



UNIVERSIDAD DEL AZUAY.
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

**Análisis y modelado de los controladores PID del molino de
crudo de la empresa UCEM-CEM planta industrial Guapán.**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Autores:

NELSON GUILLERMO CORREA GUERRERO.
SEBASTIÁN FERNANDO RUIZ ÁVILA

Director:

HUGO TORRES SALAMEA, PhD

CUENCA, ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicarlo a toda mi familia, muy en especial a la Sra. Luisa Guerrero Pesantez (+), madre, amiga, motor fundamental y respaldo incondicional durante toda mi carrera universitaria. Así mismo, a mi hijo, quien ha sido mi fuerza y mi razón para seguir adelante.

NELSON GUILLERMO CORREA GUERRERO

DEDICATORIA

En primer lugar, este trabajo va dedicado a Dios, sin su voluntad nada hubiese sido posible. A mis padres Patricio y Monserrath por su apoyo constante e incondicional que me brindan para alcanzar mis metas. Además, a mis hermanos Patricio y Vanesa con quienes he compartido gratos momentos de mi vida.

SEBASTIAN FERNANDO RUIZ AVILA

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero agradecer a DIOS por haberme impartido la fuerza y la sabiduría de seguir adelante y cumplir una de las metas más importantes planteadas en mi vida. De igual forma un eterno agradecimiento a mi familia por la confianza, los compañeros quienes fueron parte de este proceso de aprendizaje.

Finalmente, un especial agradecimiento al Ph.D. Hugo Torres por haber dirigido este trabajo de investigación y por comprometerse al desarrollo del mismo, de igual forma a todos quienes son parte de Unión Cementera Nacional, Planta Industrial GUAPAN por brindarnos el acceso y la colaboración para el desarrollo del tema propuesto.

NELSON GUILLERMO CORREA GUERRERO

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a mi Dios por haberme permitido llegar a estas instancias de mi vida y cumplir una meta importante en mi camino.

Mi más profundo agradecimiento al Ph.D. Hugo Torres, por haberme asesorado y conducido con paciencia y sobra de conocimientos como Director de este presente trabajo de investigación.

Al Personal técnico de los Departamentos de Producción y Mantenimiento de la planta Industrial Guapán en las personas de los Ingenieros: Luis Vélez, Pedro Baculima, Alfredo Mora e Ismael Minchala por su colaboración, tiempo y apoyo desinteresados.

SEBASTIAN FERNANDO RUIZ AVILA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTROLADORES PID APLICADOS A LA INDUSTRIA CEMENTERA.	3
1.1 TIPOS DE CONTROLADORES.	3
1.1.1 CONTROL DIFUSO	3
1.1.2 CONTROL MATRIZ DINÁMICA	3
1.1.3 CONTROL PREDICTIVO	4
1.1.4 1.1.4 CONTROL NEURONAL	5
1.1.5 CONTROL ADAPTATIVO	5
1.1.6 CONTROL ALGORITMO GENÉTICO	6
1.1.7 CONTROL PAR CALCULADO	7
1.1.8 CONTROL SENO - COSENO HIPERBÓLICO.....	7
1.1.9 CONTROL DE ESTRUCTURAS VARIABLES.....	8
1.1.10 CONTROL ROBUSTO	9
1.1.11 CONTROL PID.	10
1.1.11.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL.....	11
1.1.11.2 CONTROL DERIVATIVO.	11
1.1.11.3 CONTROL INTEGRAL.....	11
1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE TIPOS DE CONTROLADORES.	12

1.3 APLICACIONES DE LOS CONTROLADORES PID EN LOS SISTEMAS DE MOLIENDA DE CRUDO.....	17
1.4 RESPUESTA TRANSITORIA.....	18
1.4.1 SEÑALES DE ENTRADA.....	18
1.4.2 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN	19
1.4.3 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN	23
1.4.4 SISTEMAS DE ORDEN SUPERIOR.....	27
1.5 SISTEMAS SISO.....	28
CAPÍTULO 2: CAPÍTULO II: ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MOLINO DE CRUDO.	29
2.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA	29
2.1.1 ANTECEDENTES PLANTA INDUSTRIAS GUAPÁN.	29
2.1.2 LA EMPRESA.....	29
2.1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO POR VÍA SECA.....	30
2.1.4 TRITURACIÓN.....	30
2.1.5 PRE-HOMOGENIZACIÓN	31
2.1.6 MOLIENDA DE CRUDO	31
2.1.7 CLINKERIZACIÓN Y ENFRIAMIENTO	32
2.1.8 MOLIENDA DE CEMENTO.....	32
2.1.9 ALMACENAMIENTO, EMPAQUE Y DESPACHO DEL CEMENTO	33
2.2 PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO. - EQUIPOS PRINCIPALES.	33
2.2.1 MOLINO DE BOLAS CON DESCARGA CENTRAL.....	33
2.2.2 CIRCUITO DE MOLIENDA DE CRUDO. - DESCRIPCIÓN	34
2.2.3 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA MOLIENDA DE CRUDO.....	34
2.2.3.1 Caliza.....	35
2.2.3.2 Arcilla.....	35
2.2.3.3 Mineral de hierro.....	35

2.3 CIRCUITOS DE MOLIENDA	35
2.3.1 ANTECEDENTES.....	35
2.3.2 PROBLEMA	36
CAPÍTULO 3: RECOPIACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS.....	38
3.1 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	38
3.1.1 IMPLEMENTACIÓN PARA ADQUISICIÓN DE DATOS	38
3.1.2 IMPLEMENTACION DEL HARDWARE	40
3.1.2.1 Funcionamiento.....	40
3.1.2.2 Conexión	40
3.1.2.3 3.1.2.3 Diagrama de Flujo.....	43
3.1.3 3.1.3 IMPLEMETACION DEL SOFTWARE	43
3.1.3.1 3.1.3.1 Funcionamiento.....	44
3.1.3.2 3.1.3.2 Ejecución.....	44
3.1.3.3 3.1.3.3 Diagrama de Flujo.....	45
3.2 3.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS	46
3.2.1 3.2.1 ANÁLISIS DÁMPER D41	47
3.2.2 3.2.1 ANÁLISIS DÁMPER D49	49
3.2.3 3.2.1 ANÁLISIS SISTEMA MOLINO DE CRUDO	51
CAPÍTULO 4: CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES.....	53
4.1 4.1 TEORÍA DE IDENTIFICACIÓN GRAFICA.....	53
4.1.1 4.1.1 CARACTERISTICAS DE PROCESOS DE SEGUNDO ORDEN	53
4.1.1.1 4.1.1.1 Métodos de identificación grafica en sistemas de control de segundo orden	53
4.1.1.2 4.1.1.2 Sistemas Sub amortiguados	54
4.1.1.3 4.1.1.3 Sistemas Sobre amortiguados	56
4.1.2 4.1.2 DESARROLLO MATEMATICO	57

4.1.2.1	4.1.2.1 Función de Transferencia Apertura de Dámper D49 subida..	57
4.1.2.2	4.1.2.2 Función de Transferencia Cierre de Dámper D49 bajada.	59
4.1.2.3	4.1.2.3 Función de Transferencia Apertura de Dámper D41 subida..	61
4.1.2.4	4.1.2.4 Función de Transferencia Cierre de Dámper D41 bajada.	64
4.1.3	4.1.3 DESARROLLO EN MATLAB	66
4.1.3.1	4.1.3.1 Funcionamiento.....	66
4.1.3.2	4.1.3.2 Diagrama De Flujo	67
4.1.3.3	4.1.3.3 Ejecución.....	68
4.1.3.4	4.1.3.4 Funciones de transferencia aproximadas	69
4.1.4	4.1.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROPUESTAS	74
4.1.4.1	4.1.4.1 Función de Transferencia Promedio Dámper D49.....	74
4.1.4.2	4.1.4.2 Función de Transferencia Promedio Dámper D41.....	75
4.2	4.2 MATRIZ DE ESTADOS	76
4.2.1	4.2.1 APROXIMACIÓN MATLAB PARA DEFINIR MATRIZ RESULTANTE	78
4.3	4.3 ESQUEMA DE CONTROL	79
4.4	4.4 APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DE PID.....	82
4.4.1	4.4.1 SINTONIZACION PID DEL PROCESO DAMPER D49.....	82
4.4.1.1	4.4.1.1 Método 1 – Reacción a la Curva.....	82
4.4.1.2	4.4.1.2 Cálculo de las constantes aproximadas para el controlador PID, dámper D49.	84
4.4.1.3	4.4.1.3 Método 2 – Oscilación Sostenida.....	85
4.4.2	4.4.2 SINTONIZACION PID DEL PROCESO DAMPER D 41.....	87
4.4.2.1	4.4.2.1 Método 1 – Reacción a la Curva.....	87
4.4.2.2	4.4.2.2 Cálculo de las constantes aproximadas para el controlador PID, dámper D41.	89
4.4.2.3	4.4.2.3 Método 2 – Oscilación Sostenida.....	90
CAPÍTULO 5: CAPÍTULO V: PRUEBAS Y EXPERIMENTACIÓN.		92

5.1 5.1 FUNCIONAMIENTO DEL SIS TEMA EN SIMULINK.....	92
5.1.1 5.1.1 PRUEBAS CON DATOS CALCULADOS	92
5.1.1.1 5.1.1.1 PRUEBAS CONTROLADORES PID DAMPER D49.....	93
5.1.1.2 5.1.1.2 AJUSTE CONTROLADORES PID DAMPER D49	95
5.1.1.3 5.1.1.3 PRUEBAS CONTROLADORES PID DAMPER D41.....	97
5.1.1.4 5.1.1.4 AJUSTE CONTROLADORES PID DAMPER D41	99
5.2 5.2 CURVA REPUESTA CON CONTROLADORES ESTABLECIDOS...	100
5.3 5.3 PRUEBAS DE ROBUSTEZ.....	101
5.3.1 5.3.1 DAMPER DE FUGA.....	101
5.3.2 5.4.2 PERTURBACION POR FACTORES EXTERNOS.....	102
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFIA	108
ANEXOS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama de bloques control difuso.....	3
Figura 1.2 - Diagrama de bloques control matriz dinámica.....	4
Figura 1.3 - Diagrama de bloques control predictivo	4
Figura 1.4 - Diagrama de bloques control neuronal.....	5
Figura 1.5 - Diagrama de bloques control adaptativo	6
Figura 1.6 - Diagrama de bloques control algoritmo genético.....	6
Figura 1.7 - Diagrama de bloques control par calculado	7
Figura 1.8 -Diagrama de bloques control de estructuras variables	8
Figura 1.9 Diagrama de bloques control robusto	9
Figura 1.10 - Señales de entrada	19
Figura 1.11 - Gráfico que representa un circuito RC	19
Figura 1.12 - Gráfica que nos indica la respuesta transitoria de primer orden	21
Figura 1.13 - Programa simulink sistema de primer orden.....	22
Figura 1.14 - Simulación matlab respuesta escalón	22
Figura 1.15 - Simulación simulink respuesta escalón.....	22
Figura 1.16 - Simulación matlab respuesta rampa	22
Figura 1.17 - Simulación simulink respuesta rampa.....	22
Figura 1.18 - Simulación matlab respuesta impulso	22
FIGURA 1.19 - Simulación simulink respuesta impulso	22
Figura 1.20 - Diagrama de bloques de un sistema de segundo orden	23
Figura 1.21 - Polos en plano complejo s	23
Figura 1.22 - Respuesta del sistema de segundo orden.....	24
Figura 1.23 - Diagrama de bode ($\xi = 0$).....	24
Figura 1.24 - Diagrama de bode ($0 < \xi < 1$).....	24
Figura 1.25 - Diagrama de bode ($\xi = 1$).....	25
Figura 1.26 - Diagrama de bode ($\xi > 1$).....	25
Figura 1.27 - Programa simulink sistema de segundo orden	25
Figura 1.28 - Simulación matlab respuesta escalón	26
Figura 1.29 - Simulación simulink respuesta escalón.....	26
Figura 1.30 - Simulacion matlab respuesta rampa	26
Figura 1.31 - Simulación simulink respuesta rampa.....	26
Figura 1.32 - Simulación matlab respuesta impuso	27

Figura 1.33 - Simulación simulink respuesta impulso	27
Figura 1.34 - Respuesta transitoria de los sistemas de orden superior	27
Figura 1.35 . Diagrama de bloque de un sistema siso	28
Figura 2.1 - Diagrama del proceso de fabricación de cemento por vía seca en la planta industrial Guapán de la UCEM-CEM	30
Figura 2.2 - Esquema molino de crudo	32
Figura 2.3 - Materia prima molino de crudo	35
Figura 3.1 -Control regulable del d41	38
Figura 3.2 - Control regulable del d49	39
Figura 3.3- Arduino nano	40
Figura 3.4 - Conexión Arduino Nano	41
Figura 3.5 - Conexión pin A0 al módulo de panel central	41
Figura 3.6 - Conexión pin A1 al módulo de panel central	41
Figura 3.7 - Conexión pin A2 al módulo de panel central	42
Figura 3.8 - Conexión tierra común	42
Figura 3.9 - Interfaz inicial del programa Netbeans para adquisición de datos	44
Figura 3.10 - Botones de interfaz de usuario	45
Figura 3.11 - Ecuación característica termocupla	46
Figura 3.12 - Grafico respuesta apertura TT108	47
Figura 3.13 - Gráfico respuesta apertura TT104	48
Figura 3.14 - Gráfico respuesta cierre TT108	48
Figura 3.15 - Gráfico respuesta cierre TT104	49
Figura 3.16 - Gráfico respuesta apertura TT105	49
Figura 3.17 - Gráfico respuesta apertura TT104	50
Figura 3.18 - Gráfico respuesta cierre TT105	50
Figura 3.19 - Gráfico respuesta cierre tt104	51
Figura 4.1 - Figura comparativa de aproximación de los métodos gráficos más utilizados	54
Figura 4.2 - Sistema de segundo orden con respuesta a valores de $0 < \zeta < 1$	54
Figura 4.3 - Ubicación de variables para el análisis de identificación gráfica de un sub-amortiguado	55
Figura 4.4:Método de los dos puntos, sistema sobre-amortiguado	57
Figura 4.5:Respuesta del proceso apertura d41	57
Figura 4.6:Respuesta del proceso cierre d41	60

Figura 4.7 - Interfaz usuario inicial obtención función de transferencia	68
Figura 4.8 – Función de transferencia apertura d��mper D49.....	70
Figura 4.9- Función de transferencia cierre d��mper d49	71
Figura 4.10 – Función de transferencia apertura d��mper D41.....	72
Figura 4.11 – Función de transferencia cierre d��mper D41.....	74
Figura 4.12 - Diagrama de bloques control del proceso	79
Figura 4.13 - Diagrama de bloques detallado el control PID del d��mper D49.....	80
Figura 4.14 - Diagrama de bloques detallado el control PID del d��mper D41.....	80
Figura 4.15 - Diagrama de bloques detallado el espacio de estados.....	81
Figura 4.16 - Esquema de control completo	81
Figura 4.17 - Planta D49 a lazo abierto	82
Figura 4.18 - Respuesta al escalón del d��mper D49	82
Figura 4.19 - Grafica con trazos de parámetros para análisis de la curva a lazo abierto D49.....	83
Figura 4.20 - Esquema de control siso D49	85
Figura 4.21 - Planta D41 a lazo abierto	87
Figura 4.22 - Respuesta al escalón del d��mper D41	87
Figura 4.23 - Grafica con trazos de parámetros para análisis de la curva a lazo abierto D41.....	88
Figura 4.24 - Esquema de control siso D41	90
Figura 5.1 – Esquema de control simplificado.....	92
Figura 5.2 - Ingreso de datos de las matrices que representan la planta en simulink	93
Figura 5.3 - Ingreso constantes de controlador pid d��mper D49 de tabla 4.....	94
Figura 5.4 - Respuesta del controlador pid del d��mper D49 - Ziegler Nichols	94
Figura 5.5 - Ingreso constantes de controlador pid d��mper D49 de tabla 5.....	95
Figura 5.6 - Respuesta del controlador pid del d��mper D49 – Cohen Coon	95
Figura 5.7 - Ingreso constantes de controlador final pid d��mper D49.....	96
Figura 5.8 - Respuesta del controlador pid del d��mper D49 – Ajustado	96
Figura 5.9 - Ingreso constantes de controlador pid d��mper D41 de tabla 4.....	97
Figura 5.10 - Respuesta del controlador pid del d��mper D41 - Ziegler Nichols	98
Figura 5.11 - Ingreso constantes de controlador pid d��mper D41 de tabla 7.....	98
Figura 5.12 - Respuesta del controlador pid del d��mper D49 – Cohen Coon	99
Figura 5.13 - Ingreso constantes de controlador final pid d��mper D49.....	99
Figura 5.14 - Respuesta del controlador pid del d��mper D41 – ajustado	100

Figura 5.15 – Respuesta final del sistema.....	101
Figura 5.16 - Inserción de ruido al sistema de control - d�mper de fuga.....	102
Figura 5.17 - Respuesta al sistema con perturbación - d�mper de fuga.....	102
Figura 5.18 - Inserción de ruido al d�mper D49 – factores externos.....	103
Figura 5.19 - Inserción de ruido al d�mper D49 – factores externos.....	103
Figura 5.20 - Inserción de ruido al d�mper D41 – factores externos.....	104
Figura 5.21 - Inserción de ruido al d�mper D41 – factores externos.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Tabla comparativa ventajas y desventajas de los tipos de controladores robustos	12
Tabla 1.2 - Comparación simulación sistema primer orden	21
Tabla 1.3 - Comparación simulación sistema segundo orden.....	25
Tabla 4.1 - Tabla de aproximación Ziegler Nichols para dámper D49.....	84
Tabla 4.2 - Tabla de aproximación Cohen-Coon para dámper D49	84
Tabla 4.3 - Tabla de aproximación Ziegler Nichols para dámper D41.....	89
Tabla 4.4 - Tabla de aproximación Cohen-Coon para dámper D41	89
Tabla 5.1 - Cuadro comparativo de las constantes del control PID para el dámper D49.....	97
Tabla 5.2 - Cuadro comparativo de las constantes del control PID para el dámper D41	100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I.....	112
Anexo II	114
Anexo III	116
Anexo IV	118
Anexo V	125
Anexo VI.....	132

ANÁLISIS Y MODELADO DE LOS CONTROLADORES PID DEL MOLINO DE CRUDO DE LA EMPRESA UCEM-CEM PLANTA INDUSTRIAL GUAPÁN.

RESUMEN

Este trabajo de investigación, presenta una aplicación de un control automático ajustado a un sistema de molienda de crudo para la producción de cemento en la planta industrial Guapán.

El estudio de este proyecto, se fundamenta en el diseño de controladores PID, relacionando los sistemas S.I.S.O, con adquisición de datos y desarrollo de curvas de temperatura con un modelo arduino, regulando la apertura y cierre de los dámetros, que permiten controlar el flujo de aire caliente para el secado de materia prima, lo que se realiza manualmente por el operador, afectando a la rentabilidad del proceso con gastos mayores de energía.

Palabras claves: — PID — Arduino — Dámetros — SISO



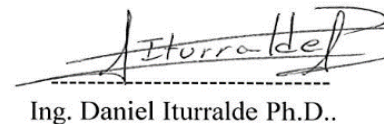
Sebastián Ruiz.



Nelson Correa.



Ing. Hugo Torres Ph.D..



Ing. Daniel Iturralde Ph.D..

ABSTRACT

This research presents the implementation of an automatic control adjusted to a raw mill system for the production of cement in *Guapan* industrial plant. This study was based on PID controllers design, connecting the SISO systems with data acquisition and temperature curves development. This was performed with an Arduino model, which regulates the opening and closing of the dampers that allow to control the flow of hot air for the drying of raw material. This procedure is done manually by the operator, affecting the profitability of the process due to higher energy costs.

Keywords: - PID - Arduino - Dampers - SISO

Ing. Hugo Torres, Ph.D.



Sebastián Ruiz.

Ing. Daniel Iturralde Ph.D.



Nelson Correa



Magaly y terge
UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by
Lic. Lourdes Crespo

Nelson Guillermo Correa Guerrero

Sebastián Fernando Ruiz Ávila

Trabajo de Graduación

Hugo Torres Salamea, PhD

Junio, 2016.

ANÁLISIS Y MODELADO DE LOS CONTROLADORES PID DEL MOLINO DE CRUDO DE LA EMPRESA UCEM-CEM PLANTA INDUSTRIAL GUAPÁN.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería en automatización y control, favorece a los procesos industriales con sus diversas aplicaciones, abordando el control y manejo de las variables de operación tales como temperatura, presión, flujos, concentración, etc. (Ipanaqué Alama, 2012)

Los procesos industriales requieren ser sustentables y rentables para las organizaciones. Hoy en día, en función del avance tecnológico y la disponibilidad de recursos informáticos, se hace posible conseguir esta característica que les permite una alta competitividad a las industrias dentro de su segmento; sin embargo, no basta solamente con la disponibilidad tecnológica y equipos modernos, se hace fundamental conocer o tener dominio de los conceptos de aplicación de tal manera que se busque o se logre una eficiencia en el manejo de equipos e instrumentación en una planta industrial. (Ipanaqué Alama, 2012)

El desarrollo de la tecnología de los procesadores digitales y sistemas embebidos, facilitan la aplicación de sistemas discretos en procesos continuos y tratamiento de señales ampliando y abriendo nueva perspectiva. (Ipanaqué Alama, 2012)

Independientemente de los actuadores físicos, son importantes para tener una respuesta en tiempo real de lo que esta sucediendo en el proceso ,así como el control lógico que accione los actuadores, fue por esto en 1910 Elmer Sperry surgió con la idea de un control PID empezando con mecanismos básicos como limitadores de velocidad y sistemas de dirección automática en barcos. (Singh, 2015) Desde ahí hasta la actualidad el control PID se ha convertido en la estrategia de control más utilizada a nivel industrial. Se estima que aproximadamente el 90% de lazos de control existentes utilizan con PID. (Lozano Valencia, Rodríguez García, & Giraldo Buitrago, 2012),

debido a esto, científicos han desarrollado herramientas de control más inteligentes y con mejores resultados experimentales no se ha podido desplazar el control PID debido su factible implementación.

PID en la actualidad no llega a una total eficiencia debido a que aplicando un controlador integral a derivativo obtenemos mejoras a razón de sacrificar imprecisiones en otros puntos. (Ortiz, 2014) Por lo que en los últimos 10 años se ha desarrollado mucho este tema, tanto que nos presenta alternativas como: el Control Difuso, Controladores Lineales en Tiempo Discreto, SFO (*State Feedback and Observers.*), MPC (Modelos Predictivos de Control). (Astrom & Hagglund, 2010)

CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTROLADORES PID APLICADOS A LA INDUSTRIA CEMENTERA.

1.1 TIPOS DE CONTROLADORES.

La teoría de control moderno presenta algunos tipos de controladores para dar solución a problemas según su procedencia. Entre estos tipos de controladores tenemos: control PID, control robusto, control predictivo, control neuronal, control adaptativo, control difuso, control par calculado, control por matriz dinámica, control de algoritmo genético, control seno-coseno hiperbólico, control de estructuras variables.

1.1.1 CONTROL DIFUSO

Esta estrategia de control está en el grupo de las desarrolladas por técnicas donde se necesita aplicar inteligencia artificial, donde es necesario establecer el error absoluto y la variabilidad del proceso. (Cantero Vergara, Chamorro Coneo, & Palencia Díaz, 2010)

Este tipo de controlador se utiliza generalmente para sistemas en tiempo real que se implementa como sistemas de ecuaciones diferencial o de igual forma mediante reglas acción-situación. (Driankov, Hellendoorn, & Reinfrank, 2013)

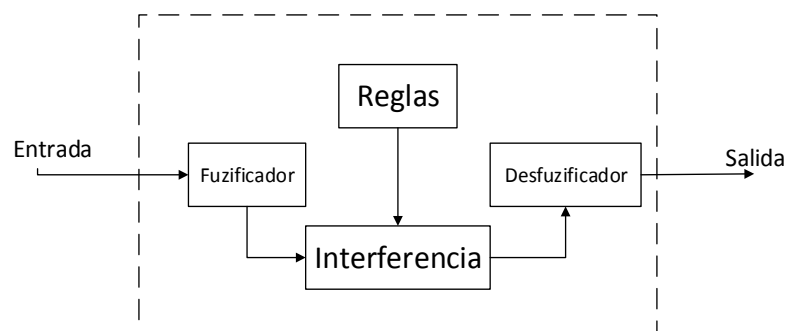


Figura 1.1 - Diagrama de bloques control difuso

Fuente: Autores - (Driankov, Hellendoorn, & Reinfrank, 2013)

1.1.2 CONTROL MATRIZ DINÁMICA

Es un método que trabaja en función del tiempo, entonces, esta se puede definir como una recopilación de datos que, en base a un histórico de datos obtenidos del pasado, podemos prever el futuro.

Esta tecnología para su desarrollo se basó en el modelo de superposición si se conoce la respuesta del sistema frente a la variable que efectué cambios, o cuando la perturbación es medible permitiendo que la señal del controlador siempre se encuentre

en los márgenes de funcionamiento. (Cantero Vergara, Chamorro Coneo, & Palencia Díaz, 2010) (Palencia Díaz, 2010)

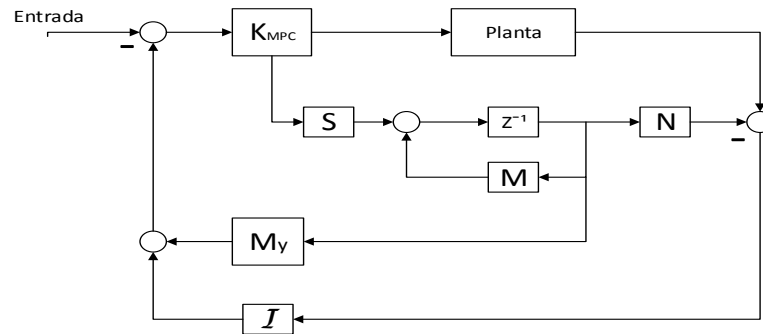


Figura 1.2 - Diagrama de bloques control matriz dinámica
Fuente: Autores - (Palencia Díaz, 2010)

1.1.3 CONTROL PREDICTIVO

El control predictivo se basa en estrategias de control por computador que es utilizado para predecir el comportamiento de las variables o estados del sistema de control. (Rodríguez Ramírez, 2011)

La representación matemática de este controlador cuando el horizonte de predicción es N se lo expresa como: (Rodríguez Ramírez, 2011)

$$\hat{y}(t+1|t); \hat{y}(t+2|t); \dots; \hat{y}(t+N|t) \quad (1)$$

Donde:

t : Constante de tiempo.

$\hat{y}$: Actuación en el sistema en el tiempo t .

Para calcular la secuencia antes expresada es necesaria la información hasta el instante t , es decir, valores antes del proceso, actuadores del proceso, valores presentes, y valores a la salida del proceso. (Rodríguez Ramírez, 2011)

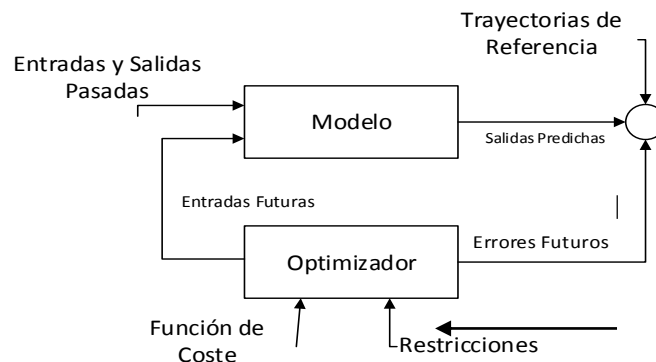


Figura 1.3 - Diagrama de bloques control predictivo

Fuente: Autores - (Rodríguez Ramírez, 2011)

Los elementos fundamentales de este controlador son el modelo de optimización y el modelo de control. (Rodríguez Ramírez, 2011)

1.1.4 CONTROL NEURONAL

Este tipo de controlador es muy tradicional se basa en un conjunto de neuronas, es decir se considera como un árbol neuronal, su función de activación se basa de dos formas: funciones Umbral, funciones Sigmoidal. (Suárez, 2012)

Estos controladores permiten la generalización y la tolerancia a fallos, se puede decir que el conocimiento está en el conjunto de neuronas y sus interconexiones, la red neuronal consta de tres capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida. (Suárez, 2012)

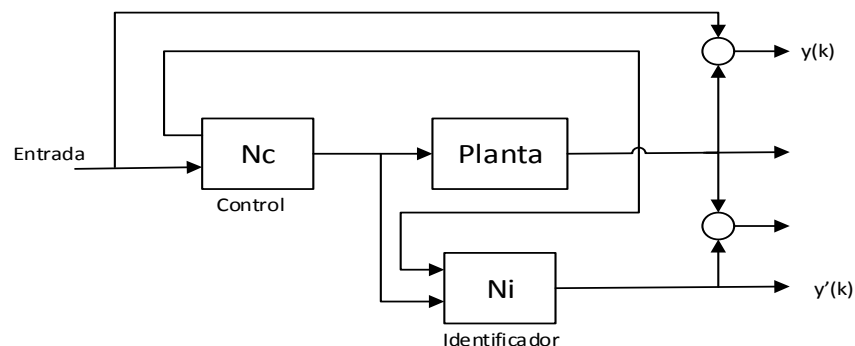


Figura 1.4 - Diagrama de bloques control neuronal
Fuente: Autores - (Suárez, 2012)

1.1.5 CONTROL ADAPTATIVO

Este tipo de estrategia de control, se basa en la mejora de la linealización local reconociendo la presencia de no linealidades, en el cual el estado del proceso es separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferentes velocidades.

Estos controladores pueden cambiar su comportamiento cuando existen cambios en el sistema y en la presencia de perturbaciones. (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011)

Dentro de los tipos de sistemas más comunes encontramos: (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011)

- Control adaptativo programado
- Control adaptativo con modelo de referencia
- Control adaptativo auto sintonizable.

Se puede decir que dentro de los parámetros del controlador existe un ajuste de modo automático para la actualización con respecto a las características del proceso que se desea controlar. (Sirgo Blanco, 2009)

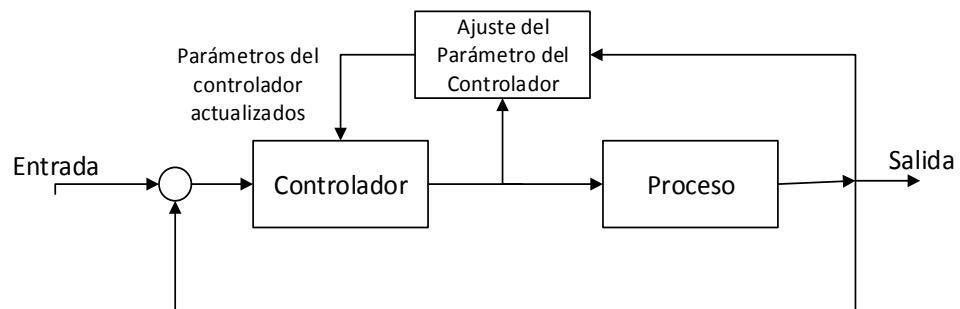


Figura 1.5 - Diagrama de bloques control adaptativo

Fuente: Autores - (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011)

Estos controladores permiten tomar alternativas en el caso de que exista ocurrencia y se conozcan los problemas y las posibles soluciones. (Sirgo Blanco, 2009)

1.1.6 CONTROL ALGORITMO GENÉTICO

Es un tipo de control inteligente que utiliza la ley del control PID. Generalmente, son métodos adaptativos que se utilizan en la resolución de problemas buscando la optimización. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

Se basan en fenómenos naturales como: cruce, selección, mutaciones, etc., manteniendo una analogía directa con la naturaleza y sus fenómenos. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

Estos algoritmos pueden utilizarse para el cálculo fuera de las constantes del control PID. Son algoritmos robustos que pueden resolver problemas que inclusive con otras técnicas de control no son solucionables. Se utilizan también cuando se requieren realizar pruebas en poblaciones aleatorias, pruebas por cada individuo. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

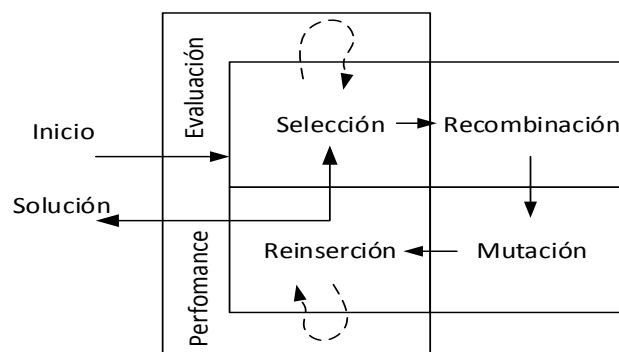


Figura 1.6 - Diagrama de bloques control algoritmo genético

Fuente: Autores - (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

Para modelar este tipo de sistema de control se utiliza la función costo o fitness. Estos algoritmos de recocido se ejecutan dentro de un lazo donde su ciclo finaliza cuando se cumple alguna meta deseada. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

1.1.7 CONTROL PAR CALCULADO

Es un tipo de control más sofisticado que se utiliza en robótica humana, en las que se exigen evoluciones rápidas del robot con una gran precisión dinámica. Se basan en el seguimiento y aplicación de consignas naturales de movimientos y patrones funcionales. (Aguilar Larrarte, 2011)

Este método exige el cálculo del modelo dinámico en línea y el conocimiento de los valores numéricos de parámetros inerciales y de frotamiento, pero el problema del cálculo en línea está resuelto prácticamente con los métodos de modelización. (Aguilar Larrarte, 2011)

Esta estrategia de control puede utilizar una lógica difusa para calcular la compensación requerida por el Control Par Calculado clásico ante variaciones en los parámetros del robot tales como masa o fricción. (Orozco Soto & Ramos Fernandez, 2012)

Existen mejoras de este tipo de control que consisten en la adaptación de la parte proporcional-derivativa (PD) de la estructura del controlador en lugar de adaptar la parte de la compensación de las dinámicas del robot. (Orozco Soto & Ramos Fernandez, 2012)

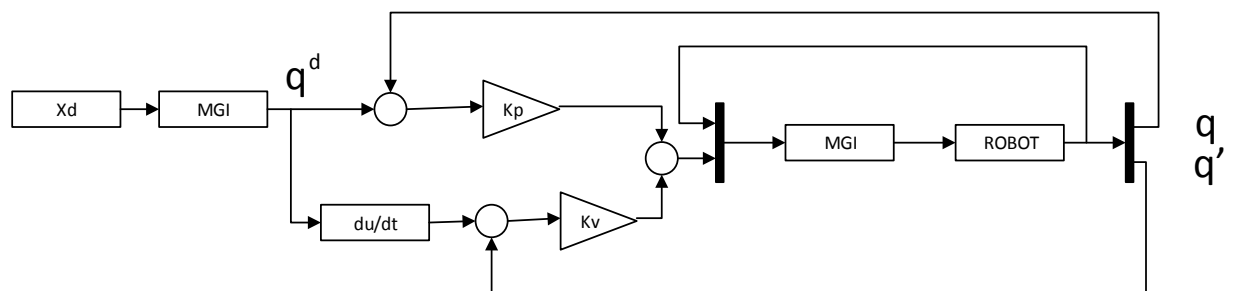


Figura 1.7 - Diagrama de bloques control par calculado

Fuente: Autores - (Orozco Soto & Ramos Fernandez, 2012)

1.1.8 CONTROL SENO - COSENO HIPERBÓLICO

Es un algoritmo de control de posición, basado en funciones hiperbólicas. Generalmente, tiene una gran utilidad en robótica. (Espinosa Maya, Barahona Avalos, & Reyes Cortéz, 2011)

Estos controladores, están formados por tres componentes: (Espinosa Maya, Barahona Avalos, & Reyes Cortéz, 2011)

- ✓ una parte proporcional basada en un seno y coseno hiperbólico,
- ✓ una parte derivativa basada en un seno hiperbólico y
- ✓ una compensación de gravedad,

La ecuación para este algoritmo de control es:

$$\tau = K \sinh(q') \cosh(q') K \sinh(q) g(q) \quad (2)$$

Donde:

K: Constante de proporcionalidad

q: Ángulo de posición articular del sistema

g: Matriz de ganancia

τ : tiempo de respuesta del sistema

Se constituyen para algoritmos más eficaces y fáciles de sintonizar que los controladores PD y PID, por su utilidad práctica.

Son también algoritmos de control de posición con demostración de estabilidad asintótica global del sistema de lazo cerrado controlador-robot. (Espinosa Maya, Barahona Avalos, & Reyes Cortéz, 2011)

1.1.9 CONTROL DE ESTRUCTURAS VARIABLES

Los controladores de estructura variable son un tipo de sistemas no lineales en los que la dinámica del sistema en lazo cerrado adopta dos o más estructuras diferentes según el valor de la entrada de control. (Aguilar, 2012)

Estos controladores presentan condiciones de robustez, un modelo de este tipo de controladores son los de modo deslizante, en los cuales la dinámica del sistema es atraída hacia una superficie en el espacio de estado conocida como superficie de deslizamiento. (Aguilar, 2012)

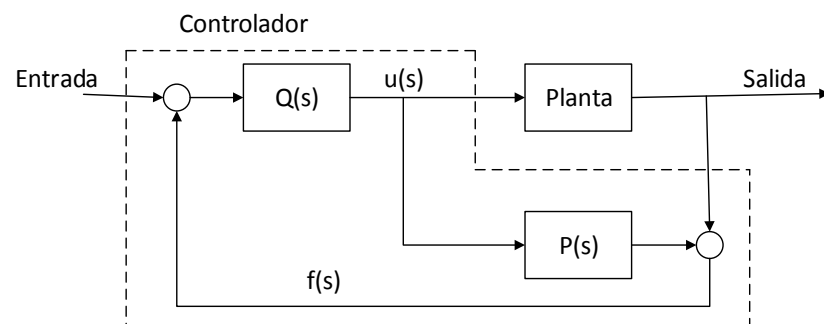


Figura 1.8 -Diagrama de bloques control de estructuras variables

Fuente: Autores - (Aguilar, 2012)

La característica fundamental para su aplicación en los sistemas de control se da cuando se satisfacen ciertas condiciones, la dinámica del sistema en lazo cerrado se desliza sobre esta superficie, permaneciendo insensible a variaciones en los parámetros de la planta y a las perturbaciones externas. (Garelli, 2013)

Se destaca en estos controles, el Control por modo deslizante de sistemas lineales, control de sistemas no lineales. (Garelli, 2013)

1.1.10 CONTROL ROBUSTO

Este tipo de controladores generalmente se aplican cuando las técnicas clásicas no generan un método de diseño adecuado para los sistemas multivariables cuando existe variaciones del sistema a controlar. (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011)

Se constituyen en técnicas sencillas de aplicación para sistemas como: Aeronáuticos, Aeroespaciales, Estructuras Mecánicas, Columnas de destilación, etc.

El Objetivo del control robusto es el de proporcionar técnicas de control válidas para sistemas multivariables que aseguren como mínimo la estabilidad del sistema aun cuando el modelo utilizado para el diseño no se corresponda exactamente con el sistema real. (Espinosa & Moya, 2011)

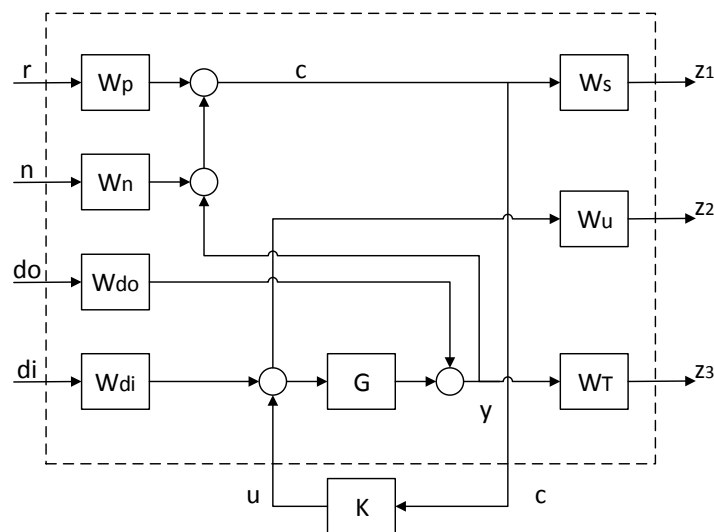


Figura 1.9 Diagrama de bloques control robusto
Fuente: Autores - (Espinosa & Moya, 2011)

Estos controladores consideran los problemas existentes en el modelo, que son tolerables por un controlador lineal y que no sea sujeto de variación en el tiempo, estos controladores están relacionadas con los procesos químicos, robótica, estructuras flexibles y aeronáutica. (Ramírez Ramos, 2012)

1.1.11 CONTROL PID.

El regulador industrial de más amplio uso y el más importante en los procesos industriales es el PID, que por sus siglas significa Proporcional Integral Derivativo, se ha convertido en la estrategia de control más utilizada a nivel industrial. Se estima que aproximadamente el 90% de lazos de control existentes utilizan con PID, debido a su estrategia simple y efectiva. (Ipanaqué Alama, 2012)

A este regulador industrial se le conoce como un controlador realimentado que tiene la función de hacer que el error en estado estacionario, que está entre la señal de referencia y la de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, esto se da mediante el uso de la acción integral(I). También este controlador puede anticipar el futuro mediante la acción derivativa(D) la cual presenta un efecto predictivo sobre la salida del proceso. (Améstegui Moreno , 2011)

Estos controladores, Proporcional Integral Derivativo, son adecuados para la resolución de varios problemas de control de muchas aplicaciones industriales, principalmente cuando la dinámica del proceso lo permite, ya sean procesos descritos por dinámicas de primer y segundo orden, como en el caso de un proceso continuo de la molienda de crudo y de clinker en el proceso de producción de cemento en los cuales los requerimientos de desempeño son modestos.

