



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU  
CONTROL REGULADOR PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR,  
DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

**Edy René Aguilar Chic**

Asesorado por el Ing. José Luis Alfaro Donis

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU  
CONTROL REGULADORIO PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR,  
DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDY RENÉ AGUILAR CHIC**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ LUIS ALFARO DONIS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU CONTROL REGULADORIO PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha septiembre de 2011.



**Edy René Aguilar Chic**

Guatemala 13 de junio del 2013

Ingeniero  
Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador del Área de Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **“MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU CONTROL REGULADOR PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.”**, del señor Edy René Aguilar Chic, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. José Luis Alfaro Donis  
Colegiado 3,695  
Asesor

**JOSE LUIS ALFARO DONIS**  
INGENIERO ELECTRONICO  
COLEGIADO No. 3,695

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 46. 2013  
Guatemala, 18 de JUNIO 2013.


Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

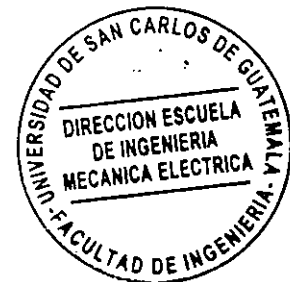
**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
“MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE  
AZUFRE Y SU CONTROL REGULADOR PARA LA  
SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, DENTRO  
DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN,  
S.A.”, del estudiante Edy René Aguilar Chic que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
~~ID Y ENSEÑAD A TODOS~~



Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrónica



STO



REF. EIME 46. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; EDY RENÉ AGUILAR CHIC titulado: “MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU CONTROL REGULATORIO PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.”, procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 11 DE JULIO 2013.**

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

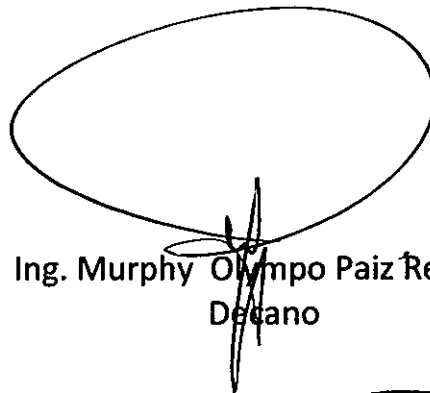


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 551 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AZUFRE Y SU CONTROL REGULADOR PARA LA SULFITACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, DENTRO DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN EN INGENIO LA UNIÓN, S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Edy René Aguilar Chic**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 9 de agosto de 2013

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme permitido llegar a este momento, brindándome fortaleza, sabiduría y perseverancia para lograr los triunfos y éxitos que hasta ahora he alcanzado.
- Mis padres** Mario René Aguilar y Ana Leticia Chic. Por brindarme todo su apoyo, orientándome con sus consejos, por estar allí siempre que necesitaba ánimo y ganas de seguir adelante; por el esfuerzo que hicieron y los recursos que me brindaron. Y por ser un ejemplo en cada paso de mi vida.
- Mis hermanas** Claudia, Ana Luisa y Carmen Aguilar Chic. Por su apoyo y cariño.
- Mis tíos** Manuel Chic y Rosalba Farela. Por su hospitalidad, apoyo y consejos que me ayudaron para alcanzar las metas propuestas.
- Mi asesor** Ing. José Luis Alfaro Donis. Por su gran ayuda y asesoría en este trabajo.
- Ingenio  
La Unión, S.A.** Por ser una empresa que me brindó la oportunidad de pertenecer a un gran equipo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mis padres</b>	Mario René Aguilar Salazar y Ana Leticia Chic Rian.
<b>Mis hermanas</b>	Claudia María, Ana Luisa y Carmen Leticia Aguilar Chic.
<b>Mi asesor</b>	José Luis Alfaro Donis.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser mi casa de estudio.
<b>Mis catedráticos</b>	Por ser una importante influencia en el desarrollo de mi carrera.
<b>Mis amigos</b>	Por su amistad y compañerismo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR .....	1
1.1. Proceso de producción.....	1
1.1.1. Cosecha .....	1
1.1.2. Patios de caña .....	2
1.1.3. Preparación y molienda .....	2
1.1.4. Clarificación .....	3
1.1.4.1. Filtración de lodos de clarificadores ...	3
1.1.5. Evaporación .....	4
1.1.6. Cristalización .....	4
1.1.7. Centrifugación .....	5
1.1.8. Secado, enfriado y envasado .....	6
1.2. Azúcar .....	6
1.2.1. Color presente en el jugo de caña de azúcar .....	8
1.2.2. Separación del color del jugo de caña .....	9
2. PROCESO DE SULFITACIÓN DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	11
2.1. Azufre .....	11
2.1.1. Preparación del dióxido de azufre.....	12
2.2. Combustión .....	13

2.3.	La sulfitación.....	14
2.4.	Procesos de sulfitación.....	16
2.4.1.	Sulfitación en frío .....	16
2.4.2.	Sulfitación después de la alcalización.....	17
2.4.3.	Sulfitación en caliente .....	17
2.4.4.	Sulfitación continua .....	18
2.4.5.	Sulfitación del jarabe.....	18
2.5.	Hornos quemadores de azufre.....	19
2.5.1.	Combustión en hornos de azufre.....	20
2.6.	Torre de sulfitación.....	20
2.7.	Proceso de sulfitación en Ingenio La Unión, S.A.....	22
2.8.	Efectos ambientales.....	25
3.	MÉTODOS DE CONTROL DE PROCESO.....	27
3.1.	Importancia de un lazo de control.....	27
3.1.1.	Elementos de un sistema de control.....	27
3.2.	Tipos de sistemas de control.....	29
3.2.1.	Sistema de control en lazo abierto.....	30
3.2.2.	Sistema de control en lazo cerrado.....	31
3.3.	Formas simples de realimentación.....	33
3.3.1.	Control de dos posiciones ( <i>ON-OFF</i> ).....	33
3.3.2.	Control proporcional.....	35
3.3.3.	Control integral.....	40
3.3.4.	Control derivativo.....	43
3.3.5.	Control PID.....	46
3.3.6.	Parámetros de sintonización.....	49
3.4.	Modelo de proceso y su clasificación.....	50

3.4.1.	El grado de conocimiento del proceso implícito en el modelo.....	51
3.4.1.1.	Modelo de caja blanca.....	51
3.4.1.2.	Modelo de caja negra.....	52
3.4.1.3.	Modelo de caja gris.....	52
3.4.2.	Al tipo de información que brinda el modelo.....	53
3.4.2.1.	Modelos explicativos.....	53
3.4.2.2.	Modelos descriptivos .....	53
3.4.2.3.	Modelos puramente predictivos.....	54
3.4.3.	Modelado dinámico de procesos.....	54
3.4.4.	Características necesarias para el diseño de un modelo.....	55
3.4.5.	Leyes fundamentales para el análisis del modelo.....	56
3.4.6.	Sistemas lineales e invariantes con el tiempo.....	59
4.	MODELADO Y DOSIFICACIÓN DE AZUFRE.....	61
4.1.	Planteamiento de problema.....	61
4.2.	Descripción del proceso de sulfitación.....	62
4.2.1.	Operación del horno.....	62
4.2.2.	Control de la alimentación de azufre al horno.....	65
4.3.	Modelado de dosificación de azufre.....	66
4.3.1.	Aire atmosférico y su composición.....	68
4.3.2.	Variables y parámetros de entrada.....	68
4.3.3.	Balances de masa.....	69
4.3.4.	Sistema de proceso.....	71
4.3.5.	Relación de alimentación de azufre y velocidad de dosificador.....	74

4.4.	Representación de modelo.....	76
4.5.	Respuesta del sistema ante condiciones preestablecidas.....	79
4.5.1.	Temperatura en la salida de gas del horno.....	81
4.5.2.	Flujo de salida de gases.....	82
4.5.3.	Concentración de dióxido de azufre en la salida del horno.....	84
4.6.	Control regulatorio en dosificación de azufre.....	84
CONCLUSIONES.....		93
RECOMENDACIONES .....		95
BIBLIOGRAFÍA .....		97
APÉNDICE .....		101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Proceso de producción de la caña de azúcar en un ingenio .....	7
2.	Representación de la glucosa y fructuosa .....	8
3.	Horno rotatorio, Ingenio La Unión, S.A. ....	21
4.	Representación del proceso de sulfitación .....	23
5.	Sistema torre de absorción .....	24
6.	Elementos de un sistema de control realimentado.....	29
7.	Diagrama de bloques de un sistema no realimentado .....	30
8.	Diagrama de bloques de un sistema realimentado .....	32
9.	Características del control <i>on-off</i> ideal (A), modificaciones con zona muerta (B) e histéresis (C) .....	34
10.	Ciclo de histéresis .....	35
11.	Relación de variable controlada y elemento final de control .....	36
12.	Controlador proporcional para ganancias $K_c$ distintas .....	39
13.	Respuesta del control integral .....	41
14.	Representación diagrama de bloques de un control PI (control proporcional e integral) ante una señal de entrada.....	42
15.	Sistema de control PI, con variaciones en el integral .....	44
16.	Diagrama de bloques de un control PD .....	46
17.	Representación de un control proporcional y derivativo .....	47
18.	Representación gráfica del controlador PID .....	48
19.	Diseño de horno quemador de azufre (b) Diseño de entrada de aire de alimentación al horno .....	64
20.	Diagrama de flujo de información, dosificación de azufre .....	67

21.	Variables necesarias para hallar el volumen del horno .....	69
22.	Sistema de proceso de dosificación de azufre al horno .....	72
23.	Diagrama de flujo de relación de azufre .....	74
24.	Curva de relación .....	75
25.	Condiciones de operación en Ingenio La Unión, S.A.....	76
26.	Diagrama de flujo de información de dosificación de azufre .....	77
27.	Diagrama de flujo de información del horno .....	78
28.	Comportamiento del azufre alimentado al horno .....	80
29.	Aire atmosférico que ingresa al horno .....	81
30.	Temperatura de salida en la reacción .....	82
31.	Flujo de salida de gases .....	83
32.	Fracción de dióxido de azufre a la salida del horno .....	85
33.	Escalón unitario, flujo de jugo de entrada .....	86
34.	Alimentación de azufre al horno .....	86
35.	Control PI, alimentación de azufre al horno .....	87
36.	Diagrama de flujo del horno y control PI .....	88
37.	Respuesta del control PI aplicado al modelo .....	89
38.	Respuesta del sistema ante cambios de flujo de entrada (a) Azufre de entrada, (b) Concentración de dióxido de azufre, (c) Temperatura de horno, (d) Flujo de gases de salida.....	90

## TABLAS

I.	Relación variable controlada y variable manipulada, caso I .....	37
II.	Relación variable controlada y variable manipulada, caso II .....	38
III.	Composición del aire .....	68
IV.	Variables y parámetros del sistema .....	70



## GLOSARIO

<b>Absorción</b>	Es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido y que forma una solución.
<b>Aminoácido</b>	Sustancia química orgánica en cuya composición molecular entran un grupo amino y otro carboxilo. Además son los componentes fundamentales de las proteínas.
<b>Azúcar blanco</b>	Azúcar de baja coloración obtenido mediante la sulfitación de los jugos de caña.
<b>Azúcar crudo</b>	Azúcar producido sin sulfitar los jugos de caña, utilizado como materia prima para la fabricación de otros tipos de azúcar y en la industria de los alimentos y bebidas.
<b>Azúcar refinado</b>	Azúcar de alta calidad y muy baja coloración que se produce a partir del azúcar moreno, se utilizan carbones con el propósito de purificar los jugos.
<b>Bagazo</b>	Residuo sólido que resulta durante la molienda de la caña de azúcar, utilizado como combustible en las calderas de los ingenios y como materia prima en otras industrias.

<b>Cachaza</b>	Es el lodo que resulta durante la etapa de clarificación de los jugos de caña, se utiliza como acondicionador de suelos.
<b>Centrífugas</b>	Son máquinas dotadas de una canasta cilíndrica giratoria forrada internamente por una delgada tela de cobre o acero inoxidable perforada con infinidad de agujeros de pequeño diámetro que permiten el paso de la miel a la vez que retienen los cristales de azúcar. La separación se da a partir de la fuerza centrífuga que se genera en la máquina por el giro de la canasta a gran velocidad.
<b>Clarificadores</b>	Son tanques o depósitos de gran tamaño por los que el jugo circula a una velocidad lo suficientemente lenta para que el precipitado producido por la reacción del floculante y la materia orgánica se asiente en la parte inferior y pueda ser extraído.
<b>Coloide</b>	A las partículas presentes en una solución y cuyo tamaño se encuentra en el rango de 0,001 a 1 micra, se les conoce como coloides, estos generalmente son los causantes de la turbidez y en menor grado también influyen en el color del jarabe de azúcar.
<b>Color</b>	Causado por sólidos disueltos y coloides, se utilizan metodologías analíticas sobre la base ICUMSA (grados ICUMSA de color).

<b>Decantación</b>	Es un método físico de separación de mezclas heterogéneas, estas pueden ser formadas por un líquido y un sólido, o por dos líquidos. Es necesario dejarla reposar para que el sólido se sedimente.
<b>Evaporador</b>	Consiste en un intercambiador de calor de gran tamaño dotado de espejos en su nivel medio e inferior y de tubos verticales que conforman el área de calefacción en que el jugo en la parte interna de los tubos recibe el calor proporcionado por vapor de baja presión que fluye externamente.
<b>Eyector</b>	Es el aparato más simple que hay para extraer el aire, gases o vapores de los condensadores y de los equipos que operan a vacío en los procesos industriales. Su funcionamiento está dado por el principio de conservación de la cantidad de movimiento de las corrientes involucradas.
<b>Floculantes</b>	Por medio de los fosfatos tricálcicos reaccionan con la materia orgánica (impurezas) produciendo moléculas de gran tamaño que decantan por diferencia de densidad.
<b>Grado ICUMSA</b>	Es una unidad internacional para expresar la pureza del azúcar en la solución, y se relaciona directamente con el color del azúcar. ICUMSA (Comisión internacional para los métodos uniformes de análisis del azúcar) es un cuerpo global que trae en concierto las actividades de todos los comités nacionales para el análisis del azúcar.

<b>Guarapo</b>	Jugo de la caña dulce exprimida.
<b>Imbibición</b>	Para mejorar la extracción de sacarosa, se aplica agua de imbibición. Este proceso consiste en agregar agua al bagazo ante su paso por el molino final.
<b>Maceración</b>	Este es un proceso que se aplica paralelo a la imbibición y que tiene la misma finalidad (aumentar la extracción). Consiste en remojar el bagazo con el jugo diluido producto de la imbibición. El jugo extraído por un molino se aplica a la entrada del molino anterior. En un tándem de 5 molinos se aplica maceración al segundo, tercero y cuarto molino, e imbibición al quinto molino.
<b>Maza</b>	Cada uno de los cilindros o rodillos que componen los molinos donde se lleva a cabo la compresión de la caña de azúcar.
<b>Meladura</b>	Nombre que recibe el jugo concentrado (60 a 65 °Brix) de la caña de azúcar resultante de la etapa de evaporación.
<b>Monosacárido</b>	Azúcares simples son los glúcidos más sencillos, que no se hidrolizan, es decir, que no se descomponen para dar otros compuestos.
<b>pH</b>	Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias.

<b>Polifenoles</b>	Son un grupo de sustancias químicas encontradas en plantas caracterizadas por la presencia de más de un grupo fenol por molécula. Generalmente son los encargados de la actividad antioxidante de las frutas y verduras.
<b>Sedimentación</b>	Es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo de un dispositivo construido especialmente para tal fin.
<b>Sólidos disueltos</b>	Se encuentran en una mezcla íntima y homogénea con el medio que los contiene, su tamaño está en el rango de 0,1 a 1 milimicra.
<b>Sólidos suspendidos</b>	Insolubles en el medio que los contiene, en el caso del jarabe de azúcar se encuentran en tamaño coloidal.
<b>Sulfitación</b>	Procedimiento mediante el cual se pone en contacto el jugo de la caña de azúcar con los vapores de dióxido de azufre producidos durante la combustión del azufre en los hornos.
<b>Tachos</b>	Son evaporadores al vacío de efecto sencillo diseñados para la manipulación de materiales viscosos. Al igual que los evaporadores se componen de un cuerpo provisto internamente de tubos verticales soportados por espejos en sus extremos.
<b>Turbidez</b>	Propiedad que tienen las soluciones de partículas muy finas de afectar la transmisión de la luz a través de ellas.



## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se desarrolla y simula la dosificación de azufre, parte importante dentro del proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar. En el capítulo 1, se describe como se obtiene el azúcar e involucra una serie de subprocesos a realizar como: cosecha, molienda, clarificación, evaporación, cristalización acondicionamiento, envasado y refinación. En el capítulo 2, se muestra el tema de la calidad del azúcar en los ingenios, y así mismo se describen los procesos de sulfitación y como están relacionados directamente con la eficiencia del proceso de clarificación del jugo de caña. La ausencia de un tratamiento eficaz en este proceso, se convierte en un azúcar de menor calidad, con incidencia más grande de color, impurezas y puntos negros.

La automatización de procesos se usa principalmente porque mantiene la estabilidad del proceso, se obtienen mejores resultados, reduce el costo de operación de los procesos industriales y se justifica plenamente la inversión en equipo de control, en el capítulo 3, se presenta la literatura de métodos de control de proceso, considerando que el empleo de un método de control genera, considerables ganancias intangibles, como: estandarización, rápida respuesta en los procesos, eficiencia, nuevas tendencias, y eliminación de errores que es otra contribución positiva del uso del control automático.

En el capítulo 4 se representa el diseño, modelado y simulación de dosificación de azufre, como un modelo matemático que se ajuste a las características requeridas y variables de entrada (flujo de jugo de caña, pH), que permitan de manera efectiva, utilizar el azufre adecuado para producir

dióxido de azufre, que es utilizado como agente blanqueador, desinfectante, conservador y que es necesario dentro del proceso de clarificación del jugo de caña, llamado sulfitación de jugo de caña.

De esta manera se podrá automatizar el proceso de sulfitación del jugo de caña y se tendrá un control adecuado en el uso del azufre. Que trabajará de acuerdo a las variables de entrada. La simulación utilizando el software Matlab con la herramienta de Simulink permite verificar resultados y como se adaptará el modelo matemático creado para producir el dióxido de azufre necesario, verificando así la validez del modelo comparándola con los datos reales.



# OBJETIVOS

## General

Desarrollar un modelo que se ajuste a las características requeridas por el proceso, que permita llevar un control eficiente en la dosificación de azufre y garantice la calidad del azúcar, dentro del proceso de clarificación de jugo de caña en Ingenio La Unión, S.A.

## Específicos

1. Conocer los distintos equipos y fundamentos teóricos del proceso y control regulado.
2. Definir un modelo matemático del horno de azufre utilizado en el Ingenio La Unión S.A.
3. Realizar una simulación del modelo matemático obtenido, utilizando el software Matlab y su herramienta Simulink.
4. Proponer un control adecuado para la dosificación de azufre.
5. Comprobar la validez de resultados del modelo diseñado y su aproximación con el proceso actualmente utilizado.



## INTRODUCCIÓN

Los modelos son comúnmente empleados en ingeniería para determinar condiciones óptimas de diseño de una etapa o proceso, delimitar la región de operación óptima de un sistema y caracterizar y extraer conocimiento sobre el comportamiento de un proceso. El modelado del proceso de dosificación de azufre al horno rotatorio de combustión es el procedimiento que permite establecer una estructura matemática o simbólica que describa de manera cualitativa o cuantitativa el comportamiento característico de un sistema, permitiendo además inferir o calcular cambios en las respuestas internas o externas del sistema, ante cambios en las variables externas.

La búsqueda de esas condiciones óptimas de operación y control de las mismas no es tarea fácil, ya que la dosificación es un proceso delicado, en el que todas las variables están interrelacionadas. Además, la realización de pruebas de forma directa es difícil de llevar a cabo, por la continuidad de operación en la producción de azúcar. Tomando en cuenta esto, es necesario buscar un método alternativo de análisis: la simulación.

Con la simulación se tendrá un comportamiento de un proceso real mediante la resolución del modelo y las ventajas se resumen en un análisis de proceso en profundidad, determinando qué variables o parámetros son críticos e influyen de manera decisiva en el funcionamiento del sistema global, también facilita la búsqueda de las condiciones óptimas de operación y se pueden estudiar de una forma segura condiciones límites del proceso. Lograr una adecuada dosificación al horno de combustión, implicaría obtener un flujo de dióxido de azufre regulado, permitiendo así sulfitar óptimamente el jugo.



# **1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR**

La caña de azúcar ha sido uno de los productos de mayor importancia para el desarrollo comercial. El azúcar se consume en todo el mundo, debido a que es una de las principales fuentes de calorías en las dietas de todos los países. Se cultiva mucho en zonas calurosas y húmedas de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos, formados por numerosos nudos. La caña alcanza entre 2 y 5 metros de altura y entre 2 y 5 centímetros de diámetro. Se conocen diversas variedades cultivadas, que se diferencian por el color y la altura de los tallos.

## **1.1. Procesos de producción**

Para obtener el azúcar, es necesario llevar a cabo una serie de procesos sobre la caña, que inician desde la cosecha, luego llevada a los patios donde se prepara para la molienda, el jugo obtenido es clarificado, evaporado, cristalizado y centrifugado, luego pasa por una etapa de secado y envasado.

### **1.1.1. Cosecha**

Se inicia con la preparación del terreno, etapa previa de siembra de la caña. Una vez madura la planta, las cañas son cortadas y se apilan a lo largo del campo, de donde se recogen a mano o a máquina, se atan en haces y se transportan al ingenio, que es un molino en el cual se trituran los tallos y se les extrae el azúcar. No debe transcurrir mucho tiempo al transportar la caña recién

cortada a la fábrica porque de no procesarse dentro de las 24 horas después del corte se producen pérdidas por inversión de glucosa y fructuosa.

### **1.1.2. Patios de caña**

La caña que llega del campo, es transportada por cabezales y una serie de jaulas hacia el ingenio, se revisa para determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas y luego es dirigida a las mesas, con un sistema de grúas que se encarga de descargar la caña contenida en los cabezales a las mesas, es allí donde la caña pasa a ser ordenada y lavada, para llegar al proceso de preparación y molienda.

