,09
0,6	9,62	2,09
0,7	9,62	2,10
0,8	9,62	2,10
0,9	9,62	2,12
1	9,62	2,12
1,1	9,62	2,13
1,2	9,62	2,13
1,3	9,62	2,15
1,4	9,62	2,15
1,5	9,62	2,15
1,6	9,62	2,15
1,7	9,62	2,13
1,8	9,62	2,13
1,9	9,62	2,13
2	9,62	2,13
2,1	9,62	2,13
2,2	9,62	2,13
2,3	9,62	2,15
2,4	9,62	2,15
2,5	9,62	2,16
2,6	9,62	2,16
2,7	9,62	2,15
2,8	9,62	2,15
2,9	9,62	2,13
3	9,62	2,13
3,1	9,62	2,13
3,2	9,62	2,13
3,3	9,62	2,14
3,4	9,62	2,14

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
3,5	1,00	2,14
3,6	1,00	2,14
3,7	1,00	2,12
3,8	1,00	2,12
3,9	1,00	1,94
4	1,00	1,94
4,1	1,00	1,64
4,2	1,00	1,64
4,3	1,00	1,31
4,4	1,00	1,31
4,5	1,00	0,97
4,6	1,00	0,97
4,7	1,00	0,71
4,8	1,00	0,71
4,9	1,00	0,55
5	1,00	0,55
5,1	1,00	0,45
5,2	1,00	0,45
5,3	1,00	0,38
5,4	1,00	0,38
5,5	1,00	0,34
5,6	1,00	0,34
5,7	1,00	0,31
5,8	1,00	0,31
5,9	1,00	0,29
6	1,00	0,29
6,1	1,00	0,30
6,2	1,00	0,30
6,3	1,00	0,29
6,4	1,00	0,29
6,5	1,00	0,28
6,6	1,00	0,28
6,7	1,00	0,27
6,8	1,00	0,27

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
6,9	1,00	0,27
7	1,00	0,27
7,1	1,00	0,27
7,2	1,00	0,27
7,3	1,00	0,26
7,4	1,00	0,26
7,5	1,00	0,26
7,6	1,00	0,26
7,7	1,00	0,25
7,8	1,00	0,25
7,9	1,00	0,24
8	1,00	0,24
8,1	1,00	0,24
8,2	1,00	0,24
8,3	1,00	0,25
8,4	1,00	0,25
8,5	1,00	0,26
8,6	1,00	0,26
8,7	1,00	0,26
8,8	1,00	0,26
8,9	1,00	0,26
9	1,00	0,26
9,1	1,00	0,26
9,2	1,00	0,26
9,3	1,00	0,28
9,4	1,00	0,28
9,5	1,00	0,29
9,6	5,00	0,29
9,7	5,00	0,28
9,8	5,00	0,28
9,9	5,00	0,31
10	5,00	0,31
10,1	5,00	0,43
10,2	5,00	0,43
10,3	5,00	0,61
10,4	5,00	0,61

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
10,5	5,00	0,76
10,6	5,00	0,76
10,7	5,00	0,90
10,8	5,00	0,90
10,9	5,00	1,00
11	5,00	1,00
11,1	5,00	1,04
11,2	5,00	1,04
11,3	5,00	1,09
11,4	5,00	1,09
11,5	5,00	1,13
11,6	5,00	1,13
11,7	5,00	1,14
11,8	5,00	1,14
11,9	5,00	1,16
12	5,00	1,16
12,1	5,00	1,16
12,2	5,00	1,16
12,3	5,00	1,15
12,4	5,00	1,15
12,5	5,00	1,15
12,6	5,00	1,15
12,7	5,00	1,17
12,8	5,00	1,17
12,9	5,00	1,16
13	5,00	1,16
13,1	5,00	1,16
13,2	5,00	1,16
13,3	5,00	1,17
13,4	5,00	1,17
13,5	5,00	1,16
13,6	5,00	1,16
13,7	5,00	1,15
13,8	5,00	1,15
13,9	5,00	1,14
14	5,00	1,14

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
14,1	5,00	1,14
14,2	5,00	1,14
14,3	5,00	1,13
14,4	5,00	1,13
14,5	5,00	1,14
14,6	5,00	1,14
14,7	5,00	1,16
14,8	5,00	1,16
14,9	5,00	1,16
15	5,00	1,16
15,1	5,00	1,16
15,2	5,00	1,16
15,3	5,00	1,16
15,4	5,00	1,16
15,5	5,00	1,14
15,6	5,00	1,14
15,7	5,00	1,15
15,8	5,00	1,15
15,9	5,00	1,16
16	5,00	1,16
16,1	5,00	1,15
16,2	10,00	1,15
16,3	10,00	1,15
16,4	10,00	1,15
16,5	10,00	1,23
16,6	10,00	1,23
16,7	10,00	1,43
16,8	10,00	1,43
16,9	10,00	1,65
17	10,00	1,65
17,1	10,00	1,83
17,2	10,00	1,83
17,3	10,00	1,98
17,4	10,00	1,98
17,5	10,00	2,06
17,6	10,00	2,06

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
17,7	10,00	2,12
17,8	10,00	2,12
17,9	10,00	2,14
18	10,00	2,14
18,1	10,00	2,15
18,2	10,00	2,15
18,3	10,00	2,16
18,4	10,00	2,16
18,5	10,00	2,18
18,6	10,00	2,18
18,7	10,00	2,22
18,8	10,00	2,22
18,9	10,00	2,25
19	10,00	2,25
19,1	10,00	2,27
19,2	10,00	2,27
19,3	10,00	2,26
19,4	10,00	2,26
19,5	10,00	2,26
19,6	10,00	2,26
19,7	10,00	2,25
19,8	10,00	2,25
19,9	10,00	2,24
20	10,00	2,24
20,1	10,00	2,24
20,2	10,00	2,24
20,3	10,00	2,23
20,4	10,00	2,23
20,5	10,00	2,23
20,6	10,00	2,23
20,7	10,00	2,23
20,8	10,00	2,23
20,9	10,00	2,24
21	10,00	2,24
21,1	10,00	2,23
21,2	10,00	2,23

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
21,3	10,00	2,15
21,4	10,00	2,15
21,5	10,00	2,13
21,6	10,00	2,13
21,7	10,00	2,15
21,8	10,00	2,15
21,9	10,00	2,18
22	10,00	2,18
22,1	10,00	2,18
22,2	10,00	2,18
22,3	10,00	2,12
22,4	10,00	2,12
22,5	10,00	2,09
22,6	10,00	2,09
22,7	10,00	2,11
22,8	1,00	2,11
22,9	1,00	2,14
23	1,00	2,14
23,1	1,00	2,07
23,2	1,00	2,07
23,3	1,00	1,79
23,4	1,00	1,79
23,5	1,00	1,41
23,6	1,00	1,41
23,7	1,00	1,05
23,8	1,00	1,05
23,9	1,00	0,78
24	1,00	0,78
24,1	1,00	0,61
24,2	1,00	0,61
24,3	1,00	0,49
24,4	1,00	0,49
24,5	1,00	0,41
24,6	1,00	0,41
24,7	1,00	0,36
24,8	1,00	0,36

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
24,9	1,00	0,33
25	1,00	0,33
25,1	1,00	0,30
25,2	1,00	0,30
25,3	1,00	0,28
25,4	1,00	0,28
25,5	1,00	0,28
25,6	1,00	0,28
25,7	1,00	0,27
25,8	1,00	0,27
25,9	1,00	0,28
26	1,00	0,28
26,1	1,00	0,29
26,2	1,00	0,29
26,3	1,00	0,29
26,4	1,00	0,29
26,5	1,00	0,29
26,6	1,00	0,29
26,7	1,00	0,30
26,8	1,00	0,30
26,9	1,00	0,30
27	1,00	0,30
27,1	1,00	0,30
27,2	1,00	0,30
27,3	1,00	0,29
27,4	1,00	0,29
27,5	1,00	0,29
27,6	1,00	0,29
27,7	1,00	0,28
27,8	1,00	0,28
27,9	1,00	0,27
28	1,00	0,27
28,1	1,00	0,28
28,2	1,00	0,28
28,3	1,00	0,28
28,4	1,00	0,28

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
28,5	1,00	0,29
28,6	1,00	0,29
28,7	1,00	0,28
28,8	1,00	0,28
28,9	1,00	0,28
29	1,00	0,28
29,1	1,00	0,27
29,2	1,00	0,27
29,3	1,00	0,27
29,4	1,00	0,27
29,5	1,00	0,27
29,6	1,00	0,27
29,7	1,00	0,26
29,8	1,00	0,26
29,9	1,00	0,28
30	1,00	0,28
30,1	1,00	0,28
30,2	1,00	0,28
30,3	10,00	0,28
30,4	10,00	0,28
30,5	10,00	0,30
30,6	10,00	0,30
30,7	10,00	0,45
30,8	10,00	0,45
30,9	10,00	0,77
31	10,00	0,77
31,1	10,00	1,16
31,2	10,00	1,16
31,3	10,00	1,52
31,4	10,00	1,52
31,5	10,00	1,78
31,6	10,00	1,78
31,7	10,00	1,97
31,8	10,00	1,97
31,9	10,00	2,09
32	10,00	2,09

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
32,1	10,00	2,17
32,2	10,00	2,17
32,3	10,00	2,22
32,4	10,00	2,22
32,5	10,00	2,26
32,6	10,00	2,26
32,7	10,00	2,28
32,8	10,00	2,28
32,9	10,00	2,30
33	10,00	2,30
33,1	10,00	2,29
33,2	10,00	2,29
33,3	10,00	2,20
33,4	10,00	2,20
33,5	10,00	2,11
33,6	10,00	2,11
33,7	10,00	2,12
33,8	10,00	2,12
33,9	10,00	2,17
34	10,00	2,17
34,1	10,00	2,21
34,2	10,00	2,21
34,3	10,00	2,24
34,4	10,00	2,24
34,5	10,00	2,27
34,6	10,00	2,27
34,7	10,00	2,29
34,8	10,00	2,29
34,9	10,00	2,31
35	10,00	2,31
35,1	10,00	2,32
35,2	10,00	2,32
35,3	10,00	2,33
35,4	10,00	2,33
35,5	10,00	2,33
35,6	10,00	2,33