Existen varias formas de controladores PID proveídos por los fabricantes, tal es el caso de sistemas del tipo “*stand alone*” que tienen la capacidad para controlar uno o varios lazos de control. Los PID son controladores importantes en los sistemas de control distribuido, debido a que proporcionan regulación a nivel local de manera eficaz.

Al momento, los controladores PID disponen de una serie de técnicas de conmutación de modos de control y el anti-windup del integrador, las cuales en el pasado se consideraban como secretos de los fabricantes. (Améstegui Moreno , 2011)

Los algoritmos en la actualidad se combinan con funciones lógicas y secuenciales para adecuarse a los requerimientos de los modernos sistemas de control y automatización industrial, para el óptimo control de temperatura, flujo, distribución de energía, concentraciones, etc. (Améstegui Moreno , 2011)

Los controladores Proporcional Integral Derivativo son a menudo usados en el nivel de control más bajo, inferiores al de algunos dispositivos como PLCs, supervisores, y sistemas de monitoreo. A pesar de eso, estos controladores se convierten en una herramienta básica para el desarrollo de las actividades de los Ingenieros de Control

Estos controladores PID generan un tratamiento para la respuesta de estado estacionario como la respuesta transitoria, y proporciona una solución genérica y eficiente a los problemas de control en empresas industriales. (Briones Sebastián, 2014)

1.1.11.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL.

Este control nos da una respuesta que es proporcional al error de control, esta parte del control es la base de un PID, ya que no puede existir derivativo o integral sin tomar en cuenta la parte proporcional del error. (Mazzone, 2012) (Golnaraghi & Kuo, 2010).

1.1.11.2 CONTROL DERIVATIVO.

Su principal propósito es mejorar la estabilidad de lazo cerrado. La acción de control forma una señal proporcional que controla a la derivada de la señal de error, agregando sensibilidad al sistema y produce un efecto de estabilidad relativa. De tal manera, que es posible 'conocer' las características dinámicas de este controlador, ya sea de crecimiento o decrecimiento, a este efecto generado se denomina acción anticipada ya que genera una corrección del error antes de que supere los rangos permisibles (Mazzone, 2012) (Dorf & Bishop, 2012).

1.1.11.3 CONTROL INTEGRAL.

Este controlador tiene como característica que la acción correctiva se basa en la integral del error, entonces, este genera una señal de control que va en función de la 'historia' de la señal de error, obteniendo una señal diferente cero, aunque la señal de error sea nula. En conclusión, ayuda a mejorar el error en régimen permanente a costa de estabilidad (Golnaraghi & Kuo, 2010) (Dorf & Bishop, 2012).

Con la acción de este control integral si existe un pequeño error positivo, producirá un incremento en la señal de control y por ende si existe un error negativo nos dará una señal decreciente sin importar cuan pequeño sea el error. (Améstegui Moreno , 2011)

La expresión analítica típica de este método viene dada por:

$$p = K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

K_p : constante de proporcionalidad

K_I : constante de integración

K_D : constante derivativa

Y la función de transferencia de este controlador es:

$$G_c(s) = K_1 + \frac{K_2}{s} + K_3s \quad (4)$$

K_1, K_2, K_3 : constantes del controlador PID

1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE TIPOS DE CONTROLADORES.

A continuación, en la siguiente tabla se describirá algunos tipos de controladores investigados:

Tabla 1.1 - Tabla comparativa ventajas y desventajas de los tipos de controladores robustos

CONTROLADOR	VENTAJA	DESVENTAJA
CONTROL DIFUSO (FLC)	• Este tipo de controlador es utilizado principalmente para sistemas no lineales. • El controlador difuso a diferencia del PID se puede aplicar con los sistemas que tienen un cambio rápido de parámetros, lo que en PID requeriría el cambio de las constantes en el tiempo. • El controlador PID ofrece muy alto tiempo de establecimiento debido al comportamiento oscilatorio en el periodo transitorio, con respecto a un control difuso. (Driankov, Hellendoorn, & Reinfrank, 2013)	• Controlador PID tiene sólo tres parámetros para ajustar, en cambio, el controlador difuso tiene una gran cantidad de parámetros entre ellos es necesario hacer una buena elección de la base de reglas y parámetros de funciones de pertenencia. • Otra desventaja del controlador difuso es que el tiempo de cálculo es mucho más largo que el de un PID, a causa de las operaciones complejas como el empleo de la misma lógica difusa. • El controlador difuso no responde adecuadamente cuando la variable responde en función del tiempo. • El controlador PID produce la respuesta con un menor tiempo de espera y tiempo de subida en comparación con el controlador de lógica difusa • El control difuso no es preciso cuando se trabaja ha rangos altos. (Driankov, Hellendoorn, & Reinfrank, 2013)
CONTROL DE MATRIZ	• La principal ventaja con respecto a los otros	• La desventaja de un DMC es que el ancho de banda es

DINÁMICA (DMC)	controladores es que un control de matriz dinámica nos permite controlar distintas variables desde un solo dispositivo. • El control DMC tiene gran potencial para manejar sistemas con alta variabilidad en donde las posibilidades de obtener modelos basados en principios básicos son difíciles o cuando múltiples perturbaciones están presentes. (Cantero Vergara, Chamorro Coneo, & Palencia Díaz, 2010) (Palencia Díaz, 2010)	muy pequeño, debido a que es necesario un alto número de coeficientes para tener un buen desempeño, pero en la práctica hay un límite de coeficientes que pueden ser usados. • Los DMC no son eficaces cuando existen perturbaciones tipo rampa. • Tienen mala respuesta cuando se diseña para sistemas MIMO (Múltiple Entrada Múltiple Salida) interactivos. • Los modelos matemáticos utilizados en DMC con respecto a un controlador PID son mucho más complejos. (Cantero Vergara, Chamorro Coneo, & Palencia Díaz, 2010)
CONTROL PREDICTIVO	• La principal ventaja es que puede identificar las restricciones de entrada y salida del proceso • Este tipo de controlador se aplica en cualquier tipo de proceso, sin importar que este sea estable o inestable. • Se obtienen formulaciones multivariantes de forma natural, así mismo, nos permite compensar en caso de existir retardos. (Rodríguez Ramírez, 2011)	• Este tipo de controlador, salvo casos triviales, puede generar la resolución de métodos numéricos complejos y se dificultan más aun cuando existen restricciones. • Son utilizados generalmente cuando nuestro proceso tiene dinámica lenta. • Para la implementación de este tipo de controlador es necesario disponer de un modelo que se acerque lo más posible a la realidad. (Rodríguez Ramírez, 2011)
CONTROL NEURONAL	• Es utilizado para el control automático de procesos reales. • Este tipo de controlador es muy flexible ya que es	• La mayor desventaja de este controlador radica en el hardware que utilizamos debido a que la mayoría procesan los datos en serie,

	utilizado tanto para sistemas lineales o no lineales. • Es un controlador robusto que optimiza los procedimientos. (Suárez, 2012) • Tiene la capacidad de aprender en base a una etapa denominada de aprendizaje. (Torres)	mientras que para este tipo de controlador requiere en paralelo. • Se necesitan inicialmente reglas definitorias para construir la red. • Para un observador externo se torna muy complejo realizar cualquier tipo de cambio o corrección. (Torres)
CONTROL ADAPTATIVO	• Mejora de la linealización local reconociendo la existencia de no linealidades y adaptando sistemáticamente el controlador cuando la aproximación lineal se hace cuestionable. • Los parámetros se ajustan de modo automático para actualizarse con respecto a las características del proceso que se está controlando. (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011) • Control adaptativo auto sintonizable. • Permite tomar alternativa en el caso de que exista ocurrencia y se conozcan los problemas y las posibles soluciones. (Sirgo Blanco, 2009)	• Este controlador no funciona de manera eficaz si la señal de entrada tiene pobre información. • Para el diseño se inician con parámetros conocidos y luego los sustituye por estimados. (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011)
CONTROL ALGORITMO GENÉTICO	• Se basan en fenómenos naturales como: cruce, selección, mutaciones, etc., manteniendo una analogía directa con la naturaleza y sus fenómenos. • Son algoritmos robustos que pueden resolver problemas que inclusive con	• Se basa en un tipo de control inteligente que utiliza la ley del control PID. • Este control realiza actividades específicas y finaliza su lazo cuando cumple con la actividad. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)

	otras técnicas de control no son solucionables. • Se utilizan también cuando se requieren realizar pruebas en poblaciones aleatorias, pruebas por cada individuo. (Hoyos, Cardona, & Arango, 2013)	
CONTROLADOR PAR CALCULADO	• Es un tipo de control más sofisticado que se utiliza en robótica humana, en las que se exigen evoluciones rápidas del robot con una gran precisión dinámica. (Aguilar Larrarte, 2011) • Se basan en el seguimiento y aplicación de consignas naturales de movimientos y patrones funcionales. (Orozco Soto & Ramos Fernandez, 2012)	• Para este tipo de modelo es necesario conocer parámetros de frotamiento e inerciales, además de exigir que se establezca un modelo matemático dinámico. (Orozco Soto & Ramos Fernandez, 2012) • El error en rms comparado con otros controladores es mucho mayor. (Urrea & Kern, 2013)
CONTROL SENO COSENO HIPERBÓLICO	• Tiene una gran utilidad en robótica. • Se constituyen en algoritmos para eficaces y más fáciles de sintonizar que los controladores PD y PID, por su utilidad práctica. • Son también algoritmos de control de posición con demostración de estabilidad asintótica global del sistema de lazo cerrado controlador-robot. (Espinosa Maya, Barahona Avalos, & Reyes Cortéz, 2011)	• Para cumplir como un sistema tolerante a falla se necesita que este adquiera características de otros controladores. (Urrea & Kern, 2013)
CONTROL DE ESTRUCTURA VARIABLES	• Son sistemas no lineales en los que la dinámica del sistema en lazo cerrado adopta dos o más estructuras	• En este controlador tiene el inconveniente funciona a altas frecuencia y esto genera inconvenientes en los

	diferentes según el valor de la entrada de control. • Un modelo de este tipo de controladores son los de modo deslizante, en los cuales la dinámica del sistema es atraída hacia una superficie en el espacio de estado conocida como superficie de deslizamiento. • El control por modo deslizante de sistemas lineales se utiliza también para el control de sistemas no lineales. (Aguilar, 2012)	actuadores. (Urrea & Kern, 2013) • Se deben satisfacer ciertas condiciones, como la dinámica del sistema en lazo cerrado que desliza sobre esta superficie, permaneciendo insensible a variaciones en los parámetros de la planta y a las perturbaciones externas. (Garelli, 2013)
CONTROL ROBUSTO	• Este tipo de controladores son aplicables cuando las técnicas clásicas no proporcionan un método de diseño adecuado para sistemas multivariados en presencia de variaciones del sistema a controlar. (Rodríguez Rubio & López Sánchez, 2011) • Aseguren como mínimo la estabilidad del sistema aun cuando el modelo utilizado para el diseño no se corresponda exactamente con el sistema real. • El control robusto abarca los problemas en los que se considera variaciones en el modelo, que sean tolerables por un controlador lineal y que no sea sujeto de variación en el tiempo. (Ramírez Ramos, 2012)	• Funcionan bien en simulaciones, pero generalmente por existir diferencias con respecto al comportamiento real generando notables inconvenientes en la práctica. (Espinosa & Moya, 2011) • Para que este tipo de controlador sea eficiente se debe evaluar el efecto que tendrá este sobre la aplicación y así mismo, determinar la información de fuentes de incertidumbre que se puedan presentar. (Ramírez Ramos, 2012)

CONTROL PID	• Simplicidad de aplicación y manejo • Fácil utilización con el tiempo, permite actualizaciones y sintonización con el ajuste del control (Améstegui Moreno , 2011) • Aplicable en general a cualquier proceso industrial en donde se requiera mejorar el control de variables • Tecnología probada y disponible, se acopla a los dispositivos existentes en el proceso o sistema. • Puede proporcionar una alta velocidad de respuesta • A través de su aplicación se puede evaluar mayor cantidad de variables (Ipanaqué Alama, 2012)	• Con proceso altamente estocásticos se vuelve ineficiente, cuando se manejan muchas variables en el sistema. • Es simple en su estructuración. • La robustez y estabilidad del sistema puede afectarse cuando existen perturbaciones (Ipanaqué Alama, 2012)para sistemas complejos no es muy óptimo • Limita el control en plantas inestables (Améstegui Moreno , 2011)
-------------	--	---

Fuente: Autores

1.3 APLICACIONES DE LOS CONTROLADORES PID EN LOS SISTEMAS DE MOLIENDA DE CRUDO.

En el pasado, cuando los molinos de cemento basaban su funcionamiento en circuito abierto, las instalaciones se realizaron siempre con accionamiento manual, sin ningún sistema de control. (UCEM-CEM , 2015)

En este tipo de circuito, la tarea del operador en la sala de control se redujo a un mínimo, es decir, aumento o disminución a la salida de molino según la finura del producto acabado.

En realidad, fue un poco más complicado, pero no había la necesidad imperiosa de desarrollar herramientas de control como en los actuales momentos. (Industrias Guapán, 2015)

En efecto, las plantas de molienda en circuito cerrado se han vuelto cada vez más complejas con la incorporación de los conceptos de eficiencia y eficacia, lo que los hace pensar sobre todo en rentabilidad para la organización, haciendo que los procesos industriales sean de mejor manera controlados. (Industrias Guapán, 2015)

En el caso de los molinos de crudo de los procesos de fabricación por vía seca se han considerado instalaciones de molienda en circuito cerrado, aprovechando la temperatura y calor de los gases del horno de clinker para secar el exceso de humedad que traen consigo los materiales en este caso, calizas, margas, arcillas, mineral de hierro, etc. que forman parte de la dosificación y molienda para los productos intermedios en la fabricación de cemento. (Industrias Guapán, 2015)

La incorporación de controladores PID a los sistemas de molienda de crudo, tienen como objetivo el controlar variables importantes para el correcto funcionamiento, tal es el caso de la temperatura a la entrada de material y gases. El PID se ha considerado en este caso un sistema antiguo, bajo la teoría de control clásico que ofrece un recurso de utilización versátil, fácil de usar e implementar que por motivos de que la variable temperatura es lenta (reacción frente a cambios son en mayor tiempo), el control PID tiene un buen desempeño en el control para este tipo de variables. (Briones Sebastián, 2014)

1.4 RESPUESTA TRANSITORIA

Se puede afirmar que los sistemas físicos reales que forman parte de la ingeniería de control contienen inercia la cual los impide seguir la señal de entrada de manera instantánea, por cual existe un período transitorio que es necesario conocer, así como el tiempo requerido para llegar al estado estacionario, cuando nos referimos a respuesta transitoria es a la que va del estado inicial al estado final, esta se presenta cuando existe un cambio en la entrada y desaparece después de un breve intervalo. (Vázquez Lòpez, 2005)

1.4.1 SEÑALES DE ENTRADA

Existe una serie de señales de entrada que comúnmente ocurren en la vida real, las cuales tenemos: el impulso, el escalón, la rampa y la parábola.

Estas señales tienen un comportamiento en el tiempo, que tiene el mismo ante alguna variación en sus entradas. (Vázquez Lòpez, 2005)

Con estas señales de prueba, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

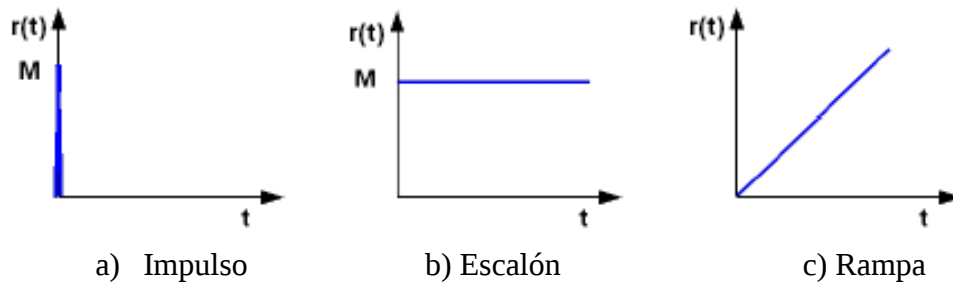


Figura 1.10 - Señales de entrada
Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

1.4.2 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

Estos sistemas son muy importantes dentro de la ingeniería de control, debido a la frecuencia con la que se presentan en la industria, y por el hecho de que muchos sistemas de orden superior pueden ser aproximados a procesos de este tipo.

(Golnaraghi & Kuo, 2010)

Consideramos el sistema de primer orden, el cual representa un circuito RC sistema térmico o algo similar. A continuación, tenemos la ilustración 1, nos representa un diagrama de bloques simplificado. La relación entrada-salida se obtiene mediante.

(Vázquez Lòpez, 2005)

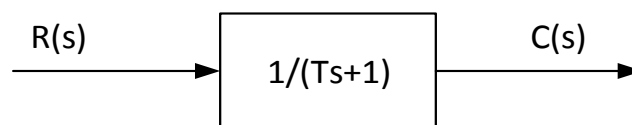


Figura 1.11 - Gráfico que representa un circuito RC
Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

Tenemos la relación entrada salida. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$\frac{1}{Ts + 1} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (5)$$

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} R(s) \quad (6)$$

Analizamos la respuesta del sistema en relación a la función de escalón unitario

Puesto que la transformada de Laplace de la función de escalón unitario es $\frac{1}{s}$

Sustituyendo R(s) obtenemos que la función escalón unitario es: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$R = \frac{1}{s} \quad (7)$$

Sustituyendo se obtiene: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (8)$$

Realizamos la transformada inversa de Laplace de la ecuación y obtenemos:

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}; \text{ para } t \geq 0 \quad (9)$$

La ecuación que se planteó anteriormente muestra que la salida c(t) es inicialmente cero y al final se vuelve unitaria. Hay que tener en cuenta que una de las características de la curva de respuesta exponencial c(t) es que, para t=T el valor de c(t)= 0.632 o que la respuesta c(t) alcanza 63.2% de su cambio total. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

Se puede apreciar la función matemática de esta manera:

$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0.632 = 63.2\% \text{ cambio total} \quad (10)$$

Se puede observar y analizar que mientras más pequeña sea la constante de tiempo T, más rápida va a ser la respuesta del sistema.

La curva de la respuesta exponencial tiene otra característica es que la pendiente de la línea de tangente en t= 0 es $\frac{1}{T}$. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

Tenemos:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}}] t = 0 = \frac{1}{T} \quad (11)$$

La ecuación anterior no muestra que la pendiente de la curva de respuesta c(t) disminuye en forma independiente de 1/T en t = 0

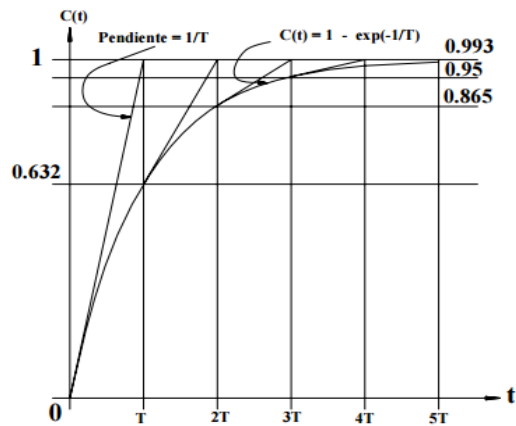


Figura 1.12 - Gráfica que nos indica la respuesta transitoria de primer orden
Fuente: (Kuo Benjamin, 2013)

Observamos en la figura 12 como está la curva de respuesta exponencial $c(t)$. En una constante de tiempo, la curva de respuesta exponencial ha ido de 0 a 63.2% del valor final. En dos constantes de tiempo, la respuesta alcanza 86.5% del valor final. En $t = 3T, 4T$ y $5T$, la respuesta alcanza 95, 98.2 y 99.3%, respectivamente, del valor final. Por tanto, para $t = 4T$, la respuesta permanece dentro del 2% del valor final. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

En la tabla 2 se mostrará la respuesta transitoria de primer orden de las señales de entradas más comunes (impulso, escalón y rampa) de una función de transferencia aleatoria simulados en Matlab y Simulink:

Tabla 1.2 - Comparación simulación sistema primer orden

Función de Transferencia:	
$\frac{5}{s + 1}$	
MATLAB	SIMULINK
Programa: $K = 5;$ $\tau = 1;$ $\text{num} = K;$ $\text{den} = [\tau \ 1];$ $t = [0:0.1:10];$ $\text{ramp} = t;$ $\text{ye} = \text{step}(\text{num}, \text{den}, t);$ $\text{yr} = \text{lsim}(\text{num}, \text{den}, \text{ramp}, t);$ $\text{yi} = \text{impz}(\text{num}, \text{den}, t);$ $\text{subplot}(3,1,1)$ $\text{plot}(t, \text{ye});$	Programa:

```

title('Respuesta a escalon unitario');
grid;
subplot(3,1,2)
plot (t,yr);
title('Respuesta a rampa unitaria');
grid;
subplot(3,1,3);
plot (t,yi);
title ('Respuesta a impulso');
grid;

```

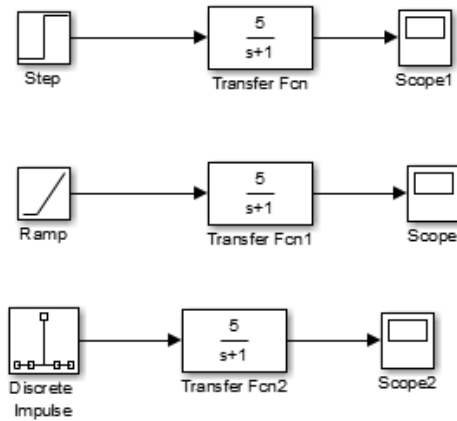


Figura 1.13 - Programa simulink sistema de primer orden

Fuente: Autores

Escalón:

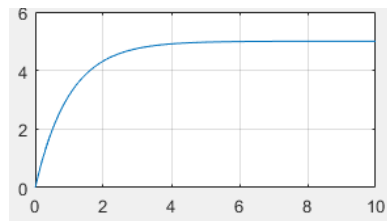


Figura 1.14 - Simulación matlab respuesta escalón

Fuente: Autores

Escalón:

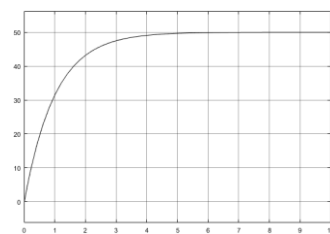


Figura 1.15 - Simulación simulink respuesta escalón

Fuente: Autores

Rampa:

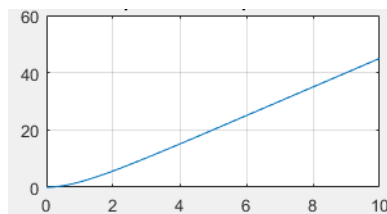


Figura 1.16 - Simulación matlab respuesta rampa

Fuente: Autores

Rampa:

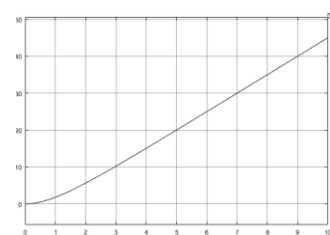


Figura 1.17 - Simulación simulink respuesta rampa

Fuente: Autores

Impulso:

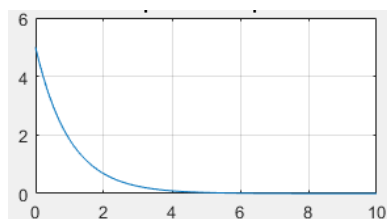


Figura 1.18 - Simulación matlab respuesta impulso

Fuente: Autores

Impulso:



FIGURA 1.19 - Simulación simulink respuesta impulso

Fuente: Autores

Fuente: Autores

1.4.3 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Un sistema de segundo orden tiene amplia variedad de respuesta a diferencia de los sistemas de primer orden por lo que depende de dos parámetros que son: factor de amortiguamiento ξ y frecuencia natural no amortiguada w_n , el producto ξw_n se le conoce como atenuación del sistema (σ). (Vázquez Lòpez, 2005)

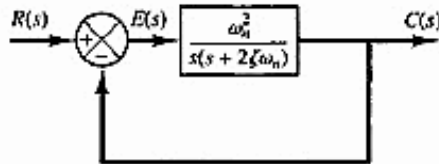


Figura 1.20 - Diagrama de bloques de un sistema de segundo orden

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

Tenemos que la función de transferencia de un sistema de segundo orden está dada por: (Kuo Benjamin, 2013)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (12)$$

Observamos la respuesta al escalón unitario

Puesto que la función de transferencia tiene dos polos y no tiene ceros. Sus polos son: (Vázquez Lòpez, 2005)

$$-\xi w_n \pm j w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (13)$$

A continuación, en la figura 21 y figura 22 se muestra la ubicación de los polos y su correspondiente respuesta al escalón unitario, considerando ($w_n = 1$)

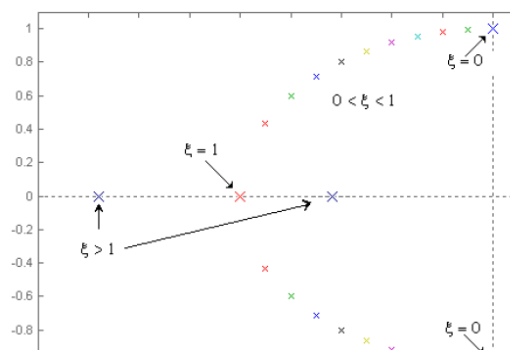


Figura 1.21 - Polos en plano complejo s

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

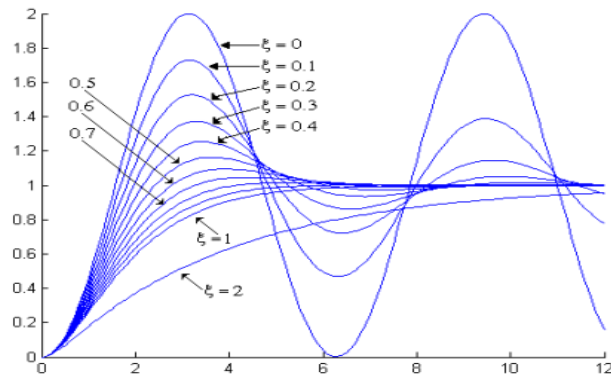


Figura 1.22 - Respuesta del sistema de segundo orden

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

El valor de ξ toma diferentes valores dependiendo de su ubicación en el plano s . (Vázquez Lòpez, 2005)

1) Si $\xi = 0$, los polos son imaginarios conjugados, el sistema se denomina críticamente estable y la respuesta presenta oscilaciones sostenidas. (Vázquez Lòpez, 2005)

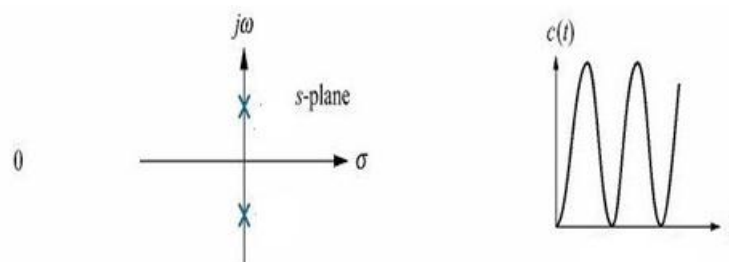


Figura 1.23 - Diagrama de bode ($\xi = 0$)

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

2) Si $0 < \xi < 1$, los polos son complejos y conjugados y se dice que el sistema es sub-amortiguado (Vázquez Lòpez, 2005)

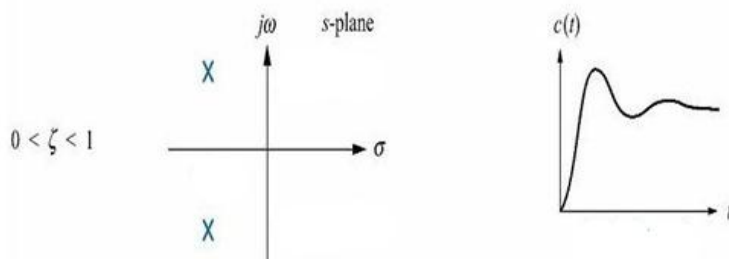
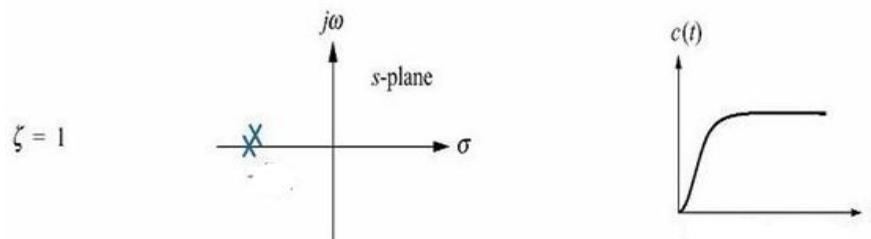


Figura 1.24 - Diagrama de bode ($0 < \xi < 1$)

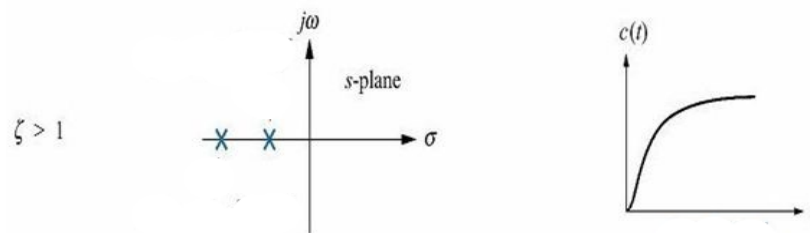
Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

3) Si $\xi = 1$, los polos son reales y repetidos, el sistema se denomina críticamente amortiguado (Vázquez Lòpez, 2005)

Figura 1.25 - Diagrama de bode ($\zeta = 1$)

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

4) Si $\zeta > 1$, los polos son reales y distintos, el sistema se denomina sobre-amortiguado (Vázquez Lòpez, 2005)

Figura 1.26 - Diagrama de bode ($\zeta > 1$)

Fuente: (Vázquez Lòpez, 2005)

En la siguiente tabla se mostrará la respuesta transitoria de primer orden de las señales de entradas más comunes (impulso, escalón y rampa) de una función de transferencia aleatoria simulados en Matlab y Simulink:

Tabla 1.3 - Comparación simulación sistema segundo orden

Función de Transferencia:	
$\frac{25}{s^2 + 0.5s + 2}$	
MATLAB	SIMULINK
Programa: <pre> num = [25]; den = [1 0.5 2]; t = [0:0.01:30]; [y,x,t] = step(num,den,t); subplot(3,1,1); plot(t,y); grid; title('Respuesta a un escalón unitario de G(s)'); xlabel('Time(s)') ylabel('Amplitude') % ----- Respuesta a impulso ----- subplot(3,1,3); </pre>	Programa:

Figura 1.27 - Programa simulink sistema de segundo orden

Fuente: Autores

```

impulse(num,den);
grid;
title('Respuesta a un impulso unitario de
G(s)');
% ----- Respuesta a una rampa -----;
r=t;
y=lsim(num,den,r,t);
subplot(3,1,2);
plot(t,y);
grid;
title('Respuesta a una rampa unitaria de
G(s)');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Amplitude');

```

Escalón:

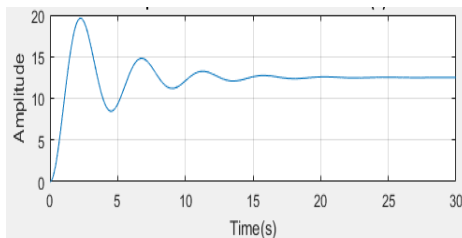


Figura 1.28 - Simulación matlab respuesta escalón

Fuente: Autores

Escalón:

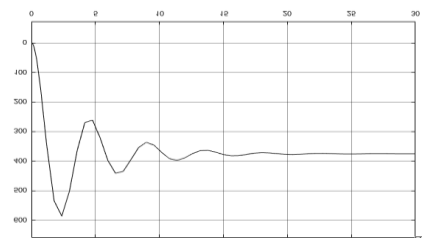


Figura 1.29 - Simulación simulink respuesta escalón

Fuente: Autores

Rampa:

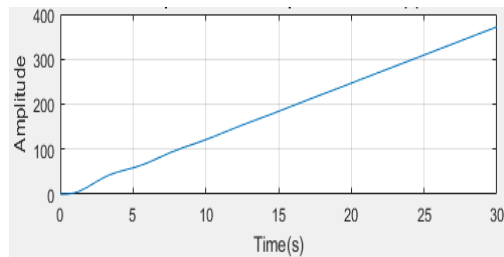


Figura 1.30 - Simulación matlab respuesta rampa

Fuente: Autores

Rampa:

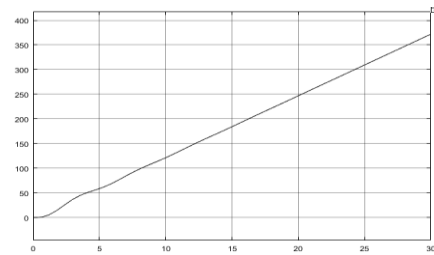
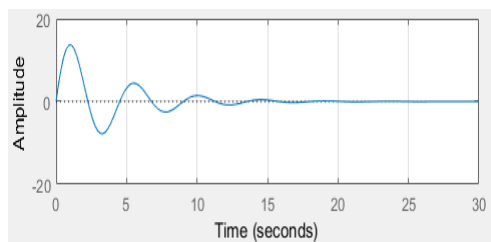


Figura 1.31 - Simulación simulink respuesta rampa

Fuente: Autores

Impulso:



Impulso:

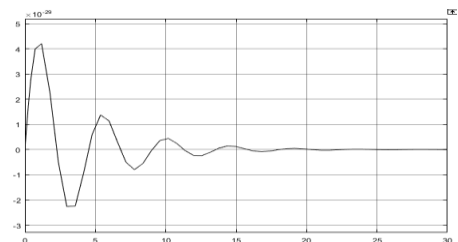


Figura 1.32 - Simulación matlab respuesta impulso
Fuente: Autores

Figura 1.33 - Simulación simulink respuesta impulso
Fuente: Autores

Fuente: Autores

1.4.4 SISTEMAS DE ORDEN SUPERIOR

La respuesta de los sistemas de orden superior es la suma de las respuestas de primer y segundo orden. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

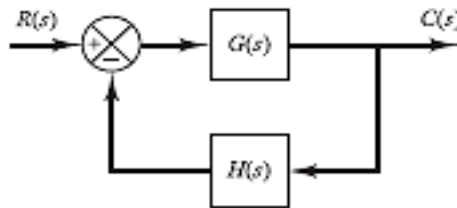


Figura 1.34 - Respuesta transitoria de los sistemas de orden superior
Fuente: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

La función de transferencia en sistemas de orden superior en lazo cerrado está dada por: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$\frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (14)$$

$G(s)$ y $H(s)$ se obtienen como cocientes de polinomios en s (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$G(s) = \frac{p(s)}{q(s)} \quad \text{y} \quad H(s) = \frac{n(s)}{d(s)} \quad (15)$$

Donde $p(s)$, $q(s)$, $n(s)$, $d(s)$, son polinomios en s .

Sustituyendo en la ecuación de función de transferencia tenemos (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$\frac{p(s)d(s)}{q(s)d(s) + p(s)n(s)} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (16)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (m \leq n) \quad (17)$$

Es preciso y adecuado realizar una factorización del polinomio del denominador para la respuesta transitoria, una vez factorizados el numerador y el denominador, se escribe como: (Ogata, 2010)

$$\frac{K(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (18)$$

A continuación, tendremos cómo se comporta el sistema para la respuesta a una entrada escalón unitario, considerando que todos los polos en lazo cerrado son reales y distintos. (Ogata, 2010)

$$C(s) = \frac{a}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{s + p_i} \quad (19)$$

Donde a_i es el residuo del polo en $s = -p_i$

Si existe un cero en lazo cerrado que está cerca de un polo en lazo cerrado entonces tendremos que el residuo en este polo es pequeño y el coeficiente del término de respuesta transitoria que corresponde a este polo se vuelva pequeño, un par polo-cero cercanos entre sí se anulan efectivamente uno al otro. Si un polo se encuentra localizado muy lejos del origen, su residuo puede ser pequeño. (Ogata, 2010)

1.5 SISTEMAS SISO

Es un sistema que consta únicamente de una señal de entrada y una señal de salida: (single input and single output).

El objetivo de este tipo de sistemas de control es presentar estructuras de control que extienden los métodos de diseño vistos, para tratar en mayor detalle la compensación exacta de ciertas perturbaciones que se determinan en el proceso, el seguimiento asintótico de señales de referencia particulares y la compensación de limitaciones en los actuadores. (Ogata, 2010)

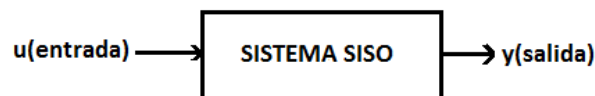


Figura 1.35 . Diagrama de bloque de un sistema siso
Fuente: (Ogata, 2010)

CAPÍTULO 2: CAPÍTULO II: ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MOLINO DE CRUDO.

2.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

2.1.1 ANTECEDENTES PLANTA INDUSTRIAS GUAPÁN.

La Planta Industrial Guapán en la actualidad, perteneciente a la Unión Cementera Nacional UCEM C.E.M., se constituyó en un inicio con un capital social de \$25`000.000,00 de Sucres, siendo sus accionistas la Caja del Seguros Social, hoy Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social IESS, Banco Nacional de Fomento, Centro de Reconversión Económica del Austro y los Consejos Municipales de Azogues, Biblián y Cuenca. (Industrias Guapán, 2015)

Para el año 2012 la composición del capital social, fue de 99,82% del Fideicomiso Mercantil Alianza Cementera Nacional y el 0,18% a la Empresa Pública Cementera del Ecuador. A mediados de 2013 el total de acciones pasó a ser del Ministerio de Industrias y Productividad. Posteriormente esta Cartera de Estado le cedió el total del paquete accionario a la Empresa Pública Cementera del Ecuador EPCE, quien, a su vez en Junta General de Accionistas, aprobó funcionar Cementos Chimborazo C.A. e Industrias Guapán S.A., para formar la Unión Cementera Nacional, UCEM C.E.M. (Industrias Guapán, 2015)

A partir del mes de septiembre del 2016, el mayor accionista pasa a ser el Socio YURA, perteneciente al grupo Gloria, con un capital accionario del 63%, que engloba a las plantas de Guapán y Chimborazo.