### **1.1.3. Preparación y molienda**

Las picadoras son unos ejes colocados sobre los conductores accionados por motores eléctricos, provistos de cuchillas giratorias que cortan los tallos y los convierten en astillas, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la extracción del jugo en los molinos. La función de los molinos es la de separar los dos componentes de la caña de azúcar, el jugo y la fibra (bagazo). Consiste en la compresión de la fibra de caña entre cilindros de gran tamaño llamados mazas.

En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua, generalmente caliente, o jugo diluido para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso. El proceso de extracción con agua es llamado imbibición y con jugo se llama maceración. Por presión, extraen el jugo de la caña, saliendo el bagazo con aproximadamente de 30 a 50 por ciento de fibra leñosa, este material es pasado a calderas como combustible.

#### **1.1.4. Clarificación**

Proceso diseñado para remover impurezas tanto solubles como insolubles, emplea en forma universal cal y agentes clarificantes. El jugo obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido (pH aproximado de 5,2), éste se trata con lechada de cal, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa, neutralizando la acidez natural del jugo y formando sales insolubles de calcio.

La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante, se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba para coagular la albúmina, algunas grasas, ceras y gomas; el precipitado así formado atrapa los sólidos en suspensión al igual que las partículas más finas.

Los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en tambores rotativos de filtración. El jugo filtrado puede regresar al proceso o pasar directamente al jugo clarificado y los desechos o residuos son tratados como cachaza. El pH ideal es de 7 a 7,5, lo cual genera un jugo brillante, mayor volumen de cachaza, aumenta la temperatura entre el jugo mixto y clarificado y se evita la destrucción de la glucosa e inversiones posteriores. Para una buena clarificación se necesita que la cantidad de cal sea correcta ya que esto puede variar la calidad de los jugos que se obtienen.

##### **1.1.4.1. Filtración de lodos de clarificadores**

Los lodos provenientes de los clarificadores se conocen como cachaza, la cual es una mezcla de todas las impurezas sedimentadas y retiradas del jugo

(gomas, fosfatos, compuestos de calcio, hierro, aluminio, magnesio, sales minerales, no-azúcares, y en general impurezas orgánicas e inorgánicas), con pequeñas partículas de fibra presentes en el jugo.

#### **1.1.5. Evaporación**

El jugo clarificado contiene aproximadamente 85 por ciento de agua. Alrededor de dos terceras partes de esta agua se evaporan al vacío de múltiple efecto, los cuales consisten en una sucesión de celdas o cuerpos de ebullición al vacío, dispuestos en serie de manera que cada celda subsiguiente tiene un grado más alto de vacío y, por consiguiente, hierve a una temperatura más baja. Los vapores de un cuerpo hacen hervir de esta manera el jugo contenido en la siguiente celda. Mediante este sistema, el vapor introducido en el primer cuerpo efectúa una evaporación de múltiple efecto.

El jugo procedente del sistema de clarificación se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 15 por ciento y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 65 por ciento. Para conseguir la formación de cristales de azúcar el jugo debe ser concentrado hasta el estado de mieles. Para alcanzar tal condición es necesario eliminar la totalidad del agua presente.

#### **1.1.6. Cristalización**

Se conoce también como cocción de azúcar. La cristalización consiste básicamente en la formación de los cristales de azúcar a partir de diferentes mieles. El proceso se efectúa en evaporadores al vacío de efecto sencillo comúnmente llamados tachos. Primeramente se concentra la meladura hasta que esta alcanza el punto de saturación. En tal condición se introducen cristales



de siembra que sirven de núcleos a los cristales de azúcar. A medida que se evapora el agua se agrega meladura con el fin de aumentar el tamaño de los cristales.

El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho. Bajo la vigilancia de un tachero o con equipo de automatización adecuada, los cristales originales crecen sin que se formen cristales adicionales, de manera que cuando el tacho está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado, y los cristales y el jarabe forman una masa densa conocida como masa cocida. La templa (masa contenida en el tacho) se descarga luego por medio de una válvula ubicada en la parte inferior del tacho.

#### **1.1.7. Centrifugación**

La masa cocida proveniente del cristizador se lleva a máquinas giratorias llamadas centrífugas. Donde se separa la miel de los cristales por medio de centrífugas, obteniéndose azúcar cruda o morena, miel de segunda o sacarosa líquida y una purga de segunda o melaza. El azúcar morena debe su color café claro al contenido de sacarosa que aún tiene.

La masa cocida se introduce a la máquina (centrífuga) por medio de un canal de poca longitud desde el vaso de retención. El canal se cierra por medio de una compuerta apropiada. En el momento de la carga la máquina gira a baja velocidad. La masa forma entonces una capa vertical contra la pared de la canasta. Cuando esta capa adquiere el espesor deseado se suspende la entrada de la masa cocida.

Seguidamente la máquina es acelerada hasta alcanzar la velocidad de operación. Cuando el ciclo finaliza se descarga el azúcar a un conductor que

transporta esta hasta la parte alta de la fábrica en donde se ubican las máquinas secadoras.

### **1.1.8. Secado, enfriado y envasado**

El azúcar húmedo, se coloca en bandas y pasa a las secadoras, que son elevadores rotatorios donde el azúcar queda en contacto con el aire caliente. El azúcar debe tener baja humedad, aproximadamente 0,05 por ciento, para evitar los terrones. El azúcar se seca con temperatura cercana a 60 grados centígrados, se pasa por los enfriadores rotatorios inclinados que llevan el aire frío en contracorriente, en donde se disminuye su temperatura hasta aproximadamente 30-35 grados centígrados para conducir al envase. El azúcar seca y fría se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado y se despacha a la bodega de producto terminado para su posterior venta y comercio. La figura 1, muestra los procesos llevados a cabo para producir azúcar.

## **1.2. Azúcar**

La caña de azúcar dentro de su composición tiene a la sacarosa como su azúcar predominante y en segundo término, los azúcares reductores. La glucosa y la fructosa, que son los azúcares que se obtienen de la inversión o hidrólisis de la sacarosa, son los que representan al grupo de azúcares reductores presentes en la caña. Cuando se invierte la sacarosa, por la acción de un ácido o de una enzima, la molécula se divide dando glucosa y fructosa, según su reacción química:

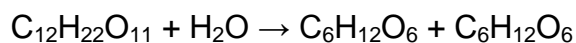
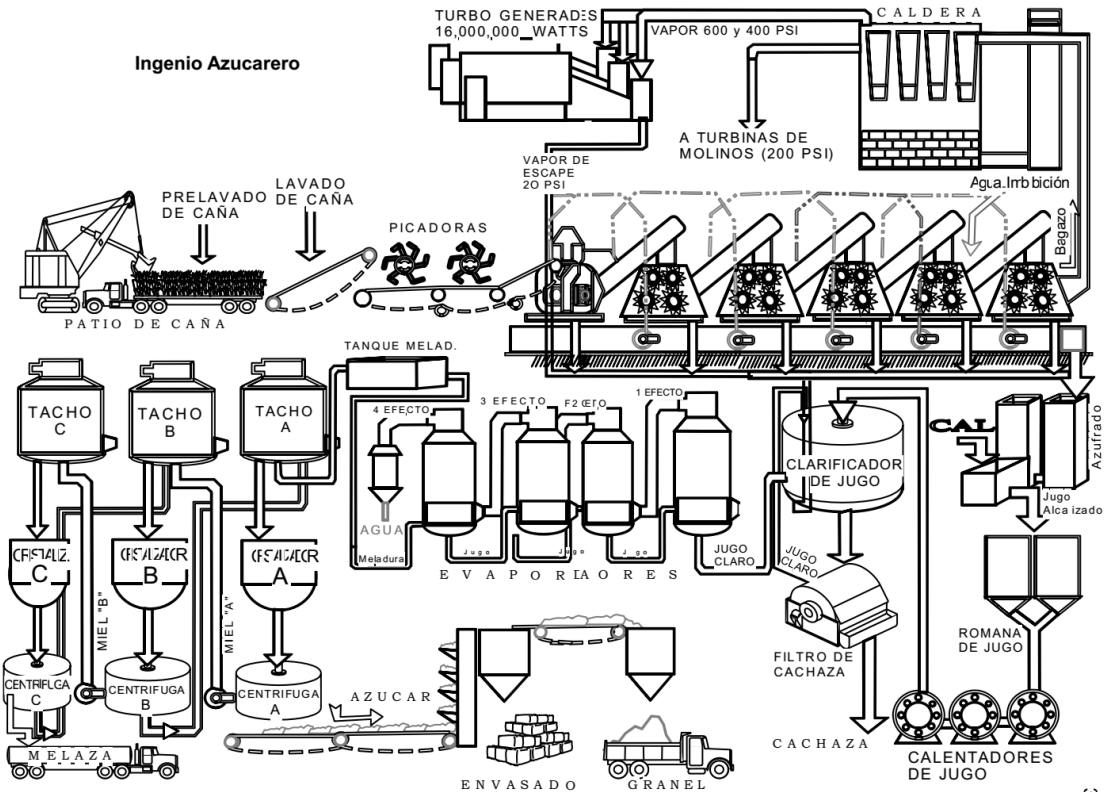


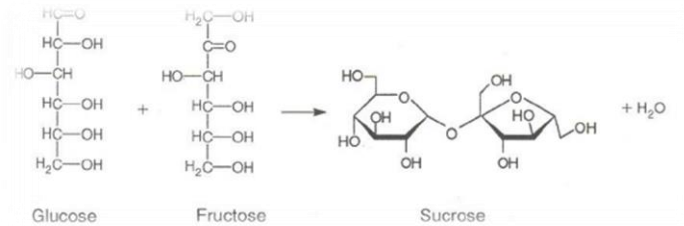
Figura 1. Proceso de producción de la caña de azúcar en un ingenio



Fuente: Ingenio La Unión, S.A.

La figura 2, muestra la reacción de las moléculas, esta reacción, a la que se llama hidrólisis o inversión, tiene efecto a diversas velocidades, que dependen de condiciones tales como la temperatura, el tiempo y el pH. Estos dos azúcares reductores desarrollan color cuando se les sujeta a condiciones de calor y pH alcalino. Si éstas son extremas, se destruirán los azúcares reductores formándose en la reacción varios productos, los que a su vez, se unen fácilmente con otros compuestos que ya antes estaban presentes o que también se originan en el proceso y las sustancias resultantes son a menudo la fuente del color de los productos del jugo de la caña o del azúcar crudo.

Figura 2. **Representación de la glucosa y fructuosa**



Fuente: REIN, Peter. *Cane Sugar Engineering*. Berlin 2007. p. 31.

En las fábricas de azúcar se hace un extenso uso de los agentes químicos con objeto de conseguir ciertos cambios deseables en la naturaleza de los materiales procesados. El propósito de varios procedimientos de purificación de jugos es convertir los jugos mezclados que son lodosos y de color verde oscuro, en jugos clarificados brillantes de color amarillo claro.

Para conseguir dicho resultado se utiliza tanto el color, como algunas sustancias químicas cuya acción es precipitar aquellos no-azúcares que si no se eliminan del jugo, podrían interferir en contra de una eficiente separación de los cristales de sacarosa del licor madre.

### 1.2.1. **Color presente en el jugo de caña de azúcar**

Los colores se derivan de pequeñas cantidades de pigmentos naturales tales como clorofilas, carotenoides y antocianinas, que se encuentran en la planta. En gran parte el color también proviene del material coloreado formado por degradación de los azúcares, por reacciones entre los azúcares reductores y los aminoácidos, y por otras reacciones similares que tienen lugar durante el proceso de fabricación. La presencia del hierro proveniente del equipo tiende también a incrementar el color obtenido debido a su reacción con los

polifenoles, que son sustancias de la caña que ya tenían color en su forma original, dadas por las células que lo conforman.

Es así como, los compuestos coloreados que se forman durante el proceso por descomposición de algunos productos y por otras reacciones químicas, al combinarse con otras sustancias pueden formar materias colorantes.

### **1.2.2. Separación del color del jugo de caña**

Los no-azúcares coloreados que están presentes en el jugo de caña pueden separarse por medio de varios procesos físicos y químicos, los más empleados son:

- Cal y ácido fosfórico
- Carbón activado
- Dióxido de azufre

En ciertos casos la separación de color se lleva a cabo por medio de la formación de compuestos insolubles que acarrean con ellos el color, directamente o en forma coloidal. Se debe resaltar que aunque se usen dichos agentes precipitantes o adsorbentes, existe el peligro de que se forme más color si los agentes no se usan bajo las condiciones apropiadas, por lo tanto, es esencial mantener hasta donde sea posible, las condiciones en las que no se formen ni se destruyan los azúcares reductores.



## **2. PROCESO DE SULFITACIÓN DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR**

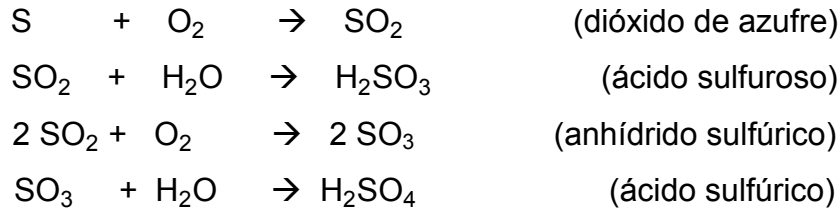
En el jugo existen dos compuestos que son no azúcares y que reaccionan con otros formando sustancias colorantes. Entre los compuestos más notables se encuentran los polifenoles y los amino-compuestos. La presencia de sustancias colorantes en el azúcar es indeseable. Para mantener los índices de coloración en valores aceptables se utiliza el proceso de sulfitación, que consiste en mezclar el jugo con dióxido de azufre.

### **2.1. Azufre**

Utilizado en muchos procesos industriales, como la producción de ácido sulfúrico para baterías, la pólvora y la fabricación de la vulcanización del caucho. Los sulfitos se usan para blanquear el papel y como conservante en bebidas alcohólicas. Sin embargo, después de ser oxidado en un horno de gas que forma el sulfuro, se utiliza en la clarificación del jugo de la caña de azúcar, uno de los subprocesos necesarios para obtener el azúcar.

El azufre reacciona con el oxígeno del aire produciendo dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ , gas denso, incoloro con olor a azufre quemado, es muy tóxico. Es un agente muy reductor y soluble en agua), el cual por otra oxidación produce el anhídrido sulfúrico o trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y éste puede reaccionar con el vapor de agua del aire produciendo ácido sulfúrico.

Estos procesos se representan mediante las siguientes reacciones químicas:



### 2.1.1. Preparación del dióxido de azufre

El azufre usado en las industrias azucareras debe estar dentro de las siguientes especificaciones con respecto a un kilogramo de azufre:

- Abajo de 10 gramos de humedad.
- Abajo de 1 gramo de ceniza.
- Abajo de 2,5 gramos de sustancias bituminosas.
- Abajo de 0,5 gramos de arsénicos.

Según la literatura, la combustión se obtiene a una temperatura de aproximadamente 275 a 375 grados centígrados, cada parte de azufre requiere una parte de oxígeno en una reacción exotérmica, para alcanzar 9280 kilojoules sobre kilogramos de azufre (1 mol de azufre, en condiciones estándar libera 296,8 kilojoules). Con una cantidad teórica de aire (que contiene una fracción de masa de 23,5 por ciento de oxígeno, fracción de volumen de 20,84 por ciento) la masa de aire requerida debería ser 4,3 veces la masa de azufre y el máximo contenido de dióxido de azufre en la combustión de gases es un fracción de volumen de 21 por ciento.

Normalmente, cerca de un 60 por ciento de exceso de aire es usado y los gases contienen una fracción de volumen de 10 a 16 por ciento, en promedio



una fracción de 14 por ciento. En presencia de agua, el azufre se quema para dar ácido sulfúrico en lugar de dióxido de azufre, y esto causa corrosión a la tubería.

Además se forma sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) en el jugo, el cual incrementa considerablemente la presencia de calcio en el jugo. La introducción de agua en los hornos de azufre debería ser prevenida y el aire para la combustión de azufre debería ser siempre seco. En algunos lugares el aire es pasado por cal viva ya que tiene una gran absorción de humedad del aire.

## **2.2. Combustión**

La combustión es la combinación rápida del oxígeno con los elementos inflamables del combustible. Para que la combustión tenga lugar, deben de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación. En la mayoría de los combustibles fósiles hay tres elementos combustibles significativos: C (carbono),  $\text{H}_2$  (hidrógeno) y S (azufre), el azufre es el de menor importancia como fuente de calor, pero puede tener una influencia importante en problemas de corrosión y contaminación.

El comburente universal es el oxígeno, pero en la práctica se utiliza el aire como comburente, porque está compuesto en su mayoría por 23,5 por ciento de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y 76,5 por ciento de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). La energía de activación es el elemento que desencadena la reacción de combustión. En las combustiones normales, la fuente de oxígeno está constituida por aire atmosférico. Los cálculos y obtención de constantes se basan en el concepto de atmósfera estándar que tiene un peso molecular de 28,966 gramos por mol.

El objetivo de una buena combustión es liberar toda la energía del combustible, a la vez que se minimizan las pérdidas derivadas de las imperfecciones de la combustión y del aire. La combinación de los elementos inflamables del combustible con el oxígeno, requiere de:

- Temperatura: debe ser suficientemente alta para la ignición de los elementos inflamables.
- Turbulencia: se debe facilitar el contacto entre combustible y oxígeno.
- Tiempo: suficiente para completar el proceso.

Estos parámetros son conocidos como las tres T de la combustión, temperatura, tiempo y turbulencia.

La temperatura de inflamación, también conocida como punto de destello, es la temperatura mínima en condiciones normales de presión, a la cual se desprende la suficiente cantidad de vapores para que se produzca la inflamación mediante la aportación de un foco de ignición externo. Así mismo, temperatura de ignición, se le llama a la temperatura mínima para que un producto entre en combustión de forma espontánea.

### **2.3. La sulfitación**

Debido a que la presencia de sustancias colorantes en el azúcar es indeseable. Para mantener los índices de coloración en valores aceptables se utiliza el proceso de sulfitación, que consiste en mezclar el jugo con dióxido de azufre. Este proceso consigue inactivar o al menos minimizar la acción de los polifenoles y los amino-compuestos.

La acción del dióxido de azufre sobre el jugo tiene los siguientes efectos: elimina las materias colorantes, transforma en compuestos ferrosos incoloros las sales férricas que se forman por contacto del jugo con los tanques. El dióxido de azufre es un gas que se obtiene de la combustión del azufre, la sulfitación se puede interrumpir a un pH de 4,0 o 4,5. El pH final debe ser 6,9 a 7,0 o ligeramente ácido.

La sulfitación puede hacerse antes o después de la alcalización, sin embargo se recomienda que el precipitado se forme en medio ácido, porque la velocidad de decantación será mayor y la cachaza más compacta. También es importante observar 2 métodos en la coagulación ácida.

- Con fuerte acidez (3,8 a 4) y baja temperatura (30 a 40 grados centígrados).
- Con débil acidez (5,5 a 5,3 a una alta temperatura 70 a 75 grados centígrados).

Debido a que el pH donde coagulan muchas proteínas y coloides esta alrededor de cuatro es por eso que se necesita menos desnaturalización.

Ventajas de la sulfitación:

- El jugo decanta más rápidamente.
- Disminuye la viscosidad de las masas cocidas u cuecen más rápidamente.
- Mejora la cristalización.
- Mejora notablemente el color.
- Se ahorra tiempo en la clarificación.
- Se aumenta ligeramente la capacidad de las centrífugas.

Inconvenientes de la sulfitación:

- Los calentadores se incrustan más rápidamente, esta incrustación se puede eliminar, sulfitando en caliente. Pero entonces debe incrementarse la superficie de calentamiento.
- Se aumentan los gastos (bombas de circulación, azufre, desgaste de aparatos, tuberías).

## **2.4. Procesos de sulfitación**

Los procesos de sulfitación están sujetos a casi tantas modificaciones como la defecación simple. Entre las variaciones pueden incluirse las siguientes:

- Modificaciones de la secuencia de adición de la cal y el dióxido de azufre.
- Modificaciones de temperatura.
- Aplicación de los reactivos.

Ya que dependen de la secuencia con la que se realizan los subprocesos de alcalización y sulfitación. Además, dependen de la temperatura de trabajo, ya sea sulfitación en caliente o en frío, calentamiento por etapas; y adición de los reactivos discontinua, continua, control ya sea manual o automático.

### **2.4.1. Sulfitación en frío**

El jugo crudo frío se bombea a través de una torre o caja de azufre con una contracorriente de dióxido de azufre para absorber tanto gas como sea posible. Así mismo, la sulfitación se lleva a cabo por inyección del dióxido de azufre (líquido de uso industrial en cilindros) al jugo crudo y frío hasta un nivel

de aproximadamente 400 partes por millón de dióxido de azufre. Esto se hace en el caso de la producción de azúcar crudo.

#### **2.4.2. Sulfitación después de la alcalización**

Este proceso se denomina sulfitación alcalina en oposición a la sulfitación ácida que se acaba de describir. Utiliza aproximadamente, 8 galones de lechada de cal con un brix de 80 grados por 100 galones de jugo, lo que da un gran exceso de cal. Luego se lleva a cabo la sulfitación hasta un pH de alrededor de 7,5, a fin de producir un precipitado pesado, el que se puede eliminar mediante sedimentación y decantación. Una alcalización más fuerte (10 a 12 galones) dará por resultado un precipitado que permitirá utilizar el filtro prensa.

Después de la evaporación, el jarabe es enfriado y sulfitado hasta obtener una ligera acidez (pH 6,5). El tratamiento del jugo de difusión con cal seguida por la sulfitación disminuye el color del jarabe, el azúcar crudo y el azúcar refinado en 25, 46 y 35 por ciento respectivamente. La filtrabilidad se mejora y la pureza de las mieles es más baja, lo que permite una mayor recuperación de azúcar.

#### **2.4.3. Sulfitación en caliente**

La sulfitación en caliente ayuda a reducir la solubilidad del sulfito de calcio, que es más soluble a una baja temperatura; la solubilidad mínima tiene lugar a aproximadamente 75 grados centígrados. Se calienta primero el jugo a esta temperatura, luego se sulfita y se alcaliza, se hierve y se deja sedimentar. El proceso de *Harloff* es un procedimiento de tratamiento en caliente en el que el jugo se calienta a 75 grados centígrados y la cal y el dióxido de azufre se

añaden simultáneamente de tal manera que se mantenga la reacción ácida a la fenolftaleína y la alcalina al tornasol (pH entre 7,4 y 7,8), excepto cerca del final, cuando se añade una cantidad de lechada de cal a fin de obtener una fuerte reacción alcalina (pH mayor de 10).