### DATOS DE LAS BANDA PESADORA ALIMENTADORA DE PUZOLANA

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
0,1	7,5	3,28
0,2	7,5	3,28
0,3	7,5	3,32
0,4	7,5	3,32
0,5	7,5	3,35
0,6	7,5	3,35
0,7	7,5	3,29
0,8	7,5	3,29
0,9	7,5	3,33
1	7,5	3,33
1,1	7,5	3,35
1,2	0	3,35
1,3	0	3,25
1,4	0	3,25
1,5	0	3,05
1,6	0	3,05
1,7	0	2
1,8	0	2
1,9	0	1,28
2	0	1,28
2,1	0	0,62
2,2	0	0,62
2,3	0	0,32
2,4	0	0,32
2,5	0	0,15
2,6	0	0,15
2,7	0	0,07
2,8	0	0,07
2,9	0	0,04
3	0	0,04
3,1	0	0,02
3,2	0	0,02
3,3	0	0,02
3,4	0	0,02

T	SALIDA CONTROLADOR	SALIDA PLANTA
[s]	[0-100%]	[t/h]
3,5	0	0,03
3,6	0	0,03
3,7	0	0,03
3,8	0	0,03
3,9	0	0,02
4	0	0,02
4,1	0	0,03
4,2	0	0,03
4,3	0	0,01
4,4	0	0,01
4,5	0	0,01
4,6	0	0,01
4,7	0	0,01
4,8	0	0,01
4,9	0	0,02
5	0	0,02
5,1	0	0,02
5,2	0	0,02
5,3	0	0,03
5,4	0	0,03
5,5	0	0,02
5,6	0	0,02
5,7	0	0,02
5,8	0	0,02
5,9	0	0,02
6	0	0,02
6,1	0	0,02
6,2	0	0,02
6,3	0	0,03
6,4	0	0,03
6,5	0	0,03
6,6	0	0,03
6,7	0	0,01
6,8	0	0,01

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
6,9	0,00	0,02
7	0,00	0,02
7,1	0,00	0,03
7,2	0,00	0,03
7,3	0,00	0,02
7,4	0,00	0,02
7,5	0,00	0,02
7,6	0,00	0,02
7,7	0,00	0,02
7,8	0,00	0,02
7,9	0,00	0,02
8	0,00	0,02
8,1	0,00	0,03
8,2	0,00	0,03
8,3	0,00	0,02
8,4	0,00	0,02
8,5	0,00	0,03
8,6	0,00	0,03
8,7	0,00	0,02
8,8	0,00	0,02
8,9	0,00	0,03
9	0,00	0,03
9,1	0,00	0,02
9,2	0,00	0,02
9,3	0,00	0,03
9,4	0,00	0,03
9,5	0,00	0,02
9,6	0,00	0,02
9,7	0,00	0,02
9,8	0,00	0,02
9,9	0,00	0,02
10	0,00	0,02
10,1	0,00	0,01
10,2	0,00	0,01
10,3	0,00	0,02
10,4	0,00	0,02

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
10,5	10,00	0,01
10,6	10,00	0,01
10,7	10,00	0,03
10,8	10,00	0,03
10,9	10,00	0,37
11	10,00	0,37
11,1	10,00	2,54
11,2	10,00	2,54
11,3	10,00	3,22
11,4	10,00	3,22
11,5	10,00	4,09
11,6	10,00	4,09
11,7	10,00	4,42
11,8	10,00	4,42
11,9	10,00	4,39
12	10,00	4,39
12,1	10,00	4,31
12,2	10,00	4,31
12,3	10,00	4,52
12,4	10,00	4,52
12,5	10,00	4,15
12,6	10,00	4,15
12,7	10,00	4,39
12,8	10,00	4,39
12,9	10,00	4,51
13	10,00	4,51
13,1	10,00	4,51
13,2	10,00	4,51
13,3	10,00	4,61
13,4	10,00	4,61
13,5	10,00	4,48
13,6	10,00	4,48
13,7	10,00	4,38
13,8	10,00	4,38
13,9	10,00	4,47
14	10,00	4,47

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
14,1	10,00	4,32
14,2	10,00	4,32
14,3	10,00	4,46
14,4	10,00	4,46
14,5	10,00	4,32
14,6	10,00	4,32
14,7	10,00	4,48
14,8	10,00	4,48
14,9	10,00	4,33
15	10,00	4,33
15,1	10,00	4,21
15,2	10,00	4,21
15,3	10,00	4,37
15,4	10,00	4,37
15,5	10,00	4,32
15,6	10,00	4,32
15,7	10,00	4,45
15,8	10,00	4,45
15,9	10,00	4,33
16	10,00	4,33
16,1	10,00	4,42
16,2	10,00	4,42
16,3	10,00	4,51
16,4	10,00	4,51
16,5	10,00	4,07
16,6	10,00	4,07
16,7	10,00	4,14
16,8	10,00	4,14
16,9	10,00	4,12
17	10,00	4,12
17,1	10,00	4,13
17,2	10,00	4,13
17,3	10,00	4,37
17,4	10,00	4,37
17,5	10,00	4,48
17,6	10,00	4,48

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
17,7	10,00	4,34
17,8	10,00	4,34
17,9	10,00	4,41
18	10,00	4,41
18,1	10,00	4,33
18,2	10,00	4,33
18,3	10,00	4,25
18,4	10,00	4,25
18,5	10,00	4,46
18,6	10,00	4,46
18,7	10,00	4,36
18,8	10,00	4,36
18,9	10,00	4,55
19	10,00	4,55
19,1	10,00	4,67
19,2	10,00	4,67
19,3	10,00	4,55
19,4	10,00	4,55
19,5	10,00	4,38
19,6	15,00	4,38
19,7	15,00	4,27
19,8	15,00	4,27
19,9	15,00	4,68
20	15,00	4,68
20,1	15,00	5,54
20,2	15,00	5,54
20,3	15,00	6,20
20,4	15,00	6,20
20,5	15,00	6,38
20,6	15,00	6,38
20,7	15,00	6,53
20,8	15,00	6,53
20,9	15,00	6,35
21	15,00	6,35
21,1	15,00	6,38
21,2	15,00	6,38

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
21,3	15,00	6,44
21,4	15,00	6,44
21,5	15,00	6,39
21,6	15,00	6,39
21,7	15,00	6,20
21,8	15,00	6,20
21,9	15,00	6,09
22	15,00	6,09
22,1	15,00	6,22
22,2	15,00	6,22
22,3	15,00	6,35
22,4	15,00	6,35
22,5	15,00	6,38
22,6	15,00	6,38
22,7	15,00	6,24
22,8	15,00	6,24
22,9	15,00	6,09
23	15,00	6,09
23,1	15,00	6,08
23,2	15,00	6,08
23,3	15,00	6,53
23,4	15,00	6,53
23,5	15,00	6,50
23,6	15,00	6,50
23,7	15,00	6,59
23,8	15,00	6,59
23,9	15,00	6,47
24	15,00	6,47
24,1	15,00	6,52
24,2	15,00	6,52
24,3	15,00	6,55
24,4	15,00	6,55
24,5	15,00	6,63
24,6	15,00	6,63
24,7	15,00	6,75
24,8	15,00	6,75

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
24,9	15,00	6,55
25	15,00	6,55
25,1	15,00	6,60
25,2	15,00	6,60
25,3	15,00	6,54
25,4	15,00	6,54
25,5	15,00	6,53
25,6	15,00	6,53
25,7	15,00	6,50
25,8	15,00	6,50
25,9	15,00	6,56
26	15,00	6,56
26,1	15,00	6,26
26,2	15,00	6,26
26,3	15,00	6,35
26,4	15,00	6,35
26,5	15,00	6,40
26,6	15,00	6,40
26,7	15,00	6,43
26,8	15,00	6,43
26,9	15,00	6,22
27	15,00	6,22
27,1	15,00	6,30
27,2	15,00	6,30
27,3	0,00	6,10
27,4	0,00	6,10
27,5	0,00	6,20
27,6	0,00	6,20
27,7	0,00	5,12
27,8	0,00	5,12
27,9	0,00	3,00
28	0,00	3,00
28,1	0,00	1,52
28,2	0,00	1,52
28,3	0,00	0,72
28,4	0,00	0,72

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
28,5	0,00	0,34
28,6	0,00	0,34
28,7	0,00	0,16
28,8	0,00	0,16
28,9	0,00	0,06
29	0,00	0,06
29,1	0,00	0,05
29,2	0,00	0,05
29,3	0,00	0,03
29,4	0,00	0,03
29,5	0,00	0,03
29,6	0,00	0,03
29,7	0,00	0,01
29,8	0,00	0,01
29,9	0,00	0,03
30	0,00	0,03
30,1	0,00	0,02
30,2	0,00	0,02
30,3	0,00	0,02
30,4	0,00	0,02
30,5	0,00	0,02
30,6	0,00	0,02
30,7	0,00	0,02
30,8	0,00	0,02
30,9	0,00	0,02
31	0,00	0,02
31,1	0,00	0,02
31,2	0,00	0,02
31,3	0,00	0,02
31,4	15,00	0,02
31,5	15,00	0,02
31,6	15,00	0,02
31,7	15,00	0,17
31,8	15,00	0,17
31,9	15,00	1,61
32	15,00	1,61

