



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Identificación y Diseño del Controlador para una Planta de  
Regulación de Presión”

**TESINA DE SEMINARIO**

Previo a la obtención del Título de:

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

Presentada por:

Carlos David Rodríguez Gallegos

Luis Alberto Rojas Flores

GUAYAQUIL - ECUADOR  
AÑO: 2011

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestro director de tesina el Msc. César Martín por el apoyo que nos dio en la misma y por alentarnos a hacerla lo mejor posible.

Al Msc. Holger Cevallos por permitirnos usar la Planta de Presión del Laboratorio de Instrumentación Industrial.

A todas aquellas personas que de una u otra forma nos ayudaron con ideas para realizar esta tesina.

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios por haberme dado la vida y la voluntad para esforzarme día a día y a mi familia por haberme motivado siempre a estudiar y por apoyarme en todo lo que me proponía.

Carlos David Rodríguez

Dedico este trabajo a Dios, que es siempre mi apoyo y fortaleza. A mis padres y hermanas, que me han apoyado y guiado siempre. Y a todas aquellas personas que supieron estar en el momento adecuado dando palabras de aliento. A todos, mi eterna gratitud.

Luis Alberto Rojas

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**Msc. César Martín**

PROFESOR DEL SEMINARIO

---

**Msc. Dennys Cortez**

PROFESOR DELEGADO

DEL DECANO

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

.....  
Carlos David Rodríguez G.

.....  
Luis Alberto Rojas F.

## RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el análisis, identificación y diseño de un controlador para una Planta de Presión.

El análisis es un proceso que debe hacerse en primer lugar pues debemos conocer las características de la planta con la que estamos tratando, ya que permitirá realizar una identificación más aproximada a lo real, dándonos confianza para finalmente diseñar un buen controlador que se adapte al sistema.

En el primer capítulo se investigó la reseña histórica de este proceso, así como también los primeros controladores para este tipo de planta, la historia y concepto del proceso de la identificación de sistemas y se analizó las aplicaciones que se dan actualmente al control de presión, es decir, se investigó las generalidades del tema.

En el segundo capítulo se trató los conceptos de los diversos tipos de presión, además de su representación matemática, se detalló las características de los diversos equipos usados como por ejemplo los que constituyen a la planta de presión, también se analizó los diversos tipos de controladores y la identificación paramétrica. En este capítulo se dio el fundamento teórico que aplicaremos en los capítulos posteriores.

En el tercer capítulo se mostró como realizar la comunicación entre la planta con la computadora, teniendo de por medio al PLC, posteriormente se realizó el análisis no paramétrico para encontrar una señal de entrada con la cual podamos obtener las características del proceso.

En el cuarto capítulo se realizó el análisis paramétrico con el cual se buscó representar matemáticamente el comportamiento de la planta mediante MatLab y LabView, realizando un cuadro comparativo entre ambos programas, luego se seleccionó el mejor modelo de la Planta de Regulación de Presión.

En el último capítulo se analizó la función de transferencia seleccionada para poder diseñarle un controlador basándonos en ciertos criterios entre los que tenemos: el sobre nivel porcentual, el tiempo de estabilización y el error de estado estable de la señal. Se realizó una comparación del efecto del controlador en la vida real con respecto a una simulación.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>II</b>
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
1.1 PRESIÓN, PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	1
1.1.1 EL PRIMER CONTROL DE PRESIÓN .....	2
1.1.2 APLICACIONES DEL CONTROL DE PRESIÓN.....	4
1.2 CONCEPTO DE SISTEMA .....	6
1.3 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	7
1.3.1 HISTORIA.....	7
1.3.2 CONCEPTO.....	8
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>10</b>
2.1 CONCEPTOS DE PRESIÓN .....	10
2.1.1 TIPOS DE PRESIÓN.....	11
2.1.2 RELACIÓN DE PRESIÓN CON EL VOLUMEN Y LA TEMPERATURA EN LOS CUERPOS GASEOSOS.....	17
2.2 PLANTA DE REGULACIÓN DE PRESIÓN .....	20
2.2.1 ELEMENTOS FÍSICOS DE LA PLANTA RT450.03 .....	21
2.2.2 SOFTWARES .....	26
2.3 SEÑALES DE ENTRADA .....	27
2.4 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA .....	28



2.5 ANÁLISIS DE CONTROLADORES CON RETROALIMENTACIÓN ..	30
2.5.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL (P).....	31
2.5.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL (PI).....	32
2.5.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) .....	33
2.5.4 CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO (PD) .....	33
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>34</b>
3.1 PROGRAMACIÓN DEL PLC .....	34
3.1.1 TOPOLOGÍA DEL PLC.....	34
3.1.2 EDITOR DE POU (UNIDAD DE ORGANIZACIÓN DE PROGRAMA) .....	36
3.2 CONFIGURACIÓN DEL OPC SERVIDOR .....	38
3.3 CONFIGURACIÓN DEL OPC CLIENTE .....	39
3.3.1 ELEMENTOS DEL OPC CLIENTE .....	39
3.4 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO .....	43
3.5 ANÁLISIS DE LA PLANTA.....	47
3.5.1 CONSTANTE DE TIEMPO ( $T_{ao}$ ).....	48
3.5.2 GANANCIA ÚLTIMA ( $K_u$ ) .....	48
3.5.3 TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN ( $T_s$ ).....	49
3.6 DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA .....	49
3.6.1 PARÁMETROS DE LAS SEÑALES DE ENTRADA .....	52
3.6.1.1 SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS) .....	52
3.6.1.2 SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS) Y SEÑAL MULTI-SINUSOIDAL .....	52
3.6.2 CONSIDERACIONES PARA SELECCIÓN DE SEÑAL .....	53
3.6.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	55
3.6.3.1 SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS) .....	55
3.6.3.2 SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS).....	55
3.6.3.3 MULTI-SINUSOIDAL .....	56
3.7 ANÁLISIS DE LA SEÑAL ESCOGIDA .....	57
3.7.1 CORRELACIÓN DE LA SEÑAL.....	57
3.7.1.1 AUTO-CORRELACIÓN DE LA ENTRADA.....	61
3.7.1.2 AUTO-CORRELACIÓN DE LA SALIDA .....	61
3.7.1.3 ESTIMADA DE LA RESPUESTA IMPULSO.....	62

3.7.1.4	CORRELACIÓN CRUZADA .....	63
3.7.2	RESPUESTA AL ESCALÓN.....	64
<b>CAPITULO IV</b>	.....	<b>69</b>
4.1	TRABAJO CON LA SEÑAL DE ENTRADA .....	69
4.1.1	DIVISIÓN DE LAS SEÑALES.....	70
4.2	CRITERIOS EMPLEADOS .....	72
4.3	MODELO ARX.....	75
4.4	MODELO ARMAX .....	81
4.5	MODELO FIR .....	85
4.6	MODELO BOX-JENKINS.....	90
4.7	OUTPUT ERROR.....	95
4.8	ELECCIÓN DEL MODELO MÁS CONVENIENTE .....	98
4.8.1	COMPROBACIÓN DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1 .....	99
4.8.2	RESPUESTA AL ESCALÓN DEL BJ:2,2,3,2,1 .....	100
4.8.3	COEFICIENTES DEL MODELOBJ:2,2,3,2,1.....	101
4.9	IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE LABVIEW .....	101
4.9.1	CONDICIONES DE LA IDENTIFICACIÓN .....	102
4.9.2	DIAGRAMA DE BLOQUES. ....	103
4.9.2.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL DIAGRAMA DE BLOQUES.....	104
4.9.3	PANEL FRONTAL.....	108
4.10	COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES REALIZADAS EN MATLAB Y LABVIEW .....	110
4.11	MODELO DE LA PLANTA (BJ:2,2,3,2,1) .....	111
<b>CAPITULO V</b>	.....	<b>112</b>
5.1	ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	112
5.2	CRITERIOS DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	114
5.3	PASOS PARA OBTENER EL CONTROLADOR .....	115
5.4	DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CONTROLADOR .....	120
5.5	SIMULACIÓN .....	122
5.6	RESULTADOS REALES.....	124

5.7 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR.....	126
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>134</b>

## ABREVIATURAS

<b>P:</b>	Presión generada.
<b>F:</b>	Fuerza aplicada sobre la superficie.
<b>A:</b>	Área de contacto.
<b>dF:</b>	Fuerza diferencial.
<b>dA:</b>	Área diferencial de contacto.
<b>n:</b>	Vector normal al “da” unitario.
<b>q:</b>	Presión dinámica en pascales .
<b>ρ:</b>	Densidad del fluido en kg/m <sup>3</sup> .
<b>v:</b>	Velocidad del fluido en m/s.
<b>g:</b>	Gravedad.
<b>h:</b>	Profundidad.
<b>R:</b>	Constante universal de los gases.
<b>Temp:</b>	Temperatura del gas.
<b>V:</b>	Volumen del gas
<b>Vdc:</b>	Voltaje continuo.
<b>Vac:</b>	Voltaje alterno.
<b>mA:</b>	Corriente en mili-amperios.
<b>PLC:</b>	Controlador lógico programable.
<b>In.:</b>	Corriente nominal.
<b>Hz:</b>	Frecuencia en hercios.
<b>RBS:</b>	Secuencia Binaria Aleatoria.
<b>PRBS:</b>	Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria.
<b>Tao:</b>	Constante de tiempo.
<b>y(t):</b>	Señal de salida de la planta.
<b>u(t-nk):</b>	Valor de entrada de la planta cada “n” períodos anteriores.

<b>r(t):</b>	Ruido presente.
<b>y(z):</b>	Señal de salida discreta.
<b>u(z):</b>	Señal de entrada discreta.
<b>v(z):</b>	Ruido discreto presente en la planta.
<b>DCSs:</b>	Sistema de control distribuido.
<b>m(t):</b>	Salida del controlador.
<b>K<sub>c</sub>:</b>	Ganancia del controlador.
<b><math>\bar{m}</math>:</b>	Tendencia.
<b>e(t):</b>	Error entre la variable controlada y el punto de ajuste.
<b><math>\tau_1</math>:</b>	Constante de tiempo integral.
<b><math>\tau_D</math>:</b>	Constante de tiempo derivativo.
<b>P:</b>	Controlador proporcional.
<b>PI:</b>	Controlador proporcional integral.
<b>PID:</b>	Controlador proporcional integral derivativo.
<b>PD:</b>	Controlador proporcional derivativo.
<b>POU:</b>	Unidad de organización de programa.
<b>fs:</b>	Frecuencia de Muestreo
<b>fo:</b>	Frecuencia de la componente más alta de la señal.
<b>wh:</b>	Frecuencia en alta.
<b>wb:</b>	Ancho de Banda.
<b>T<sub>m</sub>:</b>	Tiempo de muestreo
<b>T<sub>s</sub>:</b>	Tiempo de estabilización.
<b><math>T_{dom}^{Lo}</math>:</b>	Constante de tiempo mínima estimada.
<b><math>T_{dom}^{Hi}</math>:</b>	Constante de tiempo máxima estimada.
<b>T:</b>	Período.
<b>W:</b>	Rango de frecuencia.
<b><math>\gamma_{uy(n)}</math>:</b>	Coefficiente de correlación
<b><math>\sigma_u^2</math>:</b>	Varianza de la señal de entrada pre-blanqueada.
<b>G:</b>	Función de transferencia de la planta de presión.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Válvula de sobrepresión en reposo. ....	3
<b>Figura 1.2</b> Válvula de sobrepresión activada. ....	3
<b>Figura 1.3</b> Sistema Dinámico. ....	6
<b>Figura 2.1</b> Presión Crítica. ....	11
<b>Figura 2.2</b> Presión atmosférica versus altitud. ....	12
<b>Figura 2.3</b> Manómetro en escala de kPa y psi. ....	13
<b>Figura 2.4</b> Representación de Tipos de Presión. ....	13
<b>Figura 2.5</b> Diferencia entre profundidad y altura. ....	15
<b>Figura 2.6</b> Principio de Bernoulli. ....	16
<b>Figura 2.7</b> Relación presión-volumen. ....	17
<b>Figura 2.8</b> Relación presión-temperatura. ....	18
<b>Figura 2.9</b> Planta Regulación de Presión. ....	20
<b>Figura 2.10</b> Unidad de mantenimiento. ....	21
<b>Figura 2.11</b> Depósitos de presión. ....	22
<b>Figura 2.12</b> Válvula electro-neumática. ....	22
<b>Figura 2.13</b> Sensor de presión. ....	23
<b>Figura 2.14</b> PLC. ....	23
<b>Figura 2.15</b> Disyuntor electrónico. ....	24
<b>Figura 2.16</b> Fuente de voltaje de 24 Vdc. ....	25
<b>Figura 2.17</b> Compresor de aire. ....	25
<b>Figura 2.18</b> Diagrama de bloques de la identificación paramétrica. ....	29
<b>Figura 3.1</b> Módulos del PLC. ....	35
<b>Figura 3.2</b> Configuración de la entrada analógica. ....	35
<b>Figura 3.3</b> Configuración de la salida analógica. ....	36
<b>Figura 3.4</b> Editor de POU. ....	37

