



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y
COMPUTACION**

“Identificación y diseño del controlador para un sistema de
control de temperatura de agua en un tanque”

TESINA DE SEMINARIO

Previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACION
ELECTRONICA Y AUTOMATIZACION INDUSTRIAL**

PRESENTADA POR:

Diego Andrés Ochoa Moreno

Brean Sthill León Rodríguez

GUAYAQUIL – ECUADOR

2012

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarnos la oportunidad de terminar esta etapa de nuestras vidas, a nuestro director de tesina, el Msc. César Martín por todo el apoyo y por compartir con nosotros sus conocimientos.

A nuestros familiares y amigos, que de una u otra manera estuvieron a lo largo de nuestra vida universitaria, brindándonos el apoyo necesario.

A todos los profesores de la universidad que gracias a sus conocimientos nos encontramos en este punto importante de nuestras vidas.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, mis padres, hermanos, Yoicy, amigos y compañeros que me han brindado su ayuda y su aliento durante el desarrollo de este trabajo.

Brean Sthill León Rodríguez

Este trabajo se lo dedico a mi familia en especial a mi papá y mi mamá, por todo el apoyo que me han dado y por siempre darme los mejores consejos.

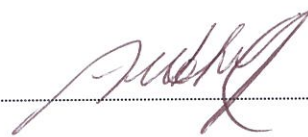
Diego Andrés Ochoa Moreno

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Msc. César Martín Moreno

PROFESOR DEL SEMINARIO



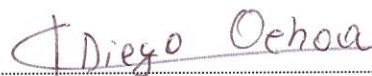
Ing. Alberto Larco

PROFESOR DELEGADO DEL DECANO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesina nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

A handwritten signature in dark ink, reading "Diego Ochoa", written over a horizontal dotted line. A vertical line descends from the end of the signature.

Diego Andrés Ochoa Moreno.

A handwritten signature in dark ink, reading "Brean Stihl León Rodríguez", written over a horizontal dotted line.

Brean Stihl León Rodríguez.

RESUMEN

La temperatura es una de las principales variables físicas a controlar en todo tipo de proceso industrial. En la cual como principal objetivo se realizó la identificación y diseño del controlador para un sistema de control de temperatura de agua en un tanque.

Uno de los principales inconvenientes al momento de realizar la identificación fue la disponibilidad de un proceso para la identificación, ya que en muchas industrias no se permite detener ciertos procesos, debido a que esto produce pérdidas en la producción. Por esta razón se decidió elaborar un prototipo, que represente la operación de un proceso real.

El trabajo consistió en diseñar una señal de entrada, para obtener una respuesta del sistema, luego se utilizó la identificación paramétrica para obtener la función de transferencia del sistema. Se realizó el análisis de correlación cruzada y covarianza a la señal de entrada, ya que en base a estos criterios se logró seleccionar la mejor señal de entrada al sistema.

En la identificación paramétrica se utilizaron cuatro de los modelos paramétricos, que mediante análisis se obtuvo el modelo que más representa al sistema, y así se consiguió la función de transferencia del sistema. Se explicó los distintos tipos de control que existen, y como una aplicación de la identificación se diseñó un controlador que cumplió con los objetivos planteados.

En este trabajo se explicó detalladamente los procedimientos necesarios que se realizaron para el análisis correcto del sistema, y posteriormente las conclusiones que se pudieron obtener de este proyecto.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el primer capítulo se mencionó la historia de la teoría de control, ya que es muy importante saber cómo se originó la misma. Por otra parte siendo más específico con el tema de este proyecto, también se presentó una pequeña historia sobre el origen del control de temperatura.

En el capítulo dos se explicó la fundamentación teórica de los principios de las leyes que se utilizaron para poder realizar el análisis, tales como: los tipos de transferencia de calor, los tipos de controladores, entre otros. Debido a que se identificó un sistema, fue necesario dar a conocer el procedimiento a realizar, para obtener resultados satisfactorios.

En el capítulo tres se buscó diseñar la solución al problema planteado, en la cual se empezó con la construcción del prototipo. Una vez que se obtuvo el prototipo, se procedió someter el sistema a una entrada escalón, es decir se hizo operar el sistema en lazo abierto, ya que de esta manera se pudo obtener los parámetros necesarios para generar una señal de entrada.

En el capítulo cuatro, con el diseño de la señal de entrada que se obtuvo del capítulo anterior, se procedió a realizar la identificación. En esta parte del proyecto se realizaron las diferentes pruebas para poder comparar con cada uno de los modelos paramétricos, y así se decidió cuál es el modelo que más se asemeja al sistema. Entonces una vez escogido el modelo se procedió a obtener la función de transferencia que representa al sistema.

En el capítulo cinco se diseñó el controlador, éste se lo realizó usando una aplicación de Matlab llamada Sisotool, a través del método del lugar geométrico de las raíces se obtuvo la función de transferencia del controlador. Así finalmente se realizó la validación del controlador y se cumplió con los objetivos del prototipo construido.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACION	III
DECLARACION EXPRESA	IV
RESUMEN	V
INDICE GENERAL	VII
ABREVIATURAS	XII
INDICE DE FIGURAS	XIV
INDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCION	XIX

CAPITULO 1: INICIOS DE CONTROL DE TEMPERATURA

1.1 HISTORIA DE LA TEORIA DE CONTROL

1.1.1 INTRODUCCION	1
1.1.2 APORTACIONES DE LOS GRIEGOS Y ARABES	2
1.1.3 REVOLUCION INDUSTRIAL.....	4
1.1.3.1 REGULADOR DE TEMPERATURA.....	5
1.1.3.2 REGULADOR FLOTADOR	6
1.1.3.3 REGULADOR DE PRESION	6
1.1.4 LA INFLUENCIA DE LAS MATEMATICAS EN LA TEORIA DE CONTROL.....	7
1.1.5 PROCESOS INDUSTRIALES	7
1.1.6 EL CONTROL AUTOMATICO A PARTIR DE 1950.....	8

1.2 HISTORIA DEL CONTROL DE TEMPERATURA

1.2.1 INTRODUCCION	9
1.2.2 LOS PRIMEROS TERMOMETROS.....	9
1.2.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA.....	12

CAPITULO 2: FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 CONCEPTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR	13
2.2 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	13
2.2.1 CONVECCION	14
2.2.2 CONDUCCION	14
2.2.3 RADIACION.....	15
2.3 CONTROLADOR	15
2.3.1 CONTROLADOR ON/OFF.....	15
2.3.2 CONTROL EN LAZO ABIERTO	16
2.3.3 CONTROLADOR PID	17
2.4 CALDERAS.....	18
2.5 DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO	20
2.6 EL SOFTWARE.....	21
2.7 ETAPAS DE LA IDENTIFICACION	22
2.8 FUNDAMENTOS BASICOS DE CONTROL EN UN SISTEMA.....	23
2.9 SEÑALES Y SISTEMAS	23
2.9.1 SEÑAL ESCALON UNITARIO.....	23
2.9.2 TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	24
2.9.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA.....	26
2.10 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN	26
2.11 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.....	28
2.11.1 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO	28
2.11.2 RESPUESTA SOBREAMORTIGUADA	29
2.11.3 RESPUESTA SUBAMORTIGUADA	29
2.11.4 RESPUESTA NO AMORTIGUADA.....	30
2.11.5 RESPUESTA CRITICAMENTE AMORTIGUADA	30
2.12 SISTEMAS SUBAMORTIGUADO DE SEGUNDO ORDEN	31

2.12.1 TIEMPO PICO	31
2.12.2 SOBRENIVEL PORCENTUAL.....	31
2.12.3 TIEMPO DE ESTABILIZACION	32
2.12.4 TIEMPO DE LEVANTAMIENTO	32
2.13 DIAGRAMA DE BODE	32
2.14 SISTEMAS DE CONTROL DISCRETO	33
2.14.1 LEYES DE CONTROL DISCRETO.....	35
2.14.2 RETENEDOR DE SEÑALES.....	35
2.14.3 ALIASING.....	36
2.15 TRANSFORMADA Z.....	36
2.16 METODOS DE IDENTIFICACION DE SISTEMAS	39
2.17 METODOS NO PARAMETRICOS	40
2.17.1 ANALISIS DE RESPUESTA TRANSITORIA.....	40
2.17.2 ANALISIS EN EL DOMINIO DE FRECUENCIA	40
2.17.3 ANALISIS DE CORRELACION	40
2.17.4 ANALISIS ESPECTRAL.....	41
2.18 TECNICAS DE IDENTIFICACION PARAMETRICAS	41
2.19 METODO PARA AJUSTE DE PARAMETROS.....	44
2.19.1 ERRORES DE PREDICCION	44
2.19.2 REGRESION LINEAL	44
2.19.3 METODO DE MINIMOS CUADRADOS	44

CAPITULO 3: DISEÑO DE LA SOLUCION

3.1 BOSQUEJO DE LA PLANTA Y RAZONES PARA CONTROLAR EL SISTEMA.....	45
3.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO	46
3.3 DESCRIPCION DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS	46
3.3.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	46

3.3.2 BOMBA DE AGUA	47
3.3.3 INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	48
3.3.4 DISPOSITIVO DE ENFRIAMIENTO.....	49
3.3.5 SENSOR DE TEMPERATURA	50
3.3.6 RESISTENCIA CALEFACTORA	52
3.4 PARTE ELECTRONICA DE LA PLANTA	54
3.4.1 CIRCUITO AMPLIFICADOR DEL SENSOR.....	54
3.4.2 CIRCUITO DE DISPARO DEL TRIAC	55
3.4.2.1 ESQUEMA GENERAL	55
3.4.2.2 PRIMERA ETAPA.....	57
3.4.2.3 SEGUNDA ETAPA	58
3.4.2.4 TERCERA ETAPA	59
3.4.3 CIRCUITO DE FUERZA.....	59
3.5 DESCRIPCION DETALLADA DEL PROCESO	60
3.6 DETERMINACION DEL TAO DOMINANTE.....	61
3.7 OBTENCION DEL TIEMPO DE MUESTREO	63
3.8 DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA	65
3.9 PARAMETROS DE LA SEÑAL MULTISENO.....	66
3.10 PARAMETROS DE LA SEÑAL PRBS.....	75

CAPITULO 4: PROCESO DE IDENTIFICACION

4.1 HERRAMIENTAS PARA EL PROCESO.....	81
4.2 OBTENCION Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS	81
4.3 ANALISIS CON EL MODELO ARX.....	84
4.4 ANALISIS CON EL MODELO ARMAX	88
4.5 ANALISIS CON EL MODELO OE.....	91
4.6 ANALISIS CON EL MODELO BJ	94

4.7 COMPARACION DE LOS MODELOS	97
4.8 OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA	98

CAPITULO 5: DISEÑO DEL CONTROLADOR

5 DISEÑO DEL CONTROLADOR	100
5.1 OBJETIVOS DEL CONTROLADOR A DISEÑAR.....	101
5.2 PARAMETROS EN LAZO ABIERTO	101
5.3 ANALISIS POR METODO ZIEGLER - NICHOLS	103
5.4 ANALISIS POR METODO COHEN- COON	104
5.5 ANALISIS POR METODO ITAE.....	104
5.6 ANALISIS POR SISOTOOL.....	105
5.7 CONCLUSIONES DEL CONTROLADOR	107
5.8 SIMULACION DEL CONTROLADOR.....	108
5.6 VALIDACION DEL CONTROLADOR.....	109

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS

t:	Tiempo.
s:	Variable compleja de Laplace.
P:	Controlador proporcional.
PI:	Controlador proporcional integral.
PID:	Controlador proporcional integral derivativo.
PD:	Controlador proporcional derivativo.
ζ	Coefficiente de amortiguamiento.
ω_n:	Frecuencia natural.
e(t):	Error entre salida y referencia.
K_p:	Ganancia proporcional.
K_i:	Ganancia integral.
K_D:	Ganancia derivativa.
G(s):	Función de transferencia de la planta.
$G_c(s)$:	Función de transferencia del controlador.
$G_{directa}(s)$:	Función de transferencia de trayectoria directa.
PRBS:	Secuencia binaria pseudoaleatoria.
y(t):	Salida de la planta.
u(t-nk):	Entrada de la planta considerando n periodos previos.
r(t):	Ruido presente en la planta.
z:	Variable discreta z.
ARX:	Autoregressive with exogeneous input.
ARMAX:	Autoregressive moving average with exogeneous input.
OE:	Output error.
BJ:	Box-Jenkins.
°C:	Grado centígrado.
Q:	Cantidad de calor.
P:	Potencia.
V:	Voltios.
mV:	Milivoltios.

R:	Resistencia eléctrica.
T:	Temperatura.
ΔT:	Variación de temperatura.
K_B:	Constante de Boltzman.
DAQ:	Data acquisition.
TRIAC:	Triodo de corriente alterna.
Vdc:	Fuente de voltaje.
f:	Frecuencia.
Vak:	Voltaje ánodo – cátodo.
CC:	Corriente continua.
CA:	Corriente alterna.
K:	Ganancia.
ΔV_o:	Variación de voltajes de salida.
ΔV_i:	Variación de voltajes de entrada.
t_{ss}:	Tiempo de estabilización.
τ:	Constante de tiempo.
t_0:	Tiempo de retardo.
τ_{dom}:	Constante de tiempo dominante.
τ_{dom}^L:	Constante de tiempo dominante estimada baja.
τ_{dom}^H:	Constante de tiempo dominante estimada alta.
Y_0:	Condición inicial de salida.
α:	Constante alfa de señales PRBS y multiseno.
β:	Constante beta de señales PRBS y multiseno.
Ts:	Tiempo de muestreo.
T_i:	Tiempo integral.
T_d:	Tiempo derivativo.

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - RELOJ DE AGUA.....	2
FIGURA 1.2 -RELOJ DE ESTRASBURGO	3
FIGURA 1.3 -MAQUINA A VAPOR.....	5
FIGURA 1.4 -PRIMER TERMOMETRO	10
FIGURA 2.1 -GRAFICO TRANSFERENCIA DE CALOR.....	13
FIGURA 2.2 - CONTROLADOR ON/OFF	16
FIGURA 2.3 - CONTROL EN LAZO ABIERTO.....	17
FIGURA 2.4 - DIAGRAMA CONTROLADOR PID	18
FIGURA 2.5 - APLICACIÓN CALDERA.....	19
FIGURA 2.6 - ESQUEMA INTERIOR DE UN CALDERO.....	19
FIGURA 2.7 - DIAGRAMA BASICO DE UN SISTEMA DE CONTROL	23
FIGURA 2.8 - ESCALON UNITARIO	24
FIGURA 2.9 - FUNCION DE TRANSFERENCIA	26
FIGURA 2.10 - SISTEMA DE PRIMER ORDEN	28
FIGURA 2.11 - SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SOBREAMORTIGUADA	29
FIGURA 2.12 - SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SUBAMORTIGUADA	30
FIGURA 2.13 - SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN NO AMORTIGUADA.....	30
FIGURA 2.14 - SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN CRITICAMENTE AMORTIGUAD.....	31
FIGURA 2.15 - SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN.....	32
FIGURA 2.16 - DIAGRAMA DE BODE	33
FIGURA 2.17 - SISTEMA DISCRETO	34
FIGURA 2.18 - DIAGRAMA DE BLOQUES SISTEMA DISCRETO.....	34
FIGURA 2.19 - LEYES DE CONTROL DISCRETO.....	35
FIGURA 2.20 - RETENEDOR	36
FIGURA 2.21 - TRANSFORMADA Z INVERSA	39
FIGURA 2.22 - MODELOS PARAMETRICOS.....	43
FIGURA 3.1 - TANQUE ALMACENAMIENTO DE AGUA	47
FIGURA 3.2 - BOMBA DE AGUA.....	48
FIGURA 3.3 - INTERCAMBIADOR DE CALOR	49
FIGURA 3.4 - VENTILADOR	49

FIGURA 3.5 - SENSOR DE TEMPERATURA	51
FIGURA 3.6 - SENSOR SUMERGIDO EN EL AGUA	51
FIGURA 3.7 - RESISTENCIA CALEFACTORA	54
FIGURA 3.8 - CIRCUITO AMPLIFICADOR DEL SENSOR	55
FIGURA 3.9 - CIRCUITO DE DISPARO	56
FIGURA 3.10 – DIAGRAMA DE BLOQUES DE CIRCUITO DE DISPARO.....	56
FIGURA 3.11 - PRIMERA ETAPA CIRCUITO DE DISPARO	57
FIGURA 3.12 - SEGUNDA ETAPA CIRCUITO DE DISPARO	58
FIGURA 3.13 - TERCERA ETAPA CIRCUITO DE DISPARO	59
FIGURA 3.14 - CIRCUITO DE FUERZA.....	59
FIGURA 3.15 - BOSQUEJO DEL PROTOTIPO	60
FIGURA 3.16 - RESPUESTA ESCALON EN LAZO ABIERTO.....	62
FIGURA 3.17 - TIEMPO MUERTO.....	63
FIGURA 3.18 - VENTANA INPUT DESIGN GUI	65
FIGURA 3.19 - PARAMETROS PRIMERA MULTISENO	67
FIGURA 3.20 - GRAFICA PRIMERA MULTISENO	68
FIGURA 3.22 - RESPUESTA PRIMERA MULTISENO	68
FIGURA 3.22 - ANALISIS CRA PRIMERA MULTISENO.....	69
FIGURA 3.23 - PARAMETROS SEGUNDA MULTISENO.....	70
FIGURA 3.24 - GRAFICA SEGUNDA MULTISENO	71
FIGURA 3.25 - RESPUESTA SEGUNDA MULTISENO	71
FIGURA 3.26 - ANALISIS CRA SEGUNDA MULTISENO.....	72
FIGURA 3.27 - GRAFICA TERCERA MULTISENO	73
FIGURA 3.28 - RESPUESTA TERCERA MULTISENO.....	73
FIGURA 3.29 - ANALISIS CRA TERCERA MULTISENO	74
FIGURA 3.30 - ANALISIS CRA CUARTA PRBS.....	76
FIGURA 3.31 - VENTANA IDENT.....	76
FIGURA 3.32 - VENTANA IMPORT DATA	77
FIGURA 3.33 - SEÑAL SIN MEDIA Y SIN TENDENCIA.....	77
FIGURA 3.34 - VENTANA ESTIMACION MODELO CORRELACION.....	78
FIGURA 3.35 - GRAFICA RESPUESTA MODELO CORRELACION	78
FIGURA 3.36 - SEÑAL PRBS ESCOGIDA	79

FIGURA 3.37 - MEJOR SEÑAL ESCOGIDA.....	80
FIGURA 4.1 - SEÑAL SALIDA-ENTRADA.....	82
FIGURA 4.2 - SEÑAL CON MEDIA REMOVIDA.....	82
FIGURA 4.3 - SEÑAL CON TENDENCIA REMOVIDA.....	83
FIGURA 4.4 - SELECCIÓN DEL RANGO PARA ESTIMACION Y VALIDACION.....	83
FIGURA 4.5 - VENTANA INGRESO PARAMETROS ARX.....	85
FIGURA 4.6 - SELECCIÓN DE ORDEN.....	85
FIGURA 4.7 - MODELO ARX121	87
FIGURA 4.8 - ANALISIS RESIUAL ARX121	87
FIGURA 4.9 - RESPUESTA AL MODELO ARX121.....	88
FIGURA 4.10 - VENTANA INGRESO PARAMETROS ARMAX.....	89
FIGURA 4.11 - MODELO ARMAX3331	90
FIGURA 4.12 - ANALISIS RESIDUAL ARMAX3331.....	90
FIGURA 4.13 - RESPUESTA AL MODELO ARMAX3331.....	91
FIGURA 4.14 - VENTANA INGRESO PARAMETROS OE	92
FIGURA 4.15 - SALIDA MODELO OE442	93
FIGURA 4.16 - ANALISIS RESIDUAL OE442	93
FIGURA 4.17 - RESPUESTA AL MODELO OE442	94
FIGURA 4.18 - VENTANA INGRESO PARAMETROS BJ.....	95
FIGURA 4.19 - SALIDA MODELO BJ33221.....	96
FIGURA 4.20 - ANALISIS RESIDUAL BJ33221	96
FIGURA 4.21 - RESPUESTA AL MODELO BJ33221.....	97
FIGURA 4.22 - FUNCION DE TRASFERENCIA EN SIMULINK.....	99
FIGURA 4.23 - RESPUESTA AL ESCALON DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA	99
FIGURA 5.1 - CIRCUITO EN LAZO CERRADO	101
FIGURA 5.2 - METODO DE LA TANGENTE.....	102
FIGURA 5.3 - RESPUESTA AL ESCALON	103
FIGURA 5.4 - TIEMPO MUERTO	103
FIGURA 5.5 - VENTANA SISOTOOL	105
FIGURA 5.6 - LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES.....	106
FIGURA 5.7 - RESPUESTA DEL CONTROLADOR.....	106
FIGURA 5.8 - SIMULACION DEL CONTROLADOR	108

FIGURA 5.9 - RESPUESTA SIMULACION DEL CONTROLADOR	108
FIGURA 5.10 - PRUEBA FINAL SET POINT 35	109
FIGURA 5.11 - PROGRAMA VALIDACION DEL CONTROLADOR	110
FIGURA 5.12 - RESPUESTA VALIDACION DEL CONTROLADOR	110

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 TRANSFORMADAS BASICAS DE LAPLACE.....	25
TABLA 2.2 TEOREMAS DE TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	25
TABLA 2.3 PRINCIPALES TRANSFORMADAS Z.....	38
TABLA 2.4 PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA Z.....	38
TABLA 2.5 TIPOS DE MODELOS PARAMETRICOS	43
TABLA 3.1 COMPARACION SEÑALES MULTISENO	74
TABLA 3.2 COMPARACION SEÑALES PRBS.....	75
TABLA 3.3 ANALISIS DIFERENTES SEÑALES DE ENTRADA	79
TABLA 4.1 PORCENTAJE DE SIMILITUD MODELO ARX.....	86
TABLA 4.2 PORCENTAJE DE SIMILITUD MODELO ARMAX	89
TABLA 4.3 PORCENTAJE DE SIMILTUD MODELO OE	92
TABLA 4.4 PORCENTAJE DE SIMILITUD MODELO BJ	95
TABLA 4.5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	97
TABLA 5.1 PARAMETROS RECTA TANGENTE	103

INTRODUCCION

La teoría de control tiene un papel muy importante para la ingeniería, ya que a través de ella se puede analizar y comprender los comportamientos dinámicos de un sistema. En la industria se ha utilizado esta teoría para diseñar diferentes tipos de controladores como controladores de nivel, controladores de presión, controladores de temperatura, entre otros.

La identificación de sistemas hoy en día se ha convertido en un procedimiento importante, ya que con este se puede obtener de una manera específica la función de transferencia de un sistema. Para poder obtener un controlador es necesario que se entienda el comportamiento dinámico del proceso para luego realizar las pruebas necesarias. Se debe tener en cuenta cual señal de entrada seleccionar, ya que la identificación de este dependerá de ella.

Para la implementación del prototipo se necesita tener un conocimiento de termodinámica y de instrumentación industrial, ya que se aplicarán los conceptos de transferencia de calor y se hará uso de sensores para la medición.

Con ayuda de la teoría de control, se puede realizar el análisis y entender el comportamiento de sistemas dinámicos. Es necesario tener en cuenta de que en todo sistema existirán perturbaciones la cual el controlador tendrá que compensar, para obtener el resultado deseado.

Para la obtención de datos se hará uso de una tarjeta de adquisición de datos. Es necesario conocer las especificaciones técnicas de todos los instrumentos que se vayan a utilizar, para que de esta manera no vaya a existir algún inconveniente al adquirir los datos.

JUSTIFICACION

Muchas industrias requieren de un sistema de control de temperatura. Por esta razón es importante realizar un análisis respectivo para poder obtener el resultado deseado. Es necesario tener en cuenta todas las variables que intervienen en el proceso para que al momento de diseñar nuestro controlador, este lo haga perfectamente.

OBJETIVOS DE LA TESINA

Diseñar y Construir un prototipo para poder simular a un proceso real.

Conocer los principales parámetros del sistema en lazo abierto, como el tiempo de estabilización, τ_o dominante, tiempo muerto, etc.

Conocer los distintos tipos de controladores que existen, ya que pueden ser on/of, de tipo proporcional o controladores PID.

Demostrar la utilidad de la técnica de identificación de sistemas y poner en práctica los nuevos conocimientos adquiridos.

Realizar la identificación a través del método paramétrico y así obtener la función de transferencia que represente al sistema.

Diseñar el controlador que cumpla con los requerimientos que se desee.

CAPITULO 1.

1 INICIOS DE LA TEORIA DE CONTROL Y CONTROL DE TEMPERATURA

1.1 HISTORIA DE LA TEORIA DE CONTROL

1.1.1 INTRODUCCION

El Control Automático ha tomado un papel muy importante en la actualidad ya que ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años. El control a lo largo del tiempo ha tenido un proceso de evolución que se inició, aproximadamente, en el año 300 a.C.

Año en el que los griegos empezaron a tener la necesidad de medir empíricamente el tiempo, y que ha continuado con etapas tan importantes como lo fueron la Revolución Industrial y las Guerras Mundiales.

Cuando la máquina de vapor fue inventada y se dio inicio a la Revolución Industrial, se inició paralelamente la necesidad de realizar un sistema de control para poder manipular los diferentes parámetros de esta máquina.

Desde el año de 1957, cuando empieza la era espacial y de la informática, hasta la actualidad, con el desarrollo tecnológico en las diferentes áreas, el Control Automático es algo con lo que se convive día a día, y hace que la vida de cada persona sea más fácil.

1.1.2 APORTACION DE LOS GRIEGOS Y ARABES

Entre los años 300 a.C. y 1200 d.C., la necesidad de los griegos y los árabes por obtener una medida de forma exacta el tiempo los llevó a realizar grandes aportaciones a la teoría y a la práctica del control automático.

Uno de los primeros inventos de los griegos fue el reloj de agua, el cual fue el primer dispositivo realimentado, este fue implementado mediante un regulador de flotador, el cual tenía la función de mantener el nivel del agua de un tanque a una cierta profundidad constante.

Al tener una profundidad constante, se produce un flujo también de manera constante que atraviesa por un tubo u orificio el que llena al segundo tanque, entonces según sea el nivel del segundo tanque era el tiempo transcurrido. En el gráfico que se muestra a continuación se ve claramente lo explicado del reloj de agua.

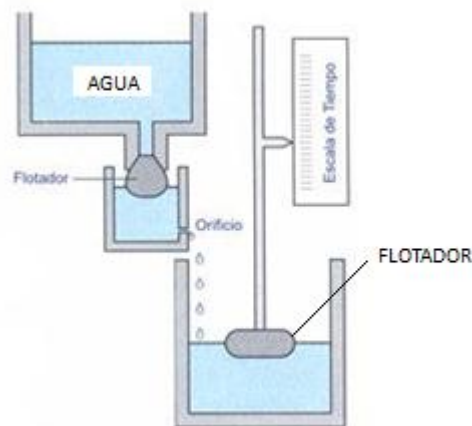


Figura 1.1 reloj de agua

Con este aporte los griegos usaron el regulador del flotador para otras aplicaciones y así empezaron con el control automático, se diseñaron sifones para mantener diferencias de nivel constantes

entre dos tanques y poco después este sistema se lo uso para abrir puertas de templos.

Entre los años 800 y 1200 varios ingenieros árabes usaron el regulador para relojes de agua y otras aplicaciones. En estos mismos años se empezó a usar el término “todo/nada”, con lo que con el pasar de los tiempos empezaría a existir los diferentes tipos de controladores.

En 1354 se construyó el famoso reloj de Estrasburgo (Suiza), este era un reloj en forma de ave, hecho de metal que no sólo podía abrir el pico, sacar la lengua y cantar, sino que además podía extender sus plumas y mover sus alas.



Figura 1.2 reloj de Estrasburgo (Suiza)

El término autómeta primero apareció en inglés en el año 1625 y se relacionó con la idea de la Inteligencia Artificial. Durante el Renacimiento en Europa, los trabajos de Héroe se redescubrieron y sus ideas y apuntes de sus experimentos inspiraron a los inventores y creadores del autómeta.

Como resultado de la evolución de la Ciencia y del pensamiento durante los siglos XVI y XVII, se formó en el siglo XVIII todo un

movimiento ideológico, fundamentalmente racionalista y crítico, llamado Ilustración. Este siglo se denominó el "Siglo de la Razón" o "Siglo de las Luces" ya que los filósofos pretendían iluminar con la razón todos los misterios del mundo y del hombre, a la vez que terminar con la oscuridad de la ignorancia y de la superstición que en esos tiempos era algo muy común entre las personas.

1.1.3 REVOLUCION INDUSTRIAL

La Revolución Industrial en Europa logró un gran avance ya que se produjo la introducción de motores o máquinas auto-conducidas. Esto vino marcado por la invención de molinos de grano avanzados, hornos, calderas, y el motor de vapor.

Estos dispositivos no se podían regular adecuadamente a mano, por lo que surgió una nueva exigencia para los sistemas de control automáticos. Una variedad de dispositivos de control fue inventada, incluyendo los reguladores de flotador, de temperaturas, de presión y dispositivos de control de velocidad.

J. Watt inventó su motor de vapor en 1769, marcando el principio de la Revolución Industrial. Es importante reconocer que otros, principalmente T. Newcomen en 1712, construyeron los primeros motores de vapor. Sin embargo, los intentos iniciales eran ineficaces, sobretodo porque los motores eran regulados a mano.

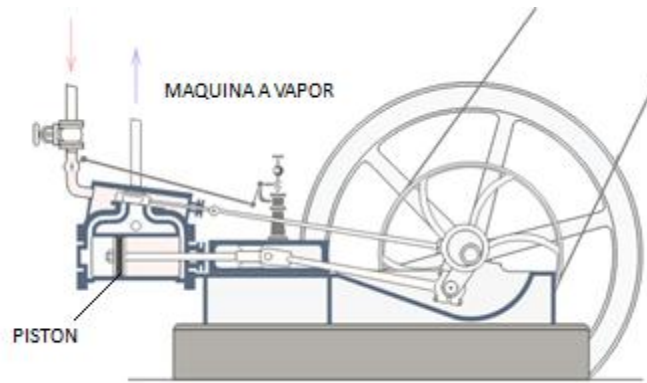


Figura 1.3 maquina a vapor

Es sumamente importante comprender que la Revolución Industrial no comenzó hasta la invención de los motores mejorados y los sistemas de control automáticos regulados.

1.1.3.1 REGULADOR DE TEMPERATURA

Alrededor de 1624, J. Kepler desarrolló un sistema de control automático de temperaturas para un horno, motivado por su creencia, basada en que los metales podrían transformarse en oro manteniéndolos a una temperatura exactamente constante durante largos períodos de tiempo.