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
32,1	15,00	4,13
32,2	15,00	4,13
32,3	15,00	5,09
32,4	15,00	5,09
32,5	15,00	5,93
32,6	15,00	5,93
32,7	15,00	6,34
32,8	15,00	6,34
32,9	15,00	6,43
33	15,00	6,43
33,1	15,00	6,33
33,2	15,00	6,33
33,3	15,00	6,49
33,4	15,00	6,49
33,5	15,00	6,55
33,6	15,00	6,55
33,7	15,00	6,74
33,8	15,00	6,74
33,9	15,00	6,76
34	15,00	6,76
34,1	15,00	6,73
34,2	15,00	6,73
34,3	15,00	6,60
34,4	15,00	6,60
34,5	15,00	6,56
34,6	15,00	6,56
34,7	15,00	6,72
34,8	15,00	6,72
34,9	15,00	6,68
35	15,00	6,68
35,1	15,00	6,52
35,2	15,00	6,52
35,3	15,00	6,27
35,4	15,00	6,27
35,5	15,00	6,34
35,6	15,00	6,34

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
35,7	15,00	6,43
35,8	15,00	6,43
35,9	15,00	6,49
36	15,00	6,49
36,1	15,00	6,42
36,2	15,00	6,42
36,3	15,00	6,30
36,4	15,00	6,30
36,5	15,00	6,27
36,6	15,00	6,27
36,7	15,00	6,38
36,8	15,00	6,38
36,9	15,00	6,39
37	15,00	6,39
37,1	15,00	6,29
37,2	15,00	6,29
37,3	15,00	6,37
37,4	15,00	6,37
37,5	15,00	6,20
37,6	15,00	6,20
37,7	15,00	6,39
37,8	15,00	6,39
37,9	15,00	6,32
38	15,00	6,32
38,1	15,00	6,42
38,2	15,00	6,42
38,3	14,63	6,39
38,4	14,15	6,39
38,5	13,61	6,49
38,6	13,12	6,49
38,7	12,55	6,60
38,8	12,04	6,60
38,9	11,85	6,15
39	11,39	6,15
39,1	11,17	5,84
39,2	10,76	5,84

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
39,3	10,66	5,42
39,4	10,31	5,42
39,5	10,19	5,11
39,6	9,88	5,11
39,7	9,84	4,76
39,8	9,59	4,76
39,9	9,43	4,64
40	9,20	4,64
40,1	9,15	4,40
40,2	8,96	4,40
40,3	8,73	4,45
40,4	8,54	4,45
40,5	8,48	4,27
40,6	8,31	4,27
40,7	8,40	3,92
40,8	8,27	3,92
40,9	8,20	3,86
41	8,09	3,86
41,1	8,14	3,65
41,2	8,06	3,65
41,3	8,03	3,59
41,4	7,97	3,59
41,5	7,90	3,60
41,6	7,84	3,60
41,7	7,84	3,51
41,8	7,79	3,51
41,9	7,83	3,39
42	7,80	3,39
42,1	7,76	3,40
42,2	7,73	3,40
42,3	7,62	3,51
42,4	7,58	3,51
42,5	7,56	3,46
42,6	7,52	3,46
42,7	7,52	3,41
42,8	7,49	3,41

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
42,9	7,51	3,33
43	7,49	3,33
43,1	7,50	3,29
43,2	7,48	3,29
43,3	7,49	3,26
43,4	7,48	3,26
43,5	7,50	3,21
43,6	7,50	3,21
43,7	7,60	3,07
43,8	7,62	3,07
43,9	7,60	3,12
44	7,61	3,12
44,1	7,61	3,14
44,2	7,62	3,14
44,3	7,59	3,19
44,4	7,59	3,19
44,5	7,60	3,18
44,6	7,60	3,18
44,7	7,53	3,28
44,8	7,53	3,28
44,9	7,49	3,32
45	7,47	3,32
45,1	7,47	3,31
45,2	7,45	3,31
45,3	7,48	3,25
45,4	7,47	3,25
45,5	7,46	3,25
45,6	7,45	3,25
45,7	7,42	3,28
45,8	7,41	3,28
45,9	7,42	3,25
46	7,41	3,25
46,1	7,40	3,26
46,2	7,39	3,26
46,3	7,42	3,20
46,4	7,42	3,20

<b>T</b>	<b>SALIDA CONTROLADOR</b>	<b>SALIDA PLANTA</b>
<b>[s]</b>	<b>[0-100%]</b>	<b>[t/h]</b>
46,5	7,37	3,27
46,6	7,36	3,27
46,7	7,41	3,18
46,8	7,41	3,18
46,9	7,37	3,25
47	7,36	3,25
47,1	7,37	3,23
47,2	7,36	3,23
47,3	7,30	3,32
47,4	7,28	3,32
47,5	7,23	3,36
47,6	7,21	3,36
47,7	7,17	3,38
47,8	7,15	3,38
47,9	7,12	3,38
48	7,09	3,38
48,1	7,16	3,25

# **ANEXO F**

## **DATOS DE SETEO, ALIMENTACIÓN, BLAINE Y RETENIDO**

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
1	68,0	95	71	65,0	3998	3,7
2	66,0	95	71	51,0	4140	4,6
3	68,4	95	71	47,0	4032	3,2
4	69,7	95	71	50,0	4415	3,0
5	68,5	95	71	60,0	4299	3,1
6	73,0	96	71	73,0	3775	4,8
7	60,0	96	71	74,0	3825	3,8
8	85,0	95	71	87,0	3896	3,4
9	69,0	95	71	73,0	4163	4,0
10	67,0	95	71	79,0	3929	4,5
11	66,0	95	71	73,0	3929	4,1
12	75,0	95	71	92,0	3910	3,7
13	65,0	95	71	63,0	4032	3,6
14	68,0	95	71	47,0	4150	3,7
15	70,0	95	71	70,0	3954	3,7
16	69,5	96	71	73,0	4167	3,6
17	64,9	96	71	57,0	4088	4,0
18	70,3	95	71	54,0	4135	3,8
19	67,0	95	71	69,0	3993	3,7
20	70,1	95	71	54,0	4017	3,7
21	70,0	95	71	67,0	3800	4,9
22	70,0	95	71	71,0	4045	3,3
23	70,0	95	71	103,0	3723	7,2
24	70,0	95	71	60,0	3925	4,1
25	70,0	95	71	53,0	3850	4,9
26	50,0	95	71	56,0	4254	3,4
27	66,9	95	71	65,0	4282	2,0
28	79,1	95	71	56,0	4213	4,0
29	72,7	96	71	61,0	4163	2,3
30	73,2	96	71	74,0	4022	3,3
31	72,0	96	71	50,0	4163	2,8
32	75,0	93	70	41,0	4116	5,0
33	75,0	93	70	63,0	3675	5,6
34	75,1	93	70	73,0	3804	5,3
35	75,0	92	70	30,0	4432	4,8
36	70,0	94	70	55,0	3800	7,4

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
37	75,0	92	70	66,0	3671	6,2
38	65,4	93	71	45,0	3929	5,0
39	64,9	95	71	55,0	4349	2,0
40	72,2	95	71	61,0	4121	2,2
41	70,6	97	71	57,0	4213	2,8
42	70,0	97	71	65,0	3978	2,2
43	70,0	97	71	62,0	3949	3,4
44	70,0	96	71	54,0	4002	3,7
45	77,1	96	71	84,0	4050	4,4
46	75,0	94	71	42,0	3779	4,6
47	70,0	95	71	75,0	3904	3,9
48	70,0	95	71	64,0	3671	4,8
49	69,5	95	71	62,0	3900	4,8
50	69,5	97	71	65,0	4032	2,6
51	70,1	97	71	62,0	3954	3,3
52	70,0	96	72	56,0	4093	3,0
53	67,7	96	72	58,0	4140	2,2
54	67,0	96	72	72,0	4112	2,9
55	75,1	96	72	81,0	3800	5,7
56	75,1	96	72	105,0	3671	5,2
57	75,1	96	71	106,0	3920	4,6
58	70,0	92	72	62,0	4163	5,0
59	70,0	94	72	72,0	3973	3,7
60	70,0	94	72	85,0	3925	4,7
61	67,8	95	72	87,0	3825	6,2
62	68,8	97	72	64,0	4002	2,8
63	68,8	97	72	56,0	3973	3,0
64	85,0	97	72	77,0	3993	3,4
65	75,0	97	72	79,0	3975	2,2
66	68,0	97	72	82,0	3909	3,5
67	68,0	95	71	68,0	3821	4,1
68	68,0	95	71	56,0	4022	3,9
69	68,0	95	71	43,0	3796	5,1
70	66,0	95	71	59,0	4017	4,5
71	50,1	95	72	43,0	3969	5,0
72	70,1	95	72	80,0	3850	3,7

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
73	70,1	95	72	86,0	3800	4,2
74	69,2	95	72	78,0	3645	4,9
75	65,1	95	71	44,0	3749	5,0
76	65,9	95	71	48,0	4097	4,2
77	64,7	95	72	57,0	3871	5,5
78	65,0	95	72	67,0	3884	5,0
79	66,0	95	72	56,0	4023	4,3
80	67,0	95	72	52,0	4169	2,5
81	67,0	95	72	65,0	4237	2,1
82	68,0	95	72	72,0	4146	2,4
83	70,1	95	72	94,0	4017	2,9
84	65,0	95	72	69,0	4181	3,2
85	65,0	95	72	66,0	3920	3,8
86	70,0	95	72	75,0	4017	4,0
87	68,0	95	72	81,0	4026	3,5
88	68,0	95	72	75,0	4272	2,2
89	75,0	95	71	46,0	4059	3,3
90	69,0	95	71	74,0	3981	3,9
91	75,0	95	71	61,0	4029	3,6
92	75,0	95	71	47,0	3865	6,4
93	67,9	95	72	66,0	3963	3,9
94	68,3	95	72	46,0	4236	4,0
95	84,3	97	72	90,0	4186	2,6
96	75,7	93	72	48,0	3904	3,8
97	60,2	96	72	72,0	3846	4,2
98	70,0	96	72	66,0	3896	2,3
99	70,0	95	71	65,0	3821	3,3
100	70,0	95	72	60,0	3951	2,9
101	67,0	95	72	40,0	3921	3,1
102	66,7	95	72	66,0	4133	2,9
103	67,3	97	72	50,0	4357	2,3
104	77,0	97	72	75,0	3903	3,1
105	63,1	97	72	55,0	4070	3,0
106	72,0	97	72	63,0	3981	3,2
107	70,0	97	72	49,0	4243	2,8
108	72,0	95	70	45,0	3840	5,1