<b>Figura 3.5</b> Configuración del OPC Servidor. ....	38
<b>Figura 3.6</b> OPC Cliente. ....	39
<b>Figura 3.7</b> Configuración del OPC .....	39
<b>Figura 3.8</b> OPC Lectura.....	40
<b>Figura 3.9</b> OPC Escritura. ....	41
<b>Figura 3.10</b> Índice de transición. ....	42
<b>Figura 3.11</b> Al espacio de trabajo. ....	42
<b>Figura 3.12</b> Visor.....	43
<b>Figura 3.13</b> Señal de entrada.....	43
<b>Figura 3.14</b> Señal sinusoidal muestreada a 4Hz y 20Hz .....	44
<b>Figura 3.15</b> Gráfica de Bode de la señal sinusoidal.....	46
<b>Figura 3.16</b> Respuesta al escalón normalizada. ....	47
<b>Figura 3.17</b> Ventana principal del “Input Design Gui”. ....	50
<b>Figura 3.18</b> Ambiente de trabajo del “Input Design Gui” .....	51
<b>Figura 3.19</b> Correlación de las señales. ....	60
<b>Figura 3.20</b> Auto-correlación de la entrada. ....	61
<b>Figura 3.21</b> Auto-correlación de la salida. ....	61
<b>Figura 3.22</b> Estimada de la respuesta impulso. ....	62
<b>Figura 3.23</b> Ampliación de la estimada de la respuesta impulso.....	63
<b>Figura 3.24</b> Correlación cruzada.....	63
<b>Figura 3.25</b> Ident.....	64
<b>Figura 3.26</b> Señal de salida (y1) y de entrada (u1). ....	65
<b>Figura 3.27</b> Señal de salida y entrada limitadas.....	65
<b>Figura 3.28</b> Señal de salida y entrada sin valor promedio. ....	66
<b>Figura 3.29</b> Señal de salida y entrada sin tendencia. ....	66
<b>Figura 3.30</b> Respuesta al escalón de la señal PRBS 4. ....	67
<b>Figura 4.1</b> Ident de PRBS 4. ....	70
<b>Figura 4.2</b> División de las señales. ....	71
<b>Figura 4.3</b> Señal de salida y entrada (70% y 30%). ....	72
<b>Figura 4.4</b> Señal de salida y entrada del 30%. ....	73

<b>Figura 4.5</b> Intervalo de confianza .....	74
<b>Figura 4.6</b> Respuesta escalón de la planta de presión. ....	75
<b>Figura 4.7</b> Ventana de parámetros del ARX.....	76
<b>Figura 4.8</b> Coeficientes sugeridos del ARX.....	77
<b>Figura 4.9</b> Coeficientes estimados del ARX. ....	78
<b>Figura 4.10</b> Análisis residual de la señal ARX:3,1,0. ....	80
<b>Figura 4.11</b> Ventana de parámetros del ARMAX. ....	81
<b>Figura 4.12</b> Coeficientes estimados del ARMAX. ....	82
<b>Figura 4.13</b> Modelo de salida del ARMAX:3,2,3,1. ....	84
<b>Figura 4.14</b> Análisis residual del ARMAX:3,2,3,1.....	85
<b>Figura 4.15</b> Ventana de parámetros del FIR. ....	86
<b>Figura 4.16</b> Coeficientes sugeridos del FIR.....	87
<b>Figura 4.17</b> Coeficientes estimados del FIR.....	88
<b>Figura 4.18</b> Ventana de parámetros del Box-Jenkins. ....	91
<b>Figura 4.19</b> Coeficientes estimados del Box-Jenkins. ....	92
<b>Figura 4.20</b> Modelo de salida del BJ:2,2,3,2,1 .....	94
<b>Figura 4.21</b> Análisis residual del BJ:2,2,3,2,1 .....	94
<b>Figura 4.22</b> Ventana de parámetros del Box-Jenkins. ....	95
<b>Figura 4.23</b> Coeficientes estimados del Box-Jenkins. ....	96
<b>Figura 4.24</b> Respuesta al escalón del BJ:2,2,3,2,1.....	100
<b>Figura 4.25</b> Diagrama de bloques.....	103
<b>Figura 4.26</b> Nuevo reporte. ....	104
<b>Figura 4.27</b> Ruta. ....	104
<b>Figura 4.28</b> Hoja de trabajo de Excel.....	104
<b>Figura 4.29</b> Datos de Excel. ....	105
<b>Figura 4.30</b> Disposición del reporte. ....	105
<b>Figura 4.31</b> Manejador de error. ....	105
<b>Figura 4.32</b> Lazo repetidor. ....	105
<b>Figura 4.33</b> Índice del arreglo.....	106
<b>Figura 4.34</b> Construye arreglo.....	106



<b>Figura 4.35</b> Mayor o igual.....	106
<b>Figura 4.36</b> Graficador de señales.....	107
<b>Figura 4.37</b> Estimador del modelo.....	107
<b>Figura 4.38</b> Convertidor de discreto a continuo.....	107
<b>Figura 4.39</b> Representación del modelo.....	108
<b>Figura 4.40</b> Panel frontal.....	109
<b>Figura 5.1</b> Respuesta al escalón del modelo en lazo abierto (Sisotool). ....	113
<b>Figura 5.2</b> Diagrama de bloques de Sisotool.....	114
<b>Figura 5.3</b> Herramientas para la Estimación y Control (Sisotool).....	115
<b>Figura 5.4</b> Ventana de Diseño de Sisotool (a).....	116
<b>Figura 5.5</b> Ventana de Diseño de Sisotool (b).....	117
<b>Figura 5.6</b> Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado (a).....	117
<b>Figura 5.7</b> Herramientas para la Estimación y Control (Filtro).....	118
<b>Figura 5.8</b> Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado (b).....	119
<b>Figura 5.9</b> Diagrama de Bloque del Sistema de control de la planta de regulación de Presión.....	120
<b>Figura 5.10</b> Diagrama de Bloque del Controlador de la planta de regulación de Presión.....	121
<b>Figura 5.11</b> Diagrama de Bloque de la Simulación del modelo.....	122
<b>Figura 5.12</b> Diagrama de Bloque del Modelo hallado en el capítulo 4.11... ..	123
<b>Figura 5.13</b> Visor de la señal de salida con su referencia y la señal que sale del controlador.....	123
<b>Figura 5.14</b> Visor de la señal de salida con su referencia (Real). ....	124
<b>Figura 5.15</b> Visor de la señal que sale del controlador (Real).....	125
<b>Figura 5.16</b> Visor de la señal de salida con su referencia ampliada (Real).125	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Módulos del PLC.....	34
<b>Tabla 3.2</b> Variables del PLC.....	36
<b>Tabla 3.3</b> Relación entre presión, corriente y bits.....	40
<b>Tabla 3.4</b> Relación entre porcentaje de abertura, corriente y bits.....	41
<b>Tabla 3.5</b> Parámetros ingresados a cada señal de entrada. ....	54
<b>Tabla 3.6</b> Resultados de cada señal. ....	54
<b>Tabla 4.1</b> Procesos realizados en el Ident. ....	70
<b>Tabla 4.2</b> Resultados de las señales ARX.....	79
<b>Tabla 4.3</b> Resultados de las señales ARMAX.....	83
<b>Tabla 4.4</b> Resultados de las señales FIR. ....	89
<b>Tabla 4.5</b> Resultados de las señales Box-Jenkins. ....	93
<b>Tabla 4.6</b> Resultados de las señales Output Error.....	97
<b>Tabla 4.7</b> Modelos más convenientes.....	99
<b>Tabla 4.8</b> Respuesta al escalón de la BJ:2,2,3,2,1. ....	100
<b>Tabla 4.9</b> Comparación de señales en MatLab y LabView. ....	110

## INTRODUCCION

Este trabajo consiste en la identificación de un sistema de regulación presión, el cual se realiza bajo lineamientos específicos junto con un análisis exhaustivo para alcanzar una representación igual o muy aproximada de la función de transferencia del proceso real.

El objetivo de este proyecto es poder identificar los parámetros de una planta de presión para posteriormente diseñarle un respectivo controlador. Este diseño se lo hará teniendo en cuenta los conceptos de control automático, generando así un controlador sencillo y adecuado para el manejo del sistema.

El control de presión en cualquier proceso industrial es realmente importante, pues ya sea que se esté controlando la presión de algún fluido como líquido, sólido o gaseoso, existe una cantidad de presión máxima de operación y de seguridad, la cual varía de acuerdo a las características específicas de la planta. El no tener un buen sistema de control en plantas de este tipo puede ser peligroso, no solo para el producto con el que se esté trabajando sino para el equipo o personal que trabaje cercano a esta área. Las presiones excesivas son las que pueden provocar este tipo de consecuencias.

Es importante entonces, tener claro el funcionamiento de cualquier proceso para así realizar el control que se requiera de una manera más precisa. Para esto es necesario la identificación de la planta, la cual nos permitirá observar cómo respondería la planta a diferentes tipos de entradas y saber matemáticamente cuáles son sus características.

La metodología consiste primero en diseñar una señal de entrada apropiada para nuestra planta, es decir, una señal que tenga una frecuencia y amplitud con la que se logre captar correctamente el comportamiento del sistema sin exceder sus limitaciones, como por ejemplo el tiempo de operación y valores nominales.

Una vez planteada la señal de entrada se la envía a la planta para hallar la función de transferencia, comprobando posteriormente que la misma tenga un comportamiento muy parecido al proceso real.

Finalmente se procede a diseñar un controlador que se acople a las especificaciones del sistema. Es necesario analizar cada etapa a fin de conseguir los mejores resultados.

# CAPÍTULO I

## ***1.1 PRESIÓN, PERSPECTIVA HISTÓRICA***

La presión del aire es un parámetro que fue descubierto a raíz de un misterio, pues hace muchos años en las minas cuando se quería extraer el agua de las mismas, se daba un problema que no podían resolver, el agua no podía ser bombeada a más de 32 pies de altura; se dieron muchas hipótesis para tratar de explicar este fenómeno como por ejemplo la propia imperfección de las bombas o que a esa altura el fluido se filtraba por estas, sin haber considerado otras variables como la presión que ejercía el aire.

El personaje que dio con una solución fue el matemático Evangelis Torricelli que en 1643 aseguró que el peso con que el aire empujaba al estanque de agua en los pozos de excavación tenía una relación con la altura a la cual esta se levantaría.

Para probar su hipótesis, Torricelli junto con su asistente Vincenzo Viviani llevaron a cabo un experimento; Viviani tomó un tubo de vidrio de unos 6 pies de altura el cual lo llenó con mercurio tapando con su dedo la base inferior del tubo, luego girándolo, lo colocó en una olla y midió el peso del mercurio que permaneció en el tubo; pues parte del mismo se dispersaba en la olla generando así un vacío en lo alto del tubo.

Torricelli repitió este experimento en diversas temporadas y observó que en días despejados la columna de mercurio estaba relativamente llena mientras que en días de tormenta esta perdía mucha de su altura por lo que intuyó

que la caída de mercurio de alguna manera estaba conectado con la atmósfera, con el clima.

Finalmente Torricelli concluyó que el peso del mercurio en el tubo era igual al peso del aire que empujaba al mercurio que se había regado en la olla, generando así un equilibrio de fuerzas con lo cual el sistema se estabilizaba (a veces con el tubo más o menos lleno de mercurio) y añadió que si alguno de ambos pesos cambiaban entonces el porcentaje de llenado del tubo cambiaría también para que así se vuelva a dar un equilibrio en otro punto.

Por lo cual gracias al aporte de Torricelli queda resuelto el misterio mencionado anteriormente, la razón por la cual las bombas de agua no podían seguir bombeando a más de 32 pies era porque aún con la combinación de la potencia de la misma junto con la de la presión atmosférica no podían igualar a la presión que el agua ejercía a esa altura, por la que no podían seguirla levantando.

### **1.1.1 EL PRIMER CONTROL DE PRESIÓN**

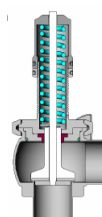
En el tiempo de la revolución industrial se comienza a dar la producción en masa de los productos con la ayuda de las máquinas motrices, uno de estos fue la máquina de vapor, el cual es un motor de combustión externa que genera energía a través del vapor de agua, con lo cual podía mover diversas máquinas como las bombas, las locomotoras, los motores marinos entre otras.

Pese a la gran aportación de las máquinas de vapor, su uso era un tanto problemático pues no podían ser reguladas directamente de una buena

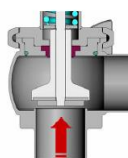
manera por los operadores, por lo que se pensó en que los mismos debían ser controlados automáticamente dando paso a la búsqueda de un sistema de control automático que regule la presión de vapor que movía a la máquina.

Fue cuando en 1674 el físico francés Dennis Papin hace un avance hacia una solución percatándose que la temperatura a la cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso dependía de la presión a la cual estaba sometida, así a una mayor presión, el agua cambiaba su estado con mayor temperatura, principio que le sirvió para descubrir la olla de presión, la cual era herméticamente cerrada y que contaba con una válvula de sobrepresión.

Finalmente en 1707 Papin usó la válvula de sobrepresión para que regule la presión de una máquina de vapor, siendo todo un éxito, este dispositivo se convirtió en una añadidura típica para toda máquina de vapor.



**Figura 1.1** Válvula de sobrepresión en reposo.



**Figura 1.2** Válvula de sobrepresión activada.

En la figura 1.1 se observa la válvula de sobrepresión cuando aún no está activada, pero al recibir una presión muy grande, el pistón de la misma se levanta permitiendo así que la presión disminuya.

Cabe recalcar que en nuestros tiempos con los avances de los sistemas de control, estas válvulas han sido desplazadas a ser elementos protectores de bombas, y otros equipos contra aumentos considerables de presión.

### **1.1.2 APLICACIONES DEL CONTROL DE PRESIÓN**

Una vez que la presión fue descubierta se la ha tratado siempre de usar a nuestra conveniencia mediante el control de la misma, según el campo de aplicación podemos pasar por métodos tan simples como un regulador de aire o tan complejos como las cabinas de presurización.

El control de la presión del aire es usado tanto en la industria (ej.: poner en marcha las herramientas neumáticas), como en la medicina (ej.: cámaras hiperbáricas), como en la aviación (ej.: cabinas presurizadas seguras para los pilotos), entre otras.

Quizás el método más sencillo para lograr el control de presión es a través de las válvulas de aire, la cual permite el paso de aire (en una sola dirección) dentro o fuera de un cuerpo; esta es una experiencia por la que todos hemos pasado, como por ejemplo cuando se nos poncha una llanta y la inflamos en la gasolinera, a través de una válvula de presión, en el cual el control viene dado por nosotros, ya que si queremos inflar más o menos la llanta debemos permitir que la válvula esté mayor o menor tiempo abierta respectivamente.

En la gran mayoría de los casos, cuando se usa un equipo neumático es necesario tener un regulador de aire para que controle la cantidad exacta de presión que va a ser entregada a los equipos, la ventaja de esto es que podremos proteger a todos nuestros instrumentos neumáticas mandándoles



un valor de presión que no sea ni muy alto para no dañarlos ni muy bajo para que funcionen correctamente, aunque para lograr esto es necesario tener un compresor de aire con la debida potencia.