También usó este regulador de temperatura en una incubadora para pollos.

Los Reguladores de temperaturas fueron estudiados por J.J. Becher en 1680, y usados otra vez, en una incubadora por el Príncipe de Conti y R.A.F. de Réaumur en 1754. "El registro del centinela" fue desarrollado en América por W. Henry alrededor de 1771, quien sugirió su empleo en hornos químicos, en la fabricación de acero y porcelana, y en el control de temperaturas de un hospital.

En 1777, se desarrolló un regulador conveniente de temperatura para el uso industrial por Bonnemain, quien lo utilizó para una incubadora. Su dispositivo fue instalado más

adelante en el horno de una planta de calefacción de agua caliente.

1.1.3.2 REGULADOR DE FLOTADOR

Hubo dos aspectos principales para los cuales fue necesario perfeccionar y profundizar el sistema del regulador de flotador. La caldera de un motor de vapor y los sistemas de distribución doméstica de agua.

Este regulador se usó en las primeras patentes para el rubor toilet alrededor de 1775. El empleo más temprano de un regulador de válvula de flotador conocido fue en una caldera de vapor, Wood usó un regulador de flotador para un motor de vapor en su cervecería en 1784.

En 1791, este tipo de regulador se lo utilizaba frecuentemente en motores de vapor.

1.1.3.3 REGULADOR DE PRESION

Además de controlar el líquido en la caldera, era necesario aprender a regular la presión del vapor para mantenerla constante. En 1681, D. Papin inventó una válvula de seguridad para una cocina de presión, y en 1707 la usó como un dispositivo de regulación de su motor de vapor. Esto se convirtió, entonces, una característica habitual de los motores de vapor.

Un regulador de presión más refinado fue realizado en 1799 por R. Delap y M. Murray.

De esta forma se combinó el avance en los reguladores de flotadores y de presión para el control de motores de vapor en 1803.

1.1.4 LA INFLUENCIA DE LA MATEMATICA EN LA TEORIA DE CONTROL

El diseño de sistemas de control realimentado después de la Revolución Industrial estaba desarrollándose por medio de prueba y error junto con mucha intuición de la ingeniería. Era más un arte que una ciencia. En las matemáticas de mediados del siglo XIX, primero fue usado el análisis de la estabilidad de sistemas de control realimentado. Como la matemática es la lengua formal de la teoría del control automático, se podría llamar al período anterior la prehistoria de la teoría del control.

1.1.5 PROCESOS INDUSTRIALES

A principios del siglo XX, hubo una necesidad industrial de instrumentos capaces de medir, grabar y controlar presiones, temperaturas y otras variables.

Desde mediados de 1930 Estados Unidos ha mantenido un liderazgo sobre otras potencias como Europa en materia de instrumentos controladores y sensores. Los controladores automáticos eran de tres tipos, mayormente:

- Relé eléctrico con válvula operada por un solenoide que da una acción de on/off.
- Relé eléctrico con válvula operada por un motor una acción proporcional de banda ancha.
- Relé neumático.

En 1922 lo valioso de un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) había sido mostrado por Minorsky. La función proporcional se conocía desde el comienzo del relé. Sin

embargo, la parte integral no se conoció hasta 1920 y la derivativa en 1930.

1.1.6 EL CONTROL AUTOMATICO A PARTIR DE 1950

Conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más y más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requiere una gran cantidad de ecuaciones.

La teoría de control clásica que trata de los sistemas con una entrada y una salida, pierde su solidez ante sistemas con entradas y salidas múltiples.

Desde 1960, debido a que la disponibilidad de las computadoras digitales hizo posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos, la teoría de control moderna, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, se ha desarrollado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto a la precisión, el peso y el coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980, se investigaron a fondo el control óptimo, tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, y el control adaptable, mediante el aprendizaje de sistemas complejos.

En la actualidad la teoría de control ha tomado un papel muy importante ya que por medio de esta herramienta podemos realizar la identificación de un sistema.

1.2 HISTORIA DEL CONTROL DE TEMPERATURA

1.2.1 INTRODUCCION

La temperatura de los cuerpos es un concepto que el hombre en la era primitiva captó a través de sus sentidos. Un gran ejemplo de esto es que si tocamos dos piedras iguales, una a la sombra y otra calentada por el sol (o por el fuego de una hoguera) las encontramos diferentes. Tienen algo distinto que detecta nuestro tacto, es la temperatura. En base a este hecho el hombre empezó a interesarse por el estudio del fenómeno físico como es la temperatura.

Las primeras valoraciones de la temperatura dadas a través del tacto son simples y poco matizadas. De una sustancia sólo podemos decir que está caliente, tibia (caliente como el cuerpo humano), templada (a la temperatura del ambiente), fría y muy fría.

Con el diseño de aparatos se pudieron establecer escalas para una valoración más precisa de la temperatura.

1.2.2 LOS PRIMEROS TERMOMETROS

El termómetro viene del griego θερμός que significa termo el cual significa "caliente" y metro que significa "medir", es decir que el termómetro no es más que es un instrumento de medición de temperatura. Desde su invención ha evolucionado mucho, principalmente a partir del desarrollo de los termómetros electrónicos digitales.

Inicialmente se elaboraron termómetros con materiales de coeficiente elevados de dilatación aprovechando el fenómeno de la dilatación. De este modo al aumentar la temperatura, su estiramiento era fácilmente visible. El metal base que se utilizaba

en este tipo de termómetros ha sido el mercurio, encerrado en un tubo de vidrio que incorporaba una escala graduada.

El creador del primer termómetro fue Galileo Galilei, este consistía en un tubo de vidrio terminado en una esfera cerrada, el extremo abierto se sumergía boca abajo dentro de una mezcla de alcohol y agua, mientras la esfera quedaba en la parte superior. Al calentar el líquido, éste subía por el tubo.

Para evaluar la temperatura ambiente, calentaba con la mano el bulbo e introducía parte del tubo boca abajo en un recipiente con agua. El aire circundante, más frío que la mano, enfriaba el aire encerrado en el bulbo y el agua ascendía por el tubo. La distancia entre el nivel del líquido en el tubo y en el recipiente se relacionaba con la diferencia entre la temperatura del cuerpo humano y la del aire. Si se enfriaba la habitación el aire se contraía y el nivel del agua ascendía en el tubo. Si se calentaba el aire en el tubo, se dilataba y empujaba el agua hacia abajo.

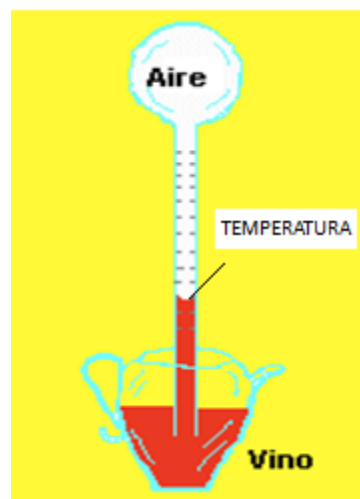


Figura 1.4 primer termómetro

Las medidas de temperaturas obtenidas por el método de Galileo tenía errores, debido a que en dicho termómetro había la intervención de otro fenómeno físico que Galileo no considero

como es la presión, ya que existe variaciones de presión atmosférica que soporta el agua ha pueden hacer variar el nivel del líquido sin que varíe la temperatura. En 1644 Torricelli estudió la presión y construyó el primer barómetro para medirla.

En 1641, el Duque de Toscana, construye el termómetro de bulbo de alcohol con capilar sellado, como los que usamos actualmente. Para la construcción de estos aparatos fue fundamental el avance de la tecnología en el trabajo del vidrio. A mediados del XVII, Robert Boyle descubrió las dos primeras leyes que manejan el concepto de temperatura:

- En los gases encerrados a temperatura ambiente constante, el producto de la presión a que se someten por el volumen que adquieren permanece constante
- la temperatura de ebullición disminuye con la presión.

Posteriormente se descubrió, pese a la engañosa evidencia de nuestros sentidos, que todos los cuerpos expuestos a las mismas condiciones de calor o de frío alcanzan la misma temperatura (ley del equilibrio térmico). Al descubrir esta ley se introduce por primera vez una diferencia clara entre calor y temperatura.

En 1717 Fahrenheit, un germano-holandés fabricante de instrumentos técnicos, construyó e introdujo el termómetro de mercurio con bulbo y tomó como puntos fijos:

- El de congelación de una disolución saturada de sal común en agua, que es la temperatura más baja que se podía obtener en un laboratorio, mezclando hielo o nieve y sal.
- La temperatura del cuerpo humano, una referencia demasiado ligada a la condición del hombre.

Además dividió la distancia que recorría del mercurio en el capilar entre estos dos estados en 96 partes iguales.

Con este termómetro de precisión Fahrenheit consiguió medir la variación de la temperatura de ebullición del agua con la presión del aire ambiente y comprobó que todos los líquidos tienen un punto de ebullición característico.

En la actualidad para el uso industrial se encuentran diferentes tipos de sensores de temperatura como son las termocupla, termistores, etc.

1.2.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA

Los primeros controladores de temperatura se dieron con la llegada de la revolución industrial, ya que en dichos años las personas empezaban a querer ciertos fluidos a una cierta temperatura deseada. Y así con la llegada de la revolución industrial se introducen los términos de controlador o regulador de temperatura.

Con el pasar de los años y con la ayuda de la teoría de control se han diseñado diferentes tipos de controladores que se describirán más adelante.

En la actualidad existen muchos procesos industriales que requieren un cierto controlador de temperatura, como ejemplo si estamos en una fábrica que fabrica galletas bañadas en chocolate, se requiere tener una cierta cantidad de agua a una cierta temperatura para que de esta manera el chocolate se mantenga en estado líquido.

Por esta razón los controladores de temperaturas se han ido mejorando y han llegado a tomar un papel muy importante a nivel industrial.

CAPITULO 2

2. FUNDAMIENTOS TEORICOS

2.1 CONCEPTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor no es más que el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro con menor temperatura o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. En base a este principio se crearon las leyes de la termodinámica.



Figura 2.1 Gráfico ilustrativo de transferencia de calor

2.2 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para la transferencia de calor pueden existir 3 tipos.

2.2.1 CONVECCIÓN

Cuando existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento produce una transferencia de calor de una parte del fluido a otra.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. A este tipo de movimiento se lo denomina convección natural.

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

2.2.2 CONDUCCIÓN

Para los sólidos, la única forma de transferencia de calor es por medio de la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que su temperatura vaya aumentando, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción.

La conducción se produce por el movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

La ley de Fourier afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo.

La conductividad térmica es el parámetro principal que depende del tipo de material que regula la conducción de calor en los materiales. Se dice que generalmente los conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.

2.2.3 RADIACIÓN

La transferencia de calor por radiación se la realiza en forma de energía electromagnética, por el espacio. La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto.

La frecuencia de onda emitida por radiación térmica es una densidad de probabilidad que depende solo de la temperatura.

2.3 CONTROLADOR

2.3.1 CONTROLADOR ON/OFF

El controlador on/off también es conocido como un controlador todo/nada, este controlador es utilizado en algunas industrias. Este controlador es el más sencillo de implementar ya que es muy simple controlar un proceso.

Este controlador tiene una señal de referencia o también conocido como set point, el cual es la señal deseada del proceso. Este controlador tiene usualmente una banda diferencial o zona neutra dentro de la cual la salida se mantiene en su valor actual.

La banda diferencial permite minimizar la frecuencia de oscilación de la salida pero aumenta la amplitud de la misma. Por esta razón el controlador todo/nada no es tan preciso.

Para el proyecto seleccionado este tipo de controlador no se realizó debido que para la identificación de sistemas se debe tener un proceso continuo. Y este control va a tratar de alcanzar la temperatura deseada pero finalmente va a terminar oscilando entre dos valores cercanos de la temperatura deseada.

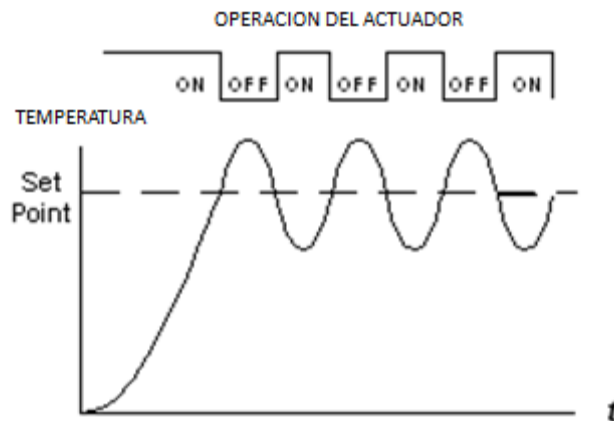


Figura 2.2 Gráfica de un controlador on/off

2.3.2 CONTROL EN LAZO ABIERTO

Para un sistema de control en lazo abierto es aquel sistema en que solo actúa el proceso bajo la señal de entrada y genera como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada. En pocas palabras esto quiere decir que no existe una realimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Son sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.

- Ser afectado por las perturbaciones. Éstas pueden ser tangibles o intangibles.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema.

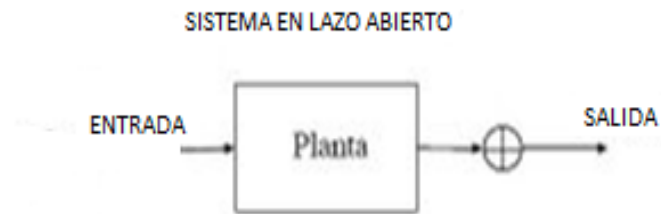


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un control en lazo abierto

2.3.3 CONTROLADOR PID

Al momento de referirnos a un controlador PID, no es más que un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso.

El control PID se basa en tres parámetros distintos que son:

- La constante proporcional.
- La constante integral.
- La constante derivativa.

La constante proporcional nos determina la reacción del error actual, en cambio la constante integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. Y por último la constante derivativa nos determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

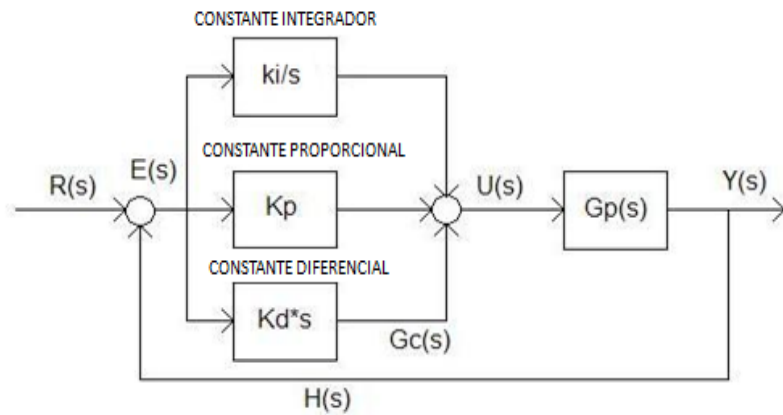


Figura 2.4 Diagrama de bloque de un controlador PID.

2.4 CALDERAS

Una caldera no es más que una máquina o un dispositivo que se utiliza en la industria que está diseñado para generar vapor saturado. Este vapor se lo genera a través de una transferencia de calor constante, para el cual el fluido cambie de estado líquido a estado gaseoso.

Entonces las calderas no son más que un caso particular en la que un líquido se eleva a altas temperaturas a través de un intercambiador de calor, en las cuales se produce un cambio de fase.

Debido a que los calderos tienen muchas aplicaciones se nombraron las más utilizadas:

- Esterilización: es muy común encontrar calderas en los hospitales, en las que se generan vapor para esterilizar los instrumentos médicos.
- Calentar otros fluidos: en la industria petrolera generalmente se calienta los petróleos pesados para mejorar su fluidez.
- Generar electricidad: las calderas son parte importante para las centrales termoeléctricas.

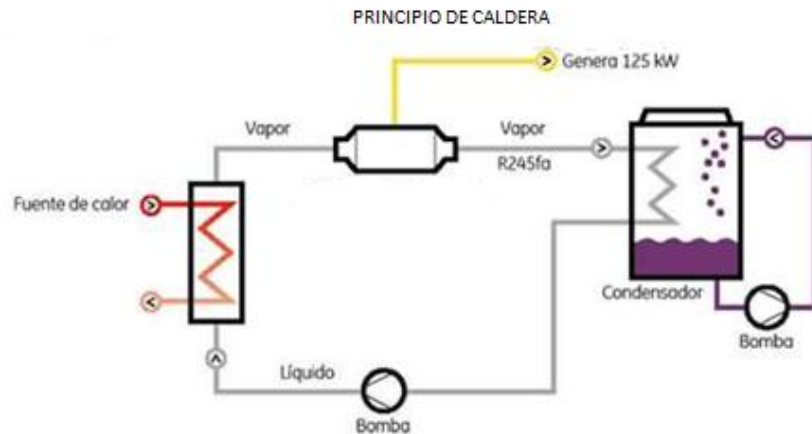


Figura 2.5 Bosquejo general de aplicación de un caldero

La historia cuenta que cuando James Watt se dio cuenta de que podría utilizar el vapor como una fuerza económica que reemplazaría a la fuerza animal y manual, se empezó a la elaboración de calderas. Las primeras calderas tenían el problema que los gases calientes estaban en contacto solo con su base, y como consecuencia no se aprovechaba bien el calor del combustible, después de haber realizado algunos estudios, se introdujeron tubos para aumentar la superficie de calefacción.

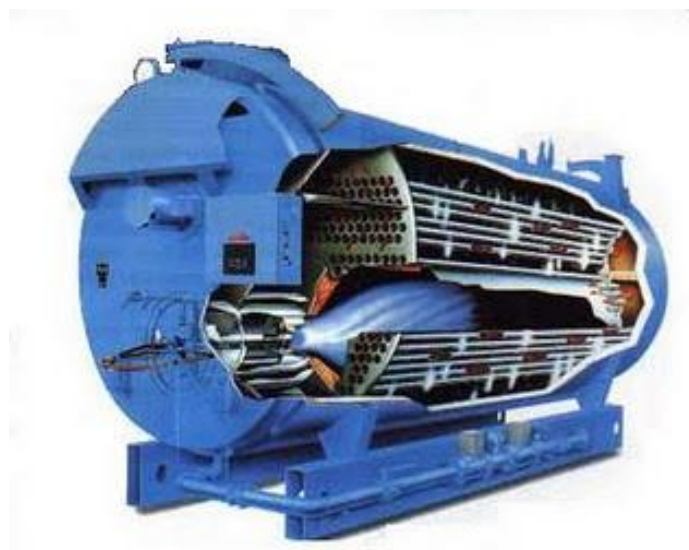


Figura 2.6 Esquema interior de un caldero

Existen dos tipos de calderas que son:

- Acuotubulares: son calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por tubos durante su calentamiento.
- Piro tubulares: son las calderas en la que el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los que circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión.

También existen caldera de tipo horizontales o verticales, las mismas que pueden ser de 2, 3 o 4 pasos que son generalmente las utilizadas en las industrias.

También existen tipos de calderos conocidos como espalda húmeda y espalda seca. Los calderos de espalda seca son los que llevan refractarios en la tapa para la transferencia de calor y los calderos de tipo espalda húmeda son los que tienen agua que la usan como un refrigerante y esta nos permite tener una mayor cantidad de vapor.

En este tipo de calderas industriales se utilizan bastante los controles de temperatura y presión, ya que los calderos industriales tienen muchas seguridades.

2.5 DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO

En la actualidad para el modelamiento y diseño de los sistemas de control se utiliza frecuentemente el software MATLAB® como simulador por su gran capacidad de cálculos y versatilidad de librerías. Actualmente este software se encuentra utilizado como material didáctico para la enseñanza de los sistemas de control en las Universidades y como herramienta científica de diseño para prototipos.

Como se mencionó anteriormente el principal objetivo es controlar la temperatura, por lo que se utilizarán los conceptos básicos descritos en este capítulo.

Para realizar el sistema de control para dicho proceso se hará uso de SIMULINK que es una aplicación de Matlab, que por medio de este software se realizará un controlador, el cual va a enviar un voltaje de referencia que irá al circuito de control de potencia.

Una vez de que la planta fue implementada se procedió a la obtención de datos, para de esta manera empezar con la identificación de sistemas haciendo uso de una de las herramientas de MATLAB como es SIMULINK.

2.6 EL SOFTWARE

MATLAB es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las distintas los distintos sistemas operativos.

MATLAB nos permite realizar:

- la manipulación de matrices.
- la representación de datos y funciones.
- la implementación de algoritmos.
- la creación de interfaces de usuario (GUIDE).
- la comunicación con programas en otros lenguajes.
- Adquisición de datos de un sistema.

Para el modelamiento matemático y para la identificación de sistemas se utilizara la herramienta de SIMULINK, que es un entorno de programación basado en MATLAB.

SIMULINK es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con un cierto grado de abstracción de los fenómenos o variables físicas involucradas en los sistemas.

Se emplea arduamente en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. Este software también es muy utilizado en Ingeniería de Control, ya que nos permite simular procesos específicos.

2.7 ETAPAS DE LA IDENTIFICACION

1) Obtención de los datos de entrada y de salida.

Para esta etapa es necesario realizar una excitación del proceso a identificar mediante una señal, para poder observar y analizar el comportamiento del sistema en un intervalo de tiempo. Estos datos de entrada y salida los vamos a obtener mediante una tarjeta de adquisición de datos.

2) Tratamiento previo de los datos obtenidos.

Como sabemos todas las señales adquiridas generalmente siempre contiene señales de ruidos o señales no deseadas, por esta razón se recomienda filtrar o corregir estas señales antes de realizar la identificación para poder obtener un mejor resultado.

3) Elección de la estructura del modelo.

Existen dos tipos de modelos que son los modelos paramétricos y los no paramétricos. Si el modelo es de tipo paramétrico se debe determinar la estructura deseada para dicho modelo. Se debe tener en cuenta las leyes físicas que rigen en el proceso para poder hacer una mejor elección de un modelo.

4) Obtención de los parámetros del modelo.

En esta etapa se debe estimar los parámetros que realiza un mejor ajuste a la respuesta del modelo elegido a los datos de entrada y salida adquiridos anteriormente.

5) Validación del modelo.

La última etapa consiste en determinar si el modelo escogido es el que mejor satisface a la aplicación que se requiere.

Se pueden considerar ciertos criterios en caso de que se determine que el modelo no es válido, puede ser que los datos de entrada y salida no proporcionan suficiente información sobre la dinámica del sistema. Otra razón puede ser que la estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.

2.8 FUNDAMENTOS BASICOS DE CONTROL EN UN SISTEMA.

Un sistema es la combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo.



Figura 2.7 Diagrama de bloque básico de un control en un sistema

Variable de entrada: es una variable del sistema que cuando existe una modificación en ella puede alterar el estado del sistema.

Variable de salida: es una variable del sistema cuya magnitud o condición se mide.

Perturbación: es una señal que afecta a la variable de salida de un sistema.

2.9 SEÑALES Y SISTEMAS

2.9.1 Señal escalón unitario

A esta función tiene la siguiente regla de correspondencia:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t < 0 \\ 1, & \text{si } t \geq 0 \end{cases}$$

Esta señal generalmente se la aplica a un sistema para poder conocer la respuesta a cambios bruscos, nos permite determinar el tiempo de establecimiento de la señal, el retardo de respuesta del sistema y la constante de tiempo.

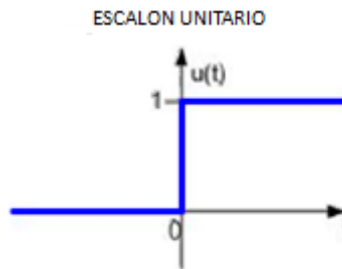


Figura 2.8 Gráfica de una señal escalón unitario

2.9.2 Transformada de Laplace

La transformada de Laplace no es más que un método o artificio matemático que nos permite resolver ecuaciones diferenciales de una manera más sencilla.

La transformada de Laplace está definida como:

$$F(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt = L[f(t)] \quad (1)$$

$f(t)$: es una función que depende del tiempo.

s : es una variable compleja.

L : es un símbolo el cual nos indica a qué función se le va aplicar la transformada de Laplace.

A continuación las siguientes tablas se muestran algunas transformadas de Laplace.

Item no.	$f(t)$	$F(s)$
1.	$\delta(t)$	1
2.	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
3.	$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$
4.	$t^n u(t)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5.	$e^{-at}u(t)$	$\frac{1}{s+a}$
6.	$\sin \omega t u(t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7.	$\cos \omega t u(t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$

Tabla 2.1 transformadas básicas de Laplace

Aquí se muestran algunos de los teoremas de la transformada de Laplace.

Item no.	Teorema	Nombre
1.	$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt$	Definición
2.	$\mathcal{L}[kf(t)] = kF(s)$	Linealidad
3.	$\mathcal{L}[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s)$	Linealidad
4.	$\mathcal{L}[e^{-at}f(t)] = F(s+a)$	Desplazamiento en la frecuencia
5.	$\mathcal{L}[f(t-T)] = e^{-sT}F(s)$	Desplazamiento en el tiempo
6.	$\mathcal{L}[f(at)] = \frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)$	Escalamiento
7.	$\mathcal{L}\left[\frac{df}{dt}\right] = sF(s) - f(0^-)$	Diferenciación
8.	$\mathcal{L}\left[\frac{d^2f}{dt^2}\right] = s^2F(s) - sf(0^-) - \dot{f}(0^-)$	Diferenciación
9.	$\mathcal{L}\left[\frac{d^nf}{dt^n}\right] = s^nF(s) - \sum_{k=1}^n s^{n-k}f^{(k-1)}(0^-)$	Diferenciación
10.	$\mathcal{L}\left[\int_{0^-}^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{F(s)}{s}$	Integración
11.	$f(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$	Teorema del Valor Final
12.	$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$	Teorema del Valor Inicial

Tabla 2.2 Teoremas de transformada de Laplace

También se puede obtener la transformada inversa de Laplace que es definida de la siguiente manera:

$$L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds = f(t) \cdot \mu(t) \quad (2)$$

En conclusión con la transformada de Laplace y la transformada inversa de Laplace podemos llevar una función que está en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa.

2.9.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia no es más que un modelo matemático que representa la relación que hay entre la respuesta de un sistema al momento de aplicar una señal de entrada.

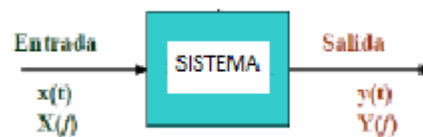


Figura 2.9 Diagrama de una función de transferencia

La función de transferencia también se la expresa de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

En donde:

Y(s): es la transformada de Laplace de la función que representa el sistema.

U(s): es la transformada de Laplace de la señal de entrada.

2.10 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

Un sistema de primer orden está definido por la siguiente forma:

$$\frac{dy}{dt} + ay = Ku \quad (3)$$

Un sistema de primer orden sin ceros y aplicado la transformada de la Laplace se define como:

$$\frac{Y_s}{U_s} = \frac{K}{s+a} \quad (4)$$

Si la entrada al sistema viene dada por una función escalón unitario la función de transferencia se define como:

$$Y_s = \frac{K}{s(s+a)} \quad (5)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace obtenemos lo siguiente.

$$y(t) = y_f(t) + y_n(t) = 1 - e^{-at} \quad (6)$$

Evaluando en el tiempo nos queda:

$$e^{-at} \Big|_{t=\frac{1}{a}} = 0.37$$

$$y(t) = 1 - e^{-at} \Big|_{t=\frac{1}{a}} = 0.63$$

Constante de tiempo = 1/a

Se define como el tiempo para que el valor de e^{-at} decaiga al 37% de su valor inicial, o también se define como el tiempo que toma la respuesta al escalón para alcanzar el 63% de su valor final.

Tiempo de levantamiento, Tr:

Se define como el tiempo necesario para que la respuesta alcance el 2% alrededor de su valor final.

$$T_r = \frac{2.31}{a} - \frac{0.11}{a} = \frac{2.2}{a} \quad (7)$$

Tiempo de estabilización Ts:

Es el tiempo necesario para que la respuesta alcance el 2% de su valor final:

$$T_s = \frac{4}{a} \quad (8)$$

En el siguiente grafico se muestra un sistema de primer orden con las variables explicadas anteriormente.

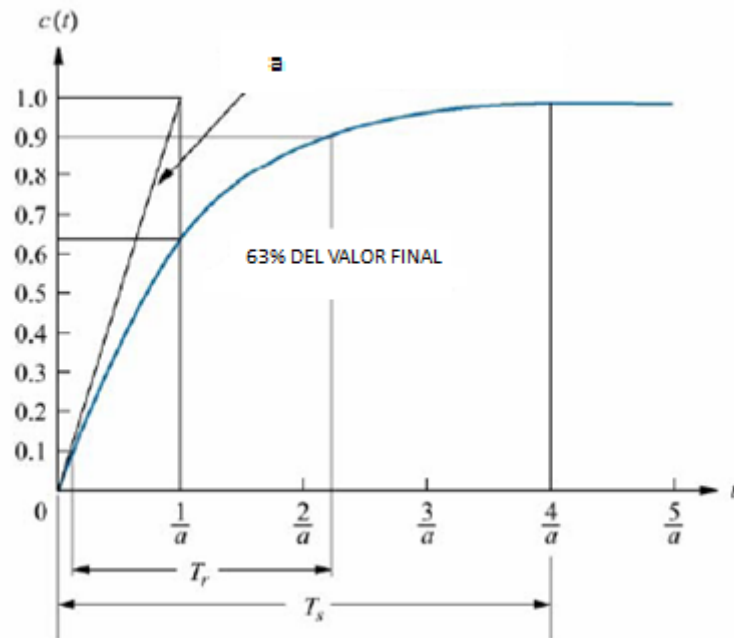


Figura 2.10 Grafica de un sistema de primer orden

2.11 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Los sistemas de segundo orden poseen una gran variedad de respuestas, que dependen del factor de amortiguamiento ζ y la frecuencia natural no amortiguada ω_n .

2.11.1 Factor de amortiguamiento relativo

Es la relación entre el decaimiento exponencial y la frecuencia de oscilación.

$$\zeta = \frac{\text{Frecuencia de decaimiento exponencial}}{\text{Frecuencia natural (rad/segundo)}}$$

Los sistemas de segundo orden se los puede representar de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

La solución de la función de transferencia es:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

En los sistemas de segundo orden existen diferentes tipos de respuesta, las cuales se las van a describir continuación.

2.11.2 Respuesta sobreamortiguada

Esta tiene 2 polos reales y distintos σ_1 y σ_2 , o cuando $\xi > 1$.