La Planta Industrial Guapán, con una capacidad instalada de 1000 toneladas métricas de Clinker por día, está localizada en la parroquia Guapán, cantón Azogues, provincia del Cañar; produce cemento portland puzolánico, en concordancia con la Norma INEN 490. (Industrias Guapán, 2015)

Las zonas a las que llega con la comercialización del producto son: Provincias de Azuay, Cañar, Loja, Zamora Chinchipe y Morona Santiago. (Industrias Guapán, 2015)

2.1.2 LA EMPRESA

La Unión Cementera Nacional, UCEM C.E.M., se constituyó con el principal objetivo de incrementar la participación en el mercado nacional con la vinculación de las plantas industriales, Guapán y Chimborazo, reflejando en la industria cementera nacional una mayor capacidad de producción y venta; esta creación se encuentra

inscrita y publicada en el Registro Mercantil del Cantón Riobamba con fecha 18 de noviembre de 2013. (Industrias Guapán, 2015)

La sede principal de la UCEM C.E.M., se encuentra ubicada en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, con oficinas en las Ciudades de Azogues, Loja y Quito. (Industrias Guapán, 2015)

Con la integración de estas plantas industriales, y con el aporte de capital del Grupo Gloria, socio mayoritario, a través de inversión en tecnología de punta se pretende incrementar considerablemente la capacidad de producción al orden de 1.600.000,00 toneladas anuales de Clinker en conjunto. (Industrias Guapán, 2015)

2.1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO POR VÍA SECA

En la Planta industrial de Guapán, el proceso de fabricación de cemento es por vía seca y corresponde a una secuencia continua de producción dividida en siete etapas: (Industrias Guapán, 2015)

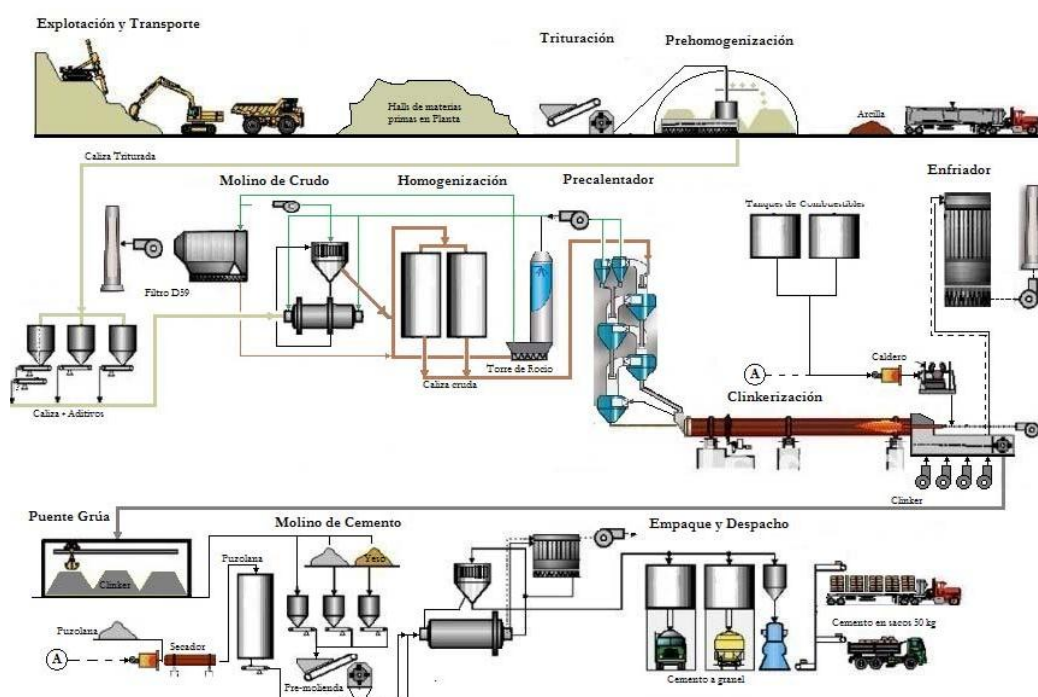


Figura 2.1 - Diagrama del proceso de fabricación de cemento por vía seca en la planta industrial Guapán de la UCEM-CEM

Fuente: Archivos Guapán – (Industrias Guapán, 2015)

2.1.4 TRITURACIÓN

El proceso de fabricación se inicia en esta etapa, con la disminución del tamaño de las rocas de materia prima abastecida desde las canteras, desde tamaños de 1000 mm en la entrada hasta partículas menores a 25 mm. a la salida. (UCEM-CEM , 2015)

2.1.5 PRE-HOMOGENIZACIÓN

En esta etapa del proceso, se procura la homogeneización y el almacenamiento del material que ha sido triturado, antes de ser enviado a la etapa de molienda de crudo, con el fin de mejorar la composición y disminuir la variabilidad del material. (UCEM-CEM, 2015)

2.1.6 MOLIENDA DE CRUDO

La función principal del molino de crudo es de preparar el tamaño y la mezcla adecuada de las materias primas según el requerimiento de composición que necesite el cemento. En esta parte del proceso se realiza la dosificación de arcillas, calizas trituradas y correctivos de mineral de hierro (Flores, 2014) (Bermeo, 2014). El molino de crudo que actualmente está funcionando en UCEM-CEM es de tipo horizontal, tiene una longitud de 7,93 m dividido en dos cámaras de molienda y consta de un tubo de acero de 3,96 m de diámetro, que tiene una capacidad de aproximada de producción de 90 TMPH (Toneladas Métricas Por Hora); es accionado por un motor de 2500 HP (*Horse Power*), dicho motor tiene un consumo de 34,7 KWH (Kilovatio Hora) (Flores, 2014).

El molino está diseñado con una descarga central y dos entradas simultáneas que alimentan las cámaras del molino; para el material de alimentación y los gases calientes para la extracción de humedad del material. Cada una de las cámaras tiene una función específica, la primera prevé material desde los dosificadores y la segunda la retroalimentación de material grueso aun no procesado enviado por el separador de aire (Flores, 2014). El separador de aire es básicamente un ventilador de tiro movido por un motor eléctrico de 800 HP, siendo los gases filtrados mediante colectores ciclónicos en serie. (Flores, 2014).

Este molino tiene un dispositivo interno que mediante un muestreo verifica la finura del harina cruda, la que contiene un tamaño de partícula de aproximadamente 75 micras en el tamiz de 200 ASTM (*American Society for Testing Materials*) y la composición química mediante un análisis de rayos X. (Bermeo, 2014) Otra función adicional es evaporar la humedad de materia prima que esta alrededor del 12%, la misma que debe ser eliminada en la cámara de secado que tiene el mismo molino aprovechando los gases calientes provenientes del horno rotativo obteniéndose al final del proceso una humedad que este por debajo del 0,8%. (Bermeo, 2014)

Esta etapa del proceso tiene la particularidad de reducir las desviaciones en composición química y física que presenta la harina cruda, con la finalidad de mejorar

portland puzolánico tipo IP, con las características y especificaciones contempladas en la Norma INEN 490. (UCEM-CEM , 2015)

Se constituye de tres subprocesos:

1. Secador de Puzolana
2. Pre molienda
3. Molienda

2.1.9 ALMACENAMIENTO, EMPAQUE Y DESPACHO DEL CEMENTO

Esta etapa consta de dos ensacadoras rotativas de 2000 fundas de 50 kg de peso por hora cada una. Dispone igualmente de dos silos de hormigón que almacenan en conjunto 5000 toneladas métricas de cemento, listas para el expendio. (Industrias Guapán, 2015)

2.2 PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO. - EQUIPOS PRINCIPALES.

2.2.1 MOLINO DE BOLAS CON DESCARGA CENTRAL

El molino de bolas; es un equipo de tipo horizontal, de tecnología Fuller Co., conformado por un tubo de acero de 3,96 m de diámetro y una longitud de 7,93 m, consta de dos cámaras de molienda, y su capacidad de producción es de 90 toneladas métricas por hora; el accionamiento se da a través de un motor de 2500 HP, con un consumo específico de 34,7 Kwh/ton, y está diseñado para trabajar 6 días por semana y 24 horas al día. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

Una de las funciones adicionales de la molienda de crudo es evaporar el contenido de agua que trae la materia prima (calizas y arcillas), y tiene lugar en la cámara de secado utilizando para esto los gases provenientes de la torre de precalentador del horno rotativo. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

Además, posee dos cámaras de molienda con la disposición de un diafragma en la descarga central que permite disponer de entradas simultáneas a éstas, tanto para los gases calientes utilizados en el secado, así como para el material de alimentación.

A la primera cámara se alimenta material desde los dosificadores y a la segunda el material procedente de la recirculación de gruesos provocados por el separador de aire. El aire de barrido del molino utilizado para extraer del sistema un exceso de material polvoso de partículas micrométricas, es manejado por un ventilador de tiro accionado por un motor eléctrico de 800 HP y los gases son filtrados mediante colectores ciclónicos en serie. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

Para tener una idea más clara en el anexo x se detalla el diagrama de instrumentación más explícito de los parámetros y variables que afectan directamente al molino de crudo.

2.2.2 CIRCUITO DE MOLIENDA DE CRUDO. - DESCRIPCIÓN

El circuito del proceso de molienda de crudo para la fabricación del cemento se inicia simultáneamente con la dosificación de las materias primas a través de las tolvas de caliza, arcilla, mineral de hierro y; los gases provenientes del horno rotativo a una temperatura de 300⁰C aproximadamente. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

El intercambio térmico entre los gases y el material se da en la cámara de secado con una reducción de la humedad desde el 12 al 0,5%, con lo cual se facilita la molienda en las dos cámaras siguientes, que están conformadas por revestimientos de placas levadoras y material molturante en tamaños que van desde los 90 hasta los 18mm de diámetro, capaces de reducir el tamaño de las partículas a valores de micras, con porcentajes de material mayor a 75 micras por el orden de 14%. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

El circuito de molienda posee un separador de aire basado en fuerzas centrífugas y centrípetas provocadas por el accionamiento de ventiladores primarios y secundarios, que hace posible la clasificación del material con una granulometría deseada, y devuelven al sistema de molienda el material que no cumple con la especificación de fineza. También dispone de un separador estático complementado con ciclones, que permiten de igual manera la clasificación de partículas dentro de las especificaciones para el producto. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

La entrada de gases al circuito de molienda de crudo se da a través del accionamiento manual de dámpers o persianas de tipo mecánico, ejecutando el control de estos por parte de los operadores de la sala del panel central; por otra parte, la salida de gases del circuito se da a través del aire de barrido provocado por el ventilador de tiro del área, que extrae éstos a una temperatura de 70⁰C aproximadamente. (Industrias Guapán, 2015) (UCEM-CEM , 2015)

2.2.3 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA MOLIENDA DE CRUDO

En la siguiente figura se puede observar los materiales que entran al molino de crudo generalmente las proporciones de estas no son exactas debido a que varían a constantes controles de calidad durante la molienda



Figura 2.3 - Materia prima molino de crudo

Fuente: Archivos Guapán – (Industrias Guapán, 2015)

2.2.3.1 Caliza

Es una roca natural, constituida mayoritariamente por carbonato de calcio, además contiene dentro de su composición química óxidos de elementos como la sílice, aluminio, hierro, magnesio, sodio, potasio y otros elementos menores como azufre, fósforo, manganeso. (UCEM-CEM , 2015)

Es el componente mayoritario en la dosificación para producir la harina en la molienda de crudo y que a su vez constituirá la base para el proceso de clinkerización. (UCEM-CEM , 2015)

2.2.3.2 Arcilla

Es un material de correctivo utilizado en el proceso de fabricación del cemento, y que provee a la mezcla de crudo, elementos fundentes como los óxidos de aluminio y hierro, además de la sílice como constituyente mayoritaria. (UCEM-CEM , 2015)

2.2.3.3 Mineral de hierro

Al igual que la arcilla es un material correctivo constituido mayoritariamente por un material fundente en forma de óxido férrico. (UCEM-CEM , 2015)

2.3 CIRCUITOS DE MOLIENDA

2.3.1 ANTECEDENTES

En el pasado, se ha cobrado mucho interés la aplicabilidad del modelamiento y simulación en los procesos de molienda, debido a que se considera una operación unitaria con un alto consumo de energía. Este consumo se determina por las pérdidas de energía y el desgaste de los sistemas molidores. (UCEM-CEM , 2015)

En el caso de los molinos de crudo en las plantas de cemento, a más del consumo de energía es importante el aprovechamiento en circuito cerrado de los gases de los

hornos de Clinker, con los cuales se podrá disminuir la humedad de la materia prima que ingresa al molino y generar un proceso que permita disminuir las partículas de material hasta granulometría en micras en la preparación de la harina cruda para el proceso de clinkerización. (UCEM-CEM , 2015)

En el manejo del circuito de molienda por lo tanto es importante regular el ingreso y la temperatura de los gases dentro de un rango establecido, de tal manera de evitar paradas de los equipos por las seguridades especificadas en los tableros de control por el incremento de la temperatura en los cojinetes. Entonces, la acción que tomará el operador para controlar la variable temperatura, será de tal manera que permita regular el proceso y evitar paradas y gastos de energía innecesarias. (Industrias Guapán, 2015)

Para lograr un control estable del tamaño de partícula, los circuitos del sistema de molienda de crudo deben ser operados para maximizar la capacidad del molino, tanto como sea posible. (Ospina Alarcón, 2009)

2.3.2 PROBLEMA

Las plantas de producción de cemento que disponen de molienda de crudo presentan una gran variabilidad operacional, como consecuencia de varios aspectos que intervienen en el proceso tales como: (UCEM-CEM , 2015)

- Diferencias en la forma y composición del material particulado que ingresa al proceso
- Cambios de distribución de tamaños de partícula
- Limitaciones propias del sistema de instrumentación y control del molino.
- Cambios en la mineralogía del material
- Carga y ajustes de material
- Mineralógica del mineral.
- Disponibilidad y funcionamiento de los separadores o clasificadores de material

El principal objetivo de una operación en un circuito cerrado en este caso de molienda de crudo, radica principalmente en que el proceso se mantenga dentro de intervalos establecidos, reconociendo la mayor inestabilidad ocasionada por varias perturbaciones que se presentan y que son propias del sistema. (Ospina Alarcón, 2009)

En los sistemas de molienda de crudo dentro de las industrias cementeras, la operación en las diferentes etapas del proceso de fabricación de cemento se la considera como una de las más intensivas en el consumo de energía eléctrica, pues a escala mundial se

consideran parámetros que garanticen la rentabilidad en el funcionamiento con índices de consumo dentro de buenas prácticas de manufactura, lo cual implica que el sistema de control de estas operaciones está direccionado a optimizar el consumo de potencia y energía como una necesidad básica. (Ospina Alarcón, 2009)

CAPÍTULO 3: RECOPIACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS.

En este capítulo se realizará la recopilación de datos y tabulaciones de las variables de temperatura, para que de esta forma poder establecer la función característica que define el proceso del molino de crudo.

3.1 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En el capítulo anterior se comprobó que las variables a tratarse eran análogas, por ende, se desarrolló un software prototipo que nos permita tomar dichas variables en tiempo real y todas al mismo tiempo.

Aunque comercialmente existen un sin número de equipos sofisticados para la adquisición de datos, en el presente trabajo presentamos una herramienta práctica y portable para el procesamiento, como es un módulo *Arduino Nano* que funcionará en tiempo real.

3.1.1 IMPLEMENTACIÓN PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

Para realizar la toma de datos debemos identificar los parámetros a variar y las variables que se verán afectadas.

Inicialmente desde panel central controlaremos el porcentaje de apertura y cierre, tanto del dámper D41 y D49.



Figura 3.1 -Control regulable del dámper d41
Fuente: Autores – Panel Central Planta Industrial Guapán Azogues

Como se puede observar en la figura 3.1 en la pantalla se observa la apertura actual en la que se encuentra dicho d mper. El indicador en forma de flecha que está direcccionado hacia arriba, permite la apertura del d mper, significando esto mayor temperatura en el molino de crudo; así mismo, el indicador en forma de flecha que está direcccionado hacia abajo, permite el cierre del d mper, el cual nos restringe el paso de aire caliente hacía el molino.

Debemos tomar en cuenta que la manipulación de este parámetro afecta directamente a las variables: TT108 que está ubicada a la altura de este d mper y al TT104 que está ubicada en la chimenea de fuga de aires calientes en el molino de crudo, en el anexo 1 se especifican los planos de construcción y se puede determinar con mayor exactitud la ubicación de las mismas.



Figura 3.2 - Control regulable del d mper d49

Fuente: Autores – Panel Central Planta Industrial Guapán Azogues

Los controles para este d mper son similares al anterior como se puede observar en la figura 3.2 la pantalla indica la apertura actual en la que se encuentra. De igual forma, el indicador en forma de flecha que está direcccionado hacia arriba genera la apertura del mismo, significando esto mayor temperatura en el molino de crudo; así mismo, el indicador en forma de flecha que está direcccionado hacia abajo disminuye el paso de aire caliente hacía el molino.

En cambio, la manipulación de este parámetro afecta directamente a las variables: TT105 que está ubicada a la altura de este d mper y al TT104 que está ubicada en la chimenea de fuga de aires calientes en el molino de crudo, en el anexo 1 se especifican

los planos de construcción y se puede determinar con mayor exactitud la ubicación de las mismas. En ambos casos las variables son específicamente termocuplas de tipo j que determinan la temperatura del paso de los gases.

3.1.2 IMPLEMENTACION DEL HARDWARE

Arduino es una herramienta de código abierto de fácil manejo, tanto en software y hardware (Anónimo, 2016). Entre toda la gama existente para el presente proyecto hemos utilizado la versión denominada “nano” debido a que no se necesitará más recursos que el que brinda éste.

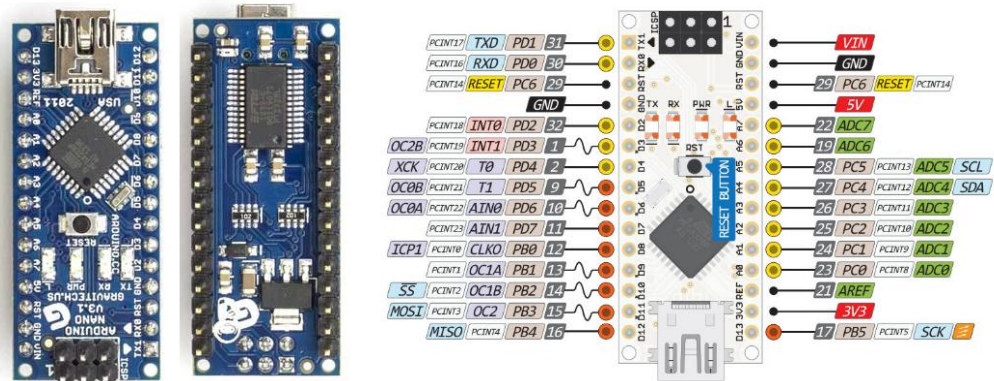


Figura 3.3- Arduino nano

Fuente: Página Oficial Arduino (Anónimo, 2016)

Entre todas las utilidades que nos presta este dispositivo únicamente utilizaremos 3 entradas analógicas-digitales y transmisión serial para que exista comunicación en tiempo real entre el Arduino y el computador.

3.1.2.1 Funcionamiento

El código implementado se encuentra en el anexo 4. Entonces siendo más explícitos el programa funciona bajo los siguientes pasos:

- Espera la señal enviada desde el computador para empezar a funcionar.
- Una vez recibida la señal, utilizamos el ADC de 10 bits del Arduino y por los pines A0, A1 y A2 adquirimos la información en voltios enviadas por los transmisores de temperatura TT105, TT108 Y TT104 respectivamente.
- Para obtener mayor precisión el valor obtenido sacamos un promedio de aproximadamente 500 valores muestreados en 8 segundos.

3.1.2.2 Conexión

En la figura 3.4 se puede observar como el Arduino se encuentra sobrepuesto en un *protoboard* y de los pines a A0, A1 y A2 se conectan cables con terminales lagartos para sujetar con mayor facilidad las borneras que vamos a utilizar.

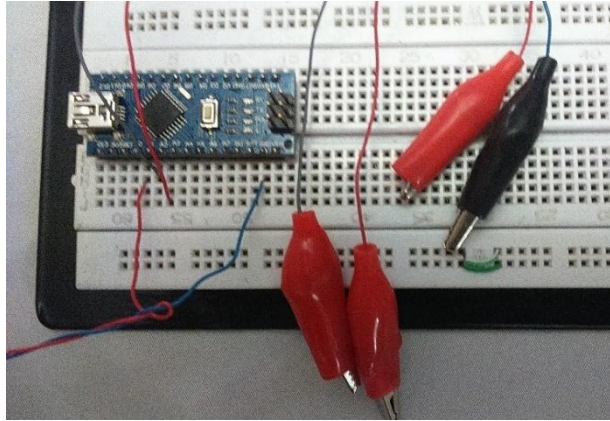


Figura 3.4 - Conexión Arduino Nano

Fuente: Autores

Luego el cable con terminal lagarto del pin A0 conectamos al pin TT105 como se observa en la figura 3.5.

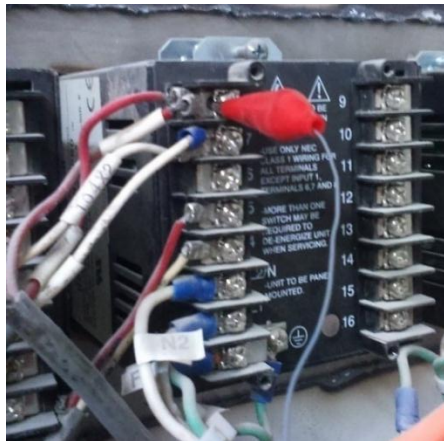


Figura 3.5 - Conexión pin A0 al módulo de panel central

Fuente: Autores

De la misma forma, el cable con terminal lagarto del pin A1 conectamos al pin TT108 como se observa en la figura 3.6.



Figura 3.6 - Conexión pin A1 al módulo de panel central

Fuente: Autores

Para finalizar, el cable con terminal lagarto del pin A2 conectamos al pin TT104 como se observa en la figura 3.7.

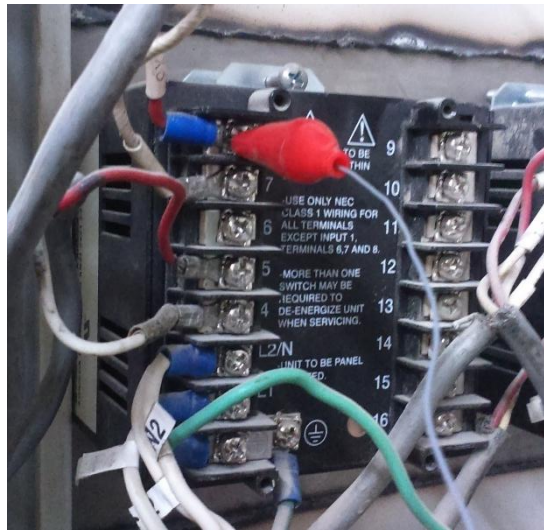


Figura 3.7 - Conexión pin A2 al módulo de panel central

Fuente: Autores

Otro dato importante a tomar en cuenta es que todos estos módulos de información y control de panel central se encuentran conectados a tierra común. Entonces, es necesario utilizar otro conector con terminal lagarto para conectar tierra del Arduino con la tierra de cualquiera de los módulos ubicados en panel central; en este caso hemos conectado como se muestra en la figura 3.8.

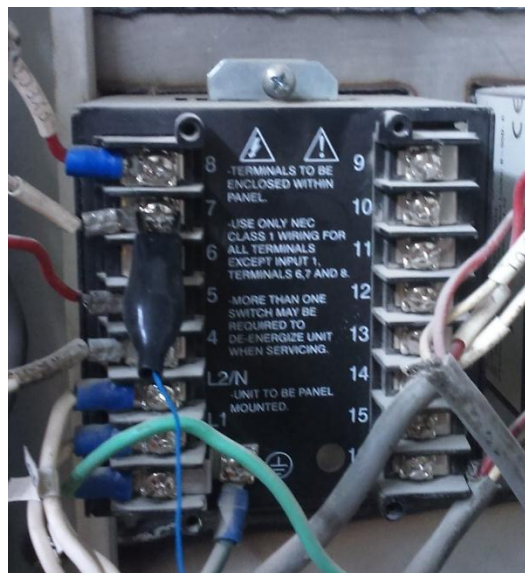
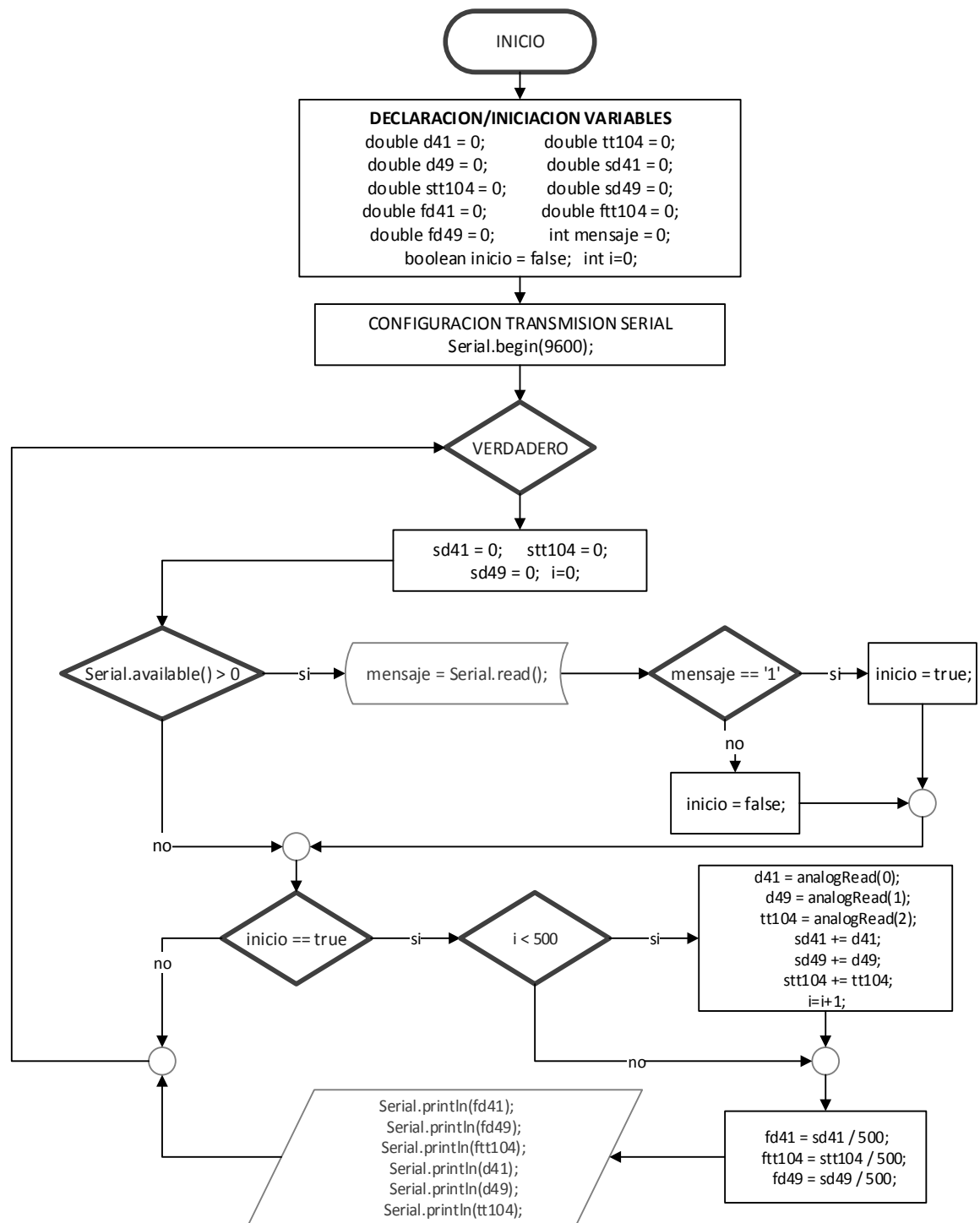


Figura 3.8 - Conexión tierra común

Fuente: Autores

3.1.2.3 Diagrama de Flujo



3.1.3 IMPLEMETACION DEL SOFTWARE

Java es uno de los lenguajes de programación más populares hasta la actualidad, debido a su flexibilidad además de presentar una interfaz bastante amigable para el usuario, ya que este lenguaje de desarrollo utiliza programación orientada a objetos.

Es necesario explicar también los botones de interfaz del programa:

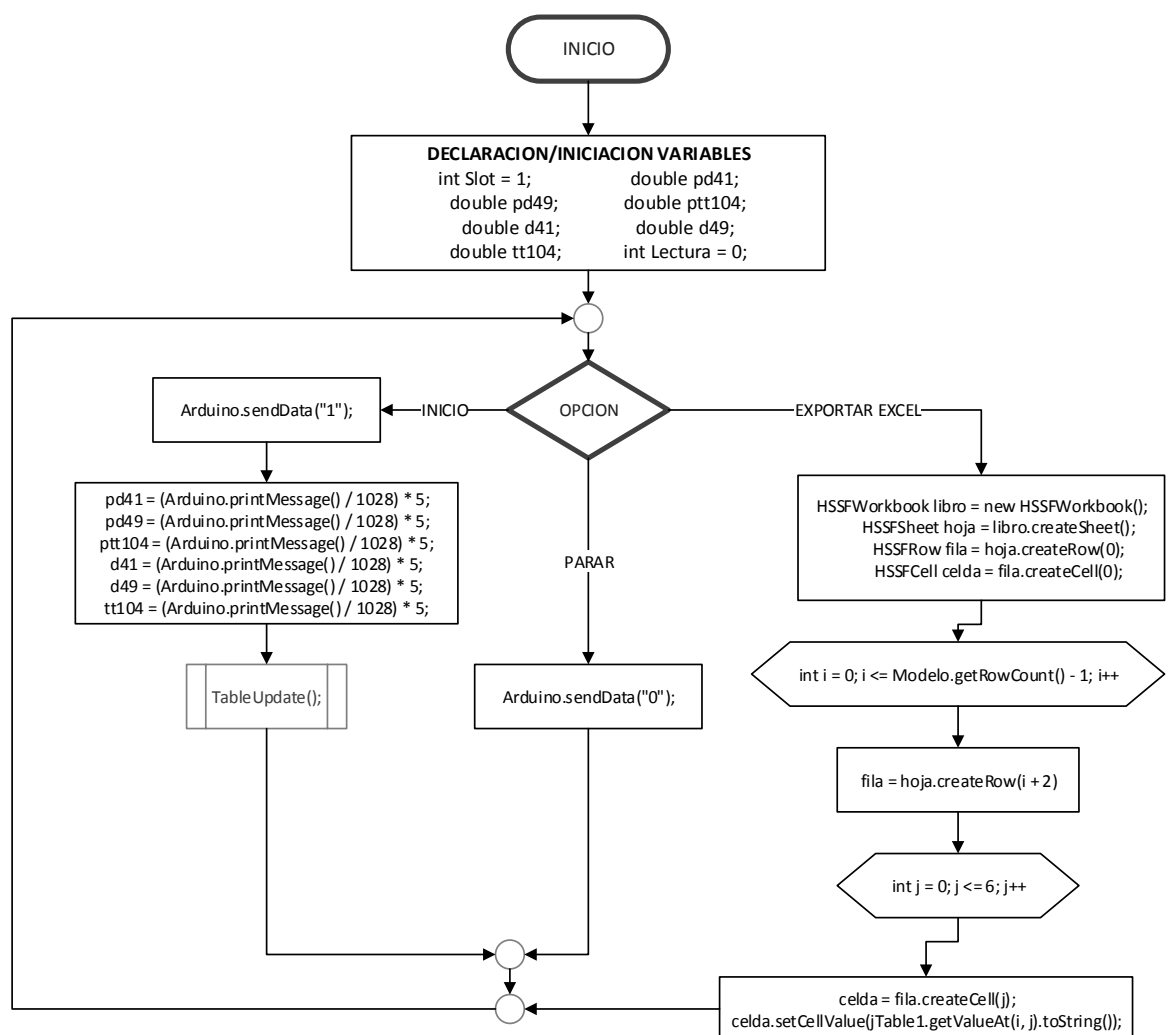


Figura 3.10 - Botones de interfaz de usuario

Fuente: Autores

- a) Este botón inicializará la toma de datos y generará la información en tiempo real en la interfaz propuesta. Si por alguna situación se desea parar la toma de datos al volver a presionar este botón se continuará desde el punto donde había sido detenida antes
- b) Paraliza instantáneamente la adquisición de datos. Se recomienda presionar este botón para proceder a guardar la información.
- c) Este botón nos abrirá una ventana donde deberíamos especificar el nombre del archivo y la ruta donde deseamos se guarde dicha información.

3.1.3.3 Diagrama de Flujo



3.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS

Una vez establecidas las herramientas que nos van a permitir recopilar la información, Procedemos a recoger todas las variables de temperatura que afectan directamente en la molienda de crudo que son:

- TT105: Termocupla dámper D49
- TT108: Termocupla dámper D41
- TT104: Termocupla salida del molino

Mediante estos parámetros, podemos relacionar todas las formas posibles las gráficas de controlabilidad de nuestro sistema, hay que tener presente que las termocuplas instaladas en la empresa UCEM-CEM son de tipo k que se encuentran especificadas en el anexo 2 y en el anexo 3 del presente trabajo. (Industrias Guapán, 2015)

En la figura 3.1, se puede observar la ecuación característica de la termocupla, en el eje de las abscisas se encuentra la temperatura y en el eje de las ordenadas el Voltaje

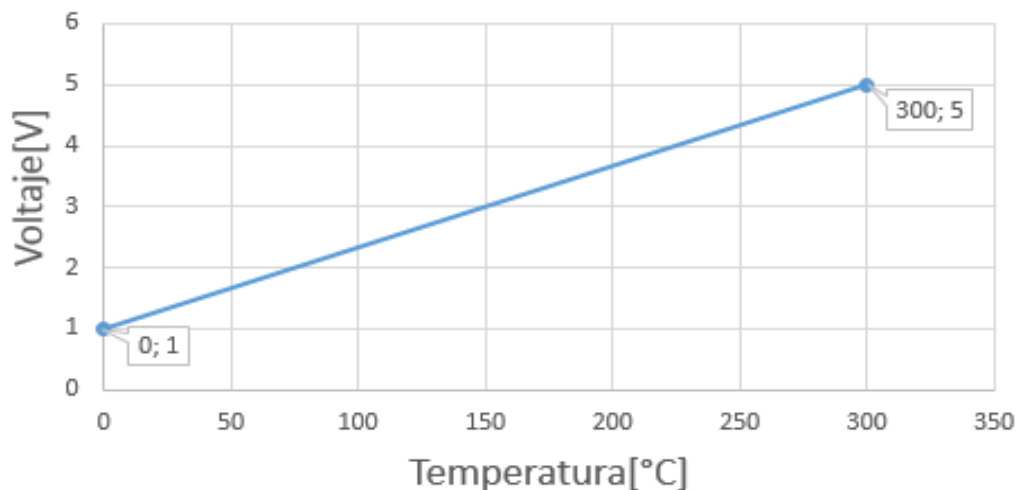


Figura 3.11 - Ecuación característica termocupla

Fuente: Autores

La relación que se tiene de la temperatura en función del voltaje es:

$0^{\circ}\text{C} = > 1\text{Voltio}$

$330^{\circ}\text{C} = > 5\text{Voltios}$

Esta información fue verificada en el sistema de molienda de crudo de la empresa prevista en la hoja técnica de las termocuplas instaladas en la planta.

Para encontrar la ecuación de una recta, basta con solo tener dos puntos, en nuestro caso estos puntos están dados por:

P1(0,1); P2(300,5)

La fórmula que determina la ecuación de una recta dado dos puntos es:

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (20)$$

Se tiene:

$$x_1 = 0, y_1 = 1; x_2 = 300, y_2 = 5$$

$$x = T(\text{temperatura});$$

$$y = V(\text{voltaje})$$

Reemplazando en la ecuación (24), tenemos:

$$\frac{V - 1}{T - 0} = \frac{5 - 1}{300 - 0} \quad (21)$$

$$300V - 300 = 4T \quad (22)$$

esta manera obtenemos la ecuación característica de la termocupla

$$4T - 300V + 300 = 0 \quad (23)$$

3.2.1 ANÁLISIS DÁMPER D41

A continuación, se presentará las gráficas obtenidas al manipular el dámper D41 al abrirlo un 30%. Inicialmente este se encontraba en un 50% y lo abrimos al 80% y teniendo el dámper D49 de igual forma abierto al 50%.

En la figura 50 se muestra la respuesta que se observa en el transmisor de temperatura 108 que se encuentra ubicado en el ducto de aire caliente junto al dámper D41.

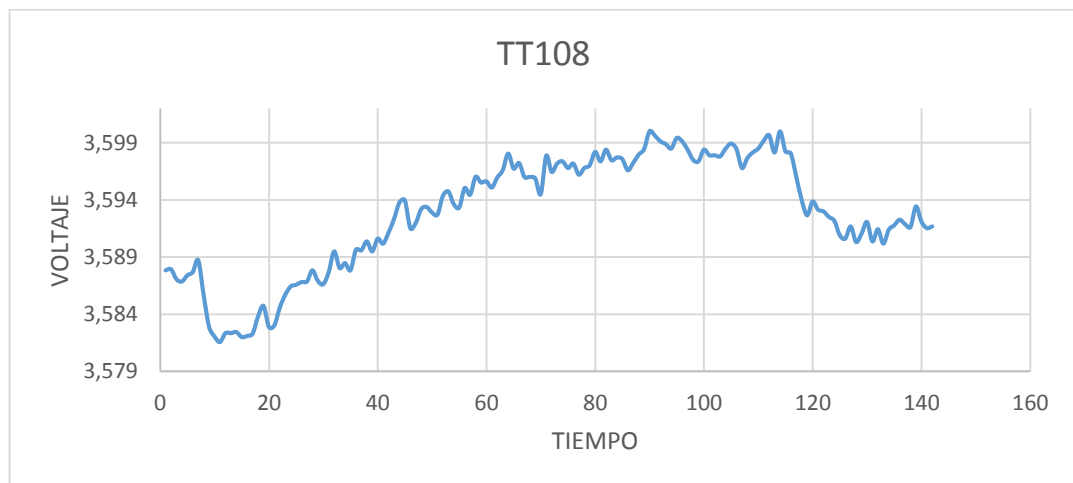


Figura 3.12 - Grafico respuesta apertura TT108

Fuente: Autores

Como se observa en la figura 3.12, se tiene una respuesta directamente proporcional, esto quiere decir que mientras mayor sea la apertura del dámper la temperatura en la entrada del molino va a ser mayor. Tentativamente a simple vista se puede observar

que tenemos un sistema sobre-amortiguado de segundo orden el cual es controlable y se puede aproximar.

En la figura 3.13, se tiene la respuesta del transmisor de temperatura TT104 que se encuentra ubicado en la salida de aire (chimenea) del molino de crudo.

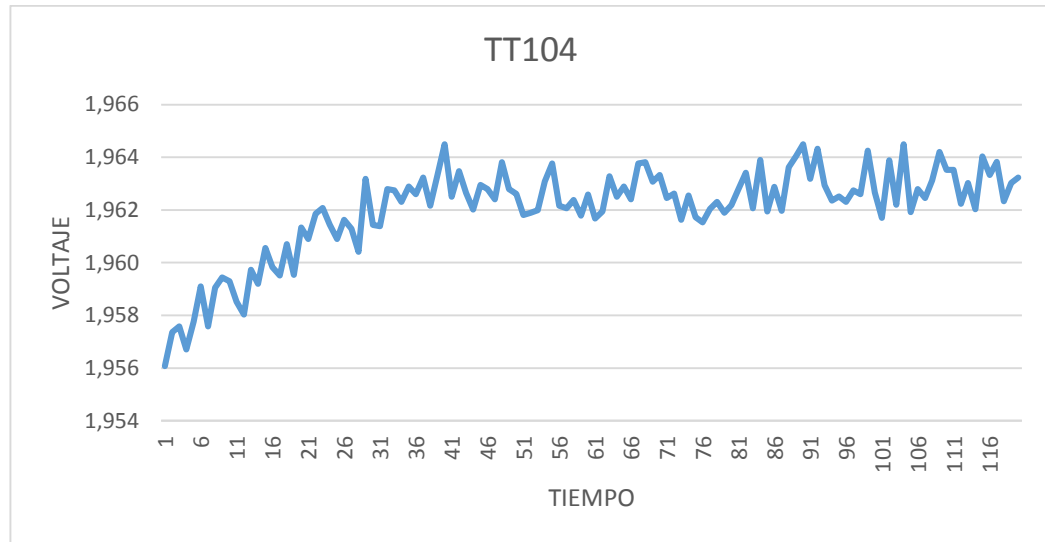


Figura 3.13 - Gráfico respuesta apertura TT104

Fuente: Autores

Al igual que en la figura 3.12, ésta también presenta una respuesta directamente proporcional y aunque existen algunos sobre-picos en el grafico se puede percibir un sistema sobre-amortiguado.

Como observamos las gráficas anteriores al tener este dämper estabilizado al 80%, entonces ahora lo cerramos hasta un 50% y observamos la reacción que este presenta, hasta que se vuelva a estabilizar.