Después de ello, se completa la sulfitación hasta la neutralidad al tornasol (pH cerca de 7,2). Como ocurre en todos los demás procesos similares, el jugo se lleva finalmente a temperaturas de ebullición en calentadores de jugo y se deja sedimentar.

#### **2.4.4. Sulfitación continua**

El término sulfitación continua indica la adición continua de dióxido de azufre y cal a la corriente de jugo que fluye de manera continua, para ello existen muchos procedimientos diferentes, con diagramas que indican detalles de construcción, métodos para la adición de cal y el gas, pantallas para asegurar una circulación apropiada, así como otros detalles.

#### **2.4.5. Sulfitación del jarabe**

La sulfitación del jugo que abandona el evaporador proporciona un azúcar de una calidad más alta y regular que la sola sulfitación del jugo. La densidad del jarabe es más baja que en los procesos corrientes de defecación, 55 grados brix en comparación con 65 grados brix o más. El jarabe sulfitado se mantiene por lo general a una clara reacción ácida, pH entre 6,1 y 6,5.

## **2.5. Hornos quemadores de azufre**

El dióxido de azufre se produce cuando se quema azufre en una corriente de aire. Los hornos antiguos operaban en forma intermitente; los quemadores modernos permiten la adición de azufre sin interrumpir la combustión.

El aire que se suministre a cualquier horno debe ser seco, ya que la humedad del aire hace que se forme ácido sulfúrico, cuyo efecto es perjudicial para las tuberías, accesorios y para el contacto con el jugo. Para prevenir esto se emplea cal viva esparcida en bandejas que se reponen cada cierto tiempo.

Los quemadores rotativos de azufre utilizan el tiro inducido, la alimentación mecánica asegura una operación continua. Sin embargo los mejores resultados se obtienen con azufre de alta pureza (99,6 a 99,9 por ciento).

El azufre se derrite por su propio calor de combustión en el cilindro rotativo, y queda expuesta una gran superficie a la combustión a medida que el azufre gotea en el aire. El aire admite un collarín y casquillo antisublimación ajustable situado en la conexión entre el tambor rotativo y la cámara de combustión; esta consiste en un compartimiento forrado interiormente de hierro colado o ladrillos equipados con placas de distribución, donde se completa la oxidación del azufre y su mezcla con el aire diluyente. De esta manera, se suministra a los sulfitadores un gas uniforme con un contenido de 10 y 16 por ciento aproximadamente de dióxido de azufre y libre de ácido sulfúrico.

El horno rotatorio está compuesto de un cilindro horizontal, de acero, con extremos en forma de cono, de hierro colado, diseñado de tal modo que se le puede impartir un lento movimiento de rotación alrededor de su eje horizontal.

El azufre se alimenta por medio de un dosificador tipo gusano, que cuenta con un variador de velocidad, (anteriormente el azufre se aplicaba manualmente a la tolva dosificadora) que se mueve a una velocidad constante, regulando el paso hacia el horno rotatorio, fundiéndose al caer, que provoca goteo en el interior del aparato. El aire necesario para esta combustión entra por el extremo anterior del aparato. Como el azufre fundido está en constante movimiento, no deja que se forme la película de sustancias bituminosas, permite así que se pueda quemar una calidad de azufre mayor que en otro tipo de quemador.

Los gases de dióxido de azufre ascienden por la tubería que consta de una camisa de enfriamiento por la cual circula agua para disminuir la temperatura de los gases. La adición de azufre se realiza sin interrupción del proceso de combustión.

### **2.5.1. Combustión en hornos de azufre**

En las plantas en las que se sulfita el azúcar con dióxido de azufre, se presentan problemas con la presencia de compuestos de azufre en los gases de combustión, debido a la combustión incompleta del azufre en el horno ocasionada por el exceso de aire que es necesario introducir al horno para producir un gas de combustión con un contenido en volumen de dióxido de azufre que no sobrepase de 10 a 16 por ciento. La figura 3, muestra el horno utilizado en Ingenio La Unión, S.A.

### **2.6. Torre de sulfitación**

Su función es mezclar el jugo mixto proveniente de los molinos con el dióxido de azufre. El flujo de azufre se controla por medio de la medición de la acidez (pH) de la mezcla resultante. El jugo mezclado frío penetra en forma de



ducha en tanques altos, verticales y cilíndricos, de 1,20 metros o más de diámetro y de 4,5 metros de alto, cuyas dos terceras partes superiores están dotadas de una serie de parrillas de madera dura construidos en tablas de 2x4 pies, puestas de canto. El jugo entra por la parte superior de la torre, en forma de ducha, y atraviesa el emparrillado de madera, es aquí donde se encuentra la corriente gaseosa ascendente de dióxido de azufre.

Figura 3. **Horno rotatorio, Ingenio La Unión, S.A.**



Fuente: Ingenio La Unión, S.A.

Estas torres funcionan en contracorriente al vacío; el cual puede ser generado por medio de un eyector, que trabaja como un sistema venturi generando vacío por el cambio de velocidades debido a las restricciones en la tubería. El jugo sulfitado se extrae del fondo cónico de la torre, a un pH de 3,8 – 4,0; se alcaliniza en un tanque aparte de alcalinización a pH 6,5 – 6,8, para neutralizar la acidez e iniciar los procesos de floculación que permiten la separación de los sólidos no azúcares que han entrado con la caña.

El encalado hasta alcanzar una ligera acidez (pH alrededor de 6,5) es seguido por el calentamiento, sedimentación y decantación como en el proceso de defecación. Se continúa con la evaporación hasta obtener un jarabe ligero, y luego dicho jarabe se deja sedimentar durante 6 a 24 horas antes de hervirlo en el tacho al vacío.

La sulfitación continua se lleva a cabo en sulfitadores cilíndricos que mantienen un volumen fijo del jugo. El jugo caliente (aproximadamente 75 grados centígrados) fluye a través del tanque en forma continua, mientras que la lechada de cal se añade continuamente al jugo que entra; la circulación necesaria se logra mediante la aplicación al jugo de dióxido de azufre en flujo constante y a presión cerca del fondo del tanque. Por lo general se pre-encala el jugo antes de entrar al tanque de sulfitación, generalmente al punto de neutralidad y luego se mantiene cerca de este punto mediante la aplicación de sulfito y cal. La figura 4, muestra la representación del proceso de sulfitación.

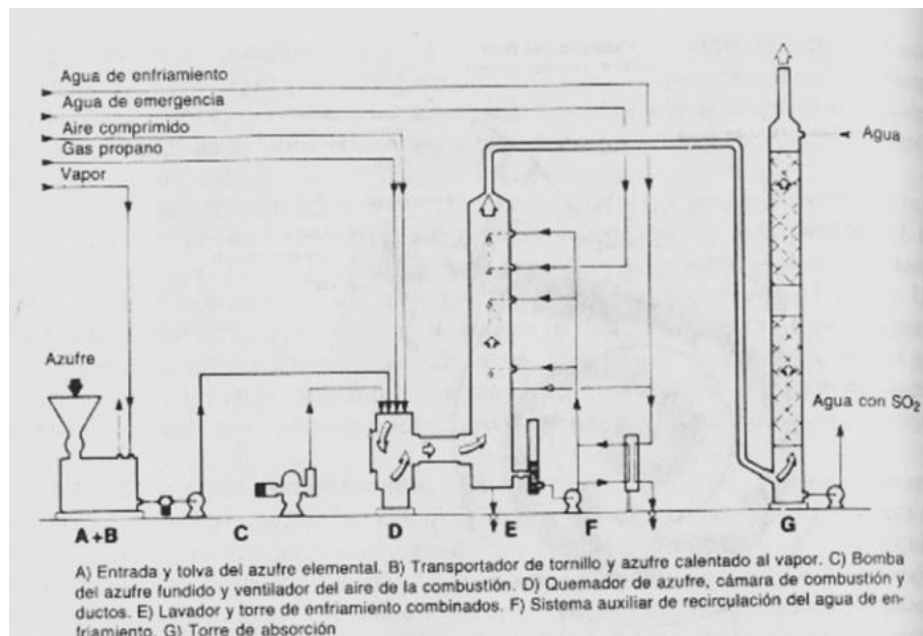
## **2.7. Proceso de sulfitación en Ingenio La Unión, S.A.**

El primer paso en el proceso de clarificación de caña de azúcar, es el sulfitado, cuyos objetivos son reducir compuestos colorantes, inhibir el desarrollo de color por parte de azúcares reductores y aminoácidos, evitar el desarrollo de microorganismos y proporcionar iones sulfito, necesarios en la etapa de alcalinización.

La torre de absorción es de platos perforados sin derramaderos, en donde tanto el gas como el líquido se ven forzados a fluir a través de las perforaciones, su funcionamiento es el siguiente:

El jugo de caña de azúcar llega directamente de los molinos hasta una torre de absorción de dióxido de azufre de platos perforados, en donde se pone en contacto con gases resultantes de una combustión previa de azufre. El jugo se alimenta a la torre por la parte superior a temperatura ambiente y un pH aproximado de 5,4 que depende de las condiciones de la caña. El jugo que entra a la torre, se distribuye uniformemente por medio de un distribuidor de jugo. Los gases de azufre se alimentan en contracorriente con el jugo de caña a una temperatura entre 120 y 200 grados centígrados, con un porcentaje de dióxido de azufre entre 3 y 16 por ciento.

Figura 4. Representación del proceso de sulfitación

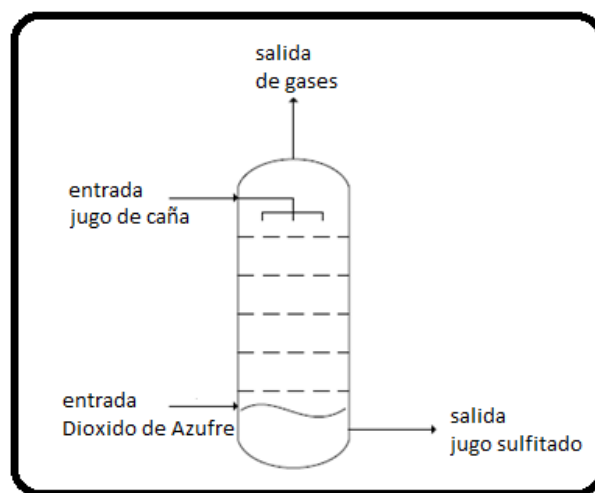


Fuente: P. CHEN, James C. Manual del azúcar de caña. p. 204.

La función de los platos perforados es aumentar el área de la interface gas-líquido de manera que aumente la transferencia de masa. El dióxido de azufre es absorbido por el líquido, formando ácido sulfuroso con el agua

presente en el jugo, lo que ocasiona una disminución de pH. El jugo sulfitado sale por los fondos de la torre con un pH entre 4,1 y 5,0. Los gases son succionados por un extractor o ventilador centrífugo desde la parte superior de la torre de absorción.

Figura 5. **Sistema torre de absorción**



Fuente: ISAZA HURTADO, Jhon Alexander. Modelado y control avanzado de proceso. Grupo de Investigación en Proceso Dinámicos-KALMAN. p. 5.

La figura 5, es una representación del sistema de la torre de absorción, el modelo que describe el comportamiento hidrodinámico de la torre de absorción, establece condiciones de flujo para evitar lloriqueo, inundación y mejorar la transferencia de masa, que se refleja en cambios en el pH del jugo, crucial en las etapas subsiguientes de producción. El modelo hidrodinámico permite analizar el comportamiento de los flujos de jugo y gas dentro de la torre, ante cambios en el flujo del gas alimentado.

## **2.8. Efectos ambientales**

Uno de los efectos más importantes y más común de la combustión es la contaminación del aire. Esta contaminación consiste en la presencia en la atmósfera de una o varias sustancias en tales concentraciones que puedan originar riesgos, daños o molestias a las personas y al resto de seres vivos, perjuicios a los bienes o cambios de clima.

Los óxidos de azufre, dióxido y trióxido de azufre, son los agentes contaminantes más habituales en el aire. Proceden de la combustión de los combustibles utilizados en la industria y en la calefacción doméstica. El principal peligro que representan son las reacciones químicas a las que dan lugar en condiciones de humedad.



### **3. MÉTODOS DE CONTROL DE PROCESO**

Anteriormente, el control de los procesos se llevó a cabo mediante sondeos basados en la intuición y la experiencia acumulada. Sin embargo, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas, lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso. Así como también obtener un aumento en los niveles de producción de la maquinaria instalada, mejoramiento de la calidad del producto, disminución de costos de producción, mejorar la seguridad en los procesos y del personal.

#### **3.1. Importancia de un lazo de control**

Cuando se trabaja con procesos tan complejos es necesario llevar un control de ellos. El planteamiento a realizar es el siguiente: qué debe hacer el sistema y además cómo hacerlo. El objetivo principal de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas de los elementos del sistema de control. Cuando se habla de un lazo de control, se refiere al diseño de un control capaz de responder a un punto de fluctuación o cambios indebidos en el proceso. El controlador toma las decisiones que afectan las variables del proceso.

##### **3.1.1. Elementos de un sistema de control**

Dependiendo del tipo de proceso y la función de control requerida, el diseño de sistemas de control puede ser desde los más simples como regular el nivel de agua o temperatura en un tanque, hasta los más complejos que

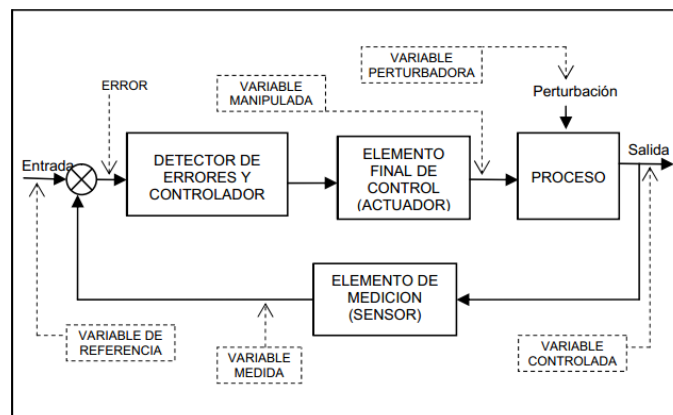
requieren el uso de equipos sofisticados y uso de grandes algoritmos de programación. Se pueden mencionar los siguientes elementos de control:

- Señales de control: son acciones elaboradas por el sistema de control, o dadas por un operario, a través de las variables manipuladas. Dentro de las señales de control se puede mencionar el controlador que es el instrumento que compara el valor medido con el valor deseado y así calcular el error, para luego actuar y corregir el error. El actuador es el instrumento que sirve para regular la variable de control y ejecutar la acción de control.
- Perturbaciones: acciones que no dependen del sistema de control ni del operario, pero si intervienen ya sea positiva o negativamente en el proceso.
- Variable de salida: variables que caracterizan el estado de los procesos dentro de la planta, estas variables son guiadas por variables controladas.
- Sensor: es un elemento de medición o de indicación de parámetros o variables del proceso que transforman la señal medida física en una señal eléctrica. Como sensores de temperatura, nivel, flujo, presión, pH, proximidad entre otros.
- Proceso industrial: es el proceso que tiene una sucesión de cambios de materia y energía en el tiempo, es decir el fenómeno físico que se puede medir y controlar.



- Variables dentro del proceso: son todos aquellos parámetros físicos cuyos valores pueden ser medidos, dentro del sistema se puede definir la variable controlada, es el parámetro que se busca mantener constante o con el menor cambio. La variable manipulada es el medio por el cual se debe corregir el efecto de las perturbaciones y sobre ella se colocara el actuador. La variable perturbadora es el parámetro que indica los cambios repentinos que provocan inestabilidad en el sistema y la variable medida es la variable que se desea monitorear y registrar pero no necesariamente controlar.

Figura 6. **Elementos de un sistema de control realimentado**



Fuente: MENDIBURU, Henry. Automatización Mediambiental. Lima, Perú–MMIII 2003. p. 17.

### 3.2. Tipos de sistema de control

La estrategia de control hace referencia a la naturaleza y la dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y controladas, según el tipo de estrategia a utilizar para calcular la acción de control del sistema se puede mencionar el lazo abierto y el lazo cerrado.

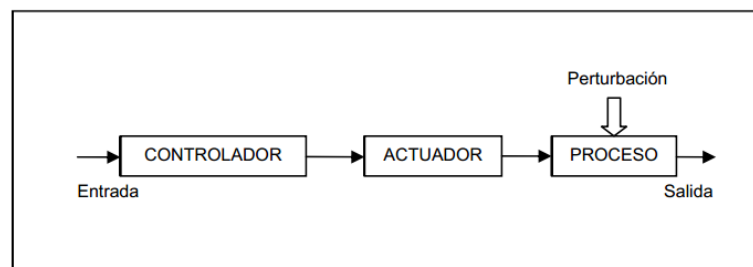
### 3.2.1. Sistemas de control en lazo abierto

Llamados sistemas no realimentados, con este tipo de control los sistemas no pueden satisfacer requerimientos de desempeño críticos. Un lazo abierto consta de dos partes: el controlador y el proceso controlado, es decir, una señal de entrada se aplica al controlador, esta señal a su vez actúa y controla el proceso de tal forma que la variable controlada se desempeñe de acuerdo a los parámetros establecidos.

Por ejemplo, un sistema de riego en lazo abierto tiene un temporizador que activa el sistema todos los días a una determinada hora, riega las plantas durante un cierto tiempo y luego se interrumpe, con la incerteza de saber si las plantas han recibido la cantidad de agua adecuada, una cantidad excesiva o una cantidad insuficiente. Este es un sistema de control no realimentado.

La ventaja de utilizar el control en lazo abierto consiste en su facilidad para ser implementado, además de ser económico, simple y de fácil mantenimiento. Sin embargo no son exactos, no corrigen errores que se presentan y el desempeño depende de la calibración inicial.

Figura 7. Diagrama de bloques de un sistema no realimentado



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Sistemas de control en lazo cerrado

Es un sistema con una o más trayectorias de realimentación. Para obtener un control más exacto, la señal controlada, debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para corregir el error. Existen dos tipos de realimentación:

- Realimentación positiva
- Realimentación negativa

La realimentación positiva es aquella donde la señal realimentada se suma a la señal de entrada, este tipo de realimentación es regenerativo y es usado en el diseño de osciladores. La realimentación negativa es aquella donde la señal realimentada se resta a la señal de entrada generando un error. Este tipo de realimentación es el que se utiliza comúnmente en el campo de control de procesos industriales.

Un sistema realimentado se ilustra en el diagrama de bloques figura 8, el sistema tiene dos componentes principales, el proceso y el controlador. El proceso tiene una entrada, la variable manipulada ( $u$ ). Esta influye en el proceso a través de un actuador, que típicamente puede ser una válvula o un motor, la salida del proceso es llamada variable del proceso ( $y$ ). Esta variable es medida por un sensor, el valor deseado de la variable del proceso es llamada *set-point*, el valor de referencia ( $y_{sp}$ ). El error es la diferencia entre el *set-point* y la variable del proceso.

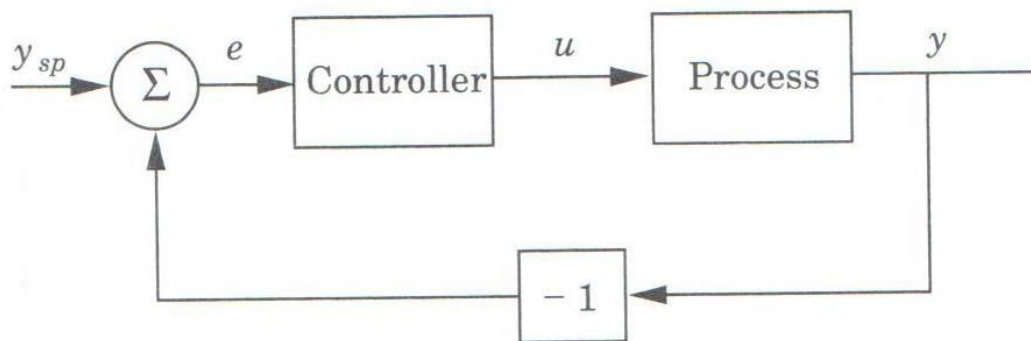
$$e = y_{sp} - y$$

Ec. 3.1

Por simplicidad se asume que el proceso es tal que la variable del proceso incrementa cuando la variable manipulada incrementa. De esta manera el principio de realimentación es expresado como: un incremento en la variable manipulada cuando el error es positivo, y una disminución cuando el error es negativo. Este tipo de realimentación es llamado realimentación negativa porque la variable manipulada se encuentra en la dirección opuesta a la variable del proceso desde que,  $e=y_{sp}-y$ .

Si la realimentación es adecuada el error será pequeño, idealmente debería ser cero. Cuando el error es pequeño la variable del proceso es muy cercana al *set-point* independientemente de las propiedades del proceso. Adicionalmente, el uso de la realimentación dentro de un proceso, puede reducir los efectos de ruido, hacer un sistema insensible a variaciones en el proceso y crear relaciones bien definidas entre variables en un sistema.

Figura 8. **Diagrama de bloques de un sistema realimentado**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Advanced PID Control*. p. 3.

### 3.3. Formas simples de realimentación

Muchas de las propiedades de realimentación pueden ser realizadas con un simple controlador, se pueden mencionar varios modos de realimentación utilizados frecuentemente, como el control de dos posiciones, control proporcional, control integral, control derivativo, control PID.

#### 3.3.1. Control de dos posiciones (*ON-OFF*)

Tipo de proceso que no necesita un control preciso, utiliza control de dos posiciones trabajando como un interruptor, encendido o apagado. Un mecanismo de realimentación es descrito como:

$$u = \begin{cases} u_{\max}, & \text{si } e > 0 \\ u_{\min}, & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

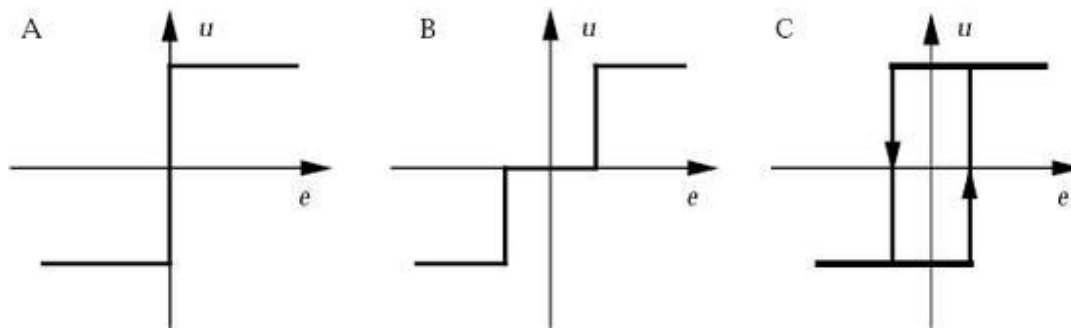
$e = y_{sp} - y$ , es el control de error.