La señal de salida tiene la siguiente forma:

$$c(t) = k_1 e^{-\sigma_1 t} + k_2 e^{-\sigma_2 t}$$

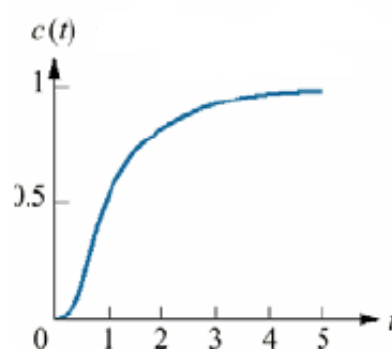


Figura 2.11 Grafica de un sistema de segundo orden sobreamortiguada

2.11.3 Respuesta Subamortiguada

Esta posee 2 polos complejos conjugados $-\sigma_d \pm j\omega_d$. O cuando $0 < \xi < 1$.

La señal de salida tiene la siguiente forma:

$$c(t) = Ae^{-\sigma_d t} \text{Cos}(\omega_d t - \varphi)$$

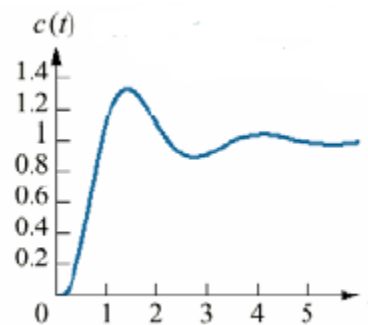


Figura 2.12 Grafica de un sistema de segundo orden
Subamortiguada

2.11.4 Respuesta no amortiguada

Tiene 2 polos imaginarios conjugados $\pm j\omega_1$. O cuando $\varepsilon = 0$.

La señal de salida tiene la siguiente forma:

$$c(t) = A \text{Cos}(\omega_d t - \varphi)$$

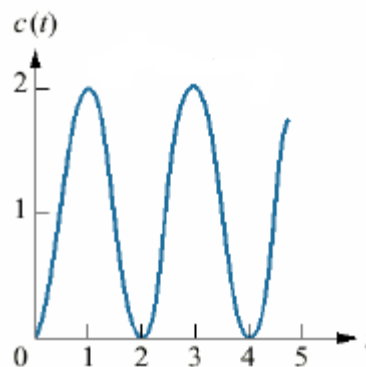


Figura 2.13 Grafica de un sistema de segundo orden no
amortiguada

2.11.5 Respuesta críticamente amortiguada

Esta respuesta tiene 2 polos reales en $-\sigma_1$. O cuando $\varepsilon = 1$.

La señal de salida tiene la siguiente forma:

$$c(t) = k_1 e^{-\sigma_1 t} + k_2 t e^{-\sigma_1 t}$$

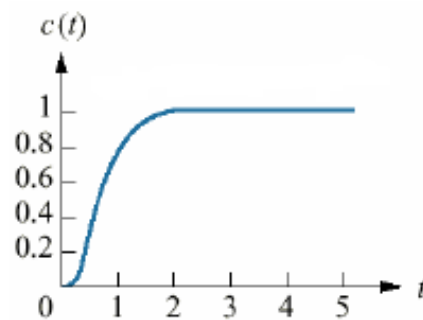


Figura 2.14 Grafica de un sistema de segundo orden críticamente amortiguada

2.12 SISTEMA SUBAMORTIGUADO DE SEGUNDO ORDEN

A continuación se realizara una breve descripción de las características que describen a un sistema de segundo orden Subamortiguada.

2.12.1 Tiempo pico (T_p)

El tiempo pico no es más que el tiempo necesario para alcanzar el primer pico o máximo.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (10)$$

2.12.2 Sobrenivel porcentual (%OS)

Es la cantidad de la onda que sobrepasa el valor en estado estable o final, en el tiempo pico, esta es expresada como porcentaje del valor en estado estable.

$$\%OS = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \times 100 \quad (11)$$

2.12.3 Tiempo de estabilización (Ts)

Tiempo necesario para que las oscilaciones amortiguadas de la respuesta transitoria alcancen y permanezcan a no más de $\pm 2\%$ del valor en estado estable.

$$T_s = \frac{4}{\omega n \xi} \quad (12)$$

2.12.4 Tiempo de levantamiento (Tr)

Tiempo necesario para que la onda pase del 10% al 90% del valor final.

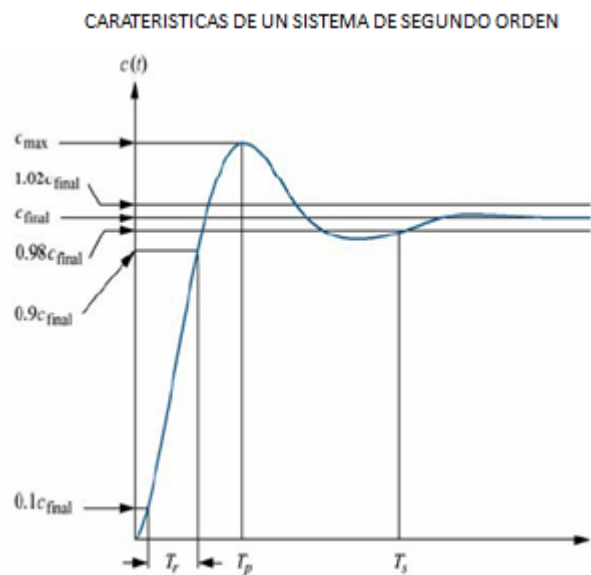


Figura 2.15 Gráfica de un sistema de segundo orden

2.13 DIAGRAMA DE BODE

El diagrama de bode no es más que una representación gráfica que nos permite caracterizar la respuesta de frecuencia de un sistema. Generalmente el diagrama de bode consta de dos gráficos. El primer gráfico corresponde a la magnitud de una señal y el segundo gráfico corresponde a la fase de la misma señal.

Ecuacion que describe el grafico de amplitud:

$$\begin{aligned}
 G(j\omega)|_{db} &= 20\log_{10}|G(j\omega)| \quad (13) \\
 &= 20\log_{10}\sqrt{Re^2G(j\omega) + Im^2G(j\omega)}
 \end{aligned}$$

Para el gráfico de fase:

$$\angle G(j\omega) = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]}\right)$$

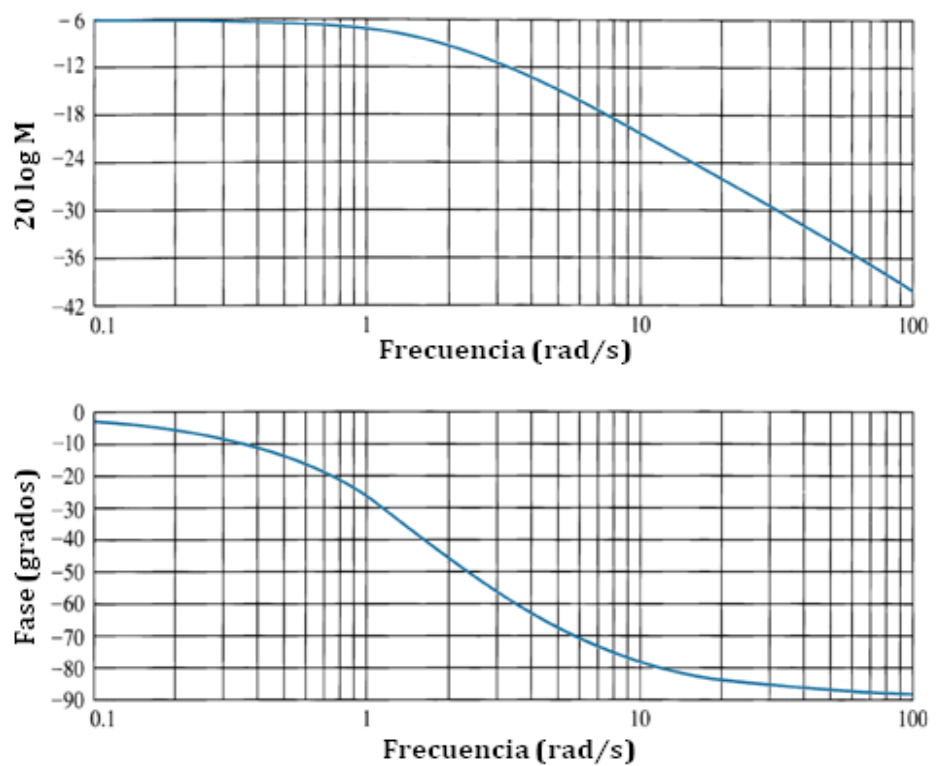


Figura 2.16 Grafica del diagrama de bode

2.14 SISTEMAS DE CONTROL DISCRETO

Antes de definir un sistema de control discreto debemos conocer lo que significa muestreo. El muestreo no es más que una parte del proceso de digitalización de las señales, que consiste en tomar señales analógicas a una frecuencia constante o en cada cierto tiempo.

Un sistema de control en tiempo discreto es aquel que sus magnitudes varían solo en instantes específicos. Estas magnitudes o señales en tiempo discreto $r(k)$, toman valores $r(t_1), r(t_2), \dots, r(t_n)$.

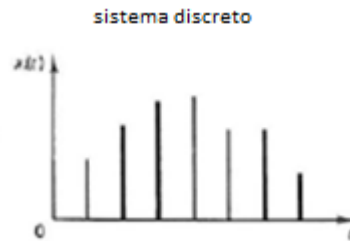


Figura 2.17 Sistema discreto

En conclusión un sistema de control discreto es aquel que incluye un computador en el bucle de control para realizar un procesamiento de la señal.

A continuación se muestra un diagrama de bloque de un sistema de control discreto

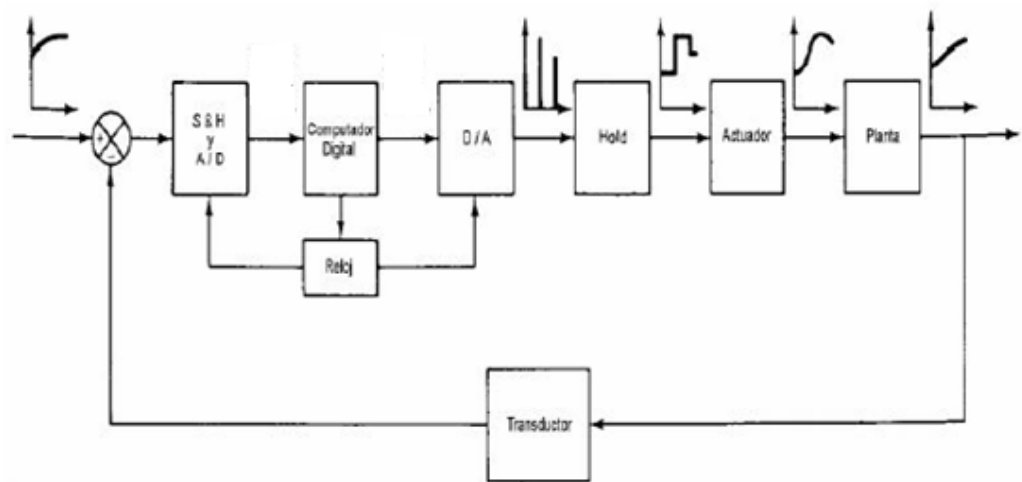


Figura 2.18 Diagrama de bloques básico de un sistema discreto

En los sistemas de control discreto se deben tomar en cuenta los siguientes fenómenos:

- Muestreo
- Leyes de control discreto
- Retenedor (reconstrucción de señales)
- Aliasing

2.14.1 Leyes de control discreto

- El controlador retorna una salida de un juego de impulsos.
- Una forma muy común de representar controladores digitales es en forma de velocidad.

En el gráfico que se muestra a continuación se puede observar claramente los pulsos de la señal.

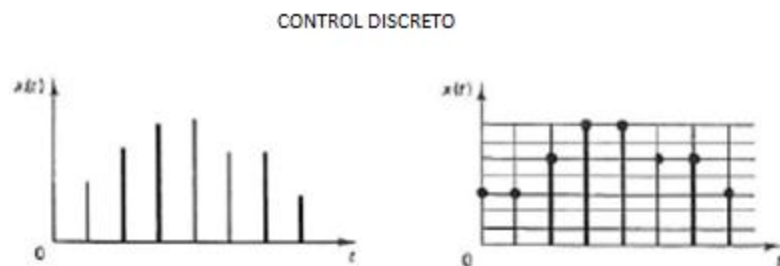


Figura 2.19 Grafica de las leyes de control discreto

2.14.2 Retenedor o reconstrucción de señales

El retenedor de primer orden (ZOH) mantiene la salida constante durante un cierto periodo hasta que la siguiente muestra sea recibida. Este fenómeno se usa muy poco en los sistemas de control.

Tiene una función de transferencia dada por:

$$\frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

En el gráfico siguiente se puede observar la señal que sale del retenedor.

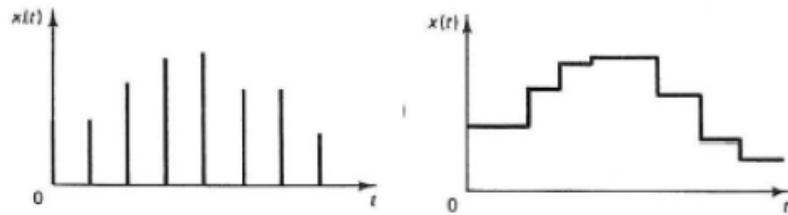


Figura 2.20 Grafica de señal saliente de un retenedor

2.14.3 Aliasing

El Aliasing ocurre cuando el tiempo de muestro no es empleado correctamente. Es decir que la señal reconstruida aparece con una forma sinusoidal con un periodo mucho mayor que la de la original.

Por esta razón el teorema de Shannon nos dice que una señal debe ser muestreada más del doble de su periodo para ser recuperada.

2.15 TRANSFORMADA Z

La transformada z permite convertir una señal real o compleja que se encuentra en el dominio del tiempo discreto en una representación en el dominio de la frecuencia compleja.

La transformada z no permite definir funciones de transferencia para sistemas discretos en el tiempo. La finalidad de la transformada z es muy parecida a la transformada de Laplace.

En un sistema de control en tiempo discreto, una ecuación en diferencias lineal caracteriza la dinámica del sistema. Para determinar la respuesta del sistema a una entrada dada, se debe resolver dicha ecuación en diferencias.

Las señales en tiempo discreto surgen si el sistema involucra la operación de muestreo de señales en tiempo continuo. La señal muestreada es $x(0), x(T), x(2T), \dots$, donde T es el periodo de muestreo. El argumento k nos indica el orden en el que se presentan los números en las secuencias. A continuación se encuentra la definición general de la transformada z .

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad (14)$$

Para una secuencia de números $x(k)$, la transformada z se define como:

$$X(z) = Z[x(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k}$$

El símbolo Z denota “la transformada z de”. En la transformada z unilateral se supone que $x(t) = 0$ para $t < 0$ o $x(k) = 0$. Z es una variable compleja.

En la siguiente tabla se muestran algunas de las funciones de la transformada z .

$x(t)$	$X(s)$	$X(z)$
$\delta(t) = \begin{cases} 1 & t = 0, \\ 0 & t = kT, k \neq 0 \end{cases}$	1	1
$\delta(t - kT) = \begin{cases} 1 & t = kT, \\ 0 & t \neq kT \end{cases}$	e^{-kTs}	z^{-k}
Escalón unidad, $u(t)$	$1/s$	$\frac{z}{z-1}$
t	$1/s^2$	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	$\frac{z}{z-e^{-aT}}$
$1 - e^{-at}$	$\frac{1}{s(s+a)}$	$\frac{(1 - e^{-aT})z}{(z-1)(z - e^{-aT})}$
$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\frac{z \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\frac{z(z - \cos \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$e^{-aT} \text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$\frac{(ze^{-aT} \text{ sen } \omega T)}{z^2 - 2ze^{-aT} \cos \omega T + e^{-2aT}}$
$e^{-aT} \text{cos } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$\frac{z^2 - ze^{-aT} \cos \omega T}{z^2 - 2ze^{-aT} \cos \omega T + e^{-2aT}}$

Tabla 2.3 principales transformadas z

En la tabla siguiente se puede observar algunas de las propiedades que existen en la transformada z.

$x(t)$	$X(z)$
$kx(t)$	$kX(z)$
$x_1(t) + x_2(t)$	$X_1(z) + X_2(z)$
$x(t + T)$	$zX(z) - zx(0)$
$tx(t)$	$-Tz \frac{dX(z)}{dz}$
$e^{-at}x(t)$	$X(ze^{aT})$
$x(0)$, valor inicial	$\lim_{z \rightarrow \infty} X(z)$ si el límite existe
$x(\infty)$, valor final	$\lim_{z \rightarrow 1} (z-1)X(z)$ si el límite existe y el sistema es estable; esto es, si todos los polos de $(z-1)X(z)$ están dentro del círculo unidad $ z = 1$ en el plano z.

Tabla 2.4 propiedades de la transformada z

La transformada z inversa $X(z)$ de cómo resultado una única $x(k)$, pero no da una única $x(t)$.

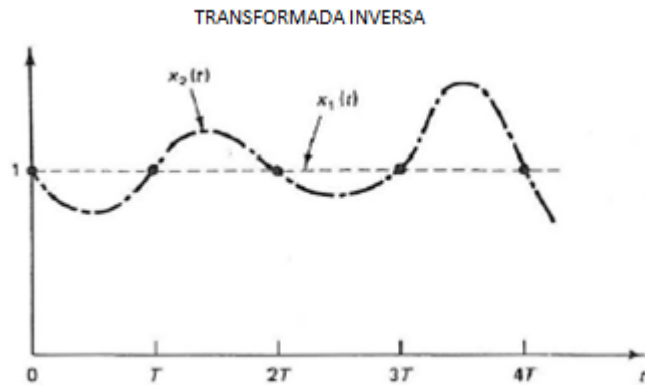


Figura 2.21 Gráfica de la transformada z inversa

La definición de transformada z inversa es la siguiente

$$x[n] = Z^{-1}\{X(z)\} = \frac{1}{2\pi j} \oint_C X(z) z^{n-1} dz \quad (15)$$

2.16 METODOS DE IDENTIFICACION DE SISTEMAS

Para la identificación de sistemas existen diversos métodos según diferentes criterios que son:

Método Paramétrico, para este método se debe hacer la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajustes de parámetros y de la estimación de parámetros del modelo que mejor se ajustan a los datos experimentales.

Método no Paramétrico, para este método es necesario hacer un estudio del sistema para poder escoger algún modelo. Algunos de los métodos de análisis del sistema son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta de frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.

2.17 METODOS NO PARAMETRICOS

2.17.1 Análisis de la respuesta transitoria

En esta técnica lo que se busca es obtener la respuesta del sistema a un impulso, o bien a una función escalón. En la práctica es muy difícil conseguir este tipo de señales por este motivo se aplica un método indirecto conocido como análisis de correlación que nos permite obtener la respuesta impulsiva del sistema. Este es un método que nos ayuda a obtener un rápido enfoque de la relación causa y efecto.

2.17.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

El modelo resultante es una representación de la respuesta en frecuencia del sistema, obtenida mediante la aplicación de señales de entrada sinusoidales de distintas frecuencias. Para cuando se torna imposible aplicar este tipo de entradas, puede recurrirse a la aplicación de una señal de ruido blanco, que permite obtener la respuesta en frecuencia mediante el conocido análisis espectral.

Unas de las ventajas de uso de este método es el no requerir un procesamiento complejo de los datos y ningún conocimiento previo de la planta. Y como principal desventaja es que el modelo resultante no puede usarse directamente para la simulación.

2.17.3 Análisis de correlación

Esta técnica nos permite estimar la respuesta al impulso de un sistema sin aplicar dicha entrada, sino a partir de un conjunto de datos muestreados, al utilizar una señal de excitación. Este nos da un enfoque rápido de constantes de tiempo y retardos.

2.17.4 Análisis Espectral

Esta técnica se basa en la realización de la transformada de Fourier de las funciones de covarianza de entrada y salida y la correlación entre la señal de entrada y la señal de salida.

2.18 TÉCNICAS DE IDENTIFICACION PARAMÉTRICAS

Los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, estos modelos quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de entrada, salida y perturbaciones. En el caso que se requiera un modelo continuo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al dominio del tiempo.

La expresión general de un modelo discreto es la siguiente:

$$s(t) = \eta(t) + \omega(t) \quad (16)$$

En donde:

$\omega(t)$: es el que modela la salida debido a las perturbaciones.

$\eta(t)$: es la salida debido a la señal de entrada.

$S(t)$: es la salida medible del sistema.

En las siguientes ecuaciones se puede observar otra expresión para cada una de las variables anteriores.

$$\eta(t) = G(q^{-1}, \theta)\mu(t) \quad (17)$$

$$\omega(t) = H(q^{-1}, \theta)e(t) \quad (18)$$

$$s(t) = A(q^{-1}, \theta)y(t)$$

En donde:

q^{-1} : es el operador retardo.

θ : es un vector de parámetros.

$\mu(t)$: entradas al sistema.

$e(t)$: ruido de entrada

$y(t)$: es la salida de interés del sistema.

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \quad (19)$$

$$= \frac{b_1 \cdot q^{-nk} + b_2 \cdot q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 \cdot q^{-1} + \dots + f_{nf} \cdot q^{-nf}}$$

$$H(q^{-1}, \theta) = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} = \frac{1 + c_1 \cdot q^{-1} + \dots + c_{nc} \cdot q^{-nc}}{1 + d_1 \cdot q^{-1} + \dots + d_{nd} \cdot q^{-nd}}$$

$$A(q^{-1}, \theta) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}$$

El vector θ que contiene los coeficientes a_i , b_i , c_i , d_i y f_i de las funciones de transferencia anteriores. Entonces la estructura genética de este modelo viene dado por:

$$A(q^{-1})y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + H(q^{-1}, \theta)e(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad (20)$$

En muchos casos, algunos de los polinomios anteriores no se incluye en la descripción del modelo, dando lugar a los siguientes casos particulares:

Tipo de Modelo	Condición	Estructura Resultante
ARX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = C(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + e(t)$
Output error (OE)	$C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + e(t)$
ARMAX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + C(q^{-1})e(t)$
Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$

Tabla 2.5 Tabla sobre los tipos de modelos paramétricas

A continuación se muestra el diagrama de bloques de cada modelo.

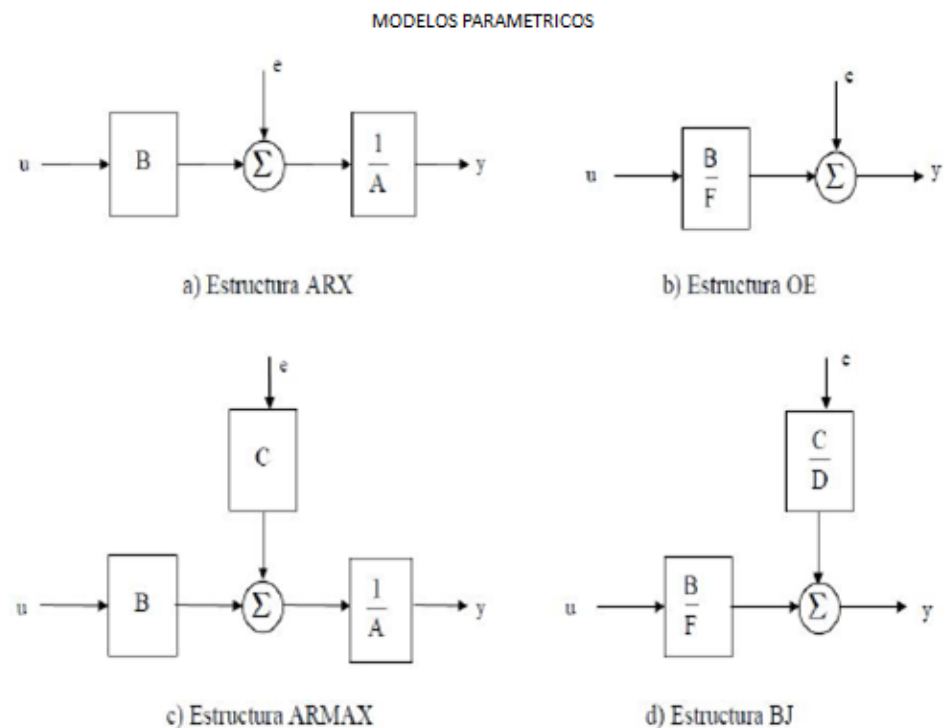


Figura 2.22 Diagrama de bloque de los tipos de modelos paramétricas

2.19 Métodos para ajustes de parámetros

2.19.1 Errores de predicción o residuos del modelo

Se conoce como error de predicción $\varepsilon(t, \theta)$ a la diferencia que existe entre la salida estimada por el modelo y la salida real del sistema en un determinado instante de tiempo:

La expresión general es la siguiente:

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - y_e(t, \theta) \quad (21)$$

En donde

$y_e(t, \theta)$: es la salida estimada por el modelo en el instante t .

2.19.2 Regresión Lineal

Una estructura posee una regresión lineal cuando la salida estimada puede expresarse de la siguiente manera:

$$y_e(t, \theta) = \varphi^T(t) \cdot \theta \quad (22)$$

En donde

$\varphi^T(t)$: Es un vector columna formado por las salidas y entradas anteriores (conocido como vector de regresión).

θ : Es el vector de parámetros del modelo.

2.19.3 Método de mínimos cuadrados (LSE).

El principio de los Mínimos Cuadrados indica que los parámetros de un modelo se deben elegir de tal forma que:

“La suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de las salidas observadas (reales) y los estimados, multiplicada por factores que midan el grado de precisión sea un mínimo”

CAPITULO 3

3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

3.1 BOSQUEJO DE LA PLANTA Y RAZONES PARA CONTROLAR EL SISTEMA.

La variable a controlar es la temperatura del agua que se encuentra almacenada en un tanque. El prototipo principalmente está basado en un tanque con agua, una resistencia tubular sumergible, un sensor de temperatura, un radiador y una bomba de agua.

Una aplicación para este trabajo, es que en industrias de elaboración de chocolate o galletas bañadas de chocolate, existe un proceso llamado el temperado del chocolate, el cual consiste elevar la temperatura del chocolate con el objetivo de que la estructura del chocolate cambie. Con este proceso se trata de que el chocolate se mantenga solido hasta la temperatura que uno desea. Un ejemplo claro, es que si se fija que la temperatura sea de 28 grados, quiere decir que el chocolate va a permanecer solido hasta esa temperatura, pasando los 28 grados el chocolate cambiará de estado, es decir empezará a derretirse. La finalidad de este proceso es que al momento que el consumidor ingiera el chocolate se empiece a derretir dentro del organismo.

3.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

Para el siguiente proyecto se sensorará la temperatura para así poder realizar el análisis del sistema. Para poder incrementar la temperatura del agua se lo realizara basado en el principio de convección.

Se debe tener en cuenta que para la simulación de algún proceso, el agua será recirculada, por lo que el controlador debe tratar de mantener la temperatura fijada por el usuario.

3.3 DESCRIPCION DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DE LA PLANTA

3.3.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

El proceso consiste en elevar la temperatura del agua para esto se necesitó un tanque de almacenamiento, antes del diseño se observó cuánta agua se necesitaba para el proceso del temperado. Con ello se construyó un tanque de almacenamiento con un volumen específico. El tanque que se construyó es de vidrio.

El volumen de agua es arbitrario, pero para este proceso se decidió que al momento de poner en funcionamiento la planta el volumen sea de 35 litros, ya que al momento de tener un volumen de agua demasiado grande el proceso se volverá más lento. Otra de las razones es que para todas las pruebas se debía tener el mismo volumen. En base a esto se realizó el siguiente análisis para obtener las dimensiones del tanque.

Se conoce que:

$$\text{VOLUMEN} = \text{ANCHO} \times \text{LARGO} \times \text{ALTURA} \quad (22)$$

$$\text{VOLUMEN} = (34.7 \text{ cm}) \times (39.8 \text{ cm}) \times (45.6 \text{ cm})$$

VOLUMEN = 62,34 cm³

En la gráfica que se muestra a continuación se puede observar claramente el tanque de agua con las dimensiones especificadas.



Figura 3.1 Tanque construido para el agua

3.3.2 BOMBA DE AGUA.

Debido a que para la identificación de sistemas, el proceso tiene que tener una cierta dinámica, y como solución al problema se decidió usar una bomba de agua que permita realizar la recirculación de la misma.

La bomba estará encendida durante todo el proceso, la selección de esta bomba se hizo en base a la potencia, ya que la planta recircula el agua una distancia corta, se decidió usar la de menor potencia que se encontró en el mercado.

Las principales características de la bomba son las siguientes:

POTENCIA: 35 W

CAUDAL: 5L/min

ALIMENTACION: 110 VAC – 60 HZ



Figura 3.2 Bomba.

3.3.3 INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Continuando con el tema de la dinámica del proceso, al momento de la recirculación del agua, esta pasa por un radiador el cual va a disipar el calor que tiene el agua.

El fin de esto es simular que el agua regresa de un proceso al tanque de almacenamiento, con el objetivo de diseñar un buen control de temperatura. En el caso específico del temperado del chocolate, el agua es recirculada ya que la transferencia de calor

se la realiza por convección, es decir el agua nunca se mezcla con el chocolate.



Figura 3.3 Intercambiador de calor.

3.3.4 DISPOSITIVO DE ENFRIAMIENTO.

Este dispositivo ayuda al intercambiador de calor a disipar el calor, es un ventilador que trabaja a 110 Vac. Este permanecerá encendido durante todo el proceso.

Este dispositivo cuenta con un control de velocidad propio por el cual se fija la velocidad que se desee. Para este trabajo se fijó en la velocidad media es decir en 2. La finalidad de esto es que el chocolate antes del proceso del temperado llega con una temperatura constante. Por esta razón se decidió que la velocidad del ventilador sea constante.



Figura 3.4 Ventilador

Como se puede observar en el gráfico anterior el ventilador se encuentra fijo a la estructura del prototipo. También se puede observar que el ventilador se encuentra en dirección hacia el intercambiador de calor.

3.3.5 SENSOR DE TEMPERATURA.

Se decidió utilizar como sensor de temperatura el LM35.

El LM35 es un sensor de temperatura que tiene precisión calibrada aproximada de 1°C. Su rango de medición puede ir desde -55°C hasta 150°C. La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10mV, por lo tanto:

$$150^{\circ}\text{C} = 1500\text{mV}$$

$$-40^{\circ}\text{C} = -400\text{mV}$$

Las características del LM35 más importantes son:

- Mide la temperatura directamente en grados Celsius.
- El voltaje de salida es proporcional a la temperatura.
- Tiene una precisión de 0.5°C a 25°C.
- Trabaja entre 4 y 30 volts de alimentación.
- Tiene una baja impedancia de salida.
- Tiene una baja corriente de alimentación (60uA aproximadamente).
- Es de bajo costo.