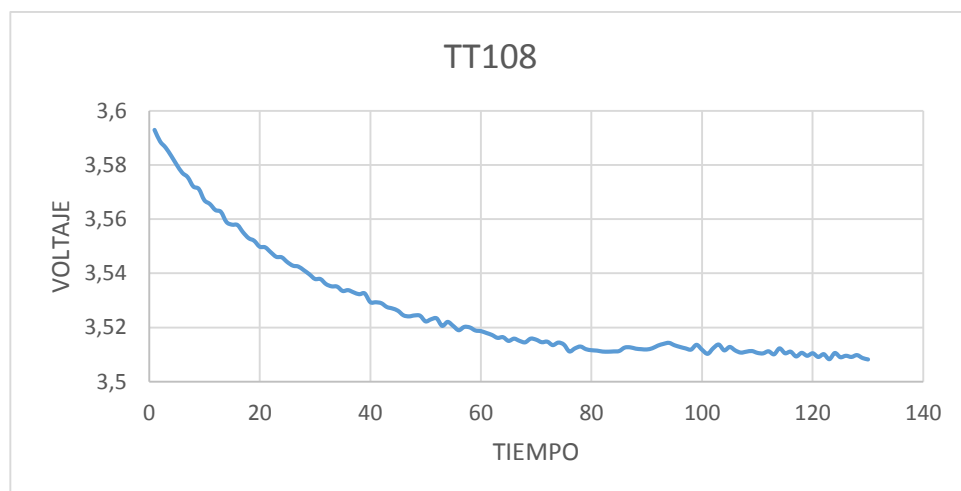


Figura 3.14 - Gráfico respuesta cierre TT108

Fuente: Autores

En la figura 3.14 se muestra la respuesta que se observa en el transmisor de temperatura TT108 que se encuentra ubicado en el ducto de aire caliente junto al d mper D41, de igual manera que en los gráficos que se analizaron anteriormente, se encuentra una proporcionalidad directa con la diferencia que visualmente este gráfico se aproxim r a a un sistema sobre-amortiguado.

En la figura 3.15, observamos la respuesta obtenida del transmisor de temperatura TT104 que se encuentra ubicado en la salida de aire (chimenea) del molino de crudo.

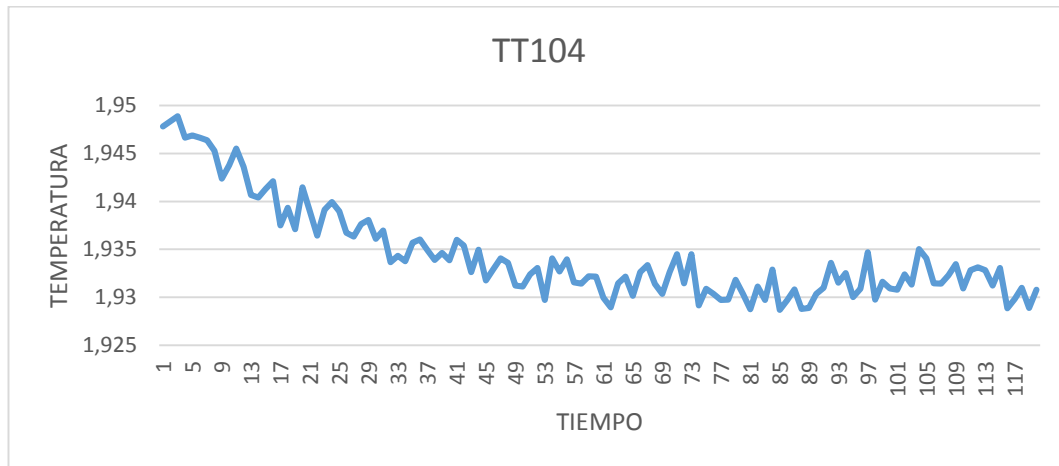


Figura 3.15 - Gráfico respuesta cierre TT104

Fuente: Autores

El grafico 53 nos muestra una proporcionalidad directa y se puede aproximar a un sistema sobre-amortiguado.

3.2.2 ANÁLISIS D MPER D49

Al igual que con el d mper D41 analizaremos de forma similar las gráficas obtenidas al manipular el d mper D49, en este caso al abrirlo un 30%. Inicialmente este se encontraba en un 50% y lo abrimos al 80% y teniendo el d mper D41 de igual forma abierto al 50%.

En la figura 3.16 observamos la respuesta en el transmisor de temperatura TT105 que se encuentra ubicado en el ducto de aire caliente junto al d mper D49.

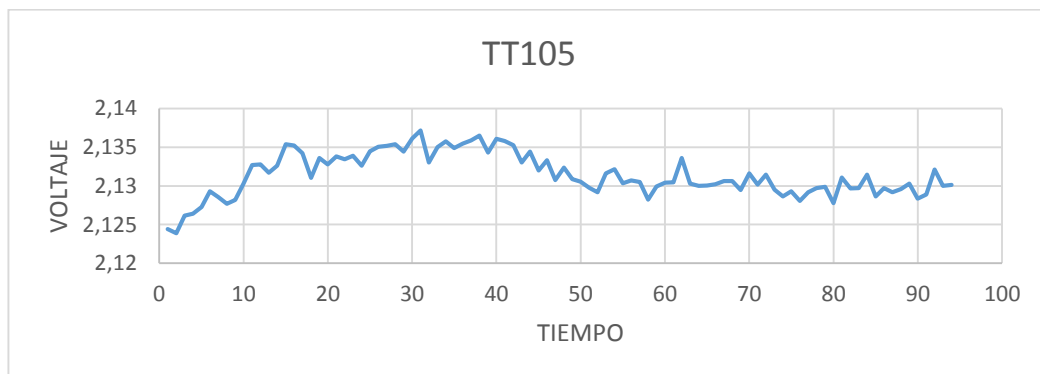


Figura 3.16 - Gráfico respuesta apertura TT105

Fuente: Autores

En la figura 3.16, tenemos una respuesta directamente proporcional, esto quiere decir que mientras mayor sea la apertura del d mper la temperatura en la entrada del molino va a ser mayor. Tentativamente se puede observar que tenemos un sistema sobre-amortiguado de segundo orden el cual es controlable y se puede aproximar.

En la figura 3,17, se tiene la respuesta del trasmisor de temperatura TT104 que se encuentra ubicado en la salida de aire (chimenea) del molino de crudo.

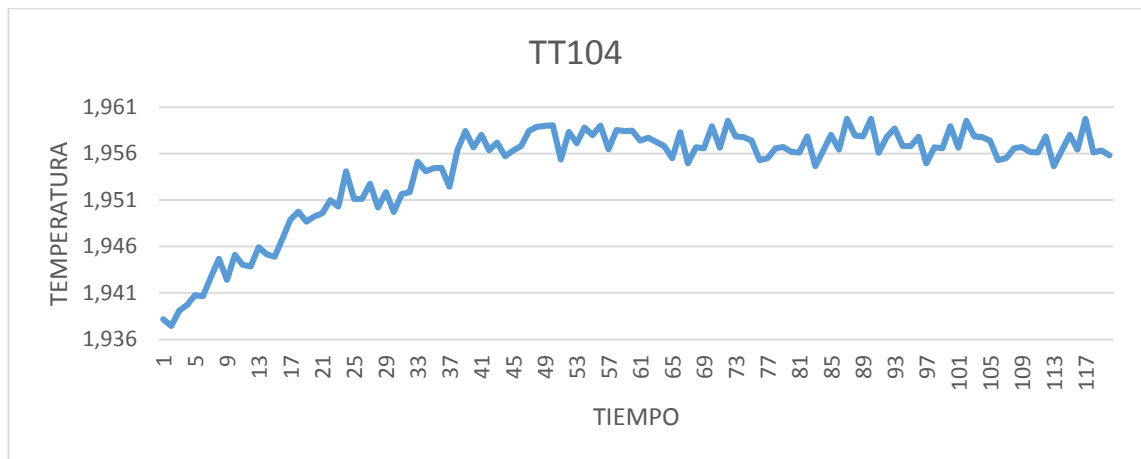


Figura 3.17 - Gráfico respuesta apertura TT104
Fuente: Autores

Como observamos las gráficas anteriores al tener este d mper estabilizado al 80% lo cerramos un 30% y observamos la reacción que este presenta.

En la figura 3.18, se muestra la respuesta que se observa en el trasmisor de temperatura TT105 que se encuentra ubicado en el ducto de aire caliente junto al d mper D49

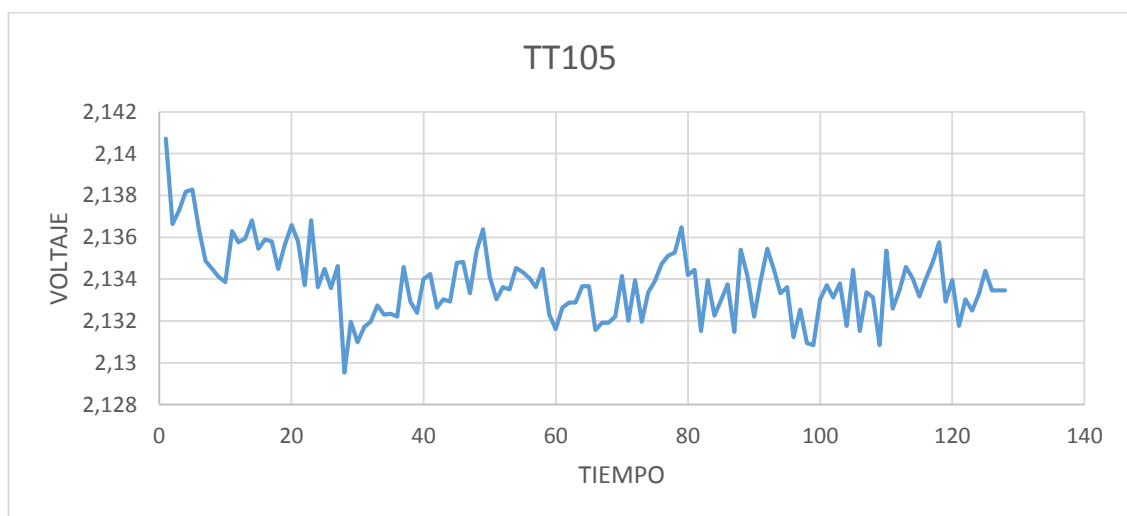


Figura 3.18 - Gráfico respuesta cierre TT105
Fuente: Autores

Como se observa en la figura 3.18, se tiene una respuesta directamente proporcional, y se pretenderá aproximar a un sistema sobre-amortiguado.

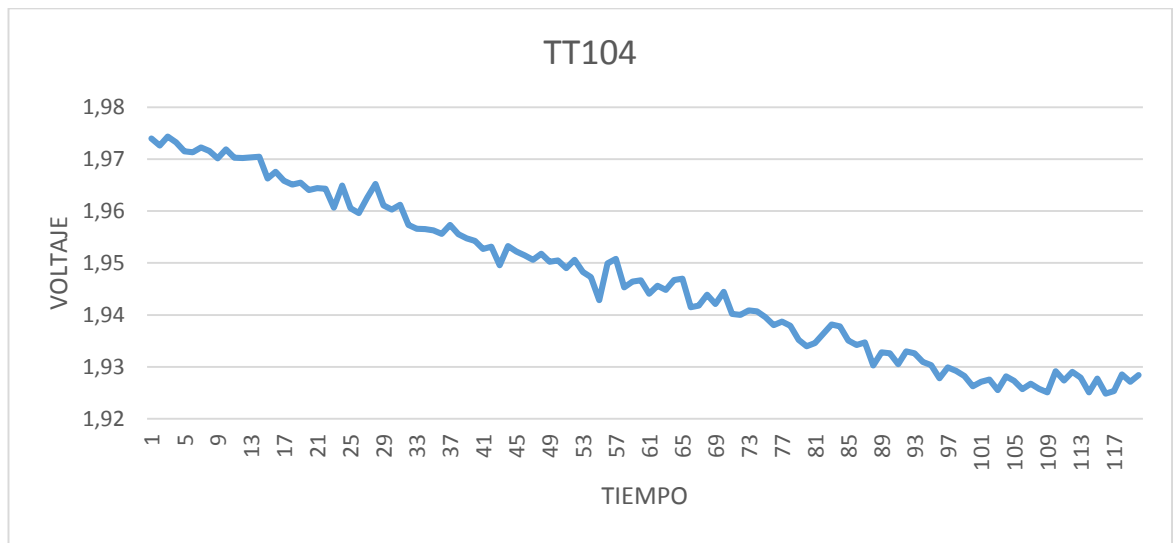


Figura 3.19 - Gráfico respuesta cierre tt104

Fuente: Autores

En la figura 3.19, se muestra la respuesta del transmisor de temperatura TT104 que se encuentra ubicado en la salida de aire (chimenea) del molino de crudo, de igual manera que en los gráficos analizados anteriormente, se encuentra una proporcionalidad directa, que visualmente este gráfico se aproximaría a un sistema sobre-amortiguado.

3.2.33.2.1 ANÁLISIS SISTEMA MOLINO DE CRUDO

Para el análisis de cada de una de los dámperes y para el análisis general se va a tomar en cuenta las respuestas de la toma de datos de un día, en este caso los datos adquiridos estuvieron bajo estas condiciones:

- Fecha:
 - Azogues, 1 de marzo del 2016
- Hora de Inicio:
 - 12h00
- Hora de Finalización:
 - 15h00
- Proporciones de Material:
 - 6 toneladas de Arena
 - 4 toneladas de Arcilla
 - 2 toneladas de Caliza

Entonces, las variables adquiridas son controlables y aunque con esta información podríamos plantear varias soluciones a este problema uno de los factores más relevantes que se debe tomar en cuenta son usar en lo posible los recursos con los que cuenta la empresa, abaratar costos y proponer la solución más viable. Aunque en la actualidad están en boga los sistemas de control híbridos o sistemas de control que sean más robustos que el PID, en la actualidad el molino de crudo cuenta con controladores PID marca *honeywell*.

Además, dichos controladores son SISO (Single Input Single Output), por lo que no sería oportuno ocupar las variaciones obtenidas en el TT105 y TT108, puesto que si utilizáramos estas igual se podría controlar nuestro sistema, pero tendríamos que plantear un sistema MISO (Multiple Input Single Output).

En consecuencia, aunque observamos en las gráficas que todas son controlables para nuestro trabajo plantearemos dos sistemas SISO que se relacionarán, directamente la apertura/cierre del dámper D41 respecto al TT104 y la apertura/cierre del dámper D49 respecto al TT104.

CAPÍTULO 4: CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y CONTROLADORES.

4.1 TEORÍA DE IDENTIFICACIÓN GRÁFICA

Cuando se desea controlar un proceso de una manera eficiente, lo principal es conocer el comportamiento del mismo, este tipo de comportamiento se representa mediante una función de transferencia en la rama de ingeniería de control. Prácticamente se puede decir que la función de transferencia de todo sistema lineal define su comportamiento dinámico ante cualquier tipo de entrada, obteniendo la velocidad de respuesta, sobre-impulsos, tiempo de estabilidad, oscilaciones. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

La función de transferencia se define como la razón transformada de Laplace de la variable de salida $Y(s)$ entre transformada de Laplace de la variable de entrada $U(s)$.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k(a_ms^m + a_{m-1}s^{m-1} + \dots + a_1s^1)}{b_ns^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s^1} \quad (24)$$

$Y(s)$: variable de salida

$U(s)$: variable de entrada

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DE PROCESOS DE SEGUNDO ORDEN

Para los sistemas de segundo orden la función de transferencia viene dado por: (Ogata, 2010)

$$G_m(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_ns + \omega_n^2} \quad (25)$$

k : ganancia del proceso de segundo orden

s : variable en función de la frecuencia

ω_n (frecuencia natural de oscilacion) = $\frac{1}{\tau}$ $\zeta < 1$

4.1.1.1 Métodos de identificación gráfica en sistemas de control de segundo orden

Para obtener la función de transferencia en forma experimental del sistema que nos presente nuestro proceso, se puede emplear ciertos métodos que son: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

- Método Analítico
- Método de Miller

- Método de Ziegler & Nichols

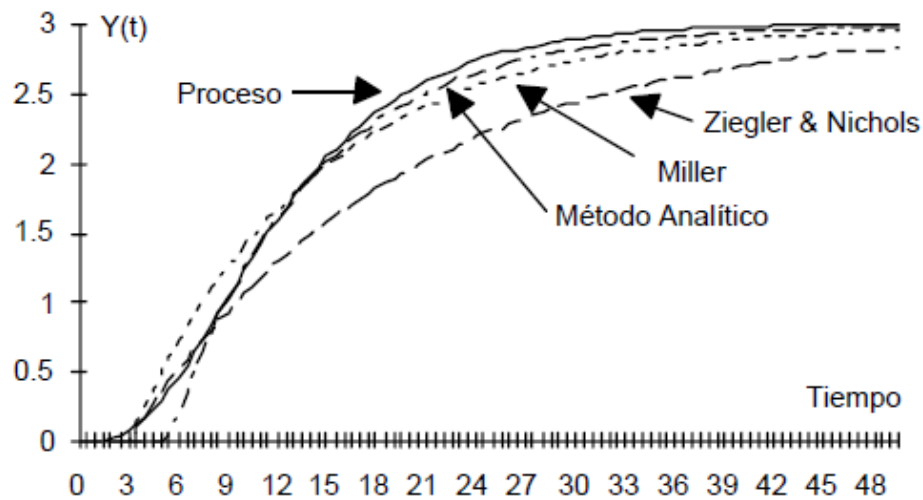


Figura 4.1 - Figura comparativa de aproximación de los métodos gráficos más utilizados
Fuente: (Golnaraghi & Kuo, 2010)

4.1.1.2 Sistemas Sub amortiguados

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar la respuesta de un proceso de segundo orden sub-amortiguado ($0 < \zeta < 1$) ante una entrada escalón unitario, se considera la ganancia con un valor de ($k = 1$) y la constante de tiempo con un valor de ($\tau = 2$), en este caso no se consideró tiempo muerto, caso contrario la respuesta del proceso se desplazaría Θ unidades a la derecha. (Vázquez López, 2005)

La figura 4.2 nos muestra cómo se comporta la respuesta con varios valores de $0 < \zeta < 1$.

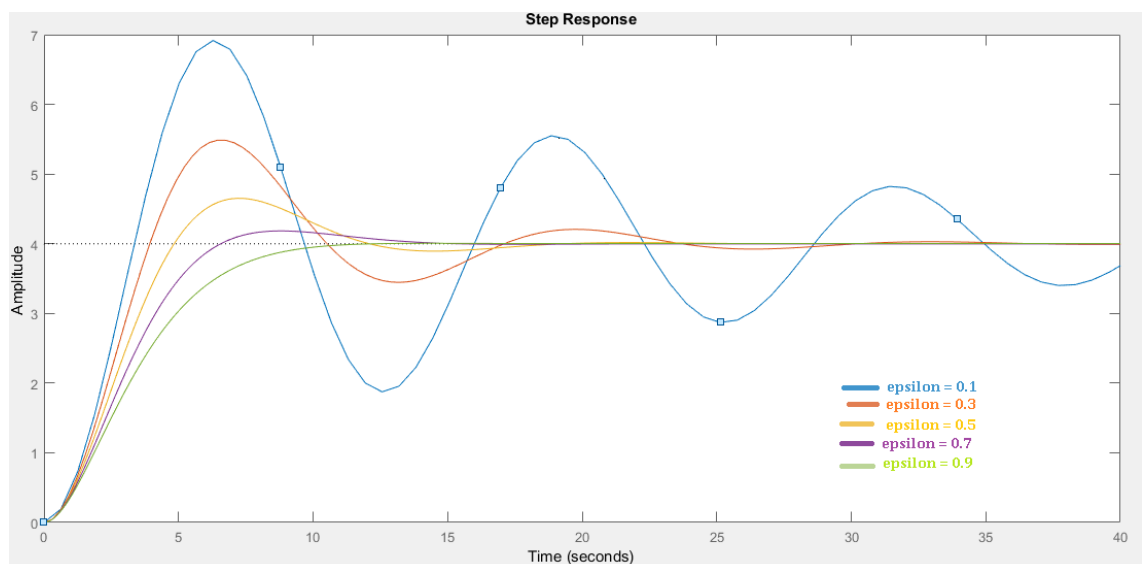


Figura 4.2 - Sistema de segundo orden con respuesta a valores de $0 < \zeta < 1$
Fuente: (Vázquez López, 2005)

En la figura 4.3, se puede observar la respuesta típica de un sistema de segundo orden sub-amortiguado ($0 < \zeta < 1$) a un cambio escalón de magnitud ΔU . En el cual se puede obtener los parámetros de desempeño de este sistema y asociarlos con las fórmulas que los definen para obtener los valores de k , ζ , τ y Θ . (Golnaraghi & Kuo, 2010)

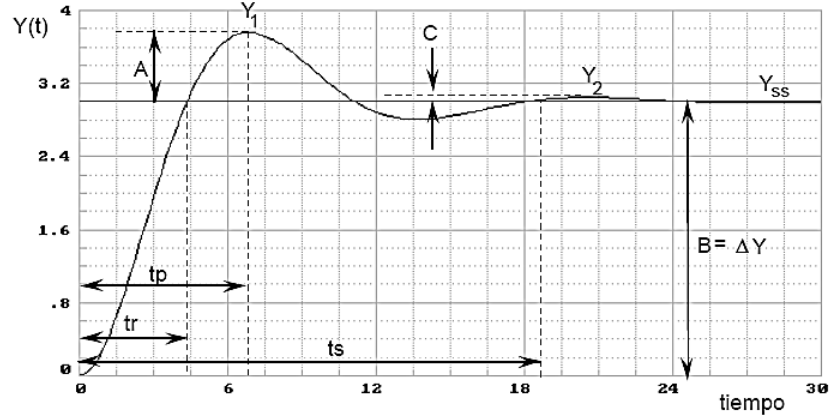


Figura 4.3 - Ubicación de variables para el análisis de identificación gráfica de un sub-amortiguado
Fuente: (Vázquez López, 2005)

De acuerdo a la figura 4.3, se puede determinar los siguientes parámetros

Tiempo Pico (t_p): es el instante de tiempo que tarda el sistema en alcanzar la primera oscilación. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$t_p = \frac{\pi\tau}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (26)$$

τ : constante de tiempo

ζ : Factor de amortiguamiento

Tiempo de elevación (t_r): es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar por primera vez el 100% del valor final de la señal de salida. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$t_r = \frac{\tau}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (27)$$

Tiempo de establecimiento (t_s): se define como el tiempo que tarda la salida del sistema en llegar a un estado estable, en una franja alrededor del valor final, dentro de ciertos límites de oscilación ($\pm 2\%$). (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$t_s = 4\frac{\tau}{\zeta} \quad (28)$$

Periodo de oscilación (T): es el tiempo que se da entre cresta y cresta de un sistema oscilante. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$T = \frac{2\pi\tau}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (29)$$

Razón de decaimiento (RD): es la relación porcentual de amplitudes, entre la segunda y la primera oscilación; se da entre oscilaciones consecutivas sucesivas. (Golnaraghi & Kuo, 2010).

$$RD = \frac{C}{A} \times 100\% = \frac{Y_2 - Y_{ss}}{Y_1 - Y_{ss}} \times 100\% = e^{\frac{-2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \quad (30)$$

Y_1 : punto máximo de la curva

Y_2 : punto mínimo de la curva

Y_{ss} : punto de estabilización de la curva

Sobretiro (PS): es la cantidad en la cual la respuesta sobrepasa el valor de estado estable por primera vez. (Golnaraghi & Kuo, 2010)

$$PS = \frac{A}{B} \times 100\% = \frac{Y_1 - Y_{ss}}{Y_{ss} - 0} \times 100\% = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \quad (31)$$

4.1.1.3 Sistemas Sobre amortiguados

4.1.1.3.1 Método de Smith

Este método también conocido como el de dos puntos, se basa en seleccionar dos puntos del transitorio t_1 y t_2 cuando se alcanzan respectivamente el 28.3% y 63,2% del cambio total en la respuesta del sistema a un cambio escalón en la entrada, de este modo se garantiza que la respuesta del modelo coincida con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo.

Posteriormente se traza la línea base y la línea del 100%, para realizar de una manera adecuada los puntos porcentuales. En el cómputo de los parámetros dinámicos se emplea las siguientes expresiones: (Alfaro, 2006)

$$t_1 = t_m + \frac{\tau}{3} \quad t_2 = t_m + \tau$$

Resolviendo para t_m y τ se obtiene:

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1)$$

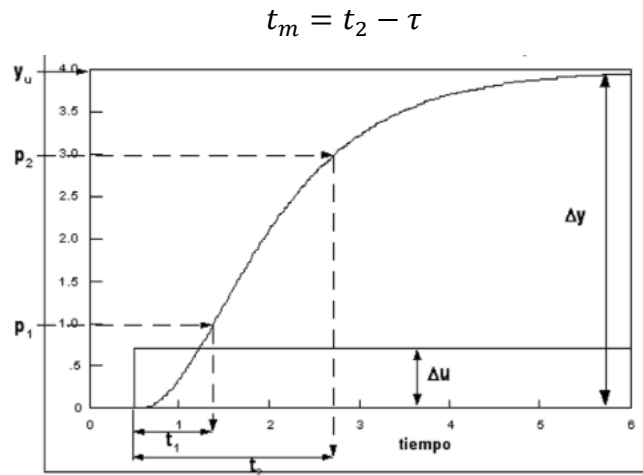


Figura 4.4: Método de los dos puntos, sistema sobre-amortiguado

Fuente: Autores

4.1.2 DESARROLLO MATEMÁTICO

4.1.2.1 Función de Transferencia Apertura de Dámper D49 subida

En la figura 4.5 que se muestra a continuación, se puede observar el comportamiento del proceso a la salida del molino de crudo, medido por el transmisor de temperatura TT104 cuando se realizó la apertura del dámper D49 de la toma de datos del anexo 2 del presente trabajo, en el eje de las abscisas podemos observar el tiempo en segundos que se toma cada muestra, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos, en el eje de las coordenadas podemos observar el voltaje obtenido por la termocupla (TT104), la respuesta del sistema como se observa en la gráfica nos muestra un sistema sobre-amortiguado, posteriormente utilizamos el método de Smith de los dos puntos que se explicó anteriormente.

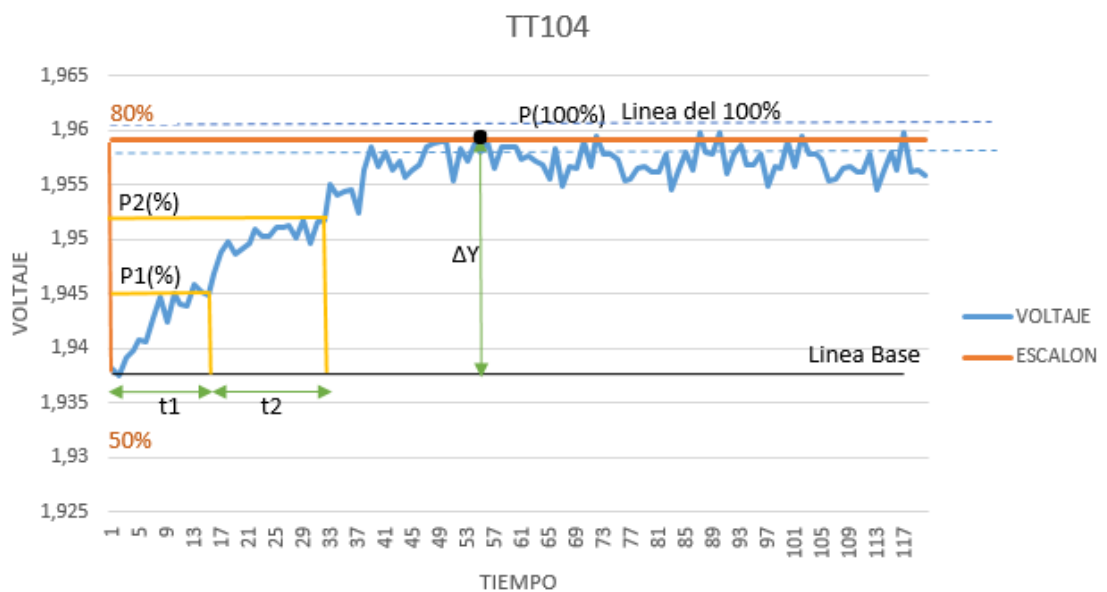


Figura 4.5: Respuesta del proceso apertura dámper 49

Fuente: Autores

Como se observa en la gráfica tenemos la curva de respuesta del proceso de la apertura del d mper D49 ante una entrada de tipo escalón.

Se coloca la línea base, que es la línea horizontal trazada en el estado inicial del proceso y la línea del 100%, que es la línea horizontal trazada en el estado final del proceso, para determinar de una manera adecuada los puntos porcentuales del transitorio, que son:

$$P_1(\%) = P_{(28.3\%)}$$

$$P_2(\%) = P_{(63.2\%)}$$

Una vez trazados estos puntos obtenemos los valores de muestreo.

$$t_{28.3\%} = \text{valor de muestra número 15}$$

$$t_{63.2\%} = \text{valor de muestra número 34}$$

De acuerdo a las muestras en el Anexo 5 se obtiene el tiempo t_1 y t_2 .

Consideramos que el punto final o punto en el cual la curva de respuesta se empieza a estabilizar está en:

$$P_{(100\%)} = 1,95831712062256[V]$$

$P_{(100\%)}$: Punto de estabilización del proceso

A continuación, se calcula la ganancia del proceso de apertura del d mper D49, la posición final de la manipulación del d mper es de 80%, y la posición inicial es de 50% para la variable de entrada $U(t)$.

$$\begin{aligned} k_{sub} &= \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{\text{Cambio variable de salida } Y(t)}{\text{Cambio variable de entrada } U(t)} \\ &= \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\text{Valor Damper}_{final} - \text{Valor Damper}_{inicial}} \\ &= \frac{1,95831712062256 - 1,93818093385214}{0.8 - 0.5} = 0.067123333 \end{aligned}$$

k_{sub} : Ganancia de subida del proceso

$V_{final} = P_{(100\%)}$: Valor final de estabilización del proceso

$V_{inicial}$: Valor inicial del proceso

Utilizando el método gráfico de Smith, se calcula los valores porcentuales trazados en la gráfica, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos.

$$P_{(28.3\%)} = t_1 * \text{tiempo de cada muestra} = 15 * 8\text{seg} = 120\text{seg}$$

$$P_{(63.2\%)} = t_2 * \text{tiempo de cada muestra} = 34 * 8\text{seg} = 272\text{seg}$$

Utilizando la fórmula para encontrar la constante de tiempo del proceso (τ), se tiene:

$$\tau_{sub} = 1,5[(P_{(63.2\%)} - P_{(28.3\%)})] = 1,5(272 - 120) = 228$$

τ_{sub} : constante de tiempo de subida

Con estos valores, podemos obtener nuestra función de transferencia para la apertura del dámper D49.

Función de transferencia (ft_{sub}):

$$ft_{sub} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} = \frac{0.067123333}{51984s^2 + 456s + 1}$$

ft_{sub} : Funcion de transferencia de subida damper D49

s: variable en función de la frecuencia

$\tau = \tau_{sub}$: constante de tiempo de subida

4.1.2.2 Función de Transferencia Cierre de Dámper D49 bajada.

En la figura 4.6, podemos observar el comportamiento del proceso a la salida del molino de crudo, medido por el transmisor de temperatura TT104 cuando se realizó el cierre del dámper D49 de la toma de datos del anexo 2 del presente trabajo, en el eje de las abscisas podemos observar el tiempo en segundos que se toma cada muestra, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos, en el eje de las coordenadas podemos observar el voltaje obtenido por la termocupla (TT104), la respuesta del sistema como se observa en la gráfica nos muestra un sistema sobre-amortiguado, posteriormente utilizamos el método de Smith de los dos puntos que se explicó anteriormente.

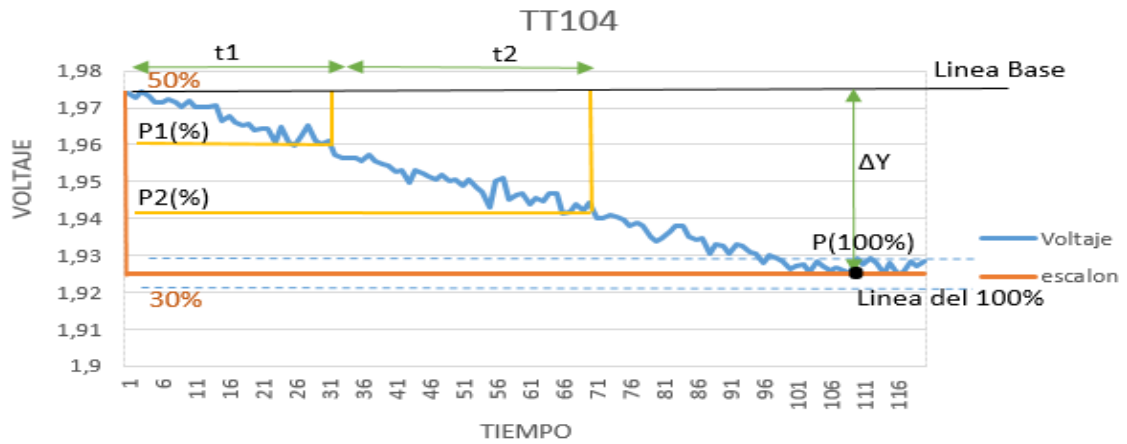


Figura 4.6: Respuesta del proceso cierre d49

Fuente: Autores

Como se observa en la gráfica tenemos la curva de respuesta del proceso del cierre del d49 ante una entrada de tipo escalón.

Se coloca la línea base, que es la línea horizontal trazada en el estado inicial del proceso y la línea del 100%, que es la línea horizontal trazada en el estado final del proceso, para determinar de una manera adecuada los puntos porcentuales del transitorio, que son:

$$P_1(\%) = P_{(28.3\%)}$$

$$P_2(\%) = P_{(63.2\%)}$$

Una vez trazados estos puntos obtenemos los valores de muestreo.

$$t_{28.3\%} = \text{valor de muestra número 31}$$

$$t_{63.2\%} = \text{valor de muestra número 69}$$

De acuerdo a las muestras del Anexo 5 se obtiene el tiempo t_1 y t_2 .

En la curva de respuesta del proceso consideramos que el punto final o punto en el cual la curva de respuesta se empieza a estabilizar está en:

$$P_{(100\%)} = 1,92675097276264[V]$$

$P_{(100\%)}$: Punto de estabilización del proceso

A continuación, se calcula la ganancia del proceso del cierre del d49, la posición final de la manipulación del d49 es de 30%, y la posición inicial es de 50% para la variable de entrada $U(t)$.

$$\begin{aligned}
 k_{baj} &= \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{\text{Cambio variable de salida } Y(t)}{\text{Cambio variable de entrada } U(t)} \\
 &= \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\text{Valor Damper}_{final} - \text{Valor Damper}_{inicial}} \\
 &= \frac{1,92675097276264 - 1,9739785992217}{0.3 - 0.5} = 0.2361
 \end{aligned}$$

k_{baj} : Ganancia de bajada del proceso

$V_{final} = P_{(100\%)}$: Valor final de estabilizacion del proceso

$V_{inicial}$: Valor inicial del proceso

Utilizando el método gráfico de Smith, se calcula los valores porcentuales trazados en la gráfica, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos.

$$P_{(28.3\%)} = t_1 * \text{tiempo de cada muestra} = 31 * 8\text{seg} = 248\text{seg}$$

$$P_{(63.2\%)} = t_2 * \text{tiempo de cada muestra} = 69 * 8\text{seg} = 552\text{seg}$$

Utilizando la fórmula para encontrar la constante de tiempo del proceso (τ), se tiene:

$$\tau_{baj} = 1,5[(P_{(63.2\%)} - P_{(28.3\%)})] = 1,5(552 - 248) = 456$$

τ_{baj} : constante de tiempo de bajada

Con estos valores, podemos obtener nuestra función de transferencia para el cierre del dámper D49.

Función de transferencia (ft_{baj}):

$$ft_{baj} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} = \frac{0,2361}{207936s^2 + 912s + 1}$$

ft_{baj} : Funcion de transferencia de bajada dámper D49

s: variable en función de la frecuencia

$\tau = \tau_{baj}$: constante de tiempo de bajada

4.1.2.3 Función de Transferencia Apertura de Dámper D41 subida

En la figura 4.7, se puede observar el comportamiento del proceso a la salida del molino de crudo, medido por el transmisor de temperatura TT104 cuando se realizó la apertura del dámper D41 de la toma de datos del anexo 2 del presente trabajo, en el eje de las abscisas podemos observar el tiempo en segundos que se toma cada muestra,

hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos, en el eje de las coordenadas podemos observar el voltaje obtenido por la termocupla (TT104), la respuesta del sistema como se observa en la gráfica nos muestra un sistema sobre-amortiguado, posteriormente utilizamos el método de Smith de los dos puntos que se explicó anteriormente.

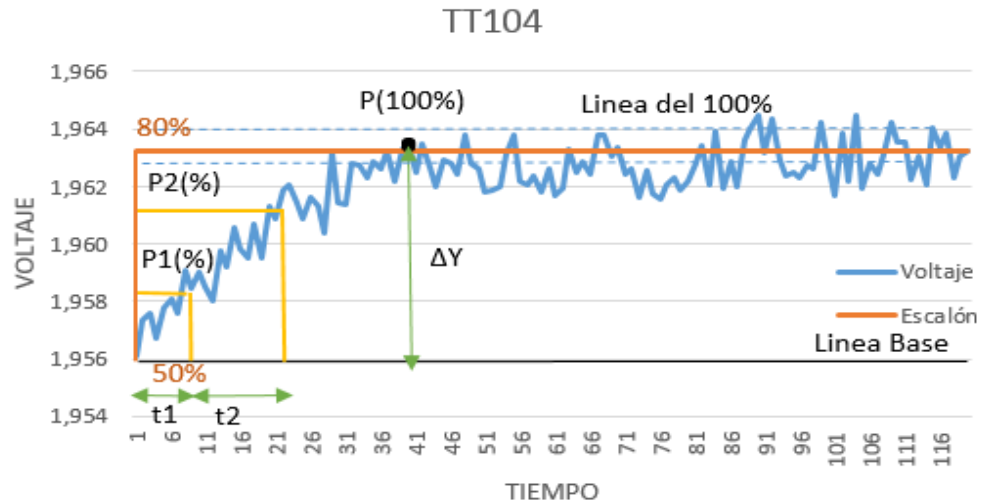


Figura 4.7: Respuesta del proceso apertura dâmpier 41
Fuente: Autores

Como se observa en la gráfica tenemos la curva de respuesta del proceso de la apertura del dâmpier D41 ante una entrada de tipo escalón.

Se coloca la línea base, que es la línea horizontal trazada en el estado inicial del proceso y la línea del 100%, que es la línea horizontal trazada en el estado final del proceso, para determinar de una manera adecuada los puntos porcentuales del transitorio, que son:

$$P_1(\%) = P_{(28.3\%)}$$

$$P_2(\%) = P_{(63.2\%)}$$

Una vez trazados estos puntos obtenemos los valores de muestreo

$$t_{28.3\%} = \text{valor de muestra número 11}$$

$$t_{63.2\%} = \text{valor de muestra número 25}$$

De acuerdo a las muestras en el Anexo 5 se obtiene el tiempo t_1 y t_2 .

Consideramos que el punto final o punto en el cual la curva de respuesta se empieza a estabilizar está en:

$$P_{(100\%)} = 1,96322957198443[V]$$

$P_{(100\%)}$: Punto de estabilización del proceso

A continuación, se calcula la ganancia del proceso de apertura del dampér D41, la posición final de la manipulación del dampér es de 80%, y la posición inicial es de 50% para la variable de entrada $U(t)$.

$$\begin{aligned}
 k_{sub} &= \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{\text{Cambio variable de salida } Y(t)}{\text{Cambio variable de entrada } U(t)} \\
 &= \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\text{Valor Damper}_{final} - \text{Valor Damper}_{inicial}} \\
 &= \frac{1,96322957198443 - 1,95607976653696}{0.8 - 0.5} = 0.023833
 \end{aligned}$$

k_{sub} : Ganancia de subida del proceso

$V_{final} = P_{(100\%)}$: Valor final de estabilizacion del proceso

$V_{inicial}$: Valor inicial del proceso

Utilizando el método gráfico de Smith, se calcula los valores porcentuales trazados en la gráfica, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos.

$$P_{(28.3\%)} = t_1 * \text{tiempo de cada muestra} = 11 * 8\text{seg} = 88\text{seg}$$

$$P_{(63.2\%)} = t_2 * \text{tiempo de cada muestra} = 25 * 8\text{seg} = 200\text{seg}$$

Utilizando la fórmula para encontrar la constante de tiempo del proceso (τ), se tiene:

$$\tau_{sub} = 1,5[(P_{(63.2\%)} - P_{(28.3\%)})] = 1,5(200 - 88) = 168$$

τ_{sub} : constante de tiempo de subida

Con estos valores, podemos obtener nuestra función de transferencia para la apertura del dampér D41.