Esta ley implica que la máxima acción correctiva siempre es usada. Según la ecuación 3.2, la variable controlada no está definida cuando el error es cero, esto puede hacer que se creen modificaciones como introducción de histéresis o zona muerta. Cuando se trabaja con este tipo de control se provocan oscilaciones dentro del proceso, porque el lazo de control depende de los tiempos de respuesta del sensor.

Cuando ha estado actuando un campo magnético sobre un material ferromagnético, y luego de cierto tiempo finaliza, el material no anula

completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo residual. Para desimantarlo será precisa la aplicación de un campo contrario al inicial. Este fenómeno se llama: histéresis magnética, que quiere decir, inercia o retardo.

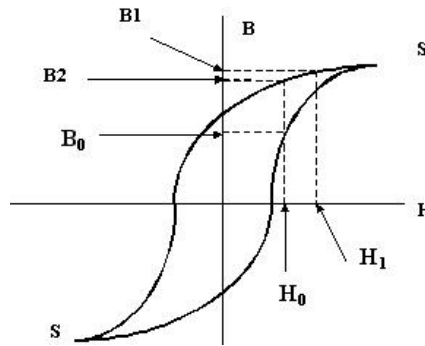
Figura 9. **Características del control *on-off* ideal (A), modificaciones con zona muerta (B) e histéresis (C)**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Advanced PID Control*. p. 4.

Se supone que una bobina crea sobre dicho material magnético una intensidad de campo  $H$ , el cual provoca en ese material magnético una inducción de valor  $B$ . Así a una intensidad de campo  $H_0$  le corresponderá una inducción de valor  $B_0$ . Si ahora aumenta  $H$  hasta un valor  $H_1$ , como se muestra en la figura,  $B$  también aumentará hasta  $B_1$ . Pero si ahora restituimos  $H$  a su valor inicial  $H_0$ ,  $B$  no vuelve a  $B_0$ , sino que toma un valor diferente  $B_2$ . Obsérvese que el camino "a la ida" es distinto que "a la vuelta" lo que implica que para restituir la inducción en el núcleo a su primitivo valor, es preciso aplicar una corriente suplementaria de signo opuesto. La saturación del núcleo magnético se representa por una "s", la figura 10, muestra el ciclo de histéresis.

Figura 10. **Ciclo de histéresis**



Fuente: <http://www.ifent.org>. Consulta: 15 de noviembre de 2012.

La banda muerta se le llama a aquellas zonas donde la sensibilidad del instrumento es nula y hace que no cambie su indicación y señal de salida; o rango dentro del cual puede variarse una entrada, sin causar un efecto en la señal de salida.

### 3.3.2. **Control proporcional**

Involucra el control continuo, que minimiza las oscilaciones dentro del sistema, donde las características del controlador son proporcionales al control de error, para errores pequeños. Es llamado así porque el elemento final de control responde en proporción a la señal transmitida por el controlador.

$$u = K_c (y_{sp} - y) = K_c e \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

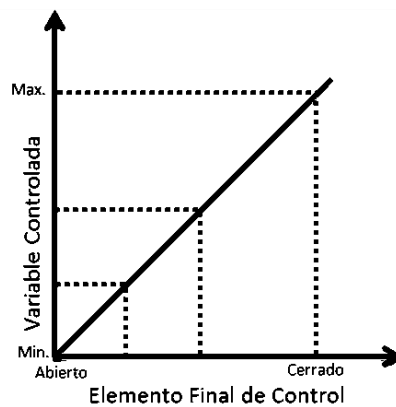
$K_c$  es la ganancia del controlador

Este tipo de control es usado cuando en el proceso, la variable controlada debe cambiar constantemente en respuesta a varios puntos de referencia establecidos. El control proporcional utiliza la ganancia del sistema para controlar el nivel de respuesta del control respecto a la señal de error. Además se añade el término banda proporcional que es la cantidad en la entrada necesaria para causar un cambio total en la salida (100 por ciento). La lógica del funcionamiento es tener un *set-point*, si la variable es mayor el actuador asume una posición y si la variable es menor el actuador asume la otra posición. La figura 11, muestra la relación entre la variable controlada y el elemento final de control.

$$BP = \frac{\text{Variable controlada \%}}{\text{Variable manipulada 100\%}}$$

$$BP = \frac{1}{K_c} \times 100\% \quad (\text{Banda proporcional})$$

Figura 11. **Relación de variable controlada y elemento final de control**



Fuente: elaboración propia.



Un sistema que utilice un control puede ser más o menos sensitivo de acuerdo a la ganancia preestablecida. Si por ejemplo, se tiene un control proporcional para un tanque con una válvula (variable manipulada) que alimenta de agua al tanque, y un medidor de nivel (variable controlada), con un *set-point* de 50 por ciento del nivel del tanque y una ganancia de 2 para el caso I, y una ganancia de 0,5 con un *set-point* de 100 por ciento del nivel del tanque, para el caso II, y utilizando la ecuación 3.3.

- Caso I
  - Variable manipulada (válvula de alimentación de agua) u
  - Ganancia del sistema  $K_c=2$
  - *Set-point* del nivel del tanque  $y=50$  (porcentaje de nivel)
  - Variable controlada  $y$ =medición de nivel actual

$$u=2(50-y)$$

Tabla I. **Relación variable controlada y variable manipulada, caso I**

Variable controlada %	Variable manipulada %
0	100
10	80
20	60
30	40
40	20
50	0

Fuente: elaboración propia.

- Caso II
  - Variable manipulada (válvula de alimentación de agua) u
  - Ganancia del sistema  $K_c=0.5$
  - *Set-point* del nivel del tanque  $y=100$  (porcentaje nivel completo)

- Variable controlada  $y$ =medición de nivel actual

$$u=0,5(100-y)$$

Tabla II. **Relación variable controlada y variable manipulada, caso II**

Variable controlada %	Variable manipulada %
0	50
10	45
20	40
30	35
40	30
50	25
60	20
70	15
80	10
90	5
100	0

Fuente: elaboración propia.

Utilizando una ganancia de 2, se puede hacer un control proporcional más sensitivo que utilizando una ganancia de 0,5. Por lo general determinar una adecuada banda proporcional se requiere de una cuidadosa observación del proceso. El comportamiento dinámico del sistema con un controlador proporcional con pequeñas variaciones se representa mediante la ecuación.

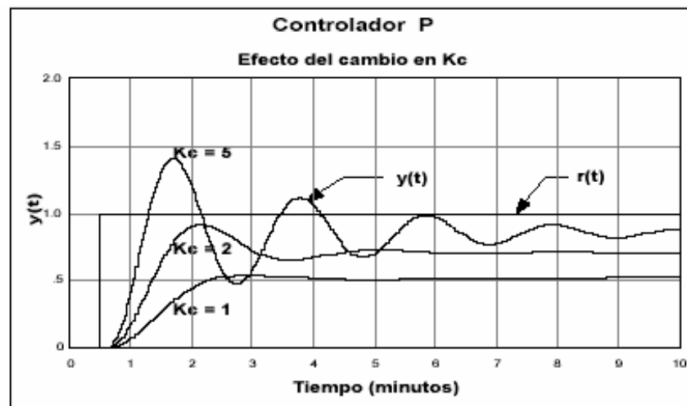
$$u(t)=\pm K_c e(t)=\pm \frac{100}{B_p} e(t) \quad \text{Ec. 3.4}$$

Y la función de transferencia del controlador proporcional será entonces:

$$G_{cP}(s) = K_c = \frac{100}{B_p} \quad \text{Ec. 3.5}$$

La figura 12, muestra el comportamiento dinámico del sistema de control, con un controlador proporcional ante cambios en el valor deseado, para varios valores de la ganancia  $K_c$ . Se puede observar en las curvas de respuesta, que al aumentar la ganancia o disminuir la banda proporcional, el error permanente respecto al nuevo valor deseado disminuye, el tiempo de levantamiento disminuye, el sistema responde inicialmente más rápido, el tiempo de asentamiento aumenta, el sistema es cada vez más lento y las respuestas son cada vez más oscilatorias pudiendo llegar el sistema a ser inestable.

Figura 12. **Controlador proporcional para ganancias  $K_c$  distintas**



Fuente: REYES, Gonzalo Serafín. Academia de Instrumentación CEC y TEM.  
instrumentación V. p. 39.

### 3.3.3. Control integral

El control proporcional tiene un inconveniente, y es que la variable del proceso frecuentemente se desvía del punto de referencia, es decir, toma en cuenta la magnitud y el signo del error, pero no por cuanto tiempo ha existido o con que velocidad cambia este error. Además el hecho de existir una relación uno a uno entre el error y la salida del controlador, hace que en la mayor parte de los casos, la salida requerida para mantener el balance del sistema en estado estacionario, solo se pueda obtener con un error permanente. Un control que tome en cuenta los valores pasados del error y que permite obtener cualquier salida del controlador con error permanente cero es el control integral.

La acción integral brinda una respuesta proporcional a la integral del error. Esta acción elimina el *offset* (la diferencia entre el *set-point* y el valor alcanzado por la variable controlada), es decir no alcanzará un valor estacionario hasta que el error sea cero y permanezca siendo cero. La respuesta es más lenta y el período de oscilación es mayor que en el caso de la acción proporcional.

El control integral calcula el área bajo la curva del error, dependiendo del valor de esa área, el control proporcional es verificado y ajustado las veces que sea necesario hasta que el estado de la variable controlada alcance el *set-point*. Es decir que la acción integral responde a la duración del error.

$$u(t) = K_c \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde:

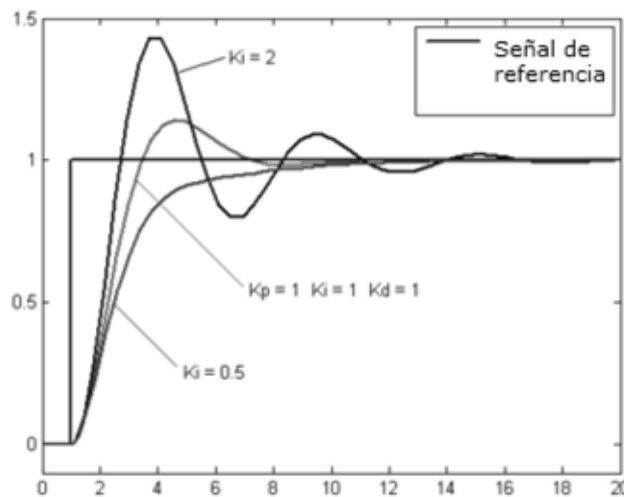
$K_c = \frac{1}{T_i}$ , es la ganancia del controlador

$u(t)$ , es la señal de salida del controlador

$e(t)$ , es la señal de error

En la figura 13, se aprecia el efecto que ejerce la acción de un control integral, se logra que la salida (elemento final de control) alcance el *set-point*, la variable del proceso debe regresar al *set-point* tan rápido como sea posible sin crear oscilaciones significativas en el sistema. Asumiendo que hay un estado estable con un error constante  $e_0$  y una señal de control constante  $u_0$ .

Figura 13. **Respuesta del control integral**



Fuente: *Instrumentation basic 2, Process Control Modes workbook. p. 19.*

$$u_0 = k_c e_0 t$$

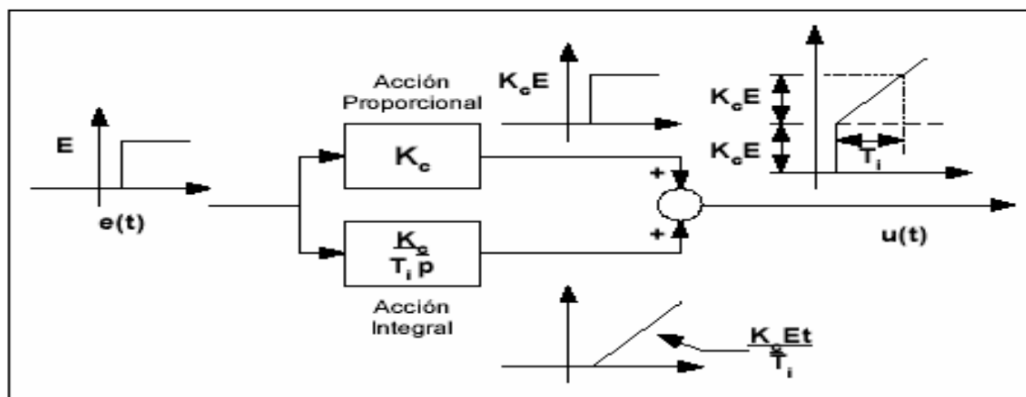
Ec. 3.7

Desde que  $u_0$  es una constante, se sigue que  $e_0$  debe ser cero. Se encuentra entonces que si hay un estado estable y un controlador tienen una acción integral al error de estado estable siempre será cero. Por lo tanto, esto se cumple para el control proporcional e integral.

El control integral ayuda a eliminar rápidamente el *offset*, pero el que estabiliza el sistema es el control proporcional. Generalmente el uso de este

tipo de control se usa en procesos que involucren controlar flujos, así mismo se emplea comúnmente en combinación con el modo proporcional para formar un controlador proporcional-integral (controlador PI).

Figura 14. **Representación diagrama de bloques de un control PI (control proporcional e integral) ante una señal de entrada**



Fuente: REYES, Gonzalo Serafín. Academia de Instrumentación CEC y TEM. instrumentación V. p. 41.

Ecuación para el controlador PI:

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad \text{Ec. 3.8}$$

El modo integral garantiza que el error permanente sea cero, ya que su contribución en la salida del controlador no alcanza un valor constante a menos que el error sea cero y permanezca siendo cero.

La función de transferencia del controlador PI es:

$$G_{cPI}(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{100}{BP} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

$K_c$  = ganancia del controlador

$B_p$  = banda proporcional

$T_i$  = tiempo integral

En la figura 15, se muestra el comportamiento dinámico de un sistema de control PI ante cambios en el valor deseado para varios valores del tiempo integral  $T_i$ , si el tiempo integral tiende a infinito, se elimina el modo integral y el controlador se convierte en un controlador proporcional puro y por lo tanto habrá error permanente.

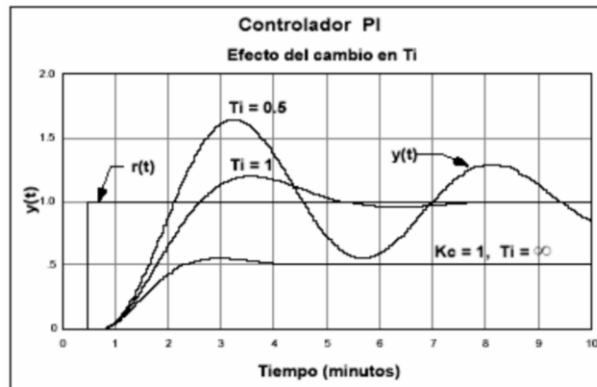
Si se disminuye el tiempo integral, aumenta la acción integral, el error permanente es cero, pero la respuesta es cada vez más oscilatoria y puede llegar a ser inestable el sistema. El modo integral elimina el error permanente pero disminuye la estabilidad relativa del sistema.

#### **3.3.4. Control derivativo**

Este tipo de control por sí solo no puede ser utilizado y necesita trabajar en conjunto al proporcional e integral, la acción derivativa genera una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error). Añadiendo esta acción de control a las anteriores, se elimina el exceso de oscilaciones. Sin embargo, no elimina el *offset*.

Se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). Necesita de un diferencial de tiempo para alcanzar la señal de referencia.

Figura 15. **Sistema de control PI, con variaciones en el tiempo integral**



Fuente: REYES, Gonzalo Serafín. Academia de Instrumentación CEC y TEM. instrumentación V. p. 42.

El control derivativo permite estimar la tendencia (valores futuros) del error. Esta acción se encuentra siempre asociada a la acción proporcional para formar el controlador proporcional-derivativo o controlador PD. En este tipo de control, la salida  $u(t)$  del controlador, es proporcional a la derivada del error  $e(t)$ , es decir:

$$u(t) = K_c \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Ecuación para el controlador proporcional y derivativo:

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] + 0,5 \quad \text{Ec. 3.11}$$



Donde:

$u(t)$  , es la señal de salida del controlador

$e(t)$  , es la señal de error

$K_c$  , es la ganancia del controlador

Si el error es cero y no cambia, es decir se está en régimen permanente, la salida del controlador será 50 por ciento ya que la contribución del modo proporcional será cero porque el error es cero y también será cero la contribución del modo derivativo porque el error no cambia. Por lo tanto la única forma de obtener salidas diferentes del 50 por ciento en estado estacionario es con un error distinto de cero, por lo que con un controlador proporcional y derivativo se tendrá normalmente error permanente. Para pequeñas variaciones de las variables la ecuación anterior se reduce a:

$$u(t)=K_c \left[ e(t)+T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = \frac{100}{B_p} \left[ e(t)+T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{Ec. 3.12}$$

Y la función de transferencia del controlador PD será:

$$G_{cPD}(s)=K_c(1+T_d s)=\frac{100}{B_p}(1+T_d s) \quad \text{Ec. 3.13}$$

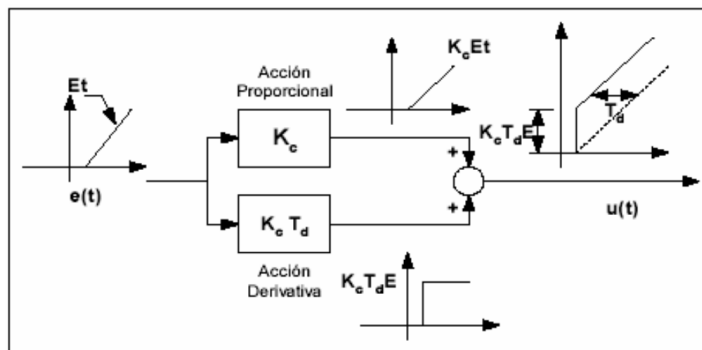
En la figura 16, se muestra la representación del diagrama de bloques de un control proporcional y derivativo, así como también su respuesta ante una señal de entrada.

Al agregar la acción derivativa se está adicionando adelanto en el controlador para compensar el retraso en el lazo. El uso de este tipo de control se limita a aquellos casos con un retraso extremo en el proceso como es el

caso de los lazos de control de temperatura. El ajuste de tiempo derivativo tiene que ver con cuanto adelanto se introduce en la acción de control.

El control derivativo hace que el lazo sea más estable si es ajustado correctamente, además se puede obtener una ganancia mayor y el error permanente será menor que, si solo se tendría un control proporcional. Así como también el sistema será más rápido y el sobrepaso máximo disminuye. El cambio de  $T_d$  no tiene ningún efecto sobre el error permanente. La figura 17, muestra el efecto del cambio en el tiempo  $T_d$ .

Figura 16. **Diagrama de bloques de un control PD**



Fuente: REYES, Gonzalo Serafín. Academia de Instrumentación CEC y TEM.  
instrumentación V. p. 44.

### 3.3.5. Controlador PID

Los tres modos de control anteriores pueden combinarse para formar un controlador proporcional-integral-derivativo, usualmente conocido como controlador PID.

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ec. 3.14}$$

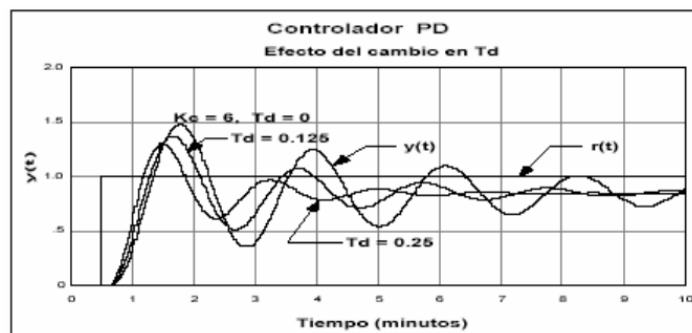
La acción de control es así una suma de tres términos que representan el pasado por la integral del error, el presente por el control proporcional y el futuro por la extrapolación lineal del error.

Donde:

$$e + T_d \frac{de}{dt}$$

Es una predicción lineal del error  $T_d$  unidades de tiempo en el futuro, los parámetros del controlador son llamados ganancia de controlador  $K_c$ , tiempo integral  $T_i$ , tiempo derivativo  $T_d$ .

Figura 17. **Representación de un control proporcional y derivativo**



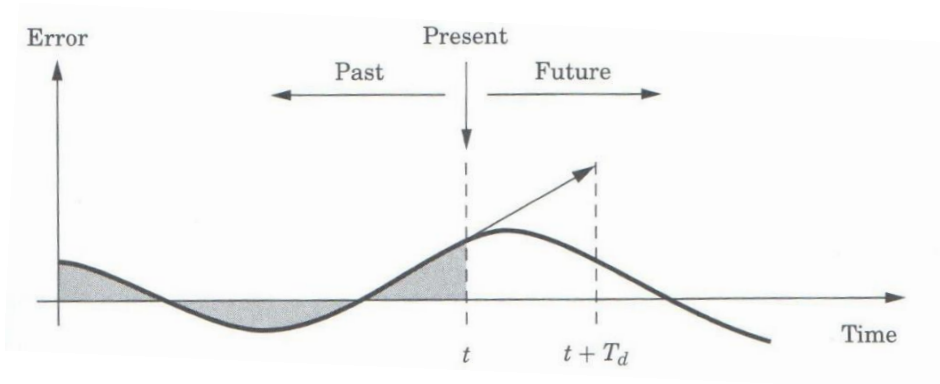
Fuente: REYES, Gonzalo Serafín. Academia de Instrumentación CEC y TEM.  
instrumentación V. p. 45.

La función de transferencia para este controlador PID es:

$$G_{PID}(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ec. 3.15}$$

La figura 18, muestra un controlador PID, que toma la acción de control basado en control de errores pasados presentes y futuros. El amplio uso de este tipo de control se debe a los siguientes factores:

Figura 18. **Representación gráfica del controlador PID**



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *Advanced PID Control*. p. 5.