Figura 3.5 Sensor de temperatura

Como se sabe que debe sentir la temperatura del agua, el LM35 puede ser sumergido siempre y cuando sus pines no estén en contacto con el agua, por esta razón al sensor se lo cubrió con silicón y con masilla, se lo colocó dentro de una manguera de poliuretano Festo PUN 8x1,25.

En la figura que se muestra a continuación se observa como el sensor es sumergido en el agua, más adelante se explicará con más detalles de cuanto es la ganancia y la parte electrónica del amplificador o circuito de acondicionamiento que se utilizó.



Figura 3.6 Sensor sumergido en el agua

3.3.6 RESISTENCIA CALEFACTORA.

Para poder elegir la resistencia adecuada que caliente una cierta cantidad de agua que se almacena en el tanque, se realizó un análisis para saber de cuantos kilovatios debe ser la resistencia.

El cálculo que se realizó esta basado en los principios de transferencia de calor, ya que existen diferentes tipos de transferencia de calor. Como ya se decidió anteriormente cuanto es el volumen de agua, se puede realizar el siguiente cálculo.

Se sabe que la ecuación de energía calorífica es la siguiente:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (23)$$

ΔQ : es la variación de energía calorífica.

m : es la masa del agua.

c : es el calor específico del agua.

ΔT : es la variación de temperatura.

Por otro lado conocemos que:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (24)$$

Dónde:

m : es la masa del agua.

ρ : es la densidad del agua.

v : es el volumen del agua.

Despejando nos queda:

$$m = \rho v$$

$$m = \left(1 \frac{gr}{cm^3}\right) \times (35000 cm^3)$$

$$m = 35000 \text{ gr}$$

$$\Delta Q = (35000 \text{ gr}) \times \left(1 \frac{cal}{grK}\right) \times (40 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\Delta Q = 525000 \text{ Calorias}$$

Convirtiendo de calorías a joule nos queda:

$$1 \text{ caloria} = 4186 \text{ Joule}$$

$$\text{Energia} = (525000 \text{ cal}) \times \left(\frac{4.186 \text{ J}}{1 \text{ cal}}\right)$$

$$\text{Energia} = 2197650 \text{ J}$$

Finalmente tenemos que:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energia}}{\text{Tienpo}} \quad (25)$$

$$\text{Potencia} = \frac{2197650 \text{ J}}{732,5}$$

$$\text{Potencia} = 3002 \text{ W}$$

Como se observa la potencia de la resistencia salió aproximadamente de 3000 W, el tiempo que se asumió para llevar una temperatura de 25 grados a 40 grados fue de aproximadamente 12 minutos, esto lo seleccionó debido a que para que el proceso del temperado del chocolate funcione, el agua debería ya tener la temperatura deseada y por esta razón se escogió una resistencia que lo haga en un tiempo no mayor a 30 minutos, por otro lado este rango de temperatura se lo hizo en base a que el fin es de que el chocolate se derrita dentro del organismo por esta razón la temperatura no debería pasar de 40 grados.

La resistencia es de tipo tubular y sumergible. Para este caso específico esta siempre debe estar siempre cubierta por el agua, porque si esta no se encuentra en esas condiciones se podría dañar.

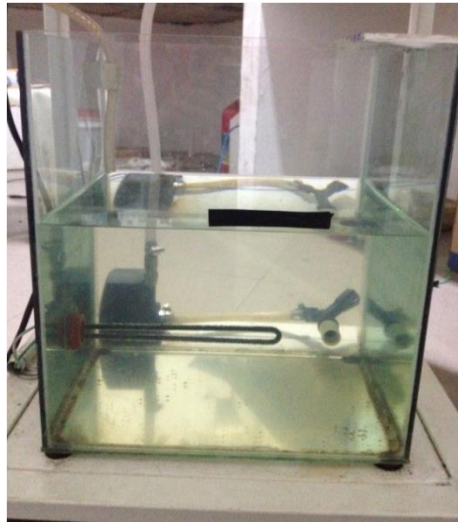


Figura 3.7 Resistencia calefactora.

3.4 PARTE ELECTRONICA DE LA PLANTA

3.4.1 CIRCUITO AMPLIFICADOR DEL SENSOR

Como ya se mencionó, se utilizó el LM35, este sensor sensa la temperatura y lo convierte en un pequeño voltaje que está en el orden de los mv. Debido que la tarjeta de adquisición de datos DAQ al momento de leer estos datos tan bajos genera señales no deseadas o ruido. Para esto se realizó un circuito de acondicionamiento para que de esta manera aprovechar el rango de voltaje que tienen las entradas analógicas de la tarjeta que es de 0 V a 5 V.

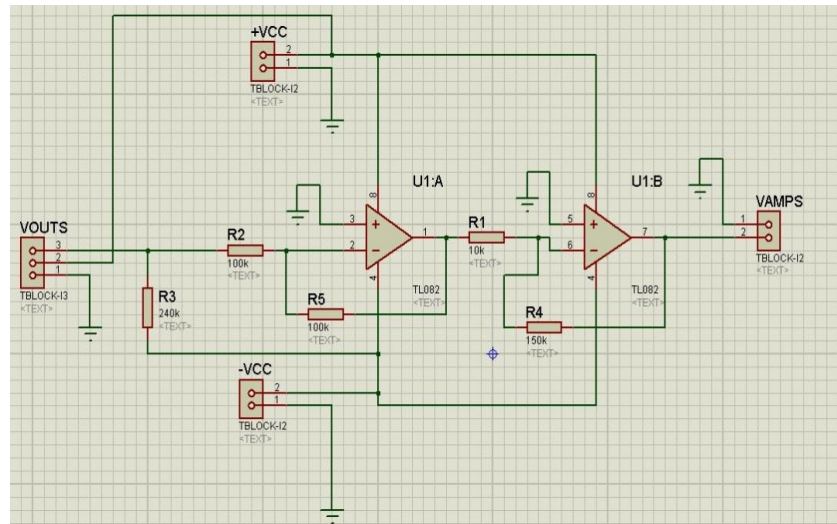


Figura 3.8 circuito amplificador del sensor

Como se puede observar en el gráfico anterior se realizó 2 amplificadores, los dos opamps se encuentran en configuración de retroalimentación negativa.

La ganancia que se escogió para el circuito de acondicionamiento es de 10 veces el voltaje de entrada, ya que se tendrá como temperatura máxima 50 grados esto equivaldría a 5V.

3.4.2 CIRCUITO DE DISPARO DEL TRIAC

3.4.2.1 ESQUEMA GENERAL

En el proyecto con el fin de tener un mejor control del proceso, a la resistencia calefactora se le regulará el voltaje variando los pulsos de disparo mediante un triac, el mismo que debe ser disparado por este circuito de disparo que se muestra a continuación. La señal de referencia la cual se va a comparar con una señal diente de sierra es la que sale por una salida analógica de la tarjeta de adquisición DAQ.

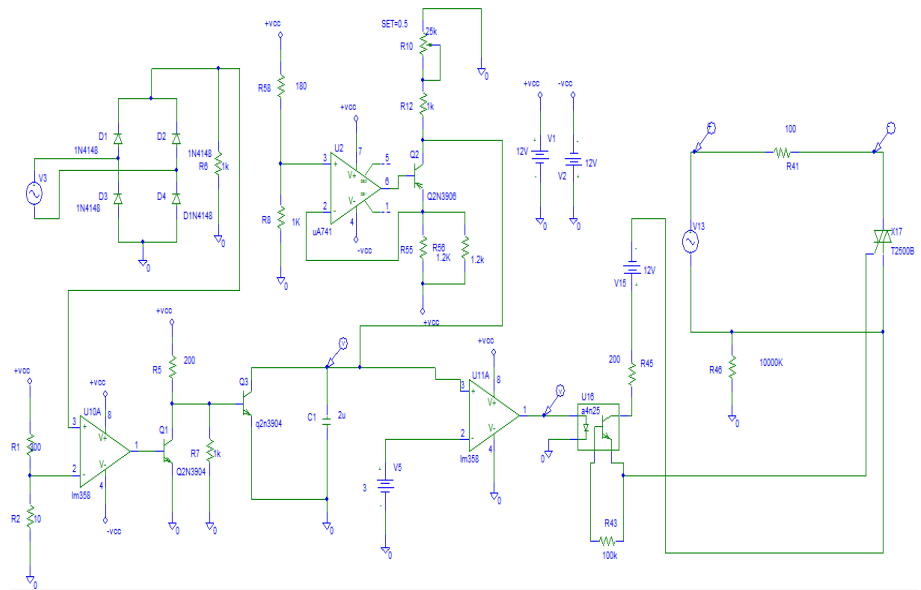


Figura 3.9 circuito de disparo

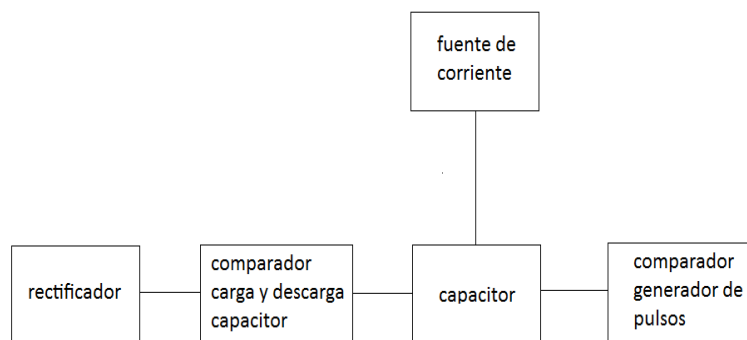


Figura 3.10 Diagrama de bloques del circuito de disparo

En el diagrama de bloques se puede observar que este circuito de disparo del triac, contiene una zona rectificadora, un capacitor, una fuente de corriente y amplificadores operaciones.

Para el análisis de este circuito se lo ha dividido en tres etapas con la finalidad de que se pueda tener de una manera más clara el funcionamiento.

3.4.2.2 PRIMERA ETAPA

A continuación se mostrará y se describirá todo lo que comprende esta primera etapa.

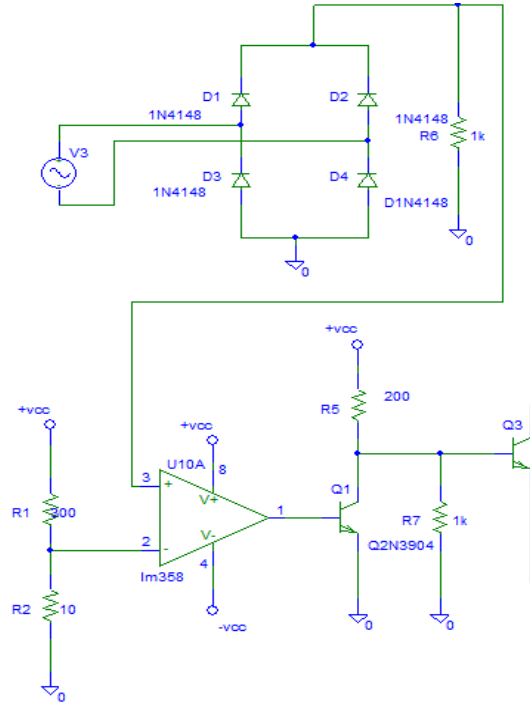


Figura 3.11Primera etapa circuito de disparo

Como se observó del gráfico anterior, primero se tiene un transformador el cual permite bajar el voltaje de 110 Vac a 12 Vac, luego esta señal pasa a través de un puente de diodos para de esta manera poder rectificarla, esta señal va a ser comparada con otra señal a través de un opamp. Esta otra señal proviene de un divisor de tensión que se puede observar claramente en el gráfico mostrado.

$$V_{ref} = (12 V) \times \left(\frac{10}{10+100} \right) \quad (26)$$

$$V_{ref} = 1 V$$

La salida de este comparador va a una configuración de transistores los cuales van a trabajar en dos estados, en saturación o corte, con la finalidad de descarga del capacitor para generar el diente de sierra.

3.4.2.3 SEGUNDA ETAPA

En esta etapa del circuito de control es en sí una fuente de corriente, la misma que va a generar la corriente que va hacer cargar el capacitor.

El juego de resistencias que se encuentran en paralelo en el emisor, son las que van a permitir regular la magnitud de la corriente, es decir que si se necesitará una fuente de corriente variable podemos poner un potenciómetro en lugar de las resistencias fijas, solo que en este caso se necesita una corriente siempre fija de carga para el capacitor.

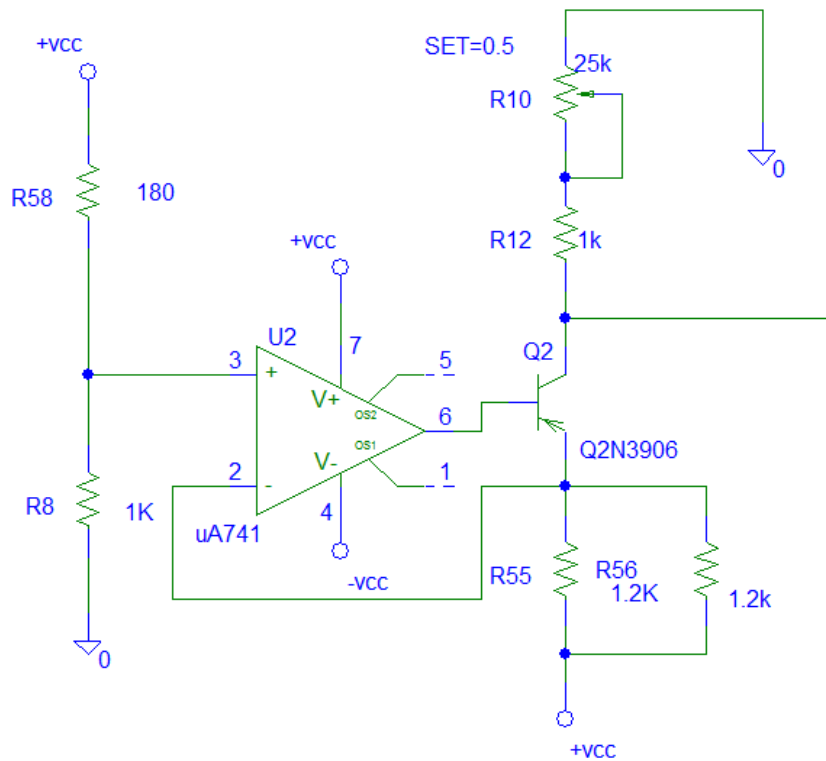


Figura 3.12 Segunda etapa circuito de disparo

3.4.2.4 TERCERA ETAPA

Esta última etapa del circuito de control no es más que el resultado final de la señal diente de sierra generada por la carga y descarga del capacitor, esta señal va a ser comparada con un voltaje dc, el cual es un voltaje de referencia que va a mandar la tarjeta de adquisición DAQ, estas señales se las compara a través del opamp y así generar los pulsos que disparan al triac.

Para poder aislar el circuito de control con la parte de fuerza se utilizó un optoacoplador.

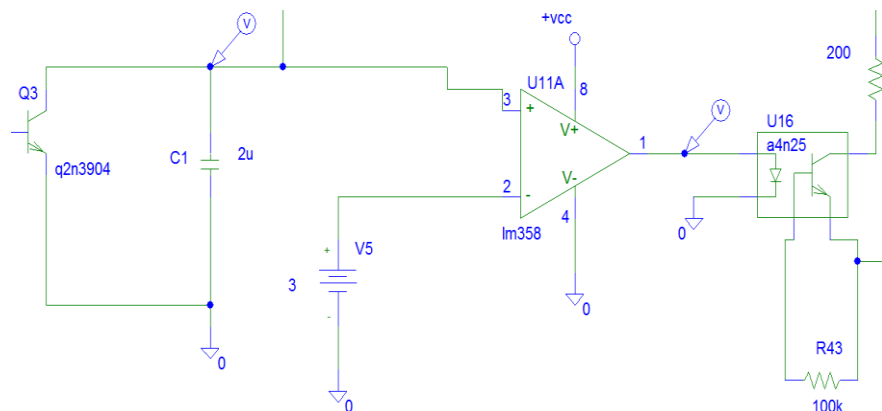


Figura 3.13 Tercera etapa circuito de disparo

3.4.3 CIRCUITO DE FUERZA

El circuito de fuerza es muy sencillo, ya que solo consta de un triac, el cual va a conducir dependiendo de los pulsos que le lleguen al mismo. Con este circuito se logra obtener que el voltaje que le llega a la resistencia sea variable de aproximadamente de 0 Vac a 208 Vac.

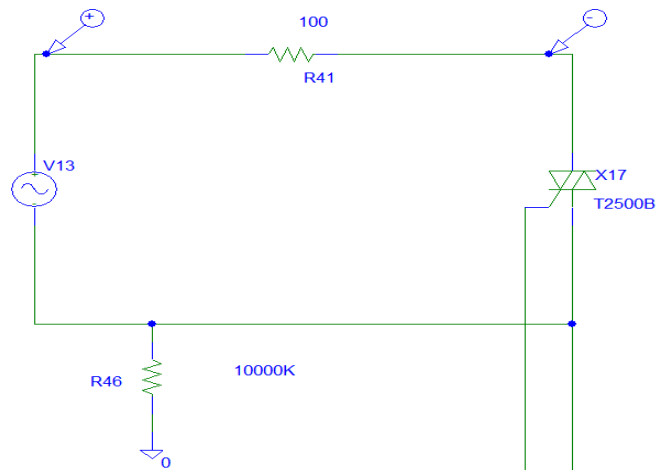


Figura 3.14 Circuito de fuerza.

3.5 DESCRIPCION DETALLADA DEL PROCESO

En el punto anterior se describió cada uno de los elementos que se han utilizado para la implementación de la planta. En la figura que se muestra a continuación está el esquema de la planta.

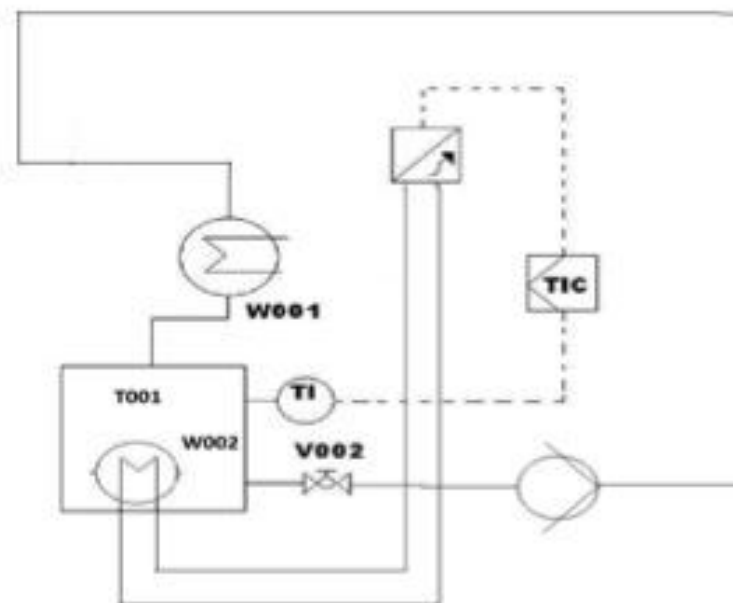


Figura 3.15 Bosquejo del prototipo

Inicialmente se tiene el agua almacenada en el tanque de vidrio T001, dentro del mismo tanque se encuentra la resistencia tubular sumergible de 3000W. EL agua es transportada a través de una bomba hacia un

radiador el cual es un intercambiador de calor llamado W001, el mismo que está recibiendo aire frío de un ventilador, esta etapa se la elaboró con el fin de simular otro proceso. Por último el agua regresa al tanque en el que el sensor de temperatura envía la señal al controlador para enviar el voltaje de referencia al circuito de referencia para controlar los disparos del triac que controla el voltaje de la resistencia.

3.6 DETERMINACION DEL TAO DOMINANTE

Para poder obtener el tao dominante, fue necesario realizar algunas pruebas al sistema que se tratará de identificar, para poco a poco ir conociendo la dinámica del mismo. Como primer paso se debe enviar una señal de entrada escalón, para de esta manera poder ver la respuesta del sistema.

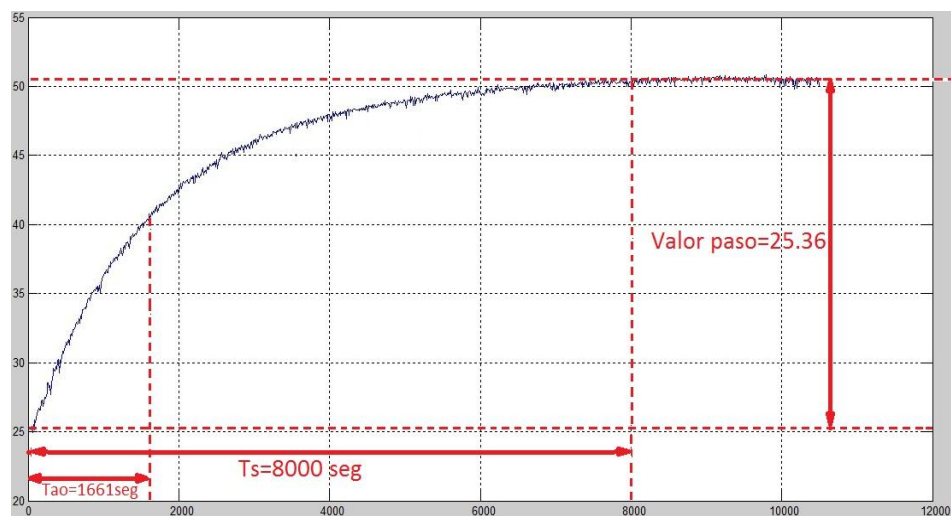


Figura 3.16 Respuesta al escalón en lazo abierto

En la gráfica anterior se muestra la respuesta del sistema al escalón con un voltaje de salida de 2V de la tarjeta de adquisición, el mismo que llega al circuito de disparo, es decir este será nuestro voltaje de referencia para el circuito de disparo.

En la gráfica podemos observar que la temperatura inicial fue de 25.1 grados, y la temperatura final fue de aproximadamente de 50.46 grados.

Una vez que se obtuvo la gráfica de respuesta al escalón se procederá a realizar el análisis para poder obtener los diferentes datos como son el τ , el tiempo de estabilización, tiempo muerto, etc.

El tiempo de estabilización es de aproximadamente de 8000 segundos lo que equivale a decir que el tiempo de estabilización es 2 horas con 10 minutos aproximadamente.

Para obtener el valor de paso se realiza lo siguiente:

$$\text{Valor paso} = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}} \quad (27)$$

$$\text{Valor paso} = 50.46 - 25.1 = 25.36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para la obtención del τ , se debe obtener el 63% del valor paso como se muestra a continuación:

$$T_{\text{paso}} = 63\%(\text{Valor paso}) \quad (28)$$

$$T_{\text{paso}} = 0.63(25.36) = 15.97$$

Como se puede observar en la gráfica para poder obtener el τ , T_{paso} se le debe sumar la temperatura inicial.

$$T = 41.07^\circ\text{C}$$

Para este valor de temperatura de la gráfica se obtiene el respectivo tiempo, es decir el τ .

$$\tau = 1661 \text{ seg}$$

Otro dato o parámetro que se debe conocer para poder hallar el τ dominante es el tiempo muerto. Este tiempo muerto se lo obtiene directamente de la gráfica. El tiempo muerto es el tiempo en que se necesita para que el sistema venza su propia inercia, en otras palabras el tiempo en el que sistema se demora en reaccionar.

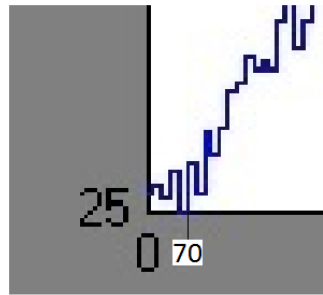


Figura 3.17 Tiempo muerto

$$\theta = 69.98 \text{ seg.}$$

Una vez determinados todos estos parámetros se puede calcular el τ dominante mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{dom} = \tau - \frac{\theta}{2} \quad (29)$$

Dónde:

θ : es el tiempo muerto

τ : es el τ o

$$\tau_{dom} = 1627 \text{ seg}$$

3.7 OBTENCION DEL TIEMPO DE MUESTREO

Algunos criterios que se utilizan se basan en el tipo de variables físicas a controlar o en la respuesta en lazo abierto a una entrada escalón. Para seleccionar un tiempo de muestreo adecuado se pueden utilizar algunos criterios. Muchas veces se cree que lo ideal es un muestreo rápido, pero esto podría innecesariamente recargar al procesador. En cambio con un muestreo lento se pierde efectividad de los sistemas de control.

Como se pudo observar en el análisis anterior, el sistema se lo puede modelar como un sistema de primer orden.

El tiempo de muestreo viene dado por la siguiente expresión:

$$0.2 < \frac{T_{muestreo}}{\theta} < 1 \quad (30)$$

Dónde:

T: tiempo de muestreo.

θ : tiempo muerto.

Como el tiempo muerto se lo halló anteriormente podemos obtener fácilmente el rango en el que se debe encontrar nuestro tiempo de muestreo.

$$0.22 < T_{muestreo} < 1.1 \text{ minutos}$$

Mientras tanto según el teorema de Nyquist que nos dice que para poder obtener una forma de onda con exactitud es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de su ancho de banda.

$$f_m > 2BW$$

$$f_m > 2[f_{max} - f_{min}]$$

Para $f_{min} = 0$ y expresando la frecuencia en radianes se obtiene lo siguiente.

$$W_m > 2W_{max}$$

El ancho de banda del sistema se determina del gráfico de Bode y se relaciona con el τ_{dom} .

$$W_m = \frac{1}{\tau_{dom}}$$

De tal manera se puede encontrar el límite para el tiempo de muestreo

$$W_m > 2W_{max}$$

$$\frac{2\pi}{T_{muestreo}} > \frac{2}{\tau_{dom}}$$

$$T_{muestreo} < \pi(\tau_{dom}) \quad (31)$$

$$T_{\text{muestreo}} < 85.13 \text{ minutos}$$

Mediante estos dos criterios se decidió trabajar con un tiempo de muestreo igual a 60 segundos. Ya que este tiempo cumple con los 2 criterios planteados.

3.8 DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA

Para poder diseñar una señal de entrada se hace uso del programa Input Design Gui, aplicación de Matlab realizada por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun.

A continuación se muestra la ventana principal de esta aplicación que se encuentra en Matlab.

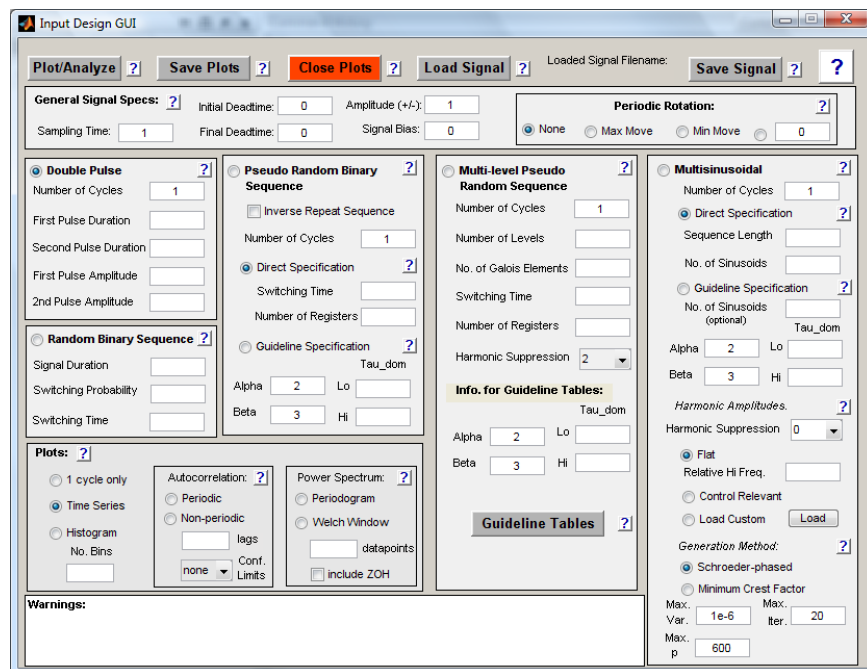


Figura 3.18 ventana de Input Design Gui.

Como se puede observar mediante esta aplicación se pueden generar los distintos tipos de señales de entrada, como las más conocidas son la PRBS, RBS y multiseno.

Los parámetros generales que se deben ingresar indiferentemente del tipo de señal de entrada son los siguientes:

- Sampling Time o tiempo de muestreo: es el calculado anteriormente
- Amplitud: es la amplitud de la señal
- Signal Bias: es el desplazamiento de la señal con respecto al eje horizontal.

Se realizarán varias pruebas con dos tipos de señales, que son la PRBS y la señal MULTISENO.

3.9 PARAMETROS DE LA SEÑAL MULTISENO

Para la señal multiseno existen los siguientes parámetros:

- Numero de ciclos.
- Longitud de la señal N_s .
- Numero de senoide n_s .
- Alpha
- Beta
- Tao Dom Lo, Hi.

Los valores de alfa y beta generalmente se los considera 2 y 3 respectivamente. Para poder obtener estos parámetros se utilizó el siguiente criterio: **[8]**

$$N_s = \frac{2\pi(\beta s)(\tau_{dom})}{T_{muestreo}} \quad (32)$$

$$N_s > \frac{2\pi(3)(27)}{1}$$

$$N_s > 377$$

Mientras tanto n_s viene dado por:

$$n_s > \frac{N_s(T_{muestreo})(\alpha s)}{2\pi(\tau_{dom})} \quad (33)$$

$$ns > 6$$

Una vez determinados estos parámetros se procederá a generar las señales para poder ser enviadas a nuestro prototipo.

