



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“IDENTIFICACIÓN Y DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA UN SISTEMA  
DE CONTROL DE PH EN UN PROCESO QUÍMICO”**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN  
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA  
Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

**MENDOZA MACÍAS RAÚL RAMÓN  
ZAMBRANO ZAMBRANO GABRIEL OSWALDO**

Guayaquil - Ecuador

2012

# AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por ser quien me iluminó a través de esta jornada y me mantuvo en el camino del éxito. A mi mentor el Ing. César Martín con quien compartimos una jornada de aprendizaje e investigación. A mi familia y a mi esposa Estefanía, por ser quienes brindaron su amor y fortaleza. A todos aquellos que siempre me guiaron por el buen camino, docentes, amigos, personas queridas. A todos ustedes, mi eterna gratitud.

G.O.Z.Z.

A Dios, a nuestro profesor el Ing. César Martín y a mis padres y hermanos. También debo agradecer a todas aquellas personas que han aportado y ayudado de una u otra manera en el cumplimiento de mi meta: familiares, amigos, profesores, y autoridades de esta prestigiosa sede de la educación.

R.R.M.M.

# DEDICATORIA

*A Dios, quien me iluminó a través de esta jornada. A mi familia y a mi esposa Estefanía, por ser quienes siempre me brindaron su amor y fortaleza. A mi hija Ruth por ser una gran fuente de luz y de felicidad en mi vida.*

*G.O.Z.Z.*

*A mis padres, a mis hermanos, y a mi familia, que me han brindado su guía y apoyo incondicional. Y a todas aquellas personas que supieron estar ahí para mí, ofreciéndome sus palabras de aliento y todo su afecto.*

*R.R.M.M.*

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'César M. Moreno', written over a horizontal line.

Ing. César Martín Moreno  
Profesor del Seminario

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Salazar', written over a horizontal line.

Ing. Carlos Salazar  
Profesor delegado del Decano

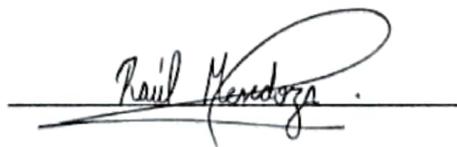
# DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Trabajo Final de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Zambrano Zambrano Gabriel Oswaldo



Mendoza Macías Raúl Ramón

# RESUMEN

El presente trabajo trata de un estudio para la aplicación de los sistemas controladores de pH en la industria, enfatizando la Identificación de Sistemas como una opción viable a los procesos ya establecidos o a los procesos futuros a elaborarse.

En este trabajo utilizaremos la información proveniente de las especificaciones y datos técnicos de la planta a utilizar como una ayuda para un correcto uso de los equipos, herramientas y sensores. Cabe recalcar que el saber con qué elementos cuenta la planta nos dará una idea previa del orden del modelo a obtener al aplicar las Técnicas de Identificación a nuestro sistema de pH.

Se manejarán principalmente conceptos de identificación no paramétrica y paramétrica, que tiene su fundamento en análisis estadísticos, y a su vez también se revisaran conceptos relacionados al ámbito químico de la planta, es decir un poco sobre el ácido a utilizar, sus riesgos y su disociación. Seguido de los análisis de ciertos parámetros que soportarán o no nuestro método de identificación como un método viable para esta planta y así sirva de referencia para obtener rendimientos óptimos en sistemas parecidos.

Para realizar este estudio se tomaron en cuenta diferentes escenarios, en los que se presenta principalmente el rendimiento de una planta fabricada con fines experimentales y luego se incluyen análisis de los procedimientos y resultados para obtener la modelación e identificación de la planta real, constatar con simulaciones y así finalmente poder desarrollar un controlador para esta planta.

La introducción tratará sobre la descripción del proyecto, narra un poco de la problemática en sí que se trata de solucionar mediante procesos químicos, y es aquí donde se van a plantear los objetivos generales y específicos que queremos alcanzar.

En el primer capítulo analizaremos lo motivante a nuestro tema, describiendo de manera general los antecedentes detrás de la elección de esta tesina y lo relevante a la planta de pH, sus usos, los problemas a los que se trata de llegar; y la identificación de sistemas, sus ventajas y una descripción sobre el impacto que genera ésta en plantas como la nuestra.

El segundo capítulo detallará todas nuestras herramientas para la elaboración y desarrollo de esta tesina, resalta la metodología de la Identificación de Sistemas, sus diversos modelos paramétricos y no

paramétricos a ser tomados en cuenta durante el análisis de la planta, se desarrollará también lo relacionado a la adquisición, generación y tratamiento de datos, describiendo el software de trabajo MATLAB junto con sus herramientas IDENT e INPUTDESIGNGUI, el CFP Compact Field Point. Y por último tenemos la descripción de nuestra planta a la que se le va a aplicar todo lo detallado en este capítulo.

En el tercer capítulo se aplicarán diversos métodos para un análisis no paramétrico, se detallará sobre la Generación y Adquisición de Datos de la planta, se darán los parámetros principales de la planta como lo son: tiempo de muestreo, amplitud de las señales a utilizar, desfase de las señales, rango de la señal. Posteriormente se analizará de manera detallada los parámetros de las señales de entrada a utilizar: RBS, PRBS y Multisenos. Es en este capítulo donde se detallará los análisis de correlación de las señales obtenidas.

En el cuarto capítulo analizaremos el diseño de la solución para la selección del mejor modelo paramétrico usando la señal de entrada escogida en el capítulo tres, mostraremos los parámetros y criterios para una correcta validación del modelo así como el correcto uso de la señal escogida para elaborar la mejor función de transferencia, y así ser este el modelo a utilizar en el diseño del controlador del capítulo siguiente.

El quinto capítulo se centrará en el diseño del controlador para la función de transferencia obtenida en el capítulo anterior, mostraremos el análisis correspondiente para dicha función de transferencia, y esquematizaremos los criterios para la elaboración de un buen controlador y los pasos a seguir en la elaboración del controlador. Por último tendremos las simulaciones pertinentes antes de probar el controlador en la planta y posteriormente los resultados de aplicar este controlador a nuestra planta de pH.

El trabajo finaliza con conclusiones acerca de los resultados obtenidos y de los diferentes métodos utilizados a más de su beneficio significativo.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	II
DEDICATORIA .....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	X
ABREVIATURAS .....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
Objetivos Generales .....	xxii
Objetivos Específicos .....	xxiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1 ÁCIDOS Y PH.....	2
1.1.1 LINEAMIENTOS HISTÓRICOS ÁCIDOS.....	3
1.1.2 LINEAMIENTOS HISTÓRICOS pH.....	7

1.1.3	DATOS DE CONTROL DE pH.....	11
1.1.4	APLICACIONES DEL CONTROL DE PH .....	13
1.2	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS .....	17
1.2.1	CONCEPTO.....	17
1.2.2	DETALLES DE LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	18
1.2.3	RAZONES PARA APLICAR LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS PARA CONTROLAR PLANTAS DE pH .....	19
<b>CAPÍTULO 2.....</b>		<b>21</b>
<b>2. RECURSOS Y HERRAMIENTAS.....</b>		<b>21</b>
2.1	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS .....	21
2.1.1	METODOLOGÍA.....	21
2.2	HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	31
2.2.1	COMPACT FIELDPOINT .....	32
2.2.2	SOFTWARE DE TRABAJO.....	34
2.3	PLANTA REAL DE PH.....	42
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>55</b>
<b>3. DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA Y ESTIMACIÓN DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS .....</b>		<b>55</b>
3.1	GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	55
3.2	ANÁLISIS DE LA PLANTA.....	63
3.2.1	DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO .....	63

3.2.2	ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN.....	65
3.2.3	CONSTANTE DE TIEMPO (TAO - $\tau$ ).....	70
3.2.4	GANANCIA.....	71
3.2.5	TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN .....	71
3.2.6	CÁLCULO DEL TIEMPO DE MUESTREO .....	72
<b>3.3</b>	<b>DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA .....</b>	<b>73</b>
3.3.1	PARÁMETROS COMUNES DE LAS SEÑALES RBS, PRBS Y MULTISINUSOIDAL .....	74
3.3.2	PARÁMETROS DE LA SEÑAL PRBS Y MULTISINUSOIDAL .....	75
3.3.3	PARÁMETROS DE LA SEÑAL RBS.....	77
3.3.4	ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE ENTRADA .....	78
3.3.5	PRUEBAS REALIZADAS.....	83
3.3.6	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.....	85
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>.....</b>	<b>97</b>
<b>4. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....</b>	<b>.....</b>	<b>97</b>
4.1	ESTIMACIÓN DE MÉTODOS PARAMÉTRICOS MODELO .....	97
4.2	CRITERIOS PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO .....	99
4.3	USO DE LA SEÑAL ESCOGIDA .....	101
4.4	ELECCIÓN DEL MODELO MÁS CONVENIENTE .....	123
4.5	MODELO DE LA PLANTA IDENTIFICADA.....	125
4.6	SIMULACIONES .....	126

<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>131</b>
<b>5. DISEÑO DEL CONTROLADOR .....</b>	<b>131</b>
5.1 ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....	131
5.2 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	133
5.3 PASOS PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	135
5.4 SIMULACIÓN DE LA PLANTA CON CONTROLADOR .....	140
5.5 PRUEBA DEL CONTROLADOR CON LA PLANTA REAL .....	143
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>147</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>151</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>162</b>

# ABREVIATURAS

$pH$	Potencial Hidrógeno
$H$	Hidrógeno
$HCl$	Ácido Clorhídrico
$Hz$	Frecuencia en hercios.
$SISO$	Modelo Una Entrada – Una Salida
$RBS$	Secuencia Binaria Aleatoria.
$PRBS$	Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria.
$OPC$	Control de Proceso Abierto.
$\tau$	Tao, Constante de tiempo.
$\tau_I$	Constante de tiempo integral.
$\tau_D$	Constante de tiempo derivativo.
$y(t)$	Señal de salida de la planta.
$u(t)$	Señal de entrada a la planta.
$u(t-nk)$	Valor de entrada de la planta cada “n” períodos anteriores.
$r(t)$	Ruido presente.
$y(z)$	Señal de salida discreta.
$u(z)$	Señal de entrada discreta.
$v(z)$	Ruido discreto presente en la planta.
$e(t)$	Error entre la variable controlada y el punto de ajuste.

$f_s$	Frecuencia de Muestreo
$f_o$	Frecuencia de la componente más alta de la señal.
$BW$	Ancho de Banda.
$T_m$	Tiempo de muestreo
$T_s$	Tiempo de estabilización.
$T_{dom}^{Lo}$ :	Constante de tiempo mínima estimada.
$T_{dom}^{Hi}$ :	Constante de tiempo máxima estimada.
$T$	Período.
$W$	Rango de frecuencia.
$\gamma_{uy(n)}$ :	Coefficiente de correlación
$\sigma_u^2$ :	Varianza de la señal de entrada pre-blanqueada.
$\alpha_i$	Potencia relativa.
$\emptyset$	Desfase de la señal.
$\emptyset_i$	Desfase de la señal coseno.
$AR$	Auto Regresivo.
$ARMA$	Media Móvil y Auto Regresiva.
$ARMAX$	Media Móvil y Auto Regresiva con Entradas Externas.
$ARX$	Auto Regresivo con Entradas Externas.
$BJ$	Box Jenkins.
$CF$	Factor de cresta.
$FIR$	Respuesta al impulso finito.

<i>K<sub>p</sub></i>	Constante proporcional.
<i>MA</i>	Media Móvil.
<i>N<sub>s</sub></i>	Duración del ciclo.
<i>OE</i>	Error de Salida.
<i>IDE</i>	Entorno de Desarrollo Integrado
<i>GUI</i>	Interfaz Gráfica de Usuario
<i>GUIDE</i>	Editor de Interfaces de Usuario - GUI
<i>FDT</i>	Funciones De Transferencia
<i>NI</i>	NATIONAL INSTRUMENTS

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 PAPEL TORNASOL COMO INDICADOR DE PH.....	5
FIGURA 1-2 MODELO DE LA CLASIFICACIÓN DE ÁCIDOS .....	7
FIGURA 1-3 ESCALA DE PH .....	10
FIGURA 2-1 ESTRUCTURA DEL MODELO ARX.....	28
FIGURA 2-2 ESTRUCTURA DEL MODELO OE .....	29
FIGURA 2-3 ESTRUCTURA DEL MODELO ARMAX .....	30
FIGURA 2-4 ESTRUCTURA DEL MODELO BJ .....	31
FIGURA 2-5 ALGUNOS DE LOS ELEMENTOS DEL CFP .....	33
FIGURA 2-6 ENTORNO DE MATLAB .....	36
FIGURA 2-7 VENTANA DE INGRESO AL INPUTDESIGNGUI .....	40
FIGURA 2-8 VISTA DE INPUTDESIGNGUI .....	42
FIGURA 2.3-1 ESQUEMA DE LA PLANTA REAL .....	43
FIGURA 2.3-2 FORMA FÍSICA DEL MEDIDOR DE PH.....	45
FIGURA 2.3-3 VISUALIZACIÓN DE LA BOMBA PERISTÁLTICA .....	48
FIGURA 2.3-4 FUENTE DE VOLTAJE NI.....	53
FIGURA 3-1 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	56
FIGURA 3-2 BLOQUES DE GENERACIÓN DE DATOS .....	56
FIGURA 3-3 BLOQUES DE LECTURA Y ESCRITURA DEL OPC .....	58
FIGURA 3-4 BLOQUE DE PROPIEDADES DEL OPC MODO ESCRITURA .....	59
FIGURA 3-5 BLOQUE DE PROPIEDADES DEL OPC MODO LECTURA.....	60
FIGURA 3-6 BLOQUES DE SALIDA A WORKSPACE.....	61
FIGURA 3-7 PARA VISUALIZACIÓN Y TRATAMIENTOS DE DATOS .....	62
FIGURA 3-8 DIFERENCIA ENTRE SEÑAL CONTINUA Y SEÑAL DISCRETA .....	63
FIGURA 3-9 SEÑAL DISCRETA Y SU MUESTREO .....	63
FIGURA 3-10 RESPUESTA AL ESCALÓN DE LA PLANTA .....	66

FIGURA 3-11 BLOQUES DE FILTRADO DE LA SEÑAL .....	69
FIGURA 3-12 DATOS FILTRADOS Y DIFERENCIADOS .....	69
FIGURA 3-13 FORMAS DE ONDA DE LAS SEÑALES PRBS.....	80
FIGURA 3-14 FORMAS DE ONDA DE LAS SEÑALES RBS .....	81
FIGURA 3-15 FORMAS DE ONDA DE LAS SEÑALES MULTISENO.....	82
FIGURA 3-16 RESPUESTAS A LAS SEÑALES PRBS, RBS Y MULTISENO .....	84
FIGURA 3-17 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN PARA DATA.....	90
FIGURA 3-18 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN CRA(DATAD,65,10,2) .....	92
FIGURA 3-19 AUTO COVARIANZA DE LA ENTRADA.....	92
FIGURA 3-20 AUTO COVARIANZA.....	93
FIGURA 3-21 CORRELACIÓN CRUZADA DE LA ENTRADA CON LA SALIDA.....	94
FIGURA 3-22 RESPUESTA AL IMPULSO ESTIMADA.....	95
FIGURA 3-23 RESPUESTA AL ESCALÓN PARA SEÑAL PRBS .....	96
FIGURA 4-1 SEÑAL DE ENTRADA Y SALIDA A UTILIZAR.....	101
FIGURA 4-2 IDENT CON DATOS SELECCIONADOS Y DATOS PARA VALIDAR.....	102
FIGURA 4-3 DATOS SELECCIONADOS PARA SEÑAL Y VALIDACIÓN .....	103
FIGURA 4-4 MODELOS ARX .....	103
FIGURA 4-5 VENTANA DE MODELO PARAMÉTRICO PARA ARX .....	104
FIGURA 4-6 CUADRO DE MODELOS ARX DE RESULTADOS .....	105
FIGURA 4-7 CONTRASTE ENTRE MODELO ARX115 Y EL MODELO REAL.....	106
FIGURA 4-8 RESPUESTA AL ESCALÓN ARX115.....	106
FIGURA 4-9 ANÁLISIS RESIDUAL .....	107
FIGURA 4-10 MODELOS ARMAX.....	108
FIGURA 4-11 VENTANA DE MODELO PARAMÉTRICO PARA ARMAX .....	109
FIGURA 4-12 CONTRASTE ENTRE MODELO AMX3122 Y EL MODELO REAL .....	110
FIGURA 4-13 RESPUESTA AL ESCALÓN MODELO AMX3122 .....	110
FIGURA 4-14 ANÁLISIS RESIDUAL AMX3122.....	111
FIGURA 4-15 MODELOS FIR.....	112

FIGURA 4-16 VENTANA DE MODELO PARAMÉTRICO PARA FIR .....	113
FIGURA 4-17 CONTRASTE ENTRE MODELO FIR1010 Y EL MODELO REAL .....	114
FIGURA 4-18 RESPUESTA AL ESCALÓN FIR1010 .....	114
FIGURA 4-19 ANÁLISIS RESIDUAL FIR1010.....	115
FIGURA 4-20 MODELOS BOX-JENKINS .....	116
FIGURA 4-21 VENTANA DE MODELO PARAMÉTRICO PARA BJ.....	117
FIGURA 4-22 CONTRASTE ENTRE MODELO BJ12225 Y EL MODELO REAL.....	118
FIGURA 4-23 ANÁLISIS RESIDUAL BJ12225 .....	119
FIGURA 4-24 RESPUESTA AL ESCALÓN BJ12225.....	119
FIGURA 4-25 MODELOS OUTPUT ERROR .....	120
FIGURA 4-26 VENTANA DE MODELO PARAMÉTRICO PARA OE.....	121
FIGURA 4-27 CONTRASTE ENTRE MODELO OE125 Y EL MODELO REAL.....	122
FIGURA 4-28 ANÁLISIS RESIDUAL OE125 .....	122
FIGURA 4-29 RESPUESTA AL ESCALÓN OE125.....	123
FIGURA 4-30 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA SIMULACIONES.....	127
FIGURA 4-31 RESPUESTA AL ESCALÓN SIN INTEGRADOR .....	128
FIGURA 4-32 RESPUESTA AL ESCALÓN CON INTEGRADOR Y CON RUIDO .....	128
FIGURA 4-33 RESPUESTA ENTRADA PRBS SIN INTEGRADOR.....	129
FIGURA 4-34 RESPUESTA ENTRADA PRBS CON INTEGRADOR Y CON RUIDO.....	129
FIGURA 5-1 VENTANA PRINCIPAL DE SISOTOOL.....	136
FIGURA 5-2 LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES DE LA PLANTA.....	137
FIGURA 5-3 REQUERIMIENTO DEL TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE 210s .....	138
FIGURA 5-4 RESPUESTA AL ESCALÓN CON CONTROLADOR.....	139
FIGURA 5-5 VENTANA DEL EDITOR DE COMPENSADOR.....	139
FIGURA 5-6 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SIMULACIÓN.....	140
FIGURA 5-7 RESPUESTA DE LA PLANTA SIMULADA.....	142
FIGURA 5-8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR CON LA PLANTA REAL .....	144
FIGURA 5-9 RESPUESTA DE LA PLANTA REAL CON CONTROLADOR.....	146

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1 TABLA DE MODELOS LINEALES CONOCIDOS .....	27
TABLA 2-2 CLASIFICACIÓN DE CAJAS DE HERRAMIENTAS MATLAB .....	37
TABLA 3-1 PARÁMETROS PARA GENERACIÓN DE SEÑALES DE ENTRADA.....	83
TABLA 3-2 CONTRASTE PARA SEÑALES PRBS — RBS— MULTISENO vs PLANTA REAL .....	89
TABLA 4-1 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA MODELOS PARAMÉTRICOS .....	97
TABLA 4-2 MODELOS PARAMÉTRICOS A UTILIZAR .....	98
TABLA 4-3 TABLA DE MODELOS ARX .....	104
TABLA 4-4 TABLA DE MODELOS ARMAX .....	108
TABLA 4-5 TABLA DE MODELOS FIR .....	112
TABLA 4-6 TABLA DE MODELOS BOX-JENKINS .....	116
TABLA 4-7 TABLA DE MODELOS OE .....	120
TABLA 4-8 TABLA DE CONTRASTE ENTRE MODELO ARMAX vs BOX-JENKINS .....	124

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad la regulación ambiental por parte de organizaciones, ya sean estas privadas o públicas, ha influenciado de gran manera la implementación de sistemas que busquen regular el pH de un producto cualquiera. Gracias a este hecho muchas empresas han optado como solución viable la implementación de sistemas de tratamiento de residuos para mejorar su impacto ambiental.

De este modo hoy en día en Ecuador muchas empresas buscan desesperadamente una mejora en sus sistemas de neutralización de desechos, una mejora de precisión en sus sistemas de limpieza de materia prima, todo esto con el fin de maximizar sus recursos y reducir la mala administración de sus desechos.

Es aquí donde el manejo de sustancias con distinto pH y su regulación toman lugar, este método de estabilización y regulación de pH suele darse de manera referencial, donde se buscan rangos de pH aceptables. En Ecuador se busca que las empresas adopten el estándar en la eliminación de sustancias residuales para que tengan un valor de pH entre 6 y 7 y que

su regulación de pH sea precisa, como ejemplo tenemos el caso de Merck, una de las pioneras en este aspecto.

Este proyecto presenta un método aplicado para el manejo y la estabilización del pH en las reacciones químicas. Para esto un proceso químico tiene como fundamento la optimización de dos variables claves; la duración de la reacción química y la precisión con la que se obtendrán los resultados, además de los otros factores adicionales como lo son el punto de disociación de la reacción y las proporciones de las sustancias a utilizarse.

Además este proyecto presenta la optimización de un controlador para una planta física de pH no continua (por tandas), en base a los resultados obtenidos en la identificación de sistemas y contrastarlos con el modelo simulado.

### ***Objetivos Generales***

Dentro de los fines de nuestro proyecto está la aplicación de las técnicas de Identificación de Sistemas a un Sistema de Control de pH en un proceso químico.

Además este proyecto debe identificar todos los parámetros para un Sistema de pH y en base a esos resultados poder elaborar un controlador óptimo y de alto rendimiento tomando en cuenta las normativas económicas.

Utilizar y aplicar las técnicas para la elaboración de modelos y simulaciones de la planta del Sistema de Control de pH como un sistema dinámico mediante el uso del programa MATLAB y con el soporte de su herramienta SIMULINK.

Promover las normas de Seguridad al momento del uso de la Técnica de Identificación de Sistemas en procesos químicos, y las medidas preventivas a tomar durante la ejecución de estos procesos para su manejo adecuado.

### ***Objetivos Específicos***

Este proyecto va a constatar que la técnica de Identificación de Sistemas aplicada para un Sistema de Control de pH en un proceso químico es válida y nos puede ser de gran ayuda incluso si la planta a tratar no es continua.

Obtener una buena estimación del modelo de la Planta a tratar en base a las técnicas aprendidas durante el Seminario de Graduación y a las herramientas de trabajo en él impartidas.

Diseñar e implementar un controlador que se ajuste a las especificaciones requeridas por nuestra planta en base a los datos obtenidos por medio de la Identificación de Sistemas.

Obtener un modelo del sistema correctamente validado, aplicando las técnicas de la Identificación de Sistemas y compararlo con el comportamiento de una planta de pH real de manera que se denoten las diferencias y similitudes del modelo real vs el modelo obtenido.

# CAPÍTULO 1

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema al cual se enfrenta nuestra tesina es la elaboración y la implementación de un controlador para una planta de pH en donde se buscará que se lleve un valor de pH determinado a un valor pre-fijado por el usuario utilizando una Planta de pH proporcionada por el Laboratorio de Control Automático de la ESPOL.

Para llevar a cabo un buen entendimiento y una buena ejecución de este proyecto es necesario que ahondemos en el proceso que ocurre en nuestra planta, incluyendo los datos relevantes de los sistemas de pH y sus conceptos básicos, la descripción de las sustancias inmersas en nuestra planta y las aplicaciones de estos sistemas.

Además se adicionará información de la identificación de sistemas como su concepto, las ventajas de la identificación de sistemas sobre este tipo de plantas y cuáles serían las razones que hacen posible la aplicación de este método considerando cualquiera que fuere su resultado y para terminar se denotará todo lo referente a este método aplicado al control de nuestra planta de pH.

## 1.1 ÁCIDOS Y PH

Desde tiempos inmemorables se utiliza el vinagre, ese ácido común que se obtiene de la sidra de manzana y del vino. La palabra latina que significa vinagre, acetum, está estrechamente relacionada con otra palabra latina, acidus (agrio), de donde proviene la palabra ácido. Desde hace mucho tiempo se sabe que los líquidos de sabor agrio contienen ácidos. Las sustancias químicas capaces de neutralizar los ácidos son básicas o alcalinas, y su sabor es amargo. [1]

Los productos químicos para la limpieza suelen contener ácidos o bases. Comemos alimentos y bebemos líquidos que contienen ácidos y bases. Incluso nuestro propio cuerpo los produce. De hecho, el

mantenimiento de un delicado equilibrio entre los ácidos y bases de nuestro cuerpo es, literalmente, cuestión de vida o muerte.

Antoine Lavoisier propuso en 1787 que todos los ácidos contienen oxígeno. De hecho, el nombre oxígeno significa en griego “formador de ácido”. Lavoisier estaba equivocado. Sir Humphrey Davy (1778-1829) demostró en 1811 que el ácido clorhídrico,  $\text{HCl(ac)}$ , no contiene oxígeno. Davy concluyó que el componente común de los ácidos es la presencia de hidrógeno, no de oxígeno.

La definición de pH fue concebida por el químico danés Søren Peder Lauritz Sørensen (Enero 9 de 1868 – Febrero 12 de 1939) en el Laboratorio Carlsberg, de Copenhague.

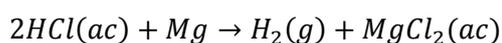
### 1.1.1 LINEAMIENTOS HISTÓRICOS ÁCIDOS

Muchos químicos intentaron responder la pregunta “más importante”: “¿Qué es un ácido?” No se dispuso de una buena respuesta hasta hace alrededor de 100 años. En 1884, el químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), cuando aún era estudiante de posgrado, propuso las definiciones de ácidos y bases que

todavía se utilizan actualmente. En general se reconocía a los ácidos como sustancias que, en solución acuosa:

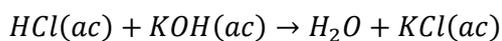
- Tienen un sabor agrio si se diluyen lo suficiente para poderlos probar.
- Hacen que el tornasol cambie de azul a rojo.
- Reaccionan con los metales reactivos, como el magnesio, el zinc y el hierro, y producen hidrogeno gaseoso,  $H_2(g)$ .

Por ejemplo: el ácido clorhídrico,  $HCl(ac)$ , reacciona con el magnesio metálico y forma hidrogeno gaseoso y cloruro de magnesio.

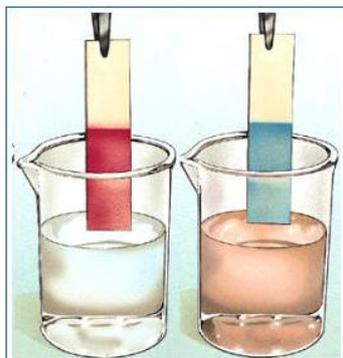


- Reaccionan con los compuestos llamados bases (contienen iones hidróxido  $OH^-$ ) para formar agua y compuestos conocidos como sales. La sal que se forma está constituida por el catión de la base y el anión del ácido.

Por ejemplo: el ácido clorhídrico,  $HCl(ac)$ , reacciona con el hidróxido de potasio, una base, para formar agua y cloruro de potasio, una sal.



Arrhenius propuso que las propiedades características de los ácidos son en realidad propiedades del ion hidrógeno,  $H^+$ , y que los ácidos son compuestos que liberan iones hidrógeno en solución acuosa, como el agua.

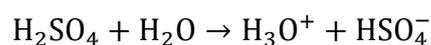


**Figura 1-1 Papel Tornasol como indicador de pH**

El papel de tornasol es un indicador de pH que se colorea de rojo sumergido en un ácido y de azul cuando lo hace una base. Cuanto más fuerte sea el ácido o la base, más intenso será el color del indicador.

Los ácidos fuertes son aquellos que se ionizan totalmente -o casi totalmente- en agua. En sus soluciones diluidas, los ácidos fuertes como el ácido clorhídrico donan su protón o protones al agua para formar iones hidronio.

La ecuación siguiente de la reacción de ácido sulfúrico con agua muestra la formación de iones hidronio en solución acuosa.



Los ácidos fuertes concentrados producen graves daños a la piel o los músculos, pues causan quemaduras químicas semejantes a las que origina el calor y las cuales suelen ser tratadas del mismo modo.

Ácido sulfúrico más agua = Reacción exotérmica

Nota: Al preparar una solución de ácido sulfúrico siempre agregar el ácido al agua y no al revés, porque la reacción es muy violenta.

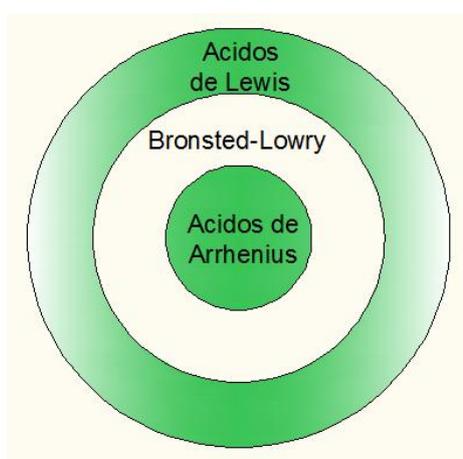
Los ácidos fuertes corrosivos también perforan la ropa que contiene fibras naturales como algodón, seda o lana, y destruyen casi todos los materiales sintéticos como las fibras de nailon, poliéster y acrílico. Hay que tener mucho cuidado de no derramar ácidos sobre la piel o ropa.

Las definiciones de Arrhenius de los ácidos son muy útiles en el caso de las soluciones acuosas, pero ya para la década de 1920 los químicos trabajaban con otros disolventes además del agua. Se necesitaba una nueva teoría. En 1923 el químico danés J. N. Bronsted (1897-1947) y el químico inglés T. M. Lowry (1847-1936) sugirieron de forma independiente definiciones más generales de los ácidos. La definición de Bronsted-Lowry es:

*“Un ácido de Bronsted-Lowry es un donador de protones; dona un ion hidrógeno,  $H^+$ ”.*

La historia de los avances de la teoría de ácidos no estaría completa sin al menos una breve presentación del modelo de Lewis

de los ácidos. El concepto más general de ácidos fue propuesto en 1923 por Gilbert N. Lewis. A continuación se enuncia su definición: Un ácido de Lewis es una sustancia capaz de aceptar (y compartir) un par de electrones.



**Figura 1-2** Modelo de la clasificación de ácidos

El modelo de Bronsted-Lowry de los ácidos amplió el alcance del modelo Arrhenius. El de Lewis es el modelo de ácidos de alcance más general. La definición de Lewis de los ácidos abarca toda sustancia capaz de aceptar un par de electrones.

### 1.1.2 LINEAMIENTOS HISTÓRICOS pH

La definición de pH fue concebida por el químico danés Søren Peder Lauritz Sørensen (Enero 9 de 1868 – Febrero 12 de 1939) en el Laboratorio Carlsberg, de Copenhague. Él estudió el efecto de la concentración de los iones en las proteínas [2], y debido a que la concentración de iones Hidrógeno ( $H^+$ ) era particularmente

importante, introdujo la escala de pH como un modo simple de expresión de ello en 1909 [3]. Es así como en el artículo que trabajo, describió dos nuevos métodos para medir la acidez. [4]

El primer método estuvo basado en electrodos, mientras el segundo implicó la comparación de muestras de colores con un juego preseleccionado de indicadores. Él se encargó de obtener la fórmula para poder manejar números enteros en el pH.

Ahora el pH moderno fue introducido en 1924, después de que se hizo evidente que la fuerza electromotriz en las células depende de la actividad en vez de la concentración de iones de hidrógeno [5]. En los primeros documentos, la notación tuvo la H como un subíndice de la p minúscula, así:  $p_H$ .

### ***La escala de pH***

En las soluciones ácidas, la  $[H^+]$  es mayor que  $1.0 \times 10^{-7}$  .

En las soluciones alcalinas, la  $[H^+]$  es menor que  $1.0 \times 10^{-7}$  .

En las soluciones neutras, la  $[H^+]$  es igual a  $1.0 \times 10^{-7}$  .

En vez de expresar todas las concentraciones de iones hidrógeno en forma exponencial, el químico danés S. P. L. Sorensen introdujo en 1909 un método más conveniente: propuso utilizar el número del exponente para expresar la acidez. La escala de acidez de Sorensen se conoció más tarde como la escala de pH, del francés *pouvoir hydrogene* (“poder de hidrógeno”). Se define el pH de una solución como el negativo del logaritmo de la concentración de iones hidrógeno,  $[H^+]$ .

El logaritmo (log) de un número es el exponente (la potencia) al que se debe elevar 10 para obtener el número especificado. En términos matemáticos, el pH se define como sigue:

$$\text{pH} = -\log [H^+]$$

Así pues, se puede afirmar que una solución tiene una concentración de iones hidrógeno de  $1 \times 10^{-6}$  mol/L, o bien que tiene un pH de 6. El significado es el mismo, pero sencillamente es más fácil decir que si pH es de 6. Por ello la escala de pH resulta muy cómoda y razonable para el usuario, y ha sido adoptada de forma universal.