Otra aplicación en el campo industrial consiste en el manejo del sistema de presión de aire, con el cual se puede generar una atmósfera alrededor del producto de alta presión, llamado la cámara de presurización o puede remover toda la presión creando lo que se conoce como la cámara de vacío.

Gracias a los sistemas de control de presión se puede generar un vacío y hasta presión negativa, los cuales han encontrado aplicaciones como por ejemplo en los campos de la seguridad:

El vacío de presión es usado normalmente en instalaciones médicas donde químicos, que son muy susceptibles a las variaciones de presión, son empleados.

La presión negativa se usa en casos de emergencia, cuando por ejemplo se ha liberado en un laboratorio algún gas peligroso, y es necesario drenarlo para evitar la propagación.

La industria de comercialización de aeronaves aplica también el control de presión para generar cabinas confortables tanto para pasajeros como para la tripulación, es así que cuando volamos a gran altura se genera una cabina artificial con una presión que es mayor a la que está fuera del avión, con lo cual a medida que el avión se eleva o desciende el sistema de presión se regula automáticamente para que la persona siempre sienta la misma presión, obviamente una que sea cómoda para el mismo.

## 1.2 CONCEPTO DE SISTEMA

Sistema es todo proceso que interactúa con diferentes tipos de variables las cuales generan señales. Las señales que son realmente de interés para el usuario son la señal de salida del sistema y la señal de entrada (que puede ser escogida libremente para que genere una salida deseada). Se dice que un sistema es dinámico cuando la respuesta del proceso demora un tiempo en actuar con respecto a la señal de entrada, es decir su respuesta no es inmediata.

Existen otros tipos de entradas que no pueden ser manipuladas por el usuario, sin embargo se conoce de su existencia, como es la señal de perturbación que es una señal externa al sistema y que no es producida por el usuario, un ejemplo de esta podría ser el ruido que afecta al proceso.

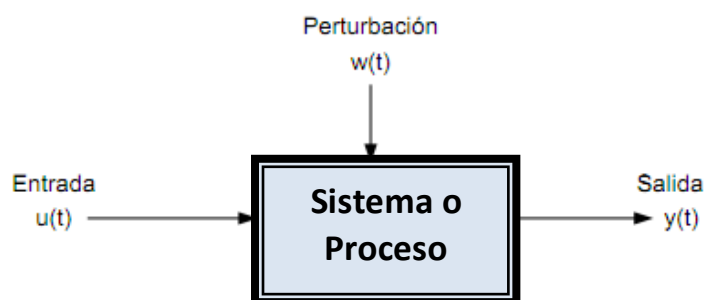


Figura 1.3 Sistema Dinámico.

## **1.3 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

### **1.3.1 HISTORIA**

La identificación es la exteorización del deseo del hombre por tratar de descubrir y conocer todo lo que lo rodea; para llegar a este objetivo el mismo ha descubierto diversos métodos, unos tan básicos como el dibujo y los gestos corporales (usados desde los orígenes de la persona) y otros tan avanzados como los sistemas de identificación de procesos digitales y analógicos.

El objetivo de poder reconocer un sistema, proceso o elemento consiste en usar este conocimiento para nuestro beneficio; así por ejemplo si nos remontamos a los tiempos de las cavernas, encontramos que uno de los problemas de las personas era el de conseguir alimento para la comunidad, por lo cual, estos reconocían a sus presas dibujándolas con los materiales que tenían a su alcance: una pared, barro, la hematita, la goethita, etc. (creándose al mismo tiempo lo que se conoce ahora como la pictografía) y una vez habiéndolas identificado podían planear estrategias futuras para tener una caza exitosa; solucionando así un problema después de la identificación del mismo.

### 1.3.2 CONCEPTO

Es el área de la teoría de control que estudia diferentes técnicas y métodos estadísticos para que mediante datos de entrada y salida de la planta se pueda obtener modelos matemáticos de sistemas dinámicos. La identificación se ha convertido en una herramienta fundamental para nosotros los ingenieros al momento de analizar sistemas en los cuales se necesita un análisis preciso, simulaciones y diseñar un controlador.

Para llevar a cabo una identificación se debe considerar:

- **Obtención de datos de entrada-salida:** Esto se logra primero escogiendo adecuadamente una señal de entrada que excite al sistema y logre así poder obtener las mejores características posibles. Estos datos deben almacenarse en cualquier tipo de programa que permita después realizársele un análisis.
- **Análisis a los datos registrados:** Se le realiza análisis estadísticos a la señal para poder tener constancia que se va a obtener una identificación correcta al momento de hacerla, también se puede corregir ciertos tipos de ruidos indeseados que entran en los datos y así facilitar y mejorar el proceso de identificación.
- **Elección de la estructura del modelo:** Es necesario seleccionar la estructura deseada para dicho modelo. Para hacer una buena elección de esta estructura debemos tener claro ciertas leyes físicas y mecánicas que determinan el modelo al cual se le realiza la identificación.
- **Obtención de los parámetros del modelo:** Se estima los parámetros de la estructura del modelo que mejor se ajuste a los datos obtenidos experimentalmente.

- **Validación:** Consiste en ver si el modelo obtenido satisface en porcentajes de exactitud para la posterior aplicación del proceso.

Si en el último paso se llega a la conclusión de que no satisface, se debe analizar si la señal de entrada escogida proporcionó la suficiente información dinámica del sistema y de no ser así, proceder de nuevo seleccionando otra señal de entrada. Puede ser también que la estructura escogida no sea la adecuada para describir la dinámica de ese sistema.

## CAPÍTULO II

### 2.1 CONCEPTOS DE PRESIÓN

La presión se puede describir como la relación que hay entre una fuerza con respecto al área de contacto donde es aplicada (la fuerza debe ser perpendicular al área); en los estudios de cuerpos sólidos la presión viene dada por la fórmula 2.1:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

**Donde:**

**P:** Presión generada.

**F:** Fuerza aplicada sobre la superficie.

**A:** Área de contacto.

Cabe recalcar que esta fórmula sólo se la puede usar cuando la fuerza “F” se aplica de manera uniforme sobre la superficie “A”, pues de no ser el caso habrá que aplicar la misma en forma diferencial, por lo que en cada punto la presión es:

$$P = \frac{dF}{dA} \cdot n \quad (2.2)$$

**Donde:**

**P:** Presión generada en dicho punto de análisis.

**dF:** Fuerza diferencial.

**dA:** Área diferencial de contacto.

**n:** vector normal al “dA” unitario.

La presión puede ser representada en términos de diversas unidades que están relacionadas y resumidas en los anexos.

### 2.1.1 TIPOS DE PRESIÓN

La presión tiene a su vez su propia clasificación, la cual se la usa según el campo de interés de estudio, por lo cual presentamos las diferentes definiciones:

**Presión crítica:** En los cuerpos líquidos se la considera como el valor de presión con el cual estos pasarían a su estado gaseoso. Esta presión crítica también depende de la temperatura como se muestra en la figura 2.1.

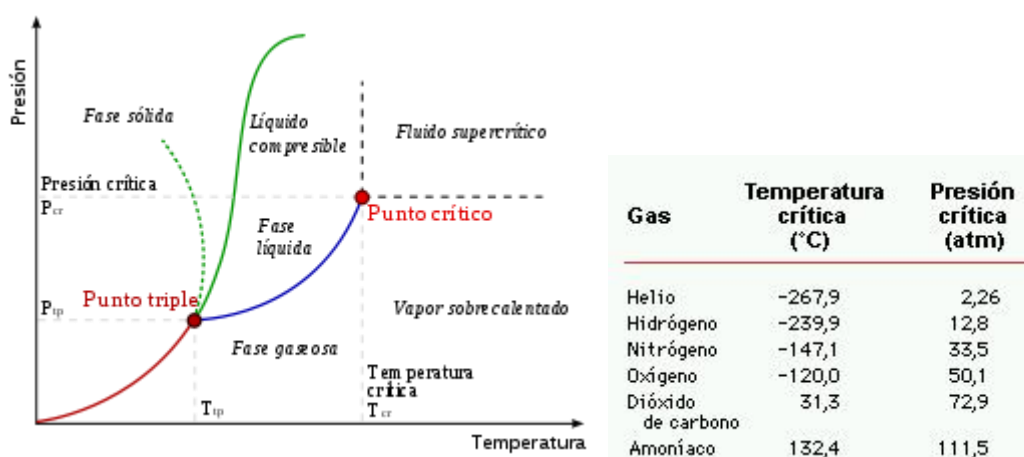


Figura 2.1 Presión Crítica.

**Presión Atmosférica:** Como su nombre lo indica, es la presión ejercida en cierto punto debido a la propia atmósfera, en los casos de la presión atmosférica terrestre, este valor dependerá de la altitud del punto de interés, pues estas dos son inversamente proporcionales, así por ejemplo, en Guayaquil hay una mayor presión atmosférica que en Quito. Esto se lo puede observar en la figura 2.2.

Es de ésta que surgió la unidad “atmósfera” para la presión, la cual es la presión atmosférica medida al nivel del mar.

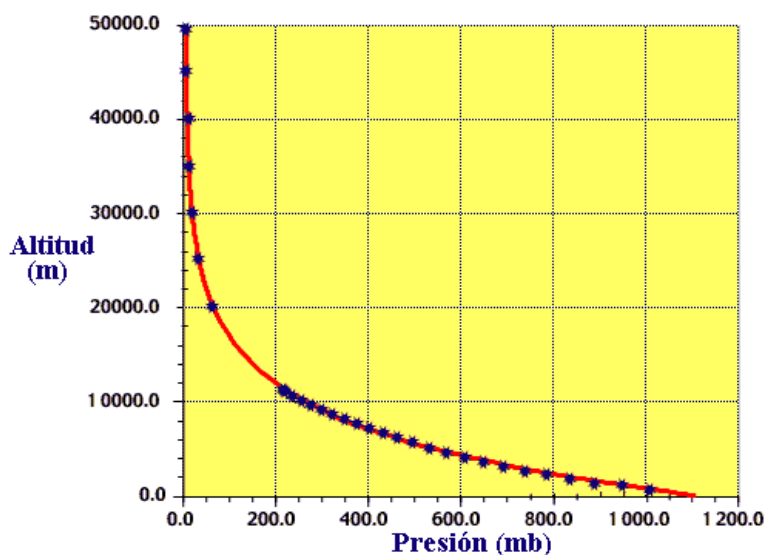


Figura 2.2 Presión atmosférica versus altitud.

**Presión Manométrica:** Presión que se mide con respecto a la presión atmosférica, es decir, es la presión total ejercida en un punto determinado sin tomar en cuenta la presión atmosférica; los equipos que miden la presión manométrica son llamados manómetros (figura 2.3).

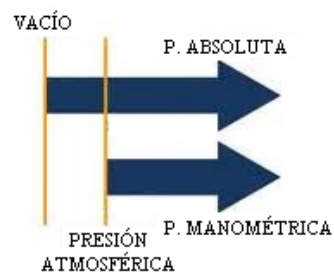




**Figura 2.3** Manómetro en escala de kPa y psi.

**Presión absoluta:** Presión total en un punto determinado con respecto al vacío de presión, por lo que se concluye que:

$$\text{Presión Absoluta} = \text{Presión Atmosférica} + \text{Presión Manométrica. (2.3)}$$



**Figura 2.4** Representación de Tipos de Presión.

**Presión Dinámica:** Presión adicional producida cuando se tiene un fluido en movimiento dado por el choque de partículas de la misma, con lo cual su fórmula es:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.4)$$

**Donde:**

**q:** presión dinámica en pascales .

**ρ:** densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>.

**v:** velocidad del fluido en m/s.

**Presión Estática:** Presión en un fluido que no es dada por el movimiento del mismo; si el fluido está en reposo la presión estática será igual a la presión absoluta.

**Presión Hidrostática:** Presión debida al peso del propio fluido, pues depende de la densidad del mismo, la profundidad y la gravedad sobre la cual se está ejerciendo dicha presión, con lo que tenemos que la presión que el fluido ejerce sobre es:

$$P = \rho g h \quad (2.5)$$

**Donde:**

**P:** Presión Hidrostática.

**ρ:** Densidad del fluido.

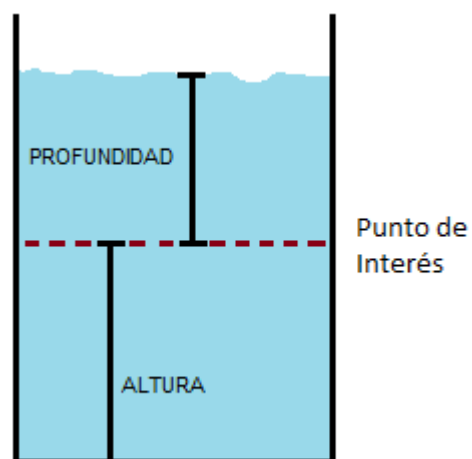
**g:** Gravedad.

**h:** Profundidad a la que se está calculando la presión.

**Nota:** Es común que exista una confusión entre lo que es la profundidad y la altura, pues estos dependen de la referencia con la que se está trabajando, por lo que se define:

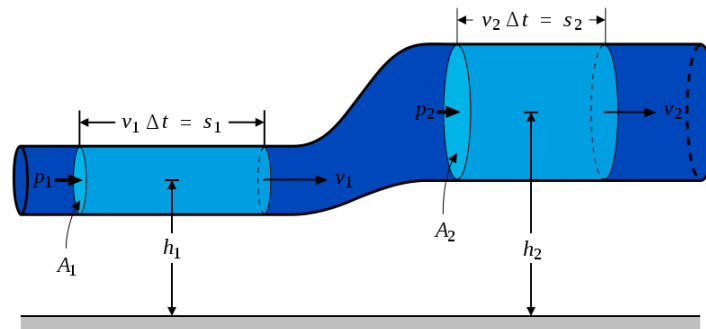
**Profundidad:** Distancia que hay desde la superficie hasta donde se encuentra el punto de interés.