PRIMERA SEÑAL MULTISENO

Para la primera señal que se generó, se utilizó el criterio anteriormente descrito. Con ello los parámetros que se ingresaron fueron los siguientes:

- Tiempo de muestreo: 60 segundos.
- Amplitud (+/-): 2.5
- Signal Bias: 2.5
- Numero de ciclos: 1
- Longitud de la señal N_s : 377
- Numero de sinusoide n_s : 6

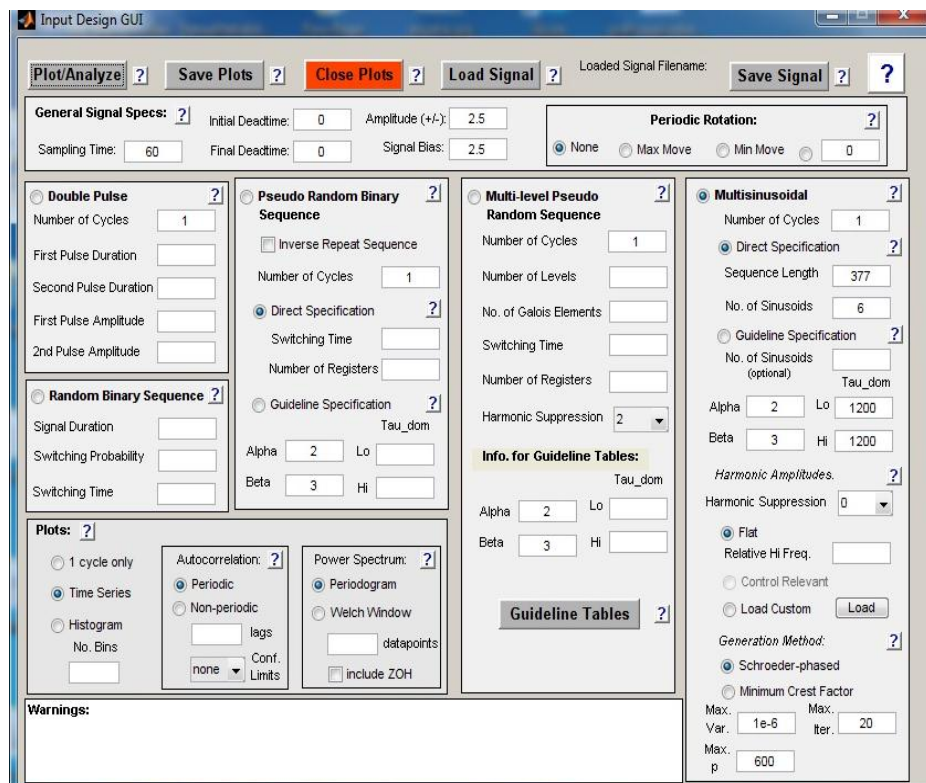


Figura 3.19 Parámetros primera multisenso

A continuación se muestra la gráfica de la señal de entrada multiseno que se generó a partir de los parámetros ingresados.

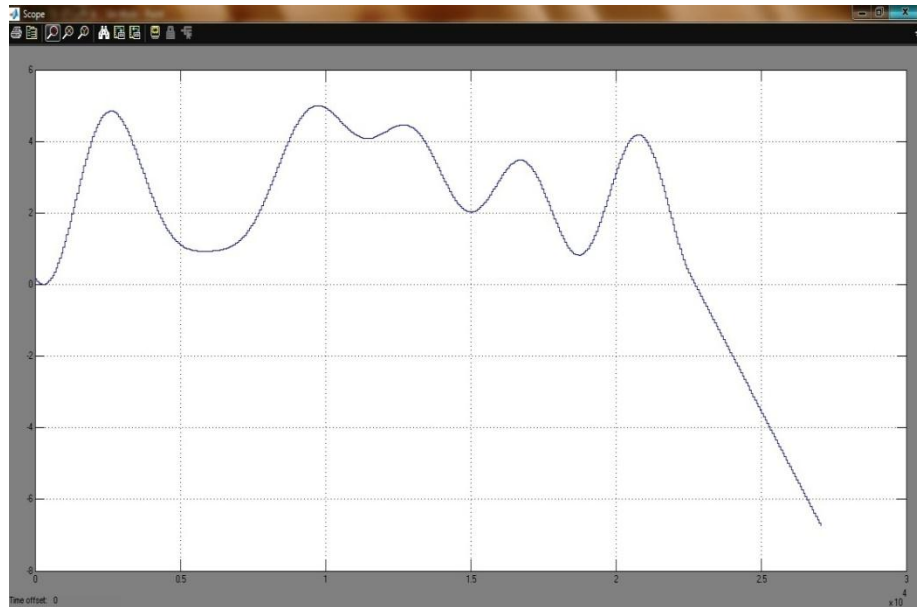


Figura 3.20 Gráfica primera multiseno

Esta prueba tuvo una duración aproximadamente de 7 horas, en la siguiente grafica se podrá observar la respuesta a dicha señal.

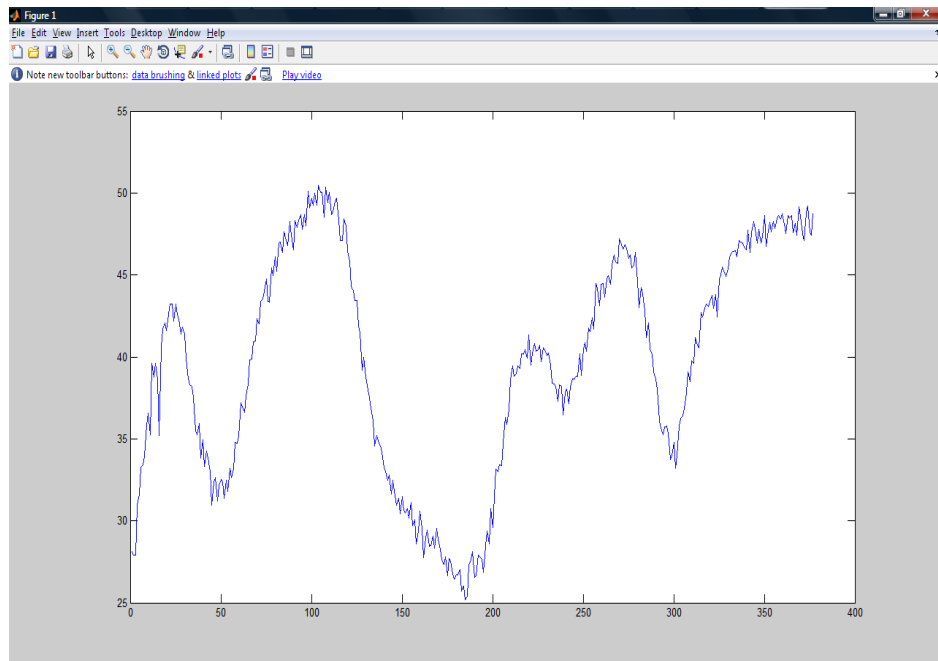


Figura 3.21 respuesta a primera multiseno

Se realizara el análisis de correlación mediante la función `cra` en matlab. Para esto se debe escribir en el command Windows `CRA(Z,20,10,2)`, En este comando, z es el conjunto de datos salida–entrada, ya sea como un objeto `iddata` o como una matriz $z = [y \ u]$, M es la cantidad de términos de la respuesta al impulso, que por defecto es 20, NA es el orden del filtro de pre blanqueado y $PLOT$ representa a la cantidad de gráficas que se desean visualizar, entonces realizando el análisis de correlación para las tres pruebas efectuadas previamente se obtuvieron los siguientes resultados.

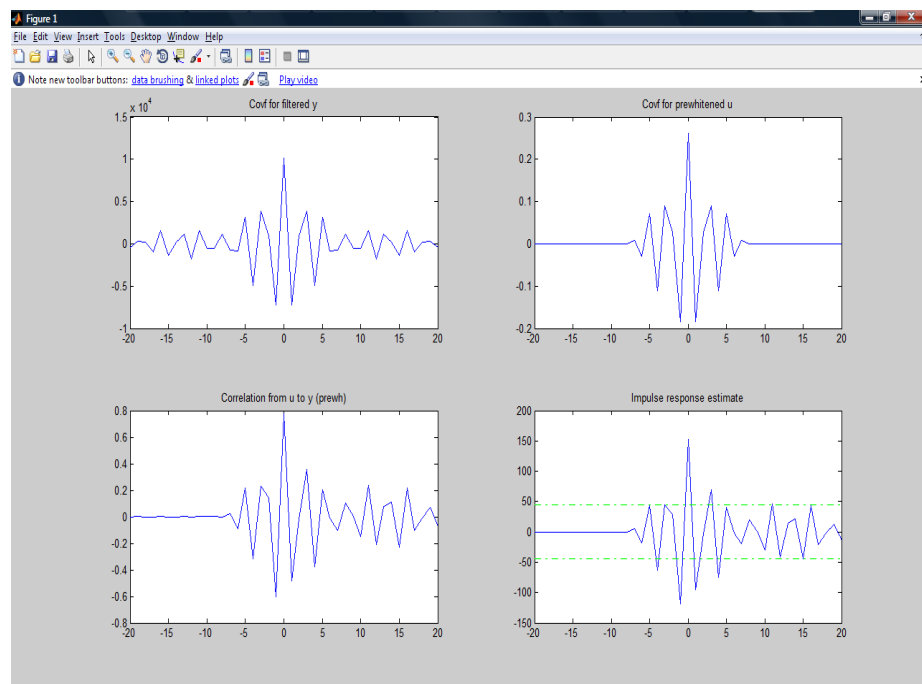


Figura 3.22 Análisis cra primera multiseno

Como resultado del mismo se obtuvo las gráficas mostradas anteriormente, en las cuales se pueden observar que las dos primeras graficas son de la covarianza y las otras dos de la parte inferior son de la correlación.

De la gráfica de correlación se observa que existe una relación alta entre los datos de entrada y los datos de salida ya que se tiene un valor de 0.8.

Esta señal no muestra una gráfica de análisis de correlación similar a la de la respuesta al escalón. Debido a esto se puede concluir que es inestable esta señal para el sistema. Por esta razón se realizaron más pruebas.

SEGUNDA SEÑAL MULTISENO

Para la segunda señal que se generó, los parámetros que se ingresaron fueron los siguientes:

- Tiempo de muestreo: 60 segundos.
- Amplitud (+/-): 1.5
- Signal Bias: 3.5
- Numero de ciclos: 1
- Longitud de la señal Ns: 377
- Numero de sinusoide ns: 10

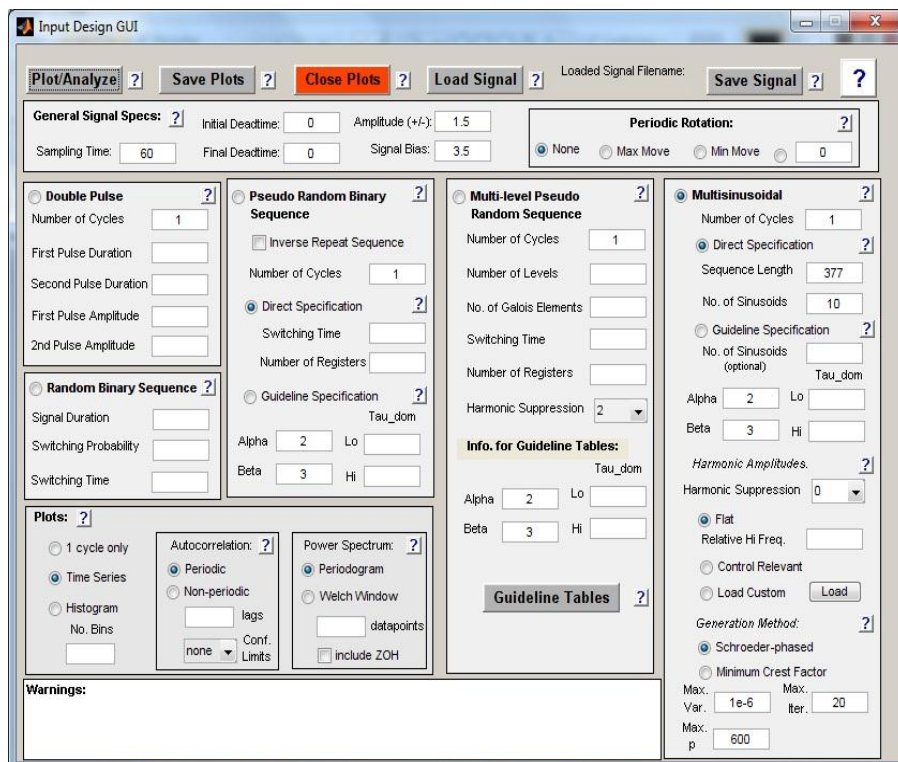


Figura 3.23 Parámetros segunda multisenos.

A continuación se muestra la gráfica de la señal de entrada multiseno que se generó a partir de los parámetros ingresados.

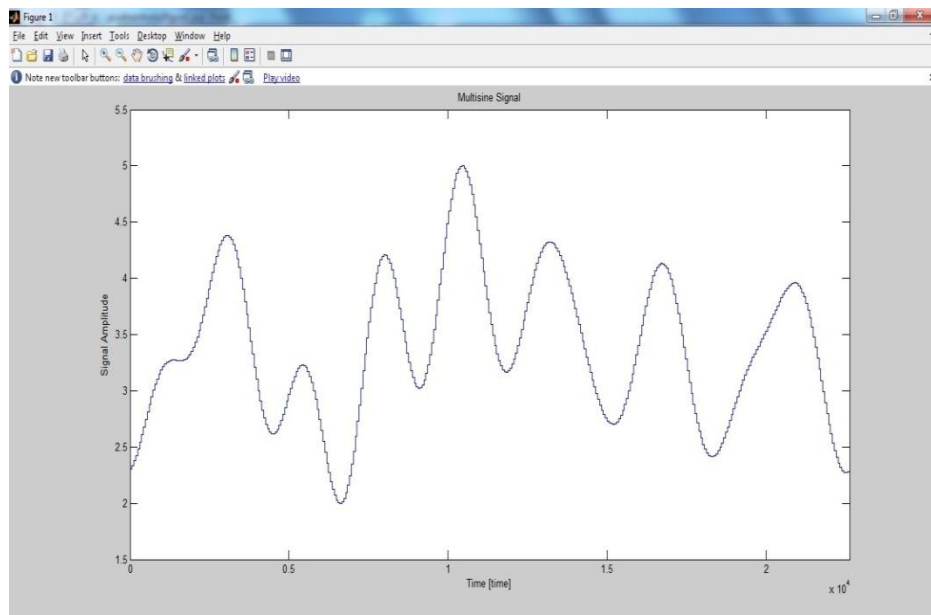


Figura 3.24 Gráfica segunda multiseno.

Esta prueba tuvo una duración aproximadamente de 7 horas, en la siguiente grafica se podrá observar la respuesta a dicha señal.

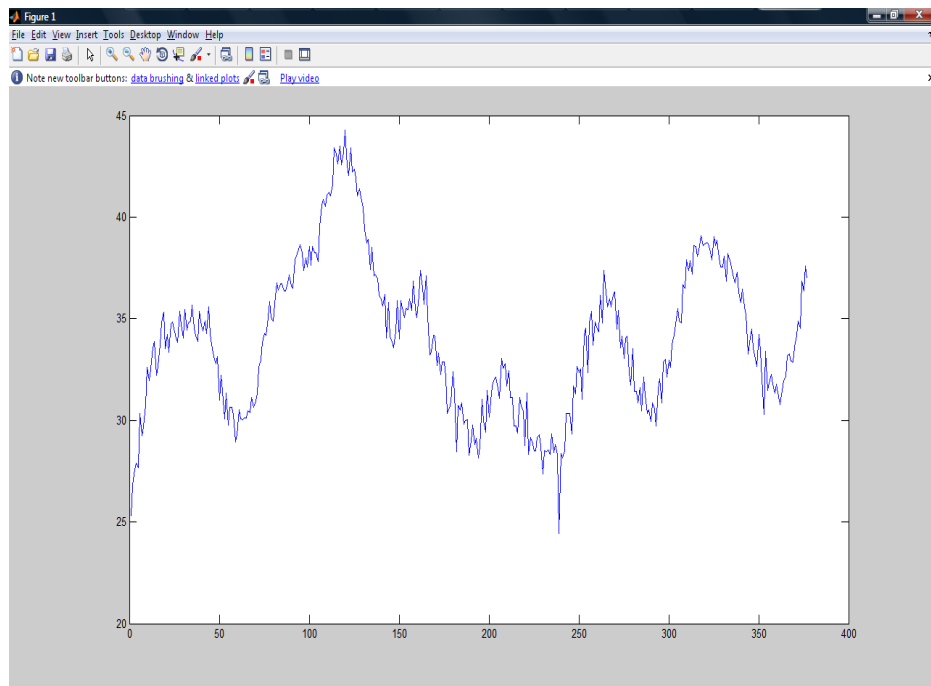


Figura 3.25 Respuesta segunda multiseno.

A esta señal también se le aplicara el análisis de correlación aplicado en la señal anterior, a continuación se mostrara las cuatro graficas del cra.

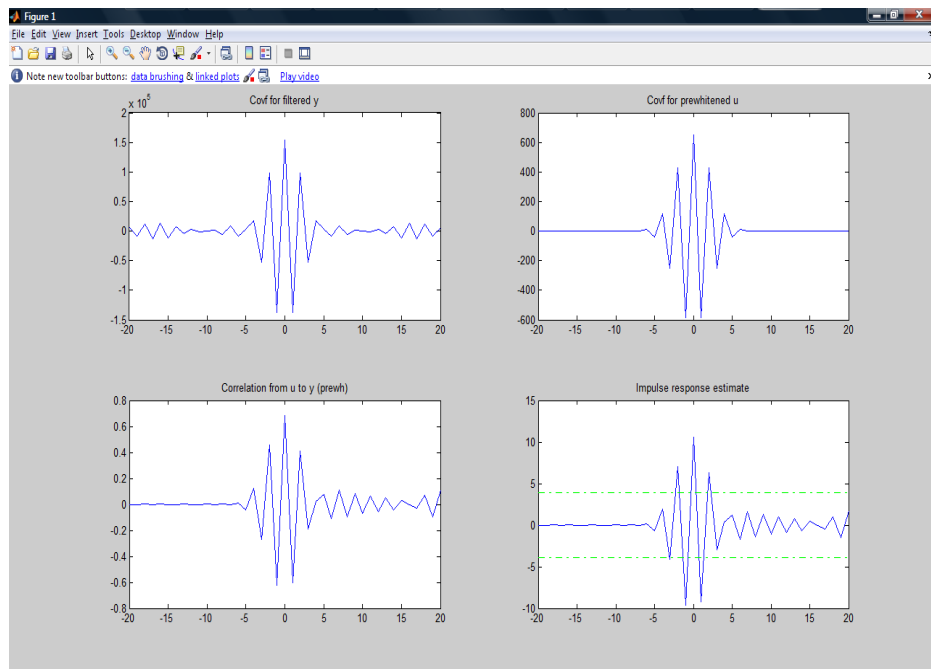


Figura 3.26 Análisis cra segunda multiseno

En esta figura se puede observar que las gráficas son similares a las de la primera señal de entrada. Con lo que se puede determinar que en la correlación se tiene un valor aproximado de 0.7. Con el análisis de estas se concluye que la señal es inestable.

TERCERA SEÑAL MULTISENO

Para la tercera señal que se generó, los parámetros que se ingresaron fueron los siguientes:

- Tiempo de muestreo: 60 segundos.
- Amplitud (+/-): 1.5
- Signal Bias: 2.5
- Numero de ciclos: 1
- Longitud de la señal N_s : 377
- Numero de sinusoide n_s : 10

La gráfica de la señal de entrada es la siguiente:

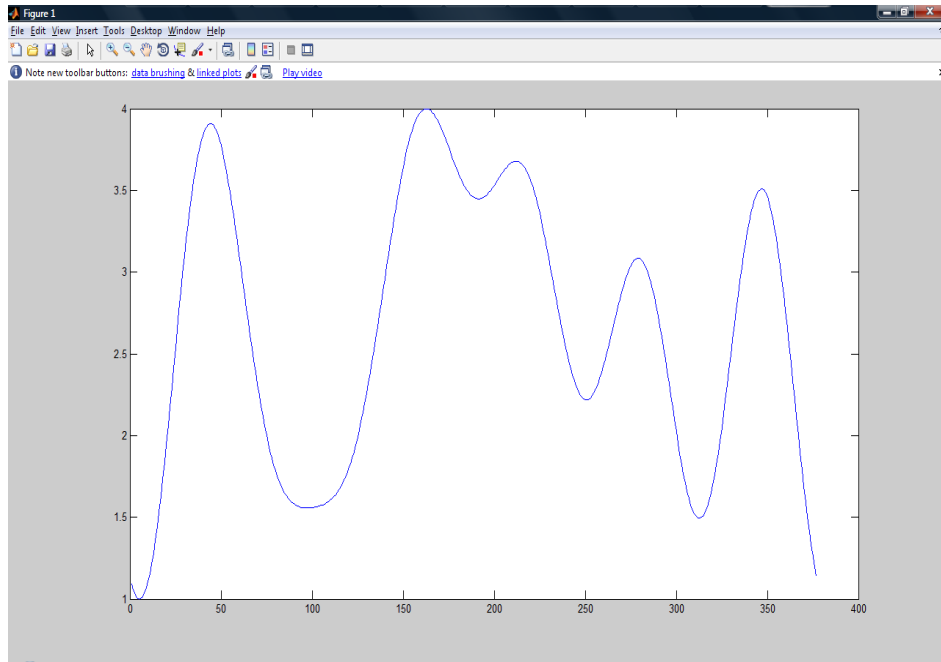


Figura 3.27 Gráfica tercera multisenso

Esta prueba tuvo una duración aproximadamente de 7 horas, en la siguiente grafica se podrá observar la respuesta a dicha señal.

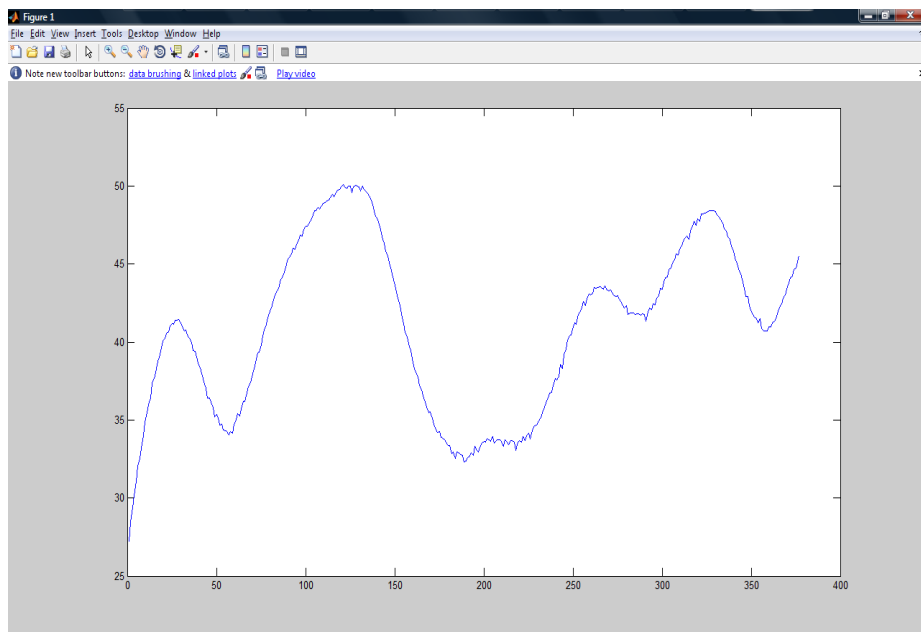


Figura 3.28 Respuesta tercera multisenso

A esta señal también se le aplicara el análisis de correlación aplicado en la señal anterior, a continuación se muestran las cuatro graficas del cra.

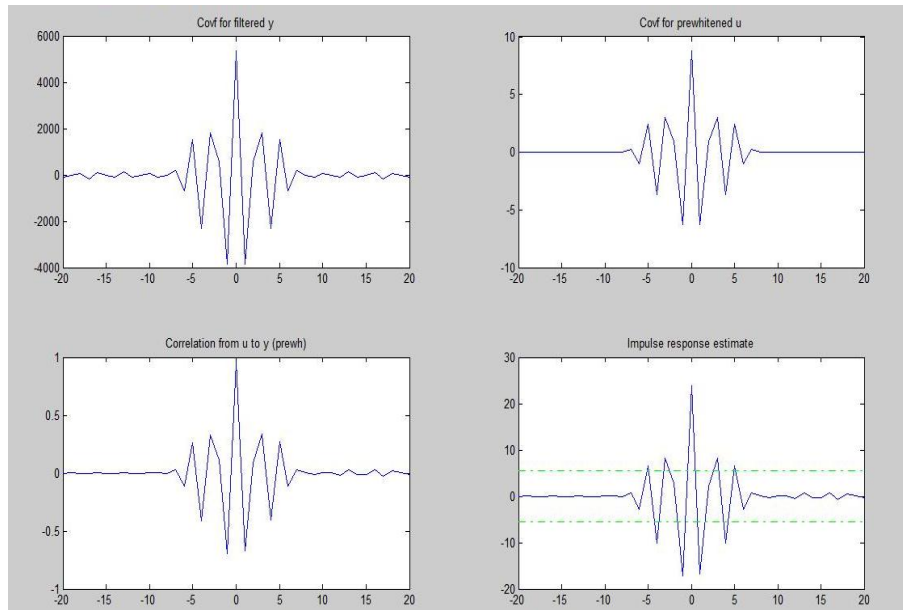


Figura 3.29 análisis cra tercera multiseno

En esta figura se puede observar que las gráficas son similares a las de la primera señal de entrada. Con lo que podemos determinar que en la correlación se tiene un valor aproximado de 1. Con el análisis de estas se concluye que esta señal es inestable.

Con estos resultados obtenidos se elaboró la siguiente tabla para realizar una breve comparación de las pruebas.

Señal Multiseno							
Prueba	Parámetros ingresados						
	T_s (s)	Duración de cada ciclo (s)	#ciclo s	N_s	n_s	Amplitu d	Signal Bias
1	60	22500	1	377	6	2.5	2.5
2	60	22500	1	377	10	1.5	3.5
3	60	22500	1	377	10	1.5	2.5
4	60	22500	1	377	8	1	2.5

Tabla 3.1 Comparación de señales multiseno.

En la tabla anterior se muestran todos los parámetros ingresados para las distintas señales multiseno que se utilizaron en cada una de las pruebas.

3.10 PARAMETROS DE LA SEÑAL PRBS

La señal PRBS puede ser generada con registros de desplazamiento y algebra de Boole, o también especificando los parámetros α , β y τ_{dom} de la planta a identificar.

Los principales parámetros que se deben llenar son:

- Alpha
- Beta
- Tao Dom Lo
- Tao Dom Hi.

Se recuerda que el coeficiente α representa la información de alta frecuencia en la señal y el coeficiente β representa la información de baja frecuencia en la señal.

TABLA DE DATOS DE SEÑAL PRBS

Señal PRBS							
PRUEBA	Parámetros ingresados						
	T_s (s)	Duración de cada ciclo (s)	#ciclos	α	β	τ_{dom}^L (s)	τ_{dom}^H (s)
1	60	24810	1	2	3	1190	1200
2	60	51274	1	2	3	1190	1300
3	60	34162	1	2	3	1100	1500
4	60	57600	1	2	3	1139	2115

Tabla 3.2 comparación señales prbs

La señal que se escogió como la mejor señal de entrada fue la de la prueba número 4, a continuación se mostraran las razones por la que es la mejor señal de entrada.

El primer análisis de esta señal es el análisis de correlación por medio de la aplicación cra.

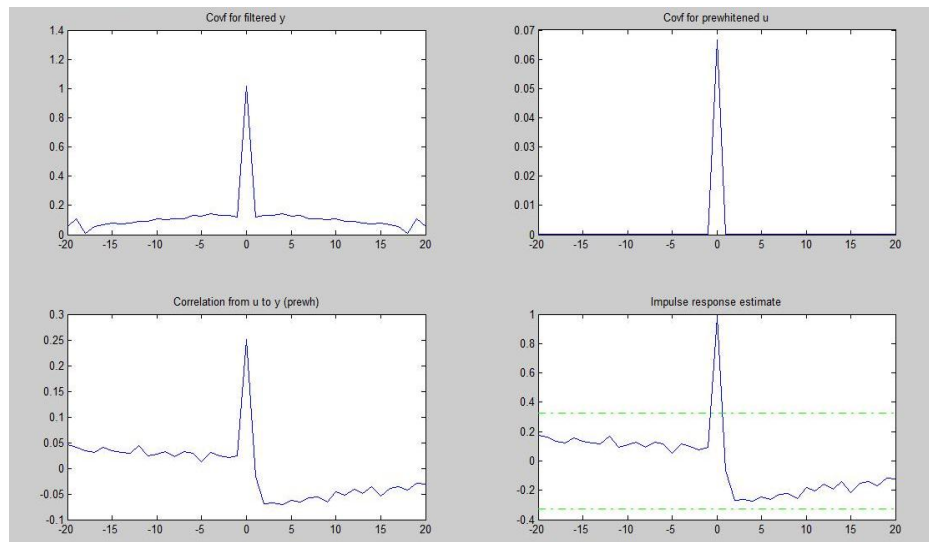


Figura 3.30 análisis cra cuarta prbs.

En esta figura se observa que existe una correlación entre los datos de salida-entrada de aproximadamente de 0.27. Además se debe realizar una estimación al modelo de correlación y verificar su similitud con la respuesta del sistema a una señal de entrada en lazo abierto.

Para esto se ingresó a la aplicación ident en matlab.

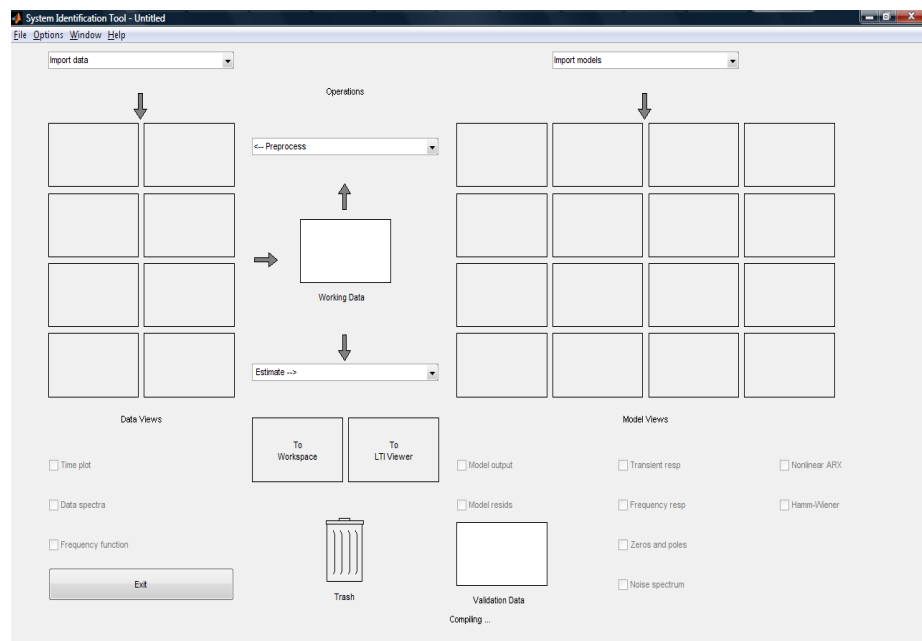


Figura 3.31 Ventana ident.