El agua pura tiene una concentración de iones hidrógeno de  $1 \times 10^{-7}$  mol/L y un pH de 7. Como se presenta en la escala de pH que aquí se muestra, toda solución neutra tiene un pH de 7.

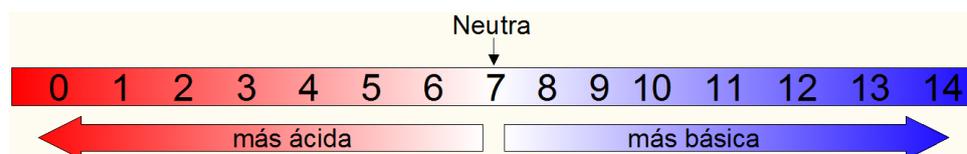


Figura 1-3 Escala de pH

Una solución ácida tiene un pH menor que 7. Una solución básica (alcalina) tiene un pH mayor que 7. Cuanto más bajo es el pH, más ácida es la solución; cuanto más alto es el pH, más básica es la solución. Un cambio de acidez de una unidad completa de pH corresponde a un cambio de 10 veces en la concentración de iones hidrógeno.

### ***Medición del pH***

Un método para determinar el pH es el que se basa en el uso de ciertas sustancias químicas llamadas indicadores ácidos-base. Estos indicadores son colorantes que cambian de color a valores pH específicos. Es decir, cada colorante indicador tiene un color

determinado en solución ácida y otro color en una solución más básica.

Los aparatos medidores de pH (pHmetro) permiten realizar mediciones más exactas del pH por métodos eléctricos. Por lo general, estos instrumentos miden el pH con una precisión de aproximadamente 0.01 unidades de pH. Con un pHmetro se puede determinar el pH de muestras de sangre, orina, y otras mezclas coloridas o complejas.

### **1.1.3 DATOS DE CONTROL DE pH**

Ahora se introducirá algunos datos relevantes de la historia de los diferentes métodos de control de pH y de sus diversas publicaciones a lo largo de los últimos años. Es esencial para nosotros conocer que una cantidad significativa de enunciados, tratados y trabajos realizados por especialistas buscan modelar y controlar soluciones de pH debido a los avances tecnológicos de las últimas dos décadas.

Se han hecho publicaciones asombrosas que competen a la modelación de la estabilización del pH en distintas soluciones dentro de las cuales nos tomamos el atrevimiento de citar trabajos de renombre como el de Thomas J. McAvoy en sus publicaciones [6] y [7], en el cual nos hace referencia a los principios de conservación de masa en condiciones de equilibrio y hace referencia también a la electro-neutralidad de las soluciones que se enfrentan a un cambio de pH.

Gustafsson y Waller [8], así como también Wright y Kravaris [9], han extendido estos resultados basados en la modelación de sistemas en los cuales existe más de un ácido que sean fuertes o débiles.

Pajunen [10] ha modelado el proceso de establecimiento del pH como una parte dinámica lineal seguida por una característica no lineal estática representada por una aproximación polinomial por tramos.

El diseño de algoritmos para controlar pH generalmente toma en cuenta la característica no lineal del proceso. Esta no-linealidad puede ser vista como una ganancia variable en el tiempo, lo cual

conduce a controladores lineales adaptables. Hay trabajos donde se adapta los parámetros de un modelo de primer orden para mantener la ganancia de lazo cerrado constante.

Se han diseñado controladores no lineales tanto adaptables como no adaptables. Se puede llegar también a una formulación general haciendo uso de variables que son independientes de la reacción química debido a que gran parte del control adaptativo se realiza con estas variables por su gran aporte con la no-linealidad del sistema.

#### **1.1.4 APLICACIONES DEL CONTROL DE PH**

Si bien hemos hecho hincapié en la historia del pH, también es necesario conocer el tipo de aplicaciones que podemos encontrar para el control del pH y las industrias que portan estas clases de aplicaciones en Ecuador.

Dentro de las aplicaciones para los sistemas de control de pH tenemos entre los más destacados aquellos que usan sistemas

mecánicos normalmente con bombas y motores para generar la neutralización de las sustancias residuales de los diferentes procesos industriales, dichas inversiones por parte de la empresa privada se han dado debido a las diferentes normas que exigen el tratamiento de desechos para que sean no dañinos al medio ambiente y a la salud humana.

Entre las aplicaciones más comunes a nivel mundial que involucran a sistemas de pH, las incluidas en nuestro país son los siguientes sistemas:

- Tratamiento de Agua Residuales para la regulación de los desechos de productos de materia Prima.
- Estabilización de Ácidos para disoluciones de distintas aleaciones de metales.
- Regulaciones de pH para procesos agrícolas de cultivo de cebollas.
- Regulación del pH del suelo para sembríos de maíz y choclo.
- Regulación del pH del suelo para cultivos de flores.
- Filtro de pH para la elaboración de plásticos.
- Purificación de metales en base a sustancias de pH fijo

Cabe recalcar que hay aplicaciones a nivel mundial muy importantes que a pesar de haber sido implementadas en muchos países y teniendo un gran impacto socio-económico en estos mismos, por falta de inversión su implementación ha sido imposible en Ecuador, entre ellas las más denotadas son las siguientes:

- Estabilización de Ácidos para extracción de carbono y de hierro.
- Tratamiento de Agua Residuales desde Refinerías, industrias medias y pequeñas industrias.
- Tratamiento de piscinas de manera autónoma.
- Sistemas biológicos para poder hacer inmersión de partes biomecánicas.
- Reestructuraciones de tierra de sembríos de exportación (Europa)
- Aplicación en el estudio de la calcificación INVITRO de una BIO-prótesis de válvula cardiaca
- Aplicaciones mineras varias.

Como se puede observar a nivel mundial existen aplicaciones no solo a la parte química y referencial del pH sino a muchos sistemas donde variaciones milimétricas de las concentraciones son críticas.

En nuestra ciudad tenemos algunas empresas que poseen en sus industrias estas aplicaciones. La gran mayoría de las empresas

medianas y grandes con procesos industriales están obligadas a tener al menos la planta de tratamiento de residuos, y para la neutralización de desechos no todas cuentan con plantas de última tecnología pero al menos existe el registro.

Dentro de las empresas que tratan de cumplir con las normas de tratamiento de desechos de manera acertada, se pueden denotar las siguientes:

- PETROECUADOR
- PROPLASA
- GEYOCA
- ARCA
- STARKISH
- PEPSICO
- CERVECERÍA NACIONAL

## 1.2 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

### 1.2.1 CONCEPTO

El término Identificación de sistemas fue acuñado por Lofti Zadeh [11] en 1962, como:

*“Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente.”*

Un concepto de la Identificación de Sistemas muy acertado se denota como la teoría y el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos basándonos en las entradas y salidas observadas a través del Método Científico. Como disciplina científica data de los primeros intentos de modelaje, fueron las de series de tiempo usando diferentes técnicas como análisis numérico, iteraciones, regresión y auto-regresión.

Aunque una parte sustancial del desarrollo de las técnicas está ligado a la Comunidad de Control, está básicamente construido a partir de técnicas estadísticas, en particular en los métodos de

regresión lineal y no-lineal lo cual nos muestra una gran formación por parte de las personas que realizan este tipo de trabajo.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la Ingeniería de Control y de muchas otras que buscan en su mayoría mejorar el rendimiento de Sistemas ya elaborados. Estos modelos necesitan simular el comportamiento real en los casos en que existe un conocimiento previo limitado de la estructura del sistema.

### **1.2.2 DETALLES DE LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

La identificación de sistemas no lineales se ha considerado como un problema difícil a través de los tiempos, la razón es muy sencilla puesto que identificar un sistema no-lineal conlleva dos grandes etapas: la selección de la estructura del modelo con un cierto número de parámetros y la selección de un algoritmo que estime dichos parámetros.

Aunque muchos sistemas no-lineales pueden ser linealizados representándolos por medio de una ecuación diferencial o en

diferencias, modelar sistemas no-lineales con modelos lineales implica muchas aproximaciones. Con frecuencia, estas aproximaciones no reflejan suficientemente comportamiento real del sistema no lineal.

Es por esta razón que para estos tipos de sistemas no-lineales se busca de alguna manera buscarle un comportamiento lineal ya sea por medio de una aproximación lineal por tramos o una aproximación de series, de ahí es que nace el Control Adaptativo.

Por tanto, el obtener un buen modelo, con una estructura que refleje la información real del sistema, exige un incremento en coste. Este coste es debido a la necesidad de algoritmos más avanzados que puedan manejar modelos con estructuras complejas.

### **1.2.3 RAZONES PARA APLICAR LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS PARA CONTROLAR PLANTAS DE pH**

Una planta de pH normalmente cuenta con un sistema complejo, donde interactúan bombas, agitadores, buffers, entre otros, razón por la cual se desearía que en vez de seccionar el sistema para un

análisis por etapas, pudiéramos acercarnos más a una identificación que lo haga a manera de subsistemas, o de manera global.

Para efecto positivo muchos de los modelos de este tipo de plantas pueden ser puestos a identificación para mejorar su rendimiento, sus propiedades de funcionamiento, su rentabilidad y poder destacar una alternativa de actualización de los equipos e inclusive una actualización por equipos de mejor tecnología.

Su disposición de brindar al usuario una guía detallada de los posibles sucesos de la planta, evaluaciones de casos específicos, simulaciones de eventos para ser analizados minuciosamente son otras razones por las cuales se hace viable realizar la identificación de sistemas para este tipo de plantas.

Muchas de estas plantas pueden ser analizadas sin parar la producción o el trabajo debido a que normalmente se trabajan con baches de producción, es decir se puede fijar un horario donde la carga de trabajo de la planta sea reducida para minimizar el impacto económico por dejar en alto la planta.

# CAPÍTULO 2

## 2. RECURSOS Y HERRAMIENTAS

### 2.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

#### 2.1.1 METODOLOGÍA

Como mencionamos anteriormente la Identificación de Sistemas trata mediante pasos similares al Método Científico llegar a una estructura final consistente es por eso que para nosotros los siguientes pasos deben de ser de vital importancia al momento de realizar la identificación de nuestra planta.

Obtener los datos de entrada y de salida de la mejor manera, involucrando una señal de entrada propicia para el sistema y así denotar la mejor alternativa al momento de la obtención de la

salida. Este proceso depende mucho de la forma en que se adquieran los datos.

Someter los datos adquiridos a los análisis correspondientes para obtener una identificación de calidad, someterla a los análisis estadísticos y a pruebas que nos ayuden no solo a mejorar la señal de entrada sino que también nos ayuden a mejorar la salida del sistema.

Por último seleccionar la estructura del modelaje correcta para así poder obtener los parámetros correspondientes y poder defender nuestra postura y elección de este método, a esta parte de la metodología de la Identificación de Sistemas hay que ponerle mucho cuidado pues es aquí donde deberemos demostrar lo aprendido sobre nuestro proyecto, las leyes que lo rigen y los fenómenos que se pueden presentar para poder así elaborar un controlador óptimo.

### **2.1.1.1 MODELOS DE SISTEMAS DINÁMICOS**

Cuando trabajamos con el modelo de un sistema cualquiera, tenemos una idea a priori de cómo las variables se relacionan entre sí. Desde un punto de vista general, podemos inclusive decir que todas estas dependencias o relaciones observadas son un modelo del sistema en sí mismo, es decir nuestro primer modelaje.

Está claro que los modelos pueden venir dados por diferentes estructuras y con distintas formulaciones matemáticas que por lo general son las que le añaden dificultad al modelaje.

### **2.1.1.2 MODELOS DE ENTRADA-SALIDA**

Los modelos de entrada-salida describen un sistema dinámico basándose en los datos de entrada y de salida. Este tipo de modelos suponen que la salida del sistema puede ser predicha a partir de las entradas y salidas pasadas del sistema. Con las condiciones de que el sistema debe de ser determinista, invariante en el tiempo y es posible su predicción en base a los

datos actuales y anteriores, de una entrada - una salida (SISO), el modelo de entrada-salida es:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m))$$

Donde  $u(k)$ ,  $y(k)$  representa el par de entrada-salida en el tiempo  $k$ . Los enteros positivos  $n$  y  $m$  son el número de salidas pasadas (también llamado el orden del sistema) y el número de entradas pasadas. En la práctica  $m$  es, normalmente, menor o igual que  $n$ . También tenemos que  $f$  puede ser cualquier función no-lineal definida desde el espacio de entradas y salidas pasadas hasta el espacio de salidas futuras.

### 2.1.1.3 MODELOS NO PARAMÉTRICOS

Los métodos no paramétricos permiten obtener modelos aproximados de un conjunto de datos no finito de parámetros, siendo modelos estadísticos, los modelos no paramétricos que suelen usarse son el análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral para ayudar a identificar a los sistemas.

Este método es muy apropiado para obtener una idea rápida de la relación entre distintas señales del sistema, retardos, constantes de tiempo y ganancias estáticas del mismo

### ***Análisis de Respuesta Transiente:***

Es el análisis que permite determinar parámetros característicos del sistema. En el cual se basa en la respuesta al Escalón o la respuesta al impulso.

### ***Análisis de Correlación***

Con el análisis de correlación obtenemos los coeficientes del modelo respuesta al impulso finito (FIR), que relaciona la entrada con la salida.

$$y(t) = P(z)u(t) + \nu(t)$$

$$y(t) = (b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n})u(t) + \nu(t)$$

Consideraciones antes del análisis de correlación:

- Las series de tiempo de la entrada y la salida deben ser estacionarias o por lo menos cuasi-estacionarias.
- La entrada y el ruido no deben estar correlacionados.

Este análisis ayuda a detallar a partir de un conjunto de datos obtenidos directamente del sistema, una respuesta al impulso que permitirá observar algunos parámetros característicos del sistema.

Las señales que se enviarán a la planta deberán estar regidas a parámetros previamente establecidos.

La solución para encontrar los parámetros es:

$$\mathbf{b} = \Gamma_{\mathbf{u}}^{-1} \gamma_{\mathbf{uy}}$$

Dónde:

$$\mathbf{b} = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n]^T$$

$$\Gamma_{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \gamma_u(0) & \gamma_u(1) & \dots & \gamma_u(n) \\ \gamma_u(1) & \gamma_u(0) & \dots & \gamma_u(n-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_u(n) & \gamma_u(n-1) & \dots & \gamma_u(0) \end{bmatrix} \quad \gamma_{\mathbf{uy}} = \begin{bmatrix} \gamma_{\mathbf{uy}}(0) \\ \gamma_{\mathbf{uy}}(1) \\ \vdots \\ \gamma_{\mathbf{uy}}(n) \end{bmatrix}$$

Si la señal de entrada es una señal de ruido blanco con varianza  $\sigma_u^2$  entonces la matriz  $\Gamma_{\mathbf{u}}$  se simplifica:

$$\Gamma_{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_u^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_u^2 \end{bmatrix}$$

Y el cálculo de los parámetros queda de la siguiente forma:

$$b_k = \frac{\gamma_{uy}(k)}{\sigma_u^2}$$

#### 2.1.1.4 MODELOS PARAMÉTRICOS LINEALES

El estado actual de la estimación de parámetros en la identificación de sistemas corresponde a la teoría clásica de la regresión lineal. Es una necesidad para el futuro de la Identificación de Sistemas comprender en profundidad los desarrollos estadísticos relevantes en análisis de la regresión debido a que ahí es donde se asientan las bases de la Identificación de Sistemas, como lo expuesto en los libros de Carroll y Ruppert [12] y de McCullagh y Nelder [13].

Algunos de los modelos lineales más conocidos y usados son:

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

**Tabla 2-1 Tabla De Modelos Lineales Conocidos**

### *ARX (Auto-Regressive with eXogenous inputs)*

La Auto Regresión con entradas Externas se denota como:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t)$$

Que puede ser visto como una manera de determinar el siguiente valor de la salida dada las observaciones anteriores y las entradas. Aquí  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$  son polinomios en el operador desplazamiento hacia atrás ( $q^{-1}$ ) e  $y(t)$ ,  $u(t)$  y  $e(t)$  son las salida, entrada y ruido, respectivamente. Recordando que el ruido  $e(t)$  es una sucesión aleatoria normalmente distribuida de media cero y varianza  $\sigma^2$ .

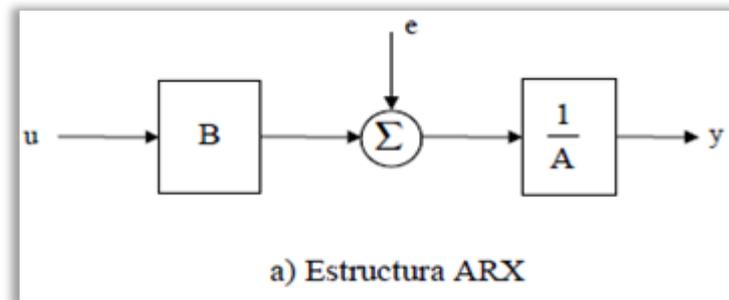


Figura 2-1 Estructura del Modelo ARX

### *OE (Output Error)*

El modelo de Error de Salida se denota como:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t - nk) + e(t)$$

Aquí en cambio tenemos que  $e(t)$  se ve como la fuente de error o que es la diferencia (error) entre la salida real y la salida libre de ruido (teórica).

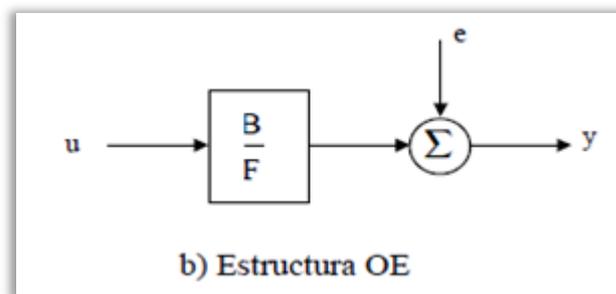


Figura 2-2 Estructura del Modelo OE

### ***ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs)***

El modelo de la Media Móvil Auto Regresiva con Entradas Externas se denota como:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + C(q^{-1})e(t)$$

En éste modelo la expresión  $A(q^{-1})y(t) = e(t)$  representa la auto-regresión,  $y(t) = C(q^{-1})$  representa la media móvil de ruido blanco, mientras que  $B(q^{-1})u(t)$  representa le entrada externa.

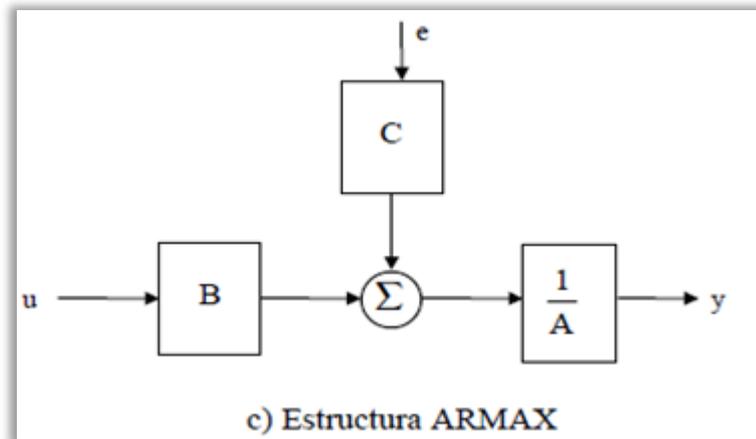


Figura 2-3 Estructura del Modelo ARMAX

### *BJ (Box Jenkins)*

El modelo Box Jenkins se denota como:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t - nk) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(t)$$

En éste modelo la expresión es un problema de regresión no lineal, se suelen buscar los órdenes más bajos para los polinomios B, F, C y D debido a que este modelo puede parametrizar independientemente a la función de transferencia y al ruido, lo malo es que el usuario suele tener que hacer muchas iteraciones para llegar a un excelente modelado.

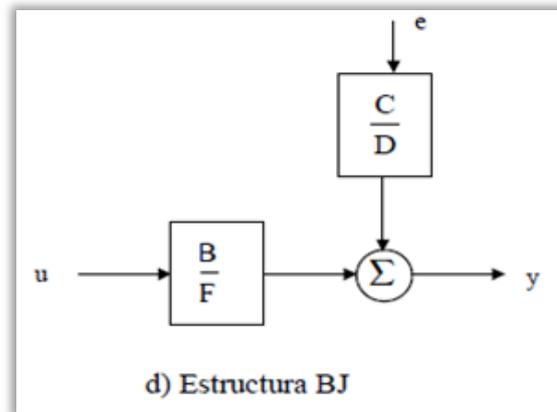


Figura 2-4 Estructura del Modelo BJ

## 2.2 HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para poder adquirir datos desde la planta a utilizar y poderlos llevarlos a un software designado es necesario utilizar una herramienta de adquisición de datos, en nuestro caso esa herramienta de adquisición es del Proveedor NATIONAL INSTRUMENTS (NI), un módulo CFP y en la planta usaremos la NI CB-68LPR.

El bloque conector que va en la planta es un accesorio de terminación de bajo costo con 68 terminales de tornillo para una fácil conexión de señales de E/S. Adicional a este bloque conector tenemos un conector macho de 68 pines para conexión directa con

cables de 68 pines que en nuestro caso irán al módulo CFP del Laboratorio de Control Automático para poder realizar una comunicación vía ETHERNET y tener la configuración en red.

Los bloques conectores incluyen monturas para utilizarse en escritorio o montados en un panel personalizado, que se han aprovechado en el montaje ubicándola en el interior de la consola de control de la planta que vamos a usar con una salida lateral para un manejo efectivo.

### **2.2.1 COMPACT FIELDPOINT**

Para nosotros trabajar a una gran velocidad de muestreo y garantizar una muy buena resolución en los datos a adquirir, es necesario una forma de adquirir datos muy confiable, el Compact FieldPoint es un controlador de automatización programable (PAC) fácil de usar y altamente expansible compuesto de módulos de E/S robustos e interfaces de comunicación inteligentes.

Los módulos de E/S de Compact FieldPoint filtran, calibran y escalan señales de sensores sin procesar a unidades de ingeniería

así como realizar auto-diagnósticos para encontrar problemas como, por ejemplo, un termopar abierto, algún error de conexión e incluso algún posible circuito abierto o en cortocircuito en el sistema a tratar.

A través de sus servidores integrados de Web y archivos, la interfaz Compact FieldPoint publica automáticamente medidas en la red Ethernet, lo cual nos ayuda en caso de que hubiese más de un estudiante tratando de utilizar alguna planta del Laboratorio de Control Automático.



**Figura 2-5 Algunos De Los Elementos Del CFP**

Dentro de los detalles generales del CFP se ubica su alimentación, este modulo puede usar las fuentes de poder proporcionadas por NI que datan de un gran rendimiento una gran resistencia, una

expectación de vida muy larga, tamaño compacto y reserva de energía. Sus 24V DC con una potencia de 19W con una entrada de 100-240 VAC son ideales para todo tipo de aplicaciones y todo tipo de cargas.

Para protección posee un amplio rango de corrección de error y la función de autoselección de la entrada de voltaje. Un rango manejable de temperatura y una extraordinaria inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI: ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IMMUNITY) incluso en las condiciones más adversas.

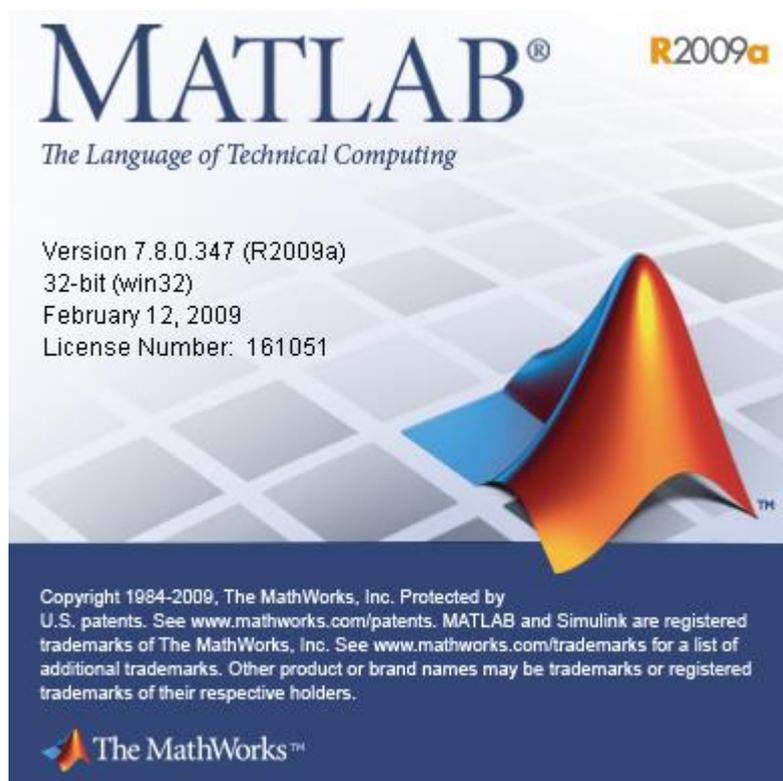
### **2.2.2 SOFTWARE DE TRABAJO**

Como mencionamos anteriormente para nosotros poder trabajar en la Identificación de Sistemas vamos a apoyar nuestro trabajo en el software MATLAB, una herramienta muy poderosa al momento de realizar algoritmos recurrentes, métodos de estimación entre otros métodos usados en la elaboración de esta tesina, para poder entender un poco más del software denotaremos sus aspectos básicos pero importantes.

### 2.2.2.1 MATLAB (MATrix LABoratory)

Nuestro software se deriva de la abreviatura "MATrix LABoratory", que en nuestro idioma significa "Laboratorio de Matrices", este es un poderoso software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.



**Figura 2-6 Entorno De MATLAB**

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (Plataforma de Simulación Multidominio) y GUIDE (Editor De Interfaces De Usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (TOOLBOXES); y las de Simulink con los paquetes de bloques (BLOCKSETS).

Fue creado por Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico,

sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK sin tener que usar Fortran [14].

Las funcionalidades de MATLAB se agrupan en más de 35 cajas de herramientas y paquetes de bloques (para Simulink), clasificadas en las siguientes categorías:

<b>MATLAB (Cajas de herramientas)</b>	<b>Simulink</b>
Matemáticas y Optimización	Modelado de punto fijo
Estadística y Análisis de datos	Modelado basado en eventos
Diseño de sistemas de control y análisis	Modelado físico
Procesado de señal y comunicaciones	Gráficos de simulación
Procesado de imagen	Diseño de sistemas de control y análisis
Pruebas y medidas	Procesado de señal y comunicaciones
Biología computacional	Generación de código
Modelado y análisis financiero	Prototipos de control rápido y SW/HW HIL
Desarrollo de aplicaciones	Tarjetas integradas
Informes y conexión a bases de datos	Verificación, validación y comprobación

**Tabla 2-2 Clasificación de Cajas de Herramientas MATLAB**

### 2.2.2.2 IDENT (Sistem Identification Tool)

La Herramienta asignada por MATLAB a la identificación de sistemas fue esta, a partir de la entrada y salida de un sistema se trata de estimar las FDT (funciones de transferencia) de la componente estocástica ( $H(q)$ ) y determinista ( $G(q)$ ).

Los datos importados se separan en dos. Una para identificar y otra para validar. Esto ayuda a los usuarios para poder separar adecuadamente un porcentaje de los datos importados y poder efectuar un análisis acertado al momento de realizar una prueba de identificación de sistemas, dejándonos espacio para poder realizar estimaciones tanto paramétricas como no paramétricas y de correlación.

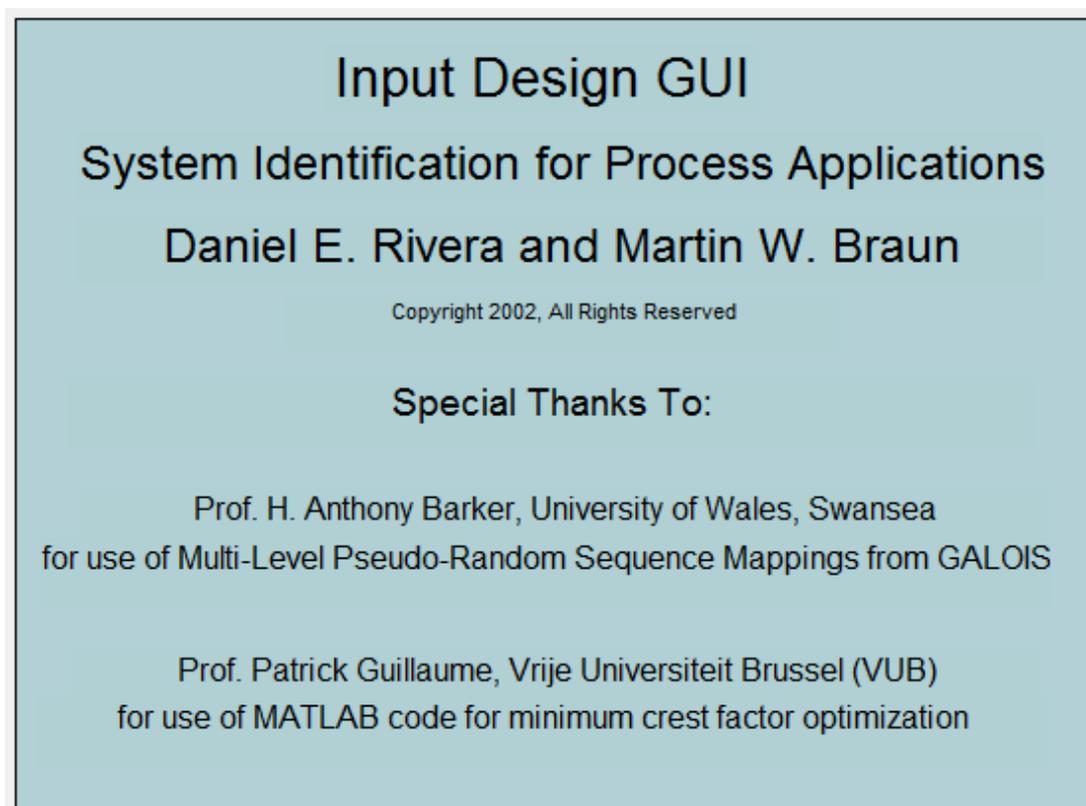
Para la estimación de correlación y la estimación no paramétrica debemos realizar un estudio en el dominio de la frecuencia, una de sus opciones es la de ETFE, una función que estima funciones de transferencia empírica y periodogramas y en conjunto con otra de sus opciones es la SPA que en cambio estima respuestas de frecuencia con frecuencias de resolución fijas usando análisis espectral.

Para los análisis de ruido se puede dar en la EFTE pero para el espectro de ruido solo podemos usar la función SPA.

Para la estimación paramétrica que es una de las que más explica en la identificación de variables de estado, se denota una estimación de todos los órdenes de preferencia con ARX para poder escoger un modelo que se asemeje de mayor manera al original.

### **2.2.2.3 INPUTDESIGNGUI (Guide User Interface for Input Design)**

La Herramienta asignada por MATLAB en un desarrollo de software proporcionado a los estudiantes por medio del Ing. César Martín en calidad de facilitador de los derechos del software otorgado por los desarrolladores de la Universidad de Wales, Swansea y Vrije Universiteit Brussel (VUB) desarrollada por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun en el año 2002.



**Figura 2-7 Ventana de Ingreso al InputDesignGUI**

La Herramienta InputDesignGUI permite al usuario familiarizarse con las diferentes señales de entradas que se pueden enviar a un sistema para su posterior identificación, está de más resaltar la importancia de este software puesto que potencia la facilidad para el usuario al momento que él conoce los tipos de señales, tiene un previo conocimiento y las contrasta para poder elegir correctamente una de ellas.

Vamos a encontrar en ella un grupo de señales de entradas de tipo: Doble Pulso, RBS, PRBS, MPRBS y MULTISINUSOIDAL. Cada una de ellas con sus respectivos parámetros característicos y con la facilidad de ver los diferentes tipos de gráficos como lo son el de Autocorrelación, Espectros de Potencias, Histogramas, entre otros.

Una de sus grandes ventajas es la característica de poder exportar tanto los datos de la señal creada, así como los gráficos vistos en MATLAB, brindando la oportunidad de poder editarlas posteriormente, contrastar diferentes señales de entradas, e inclusive manejarlas en el entorno de trabajo de MATLAB sin necesidad de tener el software ejecutándose y haciendo los cambios correspondientes antes de tener que probarlas en la planta real, brindando la oportunidad de ahorrar tiempo y pruebas innecesarias en la planta.