**Altura:** Distancia entre el punto de interés y la base del fluido.



**Figura 2.5** Diferencia entre profundidad y altura.

El Físico Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica en 1738 describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. (Vea Figura 2.6).



**Figura 2.6** Principio de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli es:

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho g h = \text{constante} \quad (2.6)$$

**Donde:**

**V:** Velocidad del fluido en la sección que se considera.

**ρ:** Densidad del fluido.

**g:** Gravedad.

**h:** Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

**P:** Presión a lo largo de la línea de corriente.

## 2.1.2 RELACIÓN DE PRESIÓN CON EL VOLUMEN Y LA TEMPERATURA EN LOS CUERPOS GASEOSOS

Si bien es cierto que la presión es un factor que afecta al cuerpo sobre el que se está dando, el mismo podrá presentar cambios en su estructura, entiéndase estos como la temperatura y la presión.

Este concepto se lo puede entender con los siguientes ejemplos:

### Ejemplo1.- Relación presión-volumen:

El gas al tener la propiedad de que sus partículas son móviles, tiene un volumen variable por lo que si se lo encierra en un recipiente y sobre este ejercemos presión, logrando que la temperatura se mantenga constante, por la fórmula 2.1 deducimos que se está ejerciendo una fuerza sobre las partículas del mismo, por lo cual estas comenzarán a disminuir su área de dispersión juntándose, logrando que el volumen del gas disminuya.

Del párrafo anterior podemos concluir que si sobre un gas ejercemos una presión, a temperatura constante, el volumen del mismo disminuirá y que a mayor presión menor volumen, por lo que estas son inversamente proporcionales.

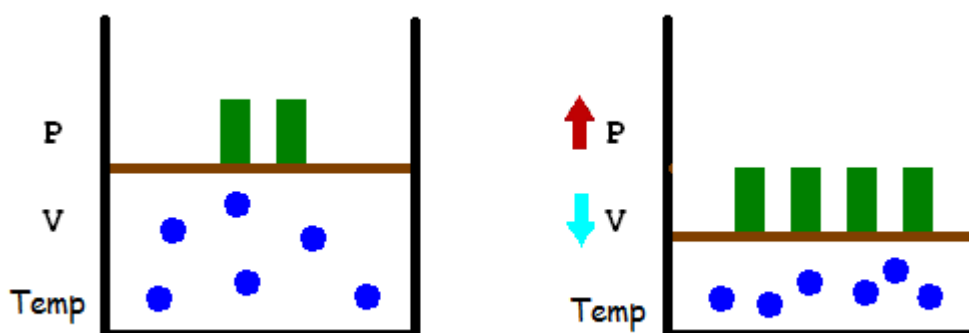


Figura 2.7 Relación presión-volumen.

### Ejemplo 2.- Relación presión-temperatura:

Si se tiene un gas sobre un cuerpo de volumen constante, en el cual aumentamos la temperatura de las partículas, estas tratarán de aumentar el volumen del gas pero al no poder porque el volumen del contenedor es fijo, habrá una fuerza que cada partícula ejerce sobre el contenedor y por la fórmula 2.1 volvemos a deducir que habrá una presión ejercida por estas partículas.

Del párrafo anterior podemos concluir que si sobre un gas aumentamos su temperatura, manteniendo su volumen constante, se dará un aumento de presión y que a mayor presión mayor temperatura, por lo que estas son directamente proporcionales.

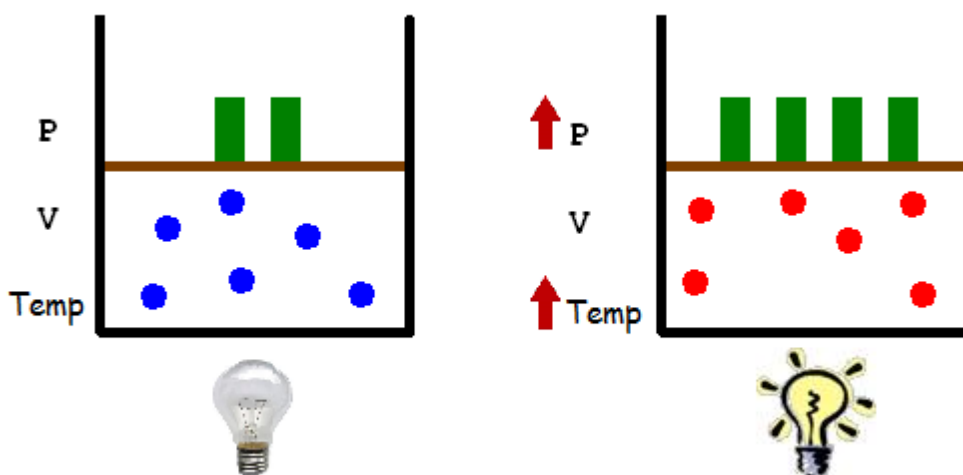


Figura 2.8 Relación presión-temperatura.

De estas dos relaciones se obtiene la “Ecuación general de los gases”, descubierta por Gay-Lussac:

$$P V = n R \cdot Temp \quad (2.7)$$

**Donde:**

**P:** Presión ejercida sobre el gas.

**V:** Volumen del gas.

**n:** Número de moles del gas.

**R:** Constante universal de los gases.

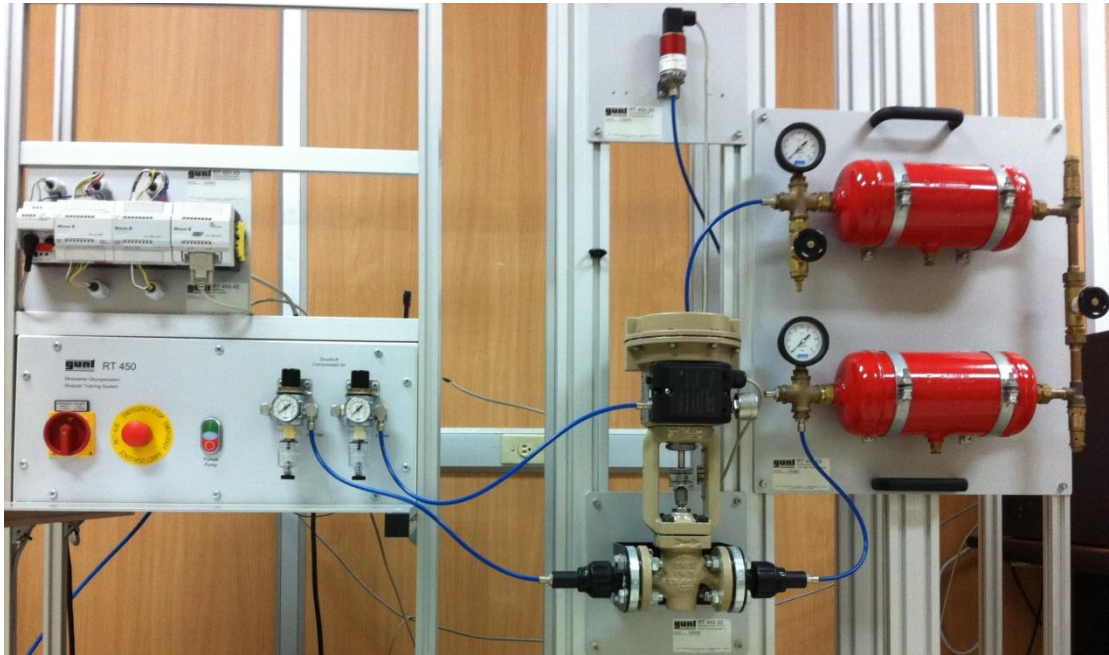
$$R = 0.08205746 \frac{\text{atm l}}{\text{mol K}} \quad (2.8)$$

**Temp:** Temperatura del gas.

Por lo que concluimos que al trabajar con cuerpos gaseosos, cambios en la presión pueden ocasionar también cambios en el volumen y en la temperatura del mismo.

## 2.2 PLANTA DE REGULACIÓN DE PRESIÓN

Contamos con una Planta de Regulación de Presión, la RT450.03, debidamente equipada para poder realizar nuestras pruebas:



**Figura 2.9** Planta Regulación de Presión.

- Diseñada para realizar experimentos de regulación de presión.
- El paso de aire en toda la planta se da a través de mangueras neumáticas con acoplamientos rápidos.
- Posee protecciones tanto de tipo neumáticas como eléctricas.
- Fácil ubicación de los elementos.
- Posee un interruptor On- OFF para prender y apagarla planta.
- Tiene un botón de emergencia que desactiva la alimentación eléctrica.



## 2.2.1 ELEMENTOS FÍSICOS DE LA PLANTA RT450.03

### Unidad de mantenimiento:



**Figura 2.10** Unidad de mantenimiento.

- Dispositivo empleado para fijar la presión de salida, purificar y lubricar el aire.
- Posee un manómetro con unidades de bares y psi.
- El rango de regulación va desde 0 a 10 bares.
- La purificación se da cuando pasa el aire con sustancias indeseadas como agua y caen a un depósito contenedor.
- Una gota de aceite cae cada cierto tiempo para que el aire al pasar por la misma se impregne con este, es importante para disminuir la fricción a través de los elementos neumáticos.
- Tiene dos puntos de conexión, el de entrada, conectado al compresor de aire y el de salida que es el aire que ha pasado por esta unidad y se dirige a la planta.

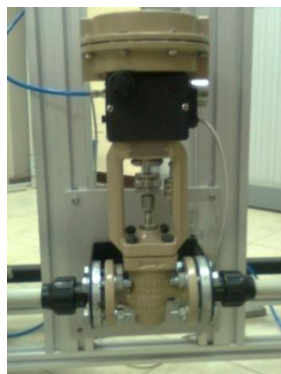
### Depósitos de presión:



**Figura 2.11** Depósitos de presión.

- Cilindros de acero conectados en serie.
- Incorporados con manómetros (0- 10 bares).
- Entre ambos hay una válvula de ventilación con la que se fija la facilidad que tiene el aire de pasar de un cilindro a otro.
- Poseen válvulas de sobrepresión (permiten la salida del aire del sistema cuando hay presión excesiva).
- Tiene una válvula de evacuación que es por donde el aire se libera al ambiente.

### Válvula Electro-Neumática:



**Figura 2.12** Válvula electro-neumática.

- Elemento actuador de la planta.
- La fuerza que acciona la válvula es neumática (presión nominal de 2.5 bares).
- Mediante señales de corriente (4 a 20 mA.) fija el porcentaje de abertura.
- Posee un indicador de la abertura de la misma.

### Sensor de Presión:



Figura 2.13 Sensor de presión.

- Elemento transductor pasivo.
- Principio de funcionamiento piezoeléctrico.
- Mide la presión relativa.
- Rango de alimentación: 11- 33Vdc.
- Salida de corriente de 4 a 20 mA.

### PLC:



Figura 2.14 PLC.

- Alimentación de 24 Vdc.
- Posee tres módulos: digital, analógico y de comunicación.
- El módulo digital está incorporado con 8 entradas y 6 salidas digitales que son relés.
- El módulo analógico cuenta con 4 entradas y 2 salidas analógicas.
- Posee un puerto de comunicación Profibus.

### Disyuntor electrónico:



Figura 2.15 Disyuntor electrónico.

- Protección eléctrica de toda la planta (junto con los fusibles).
- Se conecta a cargas de alimentación de 24 Vdc.
- La corriente nominal ( $I_n$ ) puede ser fijada en 3 ó 6 amperios.
- Cuando detecta sobre corriente (más de  $1.8 I_n$ ) disminuye el voltaje de salida, lo que puede generar que las cargas no operen adecuadamente.

### Fuente de voltaje de 24 Vdc.:



Figura 2.16 Fuente de voltaje de 24 Vdc.

- Es el alimentador de la planta.
- Su entrada es de 100 a 240 Vac. de con una frecuencia de 50 a 60 hz.
- La corriente de entrada es de 3.5 amperios.
- Genera un voltaje de +24 Vdc. y de -24 Vdc.

### Compresor de aire:



Figura 2.17 Compresor de aire.

- Principio de funcionamiento de paleta.
- Alimentación: 230 Vac. a 50 hz.

- Corriente nominal de 2.9 A.
- Internamente genera una presión de 15 bares.
- Tiene un led que indica cuando está en marcha.
- Cuenta con su propia unidad de mantenimiento.
- Posee dos manómetros, uno que indica el valor de presión dentro de sí y el segundo que muestra la presión que va al sistema.
- Representa nuestra fuente de alimentación neumática.

### 2.2.2 SOFTWARES

Para poder llevar a cabo nuestros experimentos nos valdremos de diversos programas cuyo objetivo principal es el de lograr la comunicación de la planta además de tomar y analizar los datos de la misma, entre estos tenemos:

- MatLab.
- LabView.
- Moeller.

**MatLab:** (Matrix Laboratory) es un software que representa sistemas a través de matrices, muy usado especialmente en las universidades con el cual se pueden analizar datos, tener representaciones matemáticas y gráficas de las mismas, además que se puede comunicar con otros programas y tarjetas de comunicación de datos.

**LabView:** Usa el lenguaje G. (Graphic) puesto que la programación a través del mismo se da mediante bloques, lo cual lo convierte en un programa

amigable para el usuario; también puede comunicarse con otros programas y tarjetas de comunicación de datos.

**Moeller:** Configurador del PLC, en el cual se puede establecer su topología, las señales de entrada y salida, además de la forma de comunicación.

## **2.3 SEÑALES DE ENTRADA**

La señal de entrada con la cual vamos a identificar la planta debe tener características básicas:

- **No forzar a los actuadores:** Todo actuador tiene un rango de trabajo que hay que respetar pues de lo contrario se puede dañar, por lo que la señal de entrada debe adecuarse al mismo.
- **Que sea tan corta como sea posible:** Las plantas están en constante operación por lo que la señal que usaremos para experimentar debe ser lo suficientemente corta como para que la industria no pierda mucho tiempo para seguir con la producción pero lo suficientemente larga para poder tomar una señal que permita obtener un modelo aproximado de la planta.
- **De ser posible no alterar las variables del proceso que se están controlando:** Es decir trabajar con una mínima desviación del punto de ajuste y de la varianza, a fin de no forzar mucho a la planta.