- La actuación en función de la señal de error proporciona una estructura de realimentación negativa y permite obtener comportamientos satisfactorios en el sistema en la mayoría de los casos, a pesar de existir perturbaciones e incertidumbres en el sistema.
- Utilizando el control derivativo se obtiene una cierta anticipación sobre la respuesta al sistema.
- El control integral permite eliminar el error en régimen permanente (*offset*).

- El controlador PID se puede adquirir como un módulo compacto, donde los parámetros del controlador se pueden ajustar de manera manual.
- Existen sencillas reglas heurísticas que permiten obtener los parámetros del controlador PID y hacen posible el ajuste del controlador.
- Aplicando derivadas e integrales a un sistema se puede considerar un controlador en tiempo continuo más general por ejemplo componentes como sumadores, atenuadores, diferenciadores e integradores.

### 3.3.6. Parámetros de sintonización

El paso final para que el lazo de control funcione adecuadamente es la sintonización del controlador, proceso en el cual se deben determinar los parámetros del controlador necesarios para lograr un comportamiento óptimo del sistema de control. La sintonización del modo proporcional en la mayoría de los controladores electrónicos está representado por la ganancia  $K_c$ , sin embargo en algunos controladores se realiza por medio de la banda proporcional.

$$K_c = \frac{100}{B_p}$$

El parámetro frecuentemente utilizado para la sintonización del modo integral es el  $T_i$  (minutos, segundos), aunque algunos fabricantes emplean la razón de restablecimiento  $T_r$  (minutos/repetición, segundos/repetición) siendo un inverso del otro.

$$T_i = \frac{1}{T_r}$$

Para la sintonización del modo derivativo se utiliza el tiempo derivativo  $T_d$  (minutos, segundos) a veces llamado *Pre-Act*.

### **3.4. Modelo de proceso y su clasificación**

El modelado es un procedimiento que permite establecer una estructura matemática o simbólica, que describen de manera cualitativa o cuantitativa los comportamientos de un proceso. Para eso es necesario identificar los parámetros de un modelo a partir de datos tomados del proceso ya sea por experimentación u operación normal.

Según la literatura, un modelo es un conjunto de elementos de representación de información que replican las características de un proceso real. En general cualquier modelo posee una estructura, parámetros y términos diferentes.

La estructura de un modelo involucra el conjunto de relaciones entre las partes del modelo, que incluyen los parámetros, variables y constantes. Un parámetro es un símbolo que en el modelo es un elemento de ajuste o configuración, que indica el grado en que se relacionan las partes de un sistema. La variable es un símbolo que le pertenece al objeto real y no está sujeta al ajuste, varía por sí misma y bajo la influencia de los demás elementos del modelo. Las constantes del modelo son valores fijos que son necesarios para el modelo que se está tratando. Existen una gran cantidad de clasificaciones para los modelos, según la aplicación determinada se puede seleccionar el tipo de modelo de acuerdo a:

- El grado de conocimiento del proceso implícito en el modelo.
- Al tipo de información que brinda el modelo.

- La característica de agrupamiento espacial de los parámetros del modelo.

Otra clasificación de los modelos puede ser:

- Modelos lineales y no lineales
- Modelos continuos y discretos
- Modelos causales y no causales
- Modelos estáticos y dinámicos
- Modelos variantes en el tiempo e invariantes en el tiempo

### **3.4.1. El grado de conocimiento del proceso implícito en el modelo**

Tipo de clasificación de modelos según el grado de conocimiento implícito que se tiene del sistema, el modelo puede ser clasificado como puramente empírico (caja blanca), fenomenológico (caja negra) o semifísico (caja gris).

#### **3.4.1.1. Modelo de caja blanca**

Modelo físico o fenomenológico, basado en el conocimiento detallado de las variables involucradas en el sistema y de la comprensión de las relaciones entre ellas. La obtención del comportamiento dinámico usando este tipo de modelos se logra generalmente a partir de leyes de conservación como: balances de masa total, balances de energía total, balances de energía mecánica y balance de cantidad de movimiento entre otros.

### **3.4.1.2. Modelo de caja negra**

Tipo de modelo apoyado en datos empíricos. Es determinado experimentalmente a partir de los datos disponibles del proceso. Se obtiene de la experimentación y observación y es ampliamente usado cuando el fenómeno físico es desconocido o no está bien entendido. Este tipo de modelo no es derivado a partir de leyes físicas, y para su elaboración debe seleccionarse alguna estructura matemática que relacione las variables a predecir con las variables medidas.

La selección de una estructura y variables es importante, ya que si no se incluye alguna variable crítica o si la relación propuesta es inadecuada, el modelo será incapaz de representar con suficiente exactitud el proceso. Un modelo de esta clase es el que se obtiene con funciones de transferencia en el dominio de Laplace. Las herramientas de control lineal usan esos los modelos para el diseño del sistema de control.

### **3.4.1.3. Modelo de caja gris**

Es una combinación del modelo de caja negra y modelo de caja blanca. Se pueden obtener de la siguiente manera:

- Aprovechar la estructura de un modelo fenomenológico y establecer correlaciones empíricas para algunos parámetros que no pueden ser especificados mediante una estructura explicativa. Estos se denominan modelos semifísicos de base fenomenológica (MSBF).
- Construir una estructura totalmente empírica, pero durante la identificación de los parámetros algunos de estos se pueden obtener a partir de



conocimientos fenomenológicos. Estos se denominan semifísicos de base empírica.

### **3.4.2. Al tipo de información que brinda el modelo**

Los modelos pueden ser clasificados según el tipo de información que brindan, ya sea que describan un determinado sistema, permitan entender el comportamiento de un sistema o ser un herramienta predictiva de un sistema.

#### **3.4.2.1. Modelos explicativos**

Tratan de incrementar el entendimiento de las causas del fenómeno a través de las pruebas empíricas de proposiciones de diversas teorías de apoyo. Regularmente son modelos complejos y basados en leyes y principios.

En general, no se basan en modelos empíricos o heurísticos y se utilizan cuando el sistema ya se conoce, pero se desea conocer su comportamiento en una situación específica y las razones de porque determinado fenómeno ha ocurrido de esa forma y no de otra manera. Estos modelos son más usuales en investigación.

#### **3.4.2.2. Modelos descriptivos**

En el modelado descriptivo de un sistema se trata que la representación obtenida sea adecuada para las tareas de diseño. Por tanto, el modelo descriptivo debe ser sencillo y aportar información a la toma de decisiones en las diferentes etapas del diseño. Describir un fenómeno implica definir sus características y componentes, así como definir las condiciones en que se presenta y las distintas maneras en que puede manifestarse.

### **3.4.2.3. Modelos puramente predictivos**

Aunque todos los modelos matemáticos son predictivos, cuando se habla de modelos puramente predictivos se hace referencia a aquellos modelos obtenidos empíricamente, los cuales sintetizan en una estructura sencilla las dinámicas de interés del sistema. Aunque su carácter explicativo es mínimo, su sencillez disminuye la complejidad computacional haciéndolo ideales para su uso en línea, un modelo puramente predictivo es un modelo lo suficientemente preciso para ser manipulado en tareas rutinarias de diseño.

### **3.4.3. Modelado dinámico de procesos**

Los modelos son el elemento más importante en todas las tareas o procedimientos de la ingeniería. Cuando se aborda el análisis de un proceso, aparece un grupo disponible de modelos diferentes, que van desde los diagramas de bloques hasta los modelos dinámicos del proceso basados en su fenomenología. La complejidad del modelo depende del proceso o tarea que se desarrolla.

Sin embargo existe una diferencia: en los modelos matemáticos las simplificaciones pueden hacerse antes de la obtención del modelo mismo, de acuerdo con el uso final que se le piensa dar a dicho modelo. El objetivo es hacer que se ajuste lo mejor posible a la función final para la que está siendo construido. Es decir, el uso futuro del modelo condiciona su grado de representación. Esto no implica que el modelo simplificado sea de menor calidad que el modelo original, porque se retiene aquello que interesa a la hora de realizar la tarea específica usando el modelo.

En cambio, un modelo sin simplificar puede requerir tiempos de cómputo muy largos y que resultan inadecuados para la tarea a realizar así como permitir comportamientos impropios que distorsionen los resultados finales de la tarea de ingeniería que con ese modelo se ejecuta.

#### **3.4.4. Características necesarias para el diseño de un modelo**

El modelo de un proceso no es solamente un grupo de ecuaciones, se necesita de mucha más información para construirlo. En forma general, para la construcción de un modelo, se necesitan:

- Suposiciones: características de tiempo, condiciones de flujo, características espaciales, rango y exactitud requerida para los estados del proceso a modelar.
- Ecuaciones de conservación: proporcionan ecuaciones diferenciales que representan matemáticamente la ley básica de la conservación.
- Ecuaciones cinéticas: proporcionan información sobre la velocidad con la que se producirán los intercambios de materia, energía y cantidad de movimiento, reacciones químicas o bioquímicas que ocurran en el Proceso.
- Condiciones iniciales: hacen referencia a los valores de las variables del modelo, en un momento considerado como el instante inicial para la solución del modelo mismo. Es recomendable, aunque no obligatorio, que las condiciones iniciales correspondan a un estado estacionario o punto de equilibrio del modelo.

- Modelado semifísico de base fenomenológica: la semejanza entre el objeto real y la representación, existen procedimientos objetivos y racionales para la obtención de un modelo que limitan la subjetividad solo a la intencionalidad con la que el investigador obtiene los modelos del objeto Real. Se pueden tener representaciones gráficas y representaciones matemáticas de los modelos.

Los MSBF son un punto intermedio entre los empíricos y los físicos o fenomenológicos. Su estructura representa las dinámicas del proceso y las relaciones existentes entre ellas. Tal estructura se determina a través de balances de materia, energía y cantidad de movimiento en estado transitorio. Con esto se obtiene la parte fenomenológica del modelo. Luego se pueden identificar los parámetros a través de métodos empíricos, pero ya con la estructura fija desde los balances.

Cuando se intenta la construcción de un modelo Físico o fenomenológico, suelen presentarse problemas relacionados con el conocimiento detallado de algunos aspectos del fenómeno a modelar. Por lo tanto, se deben hacer suposiciones fuertes y obtener un modelo simple que preserve su estructura fenomenológica, pero a costa de una capacidad baja para predecir el comportamiento real del proceso, o hacer uso de los modelos empíricos para incorporar dicho conocimiento específico al modelo fenomenológico original, desde fuentes heurísticas-experimentales.

#### **3.4.5. Leyes fundamentales para el análisis del modelo**

Para la elaboración de un modelo, como se ha mencionado anteriormente, es necesario utilizar conocimientos físicos, químicos y empíricos.

A continuación se presentan algunas de las leyes utilizadas frecuentemente para el análisis y desarrollo de modelos.

- Ley de conservación de la masa: establece que la materia no se crea ni se destruye, por lo que se puede hacer un balance de masa, entre la suma de los componentes entrantes y salientes para un proceso determinado. Si “x” kilogramos de combustible se combinan con “y” kilogramos de aire, siempre resultan (x+y) kilogramos de productos formados.
- Ley de conservación de la energía: establece que la energía no se crea ni se destruye, de forma que la suma de la energía entrantes (potencial, cinética, térmica, química y eléctrica) en un proceso dado, debe ser igual a la suma de las salientes.
- Ley de los gases ideales: el volumen de un gas ideal es directamente proporcional a su temperatura absoluta e inversamente proporcional a su presión. Para un mol de cualquier gas ideal la constante de proporcionalidad es la misma y la ley se expresa en la forma:

$$V = \frac{RT}{p}$$

Donde:

V: El volumen/mol, P: La presión absoluta, T: La temperatura absoluta, R la constante universal de los gases.

- Ley de pesos combinados: todas las sustancias se combinan según unas proporciones en peso simples y bien definidas, exactamente

proporcionales a las relaciones de los pesos moleculares de los respectivos componentes.

- Ley de Avogadro: volúmenes iguales de diferentes gases sometidos a la misma presión y temperatura, tienen el mismo número de moléculas. El cociente entre el peso de 1 mol de una sustancia y su peso molecular es constante; 1 mol de cualquier sustancia químicamente pura tiene el mismo número de moléculas. Por la ley de gases perfectos, como la molécula de cualquier gas ideal ocupa siempre el mismo volumen a una presión y temperatura dadas, se deduce que volúmenes iguales de diferentes gases contienen el mismo número de moléculas.
- Ley de Dalton: la presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases individuales, si cada uno de ellos ocupase el volumen que ocupa la mezcla, cada gas presente en una mezcla ocupa, por sí solo, el volumen global de la misma y ejerce una presión independiente de la de los demás.
- Ley de Amagat: el volumen ocupado por una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes ocupados por cada uno de los componentes de la mezcla, a presión y temperatura igual a las de la mezcla.
- Entalpía de reacción: energía intercambiada en forma de calor con el entorno cuando se produce una reacción a presión constante. Se mide en kilojoule o en kilojoule sobre mol. Es decir que la energía de reacción representada por  $\Delta H_r$  es la diferencia entre la entalpía molar estándar de los reactivos y de los productos, con cada término de la reacción siendo balanceado con su coeficiente estequiométrico apropiado  $n$ .

$$\Delta H_r = \sum \Delta H_m (\text{productos}) - \sum \Delta H_m (\text{reactivos}) \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde  $\Delta H_m$ , es la entalpía molar estándar de los reactivos y de los productos.

### 3.4.6. Sistemas lineales e invariantes con el tiempo

Sistemas en los cuales el sistema no cambia con el tiempo y son lineales porque el principio de superposición se mantiene; es decir si una entrada  $u_1$  genera una salida  $y_1$  en la entrada  $u_2$  genera una salida  $y_2$  entonces se cumple que la entrada  $au_1 + au_2$  genera una salida  $ay_1 + ay_2$ .

Una de las propiedades es que este tipo de sistema es tal que su respuesta a una entrada arbitraria puede ser caracterizada en términos de la respuesta de una simple señal.

En un sistema continuo las entradas, variables de estado y salidas están definidas sobre un rango continuo de tiempo. Un sistema discreto tienen las variables que están definidos a determinados instantes de tiempo, los sistemas continuos están descritos por ecuaciones diferenciales, mientras que los sistemas discretos mediante ecuaciones en diferencias.

Un sistema distribuido no posee un número finito de puntos en los cuales las variables de estado puedan estar definidas. En contraste, un sistema de parámetros concentrados puede ser descrito por un número finito de variables de estado.





## **4. MODELADO Y DOSIFICACIÓN DE AZUFRE**

En el capítulo anterior se describió como desarrollar un modelo, qué elementos se deben tomar en cuenta y que alcance se quiere obtener con el diseño del mismo. El modelo permitirá analizar un determinado proceso y obtener información del sistema, todo ello, con el propósito de entender el proceso o realizar posibles mejoras.

### **4.1. Planteamiento de problema**

El proceso industrial para la fabricación de azúcar implica realizar una serie de subprocesos para convertir el jugo de caña en cristales y sin impurezas.

Dentro del subproceso de sulfitación, la producción de dióxido de azufre, se realiza de manera manual y por lo tanto no se utiliza la cantidad adecuada de azufre para producir el dióxido de azufre óptimo que reaccionará con el jugo de caña. Aunque se ha implementado una dosificación tipo gusano, la cantidad necesaria de dióxido de azufre a producir depende del flujo de jugo y de otros factores como la lechada de cal, la concentración pH y temperatura del jugo, y por lo tanto no sigue un modelo lineal. Esto ocasiona pérdidas en el insumo necesario para producir dióxido de azufre, así como reducción de calidad del azúcar, aumento de costos y contaminación del medio ambiente.

Por esta razón, surge la necesidad de diseñar un sistema de control basado en un modelo, que sea capaz de regular la cantidad de azufre necesaria para producir dióxido de azufre.

El modelo matemático debe involucrar las variables de flujo de jugo de caña de azúcar, la cantidad de azufre y el grado pH del jugo para optimizar los recursos y reducir la contaminación. Y de esta manera controlar la dosificación de azufre óptima para el flujo de jugo que está circulando por el recipiente.

## **4.2. Descripción del proceso de sulfitación**

Una de las primeras etapas para la obtención del modelo es conocer y describir el proceso. Se hace pasar azufre en el horno, a través del tornillo dosificador, y la relación dependerá de la sulfitación que se desea. Por lo general, se recomienda una dosificación aproximada de 150 hasta 400 partes por millón de sulfito ( $\text{g SO}_2/\text{m}^3$  meladura), según análisis en el laboratorio para el jugo sulfitado. La calidad del pH en la meladura causada por la sulfitación depende de varios factores, y en general causa cambios entre 0,2 y 0,6. El jugo en la torre de sulfitación se pone en contacto en contracorriente con las corrientes de dióxido de azufre, los gases provenientes del horno contienen entre un 10 y 16 por ciento de dióxido de azufre, y entran con una temperatura entre 120 y 200 grados centígrados.

### **4.2.1. Operación del horno**

La operación del horno de quema de azufre debe de ser tal que la temperatura en el horno quede en el rango de 250 a 375 grados centígrados ya que abajo del valor mínimo no se tiene la auto-ignición del azufre y el azufre puede no estar completamente fundido, y arriba del valor máximo ya se empieza a tener la sublimación o evaporación del azufre, además de una mayor formación de los gases indeseados de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), los cuales, además de no servir al proceso, producen ácido sulfúrico, que es

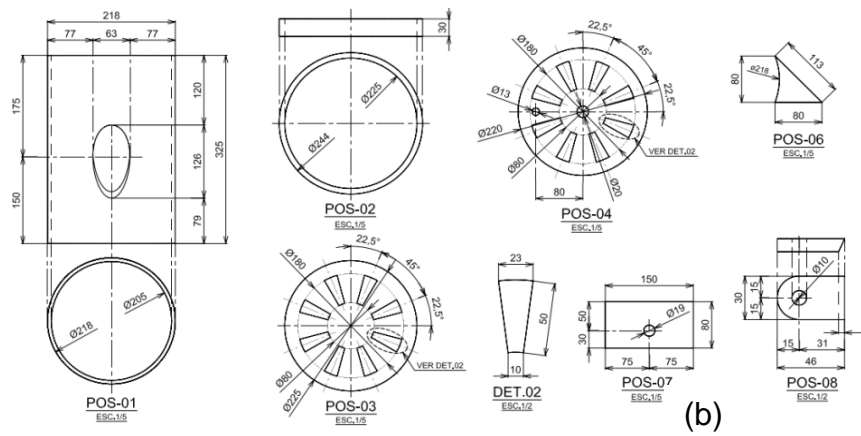
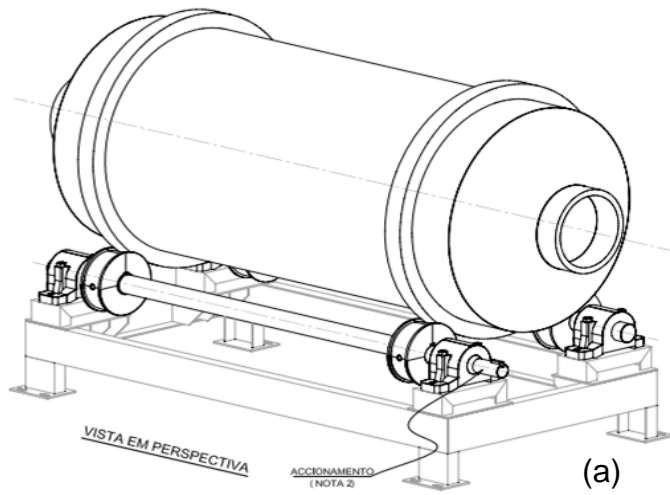
excesivamente corrosivo. El ajuste de la temperatura en el horno se hace por medio de la entrada de aire al horno, cuanto más aire, más baja la temperatura.

Arranque y operación del horno:

- Manualmente o por el tornillo dosificador de azufre, se debe alimentar unas 2 ó 3 libras de azufre al horno, y apagar el tornillo. Luego se debe hacer llegar fuego al azufre para que tenga inicio su combustión.
- Cuando ya se tenga una combustión sustentable de azufre, encender nuevamente el motor del horno, dejando girar lentamente, hasta que toda su superficie quede caliente. Durante el proceso, alimentar azufre al horno solamente en lo que sea suficiente para mantener el fuego encendido. Cuando el horno ya se encuentre totalmente caliente, encender el motor del tornillo dosificador de azufre y ajustar la dosificación del azufre al horno para garantizar la sulfitación deseada.
- Una manera de verificar el exceso de azufre es por el color de los gases en el interior del horno. Gases de color azul son una indicación de una buena quema del azufre, mientras gases de color amarillo son una indicación de exceso de azufre.

Es importante saber que la operación será mejor cuanto más estable sea el caudal de meladura para la alimentación del sistema. Los cambios en caudal de jugo de caña deben ser evitados, si se da una menor eficiencia del proceso, también se llevará un mayor consumo de azufre y existirán paradas para limpieza del equipo.

Figura 19. (a) Diseño de horno quemador de azufre (b) Diseño de entrada de aire de alimentación al horno



Fuente: proyecto ILU-SULC-Horno Azufre, Ingenio La Unión, S.A.

#### **4.2.2. Control de la alimentación del azufre al horno**

La dosificación es directamente proporcional al caudal de jugo de caña alimentado a la sulfitación. Para obtener una alimentación adecuada es necesario disponer del equipo siguiente:

- Horno de azufre.
- Medidor de flujo (transmisor de caudal) de jugo para la sulfitación.
- Variador de frecuencia del motor del tornillo de dosificación de azufre.
- Controlador/Indicador para la dosificación de azufre.
- Tornillo de dosificación de azufre al horno.

VARIABLES DENTRO DEL SISTEMA:

- Caudal de jugo.
- Frecuencia de la corriente eléctrica alimentada al tornillo.
- Factor de proporcionalidad entre la tasa de dosificación de azufre y el caudal de jugo.

Se debe establecer cuál será el factor de proporcionalidad en el controlador, el medidor de flujo, envía la señal necesaria para una buena operación. Una vez obtenida la señal de caudal de jugo y el factor de proporcionalidad, el controlador debe calcular y controlar automáticamente la frecuencia del variador, y así se ajusta la velocidad del motor del tornillo, estableciendo la dosificación del azufre al horno.

Es decir, cuanto más alto el caudal de jugo, mayor la frecuencia del variador, mayor la rotación del tornillo, y mayor la cantidad de azufre alimentada al horno. Para lograr buena precisión es necesario definir la relación entre la

cantidad de alimentación de azufre (kilogramos/horas) por frecuencia en el variador.