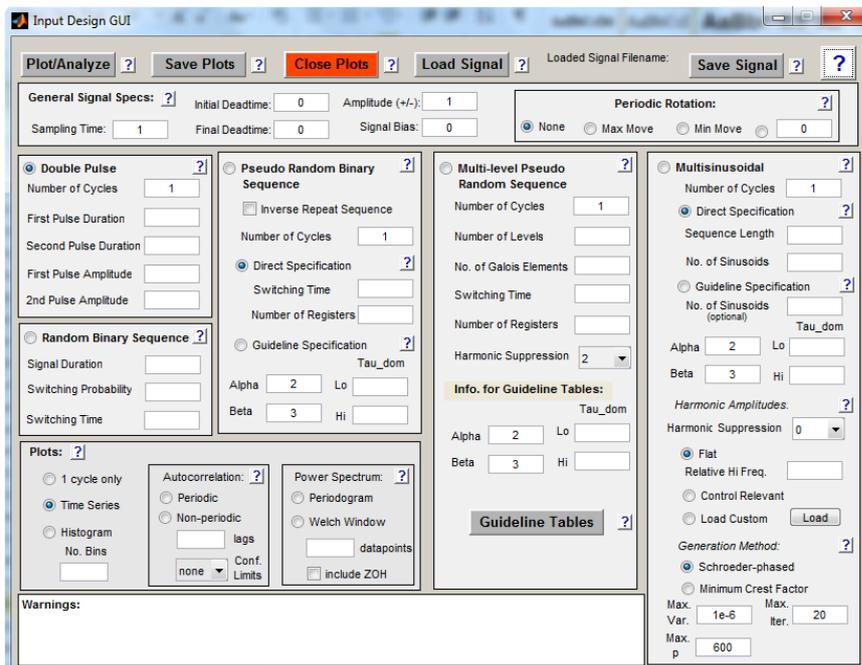


Figura 2-8 Vista de InputDesignGUI

## 2.3 PLANTA REAL DE PH

La planta real que se usará cuenta con un sistema de neutralización ácido-base, pero nosotros nos enfocaremos en el control del ácido. Los elementos con los que trabajaremos son:

- Sensor de pH. (1)
- Bomba Peristáltica. (2)
- Ácido a Utilizar (3)
- Tanques y Reservorios (4)
- Agitadores (5)
- Fuentes de Voltajes
- Controles del Panel Principal

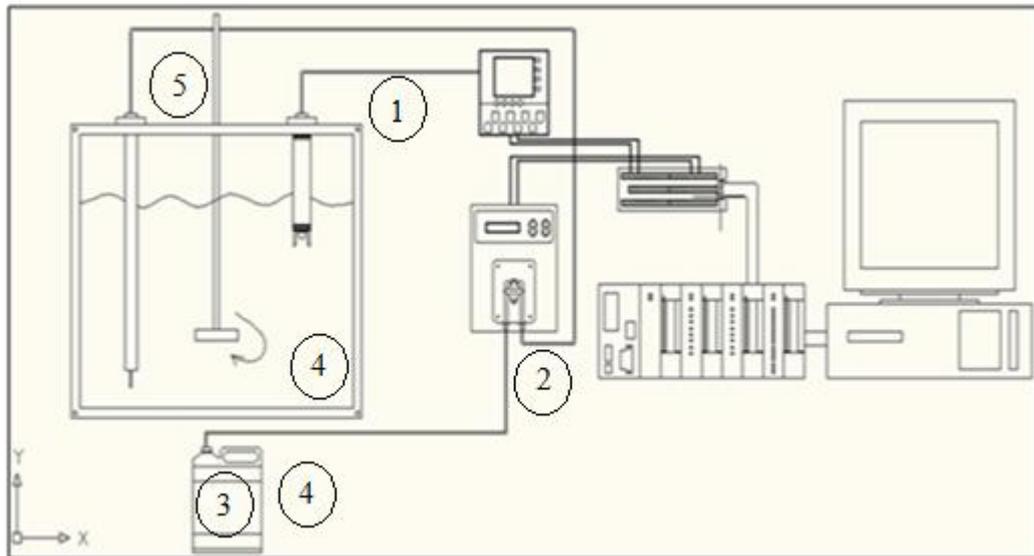


Figura 2.3-1 Esquema De La Planta Real

### *Sensor de pH*

El módulo sensor de pH es el encargado de enviar la señal recibida del electrodo a la tarjeta de adquisición de datos, CFP. Este módulo consta de un electrodo; el cual es el encargado de estar en contacto con el ácido diluido y enviar el voltaje proporcional al módulo principal o sensor que funciona como un DISPLAY mientras nos muestra en tiempo real el valor que recoge el electrodo del tanque de ácido, es muy útil la parte de la visualización en tiempo real porque nos da una idea de los puntos de saturación de la planta y de disociación de la solución.

Los valores o rango de operación de nuestro sensor son de -14mV/14mV dato muy relevante al momento de la configuración del CFP para esa entrada y al momento del manejo de las protecciones o medidas de seguridad.

El sensor de pH que usamos es el pH ACTIVE PASSIVE TRANSMITTER DO 9785T este transmisor de pH posee un DISPLAY LCD de 96x96 que permite la visualización de sus valores nominales en pH y en mV configurables, posee una salida de 4-20mA aislada con 2 cables para el modo pasivo y 4 cables para el modo activo. Su fuente de alimentación en modo activo es de 24V AC en requerimiento de 230V AC y en el modo pasivo tenemos 10V DC en respuesta a 35V DC.

Posee un electrodo que funciona de forma similar a una punta de prueba, este transductor nos ayuda a medir no solo pH sino también temperatura, recordemos que la mayoría de procesos que involucran pH suelen también tener una relación dependiente con la temperatura.

Tiene el usuario la libertad para la configuración de parámetros, para la alimentación se mencionó 2 tipos de fuentes de voltaje: 24V AC configurado por defecto y 230 V para alimentación continua en modo activo. 10-35V DC para alimentación en modo pasivo y para la salida 2 Relay de salida de 3A/230V



**Figura 2.3-2 Forma Física Del Medidor De pH**

Este tipo de sensor posee una alta recomendación para entradas directas a PLC, CFP y otros dispositivos de adquisición de datos, se puede calibrar de manera muy sencilla para un uso general, o si se prefiere para un modelo más específico.

Para efecto de nuestra planta la calibración se realizó con un buffer de 4 para la medición de las sustancias acidas y con un buffer de 7 para la parte inicial por que la sustancia inicial es agua.

### ***Bomba Peristáltica***

La planta cuenta con 2 bombas peristálticas, de las cuales la designada para el ácido será la que usaremos, estas bombas son las mejores al momento de manejar sustancias peligrosas y corrosivas, gracias a su sistema de cero contacto con la sustancia nos permite tener un mecanismo más duradero y de mejor calidad garantizando la pureza de las sustancias que pasaran por ella.

La bomba cuenta con un DISPLAY que especifica el porcentaje máximo de caudal enviado, para efecto de nuestro proyecto este rango será entre 10%-25% para poder aprovechar al máximo la linealidad de su función de transferencia.

Estos valores de la bomba son configurados por medio de entradas de corriente dadas por un rango casi lineal entre 4mA a 20mA, dejando para configuración de nuestro punto de operación los valores entre 5.6mA y 8mA.

El Sistema de dosificación o Bomba Peristáltica son de la marca Basic Pro, es un producto ideal para dosificaciones muy pequeñas mediante software, donde elegimos la cantidad a dosificar, el caudal en forma de porcentaje y la forma de envío/recepción de

señales. Además está diseñado para realizar dosificaciones a partir de señales externas o maniobras.

Dentro de sus características generales tenemos las siguientes:

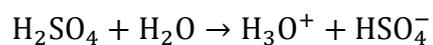
- Corriente de control expresada entre 4mA-20mA que corresponden al 0%-100% para una dosificación proporcional.
- Dosificación constante y continua ó proporcional.
- Regulación de caudal mediante software.
- Control de Velocidad por software.
- Caja de polipropileno con IP65.
- Tubos de membrana de SANTOPRENE con racores instalados.
- Equipadas con kit de instalación compuesto por: fijador, tornillos, filtro de aspiración, RACORD de inyección y tubos de aspiración e impulsión, (2 metros).
- Equipadas con entrada eléctrica para conexión de control de nivel.
- Equipada con botón de ON-OFF y CEBADO.
- Entrada digital para dosificación proporcional al caudal.
- DISPLAY 2 líneas 16 caracteres (Azul-blanco).
- Entrada de arranque dosificación (FLOW CHECK) 240Vac.
- Relé (libre de potencial) para control opcional de electroválvulas.
- Menú de programación.



Figura 2.3-3 Visualización de la Bomba Peristáltica

### *Ácido A Utilizar*

Se va a utilizar ácido sulfúrico, este es considerado como un ácido fuerte debido a que se disocia en solución acuosa y dona 1 protón. Su concentración se puede obtener con características de un 96% de pureza, la ecuación siguiente es de la reacción de ácido sulfúrico con agua la cual muestra la formación de iones hidronio en solución acuosa.



Ácido sulfúrico más agua = Reacción exotérmica

Los ácidos fuertes concentrados pueden producir graves daños a la piel o los músculos, pues causan quemaduras químicas

semejantes a las que origina el calor y las cuales suelen ser tratadas del mismo modo.

Los ácidos fuertes corrosivos también perforan la ropa que contiene fibras naturales como algodón, seda o lana, y destruyen casi todos los materiales sintéticos como las fibras de nailon, poliéster y acrílico. Hay que tener mucho cuidado de no derramar ácidos sobre la piel o ropa.

Es por esta razón que optaremos por diluir un volumen de nuestro ácido en una solución resultante de 4 litros para poder neutralizar un poco los efectos corrosivos y los riesgos de quemaduras por ácido.

### ***Ecuación De Concentración De Ácidos***

La ecuación detallada a continuación se usó al momento de la disolución del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en el Agua:

$$V_1C_1 = V_2C_2$$

$$(15\text{mL})(18.76\text{M} * 0.96) = (4\text{L}) * C_2$$

$$C_2 = 0.067536\text{M}$$

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

$$\text{pH} = -\log(2 * C_2)$$

$$\text{pH} = 0.87$$

Se tienen dos escenarios al momento de equilibrar la ecuación Volumen-Concentración. Se considera primero el volumen y la molaridad de nuestra solución inicial en la parte izquierda de nuestra ecuación y en la segunda parte se considera el volumen y la molaridad de la solución final a la cual se quiere llegar, y que en nuestro caso sería la solución ya diluida en agua

La ecuación detallada no tenía en primera instancia el valor de 15mL, tomados de nuestro ácido sulfúrico con un 96% de pureza y de 18.76 Molar, y el valor de 4 litros que es la cantidad de solución final que queremos obtener, estos valores fueron prefijados por nosotros luego de análisis experimentales que revelaban un pH cercano a 1 y que al momento de preparar la solución no gastaba mucho recurso del ácido concentrado.

### *Tanques y Reservorios*

Se procedió a la elaboración de tanques de acrílico para facilitar la disolución de las sustancias usadas en la planta. Nuestra planta posee 2 tanques, 2 reservorios y un reactor, los tanques son de capacidad de 35 litros, de forma cúbica para poder tener en ellos las sustancias inicial y final y el reactor es de forma cilíndrica para realizar la reacción de neutralización.

Dos reservorios asignados a las sustancias principales Ácido Sulfúrico  $H_2SO_4$  e Hidróxido de Sodio NaOH, estos reservorios son de plástico y se les introduce la sustancia diluida del Ácido Sulfúrico y del Hidróxido de Sodio.

Un Tanque de Acrílico será asignado para el compuesto inicial que en nuestro caso es de 25 L de Agua ( $H_2O$ ) y en él se realizará la estabilización de pH a el valor asignado por el usuario, o el deseado para la prueba.

### ***Agitadores***

Los agitadores están ubicados en los contenedores de sustancias, estos ayudan a agilitar el proceso de disolución del ácido, están controlados de manera ON/OFF, y el uso de ellos sobre nuestro proceso se los considerara siempre en estado ON a velocidad constante.

Su motor es el mismo usado en los parabrisas de un vehículo con una entrada de 14V y una potencia nominal de 12W lo suficiente para poder trabajar hasta 30 minutos de manera continua en la planta. La mayoría de las pruebas no sobrepasa ese tiempo por lo que este motor es acertado.

### ***Fuente de voltaje***

El detalle de las fuentes de voltaje se lo hará a continuación debido a que hay 3 fuentes en total en nuestra planta, una del CFP, la otra fuente que es la principal y una pequeña destinada para protección. Su fuente interna es de 24V DC con una potencia de 19W con una entrada de 100-240 VAC son ideales para todo tipo de aplicaciones y todo tipo de cargas.

Para protección posee un amplio rango de corrección de error y la función de autoselección de la entrada de voltaje. Un rango manejable de temperatura y una extraordinaria inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI: ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IMMUNITY) incluso en las condiciones más adversas.



**Figura 2.3-4 Fuente De Voltaje NI**

### ***Control de Panel Principal***

El panel principal posee un grupo de 6 botones y un SWITCH de ON/OFF para la planta principal. Una vez que el SWITCH principal este encendido los otros botones funcionarán, los botones son detallados a continuación:

***Medidor PH1:*** Energiza el primer sensor de pH destinado para el acido.

***Agitador 1:*** Energiza el primer agitador de sustancias destinado para el acido.

***Bomba Peristáltica 1:*** Energiza la bomba peristáltica destinada para el acido.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA Y ESTIMACIÓN DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS**

#### **3.1 GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

Una vez detallado el equipo que se va a utilizar en esta planta (CAPÍTULO 2.3 PLANTA REAL DE PH), se procederá a explicar cómo se generan las diversas señales que serán enviadas de la PC a la planta y como se obtienen los datos resultantes mediante el uso del OPC con el Software de MATLAB, usando la librería de SIMULINK.

A continuación se muestra el diagrama de bloques que utilizamos para el envío y recepción de datos:

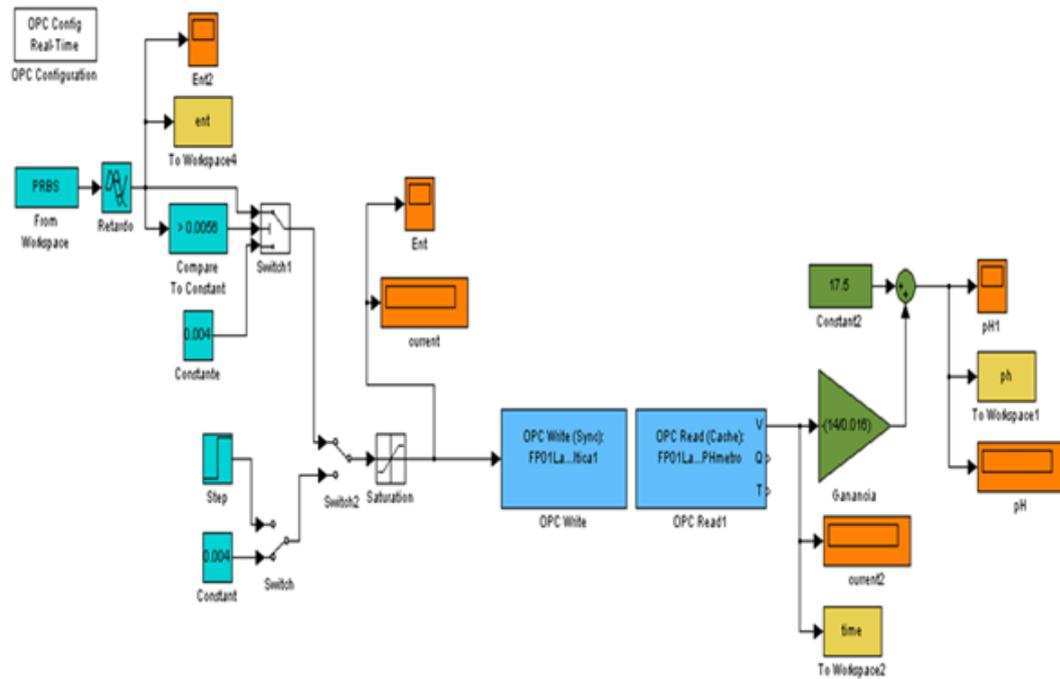


Figura 3-1 Diagrama de Bloques Para Generación y Adquisición de Datos

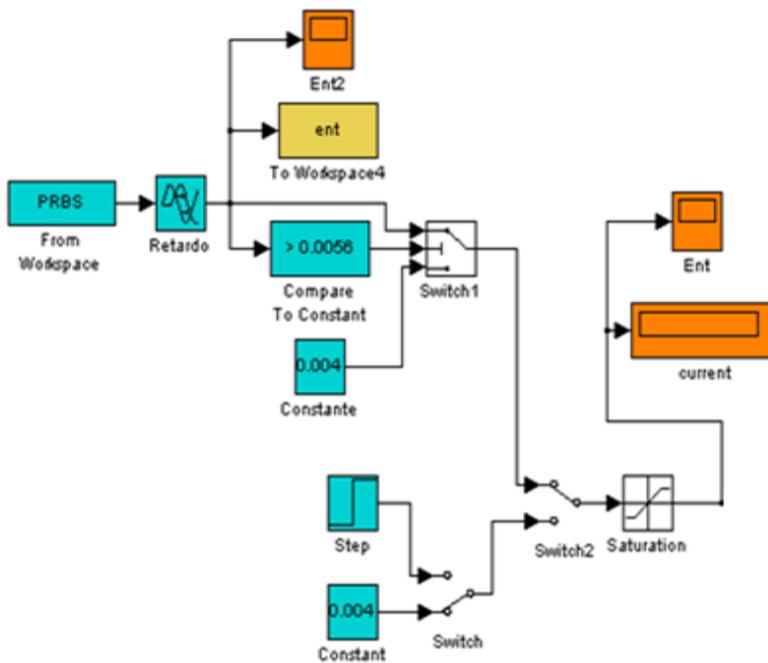


Figura 3-2 Bloques de Generación de Datos

Aquí se muestra la parte que genera los datos, para ello hay 2 opciones, en 1ra instancia se usará la parte inferior la cual cuenta con un STEP, y que es el 1er paso para el proceso de identificación no paramétrico, mandar una señal escalón a la planta. La parte superior se usa posteriormente, para mandar señales de entrada un poco más complejas como lo son la PRBS, RBS o Multiseno.

El diseño de estas se explicara más adelante, pero una vez creadas se las importara al diagrama mediante el bloque FROM WORKSPACE, después de este se encuentra un bloque de retardo, esto se justifica al utilizar filtros una vez obtenida la señal de la planta.

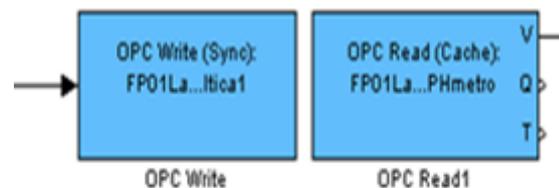
Debido a que se va a trabajar en un punto de operación diferente de cero, los filtros deben estabilizarse primero, después de eso hay un comparador que sirve para garantizar que la bomba que se está usando se apague con una corriente menor 5.6mA.

Debido a que en el rango comprendido entre 4mA - 5,6mA (0% - 10%) se genera una valor incierto en la función de transferencia de las bombas peristálticas por razones de linealidad, pues con un

valor de corriente superior a 4mA la bomba hace un salto de 0% a 10% siempre y cuando este valor de corriente sea menor a 5.6mA.

Lo detallado en el párrafo anterior nos dice en resumen que los datos en este rango no serían acertados por lo que se optó en ubicar el punto de operación entre 10%-25% del caudal de la bomba, y que en corriente se traduce en 5.6mA-8mA. Así podremos manejar de una manera más lineal la bomba y se validará que cualquier dato menor a 5.6mA apague a la bomba, es decir envíe a la bomba 4mA y así los datos obtenidos tendrán un error reducido.

Finalmente hay un bloque saturador para garantizar de que no se vaya a mandar mayor corriente de lo necesario a la planta, aunque en teoría la tarjeta está en condiciones de manejar corrientes más altas el saturador no deja pasar más de 20mA que es lo máximo que podrían recibir las bombas peristálticas.



**Figura 3-3 Bloques De Lectura y Escritura del OPC**

Estos son los 2 bloques principales que se utilizan para escribir y leer del OPC. El OPC WRITE se usa para mandar la señal de entrada a la planta, es decir la corriente de 4 a 20mA que controla el flujo de acido que se envía al tanque, mientras que el OPC READ se usa para recibir la señal de la planta, o la lectura que nos da el sensor de pH (Medidor de pH) colocado en el tanque.



Figura 3-4 Bloque de Propiedades Del OPC Modo Escritura

El bloque OPC en Modo escritura nos pide especificar el canal del cual se va a enviar la señal de control para interactuar con la planta y el tiempo de muestreo.

NOTA: EL modo de escritura debe estar ubicado en sincrónico para no generar problemas.



**Figura 3-5 Bloque de Propiedades Del OPC Modo Lectura**

El bloque OPC en Modo Lectura nos pide especificar el canal del cual se va a leer la señal de la planta para interactuar con la PC y poder adquirir datos.

NOTA: EL modo de lectura debe estar ubicado en sincrónico para no generar problemas y debe especificarse como se adquirirán los datos.

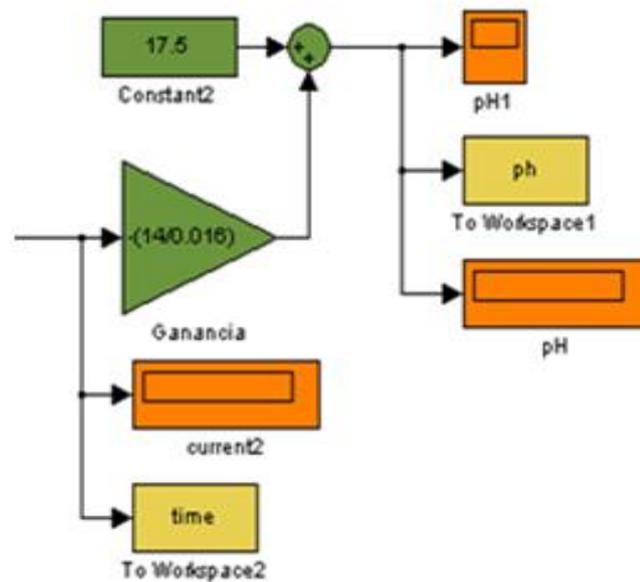
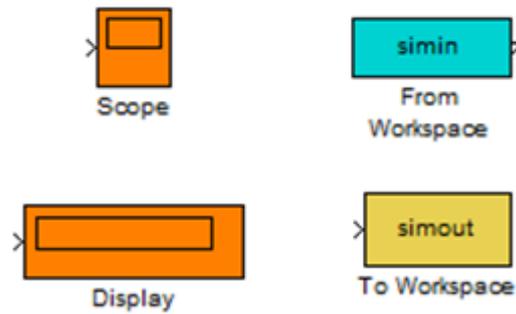


Figura 3-6 Bloques De Salida a WORKSPACE

Una vez obtenida la señal del medidor de pH, esta se lee como corriente que puede variar de 4 a 20mA, por lo tanto se hace una conversión a pH mediante la ecuación:  $pH = \frac{-14}{0.016} I + 17.5$  la cual se encuentra expresada en el diagrama de bloques por la presencia de ese bloque de ganancia y la suma de esa constante.



**Figura 3-7 Para Visualización y Tratamientos de Datos**

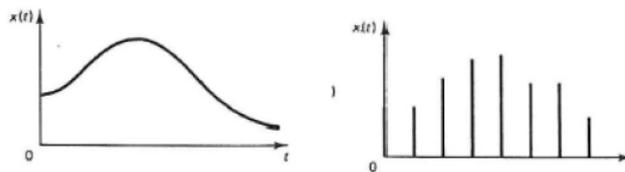
A parte también se utilizan otros bloques para poder guardar datos en MATLAB y para visualizarlos en el momento. El bloque de FROM WORKSPACE sirve para traer arreglos que se encuentran en el espacio de trabajo de MATLAB, el bloque TO WORKSPACE en cambio envía datos obtenidos en SIMULINK hacia el espacio de trabajo de MATLAB donde se los puede guardar.

Por otro lado tenemos los bloques de SCOPE y DISPLAY que eran simplemente para visualización, en el SCOPE se podía observar como variaba la señal con respecto al tiempo, mientras que en el DISPLAY se observa la señal en forma discreta.

## 3.2 ANÁLISIS DE LA PLANTA

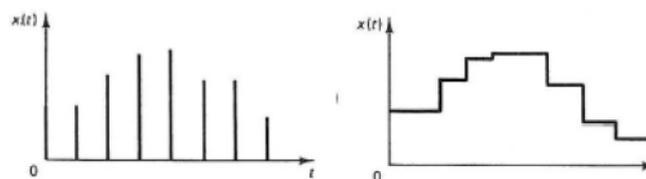
### 3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO

Para el control de la planta se usara una computadora, por lo que toma importancia el periodo de tiempo al que se va a muestrear. El muestreo como lo ve la computadora, no es más que convertir una señal continua en un conjunto de impulsos espaciados un intervalo  $T$  de tiempo.



**Figura 3-8 Diferencia Entre Señal Continua y Señal Discreta**

Ahora para la reconstrucción de la señal se utiliza lo que es un retenedor, que es el que mantiene la salida constante hasta que la siguiente muestra se obtenga un periodo de muestreo después.



**Figura 3-9 Señal Discreta y Su Muestreo**

Para seleccionar el periodo de muestreo hay que considerar varios factores, este no puede ser ni tan rápido ni tampoco lento. En cada caso irse al extremo traería consecuencias desafortunadas para la identificación de la planta.

Un tiempo de muestreo muy rápido puede excesivamente recargar el procesador de la computadora y no dejarlo desarrollar correctamente sus tareas, mientras que un tiempo de muestreo lento reducirá la efectividad del proceso de identificación pudiéndose no captar correctamente la dinámica del sistema de la planta, e inclusive en un lazo cerrado podría perjudicar su control y su capacidad para reaccionar ante perturbaciones.

Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shanon, para poder replicar con precisión la forma de onda de un sistema, se requiere que la frecuencia de muestreo sea mayor a 2 veces la frecuencia a muestrear.

Con esto se obtiene que la frecuencia de Nyquist en rad/seg es:

$$\omega_N = \frac{\pi}{T}$$

El ancho de banda del sistema se determina mediante el grafico de Bode, y su relación con  $\tau_{Dom}$ :

$$W_B = \frac{1}{\tau_{Dom}}$$

Un criterio que se puede utilizar es que:

$$W_N > \alpha * W_B$$

Donde  $\alpha$  es un entero múltiplo del ancho de banda, con lo que obtenemos que:

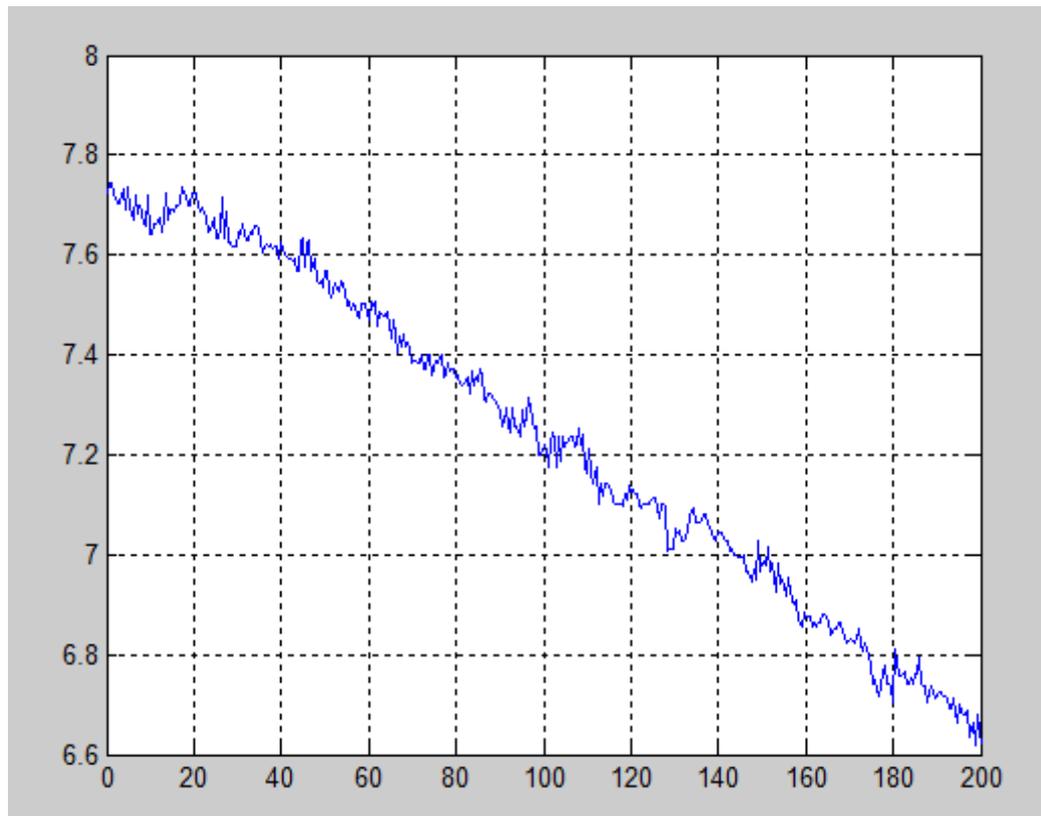
$$T \leq \left(\frac{\pi}{\alpha}\right) \tau_{Dom}$$

Como se puede observar de la formula anterior, para determinar el periodo de muestreo vamos a necesitar del  $\tau_{Dom}$  de la planta. Por lo tanto, hay que obtener la respuesta al escalón de la planta.

### 3.2.2 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN.

Nuestra señal de entrada en lazo abierto será mandada directamente al actuador, que en nuestro caso es la bomba peristáltica, esta admite señales de 4 a 20 mA para llegar a rangos de 0% a 100% de la capacidad de flujo  $q$  puede entregar. Nosotros escogimos trabajar en un rango de 10% a 25% el cual nos pareció un rango lineal aceptable de punto de operación para la bomba.

Se mandó una señal de 5.6 mA a 8 mA a la bomba en el segundo 0 y se obtuvo el siguiente resultado:



**Figura 3-10 Respuesta Al Escalón De La Planta**

Debido a que la bomba envía constantemente flujo de ácido hacia el tanque, el pH no tiene otra opción más que bajar, dándonos una respuesta inversa. Idealmente debería llegar hasta el mismo valor de pH de ácido que se está ingresando, pero esto requeriría de mucho tiempo y bastante cantidad de ácido el cual no estamos dispuestos a desperdiciar.

Además también hay que considerar que debido a que el ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) es un ácido diprótico (posee 2 iones Hidrógeno),

este tiene 2 puntos de disociación fuertes mientras se está introduciendo en el agua, esto se puede ver como que en algún momento dado requerirá bastante cantidad de ácido para poder seguir bajando el pH, de lo contrario permanecerá prácticamente constante como si fuera algún punto de saturación, este fenómeno es propio de la naturaleza del ácido.

Para efecto de nuestros análisis esta no linealidad solo nos traerá dificultades en nuestro proceso de identificación. Este hecho nos restringirá a escoger bien el punto de operación en el cual va a trabajar la planta que para nosotros será en pH 7, por facilidad de identificación.

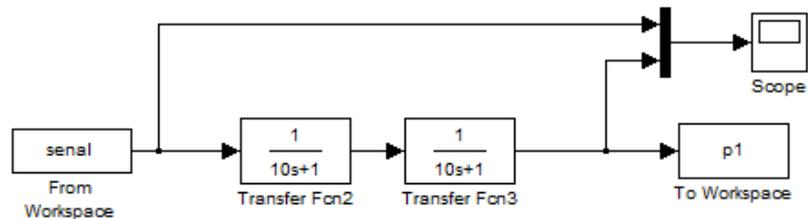
Otro aspecto que se puede observar es que la planta presentó demora al momento de reaccionar y disminuir su pH, esto se conoce como retardo. Analizando por qué se produce este retraso se descubrió que es debido a que al mandar la señal desde la computadora hasta la bomba, esto toma 5 segundos, y adicional a esto también hay un retardo adicional de 3 segundos en que la bomba pase de 10% a 25%. Este retardo será importante tener en cuenta al momento de identificar ya que nos aumentara el orden de la planta que identifiquemos.

Finalmente el punto más importante que se destaca es que el pH solo puede disminuir, no hay forma de volverlo elevar tal y como está diseñada la planta, ya que la señal de entrada solo permite que entre mayor o menor cantidad de ácido al tanque. Este es un problema debido a que la principal herramienta que usa la identificación no paramétrica es el análisis de correlación, para lo cual una de sus 3 características principales que debe de tener la serie de tiempo a analizar es que sea estacionaria.

Esto implica que se encuentre en “equilibrio estadístico”, es decir que no contenga ni tendencias ni desvíos o que no presente una varianza ni media constante, también se lo puede ver como que un proceso es “estrictamente estacionario” si sus propiedades no se afectan por el cambio en el tiempo de origen. Por lo general un sistema no estacionario involucra un proceso integrativo, una solución que se usa en estos casos es la de diferenciar los datos hasta obtener una serie estacionaria.

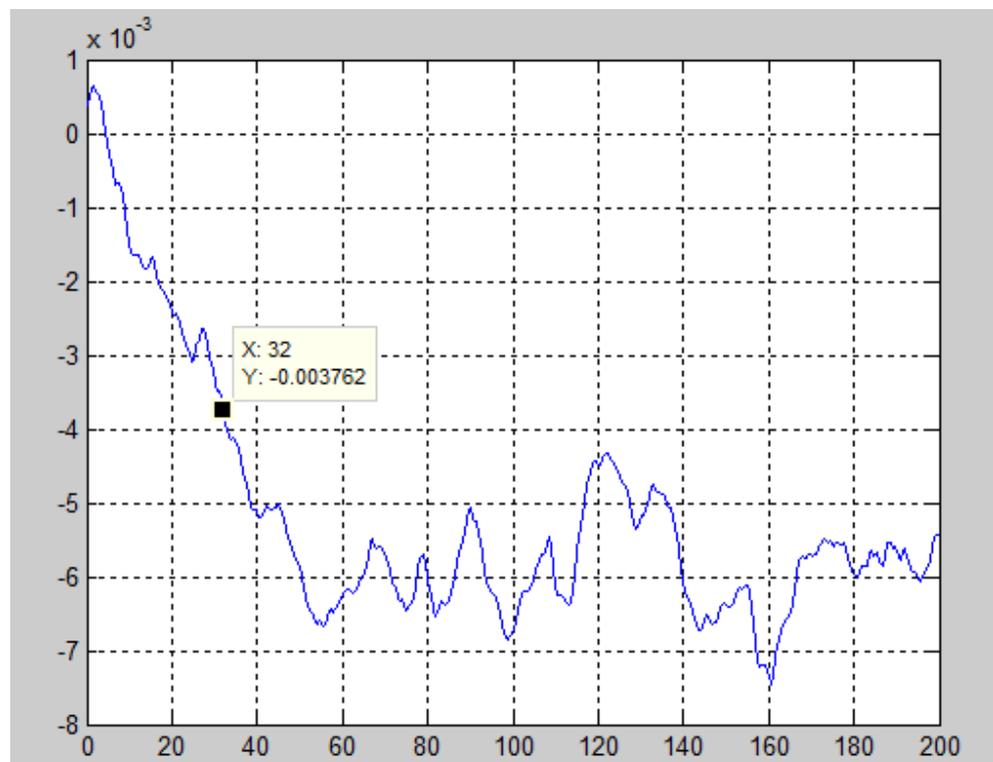
Al diferenciar la respuesta al escalón nos dimos cuenta de que el ruido que esta poseía, hacia prácticamente imposible hallar la respuesta deseada ya que la señal diferenciada obtenida era

prácticamente ruido. Por esto se procedió 1ro a filtrar la respuesta al escalón con el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 3-11 Bloques De Filtrado De La Señal**

Y una vez filtrada, se paso a diferenciar los datos, para obtener el siguiente resultado:



**Figura 3-12 Datos Filtrados Y Diferenciados**

Debido a que se uso una técnica de diferenciación de datos para eliminar el factor integrativo de la planta y así hallar un sistema estacionario, al final cuando ya se haya identificado la planta habrá que devolverle este integrador para poder reconstruir verdaderamente cómo se comporta la misma.