Todo esto se puede entender por el hecho que se busca tener una señal de entrada “amigable” con la planta, para esto usaremos:

**Secuencia Binaria Aleatoria (RBS):** Es una señal estocástica de dos niveles, es decir que solo puede tomar dos valores dados de manera aleatoria (se puede indicar su tendencia de aparición) en un tiempo fijo.

**Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS):** Señal de dos niveles determinística que tiene un algoritmo para la generación del mismo, es aconsejable conocer el Tao de la planta pues servirá como dato para este algoritmo; es una señal periódica.

**Señal multi-sinusoidal:** Consiste en una superposición de señales sinusoidales periódicas, muy usada para actuadores que no responden satisfactoriamente ante cambios bruscos, ya que esta señal a diferencia de las anteriores que son pulsos, es continua y suave.

## **2.4 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA**

Identificación de la planta que usa técnicas de regresión, por lo que habrá un error que será responsabilidad del diseñador asignarle un rango aceptable.

Lo que se busca es encontrar un modelo de estructura de predicción de error con el fin de disminuir a los mismos, este tiene la forma:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}r(t) \quad (2.9)$$

Donde:

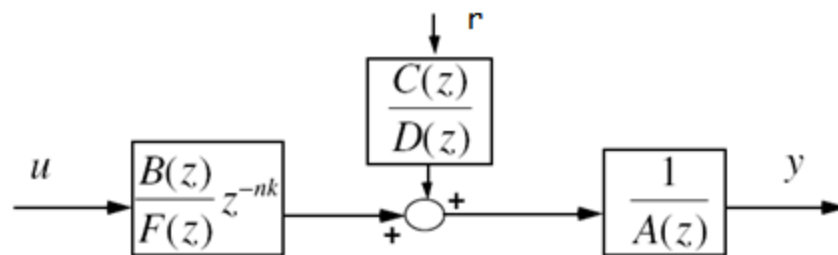
**y(t):** salida de la planta.



$u(t-nk)$ : valor de entrada de la planta cada “n” períodos anteriores.

$r(t)$ : ruido presente.

$A(z)$ ,  $B(z)$ ,  $C(z)$ ,  $D(z)$  y  $F(z)$  son polinomios cuyos valores dependerán de la identificación de la planta; la misma que se puede representar como sigue:



**Figura 2.18** Diagrama de bloques de la identificación paramétrica.

Entre estos métodos tenemos:

- **ARX:** La estimación de la misma se puede hacer para obtener una identificación de alto o bajo orden con la cual obtendremos una varianza alta o un desplazamiento de la señal respectivamente si hay un ruido significativo.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + r(t) \quad (2.10)$$

- **ARMAX:** Es muy usado en sistemas de control adaptivos, normalmente se deben realizar muchas iteraciones para determinar un orden adecuado.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)r(t) \quad (2.11)$$

- **FIR (Respuesta de impulso finito):** Pese a que el orden de los coeficientes depende del tiempo de muestreo y de estabilización, este tiende a ser alto.

$$y(t) = B(z)u(t - nk) + r(t) \quad (2.12)$$

- **Box-Jenkins:** Este sistema parametriza a la planta y al mismo tiempo al ruido de la misma de forma separada, dicha estimación será de tipo no lineal por lo que será necesario realizar iteraciones para acercarse más a una respuesta convincente.

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}r(t) \quad (2.13)$$

- **Output Error:** Es una forma más simplificada del modelo Box-Jenkins con la diferencia que no hay que hallarle un modelo al ruido, es decir se deja a parte la parametrización del mismo.

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + r(t) \quad (2.14)$$

## 2.5 ANÁLISIS DE CONTROLADORES CON RETROALIMENTACIÓN

Existen diversos tipos de controles por retroalimentación, dentro de los cuales los más usados son:

- Controladores analógicos, donde estos ya vienen a ser controladores realizados electrónicamente.

- Sistemas de control Distribuido (DCSs) y “controladores Stand-alone” conocido como controladores de lazo simple.

Estos controladores son realizados en computadoras, lo que implica que no trabajan de manera continua, sino procesa las señales en forma discreta.

Es importante que el tiempo de muestreo de la señal sea lo suficientemente rápido para que el control actúe de manera correcta y parezca cada vez más a los controladores continuos.

En este proyecto se diseñará un controlador de manera discreta mediante la herramienta de Matlab, la cual será explicada más adelante.

### 2.5.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL (P)

Este es el controlador más simple que se puede realizar en lazo cerrado. La ecuación que describe el proceso es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (2.15)$$

**Donde:**

**m(t):** Salida del controlador.

**K<sub>c</sub>:** Ganancia del controlador.

**$\bar{m}$ :** Tendencia.

**e(t):** Error entre la variable controlada y el punto de ajuste.

Se observa según la ecuación 2.15 que la salida del controlador es proporcional al error, con una ganancia de  $K_c$ .

Cuando esta ganancia es positiva el controlador realiza una acción inversa, es decir cualquier incremento en la variable controlada, hará que la salida del controlador disminuya.

Un controlador proporcional tiene la ventaja de trabajar solamente con un parámetro, sin embargo tiene la desventaja de trabajar siempre con un error de estado estacionario.

Mientras más grande sea la ganancia proporcional, menor es el error de estado estacionario pero el sistema se vuelve cada vez más oscilatorio.

## 2.5.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

En la mayoría de los sistemas se requiere un control en el cual no exista error de estado estacionario, por lo que no se puede aplicar un controlador proporcional.

La ecuación que describe un controlador proporcional integrador es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_1} \int e(t) dt \quad (2.16)$$

Donde  $\tau_1$  es el tiempo integral. La unidad de tiempo con la que se suele trabajar usualmente es en minuto.

Mientras menor sea el valor de  $\tau_1$ , el controlador integra más rápido.

### 2.5.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

Este control se vuelve más complejo al tener tres constantes que deben ser ajustadas para tener un control satisfactorio. La ecuación que describe al mismo es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Donde  $\tau_D$  es el tiempo derivativo y así mismo usualmente es en minutos.

La acción derivativa da al controlador la propiedad de anticipar el proceso, calculando la derivativa del error.

Es por esto que se recomienda que los controladores PID se usen en procesos lentos, como los de temperatura.

### 2.5.4 CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO (PD)

Un controlador PD puede ser usado en sistemas donde las especificaciones exigidas al controlar permiten que exista un error de estado estacionario aceptable, y se desee anticipar la respuesta siempre y cuando no exista excesivo ruido en el proceso.

La ecuación de un controlador PD es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.18)$$

## CAPÍTULO III

### 3.1 PROGRAMACIÓN DEL PLC

Con el PLC generaremos la señal analógica de salida para abrir la electroválvula y también será el que reciba la señal analógica de entrada proveniente del sensor de presión, esta configuración se dará a través del programa Moeller.

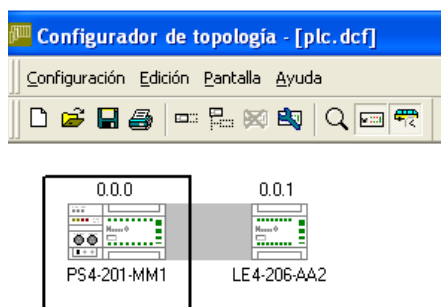
#### 3.1.1 TOPOLOGÍA DEL PLC

En la topología se indicará los módulos del PLC que se usarán, en nuestro caso necesitaremos uno de comunicación y otro analógico:

	<b>Módulo</b>
<b>Comunicación Serial</b>	PS4-201-MM1
<b>Entrada y Salida Analógica</b>	LE4-206-AA2

Tabla 3.1 Módulos del PLC.

Como se muestra a continuación:



**Figura 3.1** Módulos del PLC.

En el módulo analógico (LE4-206-AA2) se debe configurar tanto la entrada como la salida analógica, tomando en cuenta que ambas señales son de corriente de 4 a 20 mA. con una precisión de 12 bits, tenemos:

### Entrada analógica:

The screenshot shows a configuration window titled 'LE4-206-AA2'. It has three tabs: 'Parámetros para todos los canales', 'Entradas analógicas', and 'Salidas analógicas'. The 'Entradas analógicas' tab is active. It contains a table with the following columns: 'Canal', 'Dirección', 'Margen de lectura', 'Resolución', 'Escalado', 'Mín', and 'Máx'. The table lists four channels (0, 1, 2, 3) with their respective settings.

Canal	Dirección	Margen de lectura	Resolución	Escalado	Mín	Máx
0	IAW0.0.1.0	4..20 mA	12 Bit	<input type="checkbox"/>	820	4095
1	IAW0.0.1.2	0..20 mA	12 Bit	<input type="checkbox"/>	0	4095
2	IAW0.0.1.4	0..20 mA	12 Bit	<input type="checkbox"/>	0	4095
3	IAW0.0.1.6	0..20 mA	12 Bit	<input type="checkbox"/>	0	4095

At the bottom of the window are 'OK' and 'Cancelar' buttons.

**Figura 3.2** Configuración de la entrada analógica.

### Salida analógica:

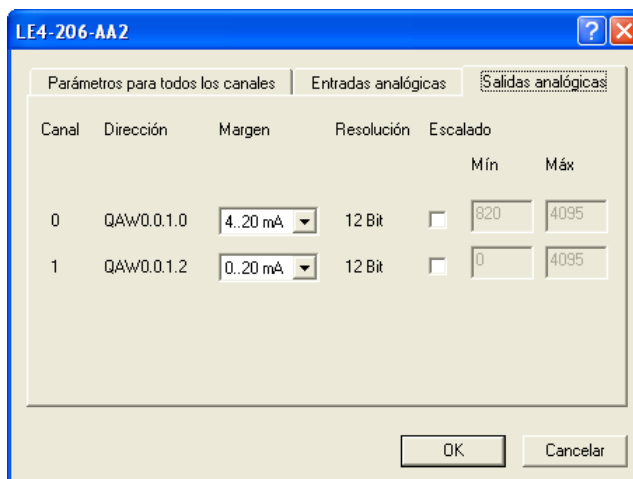


Figura 3.3 Configuración de la salida analógica.

### 3.1.2 EDITOR DE POU (UNIDAD DE ORGANIZACIÓN DE PROGRAMA)

En el mismo se asignará la señal de entrada y salida analógica a una dirección del PLC con lo que tendremos dos variables y otras dos como señales internas para pasar información entre el PLC y el OPC Cliente, como se muestra a continuación:

Nombre de la señal	Función
sens	Sensor
valv	Actuador
msens	Señal interna para el sensor
mvalv	Señal interna para el actuador

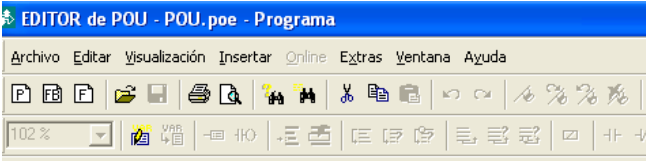
Tabla 3.2 Variables del PLC.



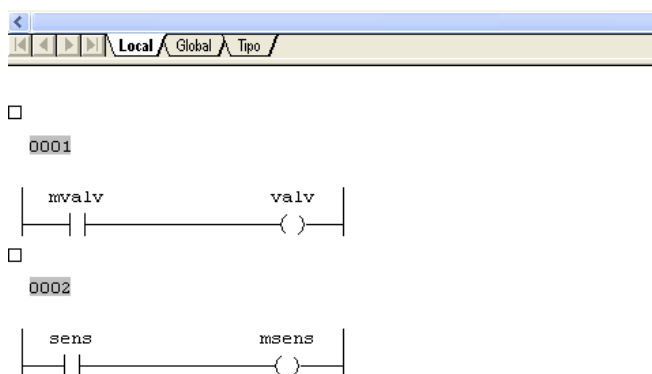
Con lo cual:

- La presión trasformada en corriente por el sensor pasará al módulo analógica del PLC quien lo leerá como la variable “sens”, este se comunicará con el módulo de comunicación quien recibirá su información a través de la variable interna “msens”, misma que pasará al OPC Cliente.
- Del OPC Cliente se dará la orden del porcentaje de abertura de la electroválvula, la cual irá al módulo de comunicación del PLC que se leerá como “mvalv” quien a su vez pasará esta información al módulo analógico a través de la variable “valv” para que genere la señal de corriente para el actuador.

Con lo que obtenemos:



	Nombre	Tipo	Valor i	Atribut	Dirección
1	sens	uint			%iaw0.0.1.0
2	valv	uint			%qaw0.0.1.0
3	msens	uint			%mwo.0.0.0
4	mvalv	uint			%mwo.0.0.2
5					

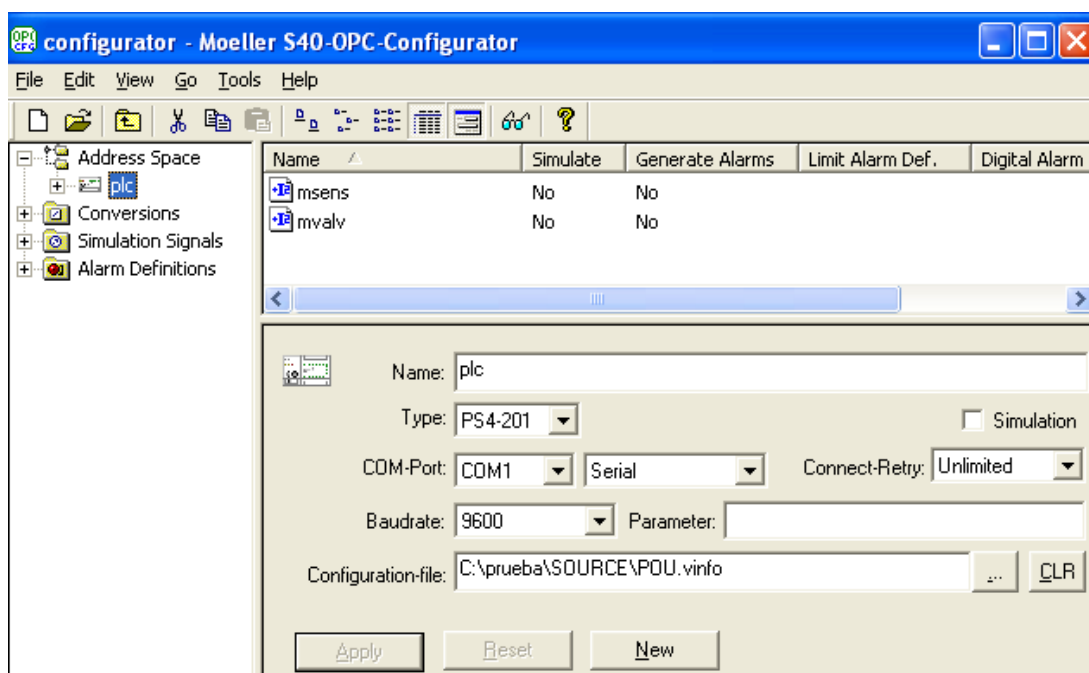


**Figura 3.4** Editor de POU.

### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL OPC SERVIDOR

En esta se selecciona la configuración que hemos generado para el PLC y se la pone en funcionamiento, la cual tiene las siguientes características:

- Hay que cargar en la misma el POU.
- Se debe escoger el puerto físico del computador por donde se va a realizar la comunicación.
- La forma de comunicación es serial.
- La velocidad de transmisión de datos es de 9600 Baudios.
- Las señales internas son: “msens” y “mvalv”.