Además, del control de alimentación de azufre al horno, la implementación de un segundo control es útil para mantener el proceso regulado. El aire que ingresa al horno (cámara de combustión), es regulado por la velocidad a la que trabaja el ventilador extractor de gases. El ventilador succiona los gases producto de la combustión dentro de horno y luego ingresan a la torre de sulfitación. La manipulación de su velocidad de operación, incidirá en la cantidad de flujo de aire que ingresa al horno. Es decir, que existe una relación entre el flujo de aire de entrada y el flujo de extracción de gases a la salida. (A mayor velocidad de extracción de gases, mayor el flujo de aire que ingresará al horno).

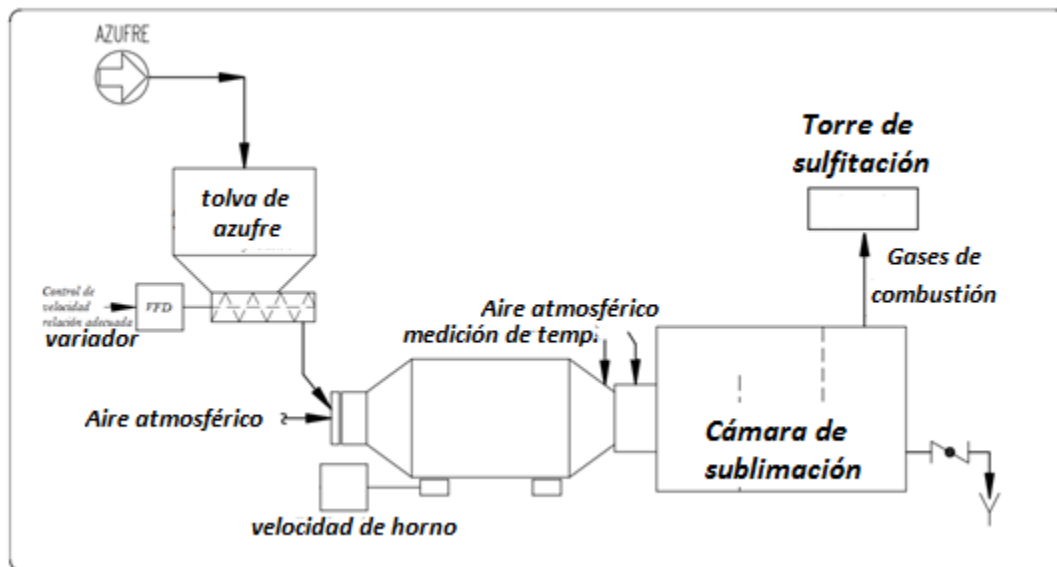
#### **4.3. Modelado de dosificación de azufre**

Una vez, que se ha observado el proceso, se ha analizado y descrito el funcionamiento del mismo, así como también se han identificado las variables de entrada, salida y las posibles perturbaciones del sistema. Se puede proceder al modelado del sistema.

Con el modelo del horno rotatorio, se describirá el comportamiento y se brindará información sobre el cambio de la temperatura, concentración y fracción molar de los gases de combustión con el tiempo, ante cambios en el flujo másico de azufre alimentado. Se consideró el horno como un reactor de mezcla completa (*continuous flow stirred tank reactor*), lo cual implica que las concentraciones y temperatura de la corriente de salida son iguales a las del interior del horno y homogéneas en toda la cámara.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 20, ejemplifica como se lleva a cabo la dosificación de azufre al horno. El azufre es depositado en la tolva de alimentación, el variador del tornillo dosificador hace pasar el azufre hacia el horno (según el control y la relación de jugo a sulfitar). Dentro del horno, existen dos entradas de aire atmosférico, medición de temperatura del horno y además un motor que mueve el horno para establecer una mezcla y combustión uniforme del azufre, los gases productos de la combustión salen de la cámara de sublimación y son llevados a un intercambiador de calor para disminuir su temperatura y luego a través de un extractor de gases son llevados a la torre de sulfitación.

Figura 20. Diagrama de flujo de información, dosificación de azufre



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio.

#### 4.3.1. Aire atmosférico y su composición

Para obtener una reacción química eficiente (combustión) del azufre con el oxígeno presente en el aire se debe conocer la composición del aire. El aire atmosférico según la literatura se compone de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de otros elementos. Se representara la composición únicamente con oxígeno y nitrógeno, la tabla III, muestra la referencia que se tomará en la composición del aire.

Tabla III. **Composición del aire**

<b>Aire Atmosférico</b>	
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	79%
Oxigeno (O <sub>2</sub> )	21%

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2. Variables y parámetros de entrada

La relación de azufre alimentada al horno, se puede calcular con los parámetros del variador de velocidad, del motor y tornillo dosificador. El volumen de la cámara de combustión se puede calcular por geometría. La figura 21, muestra las variables necesarias para hallar el volumen del horno rotatorio, además se muestran las ecuaciones generales para calcular el volumen. El horno se ha dividido en sectores, correspondiente a un cilindro y a dos troncos de cono como se observa en la figura.

$$V_{\text{total}} = V_{\text{cilindro}} + 2V_{\text{tronco}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

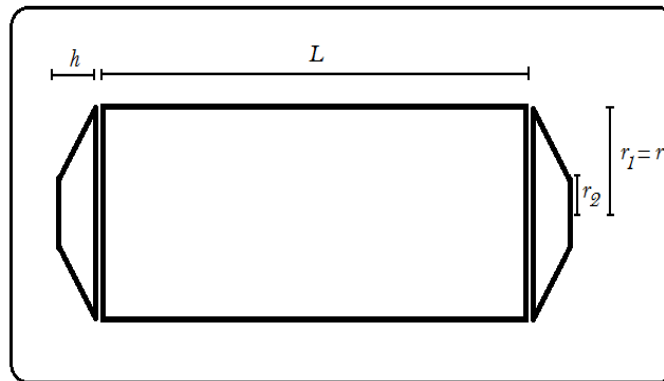
$$V_{\text{total}} = \pi r^2 L + \frac{2h\pi}{3} [r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2] \quad \text{Ec. 4.2}$$



Donde:

$$V_{\text{tronco}} = \text{Volumen del tronco de cono}$$

Figura 21. **Variables necesarias para hallar el volumen del horno**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio.

La ecuación 4.2, será utilizada para determinar el volumen del horno rotatorio, sin embargo el volumen puede ser ajustado, para propósitos de análisis y cálculo, puede tomar distintos valores o según sea el caso del horno que se está utilizando. La tabla IV, es una fuente de información para el modelo, muestra las variables de entrada y salida necesarias para el desarrollo del modelo.

### 4.3.3. Balances de masa

Debido a que el tema de interés se centraliza en obtener una adecuada combustión para producir dióxido de azufre. Es necesario realizar el análisis utilizando reacciones químicas y balances de masa, ya que dentro del horno ocurre un intercambio de masa, que provoca salida de gases a diferentes concentraciones.

Tabla IV. **Variables y parámetros del sistema**

<b>Proceso:</b>	<b>Dosificación de azufre</b>
Variable de entrada	Variable manipulable [Lb/h]
Tornillo dosificador	Parámetros de variador
Frecuencia	Frecuencia [0-60hz]
Rpm del motor	Rpm motor de tornillo
<b>Equipo:</b>	<b>Horno rotatorio</b>
Volumen	Cámara de combustión
Área superficial	[en función del horno ]
<b>Equipo:</b>	<b>Extractor de gases</b>
Variable de entrada	Flujo de aire
Extractor de gases	Parámetros de variador
Frecuencia	Frecuencia [0-60hz]
Rpm del motor	Rpm de ventilador
<b>Masa molecular de componentes</b>	
Azufre (S)	32,06 gramos
Oxígeno (O)	15,99 gramos
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	64,058 gramos
Nitrógeno (N)	14,00 gramos

Fuente: elaboración propia.

Considerando que el principio de conservación establece que una propiedad (Pr) de un proceso, no se destruye solo se transforma. Entonces, la propiedad Pr considerada, debe resultar balanceable, para lo cual se requiere que Pr:

- Se transporte o transfiera, dentro o fuera del sistema de proceso.
- Sea susceptible de generación o consumo al interior del sistema de proceso.

La expresión genérica de dicho principio de conservación al interior del sistema de proceso, matemáticamente se ve como:

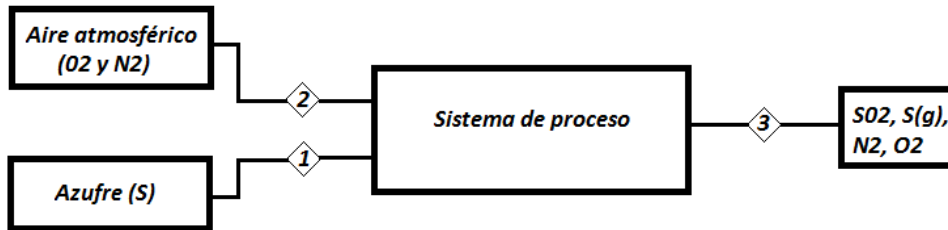
$$\frac{dP_r}{dt} = \sum_{i=1}^{\text{Num\_Entradas}} F_i * \pi_i - \sum_{j=1}^{\text{NumSalidas}} F_j * \pi_j + \sum_{k=1}^{\text{NumFuentes}} \phi_k - \sum_{l=1}^{\text{Numsumideros}} \Delta_l \quad \text{Ec. 4.3}$$

Con  $P_r$  la propiedad de interés en el sistema,  $F_i$  i-ésimo flujo de entrada,  $\pi_i$  la razón o proporción (concentración) en la que existe la propiedad  $P_r$  en el i-ésimo flujo,  $F_j$  j-ésimo flujo de salida,  $\pi_j$  razón en la que existe la propiedad  $P_r$  en el flujo j-ésimo,  $\phi_k$  k-ésima velocidad de aparición de la propiedad  $P_r$  debido a fuentes existentes en el interior del sistema,  $\Delta_l$  l-ésima velocidad de consumo de la propiedad  $P_r$  debido a sumideros existentes en el interior del sistema.

#### 4.3.4. Sistema de proceso

El sistema de dosificación de azufre al horno se representa como un sistema de proceso, donde ocurre la reacción entre azufre y oxígeno para producir dióxido de azufre. Las ecuaciones de variación permiten obtener los cambios en la cantidad de movimiento, la energía y la masa en un sistema, así como encontrar las distribuciones espaciales y temporales de velocidad, temperatura y concentración.

Figura 22. Sistema de proceso de dosificación de azufre al horno



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio.

Balance molar por componentes:

$$\frac{dC_S}{dt} = \frac{1}{V} (n_{S,1} - F_3 C_S) + r_S \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = \frac{1}{V} (n_{O_2,2} - F_3 C_{O_2}) + r_{O_2} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\frac{dC_{N_2}}{dt} = \frac{1}{V} (n_{N_2,2} - F_3 C_{N_2}) + r_{N_2} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$\frac{dC_{SO_2}}{dt} = \frac{1}{V} (-F_3 C_{SO_2}) + r_{SO_2} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Las ecuaciones descritas anteriormente servirán para establecer la relación existente entre los elementos que ingresan y salen del sistema mostrado en la figura 22, donde  $C_i$  es la concentración del componente  $i$ , a la salida del horno,  $V$  es el volumen del horno (cámara de combustión),  $n_{i,j}$  es el flujo molar del componente  $i$  en la corriente  $j$ ,  $F_3$  es el flujo volumétrico de la corriente 3 y  $r_i$  es la velocidad de producción del componente  $i$ .<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MOSCOSO, Marcela; ARIAS, Jessica; SALAZAR, Julián. *Modelo dinámico de la etapa de clarificación de jugo de caña en un ingenio azucarero*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía. Medellín, Colombia 2012.

Según la ecuación de Arrhenius se puede plantear la velocidad de reacción con respecto a la concentración de azufre y de oxígeno, además de considerar inerte al componente nitrógeno en este proceso.

$$r_{\text{SO}_2} = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} C_S C_{\text{O}_2} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$r_{\text{O}_2} = r_s = -r_{\text{SO}_2} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$E_a = 59,5 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad \text{Ec. 4.10}$$

$$k_0 = 7,29 \times 10^5 \frac{\text{m}^3}{\text{mol s}} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Considerando que la presión del sistema es constante, entonces el flujo volumétrico de salida depende solo del flujo de aire alimentado ( $F_2$ ) y las temperaturas de alimento y dentro del horno.

$$F_3 = F_2 \left( \frac{T_3}{T_2} \right) \quad \text{Ec. 4.12}$$

La ecuación 4.13, planteada representa un balance de energía para expresar el cambio de la temperatura con respecto al tiempo, considerando la entalpia de fusión y evaporación del azufre.

$$\frac{dT}{dt} = \left( \frac{1}{\sum N_i C_{pi}} \right) \left[ V \cdot r_{\text{SO}_2} (\Delta H_{rxn}) - n_i \left( \sum \theta_i C_{pi} (T - T_2) - \Delta H_{fus} - \Delta H_{vap} \right) \right] \quad \text{Ec.4.13}$$

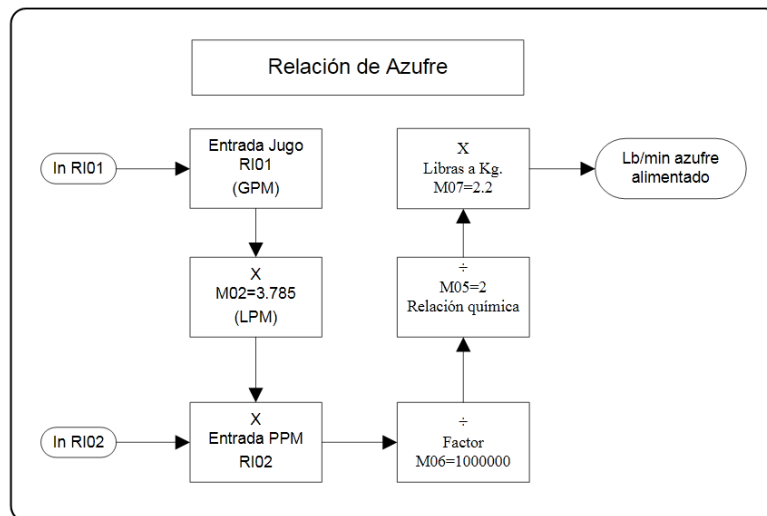
Donde  $C_{pi}$  corresponde a la capacidad calorífica del componente  $i$ ,  $T$  y  $T_2$  temperatura dentro del horno y la temperatura de alimento del aire respectivamente,  $N_i$  son las moles del componente  $i$  dentro de la cámara, equivalentes al producto del volumen y la concentración. <sup>1</sup>

#### 4.3.5. Relación de alimentación de azufre y velocidad de dosificador

La relación debe ser dependiente del flujo de jugo de caña a sulfitar, de la cantidad de alimentación de azufre por medio del gusano dosificador y la proporcionalidad con respecto a la velocidad de variador del motor, así como también de las partes por millón requeridas para lograr una buena sulfitación. Es decir si el flujo sube, la velocidad del gusano dosificador deberá aumentar y viceversa, para mantener la dosificación adecuada.

Aplicando un control adecuado utilizando todas las variables se puede establecer una aproximación real del modelo. El diagrama de flujo de la figura 23, muestra la relación básica de azufre.

Figura 23. Diagrama de flujo de relación de azufre

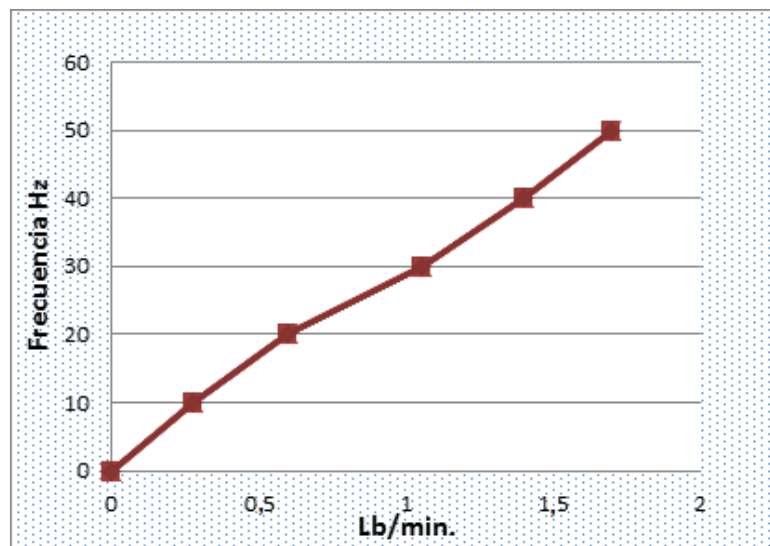


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio.

Donde RI01, es la variable de entrada y que es la que se utiliza para realizar el cálculo adecuado de relación, esta variable contiene la medición de flujo de jugo de jugo (galones por minuto), que a su vez es convertida a libras por hora y es ajustada según la relación de partes por millón (variable de entrada RI02) a la que se requiera sulfitar el jugo.

La velocidad del tornillo dosificador depende de sus dimensiones, revoluciones por minuto del motor, factor de proporcionalidad del variador para lograr una adecuada alimentación, esto es posible calcularlo en base a experimentación. En la figura 24, se observa la curva que relaciona la velocidad del variador con la alimentación de azufre.

Figura 24. **Curva de relación**

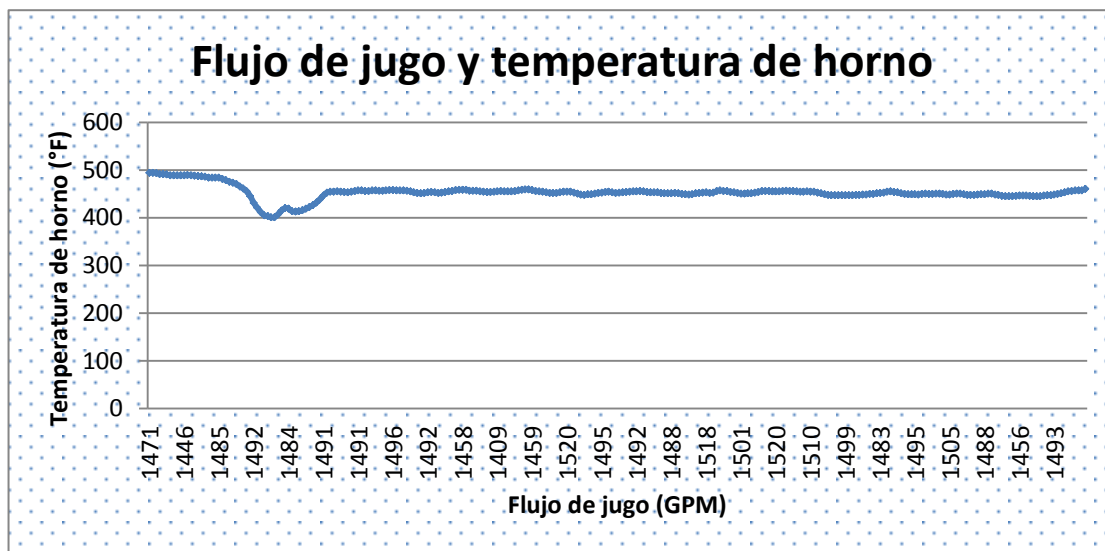


Fuente: datos Ingenio La Unión, S.A. (Microsoft Excel).

Mantener condiciones de operación constantes dentro de la fábrica puede ser difícil, por la complejidad del proceso que implica la producción de caña de

azúcar. La figura 25 representa el comportamiento del flujo de jugo y la temperatura obtenida en el proceso de sulfitación. Mientras se mantiene un flujo de jugo casi constante es posible también mantener una adecuada dosificación que se ve reflejada en la medición de temperatura también casi constante.

Figura 25. **Condiciones de operación en Ingenio La Unión, S.A.**



Fuente: sistema IA, Ingenio La Unión, S.A.

Con la utilización de los parámetros de relación de azufre y curvas de relación es posible obtener un control que permite estimar la cantidad de azufre que ingresa al horno rotatorio y que será utilizada para la producción de dióxido de azufre al reaccionar con el oxígeno.

#### 4.4. Representación del modelo

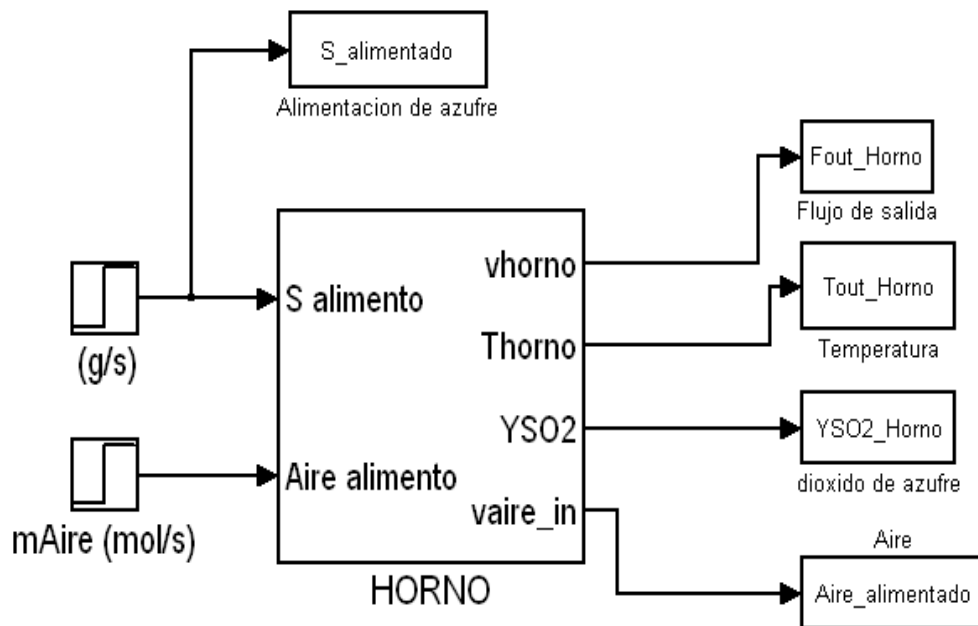
Para la representación del modelo, se utilizó la herramienta simulink de Matlab, en la figura 26, se muestra el diagrama de flujo empleado, el sistema de



interés, es el horno rotatorio y es allí donde se analizan y toman en cuenta las variables de entrada y salidas para el modelo.