### 3.2.3 CONSTANTE DE TIEMPO (TAO - $\tau$ )

Ahora si después de todos estos detalles, podemos obtener el  $\tau_{Dom}$  que gobierna la planta, y que se da cuando la respuesta al escalón haya alcanzado el 63.2% de su valor final, para esto se tiene:

$$\Delta y = 0.006$$

$$0.632 * 0.006 = 0.0037$$

De esto se obtiene:

$$\tau = 32 - 8$$

$$\tau = 24s$$

Al tiempo que se halló cuando la respuesta alcanzaba el 63.2% de su estado final, se le resto 8 segundos, debido a que este es parte del retardo el cual no se considera como parte del  $\tau$  de la planta.

Además como se puede observar, la planta demora menos de  $4\tau$  en alcanzar su valor de estado final, lo cual nos da a entender que se trata de un sistema superior al de 1er orden.

Hay otro par de parámetros que nos ayudarán posteriormente con el proceso de identificación y están relacionados con la respuesta al escalón de la planta, estos son la ganancia y el tiempo de estabilización, y se los puede obtener de manera similar al  $\tau$ .

### 3.2.4 GANANCIA

Es la relación que hay entre la salida y la entrada en estado estacionario.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$
$$K = \frac{0.006}{0.008 - 0.0056}$$
$$K = 2.5$$

### 3.2.5 TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN

Tiempo en el cual la señal llega a una franja de  $\pm 2\%$  de su amplitud, pero debido a que existía demasiado ruido previo a

diferenciar, la señal diferenciada parecería inestable al no entrar a la franja, por lo que se tuvo que tomar un aproximado.

$$T_s = 65 \text{ s}$$

### 3.2.6 CÁLCULO DEL TIEMPO DE MUESTREO

Una vez hallado el  $\tau$  y con el análisis de frecuencia de muestreo que se hizo previamente, se pasa a hacer el cálculo del tiempo de muestreo para su uso posterior:

$$T \leq \left(\frac{\pi}{\alpha}\right) \tau_{\text{Dom}}$$

$$T \leq \left(\frac{\pi}{15}\right) 24$$

$$T \leq 5.02$$

Bajo este criterio conseguido y para asegurarnos de reconstruir perfectamente la señal, podemos escoger un tiempo de muestreo 10 veces menor al del límite hallado, es decir el tiempo de muestreo q vamos a usar será de 0.5 segundos.

### 3.3 DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA

Como base para el diseño de la señal de entrada se tiene que esta señal debe ser “amigable a la planta”, esto consiste en 3 puntos sencillos a considerar:

- Ser tan corta como sea posible.
- No llevar a los actuadores al límite o exceder las restricciones de movimiento.
- Causar la mínima interrupción a las variables de control del proceso. (Baja varianza, pequeñas desviaciones del punto de operación)

Los siguientes tipos de entrada cumplen con estos requerimientos de ser “amigable a la planta” según como los vayamos diseñando, nos basaremos en estas señales para la identificación de la planta:

- Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)
- Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)
- Señal Multisinusoidal

Para la construcción de estas señales, usaremos un programa llamado INPUTDESIGNGUI (Capítulo 2.2.2.3 INPUTDESIGNGUI Guide User Interface For Input Design) que trabaja en MATLAB.

### 3.3.1 PARÁMETROS COMUNES DE LAS SEÑALES RBS, PRBS Y

#### MULTISINUSOIDAL

Para el diseño de cualquiera de las señales anteriores, se tiene los siguientes parámetros en común:

##### *Tiempo De Muestreo*

Tiempo en el cual se van a ir obteniendo los datos de la señal creada. En nuestro caso ya fue seleccionado y es de 0.5 segundos.

##### *Amplitud (+/-)*

Valor máximo y mínimo que tomará la señal creada. Se escogió el valor de 0.0068.

##### *Desfase De La Señal*

Es un valor de desplazamiento que es sumado a la amplitud. Se escogió el valor de 0.0012.

### ***Rango De La Señal***

La combinación de la amplitud y desfase de la señal darán como resultado el rango de la señal de entrada en el cual se va a trabajar. Se escogieron esos valores porque de esa manera las señales de entradas oscilaran entre 5.6 mA a 8 mA, y es el intervalo en el cual queremos trabaje la bomba, correspondiente al 10% a 25% de la capacidad de flujo que puede entregar.

### **3.3.2 PARÁMETROS DE LA SEÑAL PRBS Y MULTISINUSOIDAL**

Para el diseño de estos tipos de señal además de los parámetros en común, se tienen los siguientes parámetros que son para las especificaciones dadas por línea de Guía:

***Número de ciclos:*** Periodos en los que se repite la señal.

***Alfa:*** Asegura que haya disponible suficiente contenido de alta frecuencia, también mide que tan rápido es el sistema en lazo cerrado con respecto al lazo abierto.

**Beta:** Mide que tanta información de baja frecuencia estará presente en la señal, también provee información del tiempo de estabilización del proceso.

$\tau_{Dom}^L$ : Estimado bajo de la constante de tiempo dominante de lazo abierto.

$\tau_{Dom}^H$ : Estimado alto de la constante de tiempo dominante de lazo abierto.

**Nota:** Otra forma de diseñar la señal PRBS y MULTISENO es mediante la especificación directa, esto implica introducir 2 parámetros en vez de los ya descritos, estos son: Número de registros y tiempo de conmutación para la PRBS y Duración de la Secuencia y Número de Sinusoides para la MULTISENO. Pero como ya teníamos la información del  $\tau_{Dom}$  se prefirió usar este dato en vez de la especificación directa.

### 3.3.3 PARÁMETROS DE LA SEÑAL RBS

Para el diseño de este tipo de señal se tiene los siguientes parámetros:

*Duración de la señal:* tiempo que va a durar la señal creada.

*Probabilidad de conmutación:* probabilidad para que la señal cambie su estado actual, de alto a bajo o de bajo a alto.

*Tiempo de conmutación:* Es el mínimo tiempo para cambios en el nivel de la señal, debe ser entero múltiplo del tiempo de muestreo.

### 3.3.4 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE ENTRADA

#### *Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria – PRBS*

Es una señal de 2 niveles, periódica y determinística, generada por registros de desplazamientos. Su mayor utilidad esta en el hecho de que sus propiedades de auto correlación se asemejan bastante a las de ruido blanco, para esto los parámetros de la secuencia deben ajustarse de tal manera que la parte “plana” de su espectro de potencia este en la región de frecuencia importante para el control.

Como se menciona anteriormente hay 2 maneras de introducir los parámetros para el diseño de la señal, una es mediante especificación directa y la otra es por línea de guía. Ambas tienen en común el número de ciclos que se desea introducir, el cual fue fijado en 1 ya que de aumentar más este número, las pruebas se nos hubieran hecho más complicadas de realizar.

La especificación directa involucra introducir el número de registros y el tiempo de conmutación, la combinación de estos 2 parámetros con la ayuda de una operación exor puede crear la señal PRBS,

pero como nosotros ya contábamos con el dato del  $\tau$  de la planta, se prefirió usar el diseño mediante línea guía.

Las especificaciones mediante línea de guía requiere de 4 parámetros, los 2 primeros están involucrados con el  $\tau$  de la planta y estos son:  $\tau_{\text{Dom}}^L$  y  $\tau_{\text{Dom}}^H$ . Una vez que se sabe el valor del  $\tau$  de la planta, lo que se pide es introducir este dato en un rango, una menor y otro mayor para el cual el  $\tau$  debería estar ubicado entre estos valores. Lo más sencillo sería escogerlo en el valor medio, es por este que se escogió 21 y 27 como valor mínimo y máximo respectivamente siendo nuestro  $\tau$  de 24.

Los otros 2 parámetros a especificar son los de Alfa y Beta, a mayor Alfa nos ayuda a ubicarnos en un buen rango de frecuencia pero por el lado de alta, mientras que a mayor Beta nos ubica mejor pero por el lado de baja, todo esto con el fin de establecernos en el rango de frecuencia en el q trabaja la planta, Se escogieron los valores de 2 y 3 respectivamente ya que se consideró fueron adecuados. Con la siguiente ecuación se podrá entender con mayor facilidad esto:

$$\frac{1}{\beta_s \tau_{\text{dom}}^H} \leq w \leq \frac{\alpha_s}{\tau_{\text{dom}}^L}$$

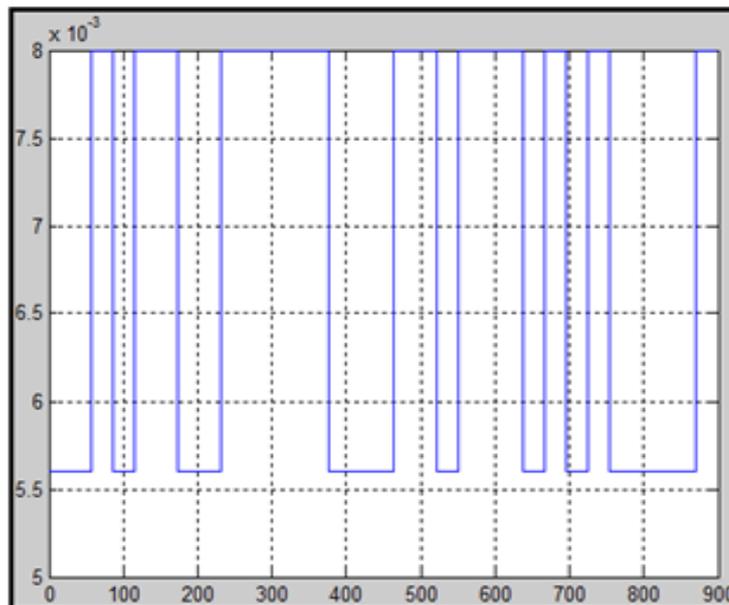


Figura 3-13 Formas De Onda De Las Señales PRBS

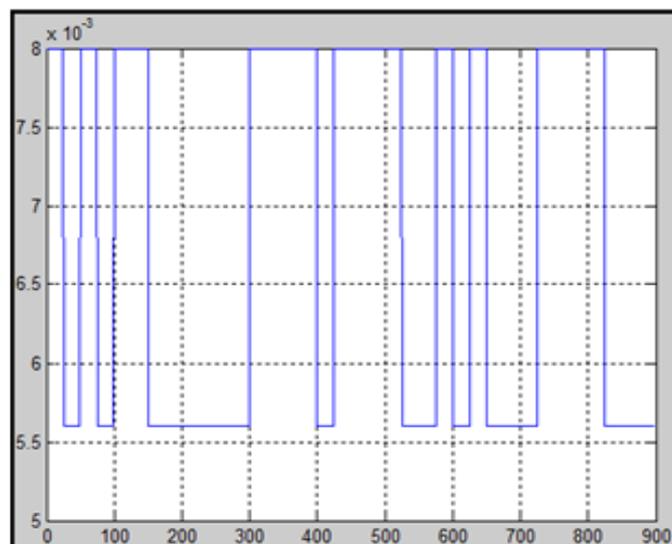
### *Secuencia Binaria Aleatoria – RBS*

Es una señal de 2 niveles que conmuta a espaciados intervalos de tiempo (determinado por el tiempo de conmutación) con una probabilidad  $p$ . Y a diferencia de la PRBS que es determinística y periódica, la RBS es verdaderamente estocástica.

Para su diseño hay 3 parámetros a considerar, el tiempo de duración que es cuánto va a durar la señal RBS, para esto se tomó en cuenta que en el resultado haya varios cambios de nivel para asegurar que la señal es lo suficientemente larga y se estableció en 900 s, otro parámetro es el de probabilidad de conmutación que se

fijó en 0.4 dado que se prefirió especificar que el cambio no se dé tan seguido, nuestra planta es un poco lenta y se consideró mejor darle un poco más de oportunidad a que se estabilice, por otro lado el tercer parámetro ayuda también en este sentido.

El último parámetro es el tiempo de conmutación, y el valor que se escogió fue de 25 s ya que nos basamos en el  $\tau$  de la planta para poder escoger un tiempo adecuado. Con valores de tiempo de conmutación muy bajos podríamos no darle el suficiente tiempo para que la planta reaccione, y por otro lado darle tiempos de conmutación muy grandes harían que la planta se estabilice y puede que quede mucho tiempo en ese valor, en cualquiera de los 2 casos irnos al extremo podría implicar perder información en captar la dinámica de la planta.

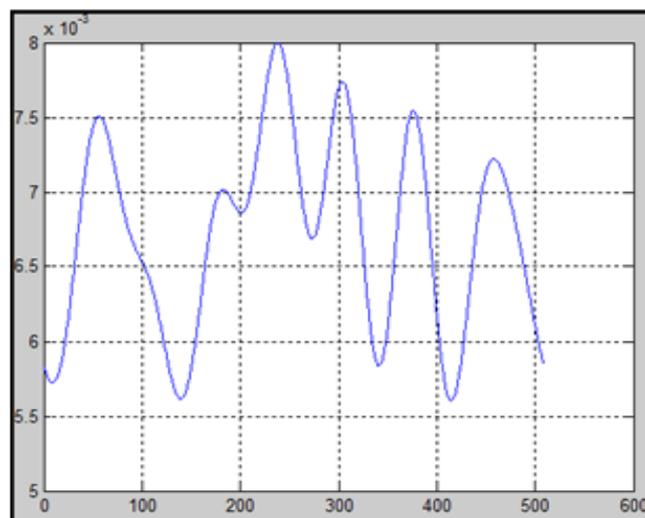


**Figura 3-14 Formas De Onda De Las Señales RBS**

### *Señal Multisinusoidal*

Tiene cierto parecido con la PRBS, incluyendo que es una señal determinística y periódica, además posee también las mismas 2 formas de diseño: especificación por línea de guía y por especificación directa.

La especificación directa es sencilla, ya que solo son 2 parámetros, duración de la secuencia y número de sinusoides. Pero por la misma razón que en la PRBS también se escogió la especificación por línea de guía, ya que se cuenta con la información del  $\tau$  de la planta y esta se usó de la misma manera que en la PRBS, de igual manera con el Alfa y el Beta.



**Figura 3-15 Formas De Onda De Las Señales MULTISENO**

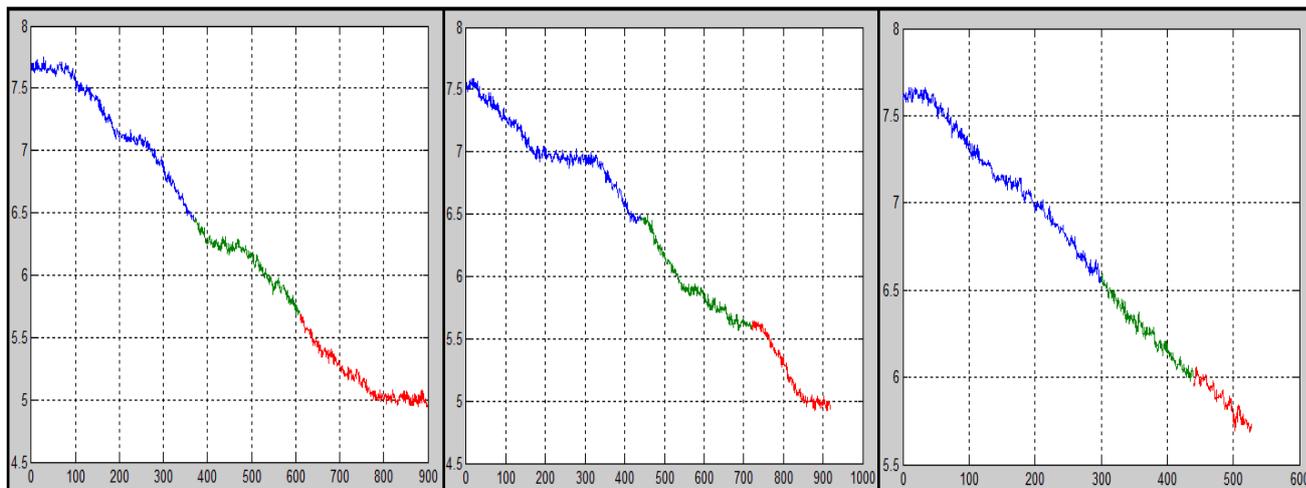
### 3.3.5 PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se muestra los parámetros que se ingresaron para el diseño de las señales de entrada:

Tiempo de Muestreo		Amplitud(+/-)		Desfase de la señal	
0.5		0.0068		0.0012	
Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)					
No. De Ciclos	Alfa	Beta	$\tau_{Dom}^L$	$\tau_{Dom}^H$	
1	2	3	21	27	
Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)					
Duración de la señal		Probabilidad de Conmutación		Tiempo de Conmutación	
900		0.4		25	
Señal Multisinusoidal					
No. De Ciclos	Alfa	Beta	$\tau_{Dom}^L$	$\tau_{Dom}^H$	
1	2	3	21	27	

**Tabla 3-1 Parámetros para Generación de Señales de Entrada**

Ahora, una vez que se aplicó las señales de entrada a la planta, se midieron las siguientes respuestas:



**Figura 3-16 Respuestas A Las Señales PRBS, RBS Y Multiseno**

Puesto que al hacer la prueba con cualquiera de las señales de entrada, la respuesta de pH cada vez se iba alejando mas del punto de operación (debido al integrador propio de la planta, y que solo se podía ir disminuyendo el valor de pH), y esto representaba que cada vez nos íbamos acercando mas a la zona no lineal, se tuvo que para cada señal de entrada hacer mas de una prueba hasta cubrir toda la longitud de la misma, es por esto que en el grafico se puede observar que cada señal de salida está dividida en 3 partes.

Que toda la señal de entrada sea introducida hacia la planta también tiene su importancia con el espectro de potencia, este nos indica como está distribuida la potencia o la energía de dicha señal

sobre las distintas frecuencias que la conforman, entonces si se llega a recortar la señal de entrada también se recortará parte del espectro de potencia y por lo tanto no se enviará toda la potencia con la que contaba inicialmente.

A partir de estos datos de entrada y salida, se procederá a realizar el análisis de correlación para asegurarnos que verdaderamente haya relación entre entrada y salida. A parte debido a que la planta presenta un factor integrativo se procederá primero a filtrar y diferenciar los datos para poder tratarlos por los motivos ya explicados previamente.

### **3.3.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN**

Este análisis se usa principalmente para obtener un estimado de los coeficientes de la respuesta al impulso finito (FIR) de la planta, además de que cuando se toman estos coeficientes y se los integra se puede obtener la respuesta escalón de la planta.

Para adquirir estos coeficientes nos basamos en obtener la autocovarianza de la entrada y la covarianza cruzada de la entrada con

la salida (2.1.1.3 MODELOS NO PARAMÉTRICOS), para usarlos como expresa la siguiente ecuación:

$$b = \Gamma_u^{-1} \gamma_{uy}$$

Donde:

$b$ : es la matriz de coeficientes de la respuesta impulso.

$\Gamma_u^{-1}$ : es la matriz de auto covarianza de la entrada inversa.

$\gamma_{uy}$ : es la matriz de covarianza cruzada de entrada con la salida

Es bueno recalcar que ya que se necesita de las covarianza de las señales, este también nos sirve como análisis de que tanto se relaciona la entrada con la salida, y de esta manera verificar que efectivamente hay alguna dinámica que se pueda identificar. Para esto los coeficientes  $b$  de la respuesta impulso deberán ser diferente de cero.

Además es recomendable pre-blanquear las señales de entrada y salida, para que estas tengan las propiedades de ruido blanco, las cuales son que sus valores de señal en 2 tiempos diferentes no guardan correlación estadística, por lo tanto su espectro potencia es una constante, esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas muestran la misma potencia.

Por lo tanto al hacer análisis de auto covarianza al ruido blanco, esta solo mostraría dependencia de la señal consigo mismo en el periodo actual y no en tiempos pasados, el valor que toma en el periodo actual sería el de su varianza y para cualquier otro tiempo sería cero. Si se aplica esto a la ecuación anterior, entonces la diagonal de la matriz de auto covarianza solo tendría el mismo valor y sería el de la varianza, y para el resto de la matriz habrían ceros, esto da como resultado una facilidad matemática para resolver la matriz, y la expresión quedaría reducida a:

$$b_k = \frac{\gamma_{yy}(k)}{\sigma_u^2}$$

Así como se ve los beneficios que trae trabajar con una señal de ruido blanco, se puede lograr tener características similares con cualquier otra señal si se usa el filtro de pre-blanqueado, y es por esto que lo usaremos posteriormente.

La herramienta que usaremos para realizar el análisis de correlación es la misma que hemos venido utilizando hasta ahora, MATLAB. Este contiene un comando que se usa en el WORKSPACE llamado CRA, el cual contiene el siguiente formato:

***IR=CRA(Z,M,NA,PLOT)***

CRA realiza el análisis de correlación para estimar la respuesta impulso, y sus parámetros son:

IR: Es la respuesta impulso estimada.

Z: Son los datos, ingresados como un objeto IDDATA o una matriz de 2 columnas  $Z=[y \ u]$

M: Es el numero de LAGS (puntos o datos) con el cual se va a construir el ancho de la ventana, por defecto 20.

NA: Es el orden del filtro de pre-blanqueado, por defecto 10. Con  $NA=0$ , no se realiza pre-blanqueamiento. Por lo que se obtiene la covarianza de los datos originales.

PLOT: Puede tomar 3 valores:  $Plot=0$  no muestra ningún grafico,  $Plot=1$  (por defecto) muestra un gráfico de la respuesta impulso junto con un intervalo del 99% de confianza,  $Plot=2$  muestra una ventana que contiene 4 gráficos: el de auto covarianza de entrada, auto covarianza de salida, covarianza cruzada entre entrada y salida, y respuesta impulso el cual contiene los coeficientes  $b_k$ .

Una vez conscientes de los conceptos y parámetros que utiliza el comando CRA, procedemos a evaluar el análisis de correlación para cada una de las señales de entrada diseñadas, y examinando cual fue la mejor, llegando hasta conseguir la respuesta escalón de cada una, se obtuvieron los siguientes resultados:

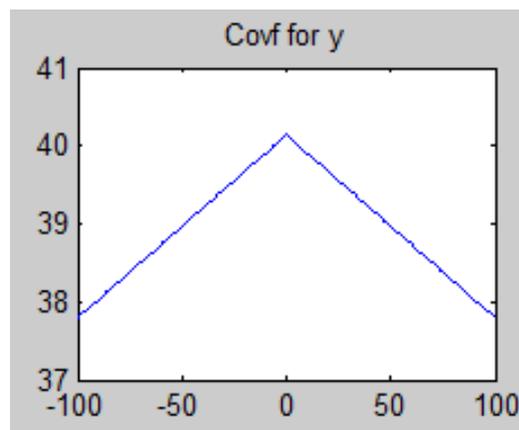
Planta Real					
Tao ( $\tau$ )		Tiempo de estabilización ( $T_s$ )		Ganancia ( $K$ )	
24		65		2.5	
Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria – PRBS					
$\tau$	$T_s$	$K_u$	Error rel. $\tau$	Error rel. $T_s$	Error rel. $K_u$
26.5	75	2.42	10.41%	15.38%	3.2%
Secuencia Binaria Aleatoria – RBS					
$\tau$	$T_s$	$K_u$	Error rel. $\tau$	Error rel. $T_s$	Error rel. $K_u$
19.5	75	2.33	18.75%	15.38%	6.8%
Señal Multisinusoidal					
Inestable					

**Tabla 3-2 Contraste Para Señales PRBS-RBS-MULTISENO vs PLANTA REAL**

De la tabla de resultados podemos observar que la señal Multisinusoidal ni si quiera se puede tomar como una opción viable debido a que su respuesta escalón aproximada es inestable, esto se debe a que la señal Multiseno tiene cambios muy suaves, y la combinación de estos cambios poco perceptibles con el ruido hacen que no se pueda captar correctamente la dinámica de la planta.

La señal RBS se aproxima adecuadamente pero no lo suficiente, ya que la PRBS es la más aproximada, la que presenta menos error, y por lo tanto será la que escogeremos para identificar la planta de pH.

A continuación se detallará todo el análisis de correlación para la entrada PRBS y su salida, primero se aplicara el siguiente comando: `CRA(data,100,0,2)`



**Figura 3-17 Análisis De Correlación Para DATA**

Este comando usa como parámetros: data que es una estructura IDDATA que contiene los arreglos de entrada, salida (sin diferenciar) y el tiempo de muestreo, fija el ancho de la ventana en 100 LAGS , no contiene filtro de pre-blanqueado, y muestra todos

los gráficos de covarianza de entre los cuales solo se muestra el de covarianza de salida.

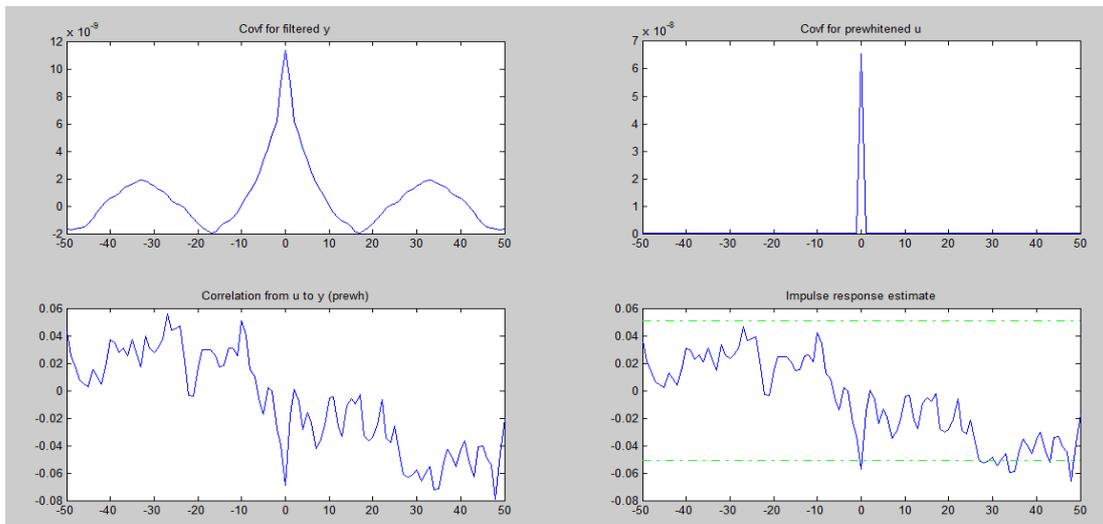
Este solo nos sirve como comprobación de que efectivamente se está trabajando con un sistema no estacionario, debido a la presencia del integrador en la planta, en la figura se puede apreciar la tendencia a ser una constante que muestra el análisis de covarianza, al no disminuir más que 2 unidades en 100 LAGS.

Esta clase de casos forma parte de la estructura del modelo ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) que se usa para representar una gran variedad de señales estocásticas, dado que nuestra planta es integrativa se puede representar como uno de los modelos ARIMA (0,1,0) también conocido como paseo aleatorio, y la forma de este modelo se da básicamente porque no se tiene una media constante.

Una vez más recalcada la importancia de diferenciar, se procede a usar el siguiente comando con los datos ahora si diferenciados:

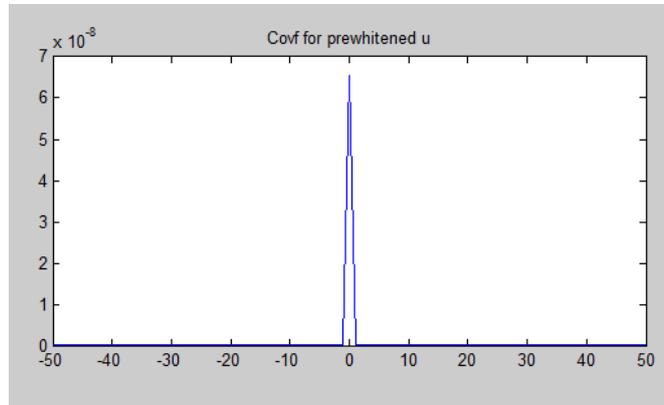
***CRA(datad,65,10,2)***

Mostrándonos el siguiente resultado:



**Figura 3-18 Análisis De Correlación CRA(datad,65,10,2)**

### *Auto Covarianza De La Entrada*



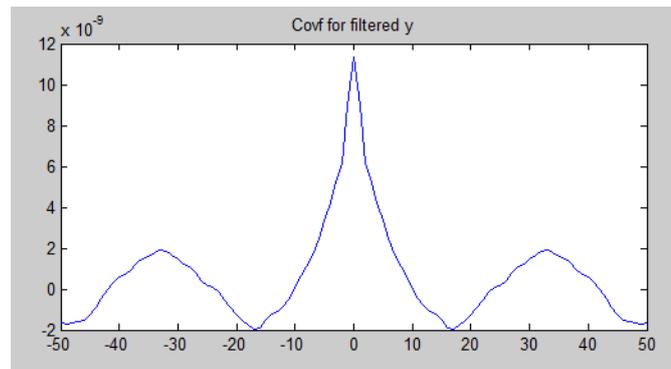
**Figura 3-19 Auto Covarianza De La Entrada**

Aquí se aprecia el resultado de la auto covarianza de la entrada después de haberse pre-blanqueado, como se puede observar esta tiene un gran parecido con lo que se obtendría si la señal fuera

directamente ruido blanco, es decir un valor pico muy alto en el periodo 0, ya para el resto de LAGS tiene valores de cero.

Este trato de la señal será útil para facilitar el desarrollo matemático en la obtención de los coeficientes  $b$ , como ya fue explicado previamente.

### *Auto Covarianza De La Salida*

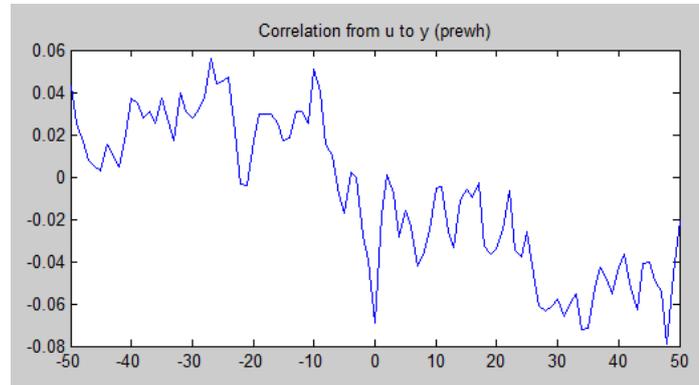


**Figura 3-20 Auto Covarianza**

Como se puede observar, la auto-covarianza de salida también trató de parecerse a ruido blanco, pero no fue lo suficientemente cercana, ya que esta varía más. De todas maneras, que la salida no tengas estas características no nos es de tanta relevancia como lo es que la entrada tenga características parecidas al ruido blanco.

Otro punto a favor es que se perdió la forma de paseo aleatorio gracias a diferenciar los datos y al filtrado.

### *Correlación Cruzada De La Entrada Con La Salida*

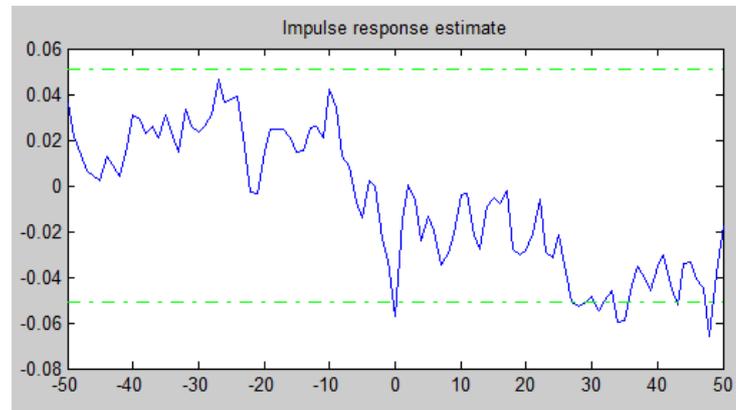


**Figura 3-21 Correlación Cruzada De La Entrada Con La Salida**

Para que exista relación entre la entrada y la salida, básicamente lo que se debe tener son valores diferentes de cero, al parecer eso es lo que se tiene en la Figura 3-21 Correlación Cruzada De La Entrada Con La Salida.