**Figura 3.5** Configuración del OPC Servidor.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DEL OPC CLIENTE

MatLab será nuestro OPC Cliente, es decir, que a través del mismo ordenaremos las señales que vamos a generar y cuales vamos a recibir, esto lo haremos mediante Simulink, mismo que se muestra a continuación:

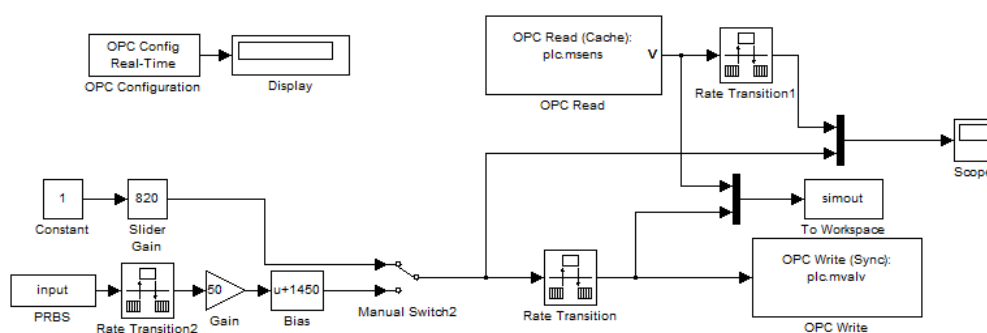


Figura 3.6 OPC Cliente.

#### 3.3.1 ELEMENTOS DEL OPC CLIENTE

Configuración del OPC:

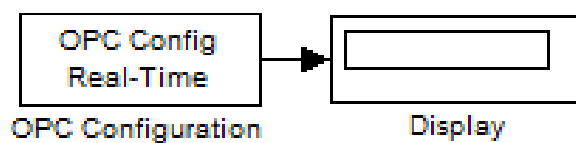
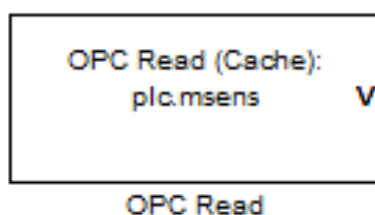


Figura 3.7 Configuración del OPC

En este bloque indicaremos con que OPC Cliente nos vamos a comunicar. Para asegurarnos que esta se dé en un tiempo pseudo-real, se mostrará el

tiempo de espera del reloj interno configurado en el mismo a través de un mostrador, por lo que mientras menor sea mejor.

### OPC Lectura:



**Figura 3.8** OPC Lectura

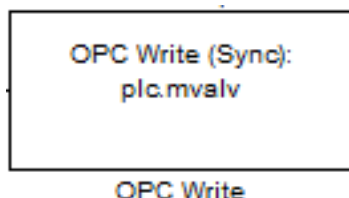
Lee la información del OPC Servidor, en nuestro caso será la presión de la planta la cual llega al PLC como una señal de corriente generada por el transductor de presión, que es convertida a una señal digital de 12 bits de precisión a través de un convertidor analógico-digital.

Las relaciones se muestran en la tabla siguiente:

	<b>Presión (Bar)</b>	<b>Corriente (mA)</b>	<b>12 bits</b>
<b>Mínimo</b>	0	4	820
<b>Máximo</b>	6	20	4095

**Tabla 3.3** Relación entre presión, corriente y bits.

### OPC Escritura:



**Figura 3.9** OPC Escritura.

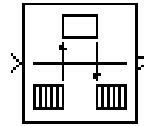
Escribe información en el OPC Server, la cual llega al PLC como señal binaria con precisión de 12 bits quien a su vez la enviará a la electroválvula como señal de corriente (por medio de su convertidor digital-analógico), la cual le ordenará el porcentaje de abertura que debe tener.

Las relaciones se muestran en la tabla siguiente:

	<b>Abertura (%)</b>	<b>Corriente (mA)</b>	<b>12 bits</b>
<b>Mínimo</b>	0	4	820
<b>Máximo</b>	100	20	4095

**Tabla 3.4** Relación entre porcentaje de abertura, corriente y bits.

### Índice de transición:

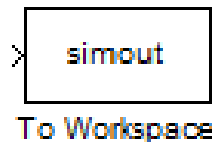


Rate Transition

**Figura 3.10** Índice de transición.

Sin importar la tasa de transmisión de datos que esté llegando en la entrada de este bloque, su salida saldrá con la tasa que se haya configurado; esto es muy útil para asegurarse que todas las señales sean analizadas a un mismo índice de transmisión.

### Al espacio de trabajo:



**Figura 3.11** Al espacio de trabajo.

Tanto la señal de entrada como de salida van a ser analizadas en el espacio de trabajo por lo que este bloque las llevará al mismo bajo el nombre de "simout".

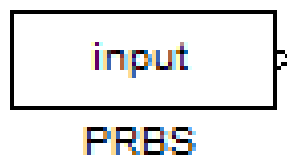
**Visor:**



**Figura 3.12** Visor

Graficador que nos servirá para observar la señal de entrada y de salida bajo una misma ventana.

**Señal de entrada:**



**Figura 3.13** Señal de entrada

A través de este bloque mandaremos la señal de entrada a la planta, que es el orden del porcentaje de abertura de la electroválvula.

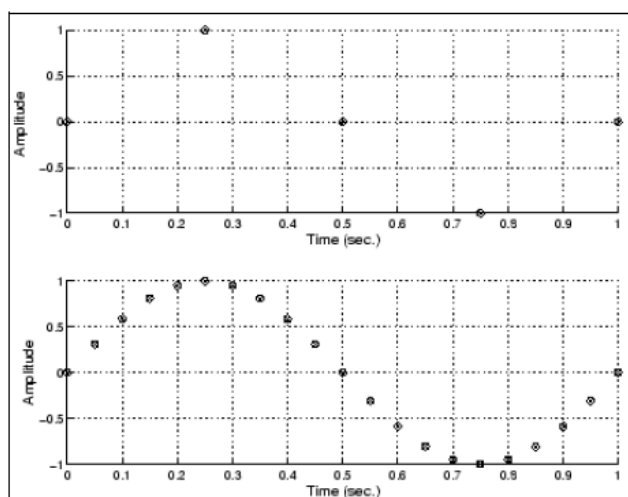
### **3.4 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO**

Los sistemas de control realizados a través de computadoras, son sistemas discretos en los que las señales se trabajan mediante muestras tomadas a un determinado tiempo de muestreo, o como generalmente se dice, a una

determinada frecuencia de muestreo. Esta frecuencia debe ser escogida de tal manera de poder reconstruir la señal continua del proceso.

Según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo " $f_s$ " debe ser por lo menos el doble de la frecuencia de la onda a muestrear " $f_o$ ", donde  $f_o$  es la componente de más alta frecuencia en la señal de tiempo continuo.

Aquí mostraremos un ejemplo donde a una señal sinusoidal de frecuencia 1hz se muestrea por lo menos al doble de la frecuencia de su componente más alta (4 veces más), en este caso por ser sinusoidal pura, es la misma de la señal de 1 hz. Entonces teóricamente la señal original podría ser caracterizada de forma única según el Teorema de Nyquist. Entonces la frecuencia de muestreo sería de 4Hz, como se observa en la Figura 3.12 (En el gráfico superior). Sin embargo con esta frecuencia no se podría imitar la forma de onda de la señal de entrada en forma única. Para lograr una imagen lo más cercana a la señal de entrada, será necesario muestrearla a una frecuencia de alrededor de 10 a 20 veces más alta que la frecuencia más alta de la señal de entrada. Ver gráfico inferior de la figura 3.12 (frecuencia de muestreo 20 veces).



**Figura 3.14** Señal sinusoidal muestreada a 4Hz y 20Hz

**\*Referencia: Ingeniería de Control Moderna por Katsuhiko Ogata.**



La componente de frecuencia más alta de un sistema está relacionada con la constante de tiempo dominante de la respuesta del sistema a una señal de entrada tipo escalón.

Por otro lado, las constantes de tiempo de la respuesta dinámica del sistema están relacionadas con la ubicación de los polos de su función de transferencia en el plano complejo “s”. Generalmente, los sistemas de plantas industriales reales presentan una marcada dominancia que puede ser de primer o segundo orden. Esto quiere decir que existe un polo simple (dominancia de primer orden) o un par de polos complejos conjugados (dominancia de segundo orden) más cercanos al eje imaginario del plano complejo “s” y que los otros polos están alejados una distancia medida sobre el eje real de por menos siete veces.

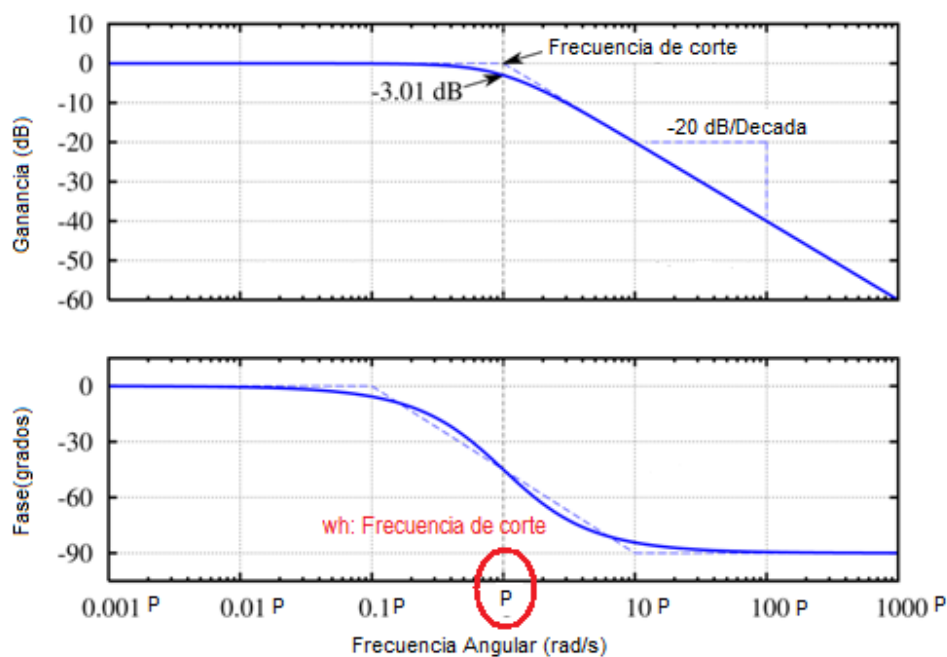
Bajo estos criterios, decidiremos a tomar la constante de tiempo dominante del escalón que se le realizó a nuestra planta, para así encontrar una frecuencia de muestreo aceptable. La constante de tiempo que obtuvimos fue de 20 seg.

En este caso, el polo dominante “p” en el dominio del Plano Complejo equivale a la constante de tiempo dominante en el Dominio de Tiempo; esto es:

$$T = \frac{1}{p} \Rightarrow p = \frac{1}{T} = \frac{1}{20} = 0.05 \quad (3.1)$$

Para un sistema dominante de primer orden resulta que la frecuencia de corte de dicho sistema es el polo dominante. Ver el gráfico de Bode que se muestra a continuación. En la frecuencia de corte, el valor de su magnitud es de -3 dB con relación a la magnitud de respuesta a bajas frecuencias. En nuestro caso, esta situación coincide con la definición del Ancho de Banda,

en lo relativo a la Frecuencia de Corte Superior; es decir que  $p = w_B = w_H$ ; donde esta es la frecuencia de corte, y la frecuencia con la que se va a trabajar.