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
109	70,7	88	70	66,0	4288	8,2
110	60,3	90	70	29,0	4204	3,0
111	72,2	94	70	41,0	3963	3,8
112	71,9	95	70	63,0	3677	7,7
113	75,0	97	72	72,0	3785	6,0
114	75,0	96	72	96,0	3708	2,5
115	60,0	96	72	64,0	3759	3,2
116	75,0	96	72	37,0	4259	3,2
117	75,0	96	72	52,0	3759	3,7
118	50,5	96	72	55,0	4152	2,7
119	70,7	96	72	47,0	4175	3,0
120	70,7	96	72	47,0	3946	4,6
121	60,6	96	72	46,0	4175	3,0
122	75,0	96	72	35,0	4249	3,3
123	70,0	96	72	52,0	3825	4,0
124	69,0	96	72	41,0	4059	3,1
125	69,0	96	72	60,0	4082	3,3
126	68,7	96	72	51,0	4065	3,8
127	70,5	96	72	59,0	4017	2,6
128	68,3	96	72	48,0	4121	2,9
129	68,9	96	72	60,0	3850	3,4
130	65,0	96	72	63,0	3830	3,4
131	75,0	96	72	38,0	4112	3,1
132	75,0	96	72	63,0	3945	3,1
133	70,1	96	72	66,0	3993	3,5
134	65,0	96	72	64,0	4093	3,8
135	65,0	96	72	57,0	4121	2,4
136	75,0	96	72	67,0	4026	2,7
137	71,0	96	72	74,0	4135	2,3
138	70,0	96	72	88,0	4204	2,3
139	70,0	96	72	89,0	3871	4,1
140	74,0	96	72	81,0	3920	3,6
141	74,0	96	72	117,0	3561	5,6
142	65,2	97	72	82,0	3896	2,8
143	80,2	97	72	37,0	4272	2,6
144	74,9	97	71	81,0	3900	3,0

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
145	70,2	97	71	68,0	3900	3,5
146	71,0	97	72	90,0	3925	3,9
147	67,0	96	72	67,0	3998	4,1
148	75,0	95	72	127,0	4427	1,0
149	75,0	95	72	61,0	4070	3,4
150	80,0	95	72	105,0	4117	3,0
151	70,0	95	72	86,0	3859	3,9
152	70,0	95	72	71,0	3987	6,0
153	70,0	95	72	95,0	3939	3,8
154	75,3	96	72	70,0	4221	3,0
155	69,9	97	72	71,0	4198	2,6
156	70,3	97	72	72,0	4158	3,8
157	69,7	97	72	78,0	3969	2,9
158	70,0	97	72	72,0	4181	2,5
159	70,0	97	72	90,0	3949	3,2
160	70,0	97	72	106,0	3821	3,2
161	70,0	97	72	77,0	4035	3,1
162	73,0	97	72	93,0	3751	4,9
163	73,0	97	72	113,0	3656	4,3
164	73,0	97	70	65,0	3914	4,0
165	75,0	97	70	51,0	3914	6,0
166	75,2	97	71	73,0	3693	7,4
167	76,1	97	71	74,0	4140	3,5
168	69,9	97	71	85,0	3719	4,4
169	68,6	97	71	70,0	3993	4,0
170	65,1	97	71	57,0	3945	3,5
171	72,0	97	72	62,0	4088	3,8
172	55,0	96	72	66,0	4041	2,8
173	80,0	96	72	64,0	4135	3,3
174	66,9	97	72	98,0	3739	3,7
175	67,0	97	72	88,0	3875	4,3
176	70,0	96	71	70,0	3745	4,0
177	70,0	96	71	68,0	3796	4,6
178	75,0	97	72	75,0	3614	6,0
179	65,3	97	72	76,0	3749	4,5
180	71,0	97	72	59,0	4140	4,1

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
181	84,1	97	72	67,0	3998	3,3
182	74,8	97	72	75,0	4069	3,1
183	74,0	97	72	67,0	3925	3,4
184	74,0	97	72	40,0	3850	3,9
185	65,0	97	72	55,0	3880	3,7
186	65,0	97	72	54,0	4140	2,7
187	70,0	92	72	69,0	4116	2,2
188	75,0	95	72	74,0	3749	5,5
189	70,1	95	72	70,0	4045	3,5
190	66,1	95	72	71,0	4093	2,2
191	79,1	97	72	60,0	4045	3,8
192	70,0	97	72	56,0	4186	3,4
193	68,0	97	72	58,0	4022	3,6
194	68,0	97	72	45,0	3880	2,9
195	72,0	88	72	110,0	3099	2,2
196	70,0	92	72	71,0	4088	2,5
197	70,0	92	72	92,0	4022	2,6
198	75,0	97	72	69,0	4158	3,0
199	65,0	97	72	75,0	3749	5,6
200	64,9	97	72	69,0	3850	7,1
201	71,2	97	72	60,0	4167	2,7
202	72,0	97	72	68,0	4121	3,2
203	70,2	97	72	85,0	4163	3,1
204	70,2	97	72	83,0	4045	3,8
205	70,0	97	72	54,0	4232	2,5
206	75,0	97	72	74,0	4121	3,4
207	75,0	97	72	97,0	3796	4,7
208	65,0	97	72	95,0	3896	3,9
209	75,0	97	72	62,0	3815	4,6
210	73,9	97	72	57,0	4088	2,8
211	75,0	95	72	87,0	4135	3,8
212	60,0	97	71	71,0	4112	3,0
213	60,0	95	70	49,0	4029	4,2
214	70,0	95	70	61,0	3850	3,1
215	75,0	97	70	134,0	3592	2,3
216	75,0	97	71	78,0	3697	2,8

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
217	80,0	97	71	100,0	3727	4,3
218	60,0	97	71	72,0	3925	5,1
219	65,1	97	71	49,0	4065	5,0
220	70,0	97	71	123,0	4135	3,0
221	75,0	97	71	122,0	3785	3,1
222	75,0	97	71	94,0	3878	4,6
223	60,0	97	71	75,0	3975	3,7
224	50,0	97	72	72,0	3865	4,7
225	80,6	97	72	94,0	4112	3,7
226	80,0	97	72	89,0	3770	3,3
227	70,0	97	70	78,0	3821	6,7
228	70,0	97	71	78,0	3745	4,0
229	60,0	97	71	71,0	3745	6,4
230	70,0	97	71	71,0	3821	3,0
231	80,0	97	71	67,0	3865	3,4
232	60,1	97	71	79,0	3909	3,7
233	75,0	97	71	70,0	3927	3,8
234	70,0	97	71	100,0	3759	2,4
235	70,0	97	71	82,0	4059	2,9
236	75,0	97	71	85,0	3939	3,2
237	75,0	97	71	50,0	3865	4,1
238	70,0	97	72	48,0	4035	2,9
239	60,0	95	72	45,0	3993	3,9
240	73,0	95	72	45,0	3941	4,1
241	65,0	95	72	44,0	3880	6,2
242	64,9	95	72	50,0	4091	4,1
243	70,0	95	72	58,0	4065	3,5
244	70,0	95	72	55,0	4082	3,0
245	70,0	95	72	56,0	4011	4,2
246	60,0	95	72	87,0	3846	4,1
247	70,0	97	72	59,0	4163	4,0
248	70,0	97	72	68,0	4022	2,6
249	70,0	97	72	70,0	3978	3,0
250	70,0	98	72	71,0	4050	2,1
251	70,0	98	72	63,0	3875	4,3
252	80,0	98	72	98,0	3800	2,0

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
253	75,0	98	72	65,0	3900	4,6
254	70,0	98	72	74,0	3875	3,1
255	75,0	98	73	57,0	3971	4,1
256	75,0	98	73	76,0	4050	3,8
257	75,0	98	73	120,0	3671	4,5
258	70,0	98	73	101,0	3896	3,3
259	75,0	98	73	93,0	3969	2,8
260	75,1	98	73	114,0	3835	2,5
261	65,0	95	73	59,0	4167	2,0
262	65,0	95	73	89,0	4116	2,0
263	80,0	97	72	57,0	3871	3,1
264	80,0	97	72	108,0	4163	4,3
265	65,0	97	72	89,0	3925	4,0
266	65,0	97	72	47,0	4002	1,7
267	75,0	97	72	59,0	3753	4,1
268	69,9	97	71	60,0	3784	4,8
269	70,0	97	71	57,0	4127	2,0
270	70,6	97	71	68,0	4008	2,2
271	70,8	97	71	60,0	4152	3,1
272	75,0	98	72	83,0	4152	3,2
273	65,0	97	72	47,0	3896	3,8
274	75,0	97	72	49,0	3973	4,5
275	75,0	97	72	90,0	3850	3,2
276	73,0	97	72	76,0	4080	4,0
277	60,0	97	72	56,0	3654	2,6
278	60,0	97	72	60,0	3816	3,9
279	70,0	97	73	107,0	3574	3,3
280	68,8	97	73	63,0	3579	2,6
281	68,8	97	73	57,0	3910	2,0
282	67,1	97	73	49,0	3925	4,4
283	69,4	97	73	44,0	4152	3,5
284	65,0	97	73	90,0	4152	3,9
285	79,0	97	72	89,0	4011	3,2
286	75,0	98	70	95,0	3890	4,1
287	71,0	98	70	89,0	3969	4,0
288	74,0	98	70	59,0	3871	4,9