Función de transferencia (ft_{sub}):

$$ft_{sub} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} = \frac{0.023833}{28224s^2 + 336s + 1}$$

ft_{sub} : Funcion de transferencia de subida damper D41

s : variable en función de la frecuencia

$\tau = \tau_{sub}$: constante de tiempo de subida

4.1.2.4 Función de Transferencia Cierre de Dámper D41 bajada.

En la figura 4.8, podemos observar el comportamiento del proceso a la salida del molino de crudo, medido por el transmisor de temperatura TT104 cuando se realizó el cierre del dámper D41 de la toma de datos del anexo 2 del presente trabajo, en el eje de las abscisas podemos observar el tiempo en segundos que se toma cada muestra, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos, en el eje de las coordenadas podemos observar el voltaje obtenido por la termocupla (TT104), la respuesta del sistema como se observa en la gráfica nos muestra un sistema sobre-amortiguado, posteriormente utilizamos el método de Smith de los dos puntos que se explicó anteriormente.

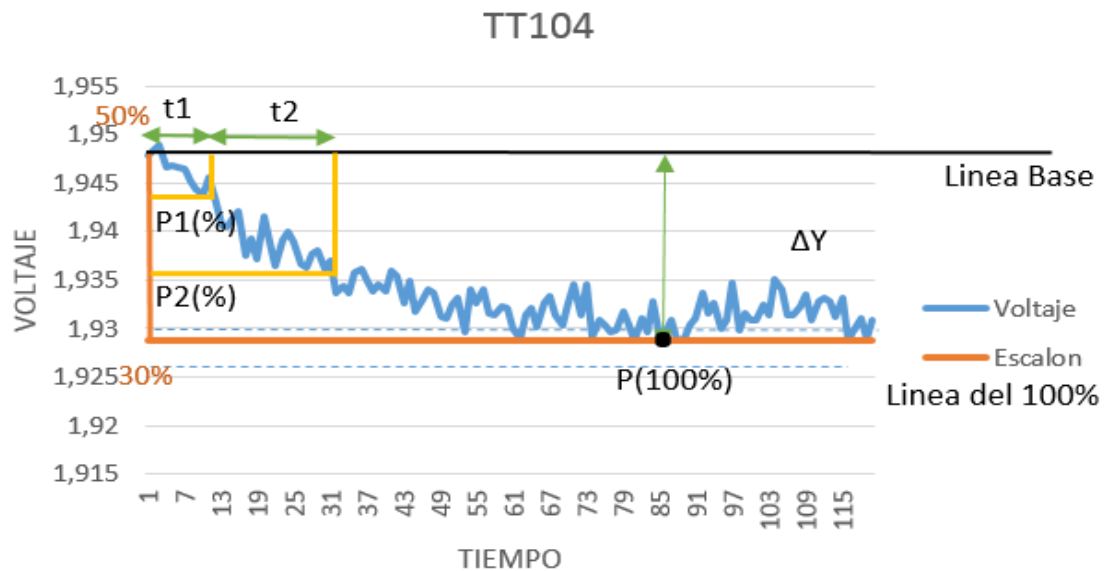


Figura 4.8: Respuesta del proceso cierre dámper 41
Fuente: Autores

Como se observa en la gráfica tenemos la curva de respuesta del proceso del cierre del dámper D41 ante una entrada de tipo escalón.

Se coloca la línea base, que es la línea horizontal trazada en el estado inicial del proceso y la línea del 100%, que es la línea horizontal trazada en el estado final del proceso, para determinar de una manera adecuada los puntos porcentuales del transitorio, que son:

$$P_1(\%) = P_{(28.3\%)}$$

$$P_2(\%) = P_{(63.2\%)}$$

Una vez trazados estos puntos obtenemos los valores de muestreo.

$$t_{28.3\%} = \text{valor de muestra número 25}$$

$$t_{63.2\%} = \text{valor de muestra número } 57$$

De acuerdo a las muestras del Anexo 5 se obtiene el tiempo t_1 y t_2

En la curva de respuesta del proceso consideramos que el punto final o punto en el cual la curva de respuesta se empieza a estabilizar está en:

$$P_{(100\%)} = 1,92879377431906[V]$$

$P_{(100\%)}$: Punto de estabilización del proceso

A continuación, se calcula la ganancia del proceso del cierre del dämpfer D41, la posición final de la manipulación del dämpfer es de 30%, y la posición inicial es de 50% para la variable de entrada $U(t)$.

$$\begin{aligned} k_{baj} &= \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{\text{Cambio variable de salida } Y(t)}{\text{Cambio variable de entrada } U(t)} \\ &= \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\text{Valor Damper}_{final} - \text{Valor Damper}_{inicial}} \\ &= \frac{1,92879377431906 - 1,94888132295719}{0.3 - 0.5} = 0.10043 \end{aligned}$$

k_{baj} : Ganancia de bajada del proceso

$V_{final} = P_{(100\%)}$: Valor final de estabilización del proceso

$V_{inicial}$: Valor inicial del proceso

Utilizando el método gráfico de Smith, se calcula los valores porcentuales trazados en la gráfica, hay que tener presente que en nuestro caso cada muestreo tomado dura 8 segundos.

$$P_{(28.3\%)} = t_1 * \text{tiempo de cada muestra} = 25 * 8\text{seg} = 200\text{seg}$$

$$P_{(63.2\%)} = t_2 * \text{tiempo de cada muestra} = 57 * 8\text{seg} = 456\text{seg}$$

Utilizando la fórmula para encontrar la constante de tiempo del proceso (τ), se tiene:

$$\tau_{baj} = 1,5[(P_{(63.2\%)} - P_{(28.3\%)})] = 1,5(456 - 200) = 384$$

τ_{baj} : constante de tiempo de bajada

Con estos valores, podemos obtener nuestra función de transferencia para el cierre del dámper D41.

Función de transferencia (ft_{baj}):

$$ft_{baj} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} = \frac{0.10043}{147456s^2 + 768s + 1}$$

ft_{baj} : Funcion de transferencia de bajada damper D41

s : variable en función de la frecuencia

$\tau = \tau_{baj}$: constante de tiempo de bajada

4.1.3 DESARROLLO EN MATLAB

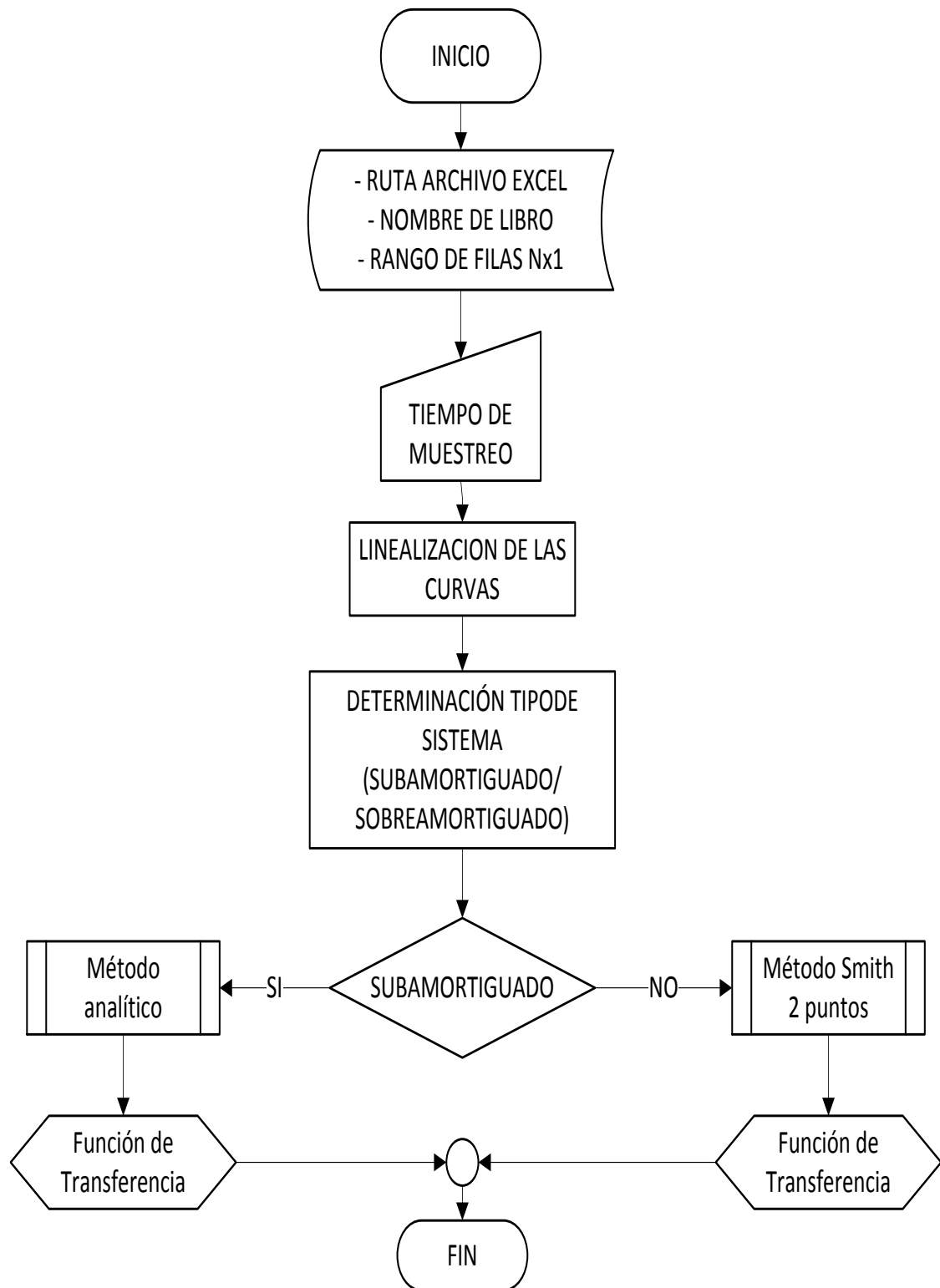
4.1.3.1 Funcionamiento

Luego de realizar el análisis matemático utilizando fórmulas de identificación gráfica se pensó desarrollar un software en base a este algoritmo para estimar promedios de varias tomas de datos y a la vez presentar una posible solución automática para la obtención de la función de transferencia para procesos similares.

Se utilizó como herramienta para el desarrollo del presente trabajo *MATLAB*, inicialmente se debe contar con una hoja de cálculo de *Excel* con la información del sistema a analizar (respuesta del escalón de la variación de la apertura de cada dámper respectivamente), se especifica la ubicación de dicho archivo la hoja y el rango de celdas que se registraran para el análisis del sistema, además se debe especificar el tiempo de muestreo, esto se refiere al tiempo en segundos del intervalo transcurrido entre muestra y muestra.

El software desarrollado en Matlab recogerá todos los parámetros pertinentes y nos presentará una muy buena aproximación a una función de transferencia de segundo orden que será la que representará el proceso que se va a estudiar. Para tener mayor precisión debido a que el presente trabajo es un proceso real y disminuir el error por las múltiples perturbaciones se pretende proponer una función de transferencia promedio de varias tomas de datos en diferentes condiciones.

4.1.3.2 Diagrama De Flujo



4.1.3.3 Ejecución

De igual forma como en programas anteriores se presenta una breve explicación del funcionamiento y continuación se muestra la interfaz principal

Figura 4.9 - Interfaz usuario inicial obtención función de transferencia

Fuente: Autores

Para el correcto funcionamiento del programa se debe ingresar los siguientes parámetros:

- Ruta de la ubicación del archivo. Ejemplo:
 - D:\TESIS\TRANSFERFUNCION_CORREARUIZ\ARCHIVOS EXCEL\AdquisicionDatos.xls
- Nombre del libro. Ejemplo:
 - D49subida
- Rango de celdas a utilizarse. Ejemplo:
 - B2:B121
- Tiempo de muestreo. Ejemplo:
 - 1
- % Escalón
 - 30
- Seleccionar tipo de sistema
- Presionamos el botón “Calcular”

El programa presentará la función de transferencia resultante para la apertura o cierre del dampér respectivo y mostrará las gráficas, la primera en la parte superior derecha

indica la función de entrada y en la parte inferior la respuesta al escalón obtenida con nuestra aproximación con métodos gráficos. Aunque las curvas obtenidas en nuestro proceso son sistemas sobre-amortiguados, de forma similar funciona para sistemas sub-amortiguados.

4.1.3.4 Funciones de transferencia aproximadas

4.1.3.4.1 Función de transferencia aproximada dámper D49 subida

Para obtener la función de transferencia respectiva de la apertura del dámper D49 se debe ingresar los siguientes parámetros:

Los datos obtenidos ingresados en la siguiente tabla se encuentran en el Anexo 5 del presente trabajo.

- Ruta de la ubicación del archivo. Ejemplo:
 - D:\TESIS\TRANSFERFUNCION_CORREARUIZ\ARCHIVOS EXCEL\AdquisicionDatos.xls
- Nombre del libro. Ejemplo:
 - D49subida
- Rango de celdas a utilizarse. Ejemplo:
 - B2:B121
- Tiempo de muestreo. Ejemplo:
 - 8
- % Escalón
 - 30
- Seleccionar tipo de sistema
 - Sobre amortiguado
- Presionamos el botón “Calcular”

Una vez completados todos estos datos nuestra interfaz se presentará como se observa en la siguiente figura.

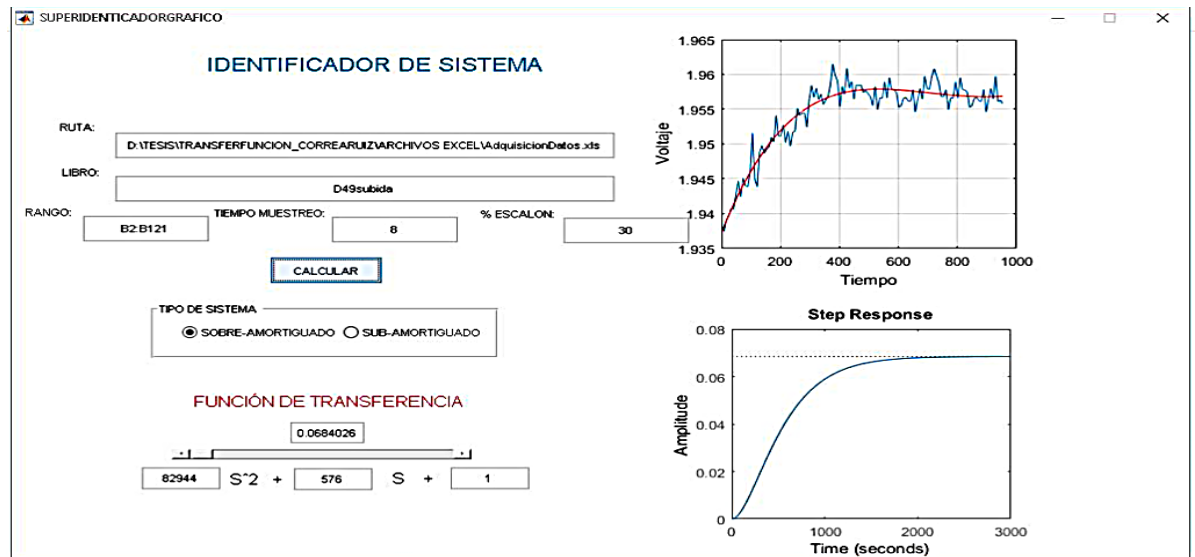


Figura 4.10 – Función de transferencia apertura dámper D49
Fuente: Autores

Tenemos que la función de transferencia para la apertura del dámper D49 es:

$$f_{t_{sub}} = \frac{0.0684026}{82944s^2 + 576s + 1} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} \quad (32)$$

Obtenemos los valores para:

$$k_{sub} = \text{ganancia de subida damper D49} = 0.0684026$$

$$\tau = \tau_{sub} = \text{constante de tiempo de subida} = \sqrt{82944} = 288$$

4.1.3.4.2 Función de transferencia aproximada dámper D49 bajada

Para obtener la función de transferencia respectiva del cierre del dámper D49 se debe ingresar los siguientes parámetros:

Los datos obtenidos ingresados en la siguiente tabla se encuentran en el ANEXO 2 del presente trabajo

- Ruta de la ubicación del archivo. Ejemplo:
 - D:\TESIS\TRANSFERFUNCION_CORREARUIZ\ARCHIVOS EXCEL\AdquisicionDatos.xls
- Nombre del libro. Ejemplo:
 - D49bajada
- Rango de celdas a utilizarse. Ejemplo:
 - B2:B121
- Tiempo de muestreo. Ejemplo:

- 8
- % Escalón
 - 20
- Seleccionar tipo de sistema
 - Sobre amortiguado
- Presionamos el botón “Calcular”

Una vez completados todos estos datos nuestra interfaz se presentará como se observa en la siguiente figura.

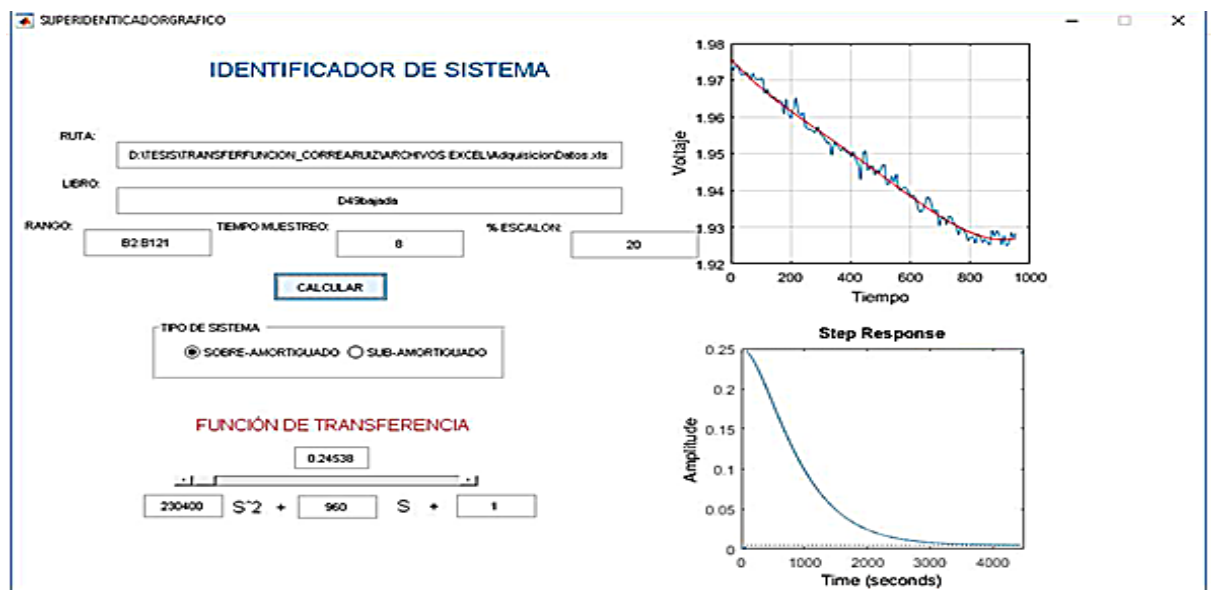


Figura 4.11- Función de transferencia cierre dámper d49

Fuente: Autores

Tenemos que la función de transferencia para el cierre del dámper D49 es:

$$f_{t_{baj}} = \frac{0.24538}{230400s^2 + 960s + 1} = \frac{k_{baj}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} \quad (33)$$

Obtenemos los valores para:

$$k_{baj} = \text{ganancia de bajada damper D49} = 0.24538$$

$$\tau = \tau_{baj} = \text{constante de tiempo de bajada} = \sqrt{230400} = 480$$

4.1.3.4.3 Función de transferencia aproximada dámper D41 subida

Para obtener la función de transferencia respectiva de la apertura del dámper D41 se debe ingresar los siguientes parámetros:

Los datos obtenidos ingresados en la siguiente tabla se encuentran en el Anexo 5 del presente trabajo

- Ruta de la ubicación del archivo. Ejemplo:
 - D:\TESIS\TRANSFERFUNCION_CORREARUIZ\ARCHIVOS EXCEL\AdquisicionDatos.xls
- Nombre del libro. Ejemplo:
 - D41subida
- Rango de celdas a utilizarse. Ejemplo:
 - B2:B101
- Tiempo de muestreo. Ejemplo:
 - 8
- % Escalón
 - 30
- Seleccionar tipo de sistema
 - Sobre amortiguado
- Presionamos el botón “Calcular”

Una vez completados todos estos datos nuestra interfaz se presentará como se observa en la siguiente figura.

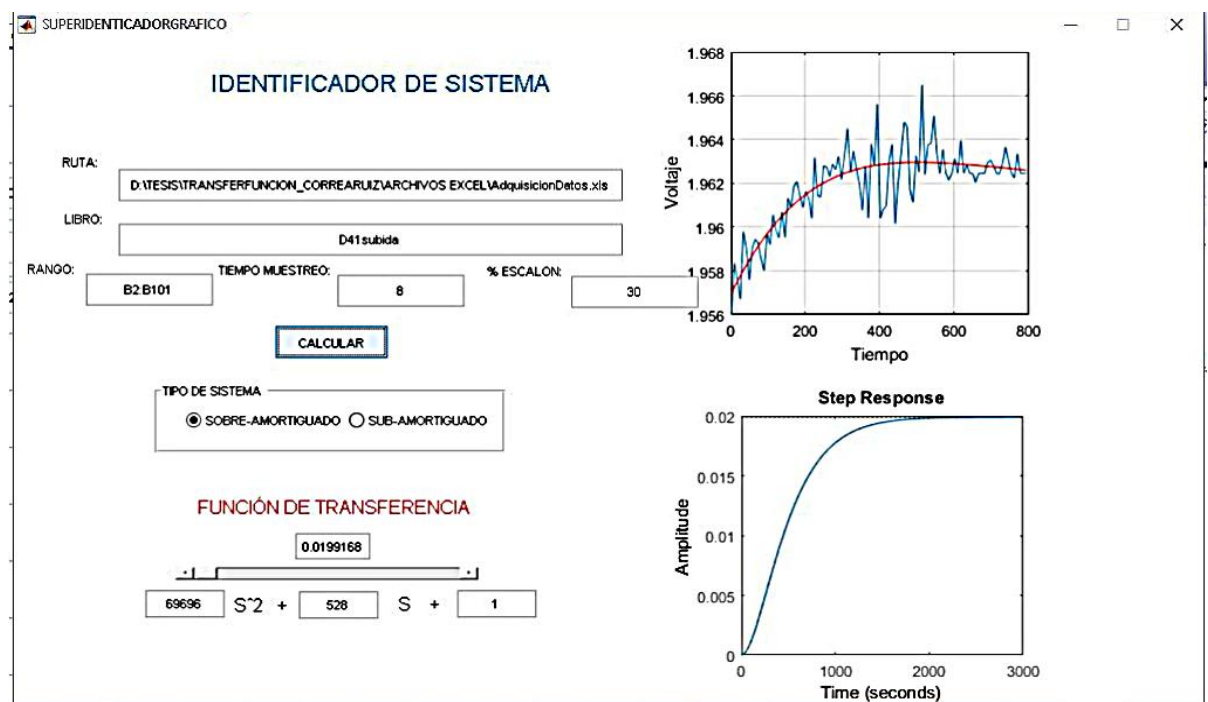


Figura 4.12 – Función de transferencia apertura dâmpfer D41

Fuente: Autores

Tenemos que la función de transferencia para la apertura del dâmpfer D41 es:

$$f_{t_{sub}} = \frac{0.0199168}{69696^2 + 528s + 1} = \frac{k_{sub}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} \quad (34)$$

Obtenemos los valores para:

$$k_{sub} = \text{ganancia de subida damper D41} = 0.0199168$$

$$\tau = \tau_{sub} = \text{constante de tiempo de subida} = \sqrt{69696} = 264$$

4.1.3.4.4 Función de transferencia aproximada dámper D41 bajada

Para obtener la función de transferencia respectiva del cierre del dámper D41 se debe ingresar los siguientes parámetros:

Los datos obtenidos ingresados en la siguiente tabla se encuentran en el ANEXO 2 del presente trabajo

- Ruta de la ubicación del archivo. Ejemplo:
 - D:\TESIS\TRANSFERFUNCION_CORREARUIZ\ARCHIVOS EXCEL\AdquisicionDatos.xls
- Nombre del libro. Ejemplo:
 - D41bajada
- Rango de celdas a utilizarse. Ejemplo:
 - B2:B121
- Tiempo de muestreo. Ejemplo:
 - 8
- % Escalón
 - 20
- Seleccionar tipo de sistema
 - Sobre amortiguado
- Presionamos el botón “Calcular”

Una vez completados todos estos datos nuestra interfaz se presentará como se observa en la siguiente figura.

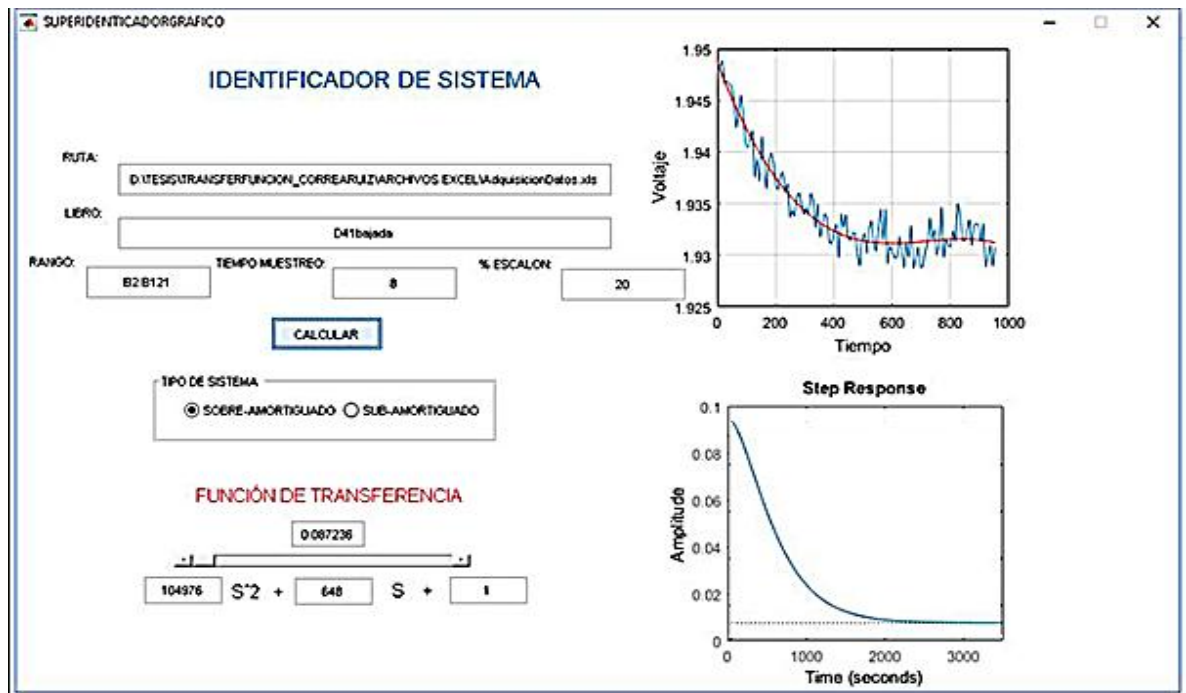


Figura 4.13 – Función de transferencia cierre d41
Fuente: Autores

Tenemos que la función de transferencia para el cierre del d41 es:

$$f_{t_{baj}} = \frac{0.087236}{104976s^2 + 648s + 1} = \frac{k_{baj}}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} \quad (35)$$

Obtenemos los valores para:

$$k_{baj} = \text{ganancia de bajada damper D41} = 0.087236$$

$$\tau = \tau_{baj} = \text{constante de tiempo de bajada} = \sqrt{104976} = 32$$

4.1.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROPUESTAS

Como lo hemos mencionado anteriormente para tener una mejor aproximación se realizará un promedio de las funciones de transferencias obtenidas.

4.1.4.1 Función de Transferencia Promedio Dámper D49.

Para sacar la función de transferencia promedio del d49, primero realizamos dos tablas con los valores calculados, aproximados de k y τ de subida y bajada que se explicaron anteriormente, con estos resultados obtenemos los promedios de cada parámetro y la función de transferencia respectiva para el d49.

Tabla 4.1 - Valores calculados y aproximados de k para el d49

Dámper D49			
Calculada(Matemáticamente)		Aproximada(Matlab)	
Subida	Bajada	Subida	Bajada
Ksub	kbaj	Ksub	Kbaj
0.067123333	0.2361	0.0684026	0.24538

Fuente: Autores

$$k_{pro} = \frac{\overbrace{(k_{sub} + k_{baj})}^{\text{calculado}} + \overbrace{(k_{sub} + k_{baj})}^{\text{aproximado}}}{4} \quad (36)$$

$$k_{pro} = \frac{(0.067123333 + 0.2361 + 0.0684026 + 0.24538)}{4}$$

$$= 0.154251483$$

Tabla 5.2 - Valores calculados y aproximados de τ para el d mper D49

D�mper D49			
Calculada(Matemáticamente)		Aproximada(Matlab)	
Subida	Bajada	Subida	Bajada
τ_{sub}	τ_{baj}	τ_{sub}	τ_{baj}
228	456	288	480

Fuente: Autores

$$\tau_{pro} = \frac{\overbrace{(\tau_{sub} + \tau_{baj})}^{\text{calculado}} + \overbrace{(\tau_{sub} + \tau_{baj})}^{\text{aproximado}}}{4} \quad (37)$$

$$\tau_{pro} = \frac{(228 + 456 + 288 + 480)}{4} = 363$$

Función de transferencia promedio D49.

$$ft_{pro} = \frac{k_{pro}}{\tau_{pro}^2 s^2 + 2\tau_{pro}s + 1} = \frac{0,154251483}{131769s^2 + 726s + 1} \quad (38)$$

 k_{pro} : Ganancia promedio d mper D49 τ_{pro} : constante de tiempo promedio d mper D49 s : variable en función de la frecuencia**4.1.4.24.1.4.2 Función de Transferencia Promedio D mper D41.**

Para sacar la función de transferencia promedio del d mper D41, primero realizamos dos tablas con los valores calculados, aproximados de k y τ de subida y bajada que se explicaron anteriormente, con estos resultados obtenemos los promedios de cada parámetro y la función de transferencia respectiva para el d mper D41.

Tabla 6.3 - Valores calculados y aproximados de k para el d mper D41

D�mper D41			
Calculada(Matemáticamente)		Aproximada(Matlab)	
Subida	Bajada	Subida	Bajada
K_{sub}	k_{baj}	K_{sub}	K_{baj}
0.023833	0.10043	0.0199168	0.087236

$$k_{pro} = \frac{\overset{\text{calculado}}{(k_{sub} + k_{baj})} + \overset{\text{aproximado}}{(k_{sub} + k_{baj})}}{4} \quad (39)$$

$$k_{pro} = \frac{(0.023833 + 0.10043 + 0.0199168 + 0.087236)}{4}$$

$$= 0.05785395$$

Tabla 7.4 - Valores calculados y aproximados de τ para el d mper D41

D�mper D41			
Calculada(Matemáticamente)		Aproximada(Matlab)	
Subida	Bajada	Subida	Bajada
Tsub	Tbaj	Tsub	tbaj
168	384	264	324

Fuente: Autores

$$\tau_{pro} = \frac{\overset{\text{calculado}}{(\tau_{sub} + \tau_{baj})} + \overset{\text{aproximado}}{(\tau_{sub} + \tau_{baj})}}{4} \quad (40)$$

$$\tau_{pro} = \frac{(168 + 384 + 264 + 324)}{4} = 285$$

Función de transferencia promedio D41.

$$f t_{pro} = \frac{k_{pro}}{\tau_{pro}^2 s^2 + 2\tau_{pro}s + 1} = \frac{0.05785395}{81225s^2 + 570s + 1} \quad (41)$$

 k_{pro} : Ganancia promedio d mper D41 τ_{pro} : constante de tiempo promedio d mper D41 s : variable en función de la frecuencia

4.2 MATRIZ DE ESTADOS

Para la representación del modelo dinámico de sistemas en el espacio de estado se usan tres tipos de variables:

- Variables de estado
- Variables de entrada
- Variables de salida

La representación de una matriz de estados tiene ciertas ventajas, en las que su modelado puede representar sistemas tanto continuos como discretos, variantes o invariantes en el tiempo, lineales o no lineales y generalmente usados en notación matricial. (Ogata, 2010)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (42)$$

$$y = Cx + Du \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & \cdots & c_{pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{p1} & d_{p2} & \cdots & d_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix}$$

$$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$B \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad (n = m = p = 2)$$

$$C \in \mathbb{R}^{p \times n}$$

x: vector de estados

y: vector de salidas

u: vector de entradas

A: matriz de estados

B: matriz de entrada

C: matriz de salida

D: matriz de transmisión directa, normalmente se toma como matriz cero (sistema causal)

Modelo en espacio de estados

Realizamos la transformada de Laplace de las ecuaciones.

$$sx(s) = Ax(s) + Bu(s) \quad (45)$$

$$y(s) = Cx(s) \quad (46)$$

Factorizando:

$$sx(s) - Ax(s) = Bu(s) \quad (47)$$

Multiplicando por la matriz identidad:

$$(sI - A)x(s) = Bu(s) \quad (48)$$

Desperado $x(s)$:

$$x(s) = (sI - A)^{-1}Bu(s) \quad (49)$$

Reemplazando $x(s)$ en la ecuación (36), tenemos:

$$y(s) = C(sI - A)^{-1}Bu(s) \quad (50)$$

Obtenemos la matriz de transferencia:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1}B \quad (51)$$

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{CAdj(sI - A)B}{|sI - A|} \quad (52)$$

4.2.1 APROXIMACIÓN MATLAB PARA DEFINIR MATRIZ RESULTANTE

Para obtener nuestra matriz de estados resultante presentamos los siguientes pasos:

- Ingresamos la función de transferencia que definimos del dámper D49
 - `FTD49=tf([0.154251483],[131769 726 1])`

$$FTD49 = \frac{0,154251483}{131769s^2 + 726s + 1}$$

- Ingresamos la función de transferencia que definimos del dámper D41
 - `FTD41=tf([0.05785395],[81225 570 1])`

$$FTD41 = \frac{0,05785395}{81225s^2 + 570s + 1}$$

- Utilizamos nuestra matriz de estados para relacionar las funciones de transferencia utilizando el comando `SSDATA`.

SSDATA: esta línea de código relaciona dos funciones de transferencia, transformando un modelo en espacio de estado.

$$\text{○ } [A \ B \ C \ D] = \text{ssdata}([FTD49 \ FTD41]) \quad (53)$$

- Las matrices de estados resultantes son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} -0.0055 & -0.0039 & 0 & 0 \\ 0.0020 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0070 & -0.0032 \\ 0 & 0 & 0.0039 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0313 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.0156 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 0.0192 \quad 0 \quad 0.0117] \quad D = [0 \quad 0]$$

4.3 ESQUEMA DE CONTROL

Para controlar nuestro sistema planteamos el siguiente diagrama de bloques:

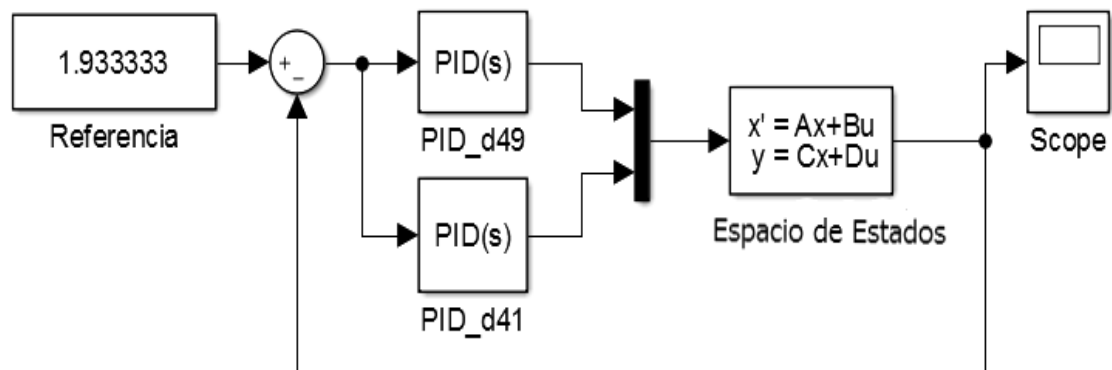


Figura 4.14 - Diagrama de bloques control del proceso

Fuente: Autores

Puesto que el valor de la temperatura a la salida del sistema de molienda de crudo que se desea estabilizar es de 70°C, tenemos:

$T = 70^{\circ}\text{C} = \text{Valor de referencia}$

Reemplazando este valor en la ecuación (27):

$$300V - 300 = 4(70)$$

Despejando el valor del voltaje (V):

$V = 1,9333$ Valor de referencia en Voltaje

En nuestro siguiente bloque, tenemos el controlador PID del dámper D49 en donde realiza la función de sumar las constantes de proporcionalidad (k_p), integral (k_I) y derivativo (k_D),

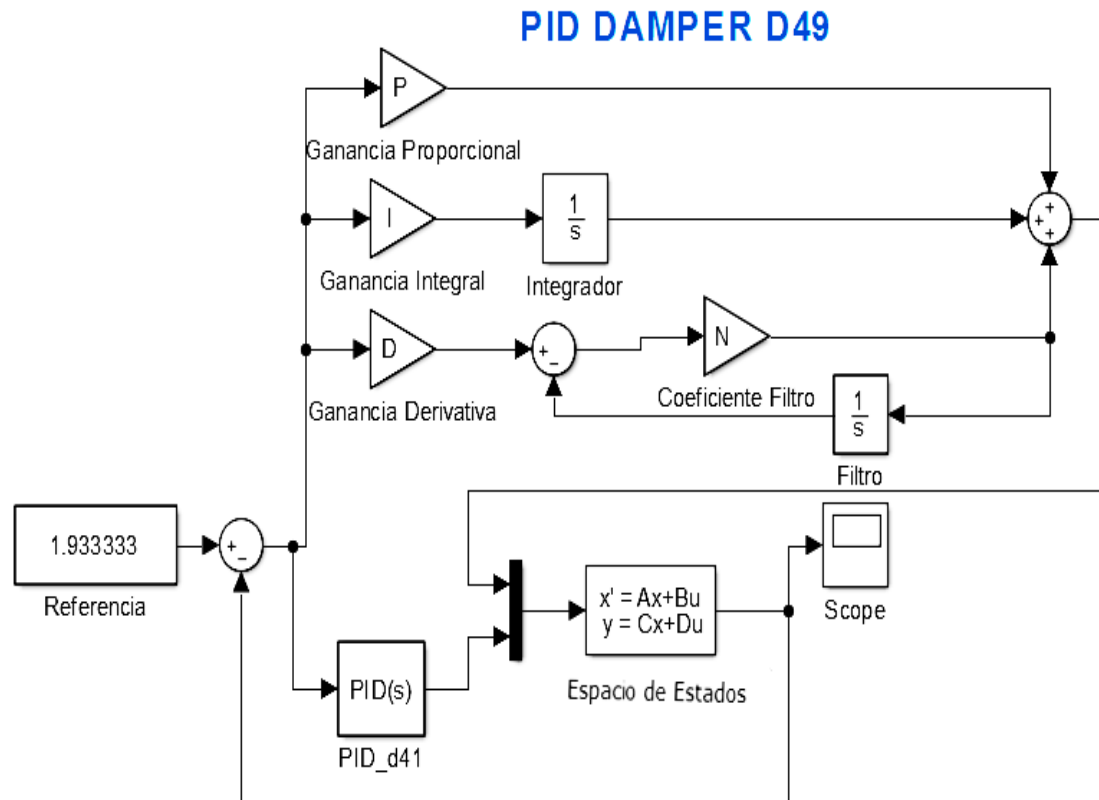


Figura 4.15 - Diagrama de bloques detallado el control PID del d mper D49

Fuente: Autores

El siguiente bloque que se tiene a continuación es del controlador PID del d mper D41 en donde realiza la función de sumar las constantes de proporcionalidad (k_p), integral (k_I) y derivativo (k_D).