Luego debemos importar lo datos de entrada y salida como se muestra a continuación:

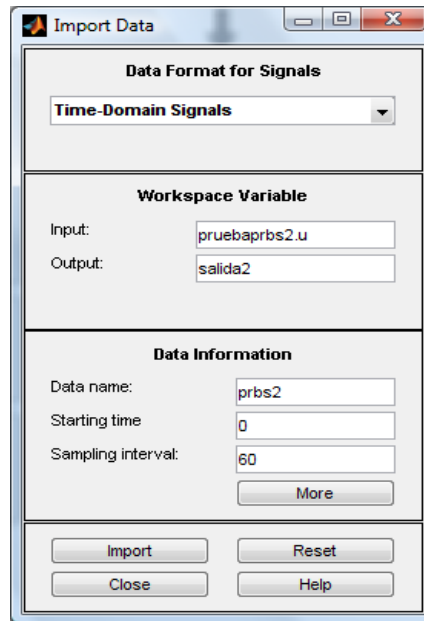


Figura 3.32 Ventana import data.

Una vez ingresados los datos se debe realizar el pre-proceso es decir remover la media y las tendencias. Una vez realizado este procedimiento se debe tener algo así:

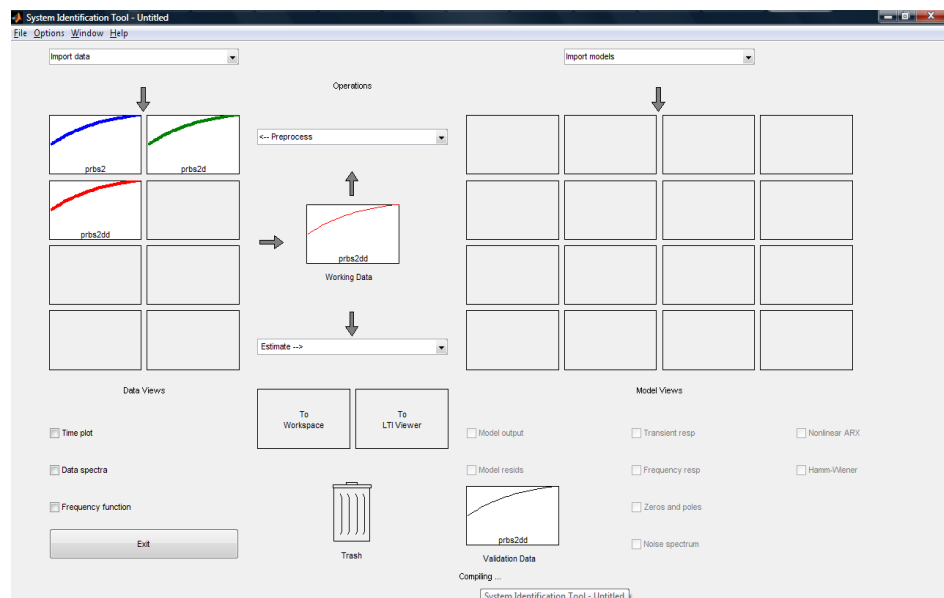


Figura 3.33 Señal sin media y sin tendencia.

Luego se estimara el modelo de correlación.

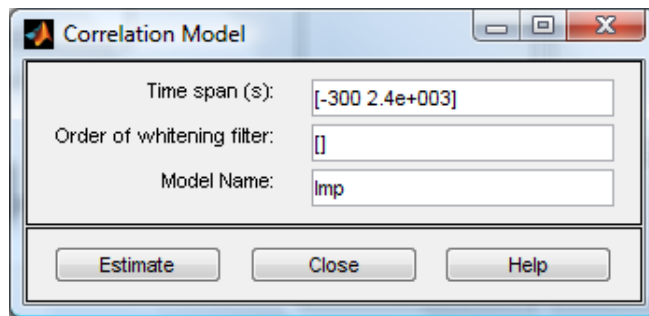


Figura 3.34 Ventana estimación modelo de correlación.

Como resultado se obtuvo la siguiente gráfica, de la cual se puede manifestar que en este caso específico la gráfica saldrá negativa debido a que el circuito electrónico utilizado, el pulso máximo se da cuando se envía una señal de 0V y a su vez el mínimo pulso se da cuando se envía una señal de 5V.

También se debe observar que la señal tiene una gran aproximación a la respuesta al escalón, ya que el tiempo de estabilización, el τ y el tiempo muerto son aproximados.

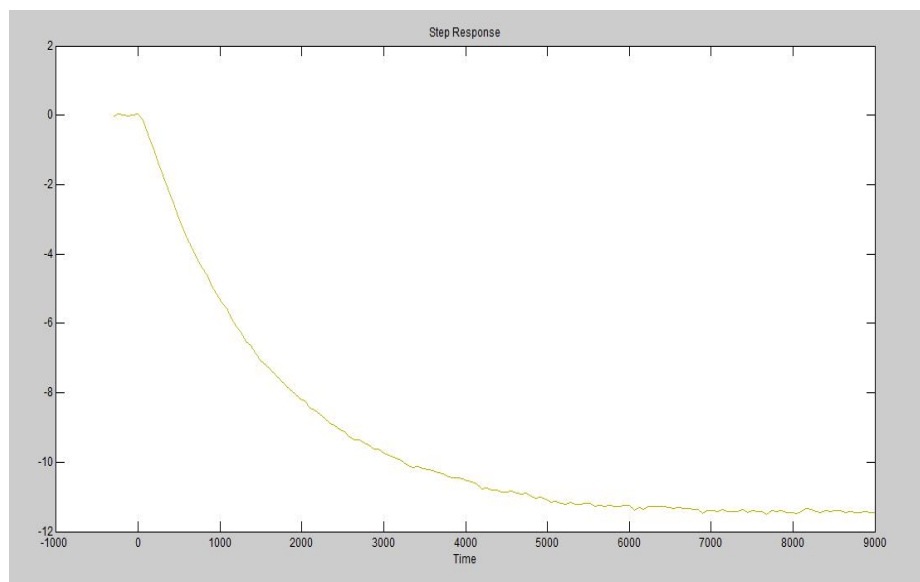


Figura 3.35 Gráfica respuesta modelo correlación.

Señal PRBS		
Iteración	Correlación cruzada	Respuesta al escalón
1	0.15	No aproximada
2	0.26	aproximada
3	0.12	No se aproxima
4	0.27	Muy aproximada
Señal Multisenso		
Iteración	Correlación cruzada	Respuesta al escalón
1		Inestable
2		Inestable
3		Inestable
4		Inestable

Tabla 3.3 Análisis diferentes señales de entrada.

Con este análisis que se realizó, claramente se puede concluir que la mejor señal que se obtuvo fue la cuarta. Los parámetros se muestran en las gráficas siguientes.

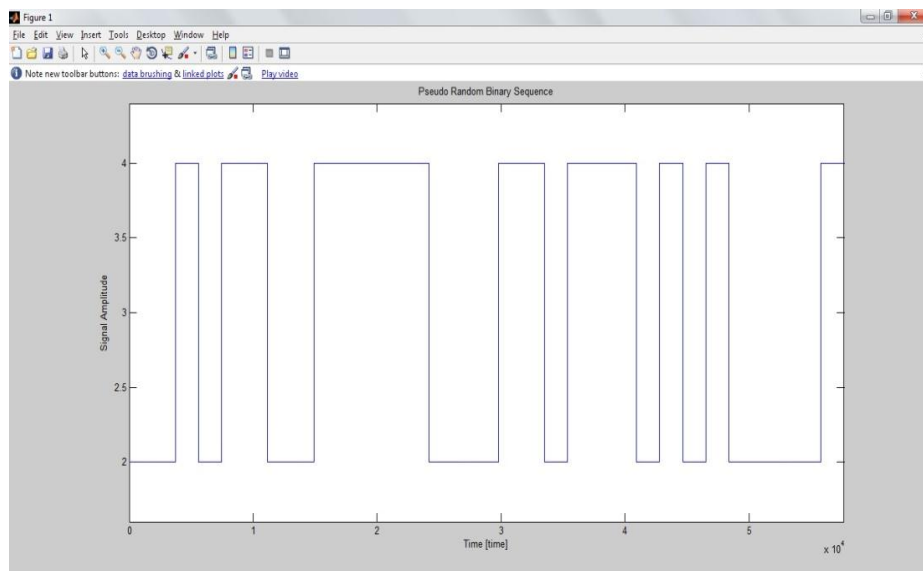


Figura 3.36 Gráfica señal prbs.

PRBS Design & Analysis Table

General Signal Specs

Sampling Time	60.000000
Initial Deadtime	0.000000
Final Deadtime	0.000000
Signal Amplitude	1.000000
Signal Bias	3.000000

Guideline Information

Hi Freq. Decision Alpha	2.000000
Lo Freq. Decision Beta	3.000000
Lo Estimate of Dominant Time Constant	1380.000000
Hi Estimate of Dominant Time Constant	1870.000000
Maximum Allowable Sampling Time	2167.698531
Low Frequency Limit [rad/time]	0.000178
High Frequency Limit [rad/time]	0.001449
Switching Time Limit	1918.200000
Shift Register Limit	4.244194

Signal Design

Sampling Time	60.000000
Switching Time	1860.000000
Number of Shift Registers	5.000000
Number of Cycles	1.000000
Low Frequency Attained [rad/time]	0.000109
High Frequency Attained [rad/time]	0.001495
Length of 1 Cycle	57660.000000

Done

Figura 3.37 Parámetros mejor señal prbs

Una vez que se obtuvo la mejor señal de entrada se procederá a realizar la identificación a través de los modelos paramétricos.

CAPITULO 4

4. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN

4.1 HERRAMIENTAS PARA EL PROCESO

En este capítulo se realiza la identificación, es decir se obtiene un modelo que represente al sistema. Es decir se busca la función de transferencia que represente al sistema. Al realizar la identificación se usó las herramientas que se explicaron en el capítulo 2.

La principal herramienta para la identificación es la usada anteriormente llamada ident. En el capítulo anterior se explica detalladamente como acceder a esta aplicación desde matlab.

4.2 OBTENCION Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos se los obtiene a través de la tarjeta de adquisición de datos, estos datos se los envía al espacio de trabajo de matlab. Una vez que se tienen los datos de la señal de entrada y salida, se procederá a ejecutar la aplicación ident.

Luego se importarán estas dos señales, a continuación se muestra la gráfica de la señal de entrada y salida.

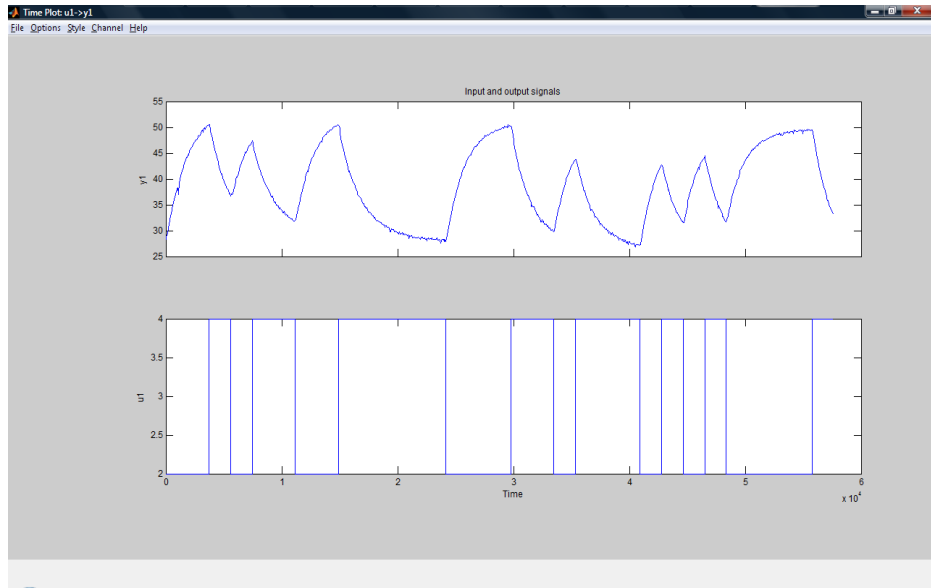


Figura 4.1 Gráfico señal de salida-entrada.

Estas señales deben ser tratadas, lo cual se denomina un pre-procesamiento de los datos, esto se debe a que existe la probabilidad que dichos datos no estén en condiciones de ser usados por algoritmos de identificación. Para ello primero se remueve la media, y las señales que se muestran a continuación.

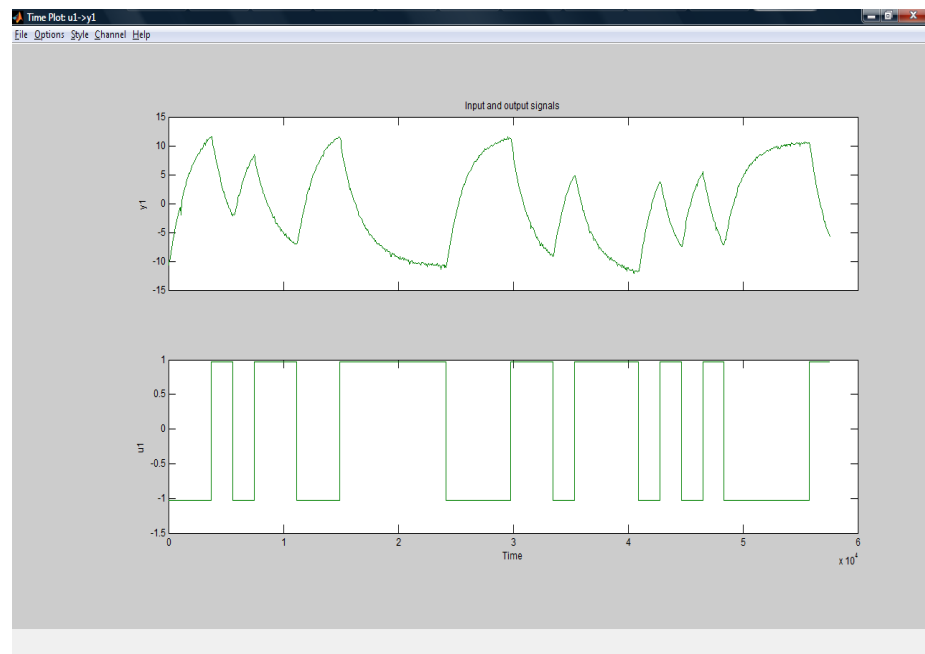


Figura 4.2 Señal con media removida.

Luego se remueve la tendencia, resultando la siguiente gráfica.

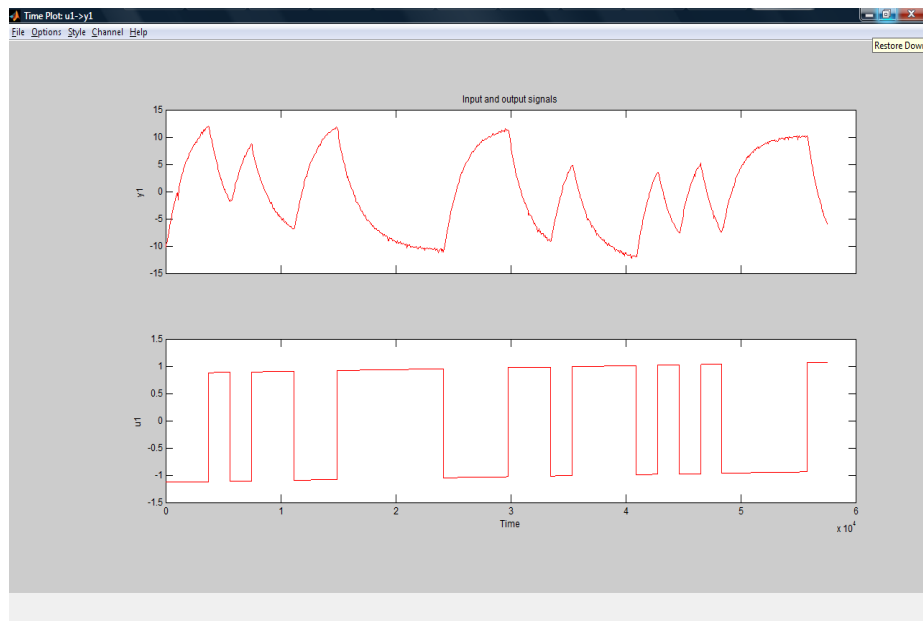


Figura 4.3 Señal con tendencia removida.

Por último se selecciona el 50% de los datos para encontrar el modelo paramétrico y el 50% de datos se usa para validar dicho modelo.

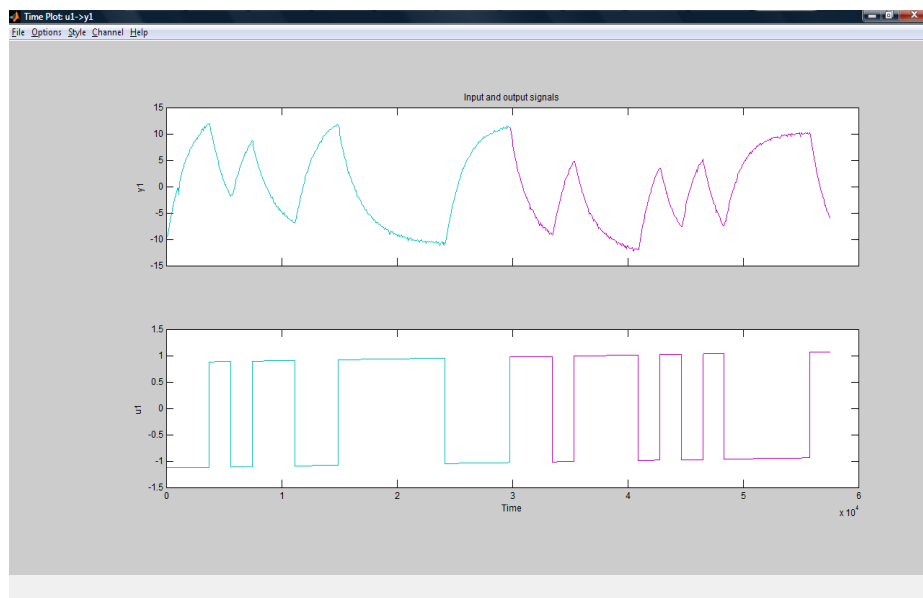


Figura 4.4 Selección del rango para estimación y validación.

Una vez que se realizó este pre-proceso la señal se encuentra lista para la identificación.

Para elegir el mejor método de parametrización de la planta se tomará en cuenta los siguientes criterios:

Modelo de Salida: Una vez que se tiene la función de transferencia esta se debe comparar con el porcentaje de similitud que esta tiene con el 30% de los datos de salida reales de la planta que fueron reservados para comprobar el modelo.

Análisis residual: Se lo denomina también error de predicción, diferencia el valor observado del valor estimado. La auto correlación residual de la salida nos permite conocer si los errores son independientes, la correlación cruzada para medir la intensidad y la dirección de la relación entre la salida y la entrada, junto con los intervalos de confianza para saber si se acepta el modelo como una buena descripción del sistema.

Intervalos de confianza: Los modelos de estimación presentan un grado de incertidumbre, que en los gráficos aparece marcada por líneas segmentadas, la región entre estos intervalos es la verdadera respuesta del sistema con 99% de confianza, mientras que la región restante da una respuesta incierta, razón por la cual se tomará el modelo cuya respuesta esté dentro de estos intervalos.

Respuesta al escalón: Es otro recurso para comprobar la validez del modelo ya que mediante la respuesta al escalón se puede determinar los parámetros T_s , K y τ , los mismos que se comparan con los parámetros de la respuesta al escalón real de la planta.

4.3 ANALISIS CON EL MODELO ARX

A este modelo se lo llama ARX, donde "AR" hace referencia a la parte autorregresiva y "X" a una entrada extra, además se recuerda que los modelos ARX están descritos por la siguiente ecuación:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + r(t)$$

Dentro de la interfaz gráfica "ident" aparece la siguiente ventana donde podemos elegir los valores de na , nb y nk para el modelo ARX.

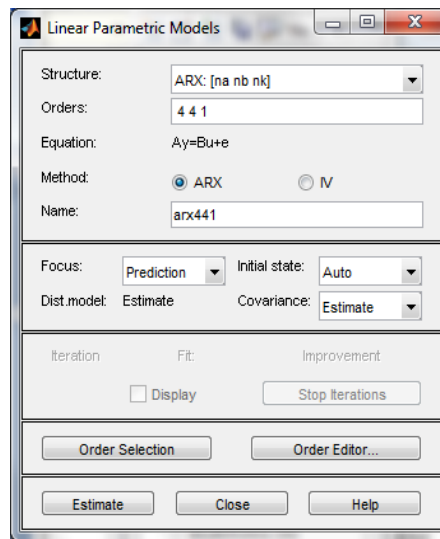


Figura 4.5 Ventana de ingreso parámetros modelo ARX

Una de las formas de escoger estos parámetros es obtener los parámetros del modelo con el mayor ajuste utilizando la opción order selection. En las gráficas siguientes se muestra cómo usar esta opción. Primero se debe seleccionar la opción que dice order selection, luego se le da clic en estimar y se obtiene la siguiente gráfica.

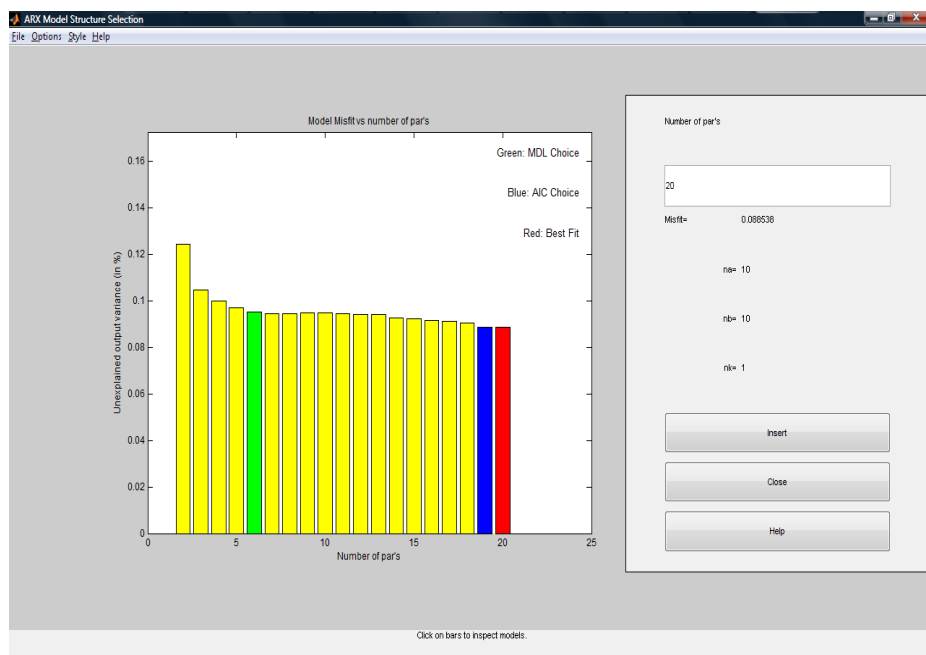


Figura 4.6 Selección del orden.

La barra roja indica los valores de los coeficientes que mejor se ajustan al modelo. La barra verde los coeficientes de alto orden y la azul para los de bajo orden.

Modelo	Porcentaje de similitud	Nivel de confianza
ARX:2,2,1	87.69%	Incertidumbre
ARX:10,10,1	87.83%	Incertidumbre
ARX:1,1,1	87.07%	Incertidumbre
ARX:3,2,1	87.46%	Incertidumbre
ARX:3,3,1	87.78%	Incertidumbre
ARX:3,4,1	87.85%	Incertidumbre
ARX:4,2,1	87.44%	Incertidumbre
ARX:4,4,1	87.78%	Incertidumbre
ARX:5,4,1	87.75%	Incertidumbre
ARX:6,4,1	87.76%	Incertidumbre
ARX:7,2,1	87.67%	Incertidumbre
ARX:7,4,1	87.79%	Incertidumbre
ARX:9,2,1	87.58%	Incertidumbre
ARX:4,4,2	87.56%	Incertidumbre
ARX:4,4,3	86.30%	Incertidumbre
ARX:1,2,1	88.25%	Incertidumbre
ARX:1,3,1	88.22%	Incertidumbre
ARX:1,4,1	88.26%	Incertidumbre
ARX:1,4,2	87.67%	Incertidumbre

Tabla 4.1 Porcentaje de similitud diferentes modelos ARX

De la tabla se puede decir que el modelo que tuvo más aproximación es el modelo ARX121. A continuación se realizara el análisis de este modelo.

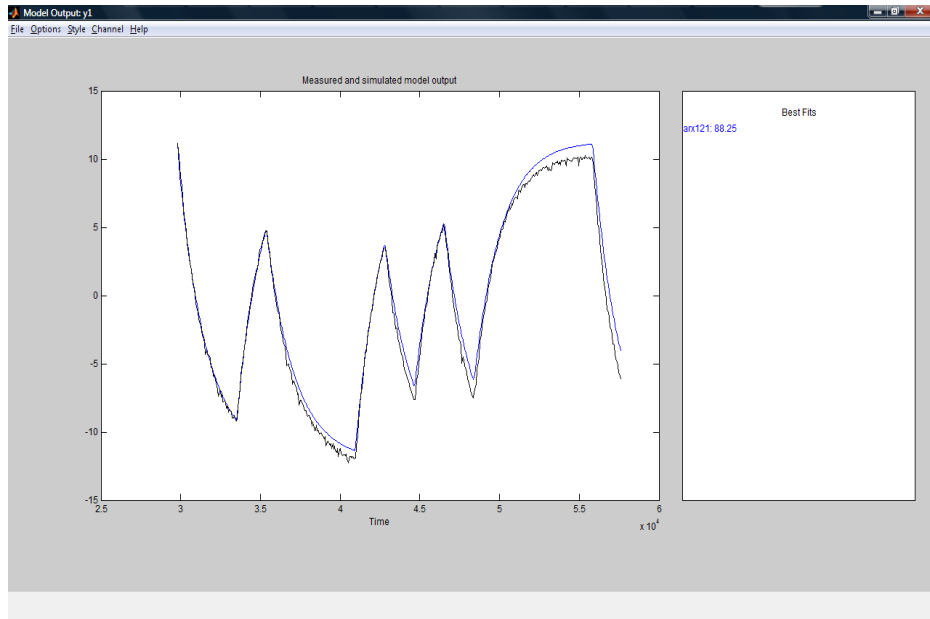


Figura 4.7 Gráfica del modelo de salida ARX121

En la gráfica anterior se puede observar claramente el porcentaje de similitud de la señal, pero no solo esta gráfica se debe tomar en cuenta, a continuación se muestra la señal de los intervalos de confianza.

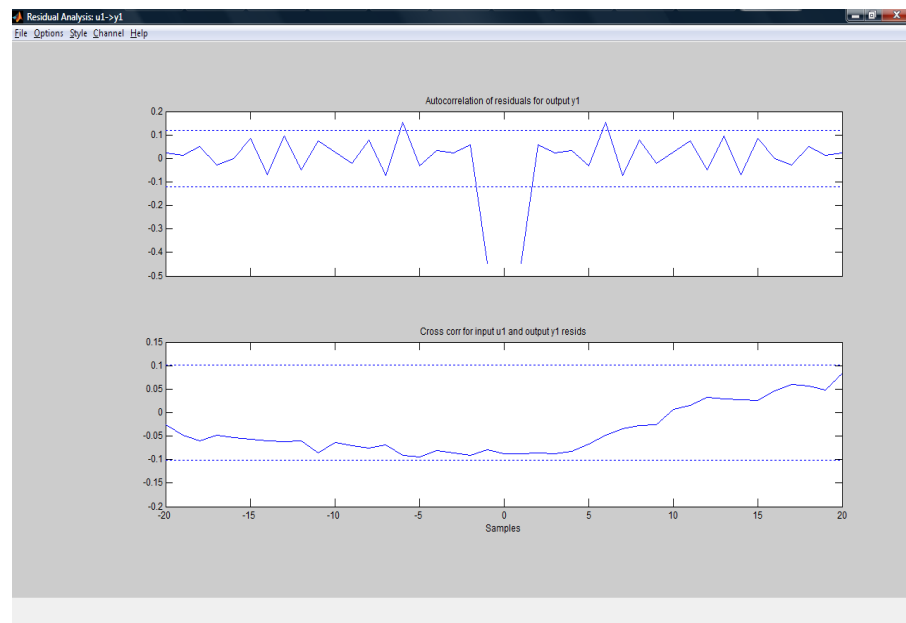


Figura 4.8 Análisis residual ARX 121

Aquí se puede observar que este modelo si se encuentra dentro de los intervalos de confianza, además de estos dos análisis realizados, se debe observar la gráfica de la respuesta del sistema.

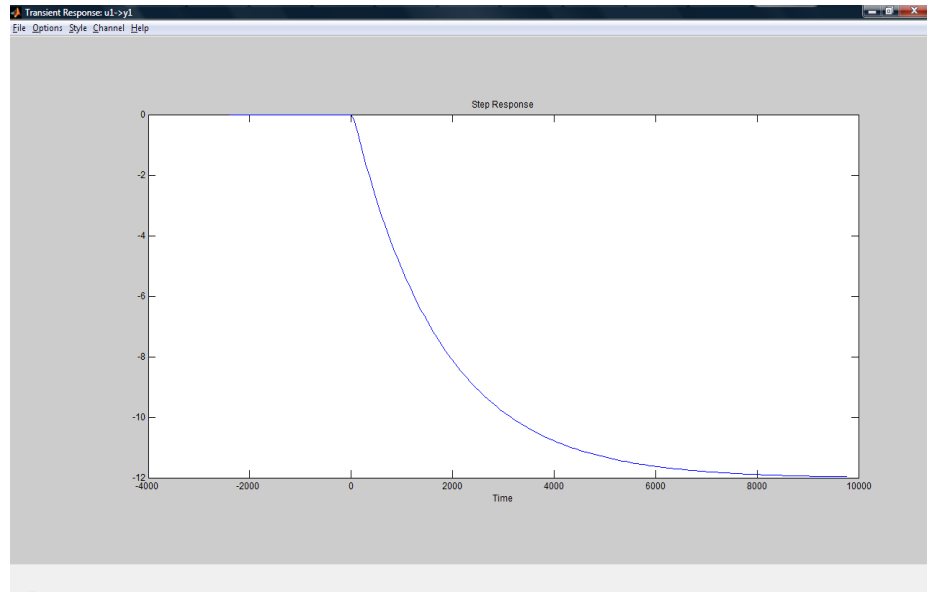


Figura 4.9 Respuesta modelo ARX121

De esta gráfica se puede observar muy claramente que es un poco aproximada la respuesta del modelo con la respuesta real del sistema. Una vez obtenido el mejor modelo ARX, se deberá probar con los otros modelos de la identificación paramétrica.