En el modelo intervienen 2 variables de entrada, una que corresponde a la cantidad de azufre que ingresa al horno y la otra variable la cantidad de oxígeno (aire atmosférico), para la alimentación de azufre la cantidad se mide en masa sobre tiempo y está definida por la relación de la velocidad del gusano dosificador y el diseño del mismo, llevadas a cabo por un control regulatorio. La cantidad de aire atmosférico se encuentra medido en flujo másico y depende de la velocidad del ventilador extractor de gases y aperturas de ranuras limitadoras de aire presentes en el horno.

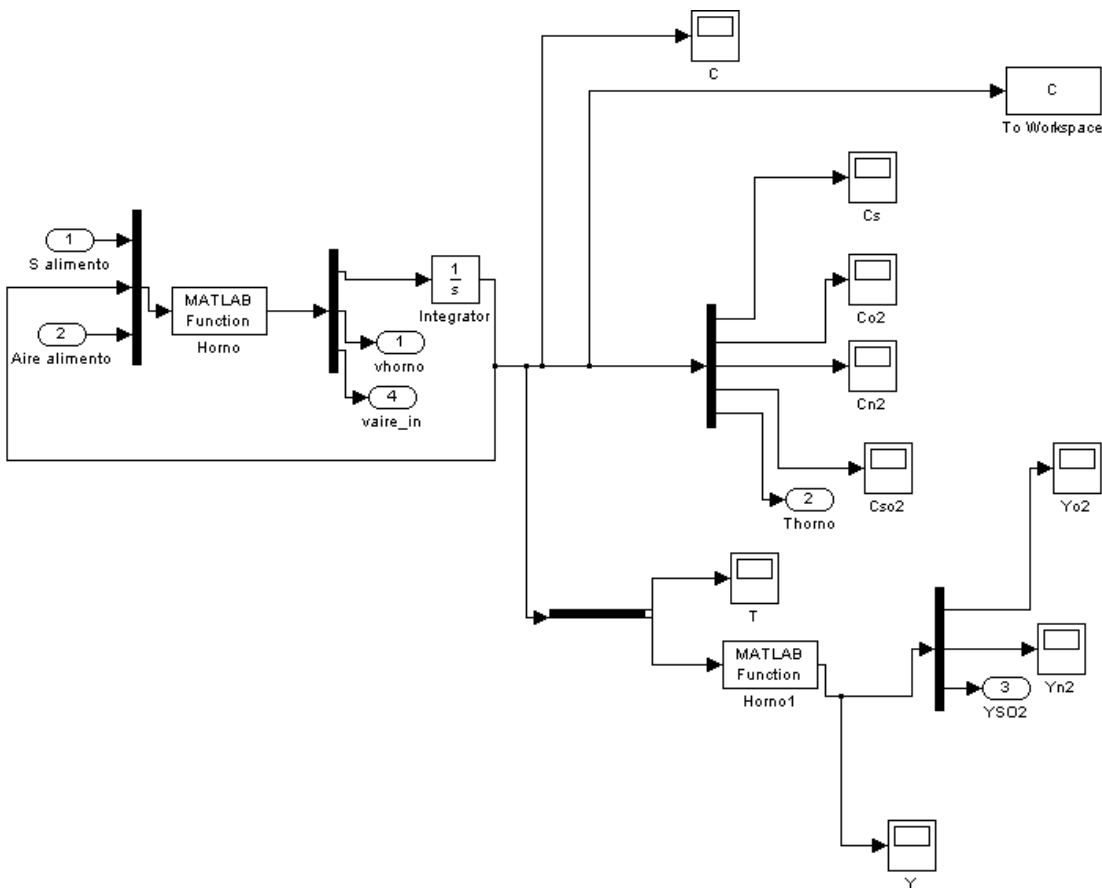
Figura 26. **Diagrama de flujo de información de dosificación de azufre**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

El aire atmosférico anteriormente mencionado como una proporción de oxígeno y nitrógeno, es una de las variables de entrada. Además al modelo es posible incluirle perturbaciones que pueden ser modificadas para simular ruido dentro del sistema, que incluyan variaciones en la dosificación de azufre ya sea por cambio de velocidad del dosificador o falta de insumos. Así como condiciones ambientales diferentes para el aire como temperatura, humedad, entre otros, que afecte la composición del aire.

Figura 27. Diagrama de flujo de información del horno



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

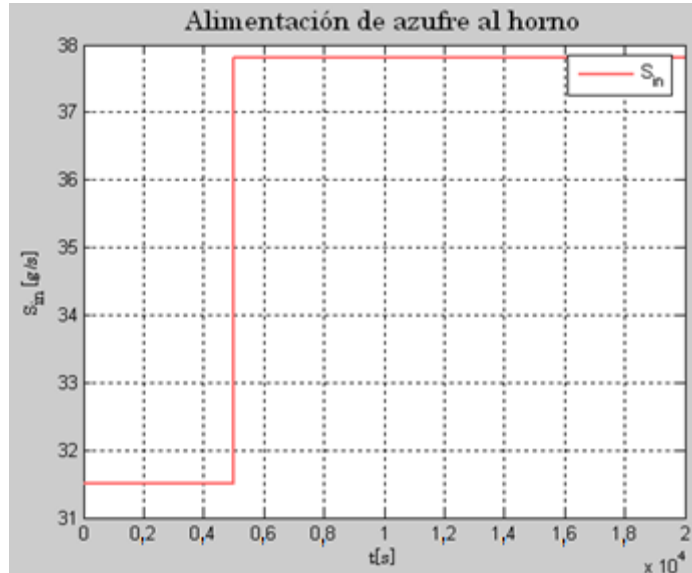
El diagrama de flujo mostrado en la figura 27, representa la segunda parte del modelo del horno, donde se modela la dosificación de azufre. Utilizando las herramientas de Simulink es posible plantear las ecuaciones de concentraciones de masa y poder analizar y graficar el comportamiento de las variables de salida de interés como: la temperatura dentro del horno, comportamiento del flujo de salida de los gases y la concentración de dióxido de azufre.

#### **4.5. Respuesta del sistema ante condiciones preestablecidas**

Considerando la respuesta del modelo ante condiciones preestablecidas de las variables de entrada se pueden obtener gráficas que brindan información del comportamiento del sistema y de las variables de salidas de interés, anteriormente mencionadas.

En la figura 28, se ilustra el comportamiento de la alimentación de azufre, correspondiente a una de las variables de entrada, la condición de operación que se presenta, consiste en una etapa de alimentación de azufre constante por 5 segundos y después de ese tiempo se presenta una perturbación que origina un aumento del 20 por ciento de la masa de azufre alimentada al horno. Esto origina que se tenga una alimentación de azufre regulada por el intervalo de tiempo mencionado y luego ocurra un incremento ocasionando aumento en la alimentación al horno. Para condiciones operativas normales se obtiene un flujo de jugo de caña estable, esto resultará en una dosificación casi constante como se aprecia en la figura.

Figura 28. **Comportamiento del azufre alimentado al horno**

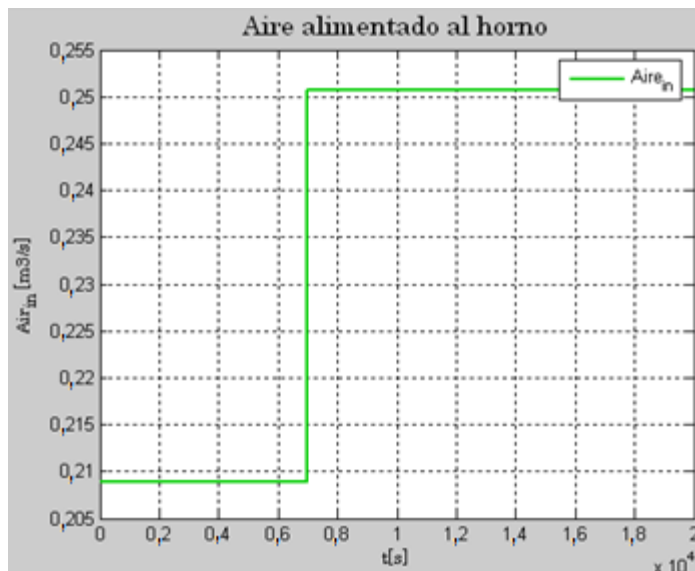


Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Siguiendo con las respuestas de las variables de entrada, se puede apreciar la figura 29, que representa la alimentación de aire atmosférico al horno con un mismo flujo durante un lapso de tiempo, luego de pasar este tiempo se genera una perturbación que influye en un aumento de flujo en un 20 por ciento. El flujo de aire que ingresa al horno, depende de la velocidad con que se extraen los gases del horno rotatorio, por lo tanto, una velocidad constante para el extractor de gases origina un flujo de extracción constante.

Considerando la alimentación de azufre y de aire atmosférico que se describió anteriormente, y que ingresa al modelo del horno rotatorio es posible obtener una respuesta del sistema, empleando parámetros, constantes y las ecuaciones de balances de masa y energía. Para obtener información sobre la temperatura de salida, flujo de salida de gases y la cantidad de dióxido de azufre generado.

Figura 29. Aire atmosférico que ingresa al horno



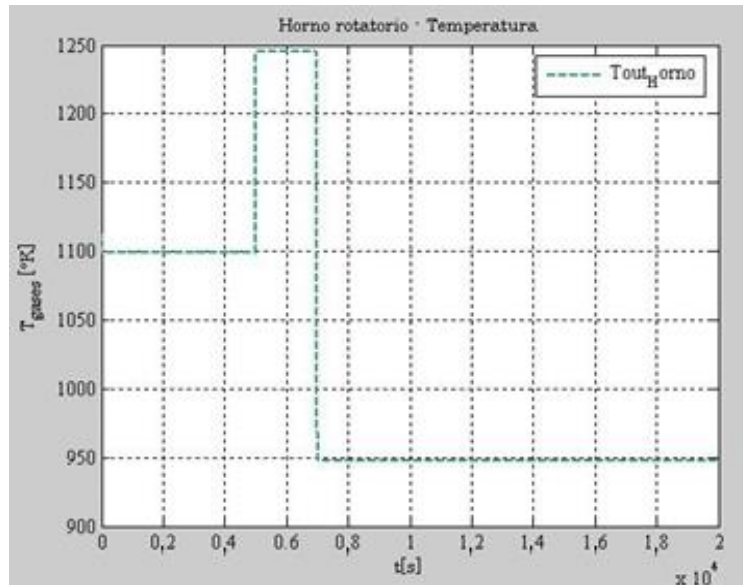
Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

#### 4.5.1. Temperatura en la salida de gases del horno

La temperatura de los gases dentro del horno, producto de la reacción entre los componentes, depende además de varios factores como la velocidad de reacción de cada uno de ellos, así como también del volumen del horno y las entalpías de fusión y evaporización del azufre y de los porcentajes de flujos molares de cada componente y sus capacidades caloríficas, todo esto se agrupa como una ecuación de balance de energía y que representa un cambio de temperatura sobre el tiempo.

La figura 30, muestra el comportamiento de la temperatura del horno, ante cambios en la dosificación de flujo de azufre por un tiempo (aumento) y posteriormente luego de un tiempo un aumento en el flujo aire atmosférico alimentado.

Figura 30. **Temperatura de salida en la reacción**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

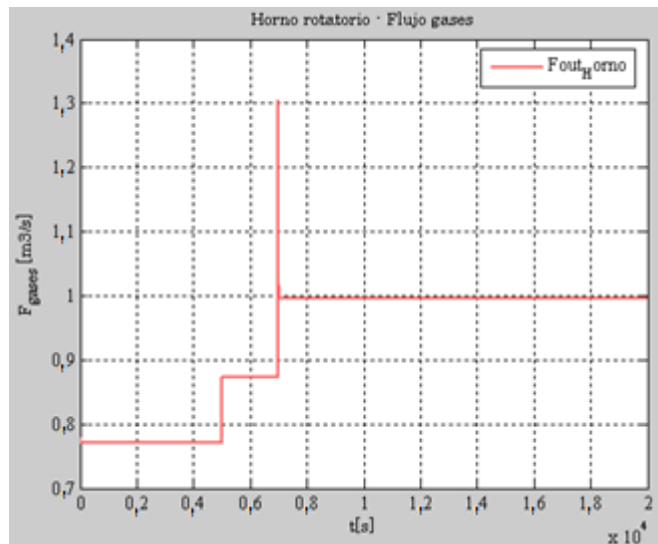
#### 4.5.2. Flujo de salida de gases

En el sistema de dosificación de azufre, una de las variables de interés es el flujo volumétrico de salida de los gases, porque muestra como es el comportamiento del flujo ante cambios en las variables de entrada.

El flujo volumétrico que sale de la cámara de combustión se ilustra en la figura 31, el cambio de flujo en la salida, se encuentra en función de la cantidad del flujo volumétrico de aire que es alimentado al horno y en también en función de las temperaturas del sistema, tanto las temperaturas exterior como interior del horno, la temperatura dentro del horno, depende de los componentes y la cantidad que reaccionan. Al cambiar algunas de las condiciones de entrada, se verá reflejada en la salida de flujo de gases.

El análisis de la gráfica, muestra que ante un ingreso de flujo molar de azufre (constante) y un ingreso de flujo molar de aire atmosférico (constante) al horno, se produce una salida de flujo de gases (flujo volumétrico de salida) constante. Si ocurre una alteración en la cantidad de azufre (aumento en la dosificación) alimentada al horno y con la misma cantidad de flujo de aire, se observa que existe un aumento en la salida de los flujos de gases.

Figura 31. **Flujo de salida de gases**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Sin embargo, si luego de ello ocurre una alteración (aumento de flujo de aire) en la alimentación del flujo de aire atmosférico, ocasiona que el flujo de salida de gases también aumente, como se aprecia en la figura.

### **4.5.3. Concentración de dióxido de azufre en la salida del horno**

Las ecuaciones de balances de masa descritas anteriormente (ecuaciones 4.4 - 4.7), son de utilidad para poder expresar las concentraciones molares de salida en el horno (concentración de oxígeno, nitrógeno y dióxido de azufre), en función del tiempo. La concentración de dióxido de azufre es de interés ya que la cantidad de gas y su proporción son utilizadas para realizar la sulfitación al jugo de caña y dependiendo del control del porcentaje producido para sulfitar es como se puede lograr condiciones adecuadas.

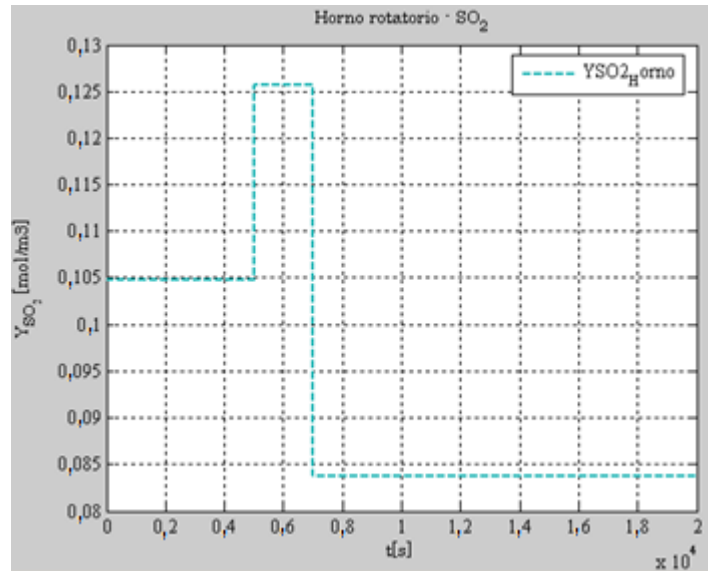
La figura 32, muestra una concentración constante ante una alimentación de azufre y aire atmosférico constante, luego de un tiempo se incrementa la alimentación de azufre, con la misma cantidad de aire y se observa un aumento en la concentración de dióxido de azufre, y aumentando la cantidad de flujo de aire pero manteniendo las condiciones de azufre constante se observa una reducción en la cantidad de concentración de dióxido de azufre.

### **4.6. Control regulatorio en dosificación de azufre**

Considerando que en el sistema existen variaciones del flujo de jugo a sulfitar, ocasionadas por condiciones de operación inestables, la implementación de un control regulatorio debe ser capaz de minimizar el problema, o reducir las oscilaciones en el proceso de dosificación de azufre, y que no afecten en gran proporción al proceso de sulfitación adecuado.



Figura 32. **Fracción de dióxido de azufre a la salida del horno**

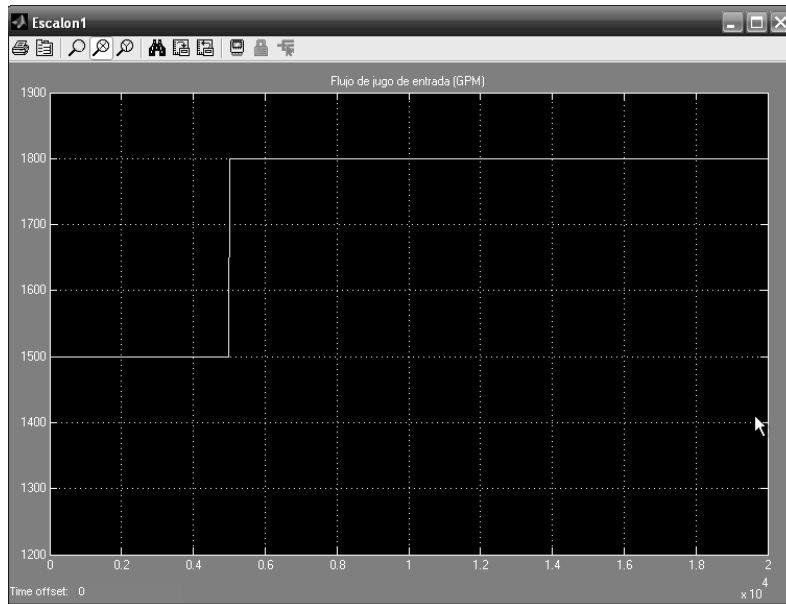


Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

La figura 33, muestra una función escalón del flujo de jugo de caña de azúcar de entrada y que será sulfitado, utilizando esta función se analiza y describe el comportamiento del sistema.

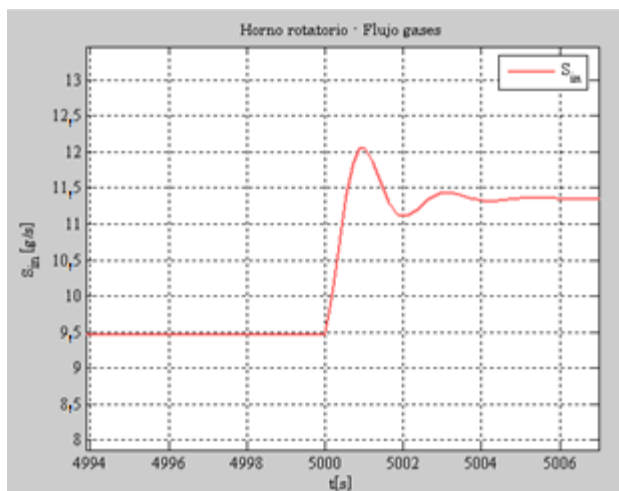
Asimismo, en la figura 34, se muestra la relación de alimentación de flujo másico de azufre al horno, en función del flujo de jugo de entrada a sulfitar, sin un control regulatorio previo. También representa la respuesta en dosificación de azufre ante un escalón en la entrada de flujo de jugo. Sin la presencia de un control, la dosificación se torna inestable o con oscilaciones pronunciadas, que influye en la producción adecuada de dióxido de azufre utilizada para sulfitar el jugo.

Figura 33. Escalón unitario, flujo de jugo de entrada



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

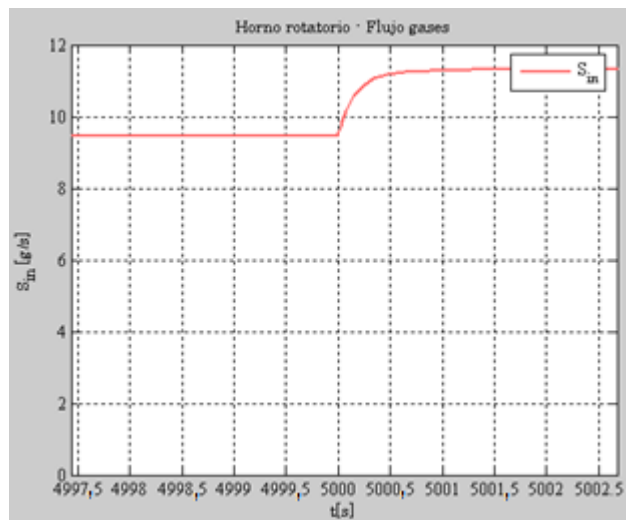
Figura 34. Alimentación de azufre al horno



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Implementando un control proporcional e integral (PI), se logra reducir las oscilaciones pronunciadas y optimizar la dosificación de azufre. En la figura 35, se implementa el uso de un control proporcional e integral, con el propósito de reducir las oscilaciones en dosificación de azufre y optimizar el proceso.

Figura 35. **Control PI, alimentación de azufre al horno**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

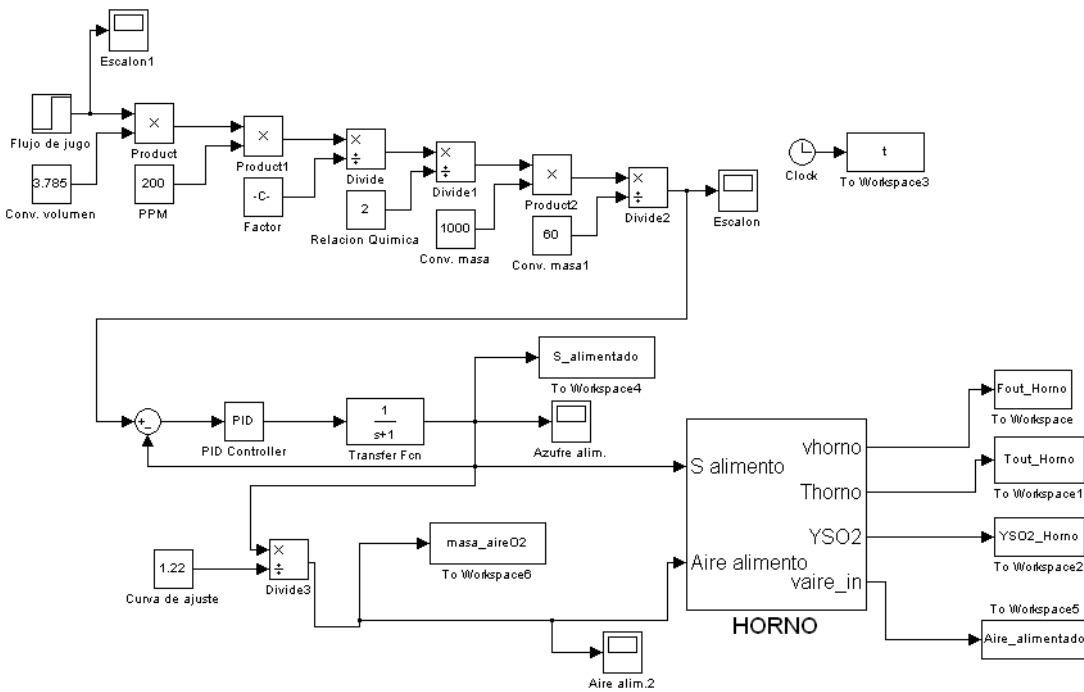
El diagrama de flujo de información utilizado para representar el modelo dinámico con la implementación de un control PI, se observa en la figura 36. Al modelo también se le ha incorporado el cálculo de relación de la cantidad de azufre en función del flujo de jugo y su control.