Para estar seguro de esta hipótesis se fija un intervalo de confianza en el cual los valores dentro del mismo se aproximarán o se dirán que son cero, y los valores fuera de este intervalo son los que nos indicara que si existe relación, para esto se puede usar también la respuesta impulso que ya contiene este intervalo y debido a que la respuesta impulso es directamente proporcional a la correlación cruzada, se puede seguir el análisis con él.

### *Respuesta Al Impulso Estimada*



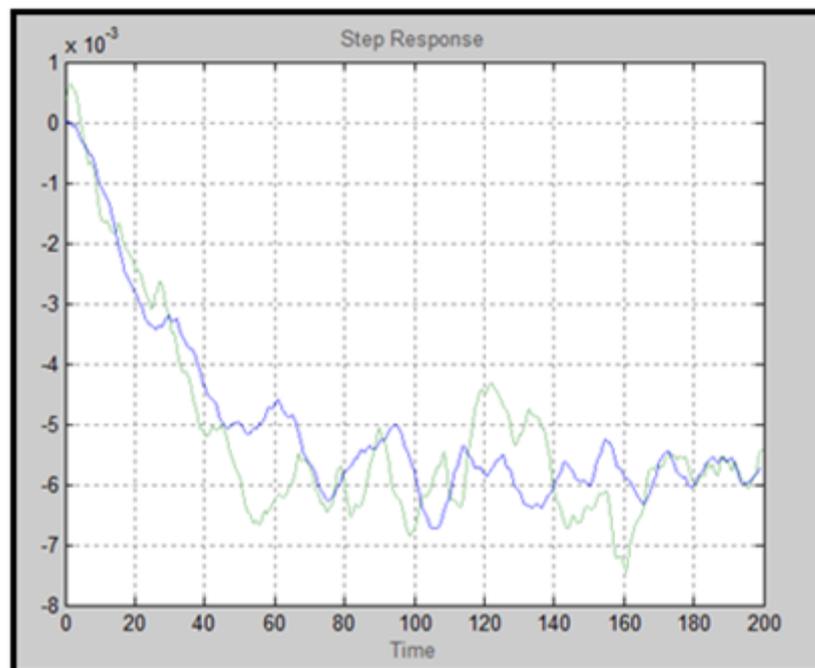
**Figura 3-22 Respuesta Al Impulso Estimada**

Finalmente se halló los valores de los coeficientes  $b$ , y también al ver que existen coeficientes que salen del intervalo de confianza podemos asegurar que si existe una dinámica que se puede identificar y con la que se puede trabajar, otro punto que se puede recalcar es que los coeficientes son negativos, indicándonos simplemente que existe una relación inversa, es decir a mayor valor en la entrada la salida será más pequeña o negativa, como es nuestro caso en el cual el pH solo disminuye a pesar de tener una entrada positiva.

A partir de esto se verifica que si existe una relación y a parte se obtuvieron los coeficientes de la respuesta impulso, con los cuales podemos obtener un aproximado de la respuesta escalón.

Finalmente como factor decisivo se considera la respuesta escalón que se obtuvo de la señal PRBS, y la por ser esta la que más se acercó a la respuesta escalón de la planta real, será la señal escogida para identificar la planta, como se mostró en la tabla 3-2.

A continuación se muestra la comparación del escalón real (verde) con la respuesta escalón de nuestra señal PRBS (azul).



**Figura 3-23 Respuesta Al Escalón Para Señal PRBS**

# CAPÍTULO 4

## 4. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

### 4.1 ESTIMACIÓN DE MÉTODOS PARAMÉTRICOS MODELO

Una vez seleccionada la mejor señal de entrada con sus datos de salida, se procederá obtener una función de transferencia que se aproxime lo más posible a la planta real, para ello se verificará con 5 de los modelos paramétricos que surgen a partir del siguiente diagrama de bloques:

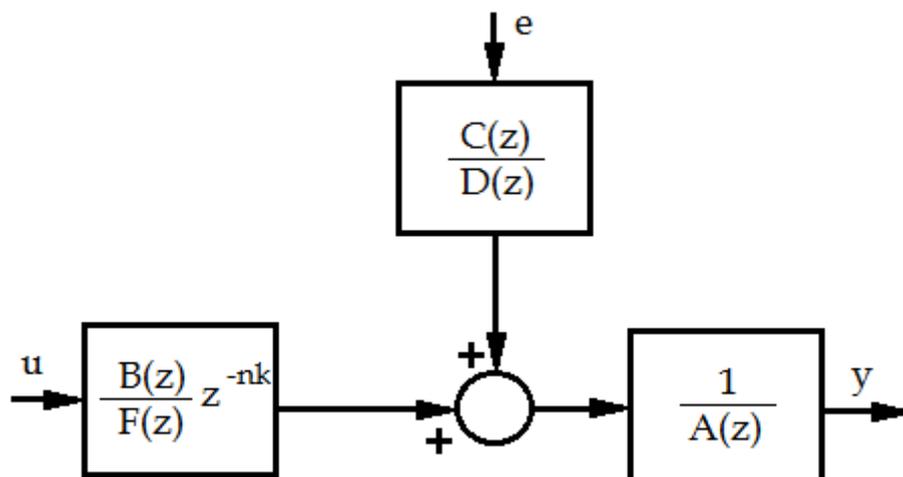


Tabla 4-1 Diagrama de Bloques Para Modelos Paramétricos

Este diagrama se lo puede resumir con las siguientes ecuaciones:

$$y(t) = \tilde{p}(z)u(t) + \tilde{p}_e(z)e(t)$$

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

Donde,

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z) = b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b+1}$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

$$D(z) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{n_d}z^{-n_d}$$

$$F(z) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_{n_f}z^{-n_f}$$

Y la cual se ajustará para obtener los siguientes modelos paramétricos que vamos a usar:

Método	$\tilde{p}(z)$	$\tilde{p}_e(z)$
ARX	$\frac{B(z)}{A(z)}z^{-nk}$	$\frac{1}{A(z)}$
ARMAX	$\frac{B(z)}{A(z)}z^{-nk}$	$\frac{C(z)}{A(z)}$
FIR	$B(z)z^{-nk}$	1
Box-Jenkins	$\frac{B(z)}{F(z)}z^{-nk}$	$\frac{C(z)}{D(z)}$
Output Error	$\frac{B(z)}{F(z)}z^{-nk}$	1

**Tabla 4-2 Modelos Paramétricos A Utilizar**

## 4.2 CRITERIOS PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez seleccionado los parámetros de estimación, lo siguiente es verificar el modelo diseñado, para esto usaremos los siguientes puntos:

### *Simulación*

Se comparará la señal de tiempo medida contra la predicha por nuestro modelo escogido. Es la técnica más común, pero nos dice claramente que tan cerca se está de la señal medida.

### *Respuesta Al Escalón*

Se comparará de una manera muy sencilla la señal medida con la predicha, aquí se podrá verificar la dinámica del sistema según criterios muy sencillos como la ganancia, tiempo de estabilización y  $\tau$ .

### *Validación Cruzada*

Se guardará una parte de los datos de la señal de entrada con su salida para la validación en vez de su uso para la identificación, se

simularán los diferentes modelos de salida obtenidos sobre estos datos y el que mejor se ajuste será el escogido.

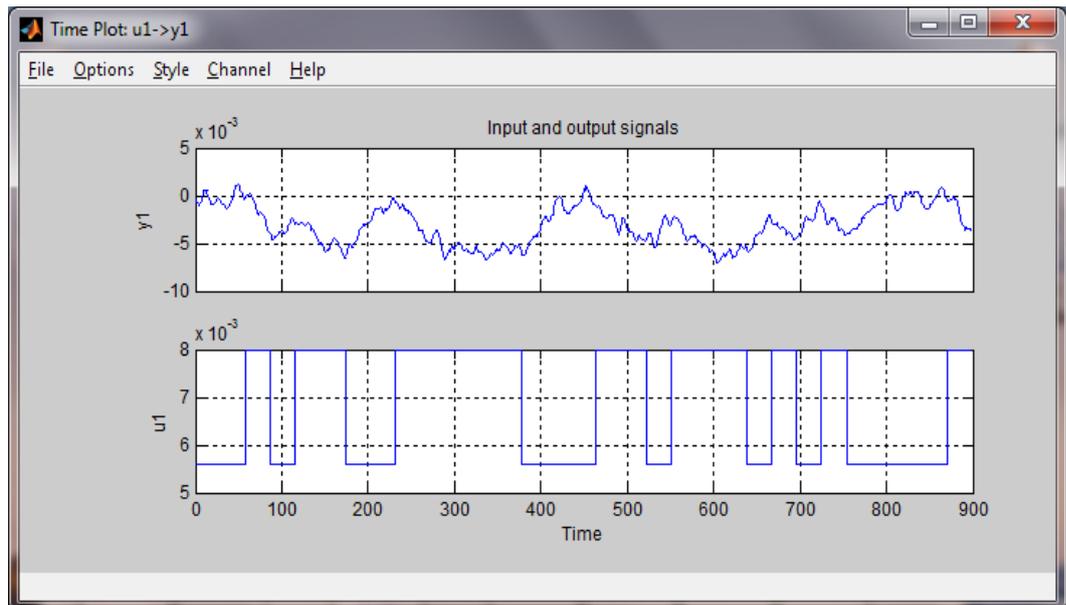
**Nota:** Aquí también se puede usar el criterio de la parsimonia, el cual indica que aunque exista un modelo que se ajuste mejor, si hay uno que este cercano y sea de buen ajuste (inclusive no tanto como el anterior) y que tenga menor orden de polos y ceros, será una mejor opción a escoger que el otro con un mejor ajuste pero mayor numero de ceros y polos.

### ***Análisis De Residuos***

Se le aplica análisis de auto correlación y correlación cruzada a los errores de predicción, y hay que verificar que estos se asemejen al ruido blanco para asegurar de que no haya relación entre los residuos consigo mismo, o entre entrada y los residuos. Que exista auto correlación significaría que el modelo del ruido es incorrecto, mientras que exista correlación cruzada significaría que el modelo es de bajo orden para reproducir correctamente su dinámica.

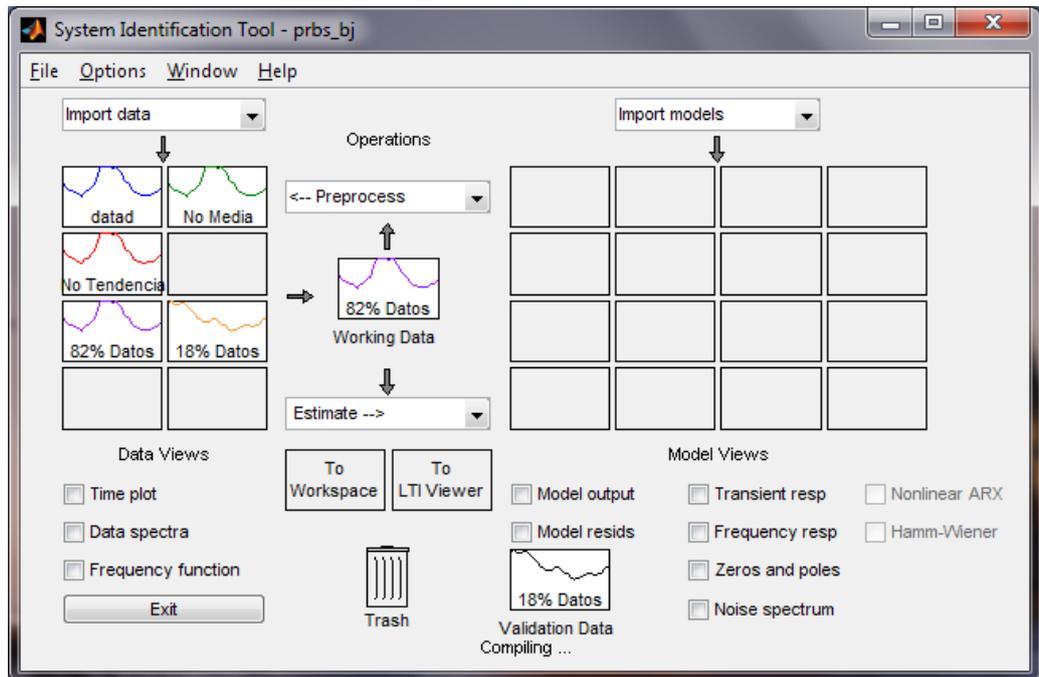
### 4.3 USO DE LA SEÑAL ESCOGIDA

Nuestra mejor señal escogida en el capítulo anterior fue la PRBS, a continuación se muestra esta señal con su respectiva salida:



**Figura 4-1 Señal de Entrada Y Salida A Utilizar**

Ahora se ejecuta el comando IDENT en la ventana de COMMAND WINDOW de MATLAB, el cual abrirá la herramienta para la identificación de sistemas.



**Figura 4-2 IDENT Con Datos Seleccionados Y Datos Para Validar**

Una vez abierta se seguirán los siguientes pasos:

- Seleccionamos DATA OBJECT en el menú desplegable de IMPORT DATA, e importamos nuestra nuestros datos de entrada y salida como un tipo IDDATA.
- Removemos medias.
- Removemos tendencias.
- Seleccionamos el rango con el que vamos a trabajar, se decidió tomar el 82% de los datos para identificar, y el 18% restante para validación.

A continuación se muestra los resultados:

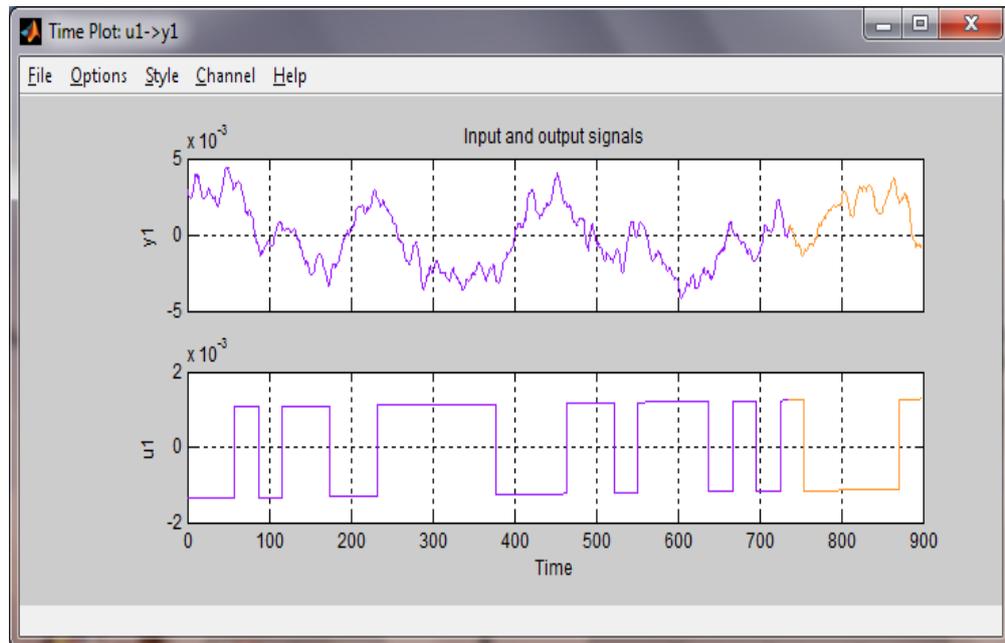


Figura 4-3 Datos Seleccionados Para Señal Y Validación

### *Modelo ARX (na nb nk)*

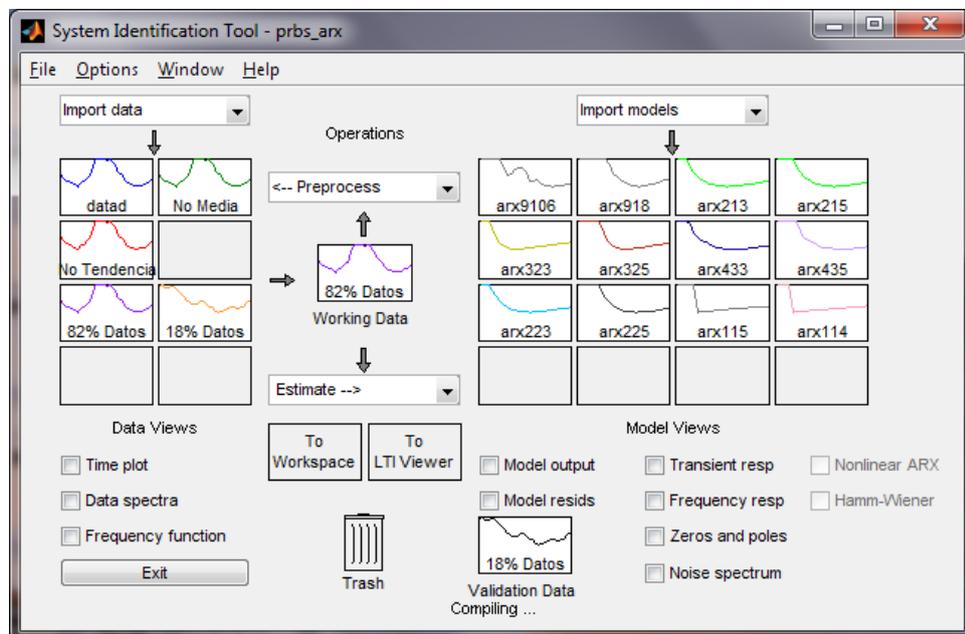


Figura 4-4 Modelos ARX

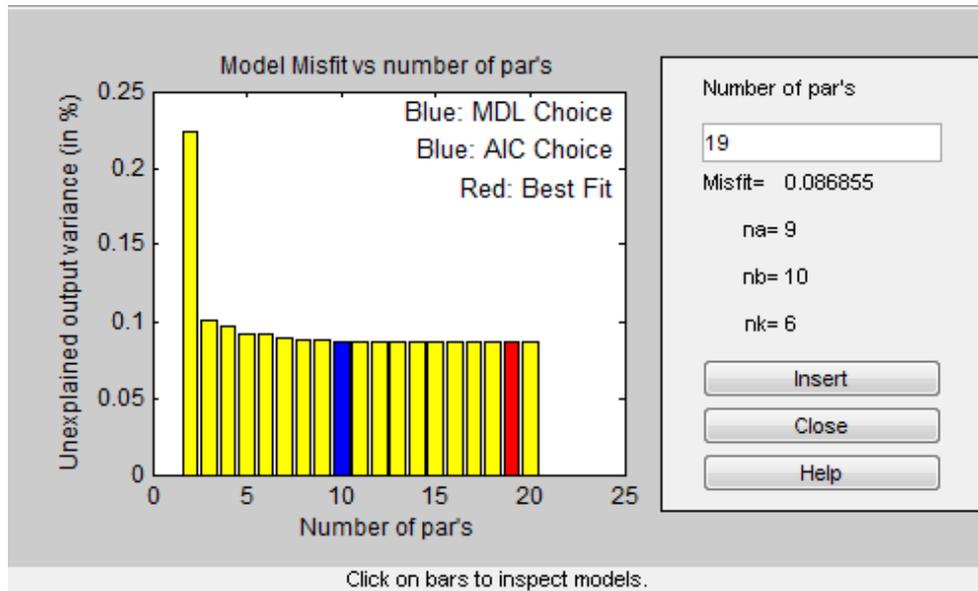
<i>Modelo con sus Coeficientes</i>	<i>Modelo residual dentro del intervalo de confianza</i>	<i>Similitud con los datos de validación</i>
Arx(9 10 6)	No	58.23%
Arx(9 1 8)	No	54.66%
Arx(2 1 3)	No	51.43%
Arx(2 1 5)	No	50.03%
Arx(3 2 3)	No	57.56%
Arx(3 2 5)	No	56.66%
Arx(4 3 3)	No	48.77%
Arx(4 3 5)	No	48.25%
Arx(2 2 3)	No	51.47%
Arx(2 2 5)	No	50.54%
Arx(1 1 5)	No	57.54%
Arx(1 1 4)	No	57.46%

**Tabla 4-3 Tabla De Modelos ARX**

En los modelos dados por ARX como modelo paramétrico tenemos que la simulación con los datos usados en validación más acertada fue la del modelo ARX9106 pero por desgracia un modelo de orden 9-10-6 en ARX es muy alto y nos generará una función de transferencia de orden elevado cuando se espera una función de un orden no mayor a 2.

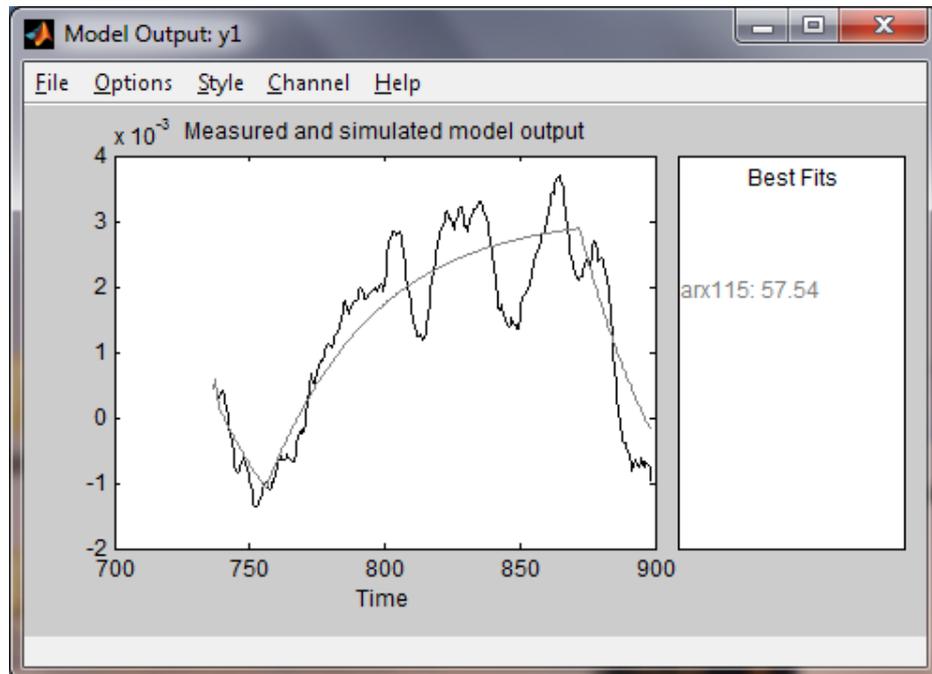
The screenshot shows a software interface for configuring an ARX model. The 'Structure' dropdown is set to 'ARX: [na nb nk]'. The 'Orders' field contains '[1:10 1:10 1:10]'. The 'Equation' is 'Ay=Bu+e'. Under 'Method', the 'ARX' radio button is selected, and the 'IV' radio button is unselected. The 'Name' field is empty. Below this, 'Focus' is set to 'Prediction', 'Initial state' to 'Auto', 'Dist.model' to 'Estimate', and 'Covariance' to 'Estimate'. There are buttons for 'Iteration', 'Fit', and 'Improvement', with a 'Trace' checkbox and a 'Stop iterations' button. At the bottom, there are buttons for 'Order Selection', 'Order Editor...', 'Estimate', 'Close', and 'Help'.

**Figura 4-5 Ventana De Modelo Paramétrico Para ARX**



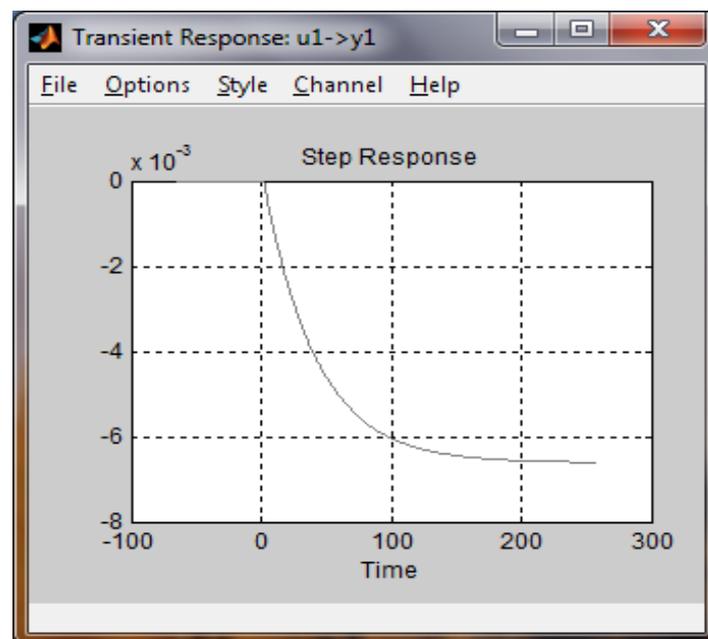
**Figura 4-6 Cuadro De Modelos ARX De Resultados**

Es por esta razón que nos vimos en la necesidad de elegir uno de menor orden pero que se acerque al 58.23% generado por el modelo de mejor desempeño pero de orden elevado. Las siguientes opciones serian: El modelo ARX323, el modelo ARX115 y ARX114 con un rango entre 57.46% - 57.56% aunque el modelo ARX326 tenga la validación con el porcentaje más acercado a 58.23% por simplificar un poco más el orden optaremos por la ARX115.



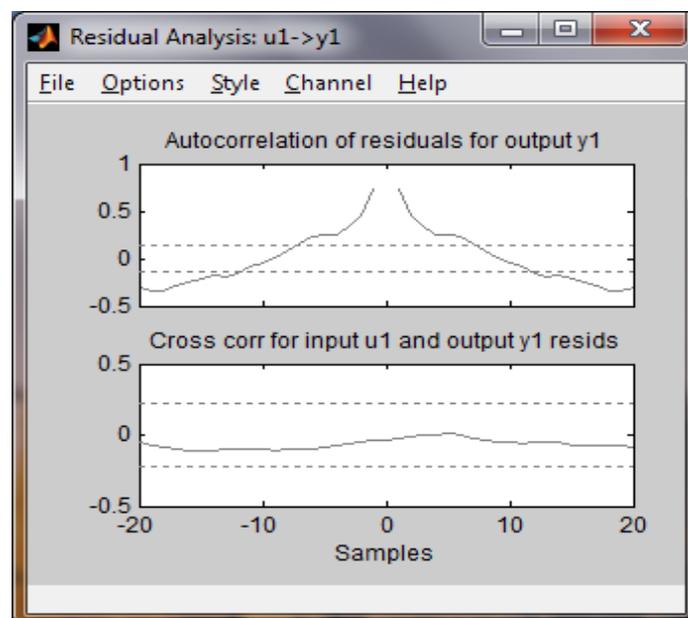
**Figura 4-7 Contraste Entre Modelo ARX115 Y El Modelo Real**

Por otro lado su respuesta al escalón en cierta forma es muy acertada pero esto aun así no justifica su uso debido a su análisis residual.



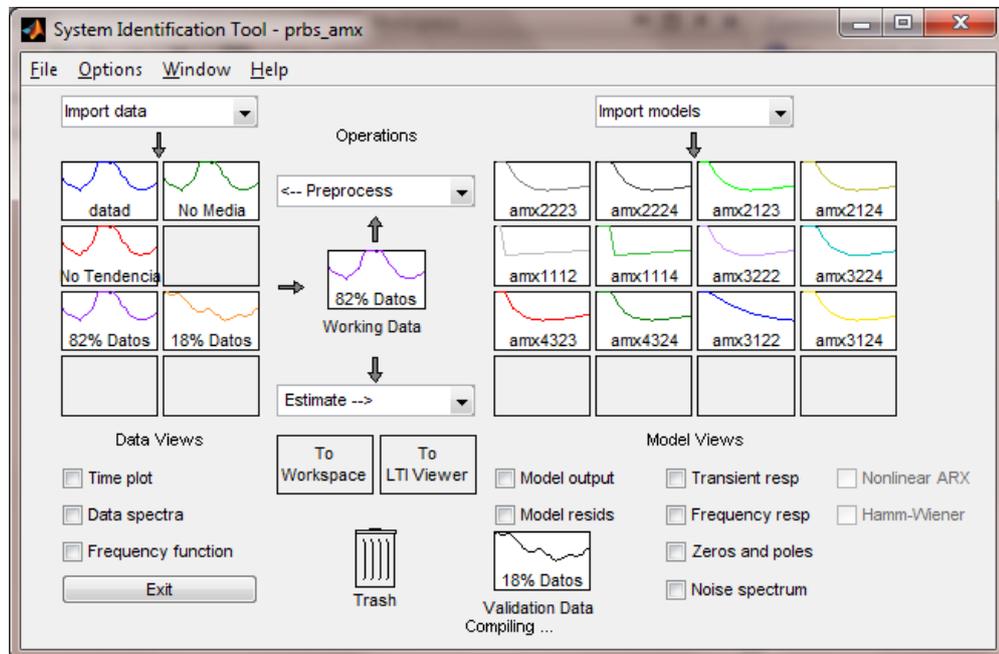
**Figura 4-8 Respuesta Al Escalón ARX115**

En estos modelos ninguno de los especificados en esta sección cumplió con que su análisis residual esté dentro de los intervalos de confianza, por lo que no se sugiere estos modelos para identificar de manera acertada.



**Figura 4-9 Análisis Residual**

**Modelo ARMAX (na, nb, nc, nk)**



**Figura 4-10 Modelos ARMAX**

<i>Modelo con sus Coeficientes</i>	<i>Modelo residual dentro del intervalo de confianza</i>	<i>Similitud con los datos de validación</i>
Amx(2 2 2 3)	Si	53.58%
Amx(2 2 2 4)	Si	52.9%
Amx(2 1 2 3)	Si	50.26%
Amx(2 1 2 4)	Si	50%
Amx(1 1 1 2)	No	39.89%
Amx(1 1 1 4)	No	42.37%
Amx(3 2 2 2)	Si	52.67%
Amx(3 2 2 4)	Si	52.88%
Amx(4 3 2 3)	Si	53.07%
Amx(4 3 2 4)	Si	52.55%
Amx(3 1 2 2)	Si	61.26%
Amx(3 1 2 4)	Si	50.27%

**Tabla 4-4 Tabla De Modelos ARMAX**

En los modelos dados por ARMAX como modelo paramétrico tenemos que el modelo más acertado fue el ARMAX3122 que a pesar de que se deseaba un orden no mayor a 2, fue el que obtuvo 61.26% en la similitud con los datos de validación.

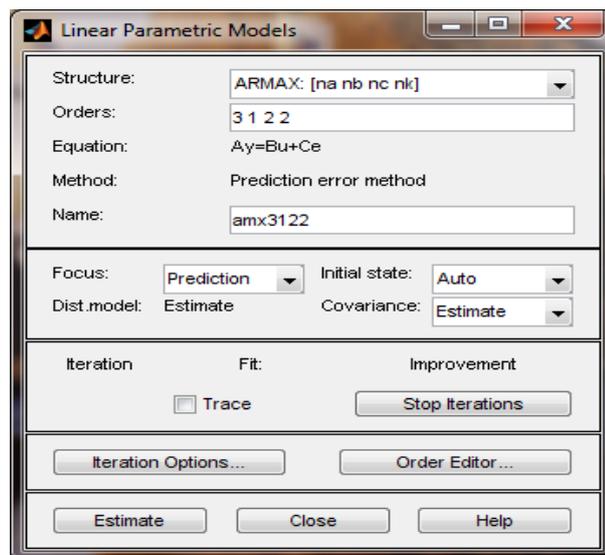
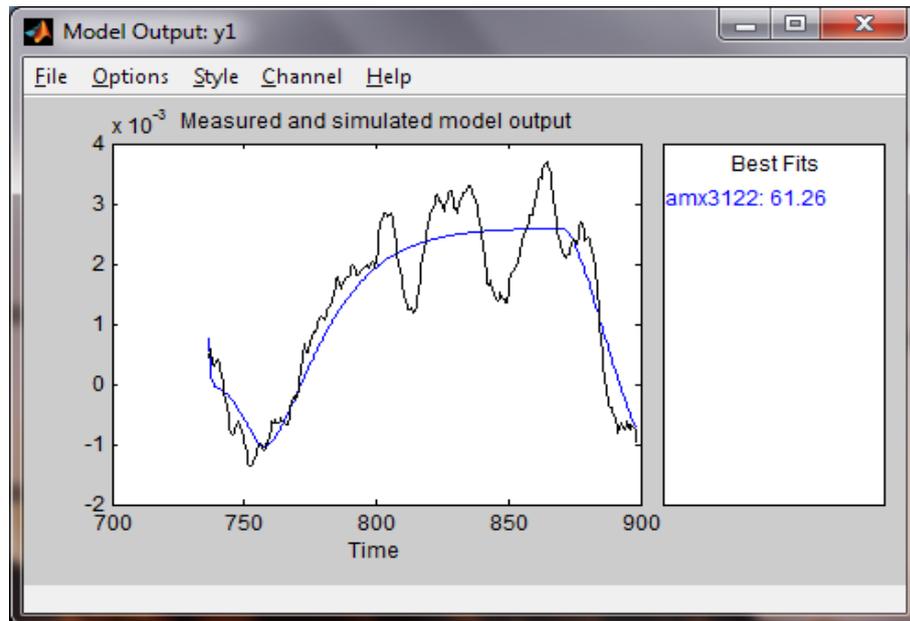


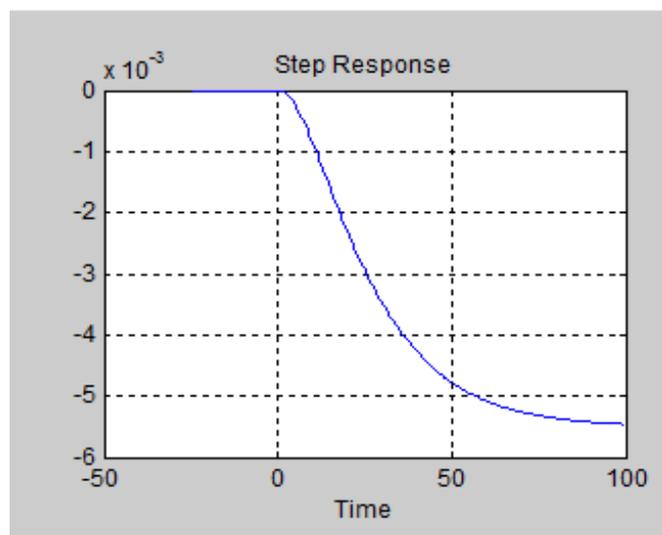
Figura 4-11 Ventana De Modelo Paramétrico Para ARMAX

En este método de predicción de error como es el ARMAX se denota claramente la diferencia que existe entre el porcentaje de similitud de los dos modelos más cercanos, estos son el ARMAX2223, que si bien es cierto posee un orden menor con un porcentaje de similitud de 53.58% y el ARMAX3122 con 61.26%, por la gran diferencia no nos deja más opción que escoger el segundo.