4.4 ANALISIS CON EL MODELO ARMAX

Su principal desventaja reside en la escasez o falta de libertad en la descripción del término de perturbación, sin embargo es posible incorporar mayor flexibilidad al agregar un término conocido como media móvil del ruido blanco. Recordemos que los modelos ARMAX están descritos por la siguiente ecuación:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)r(t)$$

En la siguiente pantalla se ingresan los parámetros del modelo:

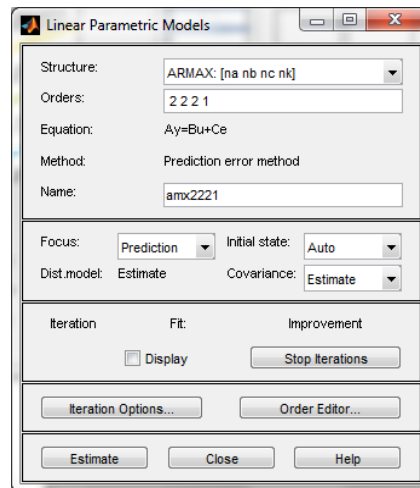


Figura 4.10 Ventana de ingreso de parámetros ARMAX

Este modelo es representado mediante los parámetros na, nb, nc y nk, la respuesta de este sistema no es exacta y la resolución se la hace mediante métodos iterativos.

Modelo	Porcentaje de similitud	Nivel de confianza
ARMAX:2.2.2.1	87.85%	Incertidumbre
ARMAX:3,3,3,1	91.15%	Incertidumbre
ARMAX:3,2,2,1	88.08%	Incertidumbre
ARMAX:2,2,2,2	87.64%	Incertidumbre
ARMAX:2,2,1,0	87.64%	Incertidumbre
ARMAX:2,2,4,1	87.95%	Incertidumbre
ARMAX:3,3,1,0	87.73%	Incertidumbre
ARMAX:3,3,2,1	90.97%	Incertidumbre
ARMAX:2,1,2,0	87.72%	Incertidumbre
ARMAX2,1,3,2	87.59%	Incertidumbre
ARMAX:1,1,3,1	87.00%	Incertidumbre
ARMAX:1,2,3,1	87.81%	Incertidumbre
ARMAX:2,3,2,3	86.27%	Incertidumbre
ARMAX:3,2,2,3	86.33%	Incertidumbre

Tabla 4.2 Porcentaje de similitud diferentes modelos ARMAX

Para este modelo paramétrico podemos observar que el modelo ARMAX3331 tiene una mayor similitud, pero este modelo no tiene una señal estable, a continuación se mostrarán las gráficas del análisis realizado.

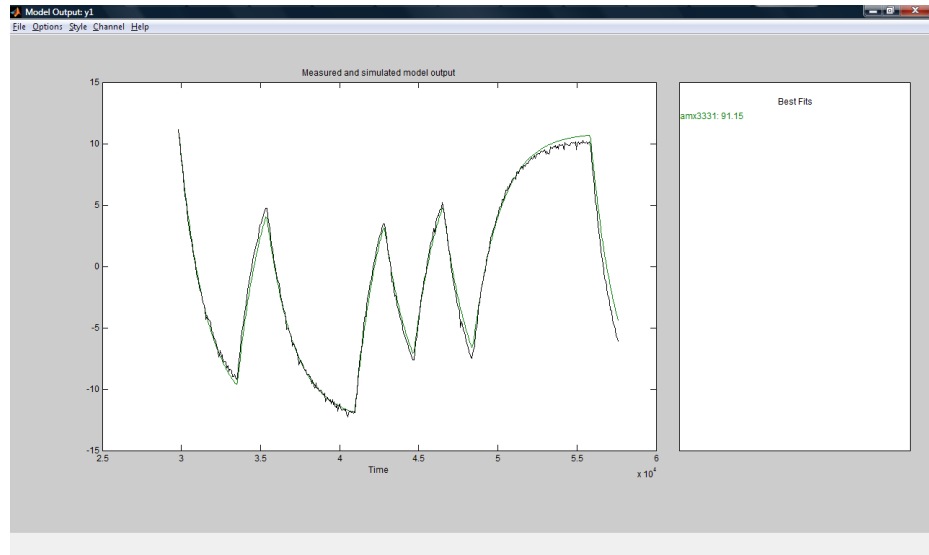


Figura 4.11 Señal de salida del modelo ARMAX3331

En la gráfica del análisis residual se demostrará que la correlación cruzada sale un poco de los intervalos de confianza.

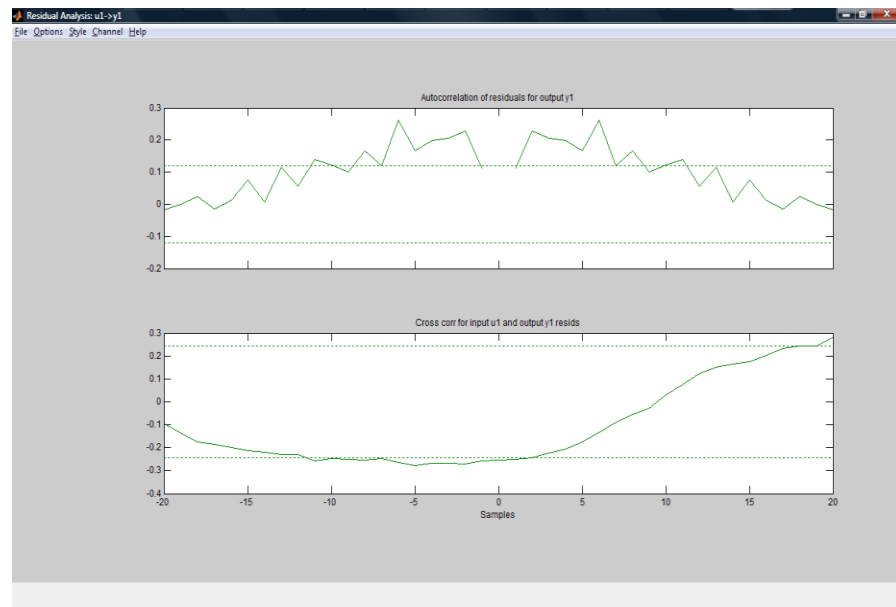


Figura 4.12 Análisis residual modelo ARMAX3331

Como se puede observar la gráfica del análisis de residuos la señal sobrepasa los límites de los intervalos de confianza, con lo que se puede observar claramente que este no sería un buen modelo a seleccionar.

Finalmente se obtiene la gráfica de la respuesta del modelo en la cual se puede observar claramente que este modelo no se asemeja al sistema real.

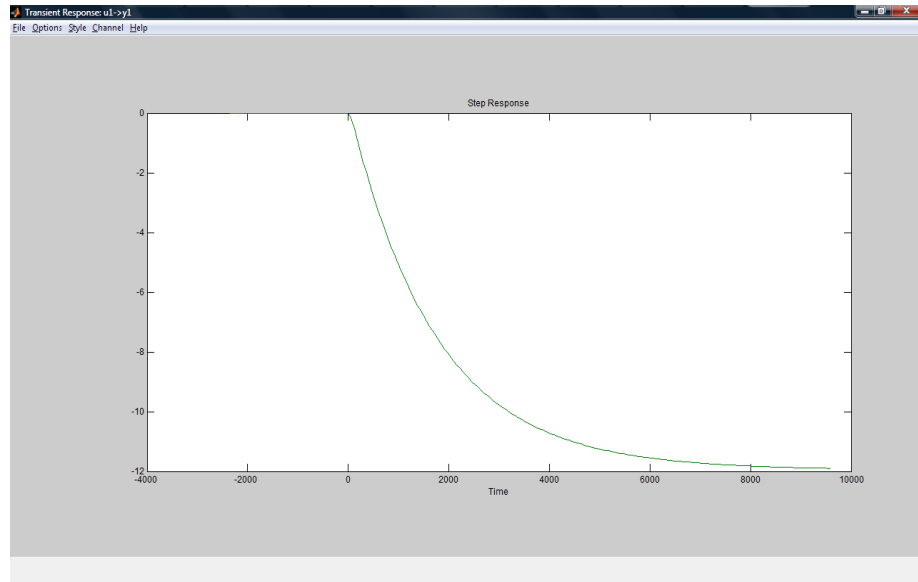


Figura 4.13 Respuesta al modelo ARMAX3331

En la gráfica de la respuesta del sistema se obtiene una buena aproximación con la gráfica obtenida del cra.

Debido a que este no es un buen modelo para el sistema se debe proceder a seguir con la identificación, estimando con el siguiente modelo paramétrico.

4.5 ANALISIS CON EL MODELO OE

Los modelos OE están descritos por la siguiente ecuación:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + r(t)$$

En la siguiente ventana se ingresan los parámetros $[nb \ nf \ nk]$ para el modelo de error de salida.

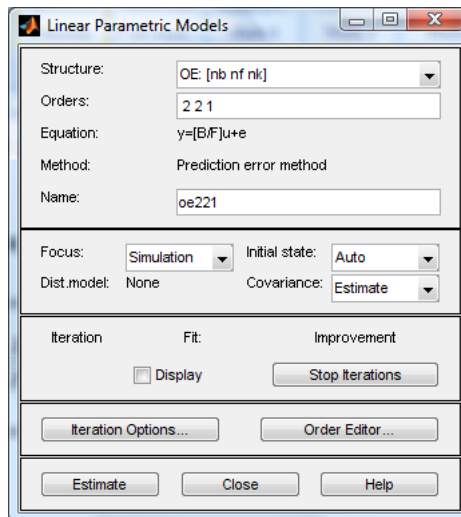


Figura 4.14 Ventana de ingreso de parámetros modelo OE

En el modelo OE se parametriza a la entrada y el ruido por separado, ya que los coeficientes únicamente se asignan a la entrada, mas no al error, debido a esto una planta con alto nivel de ruido tendría inconvenientes al usar este modelo.

Modelo	Porcentaje de similitud	Nivel de confianza
OE:2,2,1	91.42%	Incertidumbre
OE:3,2,1	84.54%	Incertidumbre
OE:3,3,1	92.09%	Incertidumbre
OE:3,3,2	92.03%	Incertidumbre
OE:3,2,1	84.54%	Incertidumbre
OE:4,3,1	92.13%	Incertidumbre
OE:4,3,2	84.87%	Incertidumbre
OE:4,4,2	92.70%	Incertidumbre
OE:4,4,3	90.45%	Incertidumbre
OE:5,4,3	85.13%	Incertidumbre
OE:5,4,1	92.10%	Incertidumbre
OE:6,4,2	50.00%	Incertidumbre
OE:6,4,4	89.99%	Incertidumbre
OE:7,2,4	86.93%	Incertidumbre
OE:7,5,4	90.29%	Incertidumbre
OE:7,6,4	90.62%	Incertidumbre

Tabla 4.3 Porcentaje de similitud diferentes modelos OE

Para este modelo paramétrico se puede observar que el modelo OE442 tiene una mayor similitud, pero este modelo no tiene una señal estable, a continuación se mostrarán las gráficas del análisis realizado.

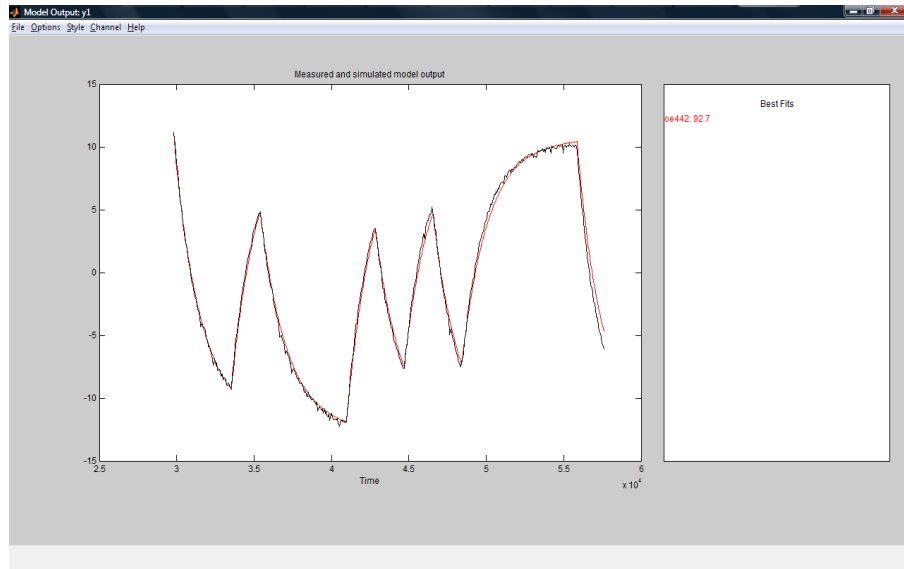


Figura 4.15 Señal de salida del modelo OE442

En la gráfica anterior se muestra el porcentaje de similitud, se observa que es de 92.70% lo cual si es un valor alto, pero debido a la gráfica que se muestra a continuación del análisis de residuo se descartará este modelo ya que la señal sale de los intervalos de confianza.

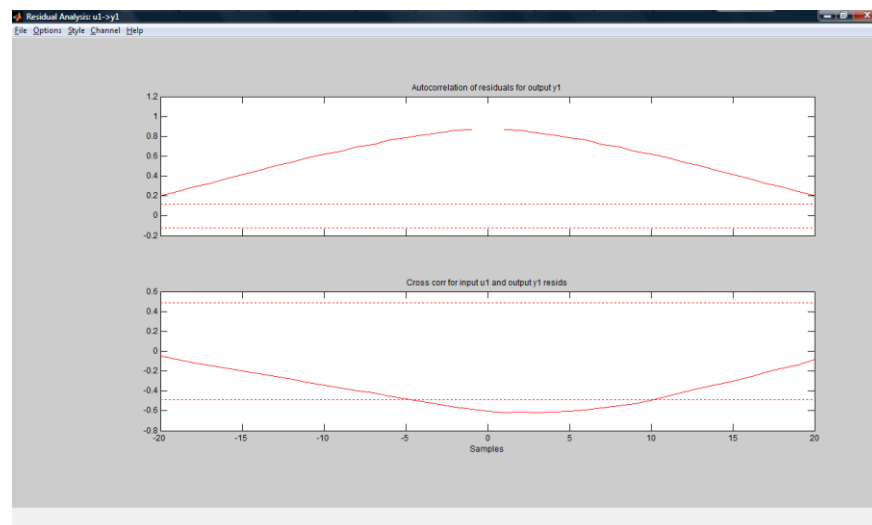


Figura 4.16 Análisis residual modelo OE442

Finalmente se obtiene la gráfica de la respuesta del modelo la cual se puede observar claramente que este modelo no se asemeja al sistema real.

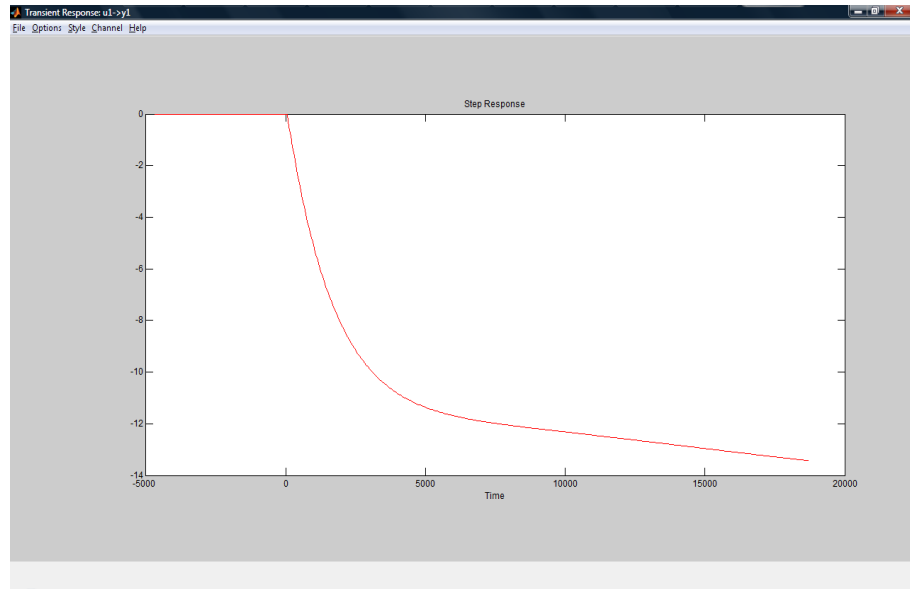


Figura 4.17 Señal de salida modelo OE442

De esta gráfica se concluye que el modelo no es bueno ya que por el análisis de residuos sale la señal de los intervalos de confianza y porque la respuesta del sistema no tiene una gran aproximación con la respuesta al análisis de correlación realizado mediante el cra. Debido a estos criterios se procede con la identificación.

4.6 ANALISIS CON EL MODELO BJ

Los modelos BJ están descritos por la siguiente ecuación:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}r(t)$$

En la siguiente ventana se ingresa los parámetros para el modelo BJ.

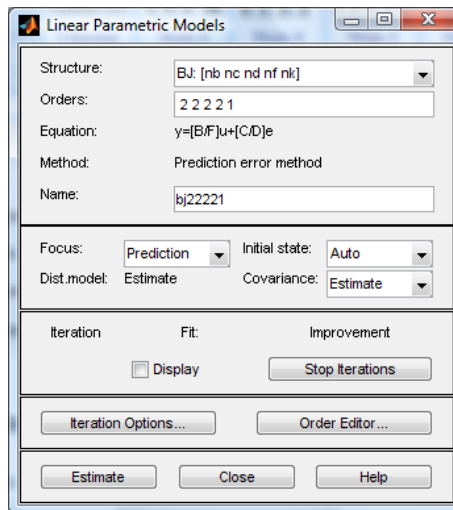


Figura 4.18 Ventana de parámetros del modelo BJ.

El modelo BJ presenta grandes ventajas: Tiene solamente en cuenta la pauta de serie de tiempo del pasado. Ignora la información de variables causales. Utiliza la observación más reciente como valor inicial.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los resultados de los obtenidos de las diferentes pruebas.

Modelo	Porcentaje de similitud	Nivel de confianza
BJ:2,2,2,2,1	88.25%	Incertidumbre
BJ:3,2,2,2,1	88.18%	Incertidumbre
BJ:3,3,2,2,1	88.56%	Incertidumbre
BJ:3,3,2,2,0	88.25%	Incertidumbre
BJ:2,3,2,2,1	88.25%	Incertidumbre
BJ:2,2,3,3,1	88.27%	Incertidumbre
BJ:3,3,3,4,1	88.25%	Incertidumbre
BJ:2,2,3,1,1	88.18%	Incertidumbre
BJ:2,2,3,2,1	88.24%	Incertidumbre
BJ:2,3,3,2,0	88.35%	Incertidumbre
BJ:3,4,3,2,0	88.24%	Incertidumbre
BJ:3,3,3,4,0	88.24%	Incertidumbre
BJ:2,2,3,4,0	88.29%	Incertidumbre
BJ:3,3,3,3,1	88.25%	Incertidumbre
BJ:3,2,3,3,1	88.54%	Incertidumbre
BJ:1,1,1,1,1	87.20%	Incertidumbre

Tabla 4.4 Porcentaje de similitud diferentes modelos BJ

Para este modelo paramétrico podemos observar que el modelo BJ33221 tiene una mayor similitud, pero este modelo no tiene una señal estable, a continuación se muestran las gráficas del análisis realizado.

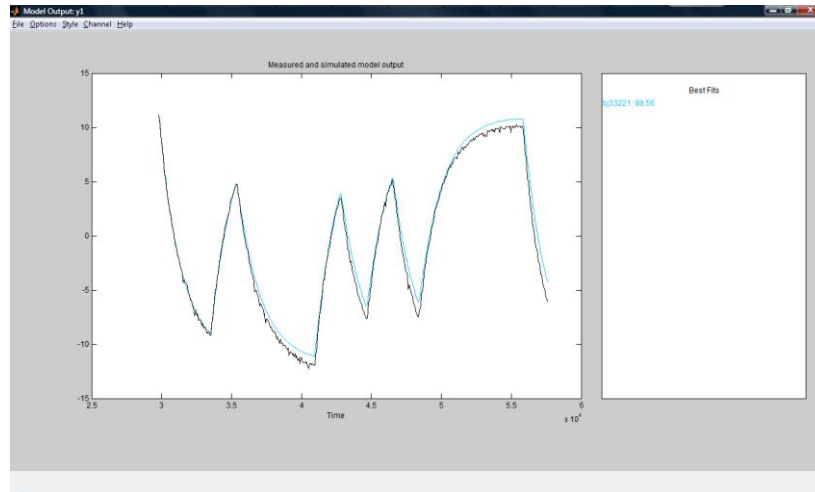


Figura 4.19 Señal de salida del modelo BJ33221

En la gráfica anterior se muestra el porcentaje de similitud, se observa que es de 85.56% lo cual es un valor aceptable, pero debido a la gráfica que se muestra a continuación del análisis de residuo se descarta este modelo ya que la señal sale de los intervalos de confianza.

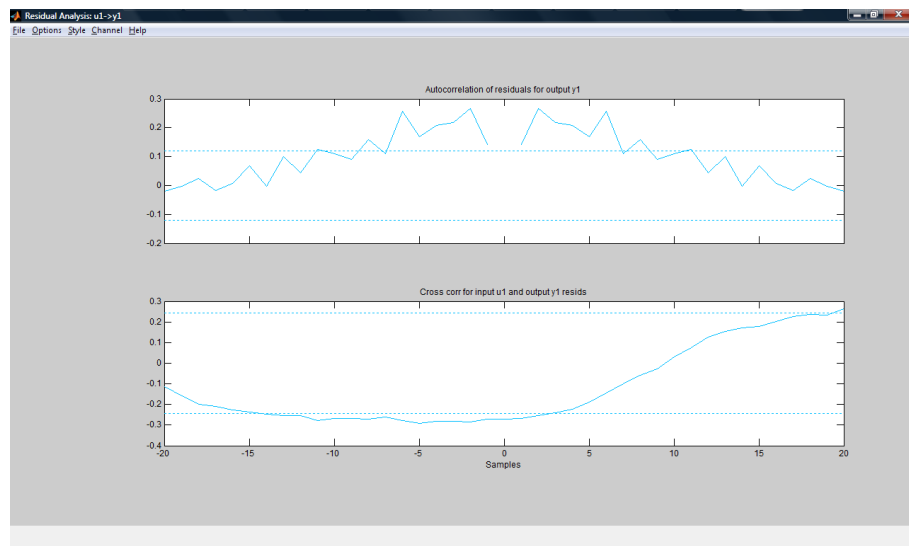


Figura 4.20 Análisis residual modelo BJ33221

Finalmente se obtiene la gráfica de la respuesta del modelo la cual se puede observar claramente que este modelo se asemeja al sistema real.

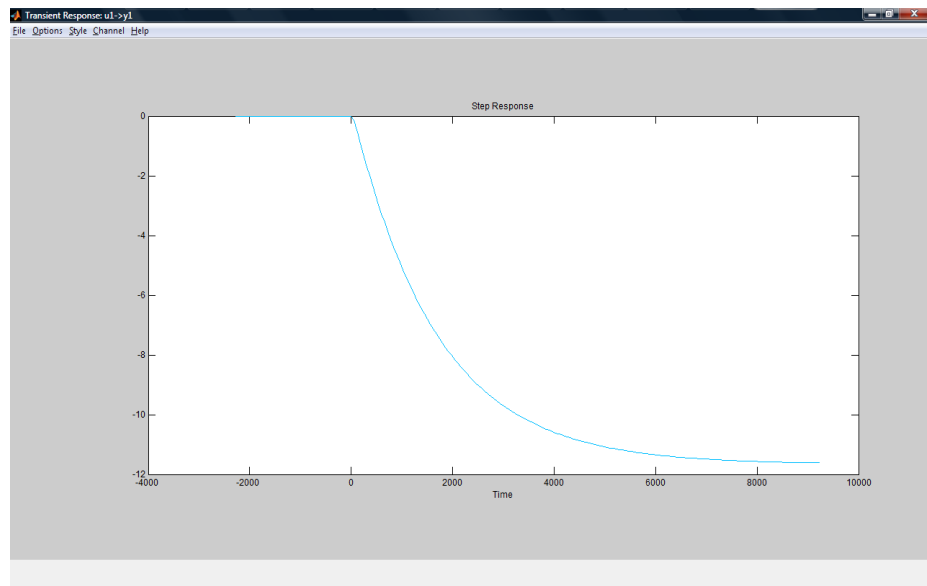


Figura 4.21 Respuesta del modelo BJ33221

Una vez realizado esta comparación con los modelos paramétricos se procede a realizar la comparación de los resultados de cada modelo para finalmente poder tomar una decisión de cuál es el modelo que más representa al sistema que se le está aplicando la identificación.

4.7 COMPARACION DE LOS MODELOS

En la tabla que se muestra a continuación se describen los mejores resultados obtenidos de las cuatro modelos analizadas.

NOMBRE DEL MODELO	PORCENTAJE DE APROXIMACION	COMENTARIOS
ARX121	81.25%	Esta es una muy buena aproximación debido a que se encuentra dentro de los intervalos de confianza, tiene un porcentaje de similitud aceptable y la respuesta a esta señal es semejante a la del

		sistema real.
ARMAX3331	91.15%	Este modelo tiene un porcentaje de similitud elevado, pero la señal sale de los intervalos de confianza. Tiene una buena aproximación a la respuesta del sistema.
OE442	92.70%	Este modelo tiene un porcentaje de similitud elevado, pero la señal sale de los intervalos de confianza. No tiene una buena aproximación a la respuesta del sistema.
BJ33221	85.56%	Este modelo tiene un porcentaje de similitud aceptable, pero la señal sale de los intervalos de confianza. Tiene una buena aproximación a la respuesta del sistema.

Tabla 4.5 Análisis de los resultados obtenidos

Debido al análisis anterior el mejor modelo de aproximación fue el ARX121 el cual no tiene el mayor porcentaje, pero debido a que se asemeja a la respuesta real del sistema. Además que la frecuencia de corte es muy aproximada a la real. Y por último este modelo se encuentra dentro de los intervalos de confianza.

4.8 OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

La función del modelo ARX121 es discreta, ahora hay que transformar a continua mediante el comando "d2c" de MATLAB, con lo cual obtenemos la función de la planta:

$$G(s) = \frac{0.1179s^2 + 0.007858s + 0.000158}{s^2 + 0.03391s + 1.912e^{-005}}$$

Una vez que se obtiene la función de transferencia se debe realizar una pequeña comprobación, para esto se ejecuta el siguiente archivo en simulink.

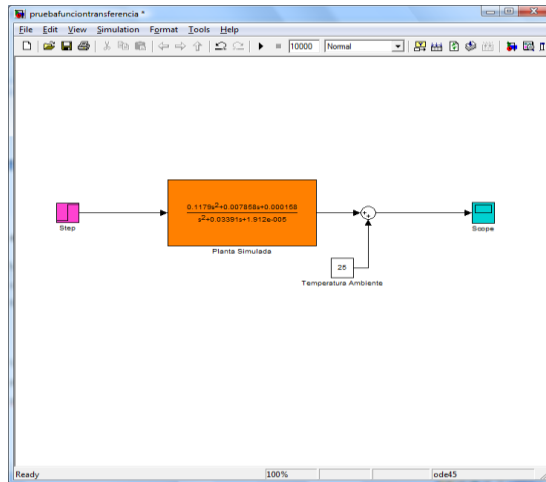


Figura 4.22 Función de transferencia en simulink

Aquí se puso a prueba la función de transferencia a una entrada escalón de 2V, se debe recordar que esta prueba está en lazo abierto.

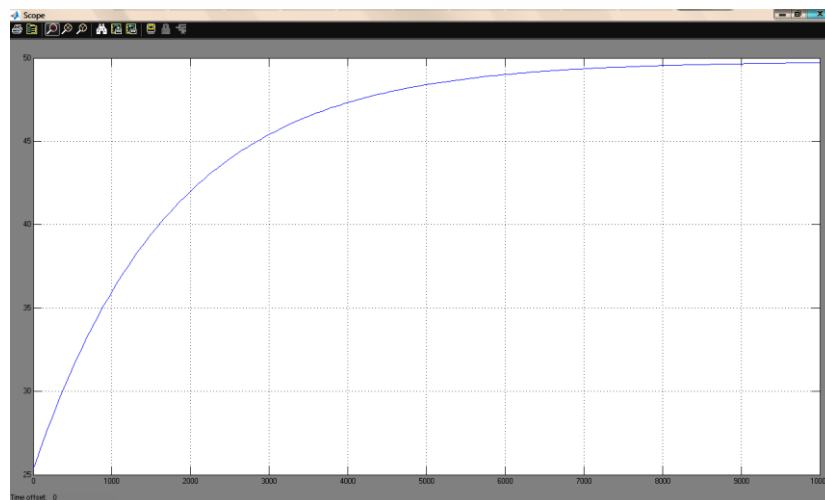


Figura 4.23 Respuesta al escalón de función de transferencia.

Con esta grafica se confirma que la función de transferencia que se obtuvo es muy aproximada al sistema real, por lo tanto con esto se procederá en el siguiente capítulo al diseño del controlador

CAPITULO 5

5 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, existen diferentes tipos de controladores, entre los más conocidos tenemos on/off, PID, entre otros.

Se elegirá un controlador PID, en este caso es muy importante determinar las constantes, para que dicho controlador sea eficiente.

A continuación se muestra un diseño básico de un sistema en lazo cerrado usando un controlador.

El principal objetivo de un controlador o de tener un sistema en lazo cerrado es que de esta manera se puede mantener variables en valores establecidos.

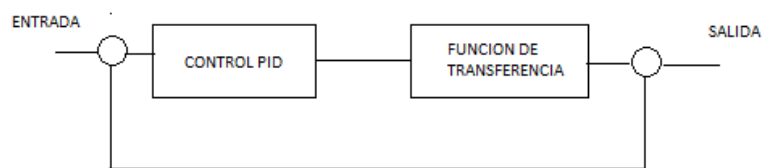


Figura 5.1 Circuito en lazo cerrado.

Un controlador PID tiene como ecuación general la siguiente:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (34)$$

Existen diversos métodos para poder obtener sus constantes.

- Método de Ziegler – Nichols.
- Método de Cohen – Coon.
- Método del Relé.
- Método ITAE.