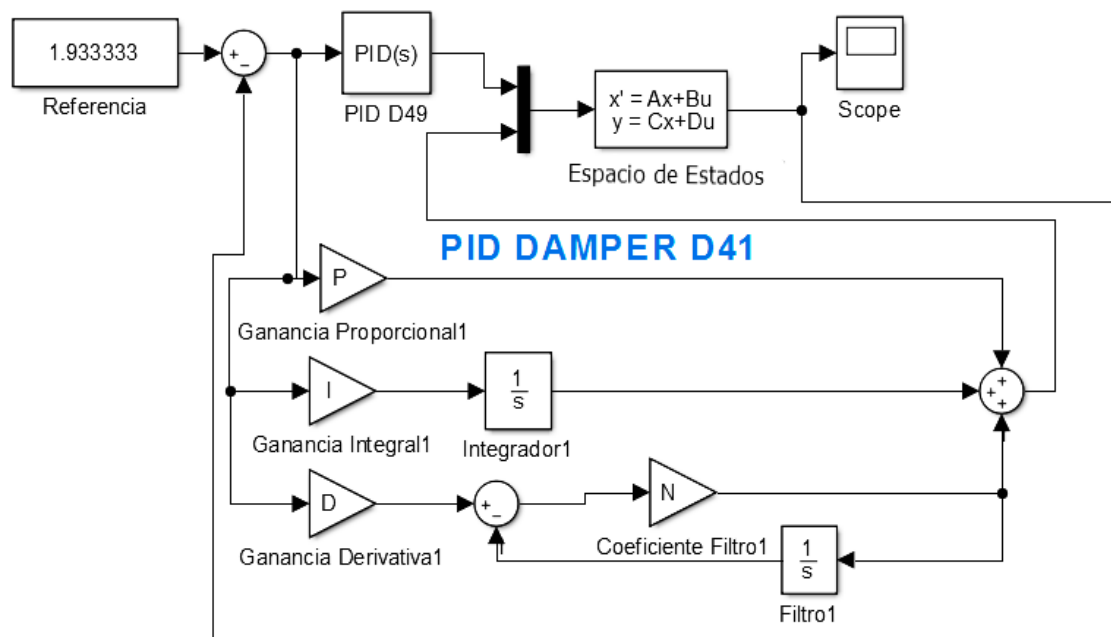


Figura 4.16 - Diagrama de bloques detallado el control PID del d mper D41

Fuente: Autores

En el bloque final del esquema de control, tenemos la matriz de estados, que relaciona las funciones de transferencia de los dampers D49 y D41

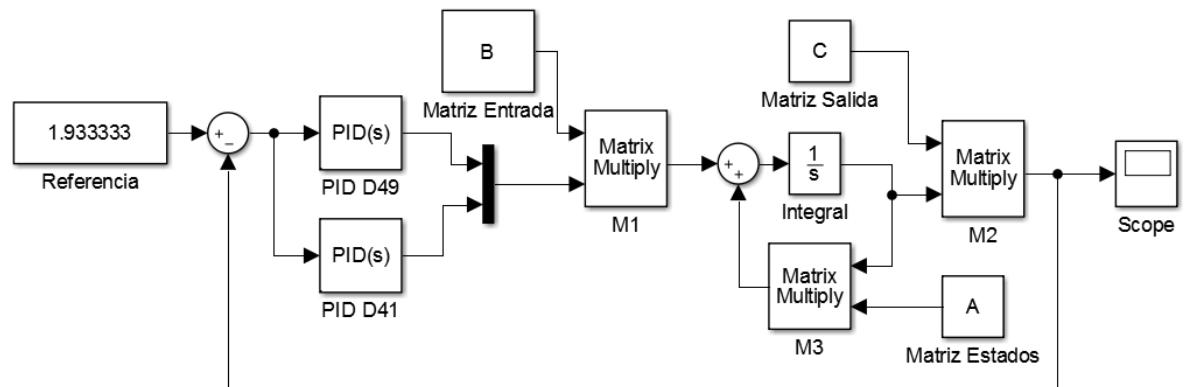


Figura 4.17 - Diagrama de bloques detallado el espacio de estados
Fuente: Autores

Por último, se tiene el esquema completo de control

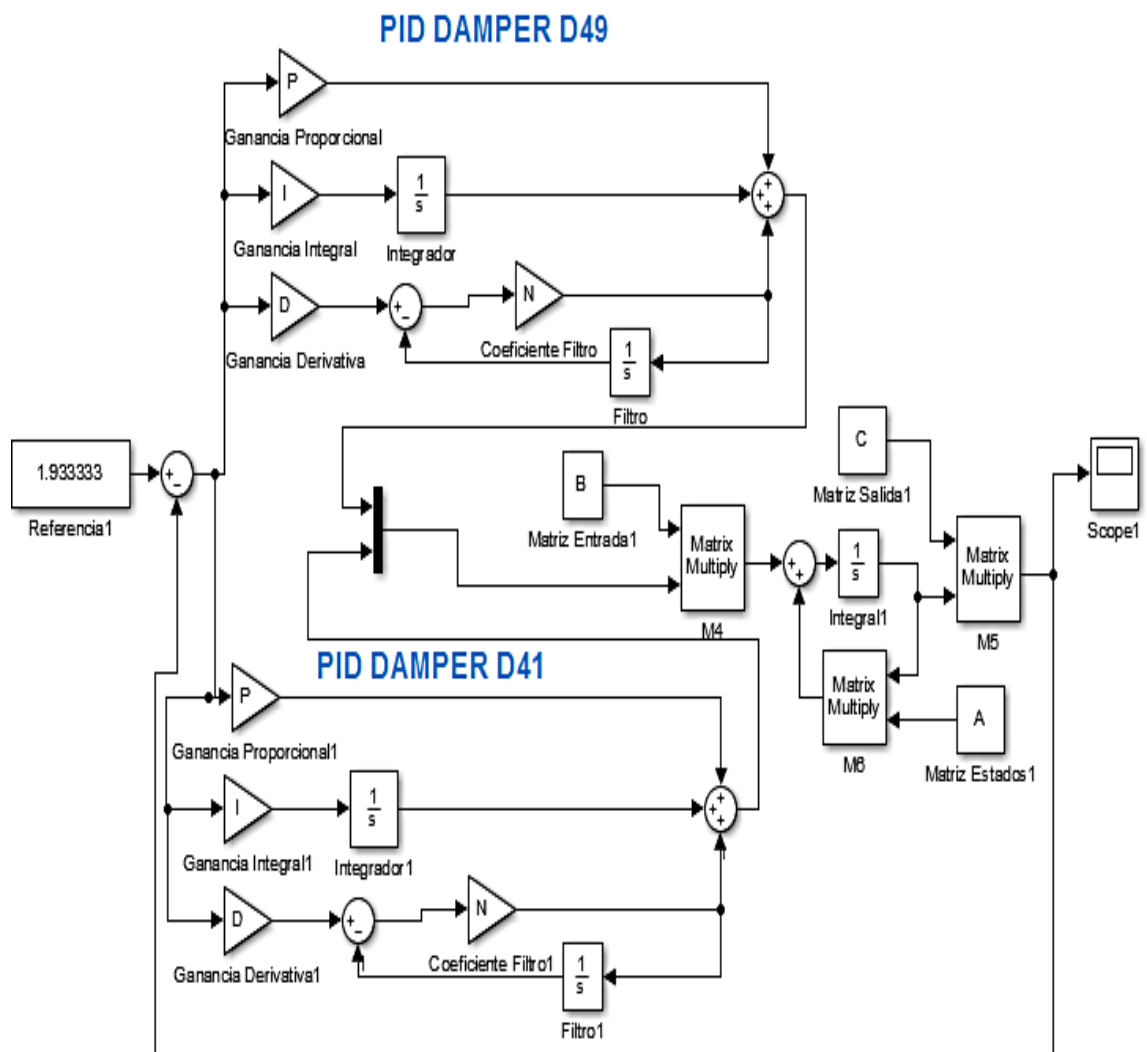


Figura 4.18 - Esquema de control completo
Fuente: Autor

4.4 APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DE PID

Como se mencionó anteriormente la planta cuenta con dos controladores SISO, por ende, en el presente trabajo se va a calcular las constantes de controlabilidad para cada uno de los actuadores que en nuestro caso serían los dampers.

4.4.1 SINTONIZACIÓN PID DEL PROCESO DAMPER D49

4.4.1.1 Método 1 – Reacción a la Curva

En la práctica la aproximación de constantes de un controlador PID, se puede obtener resultados satisfactorios utilizando métodos gráficos donde visualizaremos la reacción de la planta a lazo abierto.

Inicialmente, vamos a representar nuestra planta a lazo abierto como se muestra en la figura 4.19

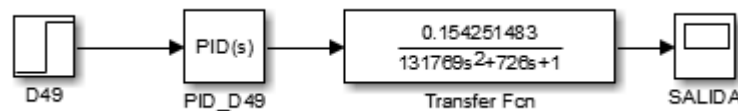


Figura 4.19 - Planta D49 a lazo abierto

Fuente: Autores

En la figura 4.17 tomamos únicamente el sistema SISO obtenido del d mper D49.

Entonces, obtenemos de dicha planta la la figura 75 que se muestra a continuación. Tomando en cuenta que para obtener esta gráfica utilizamos un 20% de un escalón unitario.

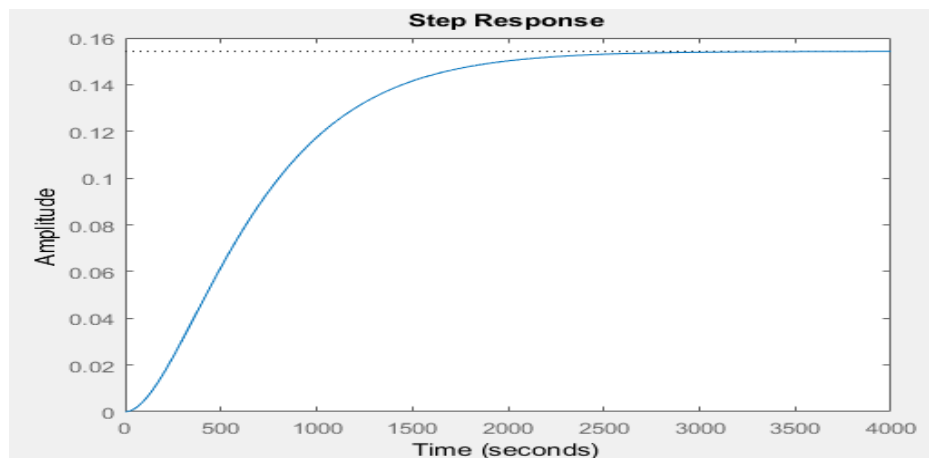


Figura 4.20 - Respuesta al escalón del d mper D49

Fuente: Autores

Como el presente método es gráfico, trazamos una línea tangente al punto de inflexión de la respuesta al escalón, como se observa en la siguiente gráfica, además de subrayar

y rescatar los parámetros fundamentales para los cálculos que propondremos más adelante.

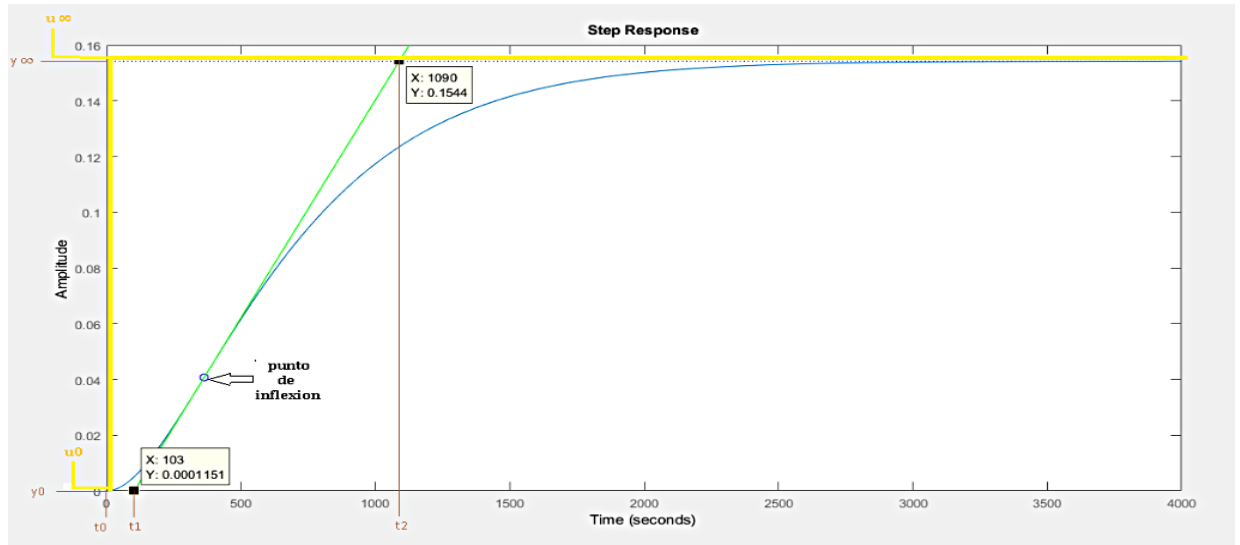


Figura 4.21 - Grafica con trazos de parámetros para análisis de la curva a lazo abierto D49

Fuente: Autores

Donde:

punto de inflexión: Indica la máxima pendiente tangente.

t_0 : Tiempo muerto – Distancia entre el origen y reacción de la curva.

t_1 : Reacción de la Curva - Distancia entre reacción de la curva y perpendicular a línea tangente.

t_2 : Constante de tiempo.

(u_0, y_0) : punto de inicio de la curva intersectado con la línea tangente.

(u_∞, y_∞) : punto de intersección de la línea tangente trazada y la proyección del punto de estabilización de la curva.

Es necesario realizar cálculos simples para obtener parámetros complementarios para el presente análisis.

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} \quad (54)$$

$$y_\infty = y(t_2)$$

$$y_0 = t_1$$

$$u_\infty = x(t_2)$$

$$K_0 = \frac{0.1544 - 0.0001151}{1090 - 503} = 2.62836286 \times 10^{-4}$$

Donde:

K_0 : pendiente de la tangente

$$\tau_0 = t_1 - t_0 \quad (55)$$

$$\tau_0 = 503 - 0 = 503$$

Donde:

τ_0 : Tiempo de reacción

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 \quad (56)$$

$$\gamma_0 = 1090 - 503 = 587$$

Donde:

γ_0 : Constante de tiempo

4.4.1.2 Cálculo de las constantes aproximadas para el controlador PID, dámper D49.

4.4.1.2.1 Aproximación según Ziegler Nichols dámper D49.

Tabla 4.5 - Tabla de aproximación Ziegler Nichols para dámper D49

	Formula	Reemplazo Formula	Constante
P	$\frac{1,2 * \gamma_0}{K_0 * \tau_0}$	$\frac{1,2 * (587)}{2.62 * 10^{-4} * 503}$	5328.022381
I	$2 * \tau_0$	$2 * 503$	1006
D	$0,5 * \tau_0$	$0,5 * 503$	251.5

Fuente: Autores

4.4.1.2.2 Aproximación según Cohen- Coon dámper D49.

Tabla 4.6 - Tabla de aproximación Cohen-Coon para dámper D49

	Formula	Reemplazo Formula	Constante
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 * \tau_0} * \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4 * \gamma_0} \right)$	$\frac{587}{2.62 * 10^{-4} * 503} * \left(\frac{4}{3} + \frac{503}{4 * 587} \right)$	687118.7296
I	$\frac{\tau_0 * (32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{503 * (32 * (587) + 6 * (503))}{13 * (587) + 8 * (503)}$	9409.185
D	$\frac{4 * \tau_0 * \gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$	$\frac{4 * 503 * 587}{11 * 587 + 2 * 503}$	1582.5325

Fuente: Autores

4.4.1.3 Método 2 – Oscilación Sostenida

Para el siguiente método iniciamos planteando la función de transferencia promedio del dämper D49, obtenida de la ecuación (38).

$$FTD49 = \frac{0.154251483}{131769s^2 + 726s + 1}$$

Tomamos en cuenta que este método es aplicado es sistemas de lazo cerrado. Entonces para empezar plantear planteamos nuestro sistema de control como se muestra a continuación en la figura 4.22.

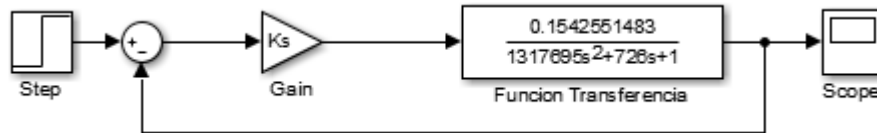


Figura 4.22 - Esquema de control siso D49

Fuente: Autores

Por ende, el PID sintonizado mediante este método se debería representar de la siguiente manera:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (57)$$

Donde:

K_p : es la constante de proporcionalidad.

T_i : es la constante integral.

T_d : es la constante derivativa.

Para encontrar dichas constantes

El presente método nos plantea las siguientes fórmulas para sintonizar dichas constantes de proporcionalidad como se muestra a continuación

$$K_p = 0.6K_{CR} \quad (58)$$

$$T_i = 0.5P_{CR} \quad (59)$$

$$T_d = 0.125P_{CR} \quad (60)$$

Donde:

K_{CR} : Ganancia Crítica.

P_{CR} : Periodo Crítico.

Como se puede observar en la figura 70 estableceremos la ecuación que representa dicho sistema.

$$ft = \frac{G_c(s)K_p}{1 + G_c(s)K_p} \quad (61)$$

Reemplazando los datos de nuestro sistema actual y simplificamos obtenemos lo siguiente

$$f_t = \frac{\frac{0.154251483K_p}{131769s^2 + 726s + 1}}{1 + \frac{0.154251483K_p}{131769s^2 + 726s + 1}} \quad (62)$$

$$f_t = \frac{\frac{0.154251483K_p}{131769s^2 + 726s + 1}}{\frac{131769s^2 + 726s + 1 + 0.154251483K_p}{131769s^2 + 726s + 1}} \quad (63)$$

$$f_t = \frac{0.154251483K_p}{131769s^2 + 726s + 1 + 0.154251483K_p} \quad (64)$$

Para obtener inicialmente nuestra ganancia crítica utilizamos el criterio de Routh Hurwitz

$$131769s^2 + 726s + 1 + 0.154251483K_p = 0 \quad (65)$$

S^2	131769	$1 + 0.154251483K_p$
S^1	726	0
S^0	$1 + 0.154251483K_p$	0

Según este criterio de estabilidad todos los parámetros deben conservar el mismo signo, en este caso positivo, y para que la ganancia sea crítica debe igualarse a cero, entonces tendríamos:

$$1 + 0.154251483K_{CR} = 0$$

$$K_{CR} = -6.482919$$

Según el criterio Routh Hurwitz la ganancia es estable para valores mayores a -1.

A continuación, para obtener nuestro período crítico utilizamos la ecuación (63) y reemplazamos en el campo de los complejos e igualamos a cero.

$$131769(jw)^2 + 1 + 0.154251483K_p = 0 \quad (66)$$

Siendo j complejo ($\sqrt{-1}$) y reemplazamos en la ecuación anterior, además de que $K_p = K_{CR} = -1$. Para así de esta forma obtener el período crítico de este sistema

$$-131769(w)^2 + 1 + (-1) = 0$$

$$726(jw) = 131769(w)^2$$

$$726j = 131769 * w$$

$$w = \frac{726j}{131769}$$

Este método no tiene respuesta para nuestro sistema. Aunque este método es muy reconocido por varios autores, se obtuvo una respuesta compleja debido a que nuestro sistema es sobreamortiguado, por ende, no es un sistema resonante.

4.4.2 SINTONIZACIÓN PID DEL PROCESO DAMPER D41

4.4.2.1 Método 1 – Reacción a la Curva

Al igual que con el sistema SISO anterior se pretende la aproximación de constantes de un controlador PID, utilizando métodos gráficos donde visualizaremos la reacción de la planta a lazo abierto.

Inicialmente, vamos a representar nuestra planta a lazo abierto como se muestra en la figura 4.23.



Figura 4.23 - Planta D41 a lazo abierto

Fuente: Autores

En la figura 4.21 tomamos únicamente el sistema SISO obtenido del dampér D49.

Entonces, obtenemos de dicha planta la figura 4.22 que se muestra a continuación. Tomando en cuenta que para obtener esta gráfica utilizamos un 20% de un escalón unitario.

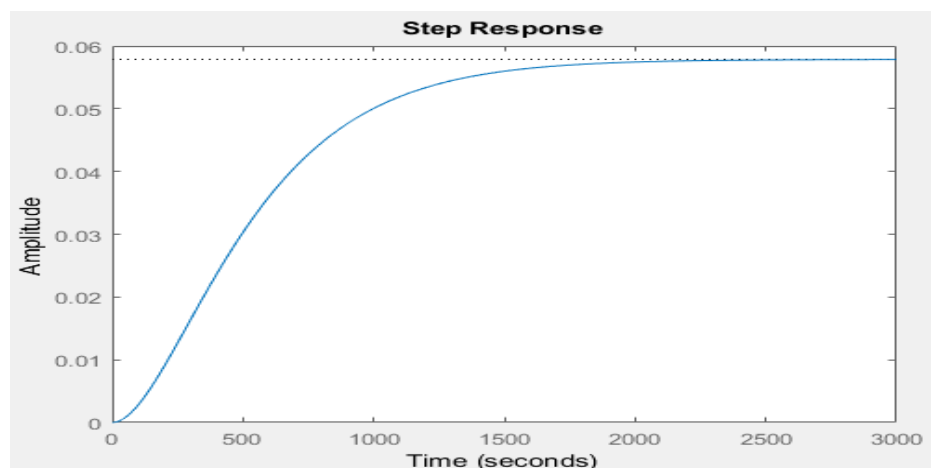


Figura 4.24 - Respuesta al escalón del dampér D41

Fuente: Autores

Como el presente método es gráfico, trazamos una línea tangente al punto de inflexión de la respuesta al escalón, como se observa en la siguiente gráfica, además de subrayar

y rescatar los parámetros fundamentales para los cálculos que propondremos más adelante.

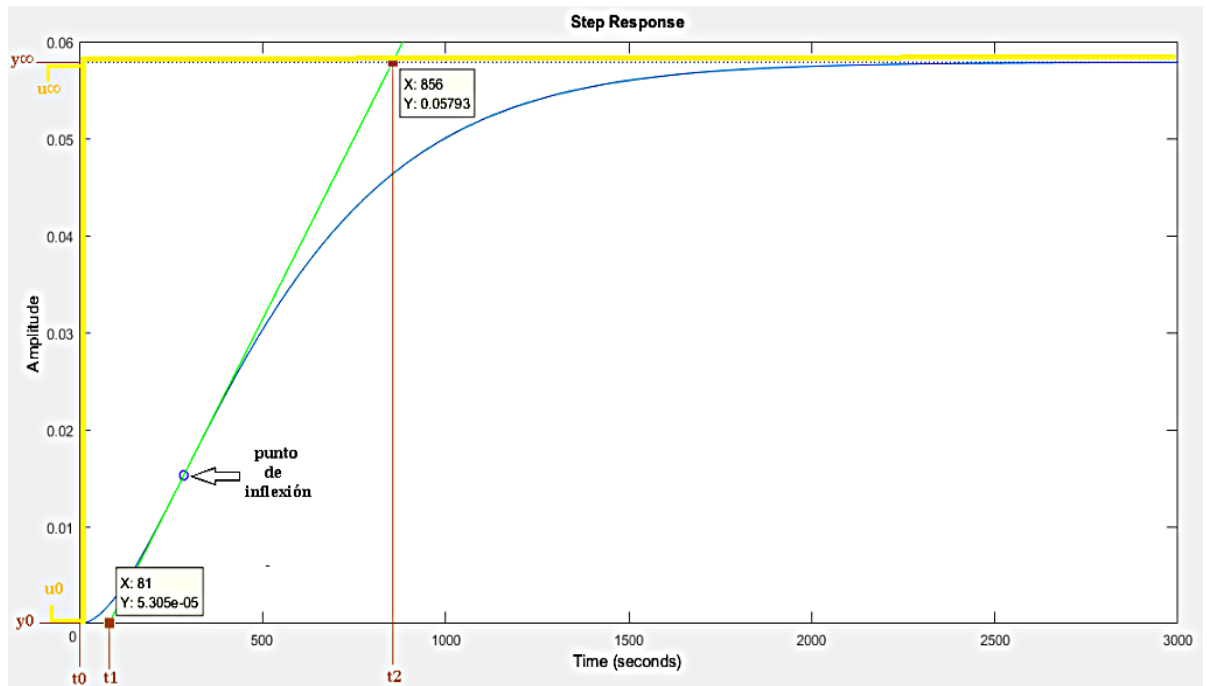


Figura 4.25 - Grafica con trazos de parámetros para análisis de la curva a lazo abierto D41

Fuente: Autores

Donde:

punto de inflexión: Indica la máxima pendiente tangente.

t_0 : Tiempo muerto – Distancia entre el origen y reacción de la curva.

t_1 : Reacción de la Curva - Distancia entre reacción de la curva y perpendicular a línea tangente.

t_2 : Constante de tiempo.

(u_0, y_0) : punto de inicio de la curva intersectado con la línea tangente.

(u_∞, y_∞) : punto de intersección de la línea tangente trazada y la proyección del punto de estabilización de la curva

Es necesario realizar cálculos simples para obtener parámetros complementarios para el presente análisis.

Utilizamos la ecuación (53) para obtener la pendiente de la tangente

$$K_0 = \frac{0.05723 - (5.305 \cdot 10^{-5})}{856 - 81} = 7.377671 \cdot 10^{-5}$$

Donde:

K_0 : pendiente de la tangente

Utilizamos la ecuación (48) para obtener el tiempo de reacción

$$\tau_0 = 81 - 0 = 81$$

Donde:

τ_0 : Tiempo de reacción

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 \quad (67)$$

$$\gamma_0 = 856 - 81 = 775$$

Donde:

γ_0 : Constante de tiempo

4.4.2.2 Cálculo de las constantes aproximadas para el controlador PID, dámper D41.

4.4.2.2.1 Aproximación según Ziegler Nichols dámper D41.

Tabla 4.7 - Tabla de aproximación Ziegler Nichols para dámper D41

	Formula	Reemplazo Formula	Constante
P	$\frac{1,2 * \gamma_0}{K_0 * \tau_0}$	$\frac{1,2 * (775)}{7.3776 * 10^{-5} * 81}$	155624.7423
I	$2 * \tau_0$	$2 * 81$	162
D	$0,5 * \tau_0$	$0,5 * 81$	40.5

Fuente: Autores

4.4.2.2.2 Aproximación según Cohen- Coon dámper D41.

Tabla 4.8 - Tabla de aproximación Cohen-Coon para dámper D41

	Formula	Reemplazo Formula	Constante
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 * \tau_0} * \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4 * \gamma_0} \right)$	$\frac{775}{7.3776 * 10^{-5} * 81} * \left(\frac{4}{3} + \frac{81}{4 * 775} \right)$	11981302.2429
I	$\frac{\tau_0 * (32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{81 * (32 * (775) + 6 * (81))}{13 * (775) + 8 * (81)}$	4202126.66
D	$\frac{4 * \tau_0 * \gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$	$\frac{4 * 81 * 775}{11 * 775 + 2 * 81}$	7482131.55

Fuente: Autores

4.4.2.3 Método 2 – Oscilación Sostenida

Para el siguiente método iniciamos planteando la función de transferencia promedio obtenida del d41, obtenida de la ecuación (41)

$$FTD41 = \frac{0.05785395}{81225s^2 + 570s + 1}$$

Tomamos en cuenta que este método es aplicado es sistemas de lazo cerrado. Entonces para empezar plantear planteamos nuestro sistema de control como se muestra a continuación en la figura 4.26.

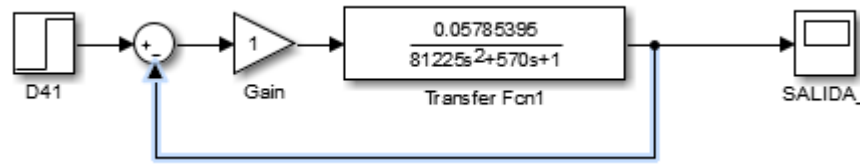


Figura 4.26 - Esquema de control siso D41

Fuente: Autores

Por ende, el PID sintonizado mediante este método se debería representar en forma de la ecuación (57).

El presente método nos plantea las siguientes fórmulas para sintonizar dichas constantes de proporcionalidad como las enunciadas en las ecuaciones (58) (59) (60).

Como se puede observar en la figura 81 estableceremos la ecuación que representa dicho sistema.

$$ft = \frac{G_c(s)K_p}{1 + G_c(s)K_p} \quad (68)$$

Reemplazando los datos de nuestro sistema actual y simplificamos obtenemos lo siguiente

$$ft = \frac{\frac{0.05785395K_p}{81225s^2 + 570s + 1}}{1 + \frac{0.05785395K_p}{81225s^2 + 570s + 1}} \quad (69)$$

$$ft = \frac{\frac{0.05785395K_p}{81225s^2 + 570s + 1}}{\frac{81225s^2 + 570s + 1 + 0.05785395K_p}{81225s^2 + 570s + 1}} \quad (70)$$

$$ft = \frac{0.05785395K_p}{81225s^2 + 570s + 1 + 0.05785395K_p} \quad (71)$$

Para obtener inicialmente nuestra ganancia crítica utilizamos el criterio de Routh Hurwitz

$$81225s^2 + 570s + 1 + 0.05785395K_p = 0 \quad (72)$$

s^2	81225	1 + 0.05785395 K_p
s^1	570	0
s^0	1 + 0.05785395 K_p	0

Según este criterio de estabilidad todos los parámetros deben conservar el mismo signo, en este caso positivo, y para que la ganancia sea crítica debe igualarse a cero, entonces tendríamos:

$$1 + 0.05785395K_{CR} = 0$$

$$K_{CR} = -17.2849$$

Según el criterio Routh Hurwitz, la ganancia es estable para valores mayores a -1.

A continuación, para obtener nuestro período crítico utilizamos la ecuación (63) y reemplazamos en el campo de los complejos e igualamos a cero.

$$81225(jw)^2 + 1 + 0.05785395K_p = 0 \quad (73)$$

Siendo j complejo ($\sqrt{-1}$) y reemplazamos en la ecuación anterior, además de que $K_p = K_{CR} = -1$. Para así de esta forma obtener el período crítico de este sistema

$$-81225(w)^2 + 1 + (-1) = 0$$

$$570(jw) = 81225(w)^2$$

$$570j = 81225 * w$$

$$w = \frac{570j}{81225}$$

Este método no tiene respuesta para nuestro sistema. De igual forma obtuvimos una respuesta compleja debido a que nuestro sistema es sobre- amortiguado, por ende, no es un sistema resonante.

CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y EXPERIMENTACIÓN.

Para el presente capítulo iniciaremos haciendo pruebas con los valores calculados utilizando como herramienta Matlab, así mismo se pretende mediante esta herramienta realizar un ajuste a los valores calculados, de tal forma que, al insertar perturbaciones que se presentan en el sistema real, presente la robustez necesaria para brindar la estabilidad al sistema y de esta forma cumplir con los objetivos trazados.

5.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EN SIMULINK

Los simuladores han representado un alivio a los procesos industriales puesto que mediante el uso del software se puede obtener una muy buena aproximación al funcionamiento real de un proceso, permitiéndonos de esta forma realizar los ajustes necesarios antes de la puesta en marcha, evitando de esta forma paros en la producción o errores que tengan un alto coste para las empresas. Por este motivo debido a cuestiones de logística, aunque no se pudo implementar a la fecha se pretende justificar los procedimientos y comprobar mediante software que el modelado matemático cumple con los objetivos planteados al inicio del presente trabajo.

5.1.1 PRUEBAS CON DATOS CALCULADOS

Una vez justificados los modelos matemáticos en los capítulos anteriores vamos a comprobar con una simulación en Matlab como funciona dicho análisis.

Inicialmente, empezamos a trabajar con nuestro sistema de control planteado, en esta parte del trabajo vamos a utilizar el esquema simplificado como se muestra en la figura 5.1.

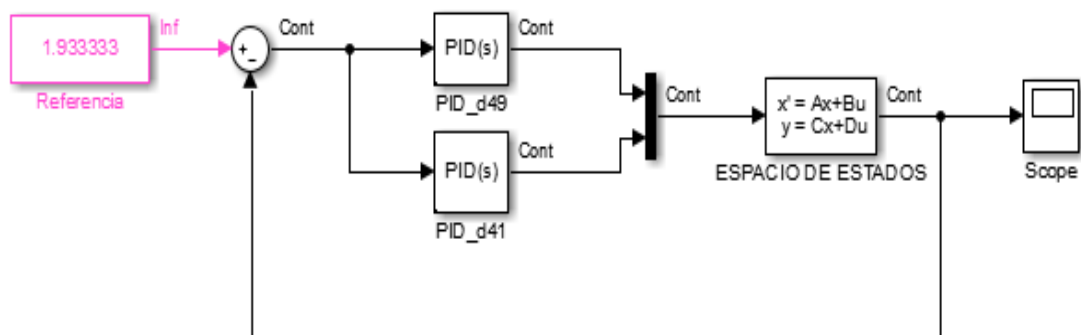


Figura 5.1 – Esquema de control simplificado
Fuente: Autores

A continuación, vamos a ingresar la información propuesta para el sistema. Primero se ingresa las matrices que representan el espacio de estados de nuestro sistema. Como se observa en la figura 5.2

Block Parameters: ESPACIO DE ESTADOS

State Space

State-space model:
 $\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$
 $y = Cx + Du$

Parameters

A:
 $[-0.0055 \ -0.0039 \ 0 \ 0; \ 0.0020 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ -0.0070 \ -0.0032; \ 0 \ 0 \ 0.0039 \ 0]$

B:
 $[0.031250000000000 \ 0; \ 0 \ 0; \ 0 \ 0.015625000000000; \ 0 \ 0]$

C:
 $[0 \ 0.019179445070328 \ 0 \ 0.011669795220683]$

D:
 $[0 \ 0]$

Initial conditions:
 0

Absolute tolerance:
 auto

State Name: (e.g., 'position')
 "

OK Cancel Help Apply

Figura 5.2 - Ingreso de datos de las matrices que representan la planta en simulink
 Fuente: Autores

Cada parámetro ingresado fue debidamente justificado en la ecuación (53) como matrices de estados resultantes.

De igual forma ingresamos los parámetros de nuestras constantes PID para nuestro sistema.

5.1.1.1 PRUEBAS CONTROLADORES PID DAMPER D49

Iniciamos probando nuestro controlador PID para el dámper D49.

Ingresamos los parámetros obtenidos en la tabla 4 que son las constantes aproximadas por el método de Ziegler Nichols.

Block Parameters: PID_d49

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

☒ Continuous-time

☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal ☐ Compensator formula

Proportional (P): 532802.2381

Integral (I): 1006

Derivative (D): 251.5

Filter coefficient (N): 100 Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Initial conditions

OK Cancel Help Apply

Figura 5.3 - Ingreso constantes de controlador pid dámper D49 de tabla 4

Fuente: Autores

Observamos a continuación en la figura 85, la respuesta al sistema obtenida.

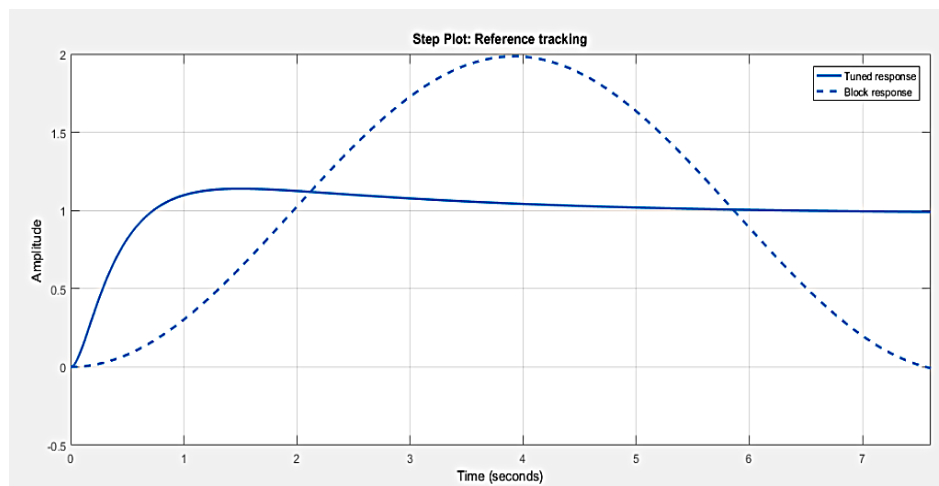


Figura 5.4 - Respuesta del controlador pid del dámper D49 - Ziegler Nichols

Fuente: Autores

La línea pre-punteada representa la respuesta de acuerdo a las constantes ingresadas y la línea continua representa la respuesta al escalón que sugiere el software. De igual forma probamos con los parámetros obtenidos en la tabla 5 que son las constantes aproximadas por el método de Cohen Coon.

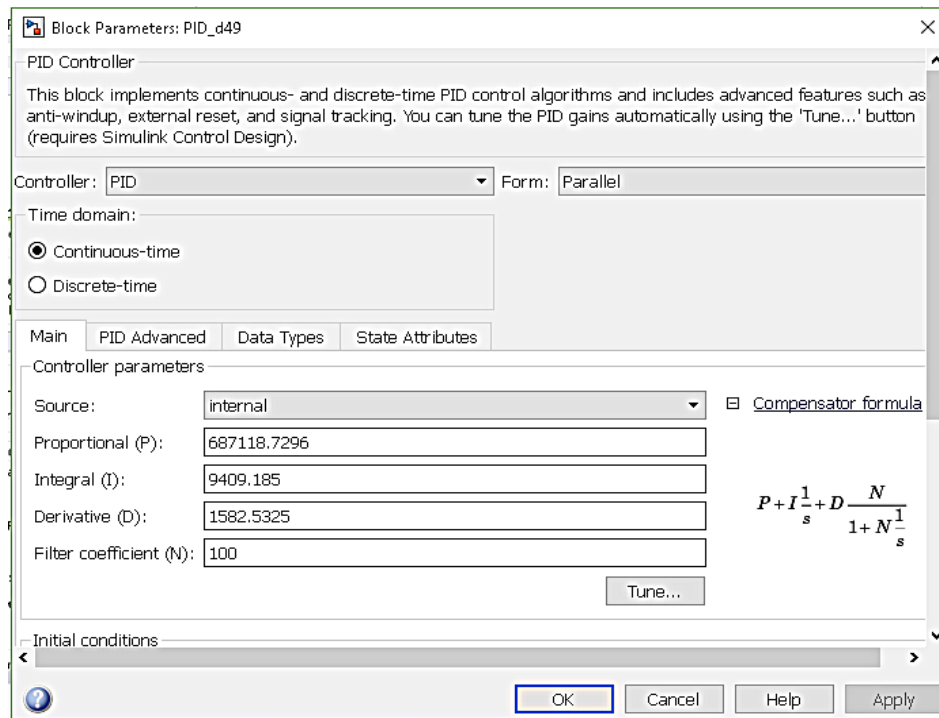


Figura 5.5 - Ingreso constantes de controlador pid d  mper D49 de tabla 5

Fuente: Autores

Observamos a continuación en la figura 5.6, la respuesta al sistema obtenida.