**Figura 4-12 Contraste Entre Modelo AMX3122 Y El Modelo Real**

En este modelo la respuesta de escalón fue muy acertada, sin variaciones bruscas y sobretodo bastante eficiente en términos de rapidez.



**Figura 4-13 Respuesta Al Escalón Modelo AMX3122**

En este modelo el análisis de residuos si cumplían todos los valores con estar dentro del intervalo de confianza con lo que se garantiza que el modelo es acertado.

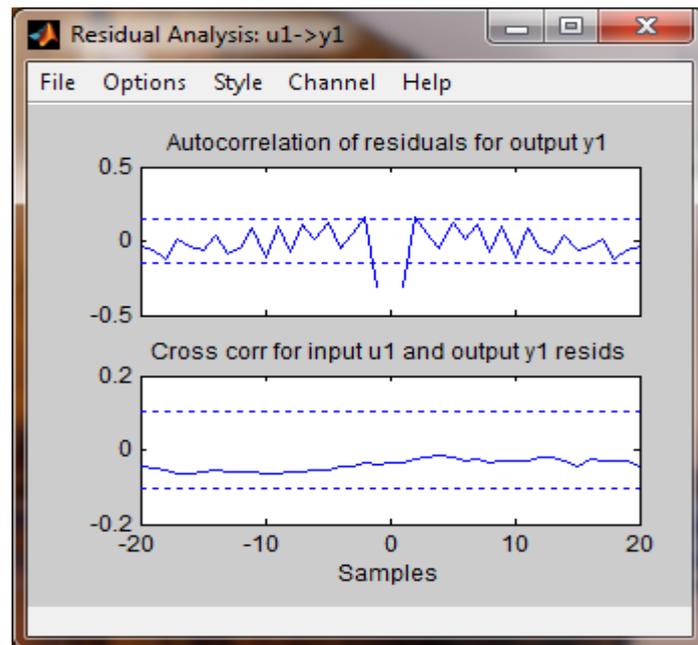


Figura 4-14 Análisis Residual AMX3122

### Modelo FIR (nb, nk)

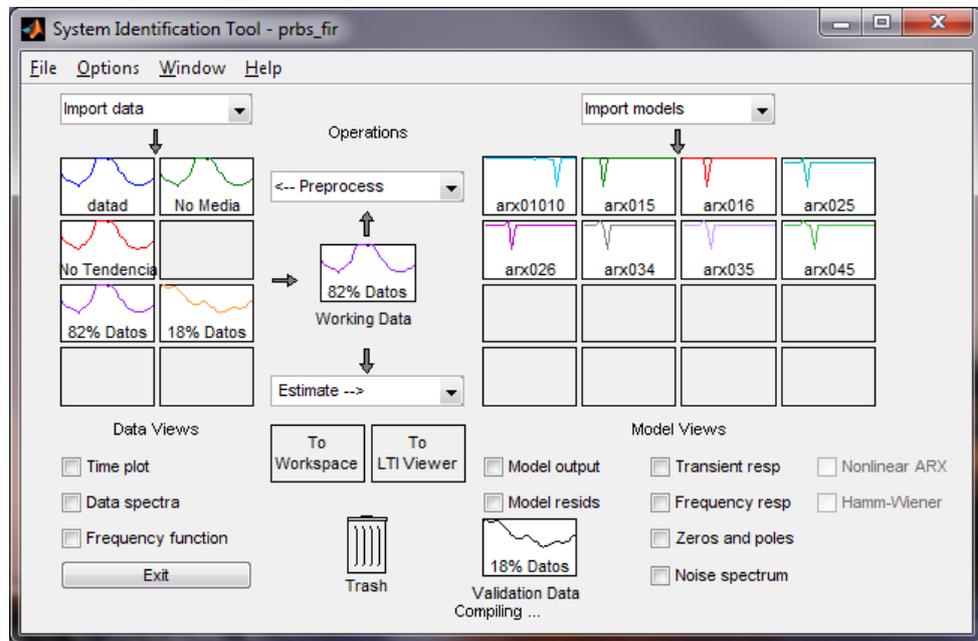
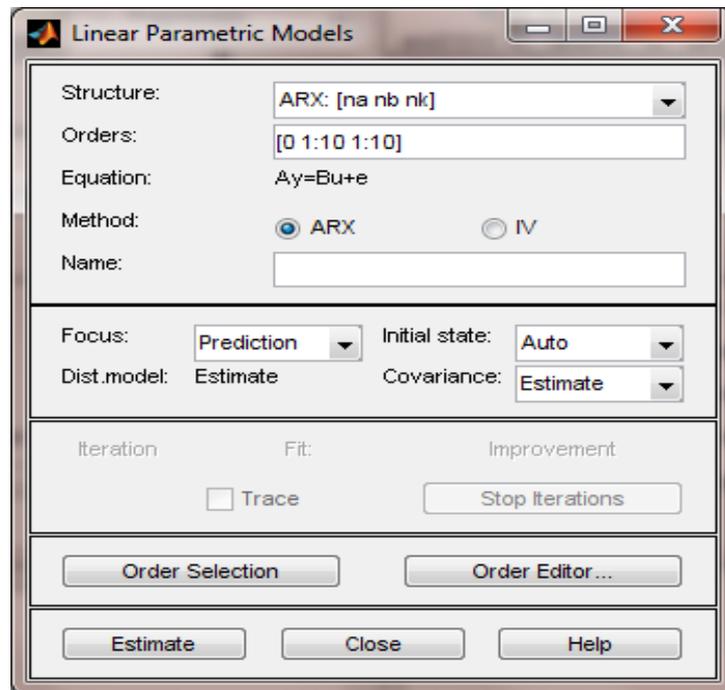


Figura 4-15 Modelos FIR

En lo modelos dados por FIR hay que recordar que como modelo paramétrico tenemos que la simulación se hace de la misma manera que el ARX pero con su primer coeficiente ( $n_a$ ) fijado en un valor de 0.

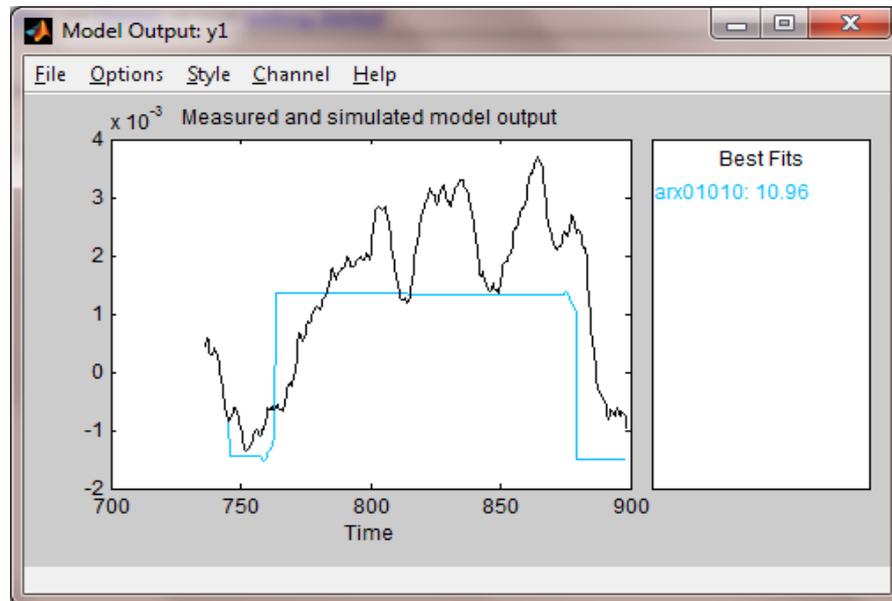
<i>Modelo con sus Coeficientes</i>	<i>Modelo residual dentro del intervalo de confianza</i>	<i>Similitud con los datos de validación</i>
Fir(10 10)	No	10.96%
Fir(1 5)	No	-10.63%
Fir(1 6)	No	-9.33%
Fir(2 5)	No	-9.33%
Fir(2 6)	No	-7.95%
Fir(3 4)	No	-9.34%
Fir(3 5)	No	-7.95%
Fir(4 5)	No	-6.49%

Tabla 4-5 Tabla de Modelos FIR



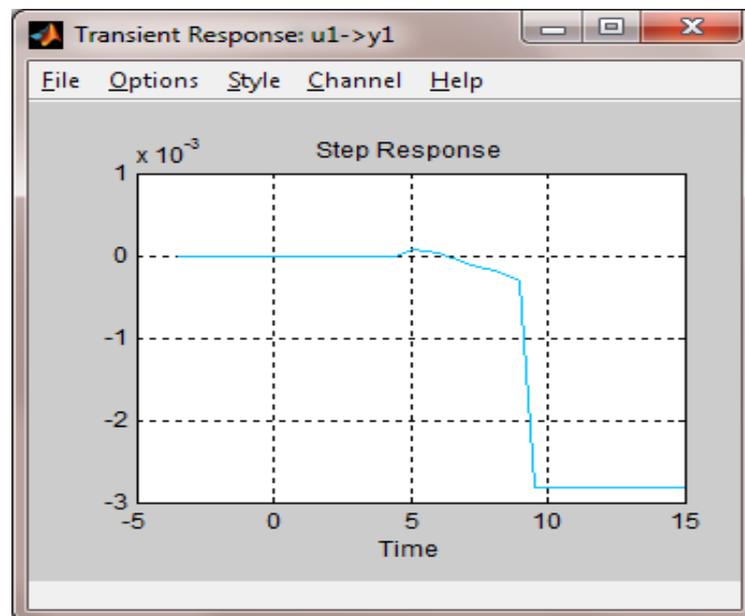
**Figura 4-16 Ventana De Modelo Paramétrico Para FIR**

Como era de esperarse debido a que en los análisis de ARX ninguno de los modelos estimados estuvo dentro de los intervalos de confianza del análisis residual aquí en el análisis FIR, derivación del ARX tampoco, con lo que no se obtuvo modelos de similitud fiables. El más destacado de estos fue el FIR1010 que se ubica a penas con un 10.96% y sus posibles modelos a contrastar se encuentran en total discordancia al tener porcentajes negativos.



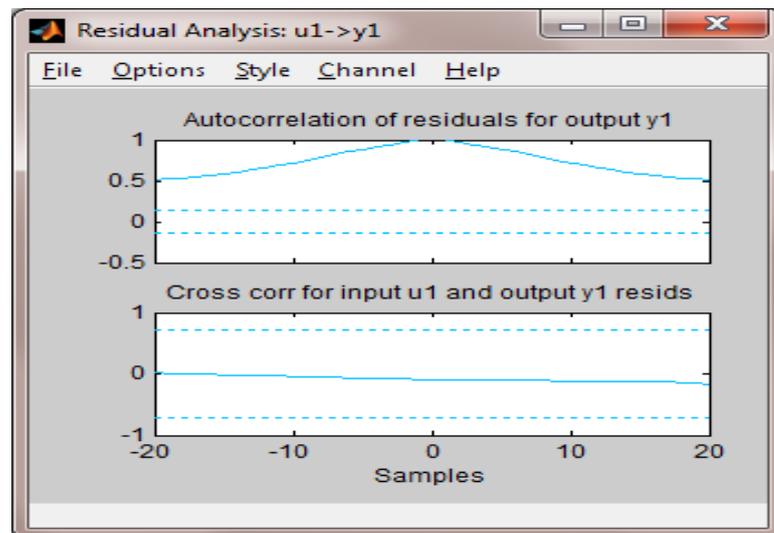
**Figura 4-17 Contraste Entre Modelo FIR1010 Y El Modelo Real**

En este modelo la respuesta al escalón fue muy desacertada, con variaciones bruscas y sobretodo excesivamente rápidas.



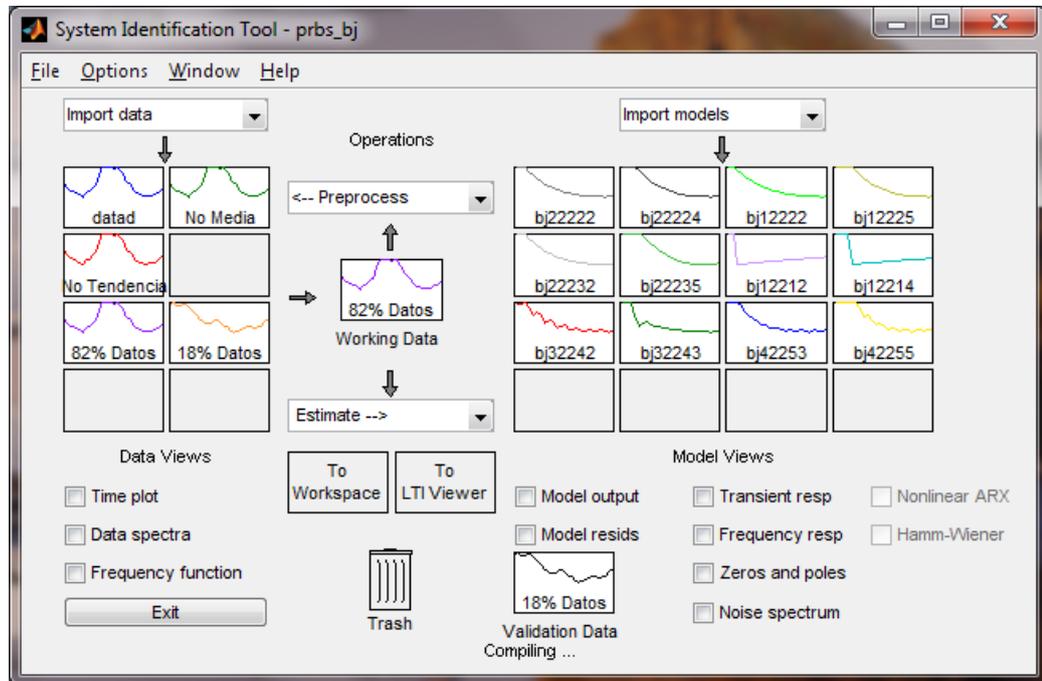
**Figura 4-18 Respuesta Al Escalón FIR1010**

Por otro lado este modelo resultó bastante ineficiente en términos de análisis residual, por que se podía apreciar que ningún valor de este análisis alcanzó el intervalo de confianza sino que por el contrario sobrepasó siempre este valor.



**Figura 4-19 Análisis Residual FIR1010**

*Modelo Box-Jenkins (nb nc nd nf nk)*

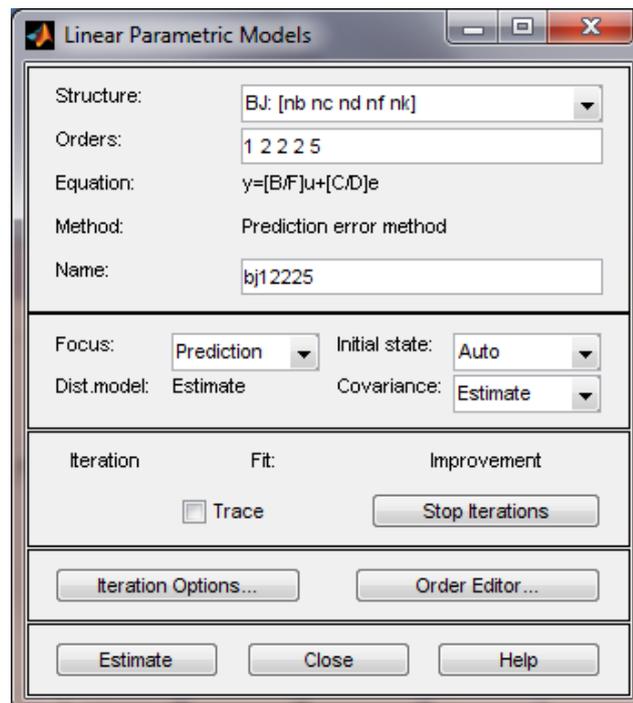


**Figura 4-20 Modelos Box-Jenkins**

<i>Modelo con sus Coeficientes</i>	<i>Modelo residual dentro del intervalo de confianza</i>	<i>Similitud con los datos de validación</i>
Bj(2 2 2 2 2)	Si	61.92%
Bj(2 2 2 2 4)	Si	61.92%
Bj(1 2 2 2 2)	Si	61.73%
Bj(1 2 2 2 5)	Si	61.71%
Bj(2 2 2 3 2)	Si	61.94%
Bj(2 2 2 3 5)	Si	61.89%
Bj(3 2 2 4 2)	Si	61.94%
Bj(3 2 2 4 3)	Si	61.32%
Bj(4 2 2 5 3)	Si	61.53%
Bj(4 2 2 5 5)	Si	61.77%

**Tabla 4-6 Tabla De Modelos Box-Jenkins**

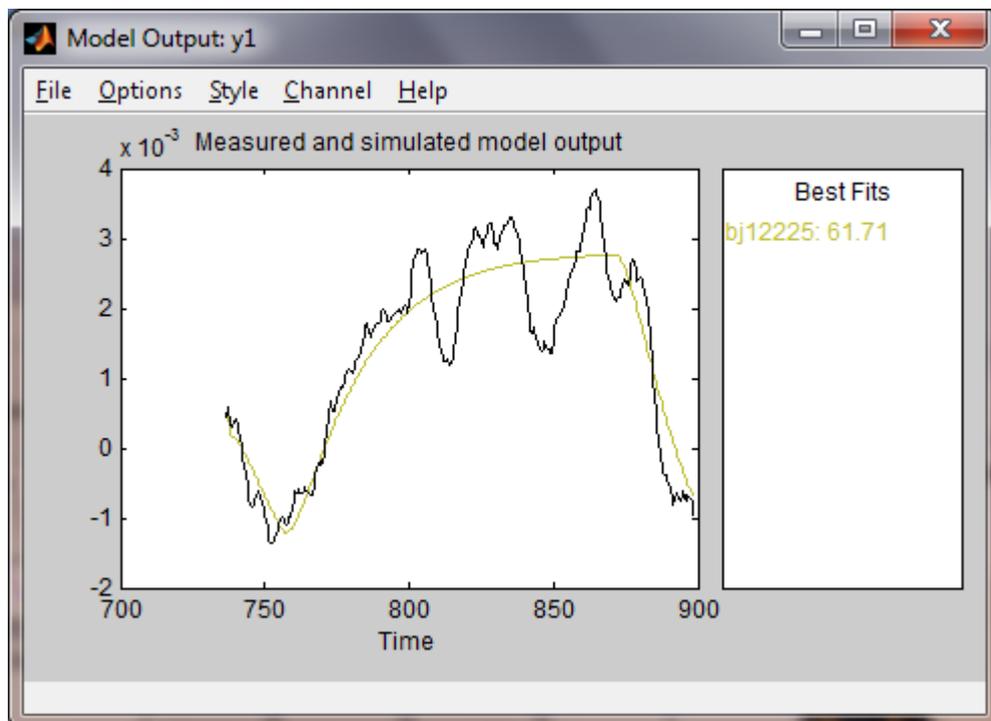
En los modelos dados por BOX JENKINS hay que recordar que como modelo paramétrico tenemos que jugar con un total de 5 parámetros, de los cuales los más importantes son la división de nb para nf y para la función del error la división de nc para nd.



**Figura 4-21 Ventana De Modelo Paramétrico Para BJ**

En los modelos dados por BJ, el más acertado en similitud fue el de BJ32242 con 61,94%, por desgracia se trata de un modelo que generará una función de transferencia de orden elevado tanto para el error como para la función principal, recordando que se espera una función de un orden no mayor a 2.

Es por esta razón que nos vimos en la necesidad de elegir uno de menor orden pero que se acerque al 61.94% generado por el modelo de mejor desempeño pero de orden elevado. Las siguientes opciones serian: El modelo BJ42255 con un 61.77%, el modelo BJ42253 con un 61.53%, BJ22222 y BJ222234 con un 61.92% y BJ12225 con un 61.71% por simplificar un poco más el orden optaremos por la BJ12225.



**Figura 4-22 Contraste Entre Modelo BJ12225 Y El Modelo Real**

En este modelo se denota que en su análisis residual contamos con los valores dentro del intervalo de confianza.

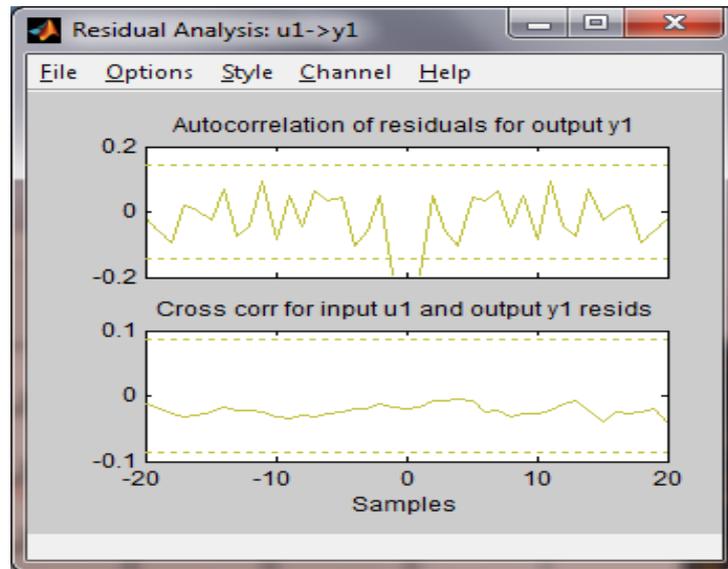


Figura 4-23 Análisis Residual BJ12225

Y por último que al analizar su respuesta al escalón encontramos un desenvolvimiento bastante bueno en los rasgos de estabilización y rapidez

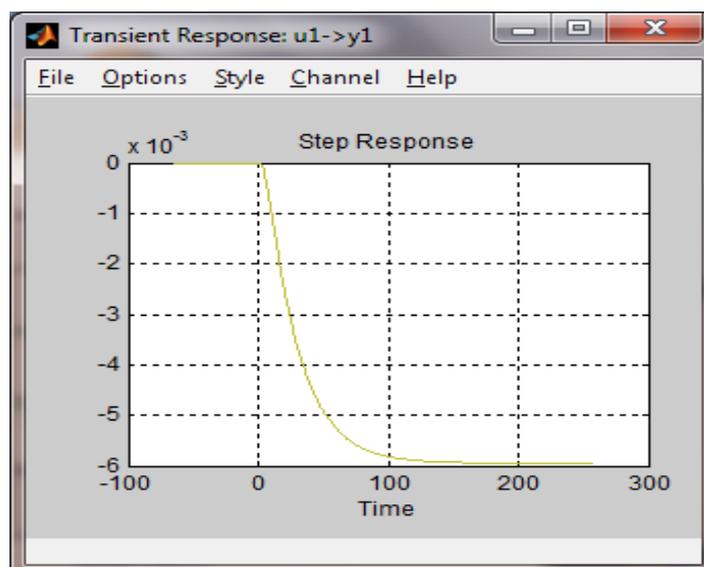


Figura 4-24 Respuesta Al Escalón BJ12225

### Modelo Output Error (nb nf nk)

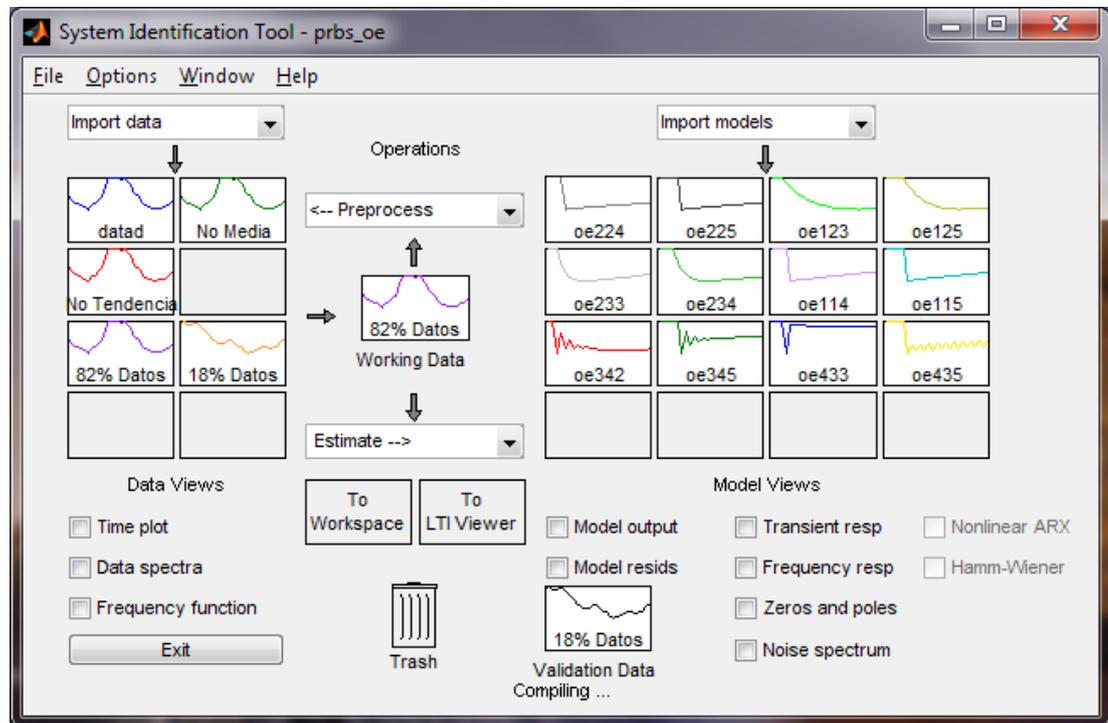


Figura 4-25 Modelos Output Error

<i>Modelo con sus Coeficientes</i>	<i>Modelo residual dentro del intervalo de confianza</i>	<i>Similitud con los datos de validación</i>
Oe(2 2 4)	No	60.07%
Oe(2 2 5)	No	60.26%
Oe(1 2 3)	No	62.16%
Oe(1 2 5)	No	62.17%
Oe(2 3 3)	No	59.27%
Oe(2 3 4)	No	60.42%
Oe(1 1 4)	No	60.59%
Oe(1 1 5)	No	60.97%
Oe(3 4 2)	No	60.44%
Oe(3 4 5)	No	61.34%
Oe(4 3 3)	No	60.57%
Oe(4 3 5)	No	60.19%

Tabla 4-7 Tabla De Modelos OE

En los modelos dados por OUTPUT ERROR hay que recordar que como modelo paramétrico tenemos el uso de solo 3 parámetros de los cuales el más importante es la división de nb para nf.

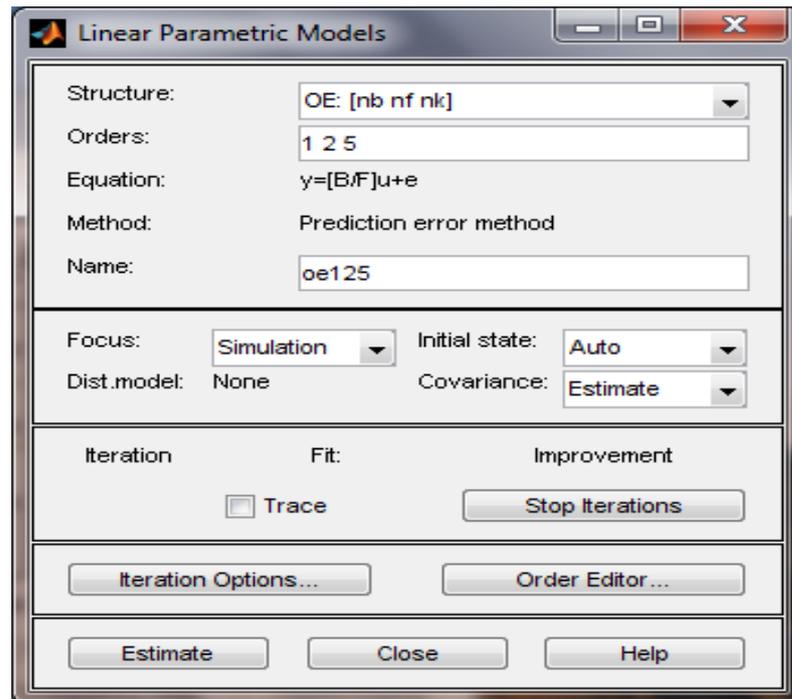
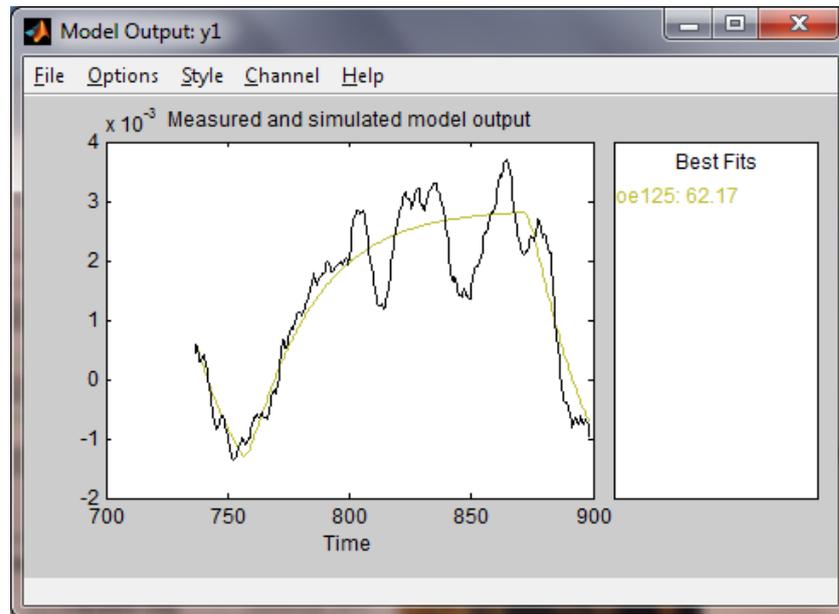


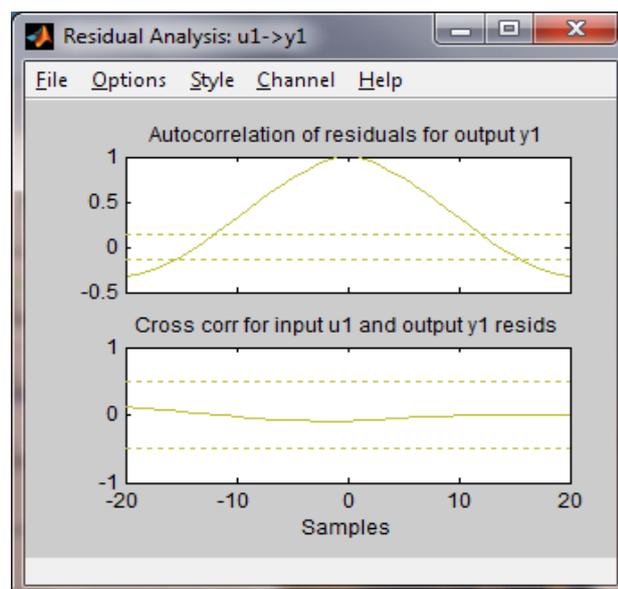
Figura 4-26 Ventana De Modelo Paramétrico Para OE

En los modelos dados por OE como modelo paramétrico tenemos que la simulación con los datos usados en validación más acertada fue la del modelo OE125 que se ajusta a lo que se deseaba; un orden no mayor a 2.



**Figura 4-27 Contraste Entre Modelo OE125 Y El Modelo Real**

Este modelo debería garantizar una gran confiabilidad debido a la similitud a los datos de validación de 62.17% pero su resultado no nos sería de gran ayuda al estar su análisis de residuos fuera de los límites del intervalo de confianza.



**Figura 4-28 Análisis Residual OE125**

En este modelo la respuesta de escalón fue muy acertada, sin variaciones bruscas y sobretodo bastante eficiente en términos de rapidez.

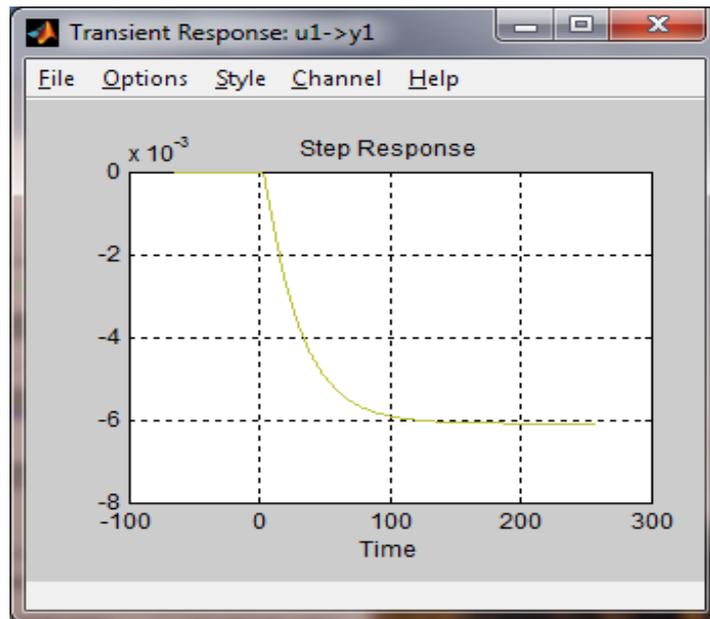


Figura 4-29 Respuesta Al Escalón OE125

#### 4.4 ELECCIÓN DEL MODELO MÁS CONVENIENTE

De todos los modelos que se escogieron como más adecuados, se obtuvo en resumen los siguientes resultados en cuanto a análisis residual:

- ARX: Análisis residual fuera del rango de confianza.
- ARMAX: Análisis residual aceptable, dentro del rango de confianza.
- FIR: Análisis residual fuera del rango de confianza.