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
289	74,0	98	72	57,0	3973	3,4
290	60,1	98	72	67,0	4093	3,2
291	75,0	98	72	62,0	4050	4,3
292	74,7	98	72	57,0	3929	4,6
293	73,8	98	72	67,0	3978	4,0
294	71,0	98	72	90,0	3871	4,2
295	74,5	98	70	95,0	3815	3,9
296	74,0	98	70	76,0	3914	3,4
297	77,0	98	70	98,0	3871	3,8
298	70,0	98	70	89,0	3775	4,3
299	70,0	98	70	100,0	3800	3,7
300	75,0	98	70	84,0	3825	5,3
301	75,0	98	71	86,0	4022	3,2
302	73,0	98	71	86,0	3800	4,2
303	70,0	98	72	55,0	3427	5,6
304	67,8	95	72	61,0	3925	4,1
305	74,9	95	71	26,0	4420	5,5
306	74,9	95	71	58,0	3963	4,6
307	74,8	96	71	45,0	3969	3,5
308	75,1	96	72	61,0	3925	4,3
309	75,1	97	72	51,0	4209	2,6
310	75,1	97	72	73,0	3753	4,2
311	75,3	97	72	67,0	3779	4,1
312	70,4	97	72	84,0	3779	3,0
313	71,5	97	72	76,0	4050	2,0
314	70,7	95	70	89,0	4158	3,3
315	74,4	95	70	87,0	4099	3,6
316	75,0	95	70	119,0	3804	3,3
317	75,0	97	71	106,0	3804	3,9
318	75,0	97	71	97,0	3708	4,2
319	75,0	97	71	99,0	3757	4,2
320	85,0	97	72	100,0	3759	4,2
321	70,0	96	72	97,0	3667	2,8
322	72,0	96	72	104,0	3671	2,8
323	75,0	96	72	96,0	3900	3,6
324	85,0	96	72	50,0	3904	2,8

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
325	69,0	97	72	73,0	3998	4,0
326	70,0	97	72	67,0	4209	3,7
327	71,0	97	72	64,0	4213	4,3
328	74,2	98	72	82,0	3542	5,9
329	74,0	98	72	64,0	4121	2,3
330	74,0	98	72	74,0	4041	2,4
331	76,0	96	70	72,0	4088	2,2
332	76,0	97	69	96,0	4152	2,7
333	75,0	97	69	110,0	3865	4,9
334	75,0	97	70	120,0	3840	3,9
335	70,0	97	70	117,0	3941	3,8
336	85,0	97	70	57,0	4041	4,2
337	70,0	97	70	83,0	3770	5,2
338	70,0	97	72	94,0	4065	4,7
339	70,0	97	72	70,0	3693	3,1
340	70,0	97	72	101,0	3896	3,5
341	80,0	97	72	75,0	3875	3,4
342	71,0	98	70	75,0	3588	4,8
343	75,0	97	70	61,0	3884	6,0
344	79,3	97	70	116,0	3859	5,3
345	84,9	97	69	69,0	3987	6,7
346	75,2	97	69	87,0	3865	4,4
347	75,6	97	69	110,0	4017	4,0
348	75,7	98	68	68,0	4035	5,7
349	81,1	98	68	125,0	4059	6,0
350	75,0	98	67	102,0	3821	6,5
351	81,1	98	67	81,0	3998	6,5
352	100,0	98	67	80,0	3723	5,6
353	100,0	98	68	95,0	3973	4,5
354	100,0	98	68	97,0	3565	5,2
355	80,0	98	68	88,0	3770	7,4
356	80,0	98	68	88,0	3651	9,3
357	80,5	98	67	102,0	3779	7,7
358	75,1	98	67	90,0	4152	5,2
359	77,9	98	67	75,0	4059	5,6
360	78,7	98	67	122,0	4035	5,2

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm2/g]	[%]
361	75,0	98	66	84,0	3963	7,8
362	80,0	98	66	62,0	3914	7,5
363	80,0	98	66	69,0	3968	7,1
364	75,0	98	66	55,0	4158	7,5
365	80,0	98	66	45,0	4135	7,5
366	80,0	98	67	60,0	3821	8,1
367	75,0	97	71	92,0	3933	5,1
368	75,0	98	71	124,0	3981	6,1
369	80,6	96	72	66,0	3975	6,3
370	69,8	97	70	129,0	3909	4,1
371	69,4	98	70	97,0	4129	4,6
372	68,0	95	69	76,0	4393	5,1
373	75,1	96	69	69,0	4198	4,5
374	78,0	96	69	58,0	4035	5,3
375	78,0	96	69	94,0	4017	4,9
376	78,0	96	69	78,0	3796	4,6
377	78,0	96	69	112,0	3727	5,3
378	78,0	98	69	86,0	3796	4,6
379	70,0	90	68	101,0	4299	2,3
380	73,7	96	69	66,0	4272	3,7
381	73,5	93	70	78,0	4041	5,6
382	74,1	95	69	59,0	4041	5,2
383	73,1	96	70	65,0	3969	6,0
384	73,1	96	70	68,0	4017	4,2
385	75,1	96	70	57,0	4041	5,8
386	75,0	96	70	79,0	3969	3,9
387	75,0	96	70	69,0	3697	4,6
388	75,1	96	70	50,0	4069	3,8
389	73,4	96	70	86,0	4116	2,4
390	71,1	95	72	130,0	4204	4,6
391	68,7	90	67	83,0	3969	5,0
392	71,0	90	67	78,0	3993	3,1
393	76,0	96	70	66,0	4377	5,4
394	76,0	96	70	59,0	3920	5,4
395	68,0	97	68	56,0	4116	5,1
396	80,0	96	68	51,0	3849	6,1

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
397	80,0	96	68	103,0	3871	4,7
398	70,0	96	68	65,0	3745	4,2
399	75,0	90	72	78,0	4123	2,2
400	75,0	97	70	71,0	4266	4,7
401	70,0	97	70	71,0	4059	4,1
402	76,6	97	70	73,0	3914	5,2
403	71,5	97	70	68,0	3939	5,3
404	71,8	97	70	60,0	4065	5,0
405	76,2	97	70	61,0	4112	4,3
406	74,0	97	70	79,0	4045	3,6
407	74,0	97	70	51,0	3904	6,2
408	80,0	97	70	84,0	3865	6,3
409	80,0	97	72	66,0	3871	5,3
410	84,0	97	72	87,0	4035	5,4
411	84,0	97	72	93,0	3790	6,1
412	70,0	97	70	50,0	4041	5,2
413	70,0	97	70	81,0	3821	6,3
414	77,7	97	70	106,0	3800	8,2
415	71,0	97	70	81,0	3920	3,1
416	73,2	97	70	75,0	3871	4,1
417	74,5	97	70	68,0	4041	3,6
418	74,0	97	70	63,0	4186	4,3
419	69,0	97	71	94,0	4059	3,8
420	74,0	97	72	113,0	3835	3,6
421	75,0	98	72	86,0	3779	3,7
422	75,0	98	70	48,0	3975	5,5
423	80,0	98	70	69,0	4000	6,1
424	80,0	98	70	89,0	3933	5,7
425	69,5	98	70	47,0	3708	6,0
426	73,6	98	70	54,0	3939	3,8
427	72,8	98	70	70,0	4152	3,8
428	73,8	98	70	60,0	4106	3,0
429	70,0	95	72	39,0	3945	3,4
430	70,0	96	69	61,0	3850	4,0
431	75,0	96	69	70,0	3949	4,8
432	73,0	95	70	53,0	4096	4,6

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
433	70,0	95	70	75,0	3875	4,0
434	75,0	95	70	56,0	4144	4,2
435	75,6	95	70	75,0	4050	3,8
436	70,0	98	72	101,0	3866	4,5
437	75,0	97	72	83,0	3697	4,7
438	75,0	97	72	106,0	3969	3,8
439	65,0	97	72	80,0	3693	5,2
440	85,0	97	72	92,0	3662	5,2
441	70,0	97	72	68,0	3662	6,3
442	70,0	95	72	68,0	3796	7,0
443	80,0	97	72	92,0	3900	6,8
444	72,0	96	71	74,0	3825	4,8
445	72,0	97	71	65,0	3671	3,8
446	71,0	97	71	65,0	4112	4,3
447	72,1	97	71	69,0	3723	4,5
448	70,0	97	71	67,0	3614	6,4
449	70,0	96	72	84,0	3890	4,7
450	70,0	96	72	82,0	4123	3,2
451	70,0	96	72	98,0	3815	3,3
452	85,0	96	72	96,0	3693	4,6
453	75,0	96	70	76,0	3688	4,4
454	75,0	95	70	91,0	3693	4,6
455	80,0	95	70	53,0	3667	5,4
456	68,0	95	71	88,0	4022	3,2
457	70,0	96	71	51,0	3865	4,2
458	71,0	96	72	84,0	3815	4,0
459	75,0	96	72	75,0	3914	2,9
460	75,0	96	72	82,0	3800	3,7
461	70,0	97	72	49,0	4017	2,9
462	75,1	97	72	105,0	3914	2,7
463	80,0	97	72	131,0	3741	2,8
464	80,0	97	70	128,0	3251	6,1
465	80,0	97	70	96,0	3588	5,5
466	80,0	96	70	75,0	3830	5,5
467	80,0	96	70	106,0	3727	3,6
468	75,0	96	70	104,0	3479	5,6