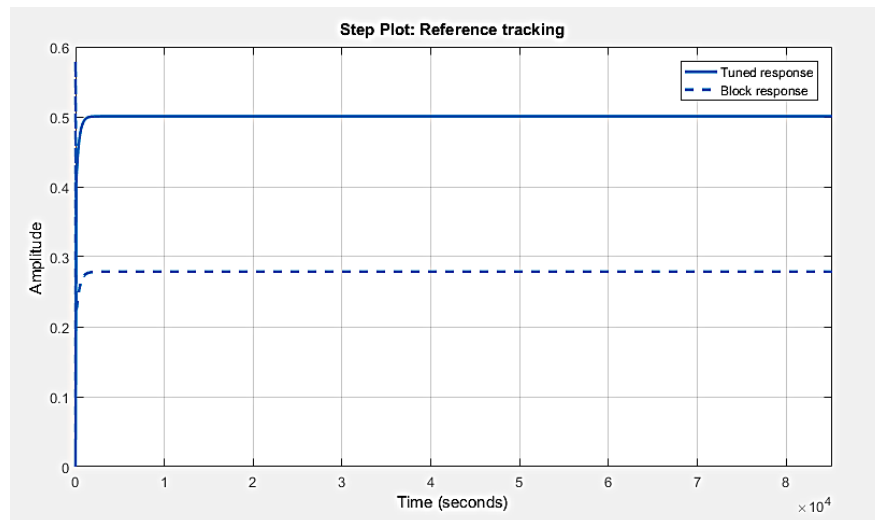


Figura 5.6 - Respuesta del controlador pid del d  mper D49 – Cohen Coon

Fuente: Autores

5.1.1.2 AJUSTE CONTROLADORES PID DAMPER D49

De las gráficas antes sealadas como respuesta a las constantes de los controladores calculados, gráficamente se observa que la gráfica que más se acerca a la función de transferencia de segundo orden con respuesta al escalón es la analizada según el método propuesto de Cohen Coon , indicado en la figura 5.5, vale recalcar, que con esta herramienta de software podemos hacer un pequeño ajuste adicional al antes mencionado para así tener una mejor respuesta final del sistema que se está analizando.

Moviendo los *sliders* (controles) que proporciona Matlab obtenemos las siguientes constantes, que de paso definimos en los parámetros de Simulink de nuestro sistema de control,

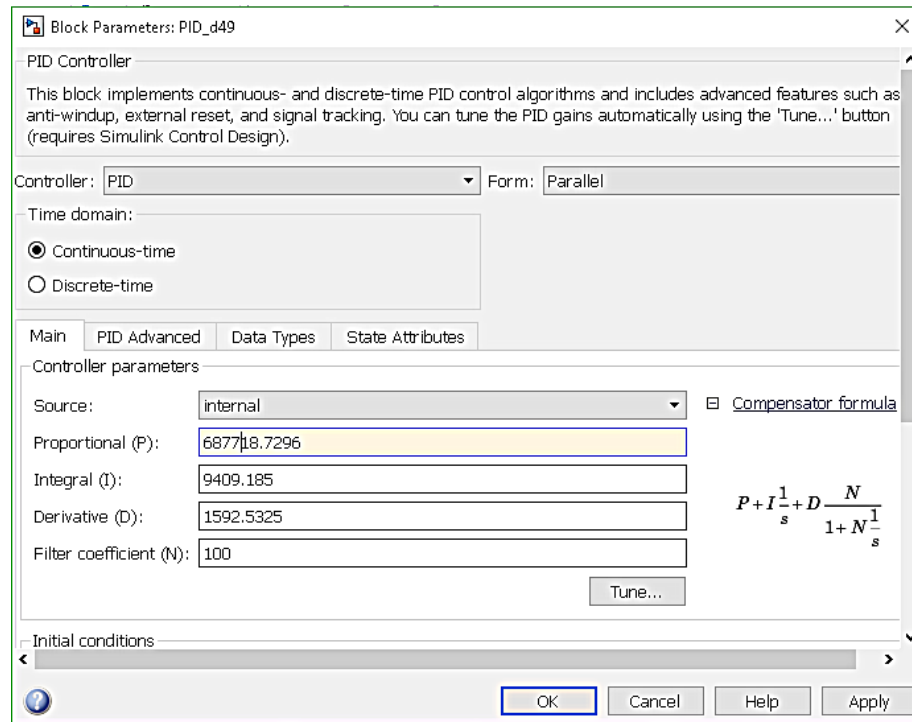


Figura 5.7 - Ingreso constantes de controlador final pid d mper D49
Fuente: Autores

Observamos a continuación en la figura 5.8, la respuesta al sistema obtenida.

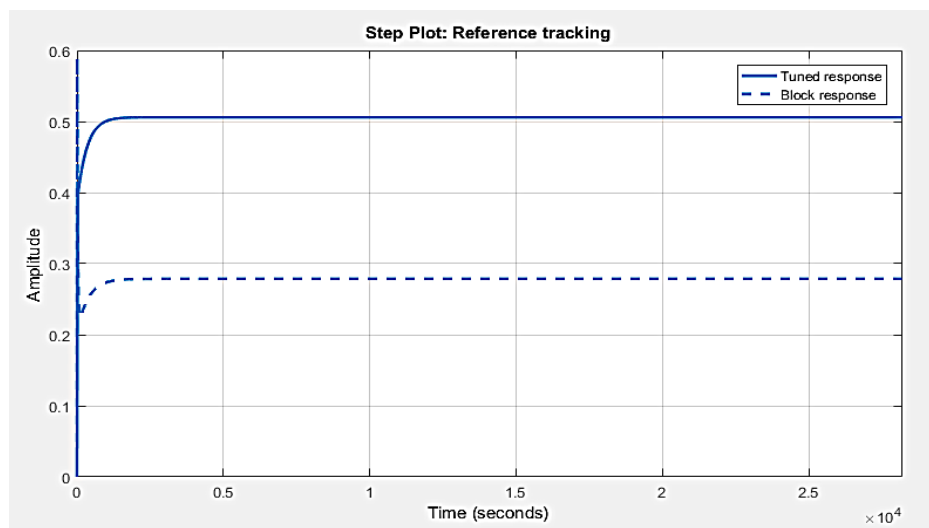


Figura 5.8 - Respuesta del controlador pid del d mper D49 – Ajustado
Fuente: Autores

La salida obtenida se la ve bastante estable como podemos observar en la figura 89. La línea entrecortada indica la respuesta al escalón calculada y la línea continua indica

la corrección del sistema. Para este ajuste fue necesario aumentar la constante de proporcional para obtener ganancia superior y aumentar la constante derivativa para disminuir el tiempo de respuesta.

A continuación, en la tabla 8 se muestra las constantes definidas del controlador PID para el dampér D49

Tabla 5.1 - Cuadro comparativo de las constantes del control PID para el dampér D49

DÁMPER D49			
	Calculada	Ajustada	% Variabilidad
P	687118.7296	687718.7296	0.087%
K_i	9409.185	9409.85	0%
K_D	1582.5325	1592.5325	0.63%

Fuente: Autores

5.1.1.3 PRUEBAS CONTROLADORES PID DAMPER D41

Iniciamos probando nuestro controlador PID para el dampér D41.

Ingresamos los parámetros obtenidos en la tabla 6 que son las constantes aproximadas por el método de Ziegler Nichols.

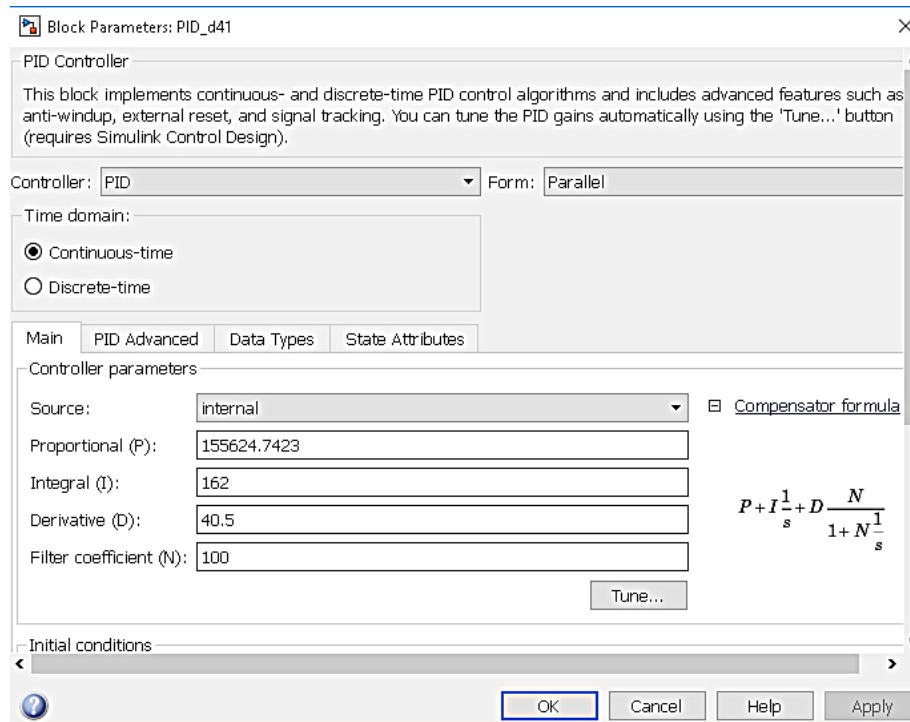


Figura 5.9 - Ingreso constantes de controlador pid dampér D41 de tabla 4

Fuente: Autores

Observamos a continuación la respuesta al sistema obtenida.

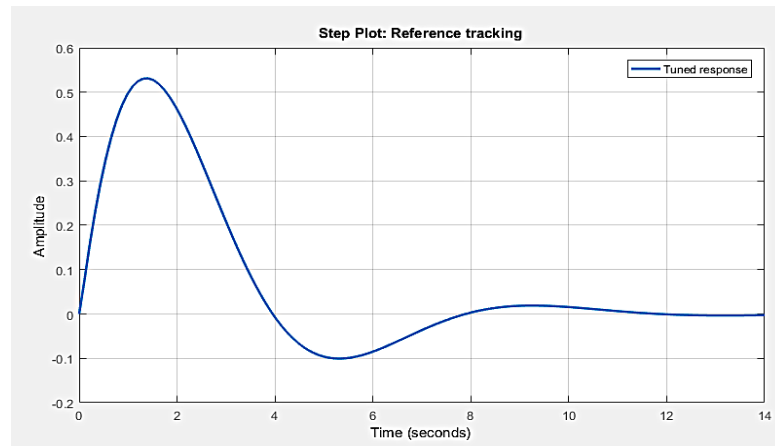


Figura 5.10 - Respuesta del controlador pid del d mper D41 - Ziegler Nichols
Fuente: Autores

La línea continua representa la respuesta con las constantes de PID ingresadas sugeridas en el método de Ziegler Nichols

De igual forma probamos con los parámetros obtenidos en la tabla 7 que son las constantes aproximadas por el método de Cohen Coon.

Figura 5.11 - Ingreso constantes de controlador pid d mper D41 de tabla 7
Fuente: Autores

Observamos a continuación la respuesta al sistema obtenida.

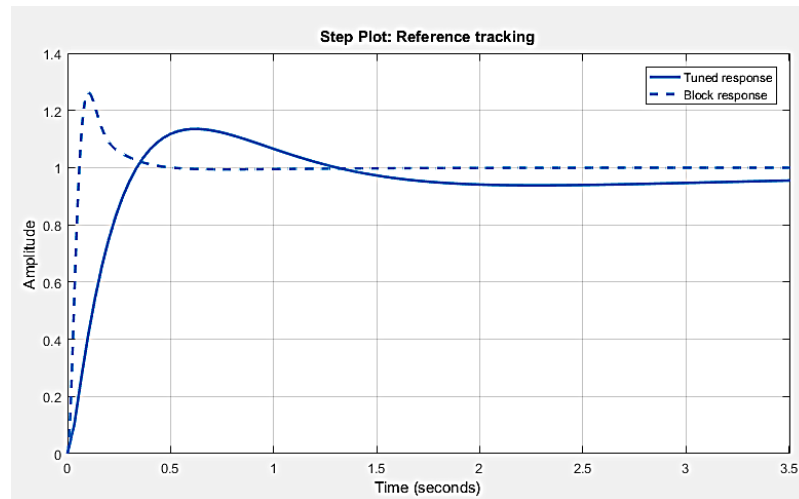


Figura 5.12 - Respuesta del controlador pid del d mper D49 – Cohen Coon
Fuente: Autores

5.1.1.4 AJUSTE CONTROLADORES PID DAMPER D41

De las gráficas antes sealadas como respuesta a las constantes de los controladores calculados, se observó que la gráfica deseada se acerca más a la analizada, según el método propuesto de Cohen Coon Indicado en la figura 5.11, vale destacar que con esta herramienta de software podemos hacer un pequeño ajuste adicional al antes mencionado para así tener una mejor respuesta final del sistema que se está analizando. Moviendo los *sliders* (controles) que proporciona Matlab obtenemos las siguientes constantes, que de paso definimos en los parámetros de Simulink de nuestro sistema de control:

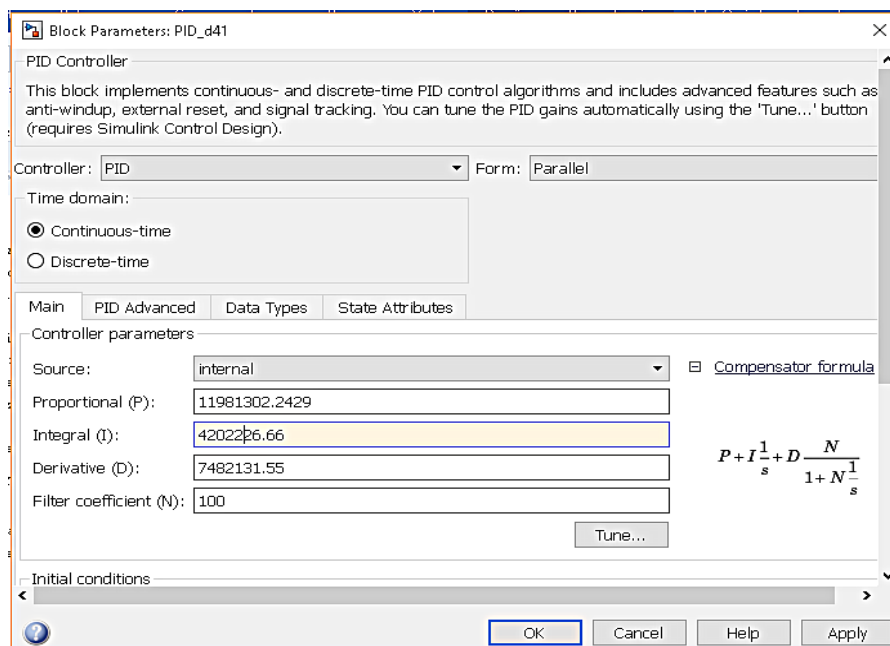


Figura 5.13 - Ingreso constantes de controlador final pid d mper D49
Fuente: Autores

Observamos a continuación la respuesta al sistema obtenida, para este lazo de control fue necesario únicamente variar la constante derivativa para eliminar los rizados presentados con los parámetros calculados.

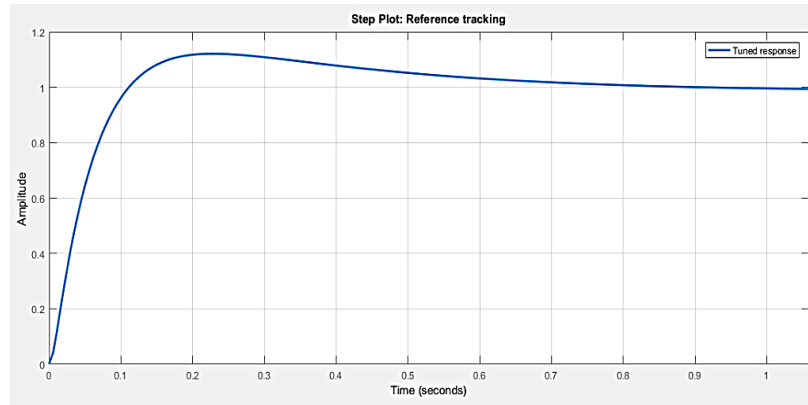


Figura 5.14 - Respuesta del controlador pid del d mper D41 – ajustado

Fuente: Autores

La salida obtenida se la ve bastante estable como podemos observar en la figura 95

A continuación, en la tabla 9, se muestra las constantes definidas del controlador PID para el d mper D41.

Tabla 5.2 - Cuadro comparativo de las constantes del control PID para el d mper D41

D�MPER D41			
	Calculada	Ajustada	% Variabilidad
P	11981302.2429	11981302.2429	0%
K_i	4202126.66	4202226.66	0.023%
K_D	7482131.55	74.82131.55	0%

Fuente: Autores

5.2 CURVA REPUESTA CON CONTROLADORES ESTABLECIDOS

Las curvas obtenidas con las constantes PID calculados presentan distintas reacciones las mismas que resultan más satisfactorias a nuestro caso son las obtenidas por el método de Cohen Coon en el control a ambos d mpers que estamos estudiando en el presente proyecto. Entonces, a dichas curvas fueron ajustarlas con la herramienta de Matlab de tal forma que estas presenten mayor estabilidad y robustez al sistema actual en la planta Guapán.

Entonces una vez optimizado los sistemas SISO del d mper D49 y d mper D41 simulamos la respuesta total de toda nuestra planta, molino de crudo, como solución planteada del presente proyecto. Obteniendo la respuesta al escalón como se muestra a continuación.

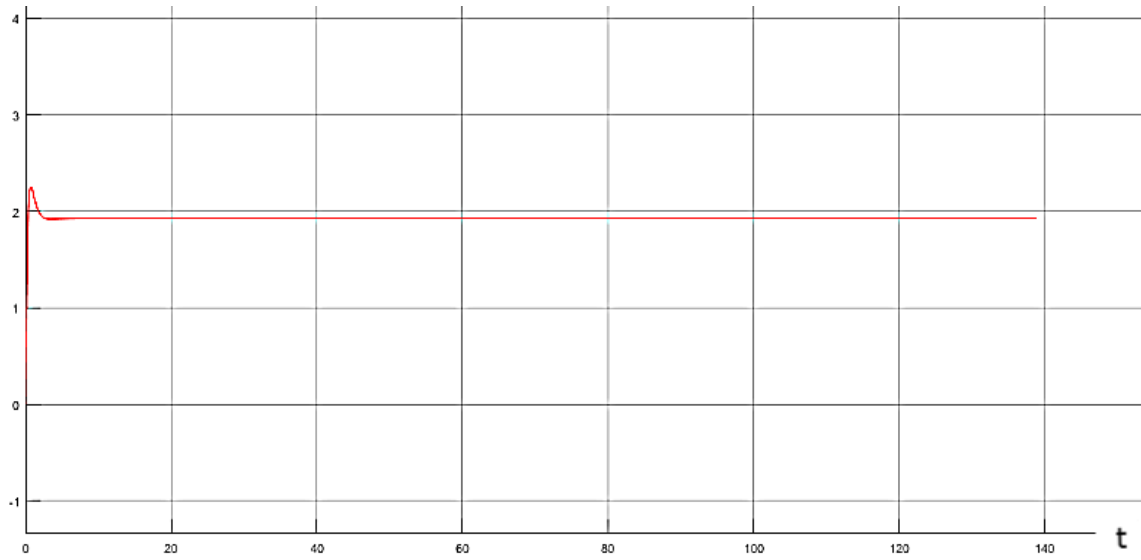


Figura 5.15 – Respuesta final del sistema

Fuente: Autores

Podemos observar en la figura 5.15 que la curva es satisfactoria y cumple con las características que requiere el proceso

5.3 PRUEBAS DE ROBUSTEZ

Si bien es cierto que las gráficas obtenidas anteriormente del sistema de control propuesto para el molino de crudo son muy satisfactorias al objetivo trazado, en dichas pruebas se ha tomado no más que el caso ideal, donde la planta se encuentra aislada y no existen factores externos que alteren su funcionamiento. Motivo por el cual, en esta sección se simularán posibles perturbaciones que afecten directamente al sistema y poder comprobar la robustez y estabilidad que pueda brindar ante estas posibles situaciones.

5.3.1 DAMPER DE FUGA

Una de las perturbaciones que afectan al sistema de molienda de crudo es el dämper de fuga, el cual es operado manualmente, su función es controlar el exceso de temperatura de los gases provenientes del horno que son inducidos por el ducto del dämper D49. En la gráfica que tenemos a continuación observamos nuestro sistema simplificado, el dämper de fuga es una entrada tipo escalón unitario la cual afecta directamente al proceso.

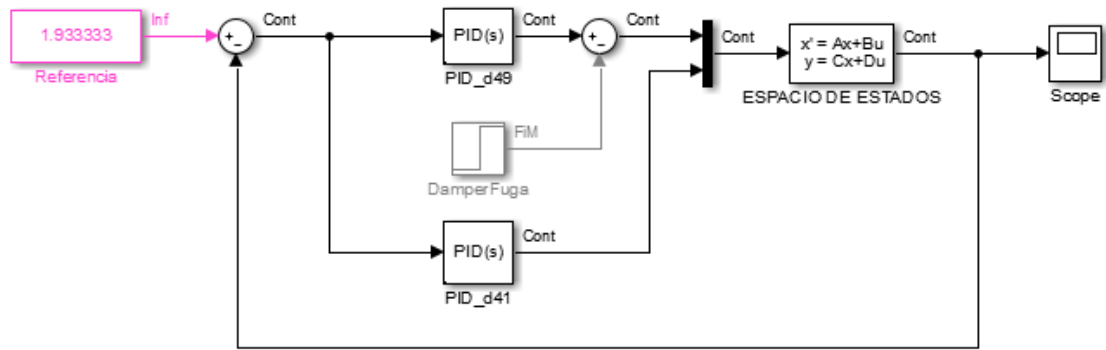


Figura 5.16 - Inserción de ruido al sistema de control - dámper de fuga

Fuente: Autores

A este dámper de fuga lo comparamos con una entrada tipo escalón unitario, debido a que la perturbación generada es constante y es producida manualmente por el operador, en caso que exista un sobrecalentamiento en el molino de crudo, dicha perturbación puede llegar a equivaler el 20% del escalón, debido a que el diámetro del dámper de fuga es muy inferior al diámetro del dámper D49.

En la figura que tenemos a continuación, se observa claramente que este parámetro no afecta a nuestro sistema de control

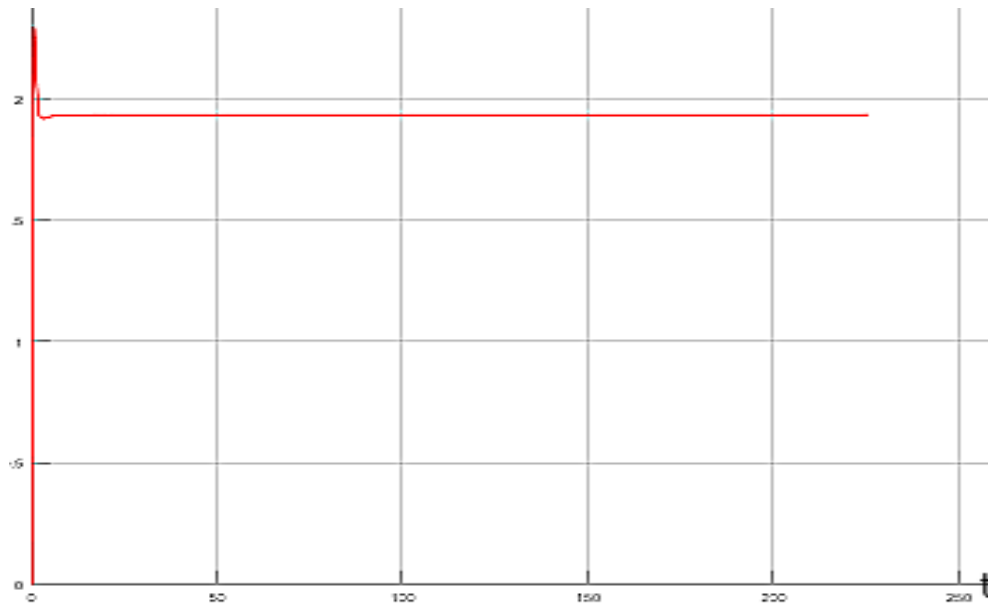


Figura 5.17 - Respuesta al sistema con perturbación - dámper de fuga

Fuente: Autores

5.3.2 PERTURBACION POR FACTORES EXTERNOS

Existen varios factores externos ambientales que afectan directamente al sistema de molienda de crudo como son:

- Temperatura Ambiente

- Tolerancia de dispositivos de control (sensores)
- Dosificación de materia prima
- Humedad

Primeramente, en la figura que se tiene a continuación se inserta una perturbación al SISO del dámper D49.

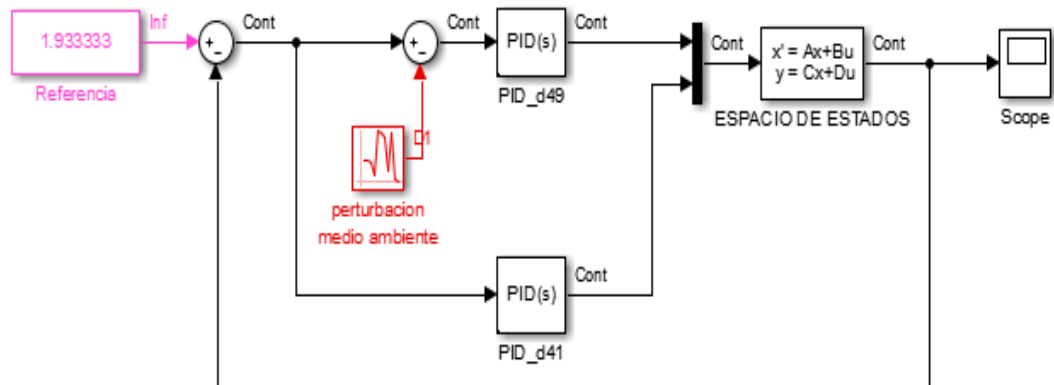


Figura 5.18 - Inserción de ruido al dámper D49 – factores externos
Fuente: Autores

En estas circunstancias la respuesta del sistema con estos factores se muestra en la figura 5.19.

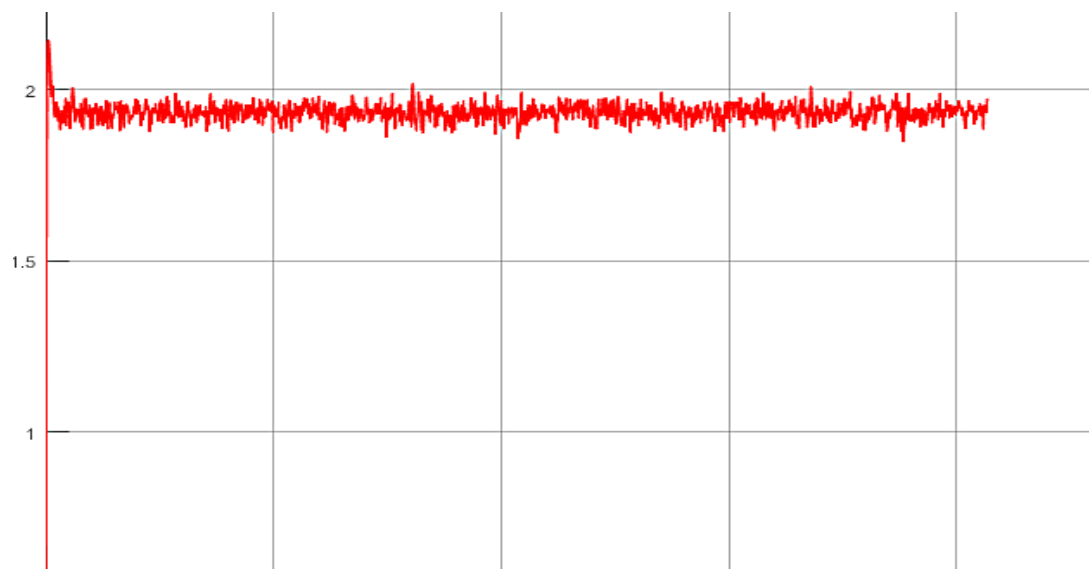


Figura 5.19 - Inserción de ruido al dámper D49 – factores externos
Fuente: Autores

Posteriormente se puede observar en la siguiente figura 5.20, que la perturbación tolerable no supera en un 10% en el SISO del dámper D41, afectando directamente al proceso.

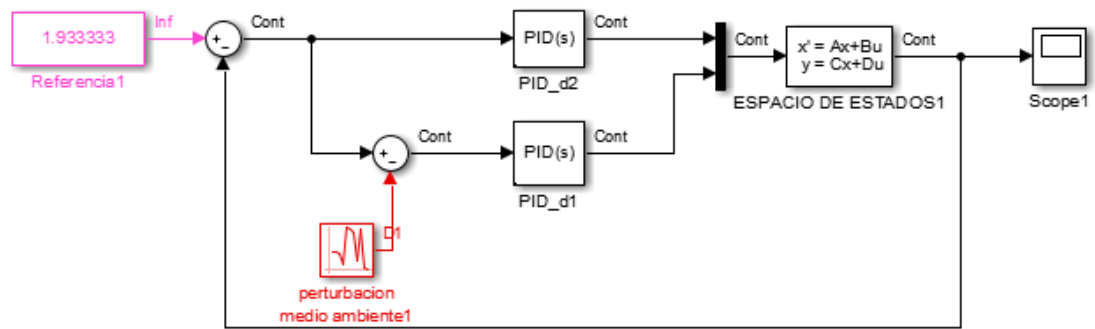


Figura 5.20 - Inserción de ruido al dámper D41 – factores externos
Fuente: Autores

En estas circunstancias la respuesta del sistema con estos factores se muestra en la figura 5.21.

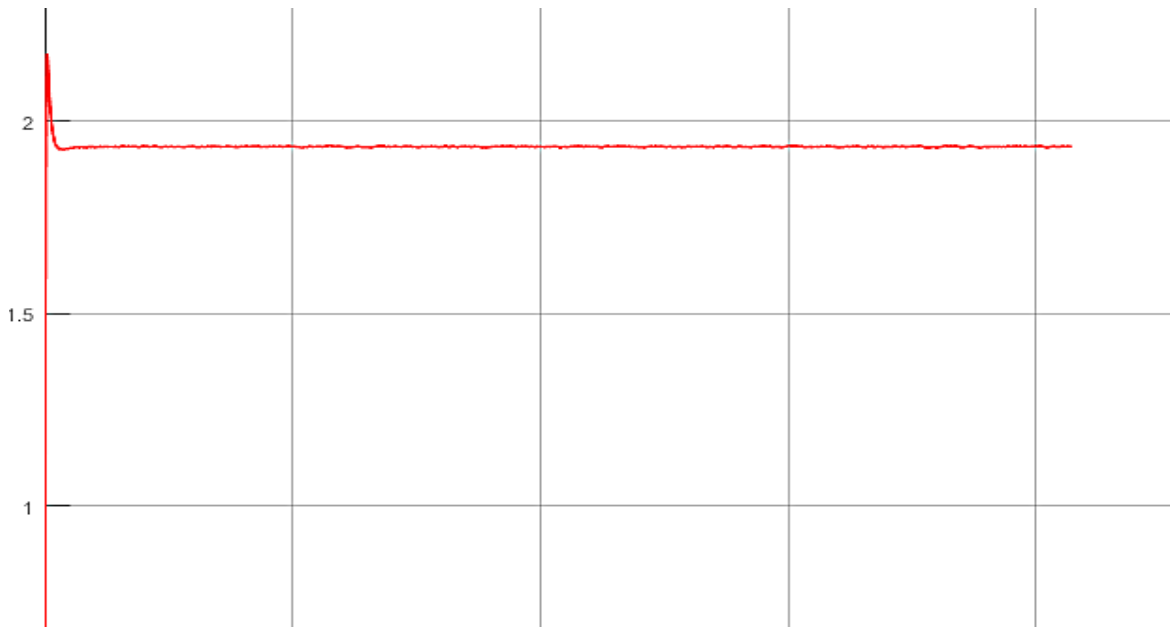


Figura 5.21 - Inserción de ruido al dámper D41 – factores externos
Fuente: Autores

En la gráfica 5.21, se puede observar, que la perturbación tolerable es más flexible y con una perturbación del 30% en el SISO del dámper D41 sigue siendo estable. Sin embargo, el dámper D49 es mucho más sensible debido a que el lazo de control es predominante.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación realizado en la planta industrial Guapán perteneciente a la Unión Cementera Nacional UCEM- C.E.M, nos ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a lo que hemos podido observar en el proceso de fabricación de cemento, no todos los sistemas de molienda de crudo son iguales por lo que, es necesario conocer a fondo los mecanismos del sistema, variables de operación, condiciones de materia prima, etc.
- El hecho de aplicar controladores PID, no solamente se basa en la observación, sino que se necesita de un estudio técnico, científico y sobre todo del conocimiento del proceso de fabricación, es decir, familiarizarse con el sistema existente, conocer los equipos de control instalados, comprender su funcionamiento, para poder establecer el lazo de control adecuado.
- La toma de datos y aplicación del modelo debe considerar todos los escenarios posibles, con la mayor recolección de aquellos que permita que el modelo sea aplicable, deben ser significativos y sobre todo representativos del proceso de molienda de crudo.
- La robustez y estabilidad del sistema pueden verse afectados por posibles perturbaciones tales como: temperatura ambiente, humedad, dosificación de la materia prima, tolerancia de los dispositivos de control.
- La temperatura de gases a salida del circuito de molienda de crudo, depende del intercambio térmico con los gases de entrada provenientes del horno, esta variable es muy importante en el proceso de molienda y va a depender de la apertura o cierre de los dámperes por cuanto regula el caudal de gases que ingresa al circuito de molienda.
- Un control adecuado del ingreso de gases del horno, favorece el intercambio térmico con el material del molino de crudo, mejorando significativamente la aplicación de un PID al sistema de molienda.
- El control tradicional de entrada de gases al molino de crudo en el proceso de fabricación de cemento, se lo realiza de forma manual, con la aplicación de los controladores PID permite que el proceso y control de ingreso de gases al circuito, se realice automáticamente de acuerdo a las necesidades del mismo con la instalación de dámperes controlados desde el sistema SCADA.

- Este desarrollo nos ha permitido a la vez de observar y conocer el proceso, tomar datos con el conversor analógico digital Arduino y presentarlos en tiempo real en una interfaz de usuario bastante simple, creando curvas de variación de temperatura en función del porcentaje de ingreso de gases calientes a través de la manipulación del dámper, con lo que la respuesta debe ser más confiable y aportará mayor eficiencia al proceso como tal.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la empresa UCEM – CEM la adquisición e instalación de nuevos y modernos dámperes para el control de ingreso de gases al molino de crudo, el objetivo es regular la cantidad requerida de gases.
- Instalar un sensor para medir el grado de llenado del molino de crudo con la finalidad de optimizar el flujo de gases al interior de éste y medir el nivel de retorno de material.
- Instalación de un sistema de pesaje en línea para el material que retorno de los separadores al molino de crudo.
- Integrar las variables en el sistema actual scada de Siemens con la aplicación desarrollada.
- Se recomienda conocer los efectos económicos de estas aplicaciones en la mejora de los procesos o sistemas de fabricación de tal manera que se pueda contar con una retroalimentación en beneficio de la rentabilidad de la organización.
- Tomar la mayor cantidad de datos posibles del sistema y realizar pruebas con diferentes herramientas tecnológicas, a fin de que se pueda contar con alternativas de solución.
- Es importante contar con la apertura de los líderes de los procesos, de tal manera que, la aplicación y el cumplimiento de objetivos sean producto de un trabajo en sinergia y al final del trabajo investigativo se consiga un valor agregado para las dos partes.

BIBLIOGRAFIA

- Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2010). The future of PID control. *Control engineering practice*, 13.
- Aguilar Larrarte, E. (2011). *Modelado y control de posición y de fuerza de una prótesis robótica de mano*. Cauca: Universidad del Cauca.
- Aguilar, F. (2012). *Universidad del Cauca*. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Nolineales%20Master/Clase%208/clase%208.pdf>
- Alfaro, V. M. (2006). *Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso*. Costa Rica : Universidad de Costa Rica.
- Améstegui Moreno , M. (Enero de 2011). (Universidad Mayor de San Andres La Paz)
- Anónimo. (2016). *Pagina Oficial Arduino*. Recuperado el 24 de Mayo de 2016, de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>
- Bermeo, A. (2014). *ANÁLISIS DE VARIABLES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE MOLIENDA y SECADO PARA MEJORAR LA SUPERFICIE ESPECIFICA DEL CEMENTO PORTLAND*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Briones Sebastián. (2014). *Diseño e implementación del lazo de control de humedad para el proceso de secado de puzolana en la planta Guapan (UCEM)*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Cantero Vergara, K., Chamorro Coneo, R., & Palencia Díaz, A. (2010). Control por Matriz Dinámica (DMC): Sistemas de lazo simple y Multivariable. *Prospect*, 8(2), 69-75.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2012). *Sistemas de Control Moderno* (Doceava ed.). Madrid: PEARSON EDUCACION S.A.
- Driankov, D., Hellendoorn, H., & Reinfrank, M. (2013). *An Introduction to Fuzzy Logic*. Múnich.
- Espinosa Maya, L., Barahona Avalos, J., & Reyes Cortéz, F. (2011). *NUEVOS CONTROLADORES DE POSICIÓN PARA ROBOT MANIPULADORES BASADOS EN FUNCIONES HIPERBÓLICAS*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

- Espinosa, V. I., & Moya, V. I. (2011). *Control Robusto*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Flores, E. (2014). *EVALUACION TECNICA DEL PROCESO DESECADO DE PUZOLANA Y PREMOLIENDA DE CEMENTO EN CIA.INDUSTRIAS GUAPAN S.A.* Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Garelli, F. (2013). *SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE, APLICACIÓN AL CONTROL CON RESTRICCIONES*. Mar del Plata: Universidad Nacional de la Plata.
- Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2010). *Automatic Control System* (Septima ed.). United States of America: PRENTICE-HALL.
- Hoyos, J. G., Cardona, J. E., & Arango, R. (2013). Control en linea con algoritmos genéticos y recocido simulado. *Scientia Et Technica*, XIII(35), 113-116.
- Industrias Guapán. (23 de Mayo de 2015). *Industrias Guapan*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2015, de <http://www.industriasguapan.com.ec/la-empresa>
- Ipanaqué Alama, W. (2012). *Control Automático de procesos*. Lima : Universisda de Piura .
- Kuo Benjamin. (2013). *Sistemas de control automatico*.
- Lozano Valencia, L. F., Rodríguez García, L. F., & Giraldo Buitrago, D. (2012). Diseño, Implementación y Validación. *SciELO*, 22.
- Mazzone, V. (Marzo de 2012). Controladores PID. *Universidad Nacional de Quilmes*, 12.
- Ogata, k. (2010). *Ingenieria de Control Moderna*. Madrid: Pearson.
- Orozco Soto, S. M., & Ramos Fernanadez, J. C. (2012). *Control par calculado difuso basado en pasividad para seguimiento de trayectorias de robots manipuladores*. Hidalgo: Univesidad Politecnica de Pachuca.
- Ortiz, P. (2014). Linearization of mass spring damper system for applying linear control PID techniques. *IEEE*, 26, 5.
- Ospina Alarcon, M. (2009). *Diseno de un sistema de control multivariable para un circuito de molienda en húmedo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Palencia Díaz, A. (2010). Estudio de Diferentes Estrategias de Control para un Tanque de Mezclado: PID, Control de Matriz Dinámica (DMC) y Lógica Difusa (FLC). *Prospect*, 8(1), 43-51.