**Figura 3.15** Gráfica de Bode de la señal sinusoidal.

Como ya explicamos anteriormente que la frecuencia de muestreo debe ser de por lo menos el doble a la frecuencia de corte en nuestro caso es 0.05. Nosotros usaremos esta ecuación:

$$T_m = \frac{1}{n \cdot w_B} \quad ; \quad 10 \leq n \leq 20 \quad (3.2)$$

Si usamos  $n=20$ .

$$T_m = \frac{1}{20 \cdot 0.05} = 1 \text{ seg}$$

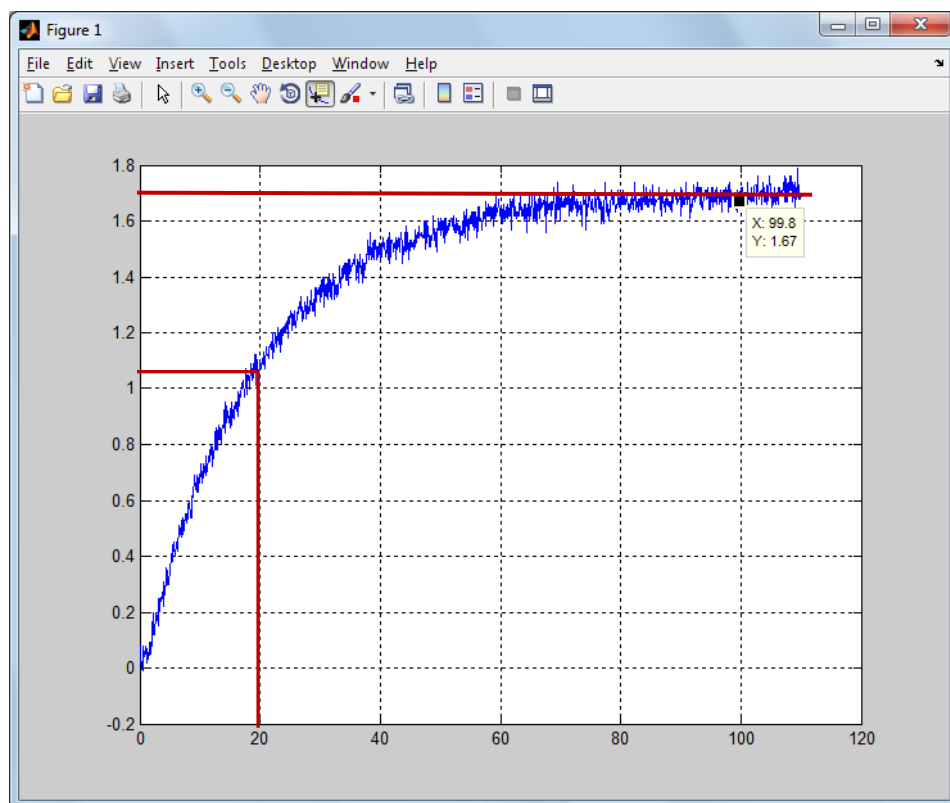
Entonces teniendo esto en cuenta y sabiendo que nuestra planta no es tan lenta, nosotros consideramos que para tener una señal mucho mejor

reconstruida tomamos un tiempo de muestreo de 0.1 seg. lo cual sería 10 veces más del  $T_m(n=20)$ .

### 3.5 ANÁLISIS DE LA PLANTA

Procederemos a obtener la respuesta de la planta ante una señal escalón para hallar ciertos parámetros de la misma que nos permitirán diseñar señales de entrada apropiadas.

La respuesta al escalón es la siguiente:



**Figura 3.16** Respuesta al escalón normalizada.

De la cual se obtiene la constante de tiempo, ganancia última y tiempo de estabilización.

### 3.5.1 CONSTANTE DE TIEMPO ( $T_{ao}$ )

Como el  $t_{ao}$  es el valor del tiempo en el cual la señal alcanza el 63.2 % de su valor en estado estacionario ( $\Delta y$ ), tenemos que:

$$\Delta y = 1.67 - 0 = 1.67 \quad (3.3)$$

$$0.632 * 1.67 = 1.06$$

Por lo que,

$$T_{ao} = 20 \text{ segundos.}$$

### 3.5.2 GANANCIA ÚLTIMA ( $K_u$ )

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

$$k_u = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (3.4)$$

$$k_u = \frac{1.67}{1}$$

$$k_u = 1.67$$

### 3.5.3 TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN ( $T_s$ )

Tiempo en el cual la señal deja de rebasar del  $\pm 2\%$  de su amplitud:

$$T_s = 92 \text{ segundos.}$$

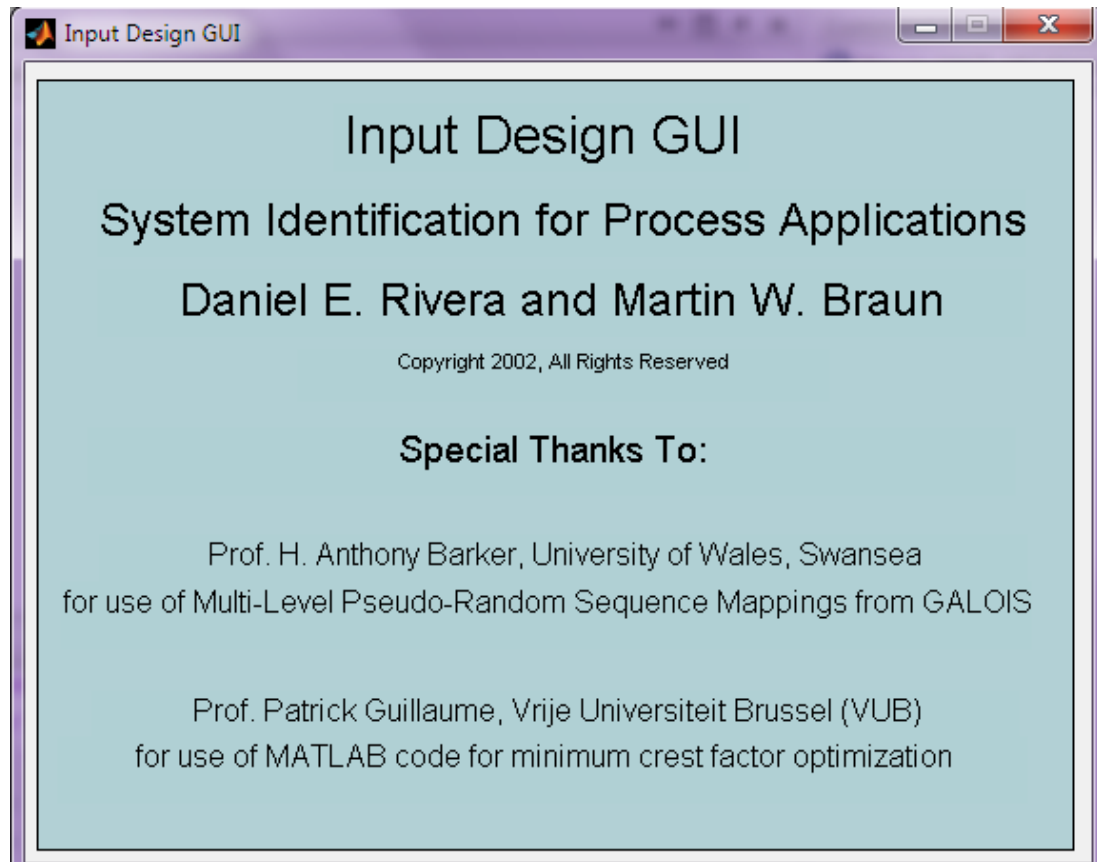
Estas son características que nos permitirán diseñar correctamente nuestra señal de entrada.

## 3.6 DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA

Como ya se indicó en el Capítulo 2, la señal de entrada debe ser “amigable con la planta”, para esto diseñaremos señales de los siguientes tipos:

- Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)
- Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)
- Señal multi-sinusoidal

Para poder generar a las mismas nos valdremos de un programa diseñado en Matlab (extensión gui) llamado “Imput Design GUI” cuya portada se muestra a continuación:



**Figura 3.17** Ventana principal del “Input Design Gui”.

Cuyo ambiente de trabajo es el siguiente:

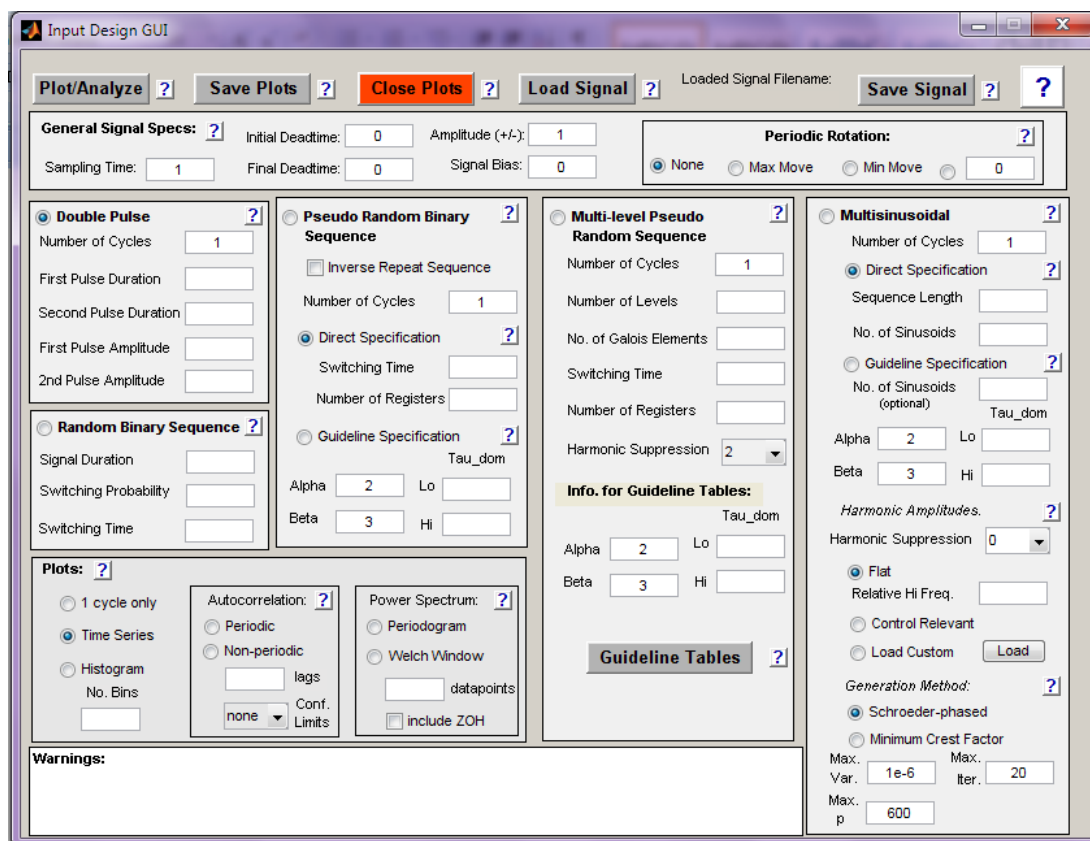


Figura 3.18 Ambiente de trabajo del “Input Design Gui”.

Como podemos apreciar, en el mismo podemos diseñar nuestras señales de interés además de otras.

Los parámetros comunes de las señales son:

- **Amplitud:** Corresponde a la amplitud de la señal a generarse, misma que será de “1” (en simulink se tomará este valor y se lo convertirá a la amplitud deseada)
- **Tiempo de Muestreo:** Tiempo en el cual se va a ir tomando los valores de la señal, previamente se definió este de 0.1 segundos.

### 3.6.1 PARÁMETROS DE LAS SEÑALES DE ENTRADA

#### 3.6.1.1 SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS)

**Duración de la señal:** Tiempo total en el cual se va a dar la señal.

**Probabilidad de conmutación:** Probabilidad para que teniendo un valor cambie al contrario (Ej: de 1 a 0).

**Tiempo de conmutación:** Tiempo que dura cada pulso.

#### 3.6.1.2 SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS) Y SEÑAL MULTI-SINUSOIDAL

**Numero de ciclos:** Total de ciclos de la señal.

**Alfa:** factor representativo de la velocidad de respuesta de lazo cerrado con respecto a la de lazo abierto.

**Beta:** factor representativo del tiempo de estabilización del proceso.

$T_{dom}^{Lo}$ : Constante de tiempo mínima estimada.

$T_{dom}^{Hi}$ : Constante de tiempo máxima estimada.



### 3.6.2 CONSIDERACIONES PARA SELECCIÓN DE SEÑAL

Con lo mencionado anteriormente procedemos a generar las señales de entrada; para saber cuál de estas muestra mejor el comportamiento de la planta, analizamos la respuesta al escalón de la función de transferencia de los datos tomados y se comparará sus parámetros con la respuesta de la planta verdadera encontrados anteriormente, por lo que lo ideal sería encontrar una función que tenga:

- **$K_u = 1.67$**
- **$T_s = 92$  segundos**
- **$T_{ao} = 20$  segundos**

***Nota:** El tiempo para tomar los datos no puede ser mayor a 20 minutos debido a que forzaremos al compresor de aire.*

Se realizaron 4 señales por cada tipo de señal de entrada, de la cual se muestran sus diseños y resultados en las siguientes tablas:

Tabla de los datos ingresados para cada señal:

SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS)					
	Duración de la señal	Probabilidad de conmutación	Tiempo de conmutación		
1	600	0,5	20		
2	600	0,5	10		
3	800	0,5	40		
4	800	0.5	60		
SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS)					
	No. De Ciclos	Alfa	Beta	$T_{dom}^{Lo}$	$T_{dom}^{Hi}$
1	2	2	3	20	22
2	3	2	3	19.8	20.2
3	3	3	4	19.8	20.2
4	2	2	3	18	20
SEÑAL MULTI-SINUSOIDAL					
	No. De Ciclos	alfa	beta	$T_{dom}^{Lo}$	$T_{dom}^{Hi}$
1	2	2	3	20	22
2	3	2	3	19.8	20.2
3	3	3	4	19.8	20.2
4	2	2	3	18	20

Tabla 3.5 Parámetros ingresados a cada señal de entrada.

Tabla de los resultados obtenidos del análisis por cada señal:

SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS)			
	T DOM. APROXIMADO	TS APROXIMADO	GANANCIA ÚLTIMA
1	23	98	1,62
2	24	86	2,06
3	24,5	95	1,57
4	21	79	1,19
SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS)			
	T DOM. APROXIMADO	TS APROXIMADO	GANANCIA ÚLTIMA
1	24,7	82	1,6
2	26	84	1,58
3	24	88	1.7
4	22	94	1.67
SEÑAL MULTI-SINUSOIDAL			
	T DOM. APROXIMADO	TS APROXIMADO	GANANCIA ÚLTIMA
1	Inestable		
2	Inestable		
3	Inestable		
4	Inestable		

Tabla 3.6 Resultados de cada señal.

### 3.6.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.6.3.1 SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS)

En vista que la señal RBS no necesita ningún parámetro propio de la planta, el análisis se basó principalmente en la selección del tiempo de duración de la prueba y del grosor de los pulsos, la probabilidad de cambio quedará fija en 50% para todos los casos, pues lo que se busca es poder generar una señal netamente aleatoria.