MUESTRA	ENTRADAS			SALIDAS		
	ALIMENTACIÓN	G39	G35	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[%]	[%]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
469	80,0	96	71	87,0	3671	4,0
470	76,1	96	71	54,0	3804	5,2
471	76,1	96	71	84,0	3929	3,0
472	50,4	96	71	135,0	4041	3,0
473	80,0	96	70	100,0	3963	3,6
474	80,0	96	70	102,0	3790	4,2
475	80,0	96	70	49,0	3714	6,3
476	72,0	96	70	77,0	4221	3,6
477	78,0	96	71	85,0	3929	5,1
478	80,0	96	70	78,0	3707	6,1
479	75,0	97	72	124,0	4050	2,2
480	75,0	97	72	84,0	3753	3,2
481	70,0	97	72	65,0	3707	4,2
482	75,1	97	72	61,0	3713	3,9
483	80,0	97	72	83,0	3984	2,8
484	60,0	97	71	87,0	3846	2,8
485	80,0	97	71	84,0	3779	3,0
486	80,0	97	70	77,0	3656	4,7
487	70,0	97	71	91,0	3501	5,3
488	75,0	97	71	82,0	4011	3,6
489	60,0	94	72	47,0	3945	2,6
490	70,0	92	72	61,0	3920	3,0
491	70,0	96	72	82,0	4534	5,0

# **ANEXO G**

**DATOS DE LAS PRUEBAS DE  
LAS VARIABLES DE FINURA DEL  
CEMENTO Y DEL SISTEMA  
O-SEPA**

ETAPA I			G39	G35
			95%	72%
Nº	ALIMENTACIÓN	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
1	70,1	71,5	4224	3,5
2	69,9	73,3	4206	3,4
3	70,1	74,0	4070	3,9
4	69,6	69,3	3896	4,5
5	70,2	67,4	4079	3,6
6	70,2	69,9	4180	3,8
7	70,3	71,6	4079	3,6
8	70,4	74,7	4158	4,1
9	70,0	72,5	4137	3,6
10	69,3	68,3	4315	4,2
11	69,9	69,5	3778	3,3
12	70,2	72,9	4093	4,0
13	69,8	70,5	4114	4,2
14	70,9	73,5	4180	3,5
15	70,5	71,5	4049	5,4
16	70,4	68,5	4092	3,3
17	70,6	69,2	4217	4,2
18	70,6	71,6	4130	5,6
19	70,4	69,8	4267	5,0
20	69,8	70,1	4202	4,7
21	70,3	69,8	4152	4,3
22	69,7	65,6	4093	4,0
23	69,8	66,4	4217	3,8
24	70,6	65,0	4108	4,9
25	70,0	63,6	4329	3,2
26	70,3	64,3	4217	4,1
27	70,2	62,4	3905	6,1
28	69,9	62,0	4226	2,9
29	69,9	59,0	3951	5,6
30	70,0	60,7	4137	3,0

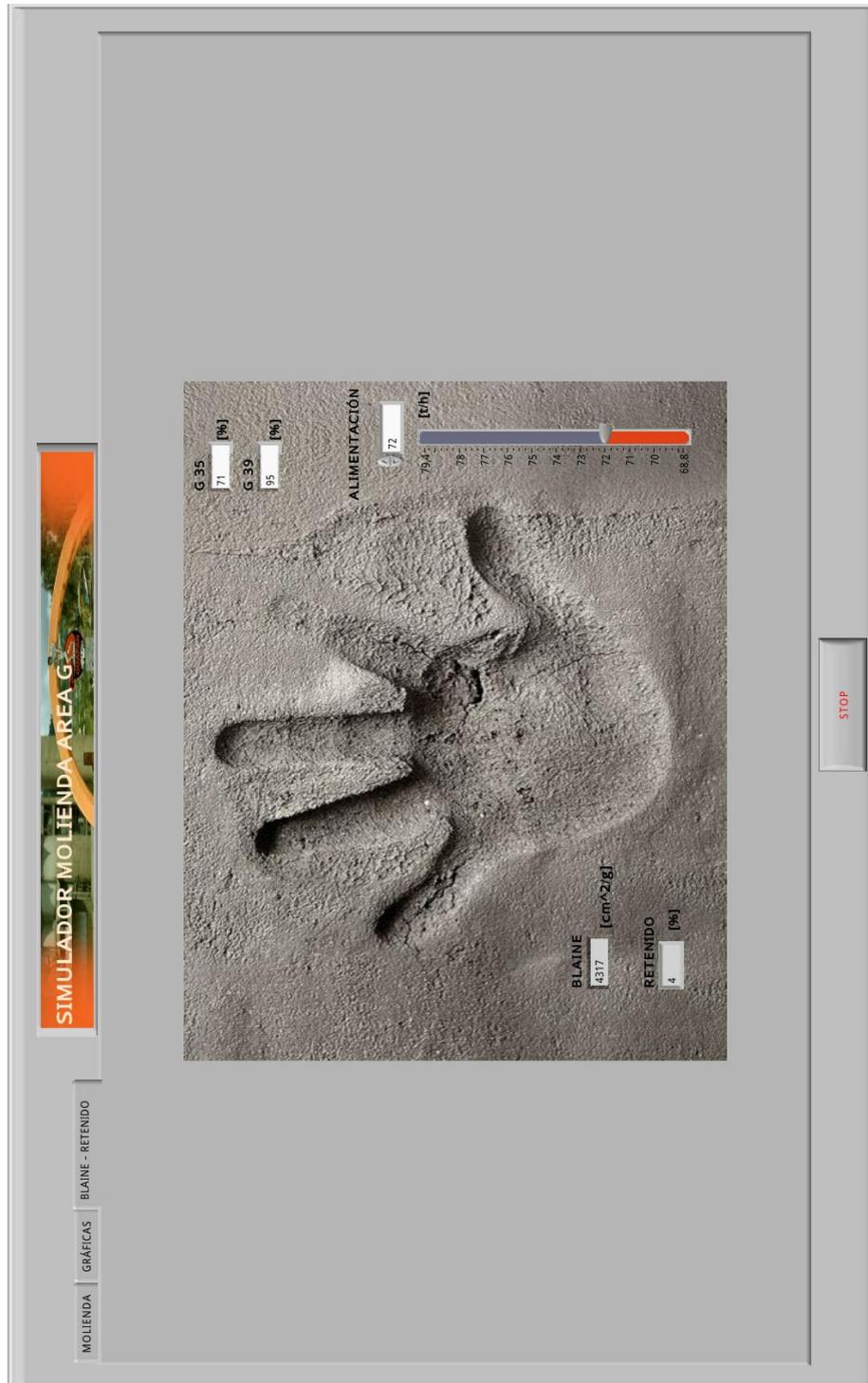
ETAPA II			G39	G35
			95%	71%
Nº	ALIMENTACIÓN	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
1	70,7	66,2	4025	5,2
2	70,0	66,4	3828	5,5
3	71,3	69,0	4036	5,3
4	69,9	66,4	4019	4,7
5	70,5	66,4	4102	4,2
6	69,1	70,1	4102	3,8
7	70,2	66,9	4158	4,2
8	69,9	62,5	4002	5,3
9	70,4	63,2	4058	5,0
10	69,8	67,7	4002	4,8
11	69,8	69,1	4275	3,2
12	69,7	63,9	4217	4,1
13	68,9	62,7	3957	3,8
14	70,5	65,6	3534	4,8
15	68,8	68,0	4124	3,4
16	70,3	64,5	4273	4,8
17	70,1	66,4	4036	3,7
18	69,8	63,4	4124	4,5
19	70,9	65,5	4251	5,3
20	70,0	64,9	4036	3,8
21	69,7	64,7	4036	4,3
22	70,0	63,5	4315	3,0
23	69,8	66,0	3810	4,3
24	69,7	63,2	3945	3,9
25	69,7	64,6	4022	5,3
26	69,4	65,3	4380	4,5
27	39,3	71,9	4048	4,0
28	74,8	70,0	4372	3,0
29	71,9	63,5	4315	4,1
30	70,3	57,6	4245	3,1

ETAPA III			G39	G35
			97%	72%
Nº	ALIMENTACIÓN	RETORNO	BLAINE	RETENIDO
	[t/h]	[t/h]	[cm <sup>2</sup> /g]	[%]
1	70,3	63,4	4288	4,0
2	69,6	60,1	4245	3,3
3	69,6	53,5	4330	3,5
4	71,0	59,8	4048	5,9
5	70,6	63,3	4188	4,0
6	69,0	63,0	4070	4,5
7	71,6	57,6	4309	3,1
8	70,8	57,0	4202	5,1
9	69,1	56,5	4180	5,0
10	70,0	61,3	4048	4,8
11	69,7	59,2	4158	4,2
12	69,3	64,2	4137	4,4
13	70,8	60,4	4294	4,9
14	69,5	58,0	4070	3,6
15	70,2	58,8	4302	5,3
16	68,9	61,6	4092	4,8
17	69,9	58,8	4180	4,5
18	70,1	61,8	4217	3,5
19	79,7	56,6	4309	3,4
20	75,8	57,2	4202	4,2
21	70,6	57,1	4224	4,3
22	69,6	52,4	4137	4,9
23	71,0	57,6	4114	4,4
24	69,8	61,9	4152	3,7
25	69,4	60,4	4266	3,3
26	69,8	55,6	4086	3,6
27	69,7	57,5	3114	5,7
28	71,5	59,5	3934	3,2
29	69,9	72,8	3863	6,0
30	69,8	74,8	4330	3,7