- Box Jenkins: Análisis residual aceptable, dentro del rango de confianza.
- Output Error: Análisis residual fuera del rango de confianza.

De los dos modelos aceptables ARMAX y Box Jenkins, se presenta un resumen en la siguiente tabla:

<i>Nombre del modelo</i>	<i>Coefficientes ingresados</i>	<i>% Similitud con datos de validación</i>	<i>Numero de Polos</i>	<i>Numero de Ceros</i>	<i>Retardo</i>
Armax	AMX(3 1 2 2)	61.26%	3	2	0.5
Box Jenkins	BJ(1 2 2 2 5)	61.71%	2	1	2

**Tabla 4-8 Tabla De Contraste Entre Modelo ARMAX vs Box-Jenkins**

De los dos modelos se pueden sacar las siguientes conclusiones: El porcentaje de similitud lo tiene más alto el modelo Box Jenkins, y en realidad la diferencia es mínima, así que no habría mayor diferencia en escoger cualquiera de los 2 modelos observando esos valores de porcentaje.

Viendo el número de polos y ceros se puede observar como el modelo Box Jenkins presenta menor cantidad, y por lo tanto presenta buen acercamiento de la dinámica del sistema sin la necesidad de un orden mayor como el del ARMAX, por parsimonia en este caso estaría mejor el modelo Box Jenkins.

Finalmente el retardo que presenta el modelo Box Jenkins es mayor que el del ARMAX, y con esto se modela mucho mejor a la planta la cual ya sabemos que cuenta con retardo y que es importante considerarlo para el análisis. Por todo lo expuesto anteriormente el modelo que escogeremos para la planta y el más óptimo será el de Box Jenkins.

#### 4.5 MODELO DE LA PLANTA IDENTIFICADA

Los coeficientes del modelo Box Jenkins en el dominio del plano discreto fueron:

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

$$B(z) = -0.00516z^{-5}$$

$$C(z) = 1 + 0.4582z^{-1} - 0.5023z^{-2}$$

$$D(z) = 1 - 1.822z^{-1} + 0.8397z^{-2}$$

$$F(z) = 1 - 1.876z^{-1} + 0.878z^{-2}$$

Los cuales al pasarlos al dominio en el plano continuo (Laplace) a la función de transferencia de la planta, se obtiene:

$$\frac{-0.0053856(s + 4.088)}{(s + 0.2199)(s + 0.04037)} e^{-2s} \qquad \frac{-0.005386s - 0.02202}{s^2 + 0.3494s + 0.07527} e^{-2s}$$

Usando la aproximación de Padé para el retardo:

$$e^{-2s} \approx \frac{s^2 - 3s + 3}{s^2 + 3s + 3}$$

$$\frac{-0.0053856(s + 4.088)(s^2 - 3s + 3)}{(s + 0.2199)(s + 0.04037)(s^2 + 3s + 3)} \quad \frac{-0.02154s^3 - 0.02344s^2 + 0.1996s - 0.2642}{4s^4 + 13.04s^3 + 15.16s^2 + 3.23s + 0.1066}$$

Y finalmente agregándole el integrador que le habíamos quitado:

$$\frac{-0.0053856(s + 4.088)(s^2 - 3s + 3)}{s(s + 0.2199)(s + 0.04037)(s^2 + 3s + 3)} \quad \frac{-0.02154s^3 - 0.02344s^2 + 0.1996s - 0.2642}{4s^5 + 13.04s^4 + 15.16s^3 + 3.23s^2 + 0.1066s}$$

Ahora, también deberíamos tomar en consideración la función de transferencia del modelo del ruido para armar todo el modelo de la planta, pero debido a que previo a la identificación se tuvieron que usar filtros para remover el ruido en cuanto era posible y de ahí diferenciar (Capítulo 3.2.2 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN), el modelo de ruido obtenido para nuestra planta quedó inconveniente e inexacto para el modelado de la planta y por esto se prefiere no utilizarlo.

## 4.6 SIMULACIONES

Para esto se utilizó el siguiente diagrama de bloques:

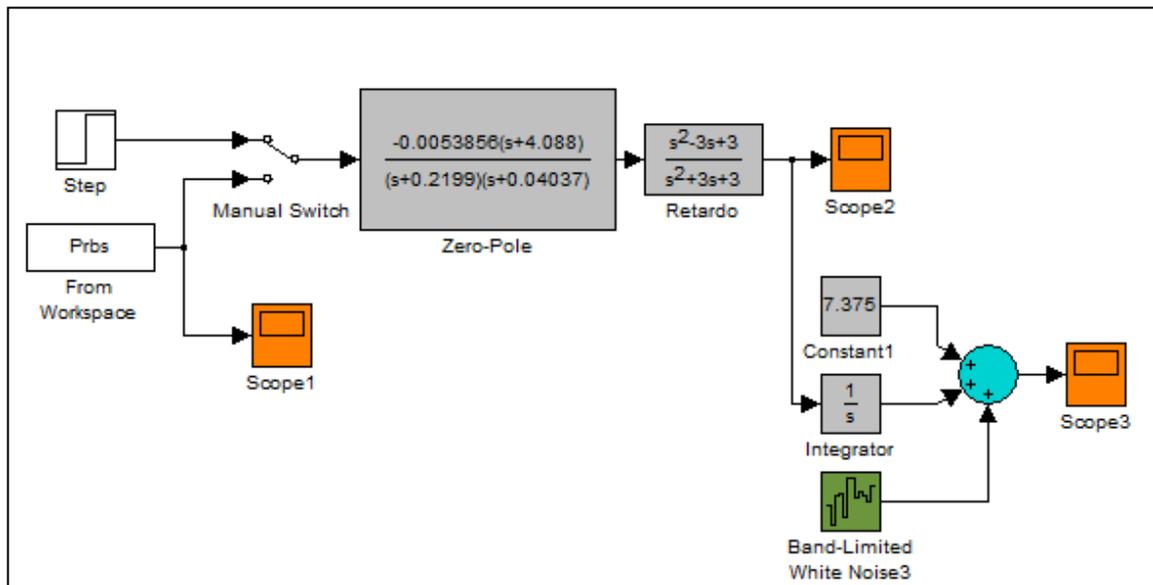
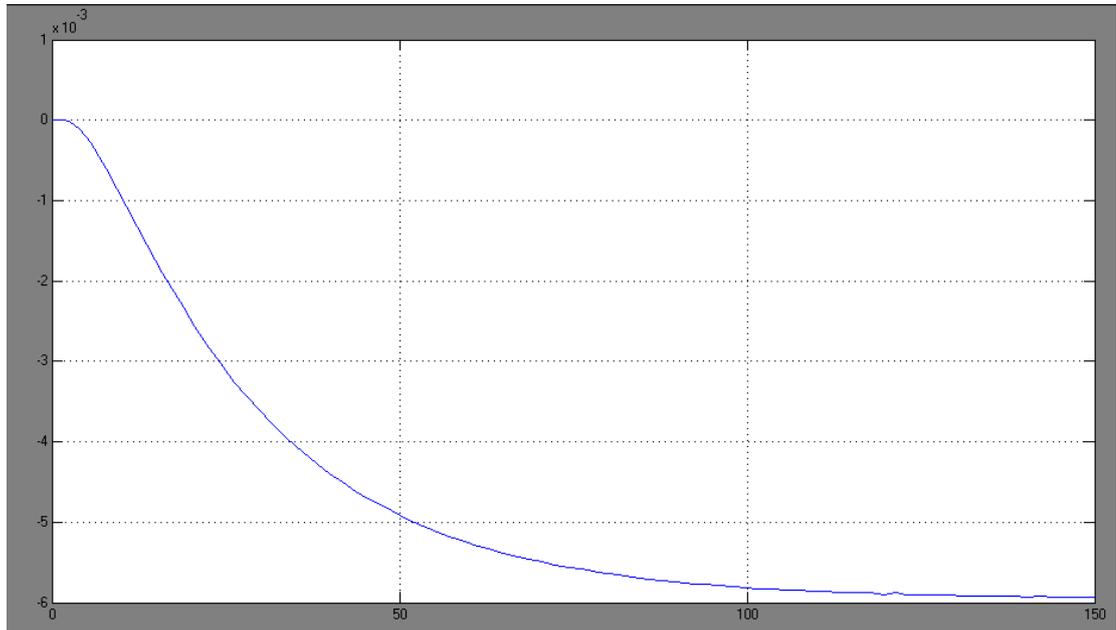
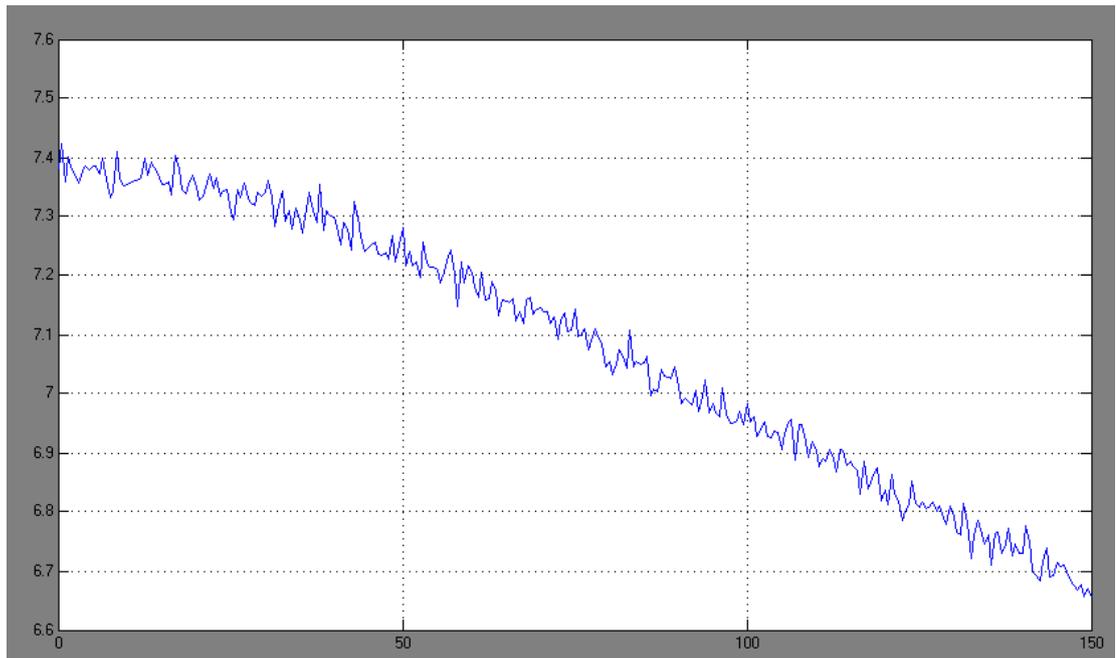


Figura 4-30 Diagrama De Bloques Para Simulaciones

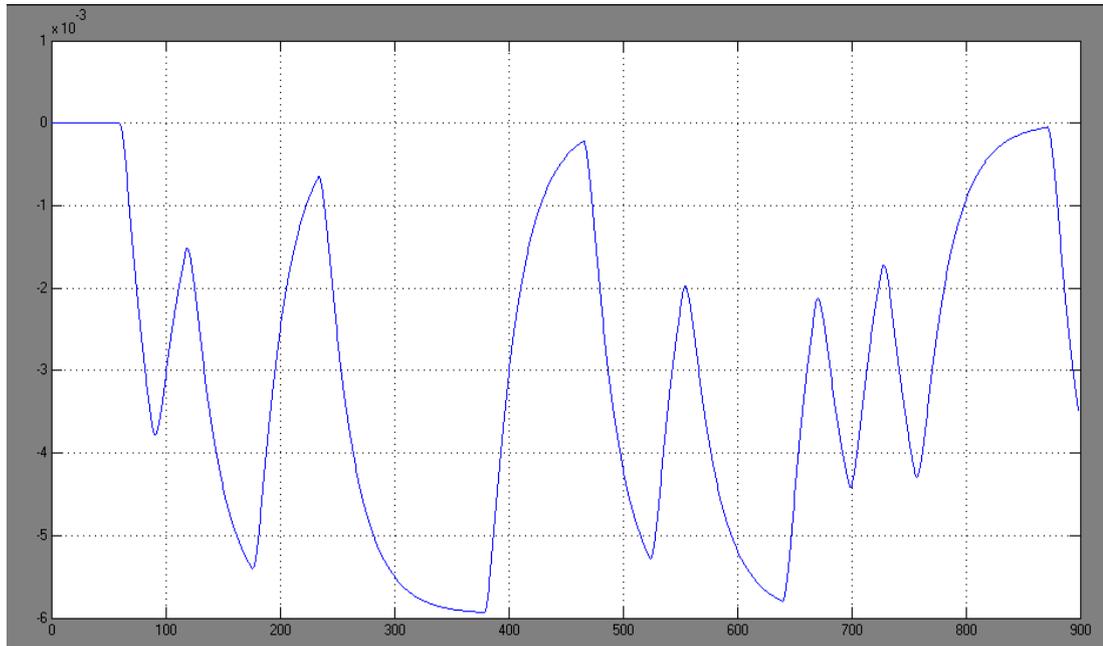
En este diagrama se prueban la señal escalón y la PRBS con la que se identificó la planta, además para acercarlo más a la planta real se agregó un desfase para alcanzar pH 7.375 y una señal de ruido blanco, obteniendo los siguientes resultados:



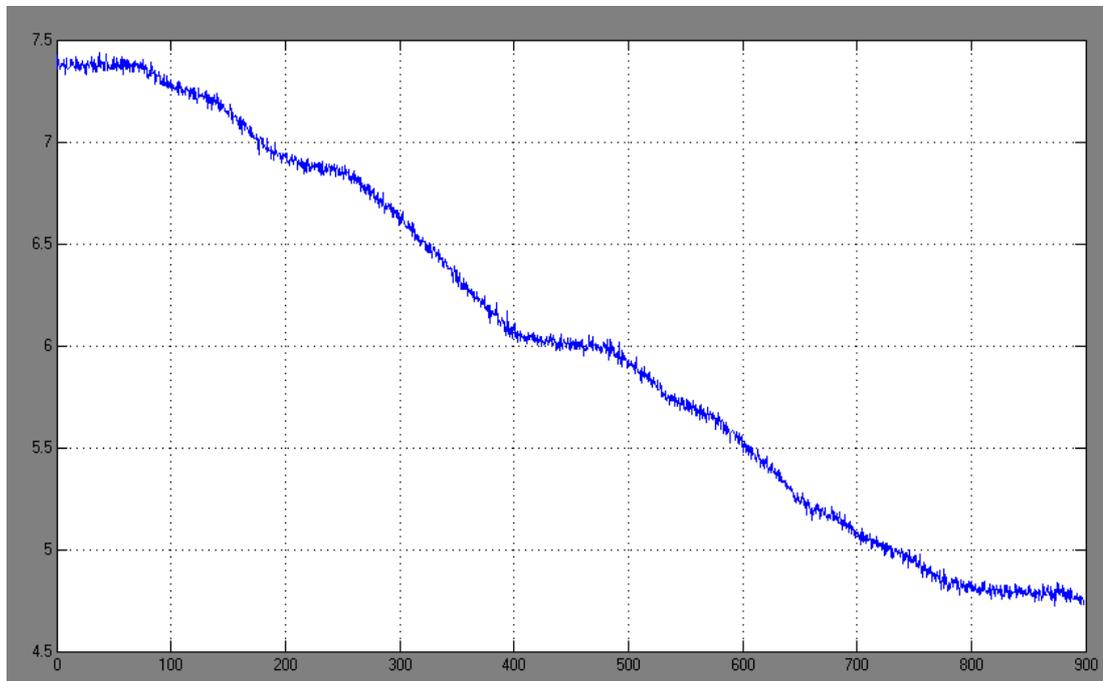
**Figura 4-31 Respuesta Al Escalón Sin Integrador**



**Figura 4-32 Respuesta Al Escalón Con Integrador Y Con Ruido**



**Figura 4-33 Respuesta Entrada PRBS Sin Integrador**



**Figura 4-34 Respuesta Entrada PRBS Con Integrador Y Con Ruido**

Como se puede observar las respuestas simuladas se aproximan bastante a las respuestas de la planta real, lo cual nos hace terminar de confirmar que el modelo Box Jenkins con coeficientes  $n_b=1$ ,  $n_c=2$ ,  $n_d=2$ ,  $n_f=2$ ,  $n_k=5$  es idóneo y un buen modelo para representar a la planta de pH.

# CAPÍTULO 5

## 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR

### 5.1 ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una vez hallada la función de transferencia que modela nuestra planta, finalmente podremos hallar un controlador adecuado para la misma, para esto nos valdremos de una herramienta más que nos ofrece MATLAB, llamada SISOTOOL.

Primero examinaremos la función de transferencia obtenida, esta es de tercer orden, tipo 1 con un cero sin contar el retardo. Los polos son los que básicamente nos dan la dinámica del sistema, diciéndonos si la planta responde con características de ser sub-amortiguada o sobre-amortiguada. Nuestra planta cuenta con 3 polos reales (indicando 3er orden), uno de estos polos se encuentra en el origen (indicando tipo 1) y es también el integrador

el cual se ha mencionado desde el capítulo 3, en lazo abierto este polo en el origen nos indica inestabilidad para una entrada escalón.

Sin contar con este polo en el origen, podríamos emplear el concepto de polo dominante, en el cual un polo se dice que es dominante cuando este se encuentra lo más cercano al origen y a la vez los demás polos se encuentran lo más alejado de este polo. Para hablar de lejanía decimos que basta con que uno de los polos se encuentre al menos una década del otro (uno sea por lo menos 10 veces el otro), y como se puede observar de la función de transferencia obtenida, se puede considerar que tenemos un polo dominante en  $-0.04037$ , ya que aunque no se encuentra a una década del otro polo, por lo menos aproximadamente lo está y el polo no dominante solo atrasará ligeramente la respuesta transitoria.

También se cuenta con un cero el cual se encuentra bastante alejado del polo dominante, esto nos indica que no afecta mucho a nuestro sistema, normalmente un cero negativo adelanta la respuesta del sistema, mientras que un cero positivo produce una respuesta inicialmente inversa.

Conjuntamente con la función de transferencia, nuestro modelo también cuenta con un retardo de 2 segundos. Este se expresa como  $e^{-2s}$  en el dominio de la frecuencia de Laplace, pero se puede hacer una conversión a función de transferencia usando la aproximación de Padé.

Esta aproximación nos ayudará a ingresarlo en el análisis de SISOTOOL que se hará posteriormente, además esta aproximación hará que el orden de nuestro modelo suba de un orden 3 a un orden 5, pero como el objetivo de la aproximación de Padé es que funcione como retardo en realidad no influenciará realmente en la dinámica del modelo, esto se lo puede comprobar inclusive porque los polos que agrega el retardo no son dominantes, por lo cual el análisis hecho previamente todavía es válido.

## 5.2 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR

Se quiere realizar un controlador que reaccione principalmente antes cambios de referencia (servo control), además este debe poseer error de estado estacionario cero, sin sobre nivel porcentual y no tan alto tiempo de estabilización.

Se desea obtener error de estado estacionario cero para que la planta se estabilice en el punto de referencia que se le indique, normalmente para esto se usa un controlador proporcional integral (PI), pero debido a que nuestra planta ya posee un integrador (polo en el origen) no será necesario que el controlador también lo posea, sino que se aprovechará el propio que ya posee la planta y de esta manera lo que obtendremos será un controlador simplemente proporcional.

No podemos contar con que la respuesta posea sobre nivel porcentual, ya que al solo ingresar acido al tanque, el valor de pH medido solo tiene la opción de disminuir y por lo tanto una respuesta sub-amortiguada de pH sería inconcebible a parte de imposible. Un tipo de respuesta como esta seguramente podría observarse en una simulación, pero no en nuestro caso para la planta real, y este hecho solo introduciría una desviación en el verdadero valor que se pida que se estabilice. Es por esto que nuestra planta necesariamente debe mostrar una respuesta sobre amortiguada.

Para el tiempo de estabilización, este debe ser adecuado y acorde con que la planta sea sobre-amortiguada, esto nos obliga a hacer la planta un poco lenta para garantizar el hecho de que no exista sobre nivel a la salida, y por esto lo establecimos en 210 segundos.

### 5.3 PASOS PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR

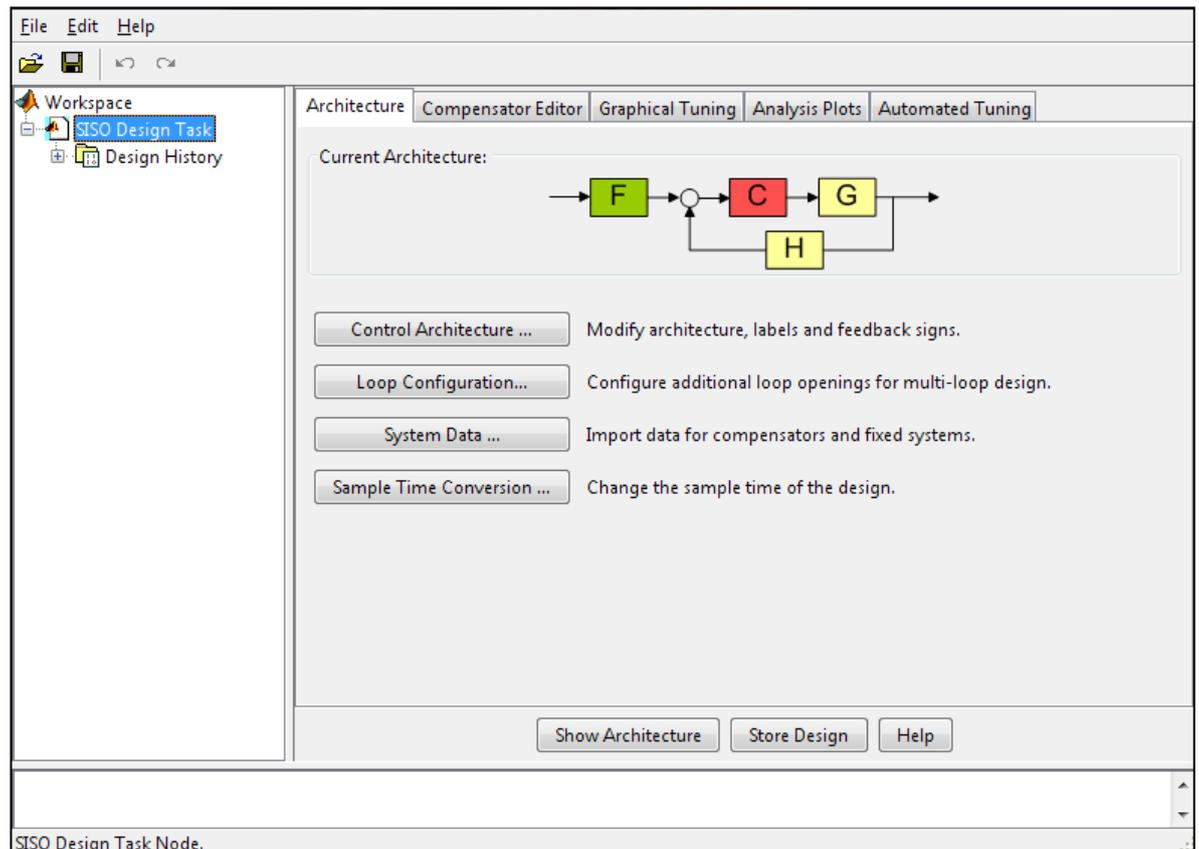
1. Se creará la función de transferencia obtenida en el COMMAND WINDOW de MATLAB, mediante el comando:

```
Planta = tf([-0.02154 - 0.02344 0.1996 - 0.2642],[4 13.04 15.16 3.23 0.1066])
```

2. Se abrirá a continuación la herramienta de trabajo SISOTOOL, y le introduciremos la planta ya diseñada con el comando:

```
sisotool (Planta)
```

3. Una vez abierto SISOTOOL, se observara la siguiente ventana:

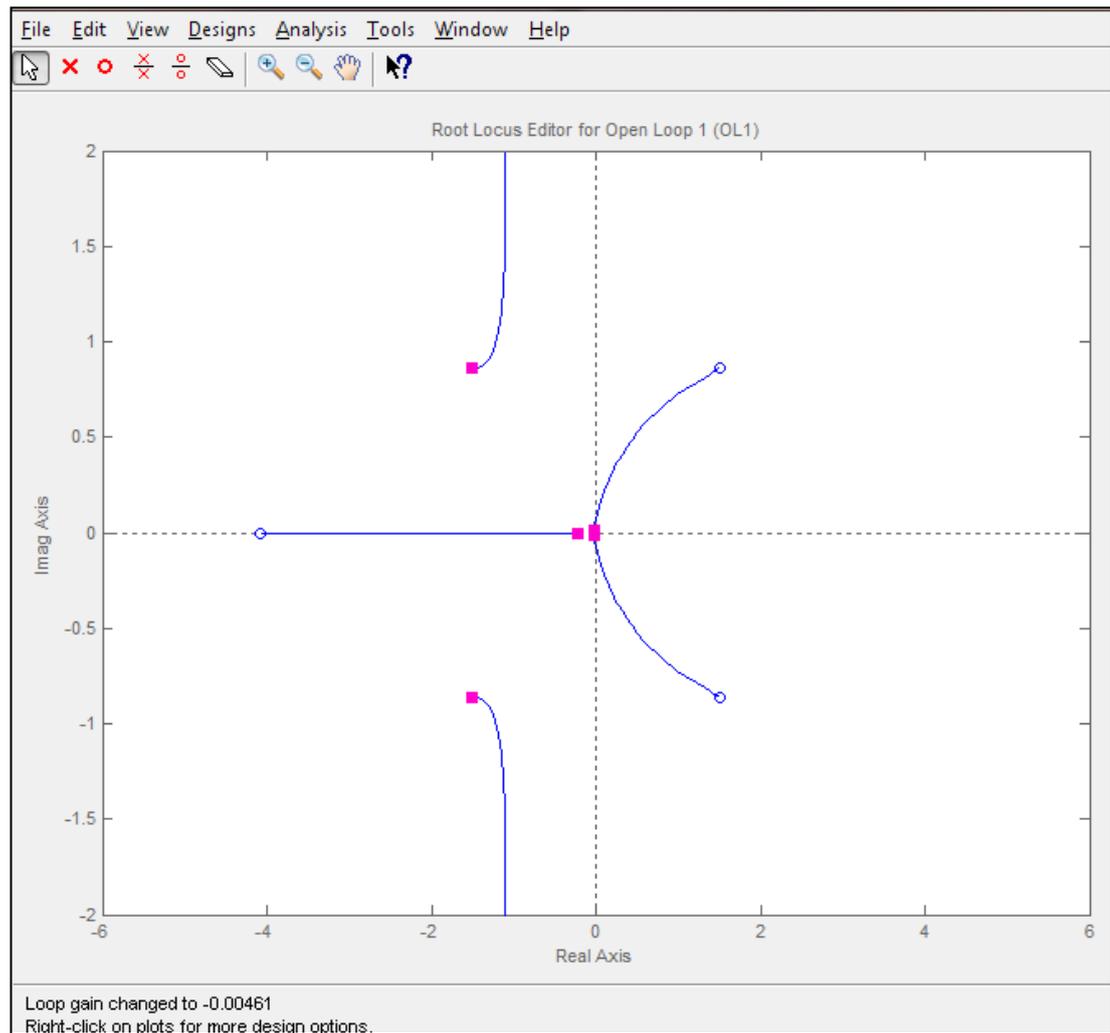


**Figura 5-1 Ventana Principal De SISOTOOL**

En la cual se puede observar el circuito de control en lazo cerrado que se va a usar, y que en nuestro caso se usarán los siguientes valores para las funciones de transferencia:

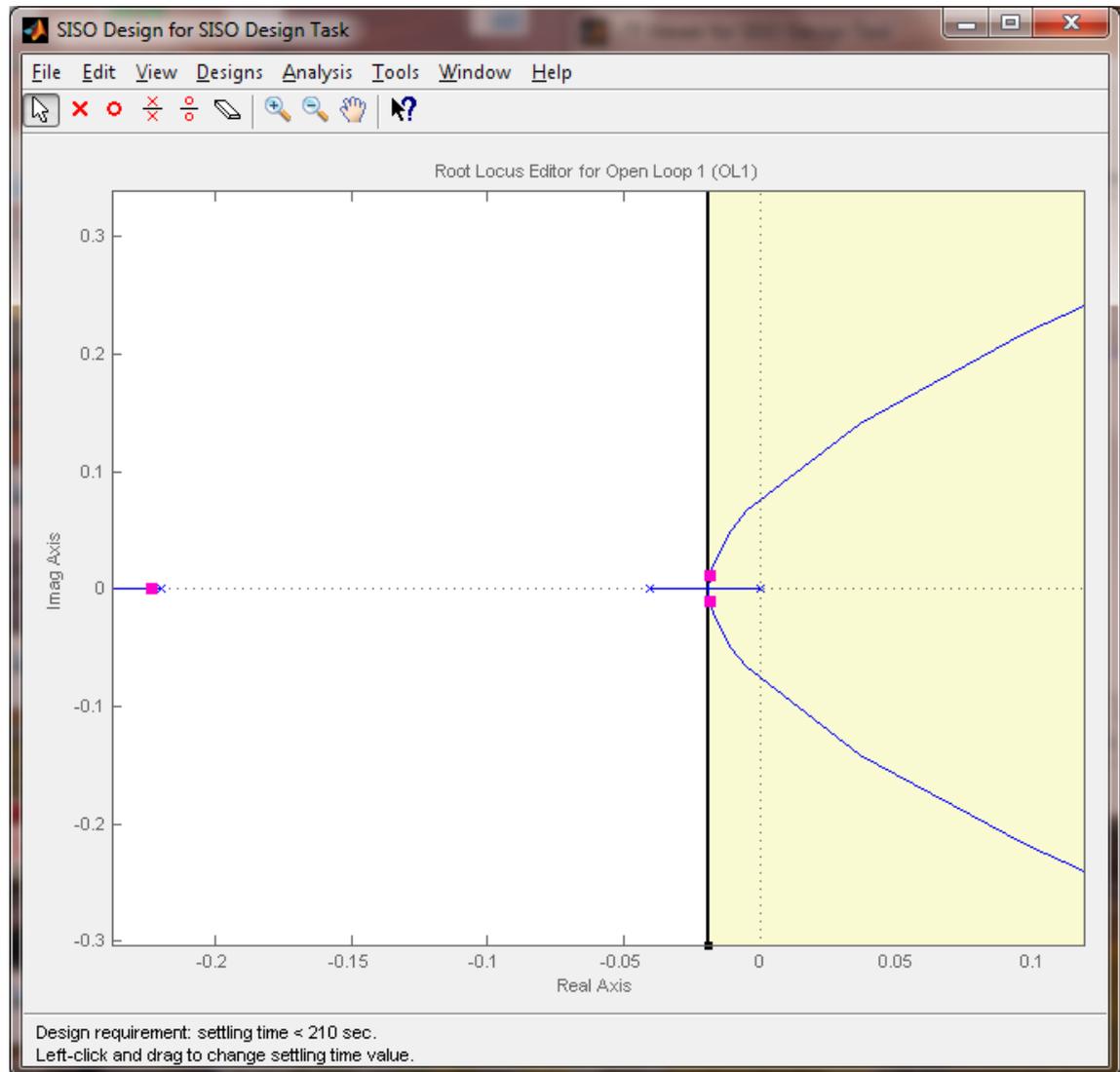
$$F = 1 \quad C = 1 \quad H = 1 \quad G = \text{Planta}$$

También se observará la ventana del lugar geométrico de las raíces:



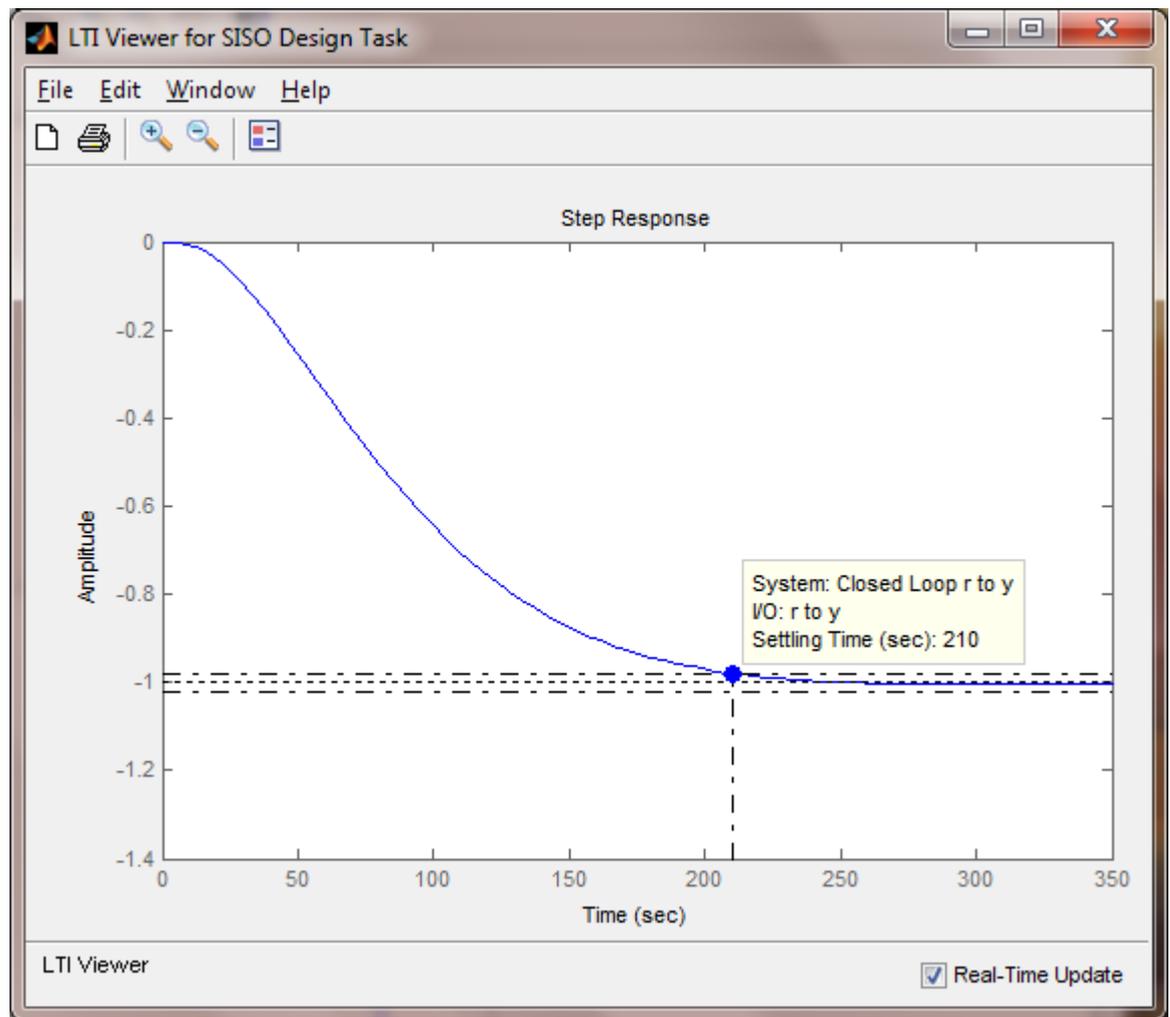
**Figura 5-2 Lugar Geométrico De Las Raíces De La Planta**

4. Ahora en el lugar geométrico de las raíces se agrega el requerimiento que buscamos, tiempo de estabilización de 210 segundos. Y se coloca las raíces para que intercepten con este requerimiento.