- Ramírez Ramos, O. (2012). *Sistemas de Control*. Puebla: Universidad de las Américas de Puebla.
- Rodríguez Ramírez, D. (2011). *PERSPECTIVA GENERAL DEL CONTROL PREDICTIVO*. Sevilla: Universidad Literaria de Sevilla.
- Rodríguez Rubio, F., & López Sánchez, M. J. (2011). *Control adaptativo y robusto*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Singh, C. (2015). Genetic Algorithms Based PID controller Design. *Giani Zail Singh PTU Campus Bathinda, III*, 4.
- Sirgo Blanco, J. A. (Diciembre de 2009). *Universidad de Oviedo*. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://isa.uniovi.es/docencia/dscc/>
- Suárez, A. (2012). *Redes Neuronales en Control*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Torres, I. (s.f.). *REDES NEURONALES*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- UCEM-CEM, G. D. (2015). Información de la empresa UCEM CEM, Planta industrial Gupan. Azogues.
- Urrea, C., & Kern, J. (2013). Fault-Tolerant Controllers in Robotic. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 11(6), 1318-1324.
- Vázquez López, V. (2005). Respuesta Transitoria. En *Ingeniería de control* (págs. 24-39). Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

ANEXOS

Anexo 1
Dibujos Autocad del Molino de
Crudo

Anexo 2
Dibujos Autocad del Diagrama de
Instrumentación del Dámper D41

Anexo 3
Dibujos Autocad del Diagrama de
Instrumentación del Dámper D49

Anexo 4
Código de Software para la
Adquisición de Datos


```

        case 3:
            Slot++;
            ptt104 =
(Double.parseDouble(Arduino.printMessage()) /
1028) * 5;
            Lectura++;
            break;
        case 4:
            Slot++;
            d41 =
(Double.parseDouble(Arduino.printMessage()) /
1028) * 5;
            Lectura++;
            break;
        case 5:
            Slot++;
            d49 =
(Double.parseDouble(Arduino.printMessage()) /
1028) * 5;
            Lectura++;
            break;
        case 6:
            Slot++;
            tt104 =
(Double.parseDouble(Arduino.printMessage()) /
1028) * 5;
            Lectura++;
            break;
        default:
            if (Lectura > 1) {
                TableUpdate();
            }
            Slot = 1;
            break;
    }
}
};

public void TableUpdate() {
    String Output;
    String hora =
    Calendario.get(Calendar.HOUR_OF_DAY) + "";
    String minuto =
    Calendario.get(Calendar.MINUTE) + "";
    String segundos =
    Calendario.get(Calendar.SECOND) + "";
    if (Integer.parseInt(hora) < 10) {
        hora = "0" + hora;
    }
    if (Integer.parseInt(minuto) < 10) {
        minuto = "0" + minuto;
    }
    if (Integer.parseInt(segundos) < 10) {
        segundos = "0" + segundos;
    }
    Output = hora + ":" + minuto + ":" +
segundos;
    Calendario = Calendar.getInstance();
    Modelo.addRow(new Object[] {Output, pd41,
pd49, ptt104, d41, d49, tt104});
}

public Window() {
    initComponents();
    Modelo = (DefaultTableModel)
 jTable1.getModel();

```

```

    try {
        Arduino.ArduinoRXTX("COM5", 2000,
9600, evento);
    } catch (Exception ex) {

        Logger.getLogger(Window.class.getName()).log(L
evel.SEVERE, null, ex);
    }
}

/**
 * This method is called from within the
constructor to initialize the form.
 * WARNING: Do NOT modify this code. The
content of this method is always
 * regenerated by the Form Editor.
 */
@SuppressWarnings("unchecked")
// <editor-fold defaultstate="collapsed"
desc="Generated Code">
private void initComponents() {

    jScrollPane1 = new javax.swing.JScrollPane();
    jTable1 = new javax.swing.JTable();
    jLabel1 = new javax.swing.JLabel();
    jButton1 = new javax.swing.JButton();
    jButton2 = new javax.swing.JButton();
    jButton3 = new javax.swing.JButton();

    setDefaultCloseOperation(javax.swing.WindowCo
nstants.EXIT_ON_CLOSE);

    jTable1.setModel(new
javax.swing.table.DefaultTableModel(
        new Object [][] {

        },
        new String [] {
            "HORA", "PROM TT105-D41", "PROM
TT108-D49", "PROM TT104-SALIDA", "TT105-
D41", "TT108-D49", "TT104-SALIDA"
        }
    ));
    jScrollPane1.setViewportView(jTable1);

    jLabel1.setText("ADQUISICION DATOS
TEMPERATURA MOLINO DE CRUDO");

    jButton1.setText("INICIAR");
    jButton1.addActionListener(new
java.awt.event.ActionListener() {
        public void
actionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
            jButton1ActionPerformed(evt);
        }
    });

    jButton2.setText("PARAR");
    jButton2.addActionListener(new
java.awt.event.ActionListener() {
        public void
actionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
            jButton2ActionPerformed(evt);
        }
    });
}

```

```

        jButton3.setText("EXPORTAR A EXCEL");
        jButton3.addActionListener(new
java.awt.event.ActionListener() {
            public void
actionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
                jButton3ActionPerformed(evt);
            }
        });

        javax.swing.GroupLayout layout = new
javax.swing.GroupLayout(getContentPane());
        getContentPane().setLayout(layout);
        layout.setHorizontalGroup(

layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Layo
ut.Alignment.LEADING)
            .addGroup(layout.createSequentialGroup()
                .addGap(21, 21, 21)
                .addComponent(jScrollPane1,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 0,
Short.MAX_VALUE)
                .addGap(277, 277, 277)
                .addComponent(jButton1)
            )
            .addPreferredGap(javax.swing.LayoutStyle.Compo
nentPlacement.RELATED,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
Short.MAX_VALUE)
            .addGroup(layout.createParallelGroup(javax.s
wing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
                .addComponent(jButton2)
                .addGap(210, 210, 210)
                .addComponent(jButton3)
                .addGap(26, 26, 26)
            )
        );
        layout.setVerticalGroup(

layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Layo
ut.Alignment.LEADING)
            .addGroup(layout.createSequentialGroup()
                .addGap(21, 21, 21)
                .addComponent(jScrollPane1,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 275,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
            )
            .addPreferredGap(javax.swing.LayoutStyle.Compo
nentPlacement.RELATED)
            .addGroup(layout.createParallelGroup(javax.s
wing.GroupLayout.Alignment.BASELINE)
                .addComponent(jButton1)
                .addComponent(jButton2)
                .addComponent(jButton3)
            )
        );

```

```

        .addContainerGap(javax.swing.GroupLayout.DEF
AULT_SIZE, Short.MAX_VALUE))
    );

    pack();
} // </editor-fold>

private void
jButton1ActionPerformed(java.awt.event.ActionEv
ent evt) {
    try {
        // TODO add your handling code here:
        //Modelo.removeRow(0);
        Arduino.sendData("1");
    } catch (Exception ex) {

Logger.getLogger(Window.class.getName()).log(L
evel.SEVERE, null, ex);
    }

    private void
jButton2ActionPerformed(java.awt.event.ActionEv
ent evt) {
    try {
        // TODO add your handling code here:
        //Modelo.addRow(new
Object[]{"1", "2", "3", "4"});
        Arduino.sendData("0");
    } catch (Exception ex) {

Logger.getLogger(Window.class.getName()).log(L
evel.SEVERE, null, ex);
    }

    private void
jButton3ActionPerformed(java.awt.event.ActionEv
ent evt) {
        // TODO add your handling code here:
        javax.swing.JFileChooser Ventana = new
javax.swing.JFileChooser();
        String ruta;
        try {
            if (Ventana.showSaveDialog(null) ==
Ventana.APPROVE_OPTION) {
                ruta =
Ventana.getSelectedFile().getAbsolutePath() +
".xls";
                FicheroExcel(ruta);
            }
        } catch (Exception ex) {
        }
    }

    public void FicheroExcel(String input) {
        HSSFWorkbook libro = new
HSSFWorkbook();
        HSSFSheet hoja = libro.createSheet();
        HSSFRow fila = hoja.createRow(0);
        HSSFCell celda = fila.createCell(0);
        celda.setCellValue("Datos obtenidos del
MOLINO DE CRUDO"); //título
        // Se colocan los encabezados
        fila = hoja.createRow(1);
        celda = fila.createCell(0);

```

```

        celda.setCellValue("HORA");
        celda = fila.createCell(1);
        celda.setCellValue("P. D49");
        celda = fila.createCell(2);
        celda.setCellValue("P. D41");
        celda = fila.createCell(3);
        celda.setCellValue("P. TT104");
        celda = fila.createCell(4);
        celda.setCellValue("D49");
        celda = fila.createCell(5);
        celda.setCellValue("D41");
        celda = fila.createCell(6);
        celda.setCellValue("TT104");
        for (int i = 0; i <= Modelo.getRowCount() - 1;
i++) {
            fila = hoja.createRow(i + 2); //se crea la fila
            for (int j = 0; j <= 6; j++) {
                celda = fila.createCell(j); //se crea la
celda
                celda.setCellValue(jTable1.getValueAt(i,
j).toString()); //se le asigna el valor
            }
        }
        try (FileOutputStream Fichero = new
FileOutputStream(input)) {
            libro.write(Fichero); //Se general el fichero
            //Se cierra el archivo
        } catch (Exception e) {
        }
    }

/**
 * @param args the command line arguments
 */
public static void main(String args[]) {
    /* Set the Nimbus look and feel */
    //<editor-fold defaultstate="collapsed" desc="
Look and feel setting code (optional) ">
    /* If Nimbus (introduced in Java SE 6) is not
available, stay with the default look and feel.
    * For details see
    http://download.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/
lookandfeel/plaf.html
    */
    try {
        for
(javax.swing.UIManager.LookAndFeelInfo info :
javax.swing.UIManager.getInstalledLookAndFeels(
)) {
            if ("Nimbus".equals(info.getName())) {

```

```

javax.swing.UIManager.setLookAndFeel(info.getCl
assName());
                break;
            }
        } catch (ClassNotFoundException ex) {

        java.util.logging.Logger.getLogger(Window.class.g
etName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE,
null, ex);
        } catch (InstantiationException ex) {

        java.util.logging.Logger.getLogger(Window.class.g
etName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE,
null, ex);
        } catch (IllegalAccessException ex) {

        java.util.logging.Logger.getLogger(Window.class.g
etName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE,
null, ex);
        } catch
(javax.swing.UnsupportedLookAndFeelException
ex) {

        java.util.logging.Logger.getLogger(Window.class.g
etName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE,
null, ex);
        }
    }
    //</editor-fold>

    /* Create and display the form */
    java.awt.EventQueue.invokeLater(new
Runnable() {
        public void run() {
            new Window().setVisible(true);
        }
    });
}

// Variables declaration - do not modify
private javax.swing.JButton jButton1;
private javax.swing.JButton jButton2;
private javax.swing.JButton jButton3;
private javax.swing.JLabel jLabel1;
private javax.swing.JScrollPane jScrollPane1;
private javax.swing.JTable jTable1;
// End of variables declaration
}

```

Anexo 5
Tabulaciones - Adquisición de
datos GUAPAN

APERTURA 30 % - 50% AL 80% - DAMPER D49

Datos obtenidos del MOLINO DE CRUDO			
HORA	D49	D41	TT104
00:02:23	2,13643	3,61274	1,96046
00:03:26	2,13521	3,61299	1,95768
00:03:34	2,13507	3,61089	1,95409
00:03:41	2,12928	3,60997	1,95477
00:03:49	2,12782	3,61128	1,95418
00:03:57	2,12782	3,61065	1,95676
00:04:05	2,12768	3,61041	1,95506
00:04:12	2,12952	3,61153	1,95545
00:04:20	2,13020	3,61265	1,95559
00:04:28	2,13025	3,61143	1,95447
00:04:36	2,13278	3,61153	1,95360
00:04:43	2,13293	3,61279	1,95170
00:04:51	2,13434	3,61440	1,95399
00:04:59	2,13390	3,61362	1,95107
00:05:07	2,13390	3,61391	1,95652
00:05:14	2,13497	3,61381	1,95238
00:05:22	2,13604	3,61323	1,95214
00:05:30	2,13731	3,61537	1,95302
00:05:38	2,13585	3,61415	1,95122
00:05:45	2,13439	3,61600	1,95054
00:05:53	2,13799	3,61556	1,95078
00:06:01	2,13740	3,61474	1,95224
00:06:09	2,13808	3,61498	1,95268
00:06:16	2,13779	3,61518	1,95457
00:06:24	2,13682	3,61503	1,95165
00:06:32	2,13706	3,61479	1,95783
00:06:39	2,13779	3,61459	1,95336
00:06:47	2,13745	3,61483	1,95447
00:06:55	2,13930	3,61673	1,95642
00:07:03	2,14125	3,61683	1,95744
00:07:10	2,14183	3,61688	1,95710
00:07:18	2,14596	3,61887	1,95778
00:07:26	2,14689	3,61902	1,96055
00:07:34	2,14587	3,62082	1,96221
00:07:41	2,14747	3,62174	1,96109
00:07:49	2,14825	3,62106	1,96308
00:07:57	2,14737	3,62135	1,96566
00:08:05	2,14630	3,62359	1,96201
00:08:12	2,14854	3,62330	1,96153
00:08:20	2,14864	3,62242	1,96440
00:08:28	2,14757	3,62135	1,96372
00:08:36	2,14718	3,62325	1,96693
00:08:43	2,14562	3,62339	1,96401

00:08:51	2,14611	3,62330	1,96586
00:08:59	2,14703	3,62315	1,96518
00:09:07	2,14509	3,62495	1,96605
00:09:14	2,14630	3,62408	1,97009
00:09:22	2,14830	3,62461	1,96839
00:09:30	2,14640	3,62510	1,96916
00:09:38	2,14703	3,62568	1,96882
00:09:45	2,14737	3,62505	1,96858
00:09:53	2,14737	3,62432	1,96766
00:10:01	2,14625	3,62451	1,97247
00:10:09	2,14728	3,62597	1,97276
00:10:16	2,14601	3,62539	1,97018
00:10:24	2,14684	3,62607	1,97213
00:10:32	2,14718	3,62510	1,97189
00:10:40	2,14849	3,62617	1,97184
00:10:47	2,14621	3,62451	1,97622
00:10:55	2,14572	3,62563	1,97733
00:11:03	2,14382	3,62476	1,97704
00:11:10	2,14465	3,62286	1,97690
00:11:18	2,14314	3,62408	1,97889
00:11:26	2,14538	3,62393	1,97962
00:11:34	2,14543	3,62466	1,97913
00:11:41	2,14382	3,62335	1,97811
00:11:49	2,14416	3,62301	1,98293
00:11:57	2,14450	3,62388	1,97957
00:12:05	2,14300	3,62296	1,98234
00:12:12	2,14222	3,62223	1,98497
00:12:20	2,14392	3,62232	1,98230
00:12:28	2,14270	3,62179	1,98254
00:12:36	2,14168	3,62155	1,98030
00:12:43	2,14363	3,62164	1,98161
00:12:51	2,14494	3,62160	1,98157
00:12:59	2,14339	3,62388	1,98254
00:13:07	2,14465	3,62369	1,98405
00:13:14	2,14431	3,62408	1,98161
00:13:22	2,14387	3,62471	1,98385
00:13:30	2,14499	3,62305	1,98215
00:13:38	2,14183	3,62315	1,98502
00:13:45	2,14100	3,62232	1,98375
00:13:53	2,14329	3,62296	1,98371
00:14:01	2,14275	3,62208	1,98419
00:14:09	2,14538	3,62330	1,98205
00:14:16	2,14246	3,62228	1,98181
00:14:24	2,14251	3,62315	1,98050
00:14:32	2,14314	3,62213	1,98161
00:14:40	2,14416	3,62305	1,98152

00:14:47	2,14178	3,62393	1,98220
00:14:55	2,14280	3,62296	1,98283
00:15:03	2,14217	3,62257	1,98016
00:15:11	2,14188	3,62189	1,97806
00:15:18	2,14066	3,62223	1,97763
00:15:26	2,14358	3,62388	1,97729
00:15:34	2,14295	3,62271	1,97661
00:15:41	2,14363	3,62388	1,97850
00:15:49	2,14382	3,62412	1,97568
00:15:57	2,14227	3,62242	1,97592
00:16:05	2,14066	3,62223	1,97641
00:16:12	2,14319	3,62252	1,97690
00:16:20	2,14377	3,62320	1,97442
00:16:28	2,14300	3,62218	1,97490
00:16:36	2,14494	3,62354	1,97738
00:16:43	2,14343	3,62130	1,97232
00:16:51	2,14095	3,62057	1,97539
00:16:59	2,14324	3,62009	1,97330
00:17:07	2,14334	3,62043	1,97481
00:17:14	2,14149	3,62028	1,96926
00:17:22	2,14125	3,61921	1,97626
00:17:30	2,14076	3,61960	1,97446
00:17:38	2,14246	3,61926	1,97281

00:17:45	2,14027	3,61946	1,97213
00:17:53	2,14193	3,61858	1,96858
00:18:01	2,14042	3,61946	1,97301
00:18:09	2,14042	3,62018	1,97169
00:18:16	2,14042	3,61892	1,97164
00:18:24	2,14052	3,61960	1,97383
00:18:32	2,14202	3,61897	1,97096
00:18:40	2,14047	3,61858	1,96892
00:18:47	2,14129	3,61873	1,97164
00:18:55	2,14110	3,61887	1,96994
00:19:03	2,14159	3,61746	1,97057
00:19:11	2,14071	3,61887	1,97194
00:19:18	2,14027	3,61819	1,97198
00:19:26	2,13940	3,61887	1,97262
00:19:34	2,14081	3,61756	1,97262
00:19:41	2,14022	3,61848	1,97281
00:19:49	2,13833	3,61882	1,97442
00:19:57	2,14134	3,61766	1,97466
00:20:05	2,14134	3,61756	1,97661
00:20:12	2,14013	3,61673	1,97432
00:20:20	2,13969	3,61819	1,97057

CIERRE 30 % - 80% AL 50% - DAMPER D49

Datos obtenidos del MOLINO DE CRUDO			
HORA	D49	D41	TT104
00:21:56	2,14071	3,61795	1,97286
00:22:13	2,13662	3,61892	1,96999
00:22:21	2,13731	3,61843	1,97179
00:22:29	2,13818	3,62067	1,97262
00:22:37	2,13828	3,61800	1,97223
00:22:44	2,13633	3,61897	1,96989
00:22:52	2,13487	3,62072	1,97339
00:23:00	2,13448	3,62072	1,96907
00:23:08	2,13410	3,62062	1,97398
00:23:15	2,13385	3,62101	1,97262
00:23:23	2,13628	3,62116	1,97432
00:23:31	2,13575	3,62189	1,97325
00:23:39	2,13594	3,62301	1,97150
00:23:46	2,13682	3,62446	1,97130
00:23:54	2,13546	3,62398	1,97223
00:24:02	2,13589	3,62330	1,97155
00:24:10	2,13580	3,62286	1,97014
00:24:17	2,13448	3,62339	1,97189
00:24:25	2,13565	3,62330	1,97028
00:24:33	2,13658	3,62359	1,97018
00:24:41	2,13580	3,62412	1,97033
00:24:48	2,13371	3,62310	1,97048
00:24:56	2,13682	3,62301	1,96629

00:25:04	2,13361	3,62301	1,96756
00:25:12	2,13448	3,62339	1,96586
00:25:19	2,13356	3,62325	1,96513
00:25:27	2,13463	3,62393	1,96547
00:25:35	2,12952	3,62281	1,96406
00:25:42	2,13196	3,62461	1,96440
00:25:50	2,13098	3,62301	1,96430
00:25:58	2,13171	3,62330	1,96065
00:26:06	2,13196	3,62286	1,96488
00:26:13	2,13273	3,62412	1,96055
00:26:21	2,13230	3,62485	1,95958
00:26:29	2,13234	3,62554	1,96255
00:26:37	2,13220	3,62583	1,96522
00:26:44	2,13458	3,62500	1,96109
00:26:52	2,13293	3,62554	1,96031
00:27:00	2,13239	3,62612	1,96119
00:27:08	2,13400	3,62505	1,95734
00:27:15	2,13424	3,62685	1,95661
00:27:23	2,13264	3,62719	1,95652
00:27:31	2,13303	3,62709	1,95627
00:27:39	2,13293	3,62568	1,95559
00:27:46	2,13478	3,62607	1,95734
00:27:54	2,13482	3,62763	1,95554
00:28:02	2,13332	3,62913	1,95472
00:28:10	2,13536	3,62889	1,95423
00:28:17	2,13638	3,62879	1,95272

00:28:25	2,13410	3,62845	1,95316
00:28:33	2,13303	3,62811	1,94956
00:28:41	2,13361	3,62699	1,95326
00:28:48	2,13351	3,62850	1,95224
00:28:56	2,13453	3,62870	1,95146
00:29:04	2,13434	3,62889	1,95063
00:29:12	2,13405	3,62797	1,95180
00:29:19	2,13361	3,62743	1,95024
00:29:27	2,13448	3,62831	1,95049
00:29:35	2,13230	3,62928	1,94903
00:29:43	2,13161	3,62836	1,95058
00:29:50	2,13264	3,62845	1,94830
00:29:58	2,13288	3,62826	1,94728
00:30:06	2,13288	3,62904	1,94285
00:30:13	2,13366	3,62680	1,94995
00:30:21	2,13366	3,62704	1,95078
00:30:29	2,13157	3,62646	1,94528
00:30:37	2,13191	3,62592	1,94645
00:30:44	2,13191	3,62646	1,94669
00:30:52	2,13220	3,62641	1,94407
00:31:00	2,13414	3,62558	1,94562
00:31:08	2,13200	3,62549	1,94480
00:31:15	2,13395	3,62670	1,94674
00:31:23	2,13196	3,62729	1,94698
00:31:31	2,13337	3,62592	1,94149
00:31:39	2,13390	3,62695	1,94178
00:31:46	2,13473	3,62690	1,94392
00:31:54	2,13512	3,62622	1,94212
00:32:02	2,13526	3,62573	1,94446
00:32:10	2,13648	3,62597	1,94022
00:32:17	2,13419	3,62850	1,93998
00:32:25	2,13444	3,62802	1,94086
00:32:33	2,13152	3,62777	1,94071
00:32:41	2,13395	3,62758	1,93959
00:32:48	2,13225	3,62933	1,93804
00:32:56	2,13298	3,62889	1,93872
00:33:04	2,13375	3,62933	1,93794
00:33:12	2,13147	3,62811	1,93521
00:33:19	2,13541	3,62918	1,93400
00:33:27	2,13414	3,62879	1,93458

00:33:35	2,13220	3,62768	1,93638
00:33:43	2,13390	3,62811	1,93818
00:33:50	2,13546	3,62806	1,93779
00:33:58	2,13444	3,62952	1,93507
00:34:06	2,13332	3,62850	1,93419
00:34:14	2,13361	3,62865	1,93468
00:34:21	2,13123	3,62753	1,93030
00:34:29	2,13254	3,62602	1,93278
00:34:37	2,13093	3,62753	1,93259
00:34:44	2,13084	3,62768	1,93054
00:34:52	2,13303	3,62743	1,93298
00:35:00	2,13371	3,62670	1,93264
00:35:08	2,13312	3,62860	1,93093
00:35:15	2,13380	3,62797	1,93035
00:35:23	2,13176	3,62797	1,92782
00:35:31	2,13444	3,62690	1,92991
00:35:39	2,13152	3,62661	1,92923
00:35:46	2,13337	3,62792	1,92821
00:35:54	2,13312	3,62831	1,92626
00:36:02	2,13084	3,62806	1,92714
00:36:10	2,13536	3,62870	1,92753
00:36:17	2,13259	3,62967	1,92554
00:36:25	2,13346	3,62933	1,92816
00:36:33	2,13458	3,62982	1,92729
00:36:41	2,13405	3,63118	1,92573
00:36:48	2,13317	3,62967	1,92675
00:36:56	2,13400	3,62952	1,92578
00:37:04	2,13478	3,63050	1,92510
00:37:12	2,13575	3,62938	1,92918
00:37:19	2,13293	3,62962	1,92738
00:37:27	2,13395	3,62704	1,92904
00:37:35	2,13176	3,62782	1,92792
00:37:43	2,13303	3,62797	1,92510
00:37:50	2,13249	3,62933	1,92777
00:37:58	2,13327	3,62894	1,92485
00:38:06	2,13439	3,62899	1,92534
00:38:14	2,13346	3,62714	1,92855
00:38:21	2,13346	3,62510	1,92714
00:38:29	2,13346	3,62451	1,92840

APERTURA 30 % - 50% AL 80% - DAMPER D41

Datos obtenidos del MOLINO DE CRUDO			
HORA	D49	D41	TT104
01:02:38	2,13093	3,58784	1,95944
01:05:46	2,13059	3,58794	1,95953
01:05:54	2,12933	3,58706	1,95885
01:06:02	2,12884	3,58687	1,95992
01:06:09	2,12977	3,58740	1,95837
01:06:17	2,12918	3,58769	1,95914

01:06:25	2,12850	3,58872	1,95715
01:06:33	2,13035	3,58565	1,95608
01:06:40	2,12952	3,58288	1,95837
01:06:48	2,13025	3,58205	1,95759
01:07:03	2,12894	3,58157	1,95671
01:07:11	2,12884	3,58234	1,95978
01:07:18	2,13001	3,58234	1,95910
01:07:26	2,12972	3,58244	1,95759
01:07:34	2,12845	3,58200	1,95905

01:07:42	2,12870	3,58210	1,95944
01:07:49	2,12962	3,58230	1,95929
01:07:57	2,13103	3,58380	1,95851
01:08:05	2,13103	3,58473	1,95803
01:08:13	2,13118	3,58288	1,95973
01:08:20	2,13016	3,58303	1,95919
01:08:28	2,12977	3,58458	1,96055
01:08:36	2,13001	3,58570	1,95982
01:08:44	2,12928	3,58643	1,95652
01:08:51	2,13118	3,58658	1,96070
01:08:59	2,12933	3,58682	1,95953
01:09:07	2,13234	3,58687	1,96133
01:09:15	2,13074	3,58784	1,96089
01:09:22	2,13205	3,58692	1,96396
01:09:30	2,12865	3,58662	1,96328
01:09:38	2,13059	3,58769	1,96245
01:09:46	2,13079	3,58949	1,96089
01:09:53	2,13040	3,58804	1,96162
01:10:01	2,12967	3,58847	1,96128
01:10:09	2,13234	3,58784	1,96041
01:10:17	2,13030	3,58964	1,96318
01:10:24	2,13152	3,58959	1,96143
01:10:32	2,12938	3,59037	1,96138
01:10:40	2,12943	3,58949	1,96279
01:10:48	2,12938	3,59061	1,96274
01:10:55	2,13030	3,59018	1,96231
01:11:03	2,12991	3,59115	1,96289
01:11:11	2,13147	3,59232	1,96260
01:11:19	2,13001	3,59377	1,96323
01:11:26	2,12826	3,59397	1,96216
01:11:34	2,12806	3,59154	1,95929
01:11:42	2,12899	3,59197	1,96449
01:11:49	2,12909	3,59319	1,96250
01:11:57	2,12763	3,59339	1,96347
01:12:05	2,13059	3,59290	1,96265
01:12:13	2,12860	3,59270	1,96201
01:12:20	2,12850	3,59436	1,96075
01:12:28	2,12753	3,59475	1,96279
01:12:36	2,13020	3,59363	1,96041
01:12:44	2,12909	3,59334	1,96381
01:12:51	2,12729	3,59504	1,96279
01:12:59	2,12889	3,59446	1,96561
01:13:07	2,12753	3,59601	1,96041
01:13:15	2,12816	3,59553	1,96080
01:13:22	2,12763	3,59562	1,96099
01:13:30	2,12588	3,59509	1,96308
01:13:38	2,12743	3,59596	1,96376
01:13:46	2,12738	3,59660	1,96017
01:13:53	2,12860	3,59805	1,96206
01:14:01	2,12928	3,59674	1,96338
01:14:09	2,12977	3,59723	1,96479
01:14:17	2,12870	3,59601	1,96459

01:14:24	2,12685	3,59601	1,96167
01:14:32	2,12714	3,59587	1,96114
01:14:40	2,12782	3,59450	1,96328
01:14:48	2,12602	3,59786	1,96250
01:14:55	2,12738	3,59645	1,96649
01:15:03	2,12578	3,59718	1,96240
01:15:11	2,12777	3,59737	1,96376
01:15:19	2,12695	3,59679	1,96381
01:15:26	2,12661	3,59718	1,96508
01:15:34	2,12592	3,59621	1,96333
01:15:42	2,12592	3,59679	1,96245
01:15:50	2,12665	3,59703	1,95963
01:15:57	2,12733	3,59820	1,96162
01:16:05	2,12855	3,59737	1,96255
01:16:13	2,12602	3,59839	1,96172
01:16:20	2,12748	3,59747	1,96153
01:16:28	2,12685	3,59771	1,96104
01:16:36	2,12782	3,59757	1,96231
01:16:44	2,12719	3,59660	1,96089
01:16:51	2,12680	3,59723	1,96119
01:16:59	2,12763	3,59796	1,96250
01:17:07	2,12811	3,59844	1,96041
01:17:15	2,12617	3,60000	1,96206
01:17:22	2,12607	3,59961	1,96089
01:17:30	2,12622	3,59912	1,96094
01:17:38	2,12704	3,59888	1,95987
01:17:46	2,12680	3,59849	1,96196
01:17:53	2,12840	3,59942	1,96362
01:18:01	2,12519	3,59912	1,96605
01:18:09	2,12802	3,59839	1,96449
01:18:17	2,12957	3,59752	1,96318
01:18:24	2,12568	3,59737	1,96532
01:18:32	2,12772	3,59839	1,96294
01:18:40	2,12797	3,59791	1,96235
01:18:48	2,12709	3,59791	1,96552
01:18:55	2,12772	3,59781	1,96231
01:19:03	2,12733	3,59849	1,96274
01:19:11	2,12665	3,59893	1,96260
01:19:19	2,12763	3,59844	1,96425
01:19:26	2,12753	3,59679	1,96566
01:19:34	2,12695	3,59767	1,96070
01:19:42	2,12753	3,59815	1,96488
01:19:50	2,12777	3,59849	1,96620
01:19:57	2,12768	3,59917	1,96449
01:20:05	2,12957	3,59966	1,96192
01:20:13	2,12758	3,59815	1,96279
01:20:21	2,12602	3,60000	1,96046
01:20:28	2,12597	3,59825	1,96712
01:20:36	2,12607	3,59805	1,96420
01:20:44	2,12699	3,59601	1,96352
01:20:51	2,12267	3,59397	1,96352
01:20:59	2,12378	3,59266	1,96124

01:21:07	2,12281	3,59387	1,96503
01:21:15	2,12135	3,59314	1,96440
01:21:22	2,12121	3,59300	1,96800
01:21:30	2,12296	3,59251	1,96537
01:21:38	2,12403	3,59217	1,96581
01:21:46	2,12291	3,59090	1,96547
01:21:53	2,12267	3,59061	1,96600
01:22:01	2,12169	3,59168	1,96688
01:22:09	2,12422	3,59032	1,96240
01:22:17	2,12325	3,59105	1,96527
01:22:24	2,12247	3,59207	1,96284
01:22:32	2,12446	3,59037	1,96513
01:22:40	2,12393	3,59144	1,96537

01:22:48	2,12437	3,59018	1,96605
01:22:55	2,12432	3,59139	1,96342
01:23:03	2,12549	3,59178	1,96124
01:23:11	2,12544	3,59227	1,96240
01:23:19	2,12393	3,59188	1,96338
01:23:26	2,12495	3,59163	1,96235
01:23:34	2,12563	3,59343	1,96138
01:23:42	2,12466	3,59212	1,95919
01:23:50	2,12437	3,59154	1,95944
01:23:57	2,12704	3,59168	1,95982

CIERRE 30 % - 80% AL 50% - DAMPER D49

Datos obtenidos del MOLINO DE CRUDO			
HORA	D49	D41	TT104
01:24:30	2,12558	3,59290	1,94781
01:30:01	2,12573	3,58867	1,94835
01:30:08	2,12763	3,58638	1,94888
01:30:16	2,12690	3,58337	1,94664
01:30:24	2,12661	3,58006	1,94689
01:30:32	2,12617	3,57709	1,94664
01:30:39	2,12675	3,57544	1,94640
01:30:47	2,12748	3,57203	1,94528
01:30:55	2,12690	3,57111	1,94236
01:31:03	2,12651	3,56697	1,94377
01:31:10	2,12646	3,56556	1,94553
01:31:18	2,12515	3,56333	1,94363
01:31:26	2,12636	3,56265	1,94066
01:31:34	2,12636	3,55890	1,94042
01:31:41	2,12792	3,55793	1,94129
01:31:49	2,12797	3,55778	1,94212
01:31:57	2,12709	3,55511	1,93750
01:32:05	2,12602	3,55297	1,93935
01:32:12	2,12695	3,55199	1,93711
01:32:20	2,12704	3,54981	1,94149
01:32:28	2,12777	3,54956	1,93896
01:32:35	2,12884	3,54776	1,93643
01:32:43	2,12792	3,54606	1,93915
01:32:51	2,12704	3,54587	1,93993
01:32:59	2,12763	3,54411	1,93896
01:33:06	2,12641	3,54280	1,93672
01:33:14	2,12870	3,54246	1,93633
01:33:22	2,12986	3,54110	1,93765
01:33:30	2,12811	3,53959	1,93808
01:33:37	2,12904	3,53789	1,93609
01:33:45	2,12675	3,53784	1,93696
01:33:53	2,12855	3,53599	1,93366
01:34:01	2,12821	3,53517	1,93434
01:34:08	2,12651	3,53507	1,93375

01:34:16	2,12714	3,53346	1,93570
01:34:24	2,12802	3,53375	1,93604
01:34:32	2,12583	3,53293	1,93492
01:34:39	2,12597	3,53225	1,93390
01:34:47	2,12904	3,53254	1,93463
01:34:55	2,12913	3,52933	1,93385
01:35:03	2,12651	3,52928	1,93599
01:35:10	2,12763	3,52894	1,93541
01:35:18	2,12675	3,52753	1,93264
01:35:26	2,12573	3,52699	1,93497
01:35:34	2,12806	3,52617	1,93176
01:35:41	2,12768	3,52446	1,93293
01:35:49	2,12578	3,52408	1,93405
01:35:57	2,12437	3,52442	1,93361
01:36:05	2,12583	3,52432	1,93123
01:36:12	2,12743	3,52223	1,93113
01:36:20	2,12680	3,52301	1,93239
01:36:28	2,12607	3,52335	1,93307
01:36:36	2,12763	3,52057	1,92972
01:36:43	2,12646	3,52203	1,93405
01:36:51	2,12617	3,52053	1,93268
01:36:59	2,12709	3,51897	1,93395
01:37:06	2,12792	3,52018	1,93157
01:37:14	2,12544	3,51999	1,93142
01:37:22	2,12588	3,51887	1,93220
01:37:30	2,12607	3,51863	1,93215
01:37:37	2,12675	3,51795	1,92996
01:37:45	2,12748	3,51722	1,92894
01:37:53	2,12563	3,51615	1,93147
01:38:01	2,12485	3,51639	1,93215
01:38:08	2,12845	3,51503	1,93016
01:38:16	2,12787	3,51586	1,93264
01:38:24	2,12631	3,51503	1,93337
01:38:32	2,12524	3,51449	1,93137
01:38:39	2,12534	3,51586	1,93035
01:38:47	2,12680	3,51547	1,93264
01:38:55	2,12641	3,51454	1,93448

01:39:03	2,12359	3,51474	1,93147
01:39:10	2,12554	3,51347	1,93448
01:39:18	2,12539	3,51440	1,92913
01:39:26	2,12495	3,51367	1,93089
01:39:34	2,12398	3,51114	1,93035
01:39:41	2,12476	3,51226	1,92972
01:39:49	2,12573	3,51294	1,92977
01:39:57	2,12777	3,51196	1,93181
01:40:05	2,12461	3,51158	1,93035
01:40:12	2,12554	3,51143	1,92875
01:40:20	2,12568	3,51109	1,93113
01:40:28	2,12719	3,51104	1,92972
01:40:36	2,12622	3,51114	1,93288
01:40:43	2,12704	3,51128	1,92870
01:40:51	2,12602	3,51255	1,92967
01:40:59	2,12753	3,51265	1,93084
01:41:07	2,12850	3,51216	1,92879
01:41:14	2,12656	3,51196	1,92889
01:41:22	2,12729	3,51187	1,93035
01:41:30	2,12690	3,51231	1,93098
01:41:37	2,12685	3,51328	1,93361
01:41:45	2,12597	3,51391	1,93152
01:41:53	2,12544	3,51430	1,93254
01:42:01	2,12665	3,51342	1,93001
01:42:08	2,12661	3,51279	1,93089
01:42:16	2,12369	3,51226	1,93468
01:42:24	2,12558	3,51182	1,92977
01:42:32	2,12607	3,51357	1,93161
01:42:39	2,12510	3,51172	1,93093
01:42:47	2,12738	3,51026	1,93079

01:42:55	2,12417	3,51231	1,93239
01:43:03	2,12568	3,51367	1,93132
01:43:10	2,12724	3,51153	1,93502
01:43:18	2,12651	3,51279	1,93405
01:43:26	2,12617	3,51148	1,93147
01:43:34	2,12583	3,51070	1,93142
01:43:41	2,12680	3,51104	1,93230
01:43:49	2,12490	3,51128	1,93346
01:43:57	2,12743	3,51060	1,93093
01:44:05	2,12651	3,51041	1,93283
01:44:12	2,12485	3,51119	1,93312
01:44:20	2,12646	3,51007	1,93283
01:44:28	2,12622	3,51226	1,93123
01:44:36	2,12670	3,51046	1,93307
01:44:43	2,12729	3,51104	1,92884
01:44:51	2,12505	3,50929	1,92982
01:44:59	2,12505	3,51060	1,93098
01:45:07	2,12568	3,50953	1,92889
01:45:14	2,12622	3,51046	1,93079
01:45:22	2,12408	3,50910	1,93016
01:45:30	2,12665	3,51012	1,92918
01:45:38	2,12510	3,50827	1,93230
01:45:45	2,12855	3,51055	1,93123
01:45:53	2,12651	3,50900	1,92821
01:46:01	2,12656	3,50953	1,92938
01:46:08	2,12544	3,50910	1,92860
01:46:16	2,12485	3,50978	1,92802
01:46:24	2,12403	3,50871	1,92996
01:46:32	2,12471	3,50817	1,92894

Anexo 6
Código – Identificador de Sistemas
en Matlab

CODIGO MATLAB

```

t = xlsread('C:\Users\NELSON-
PC\Desktop\FUNCION DE
TRANSFERENCIA\GraficasObtenidas\AdquisicionDa
tos.xls', 'D49subida', 'A2:A121');
d49s = xlsread('C:\Users\NELSON-
PC\Desktop\FUNCION DE
TRANSFERENCIA\GraficasObtenidas\AdquisicionDa
tos.xls', 'D49subida', 'B2:B121');
d49b = xlsread('C:\Users\NELSON-
PC\Desktop\FUNCION DE
TRANSFERENCIA\GraficasObtenidas\AdquisicionDa
tos.xls', 'D49bajada', 'B2:B121');
d41s = xlsread('C:\Users\NELSON-
PC\Desktop\FUNCION DE
TRANSFERENCIA\GraficasObtenidas\AdquisicionDa
tos.xls', 'D41subida', 'B2:B121');
d41b = xlsread('C:\Users\NELSON-
PC\Desktop\FUNCION DE
TRANSFERENCIA\GraficasObtenidas\AdquisicionDa
tos.xls', 'D41bajada', 'B2:B121');
figure(1);
subplot(2,2,1);
plot(t,d49s);
hold on;
f=polyfit(t, d49s, 4);
x=t;
fd49s =
(f(1)*(x.^4))+(f(2)*(x.^3))+(f(3)*(x.^2))+(f(4)*x)+f(5)
;
%plot(x, fd49s,'r');
hold off;
grid on;
title('d49 - tt104 subida')
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura')
subplot(2,2,2);
plot(t,d49b);
hold on;
f=polyfit(t, d49b, 4);
x=t;
fd49b =
(f(1)*(x.^4))+(f(2)*(x.^3))+(f(3)*(x.^2))+(f(4)*x)+f(5)
;
%plot(x, fd49b,'r');
hold off;
grid on;
title('d49 - tt104 bajada')
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura')
subplot(2,2,3);
plot(t,d41s);
hold on;
f=polyfit(t, d41s, 4);
x=t;
fd41s =
(f(1)*(x.^4))+(f(2)*(x.^3))+(f(3)*(x.^2))+(f(4)*x)+f(5)
;
%plot(x, fd41s,'r');
hold off;
grid on;
title('d41 - tt104 subida');
xlabel('tiempo');
ylabel('Temperatura');
[Kd49s,Wnd49s,Ed49s] = ftGrafica(d49s);
[Kd49b,Wnd49b,Ed49b] = ftGrafica(d49b);
[Kd41s,Wnd41s,Ed41s] = ftGrafica(d41s);
[Kd41b,Wnd41b,Ed41b] = ftGrafica(d49b);
NumD49 =
(((Kd49s.*(Wnd49s.^2))+(Kd49b.*(Wnd49b.^2)))/2
);
Bd49 =
((2.*Wnd49s.*Ed49s)+(2.*Wnd49b.*Ed49b))/2;
Cd49 = ((Wnd49s.^2)+(Wnd49b.^2))/2;
DenD49 = [1 Bd49 Cd49];
ftD49 = tf(NumD49,DenD49);
NumD41 =
(((Kd41s.*(Wnd41s.^2))+(Kd41b.*(Wnd41b.^2)))/2
);
Bd41 =
((2.*Wnd41s.*Ed41s)+(2.*Wnd41b.*Ed41b))/2;
Cd41 = ((Wnd41s.^2)+(Wnd41b.^2))/2;
DenD41 = [1 Bd41 Cd41];
ftD41 = tf(NumD41,DenD41);
figure(2);
subplot(1,2,1);
step(ftD41);
title('Funcion de Tranferencia d41 - tt104')
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura')
subplot(1,2,2);
step(ftD49);
title('Funcion de Tranferencia d49 - tt104')
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura')

```