El control PI ajustará la dosificación de azufre al horno logrando una curva suave, sin embargo agregar una relación o dependencia al flujo de aire que entra al horno en función de la cantidad de azufre alimentada mejorará la producción de dióxido de azufre, por esta razón la implementación de una curva

que relacione azufre-aire de alimentación al horno, beneficia a la estabilidad del proceso.

En la figura 37, se muestra la respuesta en salida tanto para temperaturas, como para concentración de dióxido de azufre y flujo de salida de gases, utilizando el control PI y estableciendo una relación en la alimentación de aire en función del azufre alimentado, se logra obtener una respuesta estable. Al realizar las simulaciones con distintos escalones en el flujo de entrada, también se puede verificar que el control PI, trata de optimizar los tiempos de respuestas y cambios para obtener la cantidad de dióxido de azufre necesaria para sulfatar el jugo.

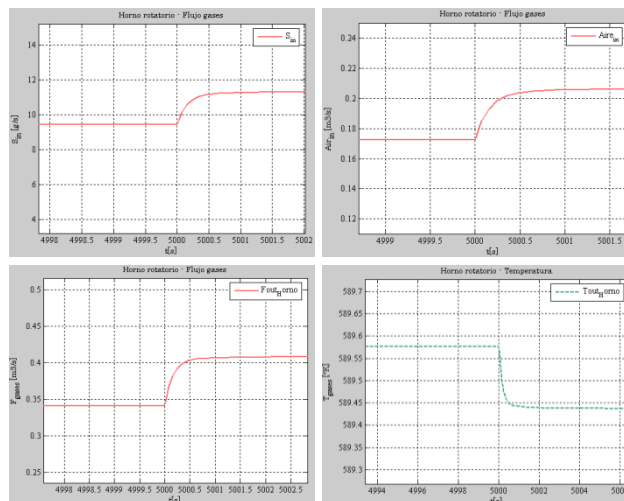
Figura 36. Diagrama de flujo del horno y control PI



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Considerando la respuesta del modelo ante un tren de pulsos del flujo de jugo de entrada a sulfitar, se observa que el sistema busca estabilizar la dosificación de azufre, para mantener una producción de dióxido de azufre, los tiempos de estabilización aumentan dado que el flujo se cambia continuamente, la temperatura del horno oscila dentro de un rango permitido y se produce el dióxido de azufre necesario para sulfitar el jugo de entrada, en función de las variaciones de entrada como se muestra en la figura 38, sin embargo estas fluctuaciones se ven reflejadas en la salida de flujo de gases.

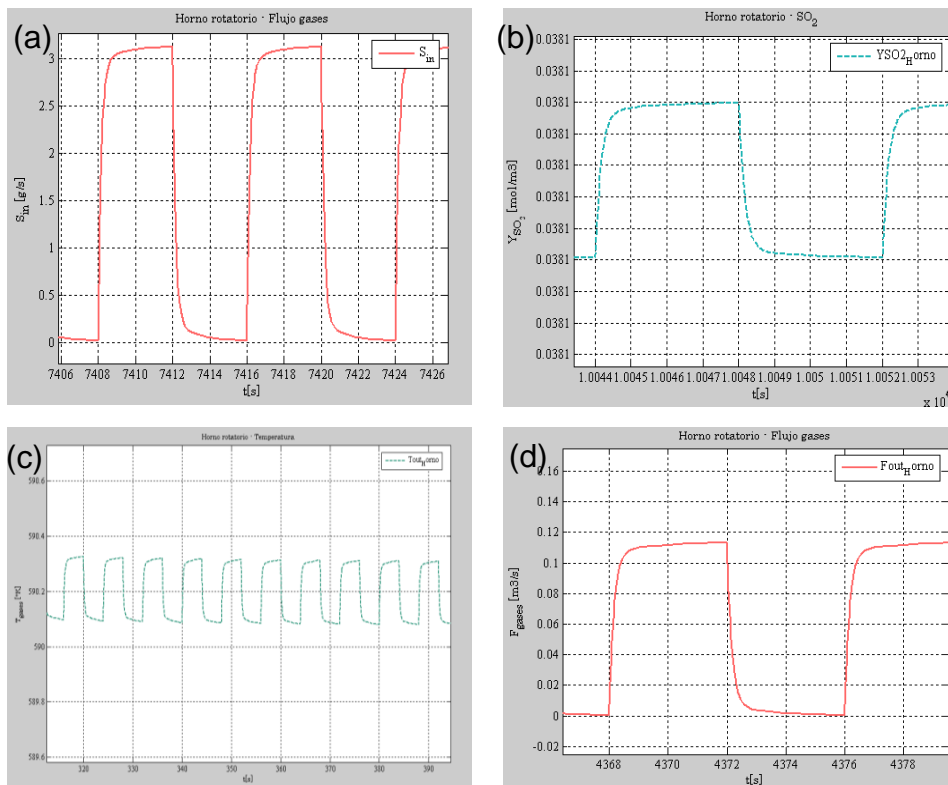
Figura 37. **Respuesta del control PI aplicado al modelo**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Una vez obtenido el modelo que incorpore el control regulatorio con acción proporcional e integral (PI), se estará en disponibilidad de integrarlo a una estrategia de control supervisada que permita ajustar el *set-point* del PID en función de las condiciones operativas del proceso.

Figura 38. **Respuesta del sistema ante cambios de flujo de entrada (a) Azufre de entrada, (b) Concentración de dióxido de azufre, (c) Temperatura de horno, (d) Flujo de gases de salida**



Fuente: elaboración propia, con programa Simulink-Matlab.

Con la implementación de la simulación se observa la respuesta tanto externa como interna de un modelo del sistema ante diferentes condiciones de operación. Además se puede generar una solución que permita ajustarlo al modelo real, y puede ser muy útil por las siguientes razones:

- Cuando se tiene poca disponibilidad del proceso para experimentación.
- Por sus altos costos, para realizar pruebas en el proceso real.
- Tiempos de ensayo en el proceso demasiado largo.

- Identificar y extraer conocimiento sobre el comportamiento de un proceso real.
- Diseñar sistemas de monitoreo y automatización, control y diagnóstico de fallas usando modelos para predecir comportamientos.

Realizar la validación confirmaría que el modelo es una representación apropiada del sistema original y es capaz de imitar su comportamiento de una forma razonable precisa en el dominio previsto para sus aplicaciones.





## CONCLUSIONES

1. Es posible simular la operación y ejercer una regulación del horno de azufre utilizando un modelo matemático y un controlador PI; bajo distintas condiciones de proceso.
2. Al realizar una simulación y usar las ecuaciones de balances de masa del modelo matemático, se puede realizar un análisis detallado del sistema, ante condiciones de entrada distintas y perturbaciones ingresadas al sistema, para determinar cuál es el efecto en la salida del sistema y qué condiciones son las favorables para trabajar en la dosificación de una manera óptima.
3. Debido a que la sulfitación de jugo de caña de azúcar es un proceso indispensable en el ingenio y que durante la operación es difícil realizar cambios al sistema, la opción de realizar una simulación del proceso es una medida conveniente para recopilar información del comportamiento del sistema.
4. Debe existir una relación adecuada de azufre que ingresa al horno, esta relación debe estar en función del flujo de jugo que se produce y que se sulfitará. Si estas condiciones se mantienen entonces el control regulatorio aplicado puede ser capaz de aumentar el ingreso de flujo de aire atmosférico o de azufre, a la entrada del horno o viceversa, siempre con el propósito de obtener la cantidad de dióxido de azufre óptima para lograr la sulfitación.

5. Para definir y desarrollar un modelo matemático de un proceso en general, se debe conocer el funcionamiento y comportamiento del proceso, qué variables son las que están involucradas, cuál es el entorno del sistema y qué perturbaciones pueden afectar al sistema.
6. El control de procesos es considerado de suma importancia dentro de Ingenio La Unión, S.A., porque es así como se logra mantener y monitorear las condiciones adecuadas de operación en la mayoría de procesos que implica el tratamiento de jugo para producir el azúcar, todo ello requiere la utilización de métodos de control de proceso, desde controles simples realimentados hasta controles PID's y utilización de PLC's.
7. Para modelos de procesos semifísicos en lo que hay intercambio de masas o calor, es adecuado trabajar con balances de masa y energía para establecer ecuaciones que permitan obtener una solución al proceso que se está evaluando.
8. Los niveles de concentración de dióxido de azufre aumentan al aumentar el flujo de aire volumétrico al horno y aumentando la dosificación de azufre.

## RECOMENDACIONES

1. No se debe dosificar exceso de azufre en el horno, una vez que se tiene mucho azufre ocurre su sublimación (evaporación del azufre), lo que puede llevar a cristalización del azufre en las tuberías de gases y en el eyector, causando obstrucciones y exigiendo el paro del sistema para limpieza.
2. El ajuste de la temperatura en el horno se hace por medio de la entrada de aire al horno y por medio del ventilador extractor de gases, es decir, cuanto más aire, más baja la temperatura. Mantener una temperatura estable dentro del horno hace posible una buena combustión por autoignición.
3. Definir adecuadamente las relaciones de proporcionalidad en base a las dimensiones del tornillo dosificador y velocidad del motor del mismo que es controlado por el variador, para determinar la cantidad real de azufre que ingresa al horno.
4. Llevar a cabo la implementación y validación del modelo y ajuste del controlador.
5. Continuar con la investigación e integrar el sistema supervisorio basado en el modelo de toda la etapa de clarificación.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ALVAREZ, Hernán; LAMANNA, R.; VEGA, P.; REVOLLAR, S. Metodología para la obtención de modelos semifísicos de base fenomenológica aplicada a una sulfitadora de caña de azúcar. *En Revista Iberoamericana de Automatización e Informática Industrial (RIAI)*. España. 2009. Vol. 6. Núm. 3. ISSN: 1697-7912. 10-20 p.
2. ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. *ADVANCED PID CONTROL*. ISA-Instrumentation, systems and automation society. United States of America, 2006. 460 p. ISB-10: 1-55617-942-1.
3. DELORES, Etter. *Solución de problemas de ingeniería con Matlab*. García, Roberto (trad). 2a. ed. México 1998. 329 p. ISBN: 0-13-397688-2.
4. *Estequiometría* [en línea]. Dpto. Química Orgánica. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. <<http://www.eis.uva.es/~qgintro/inicio.html>> [Consulta: 10 de junio de 2012].
5. FLÓREZ GÁLVEZ, Diana María. *Evaluación comparativa del método de sulfitación frente al empleo de peróxido de hidrogeno en el proceso de decoloración de meladura en el Ingenio Risaralda S.A.* Trabajo de graduación de Ingeniera Tecnóloga Química, Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia 2007. 81 p.

6. GRUPO DE INVESTIGACIÓN. *Proyectos de Investigación aplicada*. Ingenio La Unión, S.A. Guatemala 2011. 273 p.
7. ISAZA HURTADO, John Alexander. *Informe estancia investigativa, modelado y control avanzado de proceso: Ajuste de pH y clarificación de jugo de caña*. Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación en Procesos Dinámicos – KALMAN, 2011. 17 p.
8. LEVENSPIEL, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. 2a. ed. México 1987. 634 p. ISBN: 84-291-7325-0.
9. MOSCOSO, Marcela; ARIAS Jessica; SALAZAR, Julián. *Modelo dinámico de la etapa de clarificación de jugo de caña en un ingenio azucarero*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía. Medellín, Colombia 2012. 87 p.
10. P. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. Editorial Limusa, México 1991. 1203 p.
11. Red Internacional de Tecnologías Limpias. *Procesos de producción industriales* [en línea]. <<http://www.tecnologiaslimpias.org>> [Consulta:24 de febrero de 2013].
12. REIN, Peter. *Sugar Cane Engineering*. Berlin 2007. 768 p. ISBN: 978-3-87040-110-8.

13. Revista de Investigación, Industrial Data. Diseño e implementación de un controlador proporcional integral [en línea]. <<http://www.scielo.org>> [Consulta: 18 marzo de 2013].





## **APÉNDICE**



**Apéndice 1.** Desarrollo de modelo de horno de horno rotatorio, se adjunta el código de programación utilizado en Matlab, se detalla el programa principal.

```

%simulación en simulink.
clear all
close all
clc
tic
                                %Inicia temporizador
                                % Perturbaciones Horno.
td_S=5000;                       %Tiempo de alimentación de azufre constante
m_azufre=31.4993;                %masa de azufre
dmS=(0.2)*m_azufre;             %Porcentaje de perturbación 0.2 (aumenta un 20%
el flujo de
                                %azufre alim.)
td_Aire=7000;                    % Tiempo de alimentación de aire constante
m_Aire_in=9.3976;               % mol/s considerando el volumen del horno y su densidad
                                %lacantidad de aire alim. al horno seria esta en 7 seg.

dmAir=0.5*m_Aire_in; %Porcentaje de la perturbación.
                                %0.2 (aumenta un 20% el flujo de aire alim.)
t_sim=20000;                    %Tiempo de operación de period de prueba
sim('Horno');                  %Simulación de modelo
                                % Horno Rotatorio

figure (1)                      %Programación para mostrar las imagenes
axes1 = axes('Parent',figure (1),'FontSize',10,'FontName','times');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(t, Fout_Horno,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','-','Color',[1 0.4
0.4],'DisplayName','Fout_Horno'), hold on, grid on, zoom on
xlabel('t[s]','FontSize',10,'FontName','Century');
ylabel('F_{gases} [m3/s]','FontSize',10,'FontName','Century');
title('Horno rotatorio - Flujo gases','FontSize',10,'FontName','Century');
legend1=legend(axes1,'show');
set(legend1,'Location','NorthEast','FontSize',10);

figure (2)
axes2 = axes('Parent',figure (2),'FontSize',10,'FontName','times');
box(axes2,'on');
grid(axes2,'on');

```

```

hold(axes2,'all');
plot(t, YSO2_Horno,'Parent',axes2,'LineWidth',2,'LineStyle','--','Color',[0.1098
0.7059 0.7059], 'DisplayName','YSO2_Horno'), grid on;
xlabel('t[s]','FontSize',10,'FontName','Century');
ylabel('Y_{SO_{2}} [mol/m3]','FontSize',10,'FontName','Century');
title('Horno rotatorio - SO_{2}','FontSize',10,'FontName','Century');
legend2=legend(axes2,'show');
set(legend2,'Location','NorthEast','FontSize',10);

```

```

figure (3)
axes1 = axes('Parent',figure (3),'FontSize',10,'FontName','times');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(t, Tout_Horno,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','--','Color',[0.2098
0.6059 0.5059], 'DisplayName','Tout_Horno'), grid on;
xlabel('t[s]','FontSize',10,'FontName','Century');
ylabel('T_{gases} [°K]','FontSize',10,'FontName','Century');
title('Horno rotatorio - Temperatura','FontSize',10,'FontName','Century');
legend1=legend(axes1,'show');
set(legend1,'Location','NorthEast','FontSize',10);

```

```

figure (4)
axes1 = axes('Parent',figure (4),'FontSize',10,'FontName','times');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(t, Aire_alimentado,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','-','Color',[1 0.4
0.4],'DisplayName','Aire_{in}'), hold on, grid on, zoom on
xlabel('t[s]','FontSize',10,'FontName','Century');
ylabel('Air_{in} [m3/s]','FontSize',10,'FontName','Century');
title('Horno rotatorio - Flujo gases','FontSize',10,'FontName','Century');
legend1=legend(axes1,'show');
set(legend1,'Location','NorthEast','FontSize',10);

```

```

figure (5)
axes1 = axes('Parent',figure (5),'FontSize',10,'FontName','times');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(t, S_alimentado,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle','-','Color',[1 0.4
0.4],'DisplayName','S_{in}'), hold on, grid on, zoom on
xlabel('t[s]','FontSize',10,'FontName','Century');
ylabel('S_{in} [g/s]','FontSize',10,'FontName','Century');

```

```

title('Horno rotatorio - Flujo gases','FontSize',10,'FontName','Century');
legend1=legend(axes1,'show');
set(legend1,'Location','NorthEast','FontSize',10);
toc %termina temporizador

```

**Apéndice 2.** Además del programa principal, se utilizaron dos funciones más para el desarrollo del modelo, el siguiente código de programación corresponde a la función horno.

```

% Ecuaciones diferenciales del modelo de combustión de azufre Reacción:
% S(s) + O2(g) ---> SO2(g)

```

```

function dC_dt=EDhorno(in_horno)
% Entradas al modelo
ms=in_horno(1);
Cs=in_horno(2);
Co2=in_horno(3);
Cn2=in_horno(4);
Cso2=in_horno(5);
T=in_horno(6);
mAir_in=in_horno(7);

% Parámetros y constantes
Ea=59.5e3;           %[J/mol] Energía de activación
Ko=7.29e5;           %[m3/mol.s] Constante cinética preexponencial
PMs=32;              %[g/mol] Peso molecular azufre
V=pi*(1.2^2)*1.8/4;  %[m3] Volumen de la cámara de combustión (puede
variar)
R=8.314;              %J/mol.k] Constante de gases ideales, asumiendo
%una constante para el el aire (8.314/ el peso seco
molecular
%del aire 28.96)
%entonces esa constante es 287 J/(K*Kg)
%Aire de entrada

T2=273+25;           %[K] Temp. del aire a la entrada considerando 25°C temp.
amb.

P2=101325*1.1;       %[Pa] Presión del aire a la entrada, considerando que la
%presión estandar en la superficie es 101325 pascals, se
%multiplica por 1.1 para ejemplificar una altura cercana al
%nivel del mar,
%La densidad del aire es 1.1 kg/m3 P=Po -dgh  gravedad
%y altura

```

```

XN2=0.79;           %Fracción de Nitrógeno en el aire
XO2=0.21;           %Fracción de Oxígeno en el aire
                    % Entradas al modelo (variantes con el tiempo)
% ms=in_horno(1);  %31.4993 [g/s] Flujo másico de azufre alimentado

n1=ms/PMs;          % [mol/s] flujo molar de azufre alim.la masa que pasa por
seg.
                    % al horno dividido un un mol de azufre (32 grs)
nO2_in=mAir_in*XO2; % [mol/s] flujo molar de Oxígeno alimentado al horno
nN2_in=mAir_in*XN2; % [mol/s] flujo molar de Nitrógeno alimentado al horno
n2=nO2_in+nN2_in;   % [mol/s] flujo molar de aire alim. al horno con 80% de
                    % exceso de O2
v2=n2*R*T2/P2;      % [m3/s] Flujo volumétrico de aire alim.
                    % únicamente el oxígeno que es alimentado

% Estequiometría

v3=v2*T/T2;         %[m3/s] Flujo volumétrico de la salida del reactor
                    %cambia la diferencia de temperaturas
                    % La temperatura del horno es una variable que viene
                    dada por una entrada y es la
                    % medición instrumentación del horno.

CpO2=31.75995;      %[J/molK] capacidades calorificas dadas en moles
CpN2=29.93537;      %[J/molK] capacidad calorifica del nitrogeno.
CpSO2=47.90180;     %[J/molK] capacidad calorifica del S02
CpS=22.67637;       %[J/molK] capacidad calorifica del azufre

dHrxn=296.81e3;     %[J/mol] entalpía de reacción dioxido de azufre

dHfS=1.727e3;       %[J/mol] Entalpía de fusión del azufre
dHvS=45e3;          %[J/mol] Entalpía de vaporización del azufre

% PARAMETROS FOGLER
Ns=Cs*V;            %moles de azufre presentes en el horno
No2=Co2*V;          %moles de oxigeno presentes en el horno
Nn2=Cn2*V;          %moles de nitrogeno presentes en el horno
Nso2=Cso2*V;        %moles de dioxido de azufre en el horno

NCp=Ns*CpS+No2*CpO2+Nn2*CpN2+Nso2*CpSO2; %sumatoria
theta_s=1;
theta_o2=nO2_in/n1;
theta_n2=nN2_in/n1;

```

```

theta_so2=0;

thetaCp=theta_s*CpS+theta_o2*CpO2+theta_n2*CpN2+theta_so2*CpSO2;

% FIN PARAMETROS FOGLER
%Ley de velocidad
rso2=Ko*exp(-Ea/(R*T))*Cs*Co2;
ro2=-rso2;
rs=-rso2;
rn2=0;

%Balances por componente

dCs_dt=(1/V)*(n1-v3*Cs)+rs;
dCo2_dt=(1/V)*(nO2_in-v3*Co2)+ro2;
dCn2_dt=(1/V)*(nN2_in-v3*Cn2)+rn2;
dCso2_dt=(1/V)*(-v3*Cso2)+rso2;

%Balance de energía La temperatura de referencia es T2=Tentrada
dT_dt=(V*rso2*(dHrxn)-n1*(thetaCp*(T-T2)+dHfS+dHvS))/(NCp);
%ECUACIONES DE FOGLER
dC_dt=[dCs_dt dCo2_dt dCn2_dt dCso2_dt dT_dt v3 v2]; %[3.6410 7.2810
25.8227 0.0039]

```

**Apéndice 3.** Código de programación correspondiente a la función fracción de dióxido de azufre liberado

```

%Cálculo fracción de compuestos en el gas de salida
function Y=fracso2(C)
Co2=C(2);
Cn2=C(3);
Cso2=C(4);

% Ys=Cs/sum(C);
Yo2=Co2/sum(C(2:end));
Yn2=Cn2/sum(C(2:end));
Yso2=Cso2/sum(C(2:end));           %Concentración de dioxido de azufre
Y=[Yo2 Yn2 Yso2];

```