# **ANEXO H**

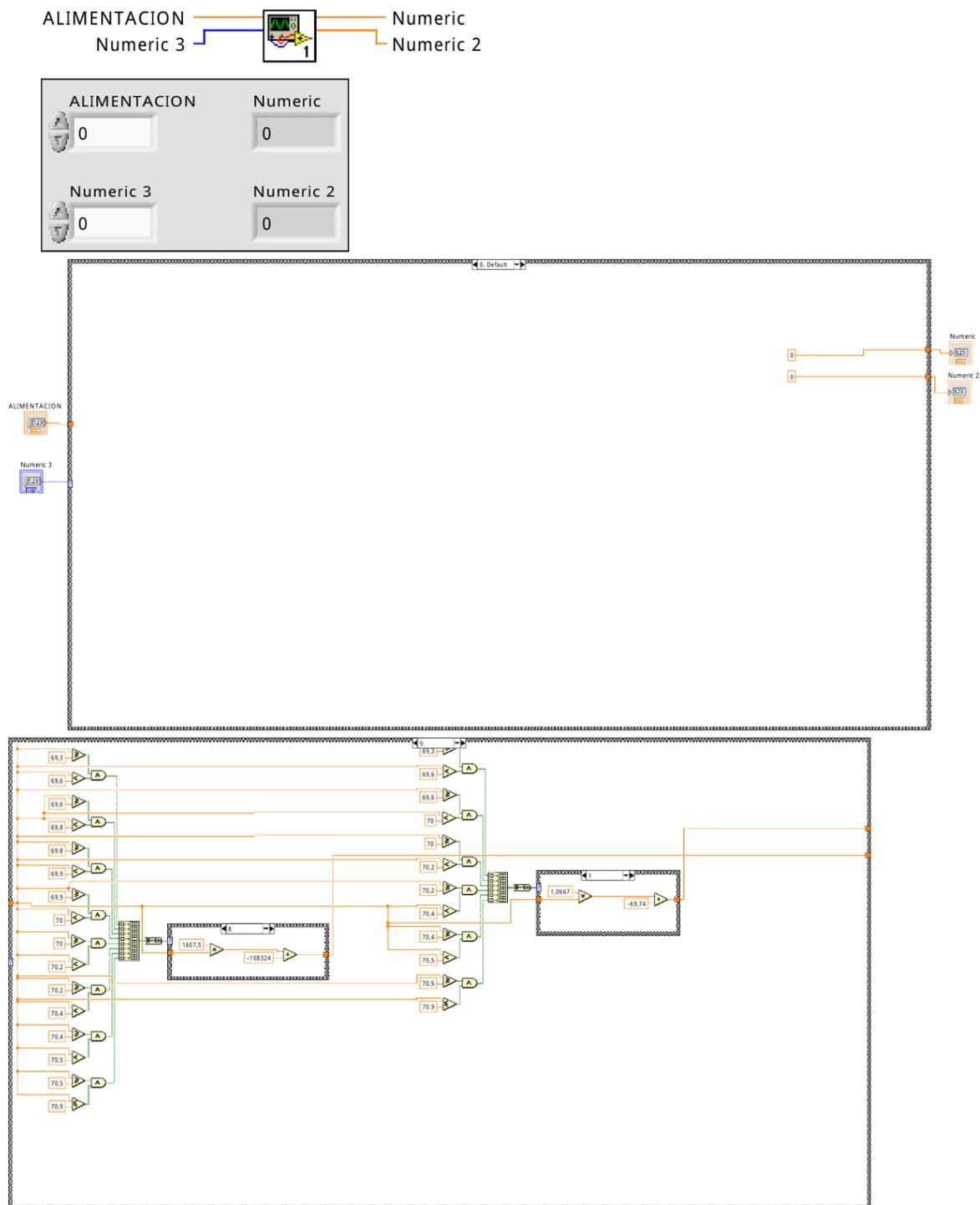
**PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA  
DE FUNCIONES DE BLAINE Y  
RETENIDO**

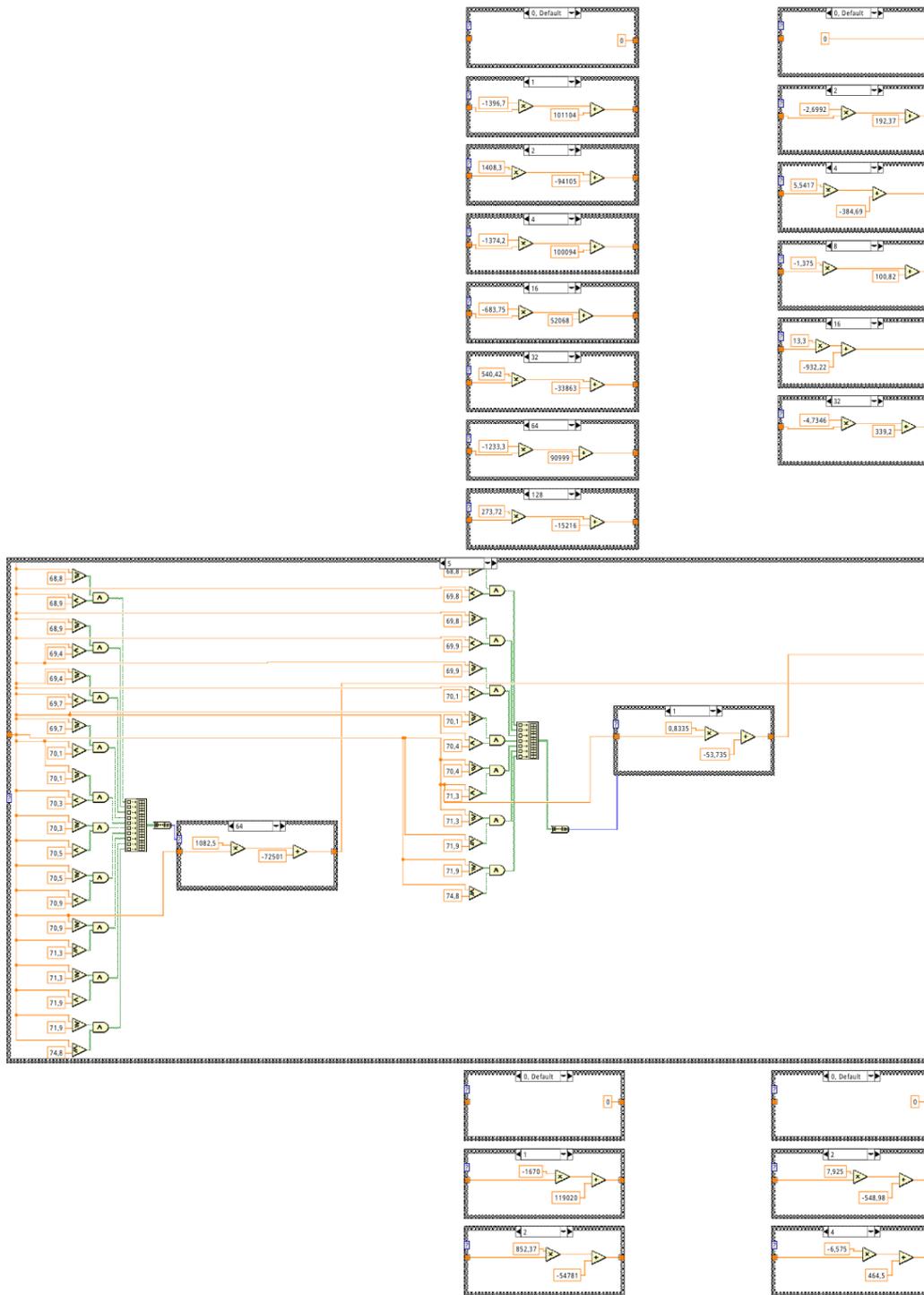
## PANEL FRONTAL DE BLAINE Y RETENIDO

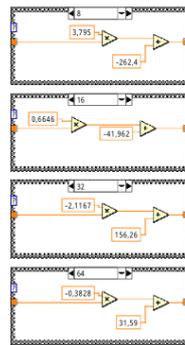
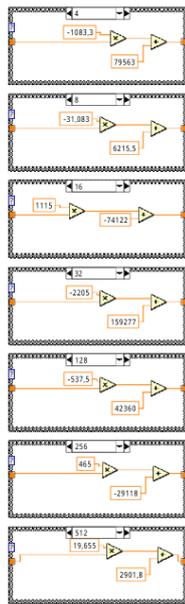


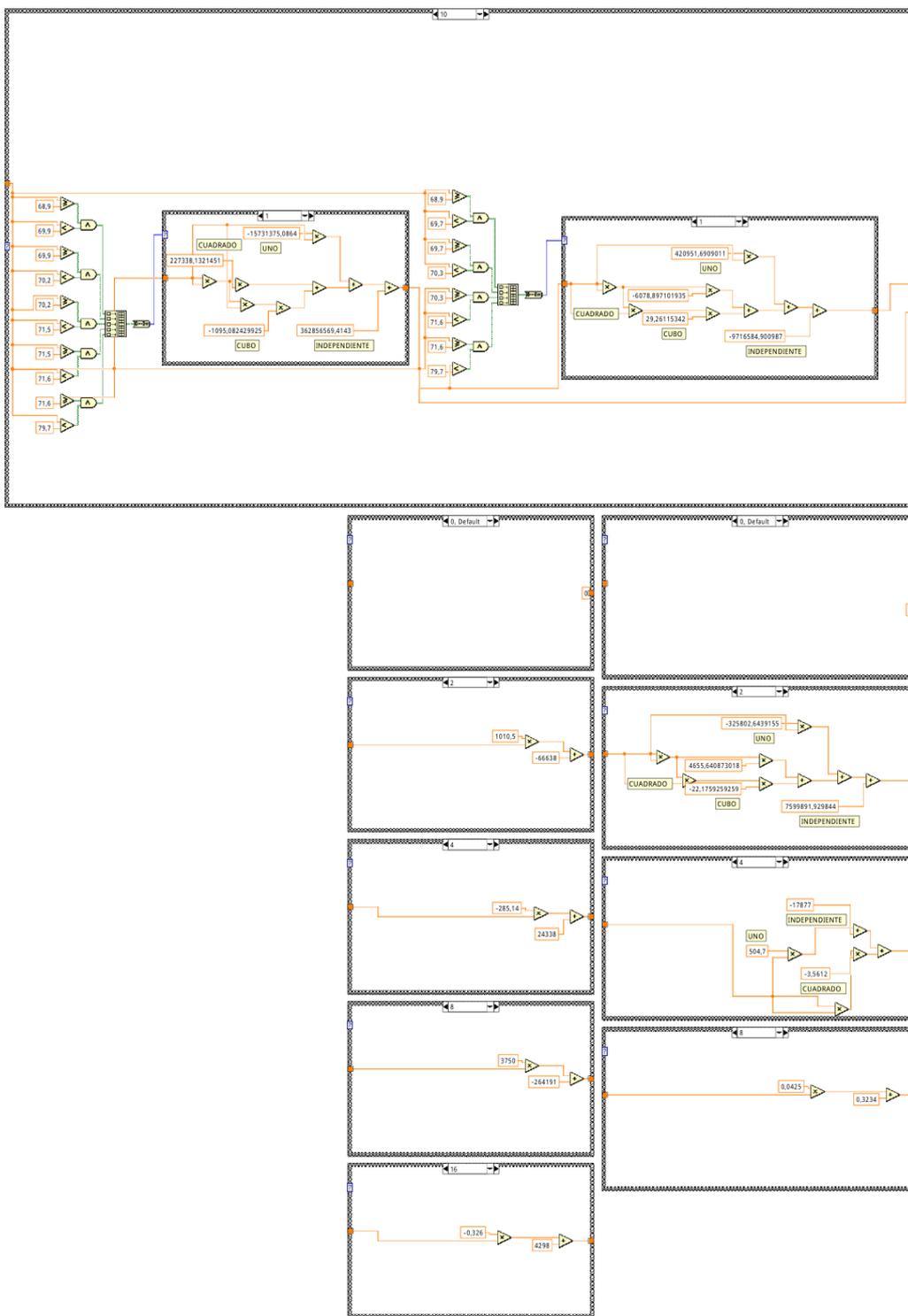
## DIAGRAMA DE FUNCIONES DE BLAINE Y RETENIDO