5.1 OBJETIVO DEL CONTROLADOR A DISEÑAR

Como ya se explicó, el principal objetivo del controlador es de alcanzar un resultado en el menor tiempo posible. Se requiere un control de temperatura del agua que por convección se transfiere ese calor al chocolate a través de una chaqueta para un sistema de bañado de galletas con chocolate.

El control que se diseñará deberá mantener una temperatura constante del agua a 35 grados aproximadamente, debido a que si no se tuviera este proceso al momento de realizar el bañado de las galletas, el chocolate podría endurecerse y obstruir el flujo por las tuberías.

Otro de los objetivos del controlador es que permita alcanzar la temperatura deseada en un tiempo menor que en lazo abierto, el tiempo de estabilización deseado debe ser aproximadamente la mitad del tiempo de estabilización en lazo abierto. El sobre nivel porcentual no debe ser mayor al 8%. Cumpliendo estos objetivos se logra que las galletas sean bañadas con rapidez, para que puedan ir al siguiente proceso que es el túnel de enfriamiento.

5.2 PARAMETROS EN LAZO ABIERTO

Antes de aplicar cualquier de los métodos mencionados anteriormente para la obtención del controlador. Se debe analizar el comportamiento a partir de la gráfica o respuesta a una señal de entrada en lazo abierto, en este caso en particular se lo realizará con una entrada escalón de 2V.

Una vez obtenidos la gráfica, se procederá a realizar el método de la tangente para obtener los parámetros que se necesitaran para aplicar el método de Ziegler - Nichols, Cohen –Coon y método Itae.

La gráfica siguiente se observará claramente cuáles son los parámetros que se necesitan para el análisis.

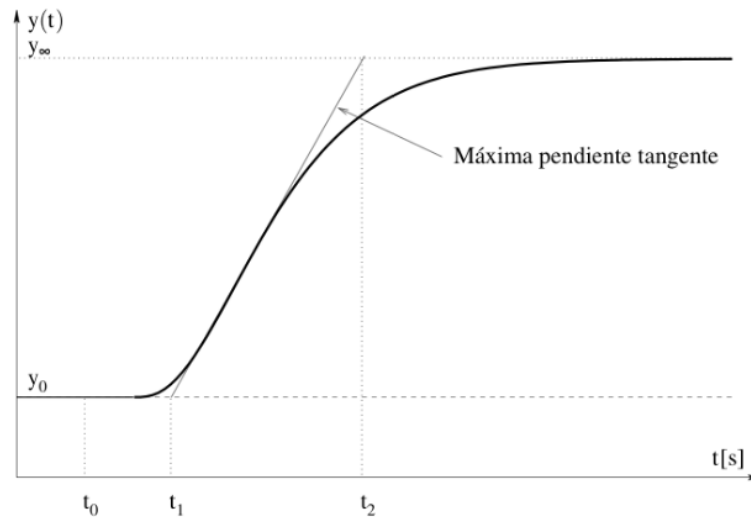


Figura 5.2 Método de la tangente.

En la siguiente grafica se podrá observar cuales son los valores de estos parámetros. Debemos tener en cuenta lo siguiente:

$$\theta_o = t_1 - t_0 \quad (35)$$

$$\tau(s) = t_2 - t_1 \quad (36)$$

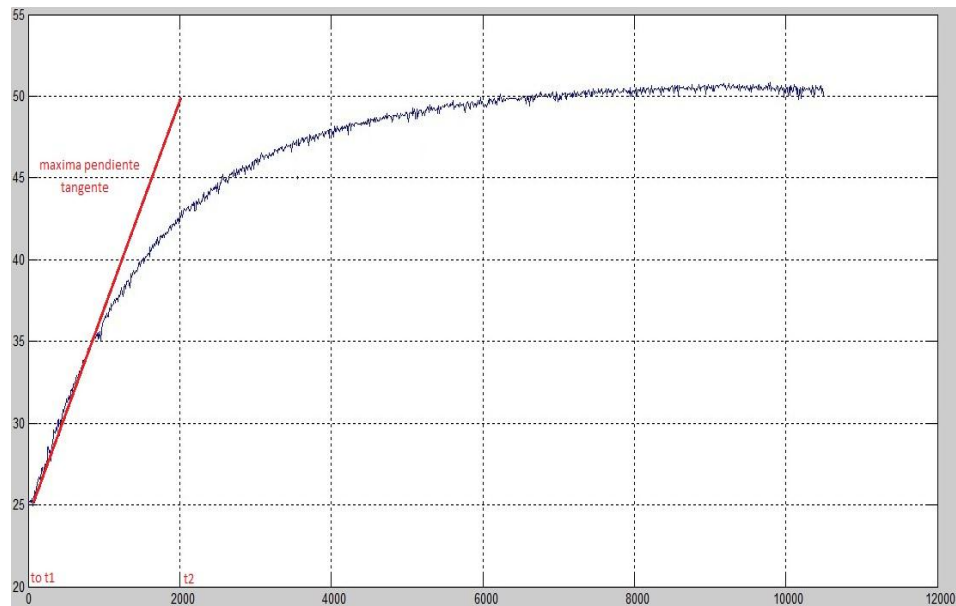


Figura 5.3 Respuesta al escalón.

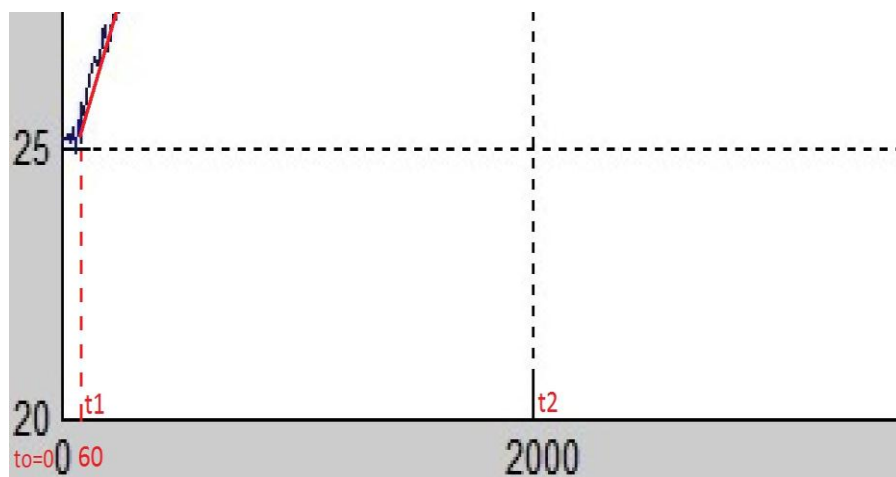


Figura 5.4 tiempo muerto.

De la gráfica anterior se obtiene:

K	τ (s)	θ_0 (s)
24.5	1940	60

TABLA 5.1 Parámetros respuesta al escalón.

5.3 ANALISIS POR METODO ZIEGLER – NICHOLS

Existen dos métodos de Ziegler – Nichols que pretenden obtener una relación de decaimiento del 25%, o sea que el error en estado estable decaiga la cuarta parte de un periodo de oscilación.

Con la ayuda de la respuesta del sistema en lazo abierto, Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$K_p = 1.2 \left(\frac{\tau}{K(\theta_o)} \right)$$

$$K_i = 2(\theta_o)$$

$$K_d = 0.5(\theta_o)$$

Reemplazando los valores en estas ecuaciones da como resultado lo siguiente:

$$K_p = 28.8 \quad K_i = 120 \quad K_d = 30$$

5.4 ANALISIS POR METODO COHEN-COON.

Este método también utiliza los parámetros del sistema en lazo abierto. Cohen y Coon sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo a las ecuaciones siguientes.

$$K_p = \frac{\tau}{K(\theta_o)} \left(\frac{16\tau + 3\theta_o}{12\tau} \right)$$

$$K_i = \theta_o \left(\frac{32\tau + 6\theta_o}{13\tau + 8\theta_o} \right)$$

$$K_d = \frac{4\theta_o\tau}{11\tau + 2\theta_o}$$

Reemplazando los valores en estas ecuaciones da como resultado lo siguiente:

$$K_p = 1.316 \quad K_i = 145.125 \quad K_d = 21.65$$

5.5 ANALISIS POR MÉTODO ITAE.

Con la ayuda de la respuesta del sistema en lazo abierto, se sugiere establecer los valores de K_p , K_i y K_d . Se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$Kp = \frac{0.965 \left(\frac{\theta_0}{\tau}\right)^{-0.81}}{K}$$

$$Ki = \frac{\tau}{0.796 - 0.1465 \left(\frac{\theta_0}{\tau}\right)}$$

$$Kd = 0.308\tau \left(\frac{\theta_0}{\tau}\right)^{0.929}$$

Reemplazando lo valores en estas ecuaciones da como resultado lo siguiente:

$$Kp = 0.586 \quad Ki = 1823.025 \quad Kd = 23.1577$$

5.6 ANALISIS POR SISOTOOL.

Al momento de realizar el análisis por sisotool, primero se debe ingresar la función de transferencia al workspace de matlab. Una vez que se realice el paso anterior, se debe proceder a ejecutar el comando sisotool. En ese momento debe aparecer la siguiente ventana.

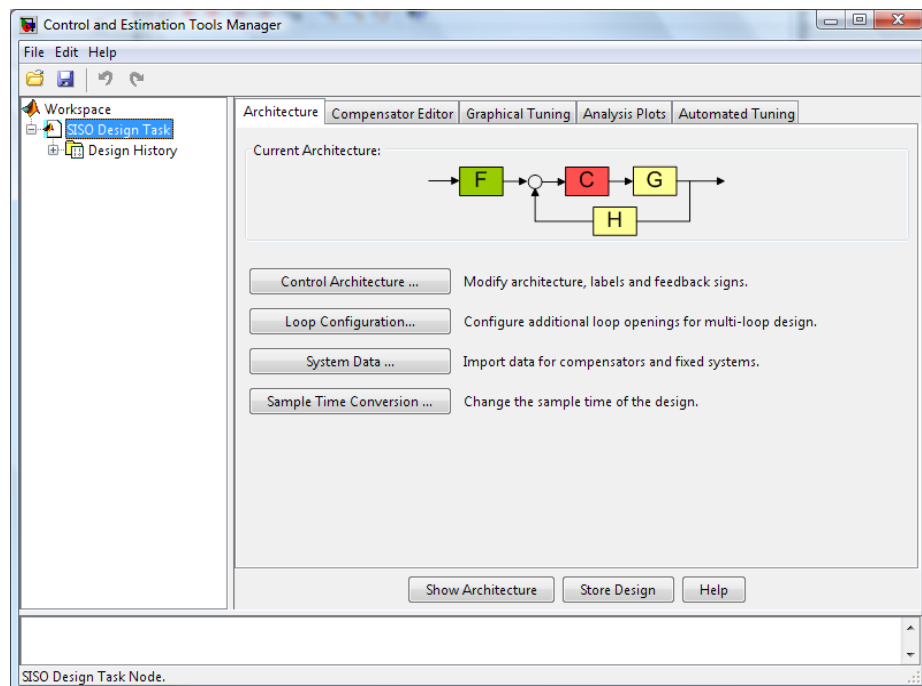


Figura 5.5 Ventana sisotool.

A través de esta ventana se puede tranquilamente añadir polos y ceros a un controlador PID, o bien directamente a la función de transferencia, al momento de ejecutar el comando sisotool este por defecto muestra la gráfica del lugar geométrico de las raíces y las gráficas de la respuesta de frecuencia del sistema en lazo cerrado.

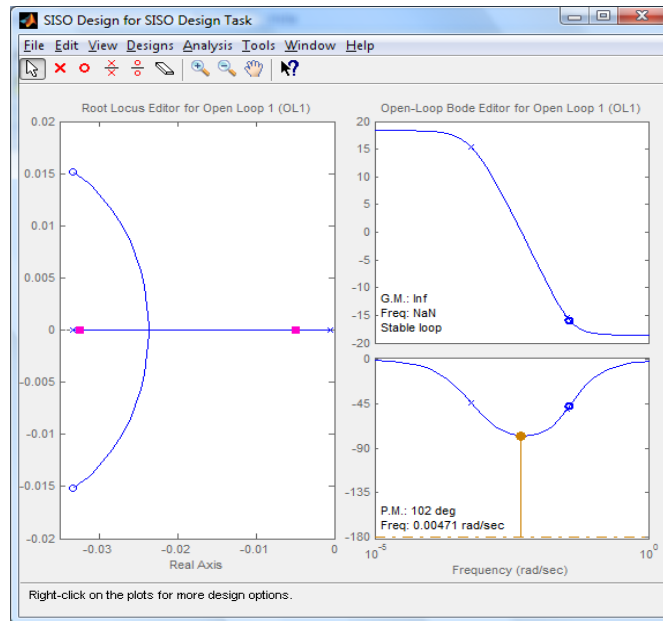


Figura 5.6 Lugar geométrico de las raíces.

Aquí por medio de la aplicación sisotool se añadirá un integrador y un real zero, se tratara de elegir la mejor ubicación de ellos, siempre y cuando observando el análisis de respuesta en el tiempo.

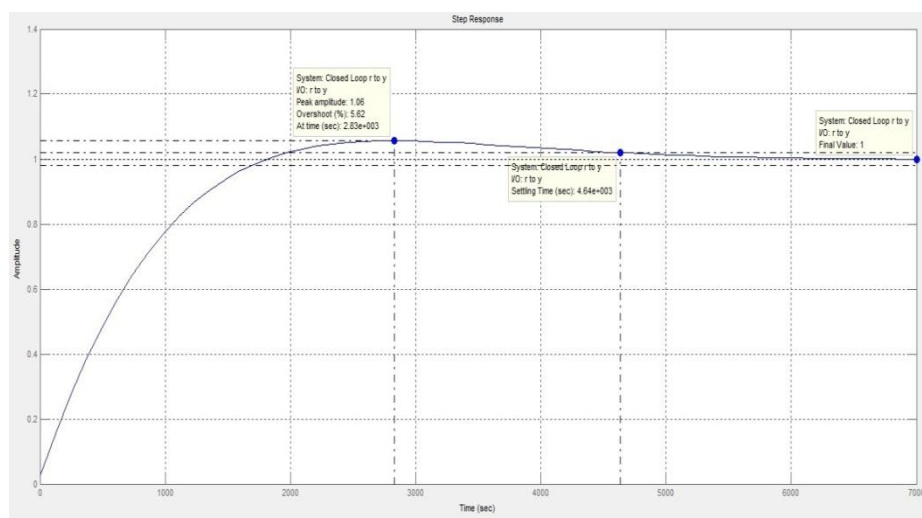


Figura 5.7 Respuesta del controlador.

En el gráfico anterior se puede observar que se elige el tiempo de estabilización y el sobre nivel porcentual deseado. Una vez escogido el controlador se lo simulará en simulink para ver cómo responde a la función de transferencia que se obtuvo del proceso de la identificación.

Como resultado se obtuvo la siguiente función de transferencia del controlador:

$$G_c = \frac{0.2457s + 0.0002457}{s}$$

5.7 CONCLUSIONES DEL CONTROLADOR

Los métodos aplicados anteriormente para el diseño de controladores PID no son tan eficaces. Por esta razón se decidió utilizar el controlador que resultó del análisis del lugar geométrico de las raíces. Ya que mediante este método se puede ubicar los polos y ceros en la posición que uno desea, para poder ir viendo en la gráfica cómo será la respuesta del sistema. En otras palabras por medio del método de sisotool se pueden diseñar varios controladores dependiendo de cuanto sobre nivel porcentual y tiempo de estabilización se desee.

Se observa que cuando se desea obtener un controlador que actué más rápido se obtiene un alto sobrenivel porcentual, en cambio cuando este es menor se obtiene un tiempo de estabilización mayor.

Por otro lado si se quisiera obtener una respuesta más rápido, lo más recomendable sería subir la potencia de la resistencia, debido a que hay que tener en cuenta la dinámica del proceso, para así al momento de diseñar el controlador por el método de las raíces se pueda obtener un tiempo de estabilización menor.

El controlador es estable, no presenta oscilaciones, lo que sí se observó es que para este tipo de control hay un sobre nivel, esto se debe a que en todo proceso térmico está presente la temperatura residual.

5.8 SIMULACION DEL CONTROLADOR.

Una vez que se obtuvo la ganancia del controlador se procedió a realizar la simulación del mismo a través de simulink. De esta manera se trata de comprobar la reacción del controlador al sistema.

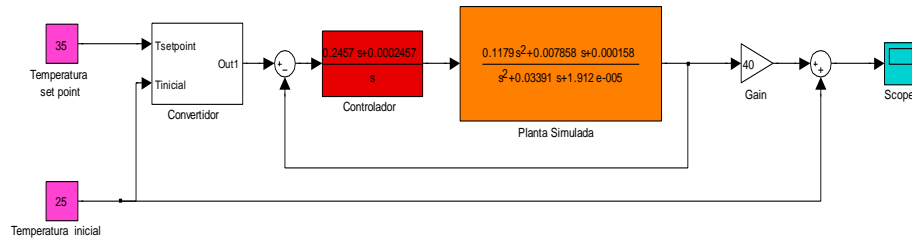


Figura 5.8 Simulación del controlador.

Mediante esta simulación se obtuvo la siguiente grafica como resultado:

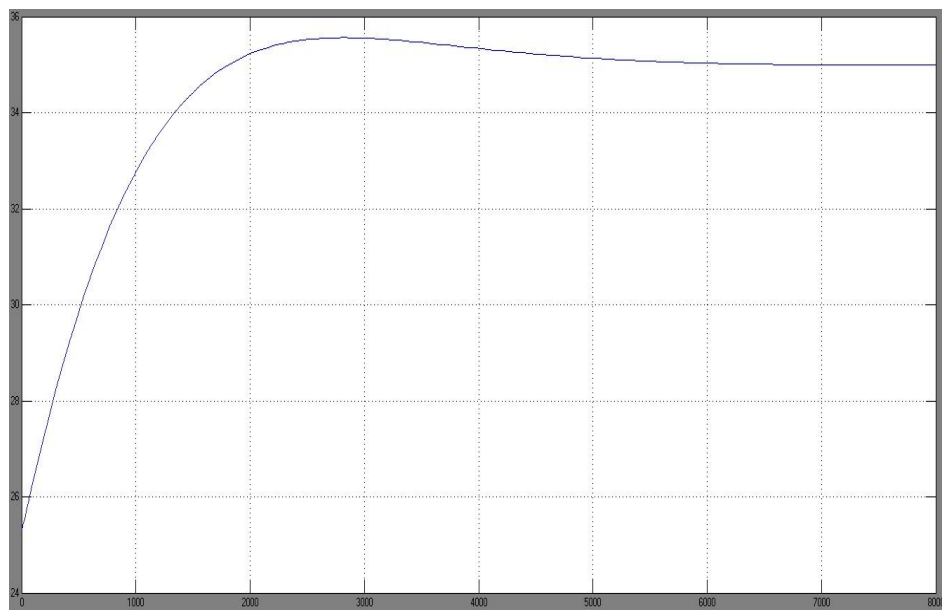


Figura 5.9 Respuesta simulación del controlador.

Aquí se selecciona un set point de 35 grados, como se puede observar la señal empieza a partir de una temperatura de 25 grados, tiene un pequeño sobrenivel porcentual. Así se concluye que la gráfica de la simulación es muy parecida a la gráfica que se muestra en sisotool.

5.9 VALIDACION CONTROLADOR

Para finalizar se procede a la validación del controlador con el sistema real, comparado con el sistema simulado. En la siguiente grafica se mostrara los resultados obtenidos, cumpliendo los objetivos planteados.

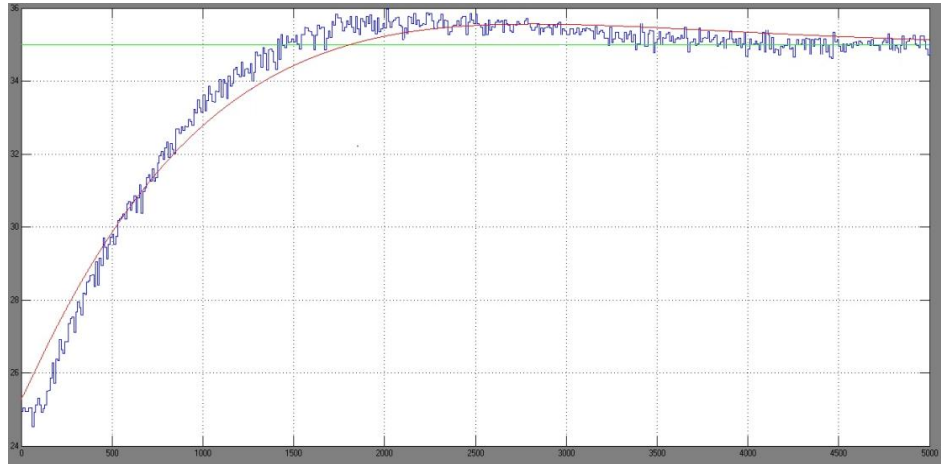


Figura 5.10 prueba final set point 35 grados.

En la gráfica anterior se pudo observar que se cumplió el tiempo de estabilización que es aproximadamente de 4400 segundo y mientras que el sobre nivel porcentual no es superior al 8%.

Para finalizar se procede a la validación del controlador con el sistema real, comparado con el sistema simulado. Para ello se generó una señal que varié el set point, es decir que por 4000 segundos el set point será de 30 grados, luego por 4000 segundos más el set point será de 45 grados y finalmente el set point se toma el valor de 40.

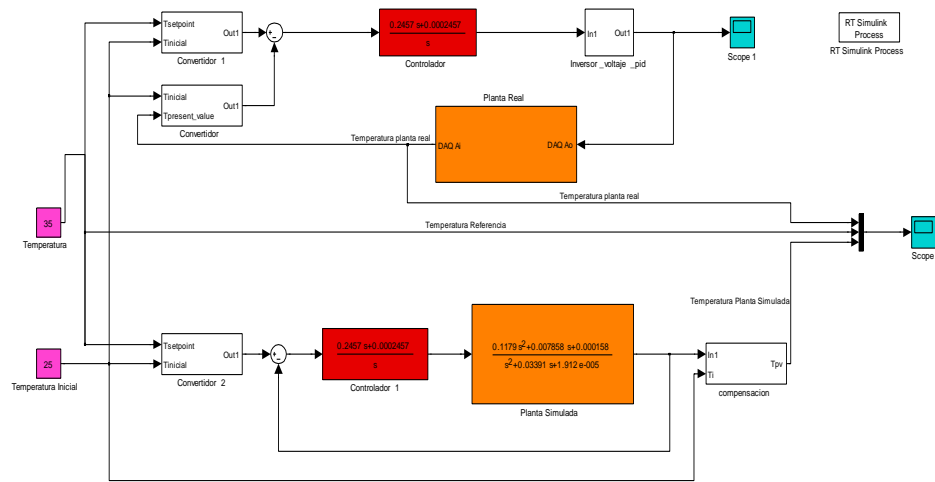


Figura 5.11 Programa validación del controlador.

En el gráfico anterior se muestra el programa o archivo que se creó en simulink para el controlador.

Se debe recordar que el tiempo de simulación debe ser lo suficiente para que la respuesta del sistema pueda alcanzar la estabilización en la temperatura deseada.

Como respuesta se obtuvo la siguiente gráfica:

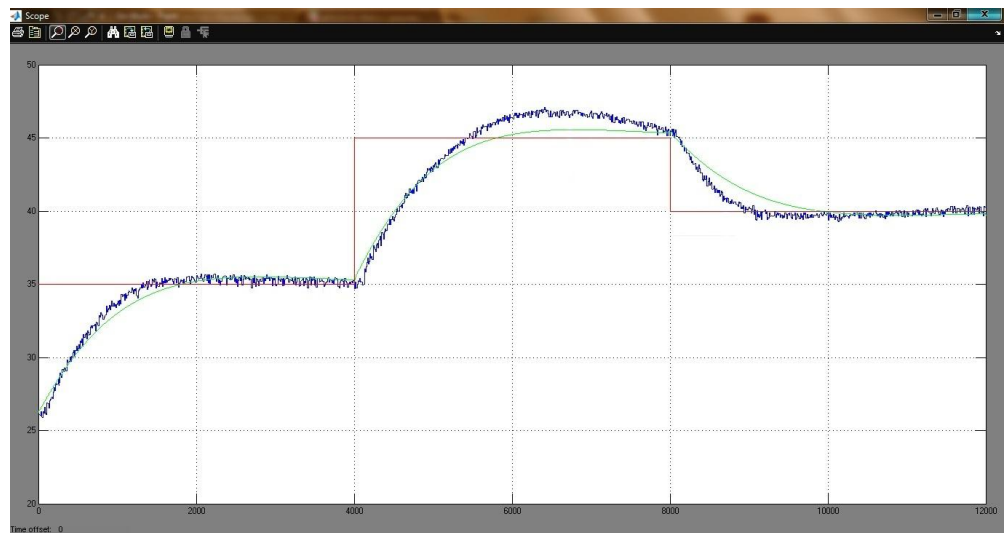


Figura 5.12 Respuesta de la validación del controlador.

Aquí se puede observar que la señal de color azul es la temperatura real del sistema, mientras que la señal que se encuentra de verde es la

respuesta al sistema simulado y por último la señal de morado muestra los diferentes set points.

Como se vio cuando se utilizó el controlador diseñado, la temperatura de salida del lazo de control sí trata de igualarse con el valor de la temperatura de referencia.

De aquí se concluye que se puede realizar una identificación aproximada al sistema, debido a que la señal simulada y la real son aproximadas, además cumple con nuestro objetivo planteado.

CONCLUSIONES

1. Es muy importante diseñar la señal de entrada, ya que con ella se realiza el proceso de la identificación. Otro punto a considerar es el tiempo de muestreo, ya que si se tiene un tiempo de muestreo muy lento hace perder la efectividad de los sistemas de control y si el tiempo de muestreo es muy rápido se obtendrán demasiados datos innecesarios.
2. Mediante el comando `cra`, se pudo realizar un análisis de identificación no paramétrica, de esta manera se puede analizar el valor de correlación cruzada de los datos de salida-entrada. También se obtuvo la gráfica de respuesta al modelo de correlación con la que se pudo comprobar que los parámetros eran semejantes a la de la respuesta al escalón, y con esta manera se concluyó que la mejor señal de entrada es la PRBS.
3. Al momento de realizar la elección de la estructura del modelo, se puso en práctica los nuevos conocimientos adquiridos, ya que se deben tomar criterios el análisis residual, el porcentaje de aproximación del modelo, respuesta al modelo y por último el criterio de la parsimonia que no es que tratar de encontrar una función que sea lo más sencilla posible, es decir que tenga la menor cantidad de polos y ceros, pero siempre y cuando cumpliendo los criterios mencionados anteriormente.
4. Para poder obtener un buen controlador es necesario que el proceso de identificación se lo haya realizado con éxito, ya que si la identificación no es la adecuada se va a obtener un controlador ineficiente al momento de ponerlo a prueba con el prototipo.
5. Para el diseño del controlador se utilizó la aplicación `sisotool` de matlab, la cual nos permite analizar la respuesta del sistema a través del lugar geométrico de las raíces, aquí se decide en cuanto tiempo quiere que se establezca el sistema y

cuanto sea el porcentaje de sobre nivel. Finalmente se observó que el controlador cumple con lo deseado.

6. Se pudo observar que el prototipo diseñado es una buena representación del proceso real, por esta razón el controlador diseñado se lo podría utilizar en el proceso industrial.

RECOMENDACIONES

1. Al momento de tomar los datos se necesita tener un circuito amplificador, debido a que la tarjeta de adquisición de datos DAQ, no es tan precisa en leer u obtener variaciones de voltaje que se encuentren en el orden de los mV. De igual manera se debe filtrar la señal para de esta manera eliminar las señales no deseadas.
2. Se recomienda al momento de diseñar la señal de entrada realizar varias pruebas, para de esta manera poder comparar las pruebas y tomar una decisión más apropiada. También realizar el análisis de correlación o cra correspondiente.
3. Si se requiere tener una mayor precisión en la lectura de la temperatura se recomienda usar una pt100 debido a que este tipo de sensor es más preciso, también hacer uso de algún transductor. En cambio sí se necesita que el proceso sea un poco más rápido se podría aumentar la potencia de la resistencia calefactora.
4. Al momento de empezar con el diseño o implementación del prototipo, se debe tener en cuenta todos los detalles respecto a los fenómenos físicos, por ejemplo al momento de decidir cuál será el mejor tanque de almacenamiento se debe tener en cuenta el material del que está hecho para saber hasta que temperatura resiste.
5. Se debe tener un conocimiento del software de Matlab, debido que por medio de este se realiza la identificación. Así como la aplicación sisotool e ident. Al momento de diseñar el controlador se recomienda tener un cierto

conocimiento sobre lo que son controladores proporcionales, proporcional integral y proporcional integral derivativo.

6. Se recomienda leer las especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición, ya que se debe conocer cuáles son los valores de entrada máxima que soporta. Se recomienda también tener un cierto conocimiento sobre los drivers para que Matlab reconozca la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.
7. No solo evaluar el porcentaje de error, sino también tener en cuenta el análisis residual, la respuesta al modelo ya que pueden que estos valores no sean correctos y esto podría causar problemas al momento de diseñar el controlador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] REOCITIES, Respuesta transitoria, <http://reocities.com/Area51/starship/6611/cap4.pdf>, Fecha de consulta abril 2012.

- [2] Diaz,Nelson, Transferencia de calor, <http://www.monografias.com/trabajos15/transf-calor/transf-calor.shtml>, Fecha de consulta abril 2012.

- [3] Ljung,Lennart, System Identification: Theory for the User, Prentice Hall 2nd Ed, 1999.

- [4] Zadeh,Lotfi A., From circuit theory to system theory, Proceedings of the Institute of Radio Engineers 50, 1962.

- [5] Del Pozo, Juan, Prácticas de laboratorio de control Automático, <http://jdelpozo.espol.edu.ec/web/herramientas/referencias.asp>, mayo 2010.

- [6] Garrido, Santiago, Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO, Universidad Carlos III, 1999.

- [7] Ogata, Katsuhiko, Sistemas de control en tiempo discreto, Pearson Educación 2da Edición, 1996.

- [8] Álamo, Teodoro, Diseño de controladores PID, http://www.esi2.us.es/~alamo/Archivos/Certificaciones/Sec_9_Otras_Publicaciones/Docente/AlamoPIDTotal.pdf, Fecha de consulta mayo 2012.

- [9] Universidad Nacional de Quilmes, Control PID, <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/C07.pdf>, Fecha de consulta abril 2012

[10] EUETIB, Regulación Automática con Matlab,
<http://usuarios.multimania.es/automatica/temas/tema1/historia/HISTORIACTRLAUTOM.pdf>, fecha de consulta abril 2012