**Figura 5-3 Requerimiento Del Tiempo De Estabilización De 210s**

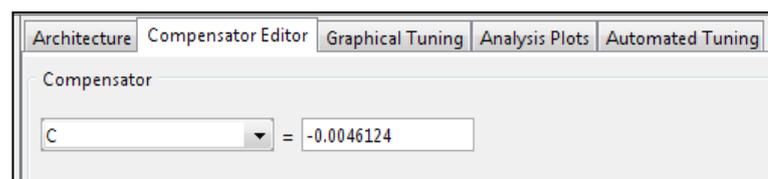
5. Se verifica introduciendo una señal escalón negativa la respuesta de la planta y que esta cumpla con error de estado estacionario cero, el requerimiento de tiempo de estabilización establecido, y que sea una respuesta sobre amortiguada.



**Figura 5-4 Respuesta Al Escalón Con Controlador**

6. Una vez verificado todo esto, se revisa el valor del controlador proporcional obtenido:

$$C = -0.0046124$$



**Figura 5-5 Ventana Del Editor De Compensador**

## 5.4 SIMULACIÓN DE LA PLANTA CON CONTROLADOR

Para verificación, una vez obtenida la planta y el controlador de la misma, se procederá a usar a ambos en una simulación, el cual a su vez es el verdadero objetivo de este proceso, poder hacerle las pruebas que uno desee a la planta y observar cómo reacciona previo a hacer estas pruebas en la vida real, para esto nos valemos del siguiente diagrama de bloques:

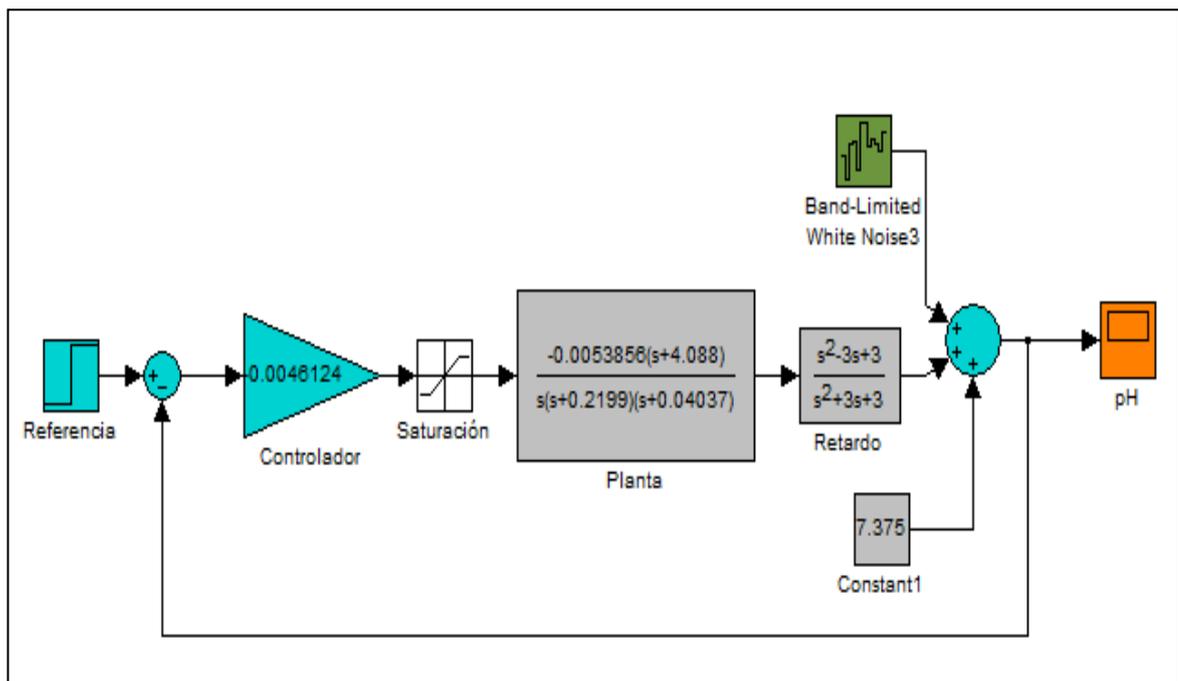


Figura 5-6 Diagrama De Bloques Para La Simulación

En esta simulación se ajusta la referencia en pH 6.5, y hay esencialmente 2 diferencias comparado con la prueba que se obtuvo al momento de diseñar el controlador.

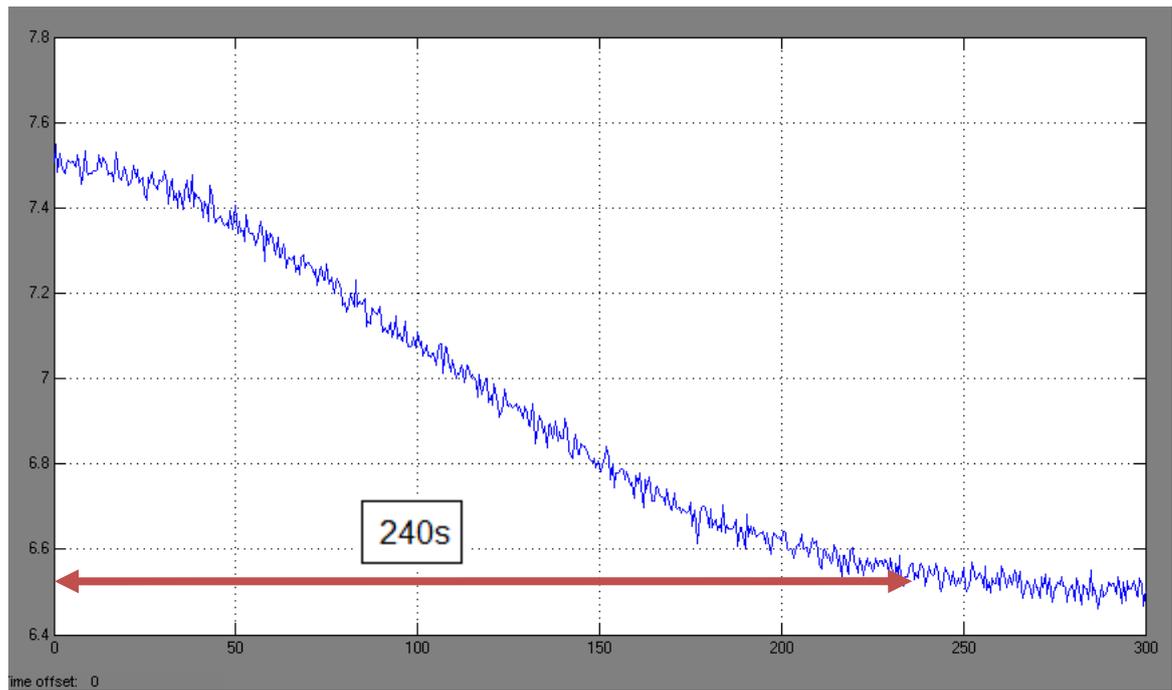
Su primera diferencia fue el bloque saturador, el cual fue agregado ya que en la planta real se usa, este tiene el propósito de mantener a la bomba peristáltica trabajando en un rango de 10% a 25% de su capacidad de flujo de entrega, la cual consideramos una zona aproximadamente lineal e ideal para trabajar como nuestro punto de operación para la bomba.

La otra diferencia es el uso de un bloque para generar una señal de ruido blanco, usado como perturbación para asemejarse más a la planta real.

Este bloque de ruido en realidad debió ser representado en conjunto con la función de transferencia identificada por el modelo Box Jenkins, pero debido al uso de nuestros filtros al momento de la adquisición de datos detallados en el capítulo 3, el modelo de ruido conseguido para nuestra planta no es conveniente y por ende se lo descartó.

También se encuentra un bloque de una constante que suma a la salida 7.5 y este hace que la salida de pH empiece en un valor nominal muy similar al que encontraríamos en la planta real de pH

que tenga como solución de inicio agua. Una vez aclarados estos detalles, se presenta la respuesta de la simulación:



**Figura 5-7 Respuesta De La Planta Simulada**

Aquí se puede observar como respondió la planta simulada incorporando las características ya mencionadas, la principal diferencia con la respuesta obtenida al momento del diseño del controlador, es que ahora el tiempo de estabilización se alargó comparado con el que habíamos esperado.

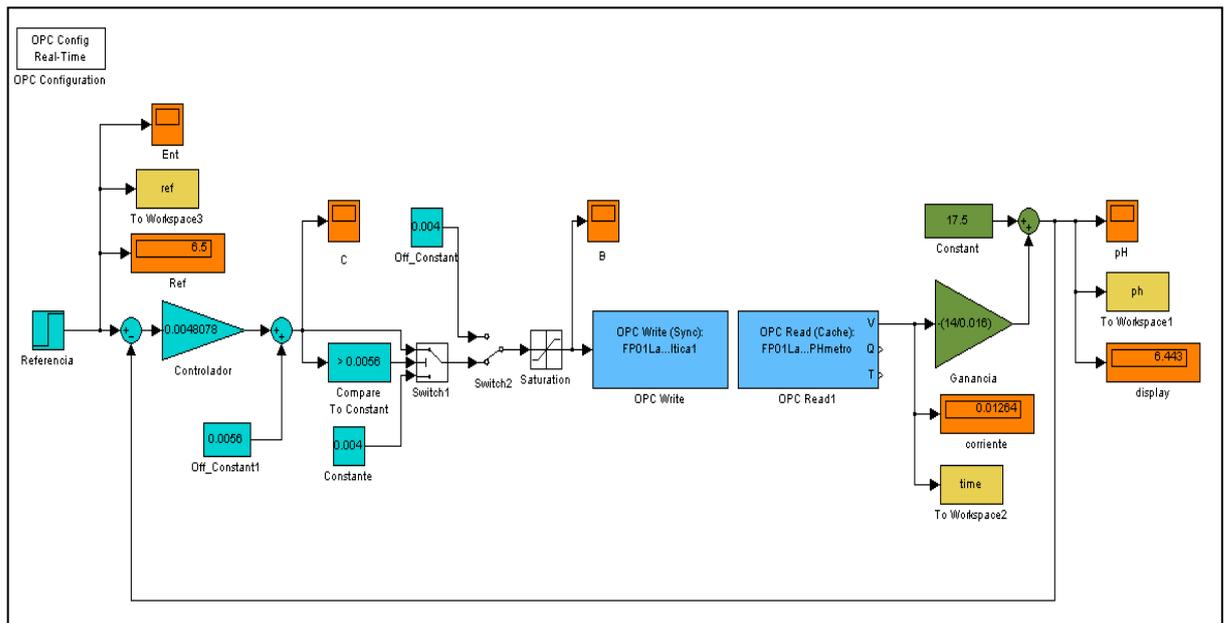
Esto se debe al uso del saturador, puesto que este limita la cantidad de corriente que se le enviaría a la planta y no permitiría que la bomba pueda enviar un mayor flujo del ácido al tanque.

Al momento del diseño del controlador, no se consideró que su salida era mayor de lo que iba a poder enviarse a la planta (debido a que no se podía agregar un saturador en el modelo del diseño del controlador), y esto provocó en conclusión que la planta se demore un poco más de lo previsto, ahora nuestro tiempo de estabilización se encuentra aproximadamente en 240 segundos contrastado con los 210 que se quería obtener.

Este suceso es un hecho que en realidad no afecta demasiado a la planta y se puede considerar aceptable para nuestras expectativas, por todo lo demás la planta reacciona bastante bien.

## ***5.5 PRUEBA DEL CONTROLADOR CON LA PLANTA REAL***

Finalmente hemos llegado a nuestra prueba final, utilizar el controlador diseñado y probarlo en la planta real, para esto se uso el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 5-8 Diagrama De Bloques Del Controlador Con La Planta Real**

Como se puede observar hay ciertas diferencias con la simulación, para empezar después del controlador se encuentra un sumador el cual desfasa la señal que sale del controlador en 0.0056, esto se debe a que el rango de trabajo para la bomba concierne desde 5.6mA a 8mA y esto corresponde del 10% al 25% del flujo que arroja la bomba en el cual se va a trabajar. Al agregar este sumador, nos estamos asegurando de que como valor mínimo se envíe a la planta 5.6mA.

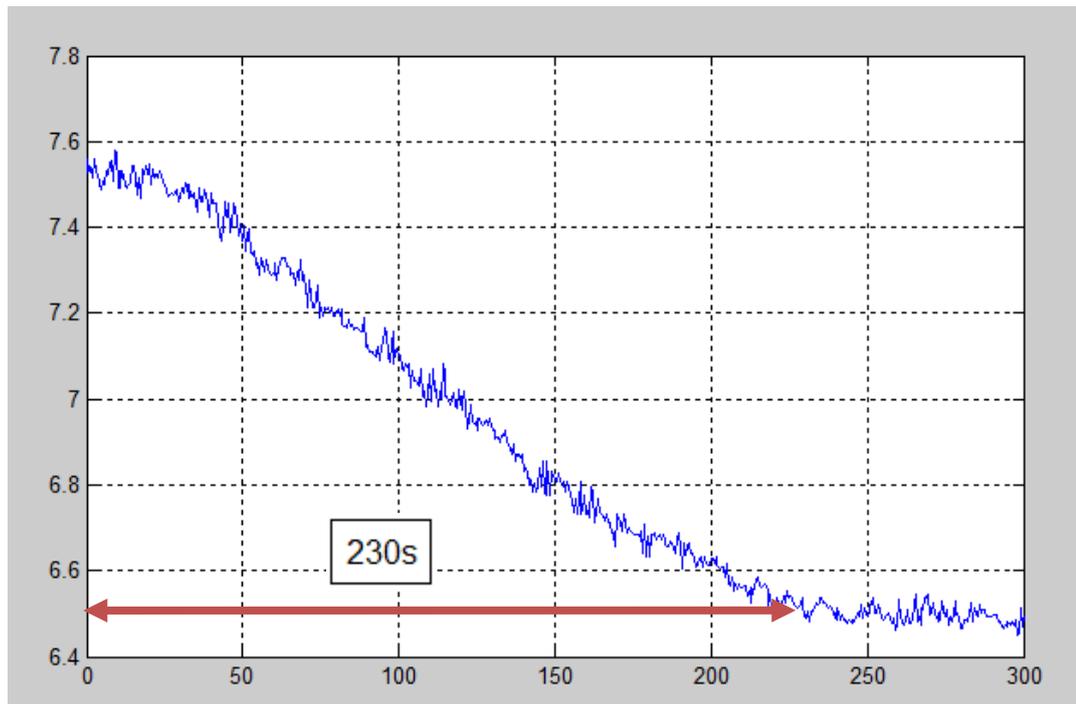
El siguiente bloque es uno comparador, el cual deja pasar la señal normalmente si esta es mayor a 0.0056 pero si es menor se envía

4mA, esto se usa para poder apagar la bomba y no seguir enviando ácido (explicado con mayor detalle en el capítulo 3).

Después encontramos un SWITCH manual colocado ahí solo en caso de que no se quiera seguir usando el controlador, y se quiera apagar la bomba, se puede denotar a este SWITCH como protección para algún caso de emergencia.

Finalmente se encuentra un saturador que tiene sus valores máximo y mínimo colocados en 8mA y 4mA respectivamente con el objetivo de mantener a la bomba trabajando en su punto de operación.

A la salida de la planta se encuentra una ganancia y un desfase los cuales hacen la conversión de corriente a pH. Una vez más se ajustó la referencia en pH 6.5 para hacer una comparación con la simulación, y se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 5-9 Respuesta De La Planta Real Con Controlador**

Aquí se muestra la respuesta de la planta real usando el controlador proporcional diseñado en este capítulo, como se puede observar denota un gran parecido a la respuesta esperada vista en la simulación, y cumple con las características de diseño, excepto que el tiempo de estabilización, que fue especificado para un valor de 210s, este se desfasó para la planta real ligeramente en unos 20s y ahora llegó hasta 230 segundos por la misma razón que en la simulación, el bloque saturador que se agregó. Por todo lo demás podemos concluir que el controlador hallado trabaja óptimamente en la planta y para el punto de operación escogido.

# CONCLUSIONES

1. Las técnicas de Identificación de Sistemas resultaron ser válidas y aplicables a la planta real de pH a pesar de sus diversos factores adversos, como lo fueron su comportamiento no estacionario, su alto nivel de ruido, y su no linealidad.
2. El modelo para la planta de pH obtenido mediante la Identificación de Sistemas se considera como válido con un valor de similitud de 61,71% dado que los datos de validación usados en este modelo contaban con mucho ruido.
3. Se verificó que los valores asignados en base a escenarios matemáticos del TAO MÍNIMO, TAO MÁXIMO y TIEMPO DE MUESTREO fueron adecuados para la generación de las Señales de Entrada escogida, representando de manera acertada a nuestro sistema.
4. Se denota que el modelo con el controlador simulado se asemeja en gran proporción al obtenido una vez probado en la planta de pH y gracias a esto ahora se podrá obtener la respuesta a una entrada dada mediante la simulación sin la necesidad de trabajar con la planta real.

5. El controlador diseñado con la ayuda de la función de transferencia de la planta, fue eficiente y simple puesto que al implementar un controlador meramente proporcional se pudo llegar a un error de estado estacionario cero.
  
6. Haber obtenido un controlador proporcional, trae un gran beneficio en cuestiones económicas, dado que en caso de una implementación completamente física sin el uso de algún software, este sería muy sencillo y barato de hacer.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario tener toda la información sobre la planta con la que se va a trabajar, vastos conocimientos sobre el método escogido para la Identificación de Sistemas y buenas bases teóricas para un acertado diseño del controlador.
2. Sugerimos fuertemente seguir las medidas de seguridad aquí especificados para el manejo del ácido.
  - Uso constante de los implementos de laboratorio para medidas de prevención como lo son: mandiles, guantes y en casos especiales gafas de protección.
  - Agregar siempre el ácido a la solución no la solución al ácido debido a que la reacción genera mucha energía calorífica y al tratarse de un ácido fuerte genera pequeñas cantidades no manejables.
  - Manejar de manera adecuada el ácido porque su contacto con la piel y las prendas pueden causar serios daños.
3. El manejo de la planta no debe efectuarse por un lapso mayor a 30 minutos, puesto que algunos de los elementos de la planta constan con este tiempo como límite de trabajo constante, en especial el motor del agitador y la bomba peristáltica.

4. El sensor de pH debe ubicarse en su protector con un poco de agua para evitar daños menores en la adquisición de datos y someterlo a un mantenimiento preventivo de calibración cada tres meses debido a que este siempre está en contacto con sustancias de pH variable.

# ANEXOS

## *Ecuaciones Y Gráficos De Las Bombas Peristálticas*

Las ecuaciones de las bombas peristálticas detalladas a continuación fueron especificadas con un salto de 0% a 100%, estos valores hacen que la extrapolación de datos sea de manera lineal, exceptuando el rango de 0% a 10% que solo necesita un valor entre 4mA a 5.6ma para fijar el caudal en un 10%.

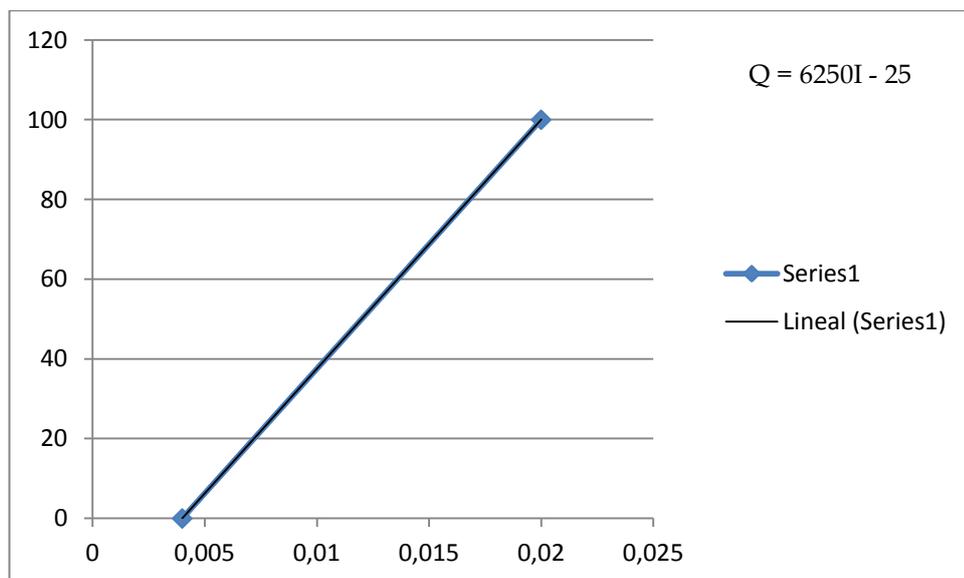
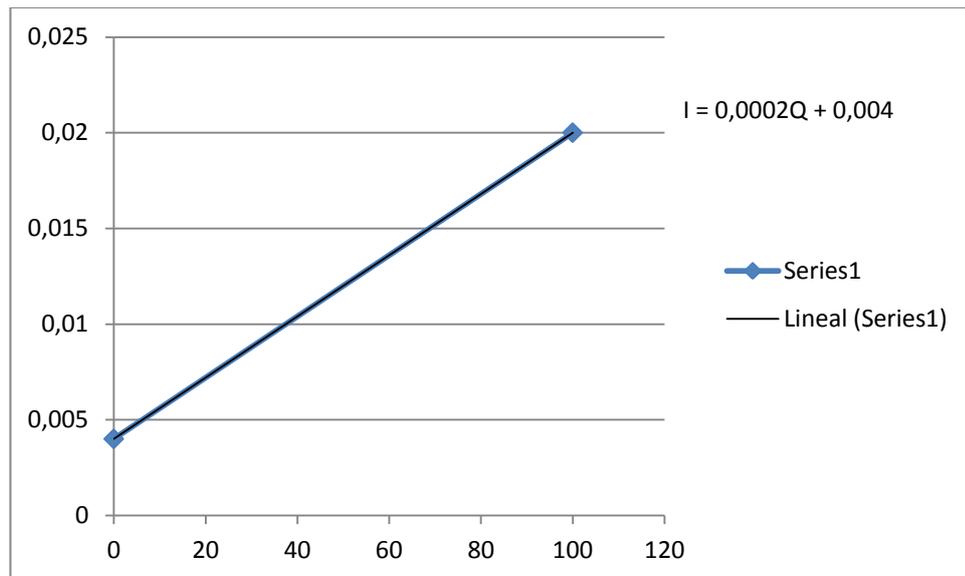


Gráfico de Caudal Vs Corriente

El primer grafico tiene como puntos para su salto de 0% a 100% los siguientes valores: P1 (0.004 , 0) y P2 (0.020 , 100) que nos darían como grafica lo expuesta en la Figura 82.

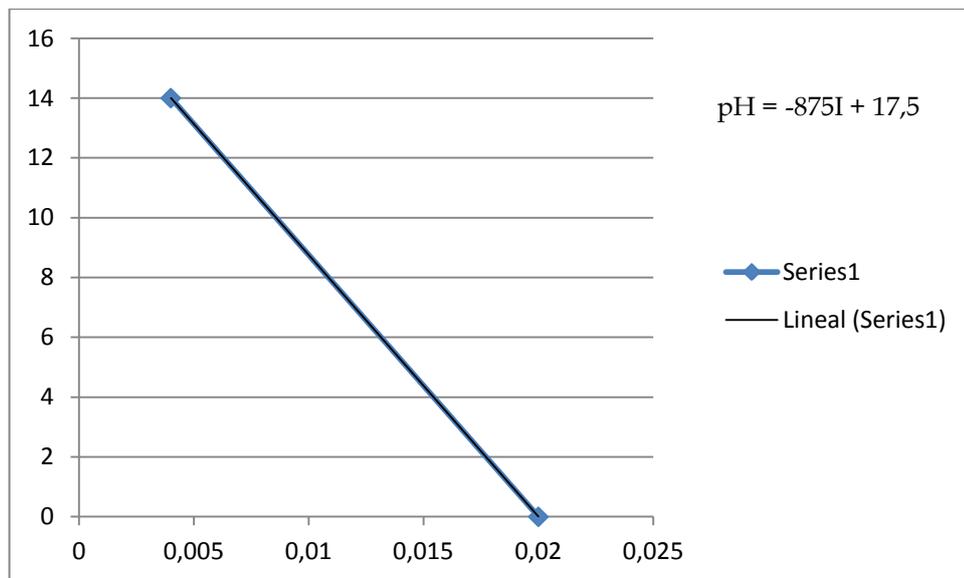


**Gráfico de Corriente Vs Caudal**

El segundo grafico tiene como puntos para su salto de 0% a 100% los siguientes valores: P1 (0 , 0.004) y P2 (100 , 0.020) que nos darían como grafica lo expuesta en la Figura 83.

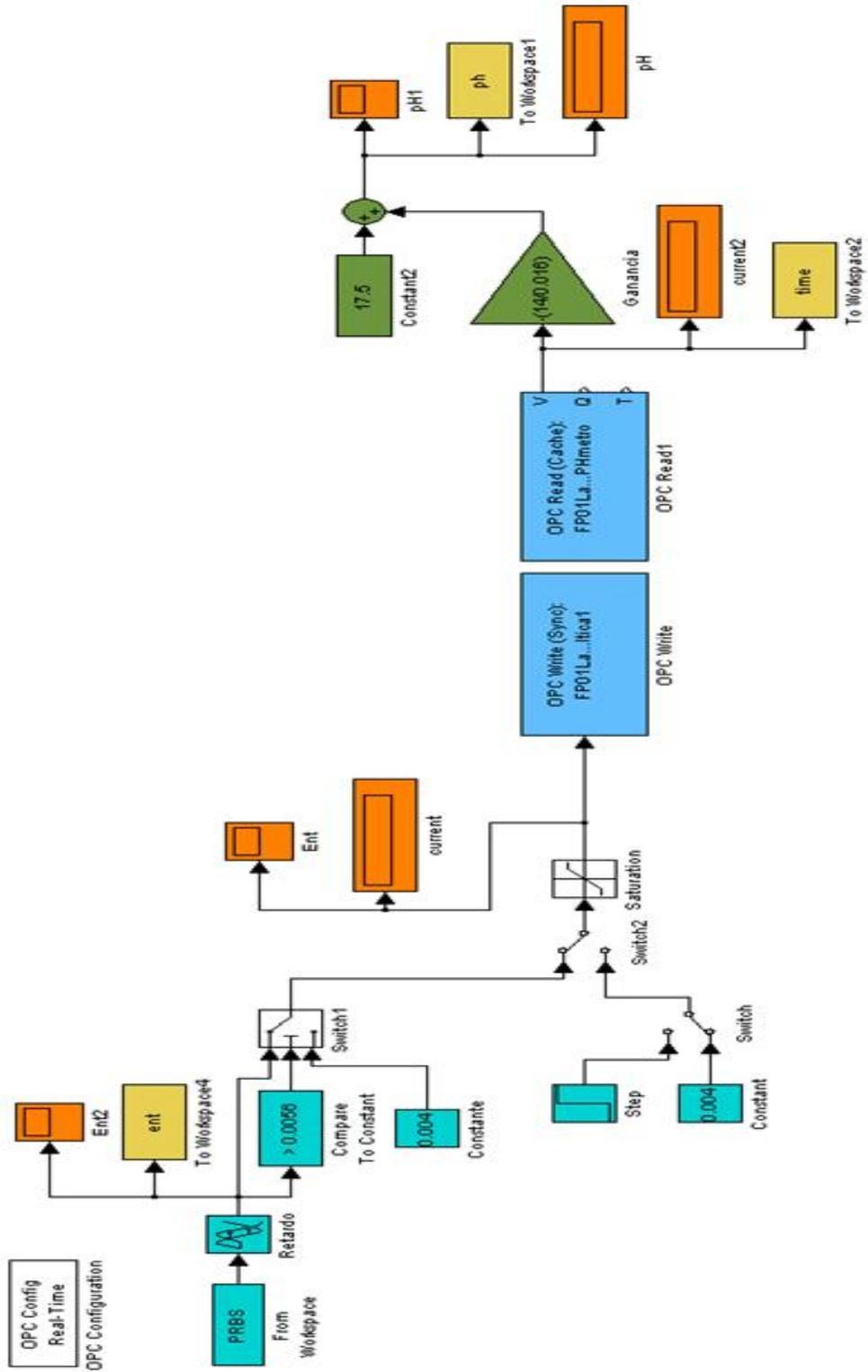
### *Ecuaciones Y Gráficos Del Sensor De pH vs Corriente*

La ecuación de conversión de pH a corriente fue muy útil al momento de adquirir los primeros datos de la planta puesto que necesitábamos estos valores para la calibración del medidor de pH. Se obtuvo el siguiente grafico una vez que se tomó el rango acorde de los datos que enviaba el sensor a la PC.



**Gráfico de pH Vs Corriente**

*Diagrama de Bloques Para Generación y Adquisición de Datos*

















## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ralph A. Burns, Fundamentos de Química (4ta Edición) – Pearson Prentice Hall, 2003.
- [2] Søren Sørensen, Chemical Achievers - The Human Face of the Chemical Science, Chemical Heritage Foundation, Retrieved 2011-10-14.
- [3] Robert A. Alberty; Robert J. Silbey, Physical Chemistry (second ed.). John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [4] Anita Kildebæk Nielsen, "S.P.L. Sørensen" (in Danish). Biokemisk forening. Retrieved 2007-01-09.
- [5] Isaac Feldman. "Use and Abuse of pH measurements". Analytical Chemistry 28, 1859.
- [6] McAvoy T. et al. "Dynamics of pH in controlled stirred tank reactor". Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, vol. 11, No 1, 1972. pp. 68-70
- [7] McAvoy T. "Time optimal and Ziegler-Nichols control". Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., vol. 11, No 1, 1972. pp. 71-78
- [8] Gustafsson T. y Waller K. "Dynamic modeling and control invariant control of pH". Chemical Engineering Science. Vol. 38, N13, 1983. pp. 389-398
- [9] Wright R. and Kravaris C. "Nonlinear control of pH processes using strong acid equivalent " Ind. Eng. Chemical Res. vol. 30, pp. 1561-1572, 1991.
- [10] Pajunen G.A. "Identification of a pH process represented by a nonlinear Wiener model". IFAC Workshop on Adaptive System in Control and Signal Processing, 1983. pp. 91-95
- [11] L. A. Zadeh. From circuit theory to system theory. In Proc. IRE 50, 1962. pages 856–865
- [12] R J. Carroll and D. Ruppert. Transformation and Weighting in Regression. Chapman and Hall, New York, 1988.
- [13] P McCullagh and J. A. Nelder. Generalized Linear Models. Chapman and Hall, New York, 1989.
- [14] Richard Goering, "Matlab edges closer to electronic design automation world," EE Times, 10/04/2004