### BLAINE Y RETENIDO (SubVI).vi



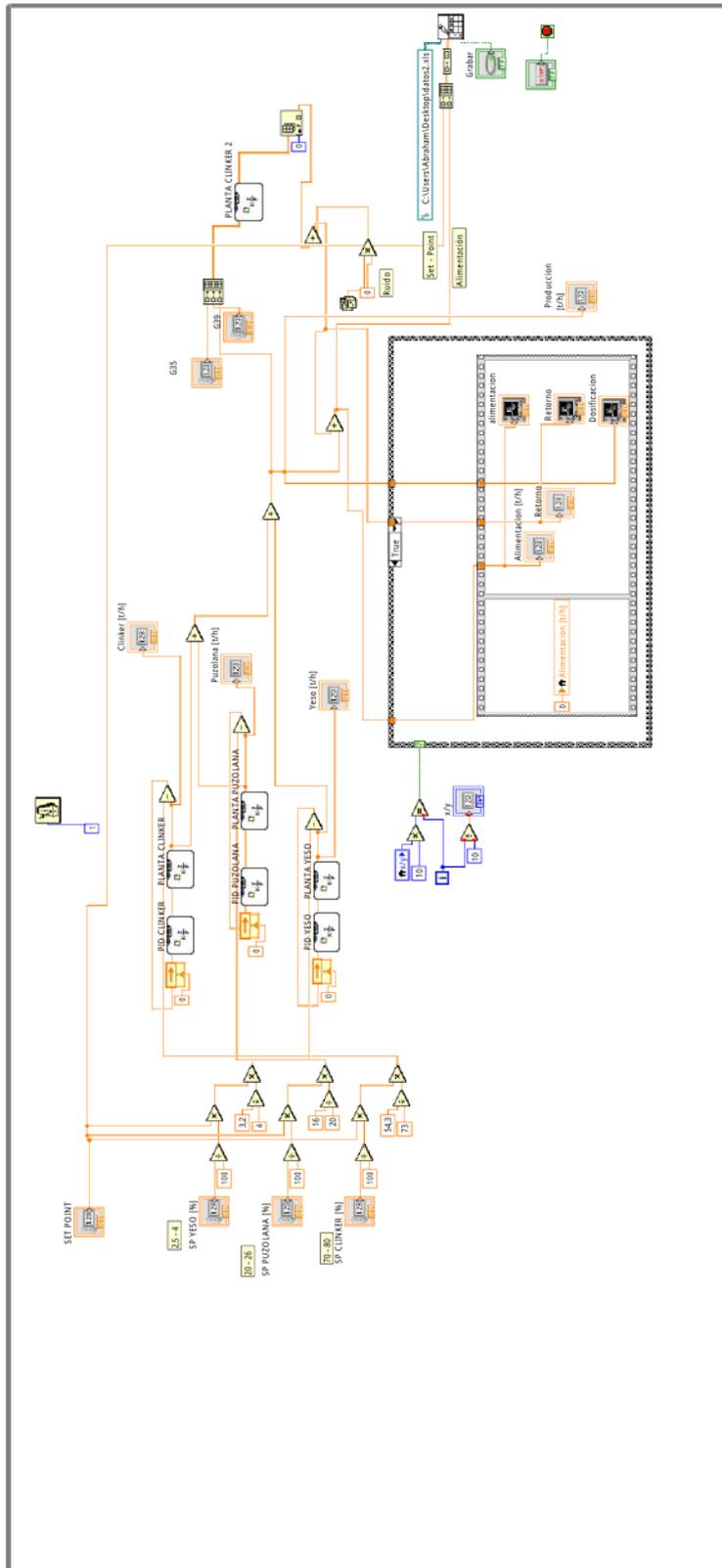






# **ANEXO I**

**DIAGRAMA DE FUNCIONES DE  
LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN  
LAZO ABIERTO**

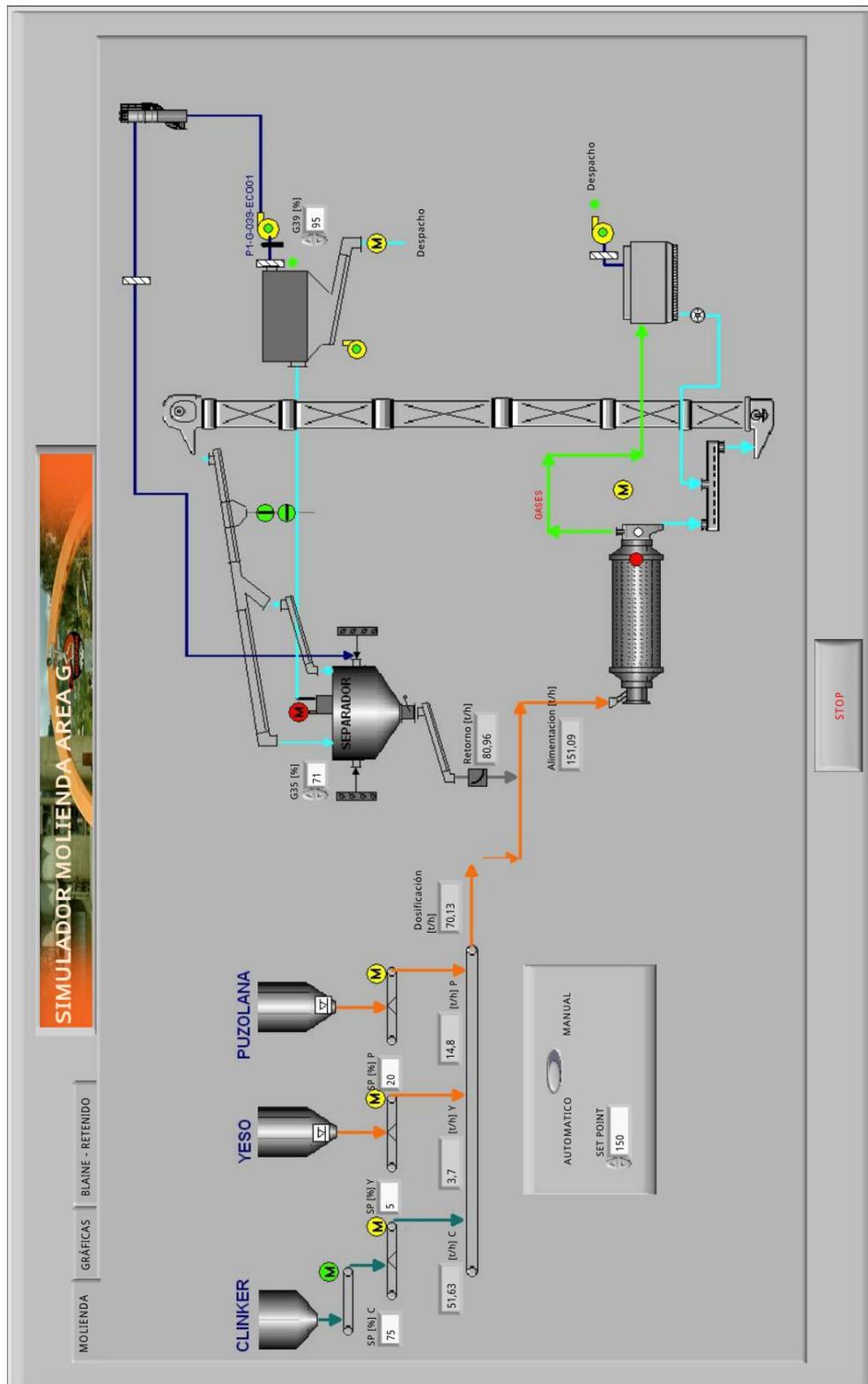


# **ANEXO J**

**PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA  
DE FUNCIONES DEL SISTEMA  
GLOBAL EN LAZO CERRADO**

## PANEL FRONTAL DEL SISTEMA GLOBAL

- **MOLIENDA**



- GRÁFICAS



# DIAGRAMA DE FUNCIONES DEL SISTEMA GLOBAL