La importancia del grosor de los pulsos se debe a que si estos son muy finos, la planta no va a poder reaccionar tan rápido ante estos cambios y si los mismos son muy gruesos, podría darse el caso de que la señal se estabilice y quede en un valor constante por mucho tiempo, ambos casos nos representarían pérdida de información, por lo que se trató de hacer, fue generar señales ni muy rápidas, ni muy lentas para poder obtener un comportamiento eficiente de la planta, para esto tomamos en cuenta el  $T_{ao}$  de la misma ( $T_{ao} = 20$  segundos).

Como podemos apreciar de la tabla, los resultados son aproximados a los deseados, lo cual nos da a entender que nuestro tiempo de conmutación fue acertado.

#### 3.6.3.2 SECUENCIA BINARIA PSEUDO-ALEATORIA (PRBS)

El criterio en esta consiste en bajo que rango encerrar al  $T_{ao}$  (mediante el  $T_{dom}^{Lo}$  y el  $T_{dom}^{Hi}$ ), en nuestro caso,  $T_{ao} = 20$  segundos, por lo que nos

pudiéramos ver tentados a que ambos valores sean de 20, pero si por algún motivo sale del rango, nuestra señal generada no va a ser tan buena como pudiera haber sido, por lo que con el afán de evitar errores, se procedió a poner rangos de Tao tanto por derecha como por izquierda, tanto grandes como pequeños.

Los valores de Alfa y Beta también son importantes puesto que nos servirán para hallar una buena aproximación del comportamiento transiente y estable de la señal respectivamente, de tal manera que mientras mayor sea Alfa, estaremos permitiendo que el rango de la frecuencia se incremente por derecha y mientras mayor sea el Beta que el rango de frecuencia se incremente por izquierda, esto se puede comprender de la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{Beta \cdot T_{dom}^{Hi}} \leq W \leq \frac{Alfa}{T_{dom}^{Lo}} \quad (3.5)$$

De nuestros resultados obtenidos tenemos que la mejor de estas fue la cuarta señal de entrada, lo cual nos da a entender que fue en la misma donde mejor se ubicó el rango de Tao.

### 3.6.3.3 MULTI-SINUSOIDAL

El criterio para dar valores a los parámetros fue el mismo que en la señal PRBS, pero en esta tenemos la novedad que todas nuestras respuestas al escalón fueron deficientes, ya que fueron respuestas inestables, esto se debe a características específicas de nuestra planta.

Esta señal es usada principalmente en plantas en las que no se puede forzar al actuador, pues a diferencias de las otras que son pulsos, esta es continua logrando que el actuador varíe lentamente con respecto a las otras. El

problema radicó en que la electroválvula de la planta no opera correctamente con cambios pequeños, necesita cambios más pronunciados para poder operar, razón por la cual la señal multi-sinusoidal no es apropiada para este proceso.

### **3.7 ANÁLISIS DE LA SEÑAL ESCOGIDA**

Por el estudio realizado en la sección anterior, deducimos que la mejor señal de entrada corresponde a la cuarta señal PRBS generada, es decir, aquella que tuvo los parámetros:

- **Ciclos:** 2
- **Alfa:** 2
- **Beta:** 3
- $T_{dom}^{Lo}$ :18
- $T_{dom}^{Hi}$ :20

#### **3.7.1 CORRELACIÓN DE LA SEÑAL**

Antes de hacer cualquier análisis es necesario asegurar que exista una relación entre la señal de entrada y la señal de salida, pues si por algún motivo se consideró mal cuales iban a ser estas, todo el desarrollo posterior resultaría en una pérdida de tiempo.

Para esto cabe hacer las siguientes preguntas:

¿La señal actual de entrada afecta a la señal actual de salida? o

¿Las señales anteriores de entrada afectaron a la señal actual de salida?

La respuesta a estas inquietudes se puede obtener analizando qué relación hay entre las dos, es decir, hallando la correlación cruzada entre la entrada y la salida, misma que se la puede entender la siguiente manera:

$$y(z) = (b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}) u(z) + v(z) \quad (3.6)$$

**Donde:**

**y(z):** señal de salida discreta.

**u(z):** señal de entrada discreta.

**v(z):** ruido discreto presente en la planta.

**bn:** coeficientes.

Por lo que como ya se mencionó anteriormente nuestro objetivo es hallar una relación entre la entrada y la salida, para esto bastaría con hallar los coeficientes bn, ya que, aplicando la transformada inversa tenemos:

$$y(t) = b_0u(t - 0T) + b_1u(t - 1T) + b_2u(t - 2T) + \dots + b_nu(t - nT) + v(t) \quad (3.7)$$

**Donde:**

**T:** período.

Por lo que conociendo los coeficientes bn conoceremos la relación entre la señal de salida actual con respecto a la señal de entrada n períodos atrás.

**Nota:** Si los coeficientes “bn” son igual a cero, se comprenderá que no hay relación entre la entrada y la salida, por conclusión, las mismas no servirán para hacer ningún análisis.

Es recomendable pre-blanquear la señal de entrada, es decir, tratar de que esta tenga las propiedades de una señal de ruido blanco:

- Aleatoriedad de la señal.
- Sin relación entre el valor de la señal actual con respecto a los valores anteriores.

Esto es porque con la misma el cálculo realizado en MatLab se facilitará enormemente, además que la expresión de  $b_n$  quedaría reducida a:

$$b_n = \frac{\gamma_{uy(n)}}{\sigma_u^2} \quad (3.8)$$

**Donde:**

- $\gamma_{uy(n)}$ : *Coficiente de correlación.*
- $\sigma_u^2$ : *Varianza de la señal de entrada pre – blanqueada.*

Ahora podremos saber si hay una relación entre la señal de entrada y de salida, para esto nos valdremos de una función de MatLab que tiene el siguiente formato:

### **CRA (DATOS, PERIODO, PRE-BLANQUEADO, GRÁFICO)**

**Donde:**

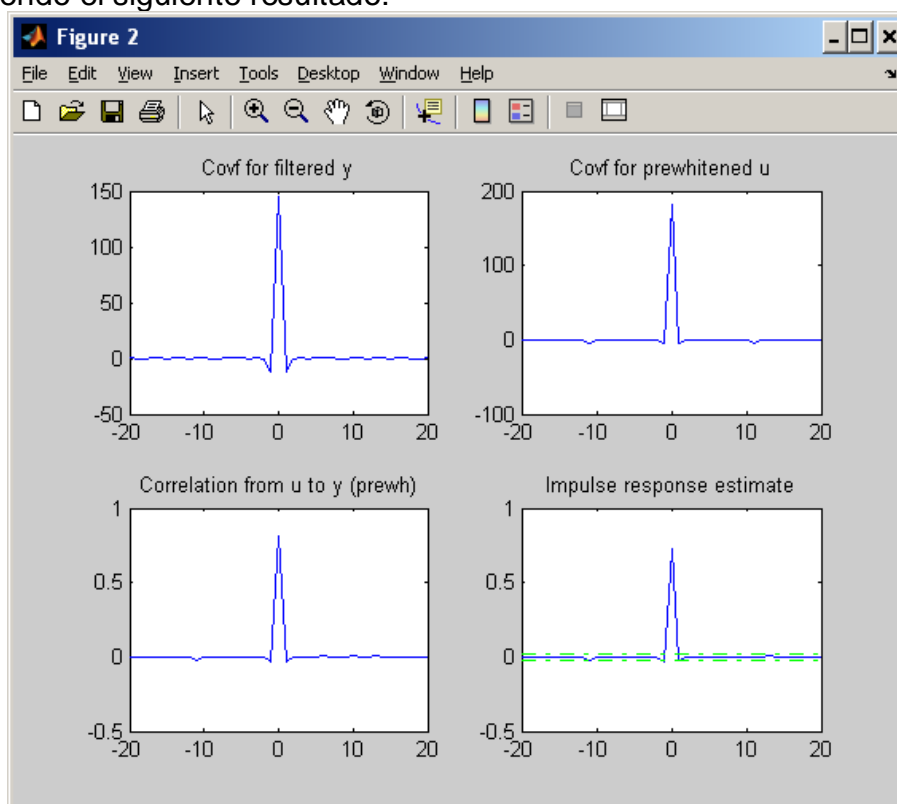
- **CRA (Análisis de correlación):** Halla la correlación entre dos señales.
- **Datos:** Ingreso de las dos señales, en nuestro caso, la señal de entrada y de salida.
- **Período:** Indicará hasta que período se hallará la correlación.
- **Pre-blanqueado:** Es el orden de pre-blanqueado que se pondrá, por definición 10; hay que tener cuidado en la misma pues con un pre-blanqueado muy alto se puede perder características de la propia señal.

- **Gráfico:** Puede tener los siguientes valores:
  0. No muestra gráficos.
  1. Muestra el valor de los coeficientes “bn”.
  2. Muestra la auto-correlación de la entrada, de la salida, la correlación cruzada entre estas señales y los coeficientes bn.

Por lo cual se introdujo la función:

**`cra(simout,20,10,2)`**

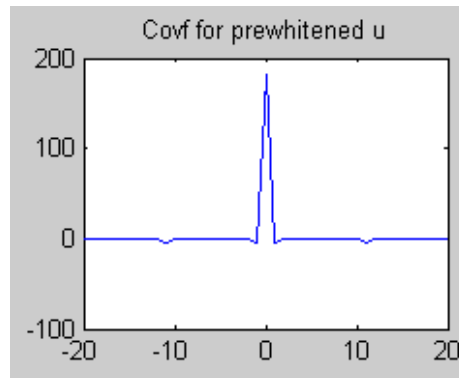
Obteniendo el siguiente resultado:



**Figura 3.19** Correlación de las señales.



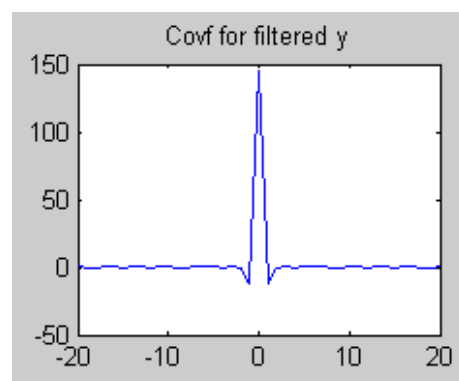
### 3.7.1.1 AUTO-CORRELACIÓN DE LA ENTRADA



**Figura 3.20** Auto-correlación de la entrada.

Como podemos apreciar, pese al pre-blanqueado, la señal no tiene totalmente los parámetros del ruido blanco, ya que sí posee cierta relación con valores anteriores, aproximadamente hasta un período atrás “ $k=1$ ”; pero se aproxima a la misma pues para los otros periodos son independientes sus comportamientos; únicamente hay una gran relación si se compara la señal en un tiempo con la misma señal en el mismo tiempo “ $k=0$ ” (por lógica debíamos obtener este resultado).

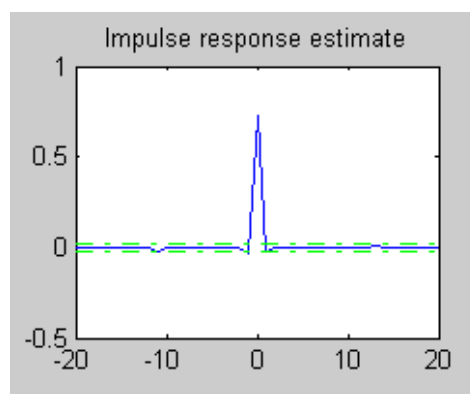
### 3.7.1.2 AUTO-CORRELACIÓN DE LA SALIDA



**Figura 3.21** Auto-correlación de la salida.

La señal de salida es parecida a la de entrada, esto se debe a que la misma no posee mucha dependencia con respecto a sus valores anteriores, pero pese a que este no fue pre-blanqueado, el pre-blanqueamiento de la señal de entrada lo afecta, mostrando este resultado.

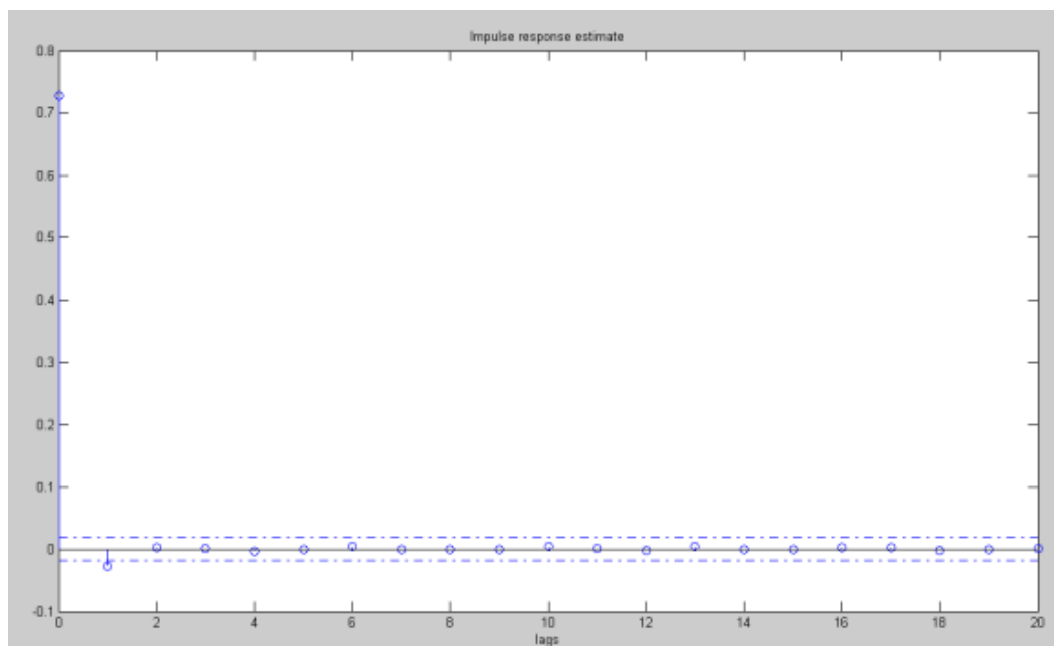
### 3.7.1.3 ESTIMADA DE LA RESPUESTA IMPULSO



**Figura 3.22** Estimada de la respuesta impulso.

Esta representa los coeficientes “ $b_n$ ” que queríamos hallar, para poder apreciarlos más claramente procederemos a ordenar que sólo se grafiquen estos:

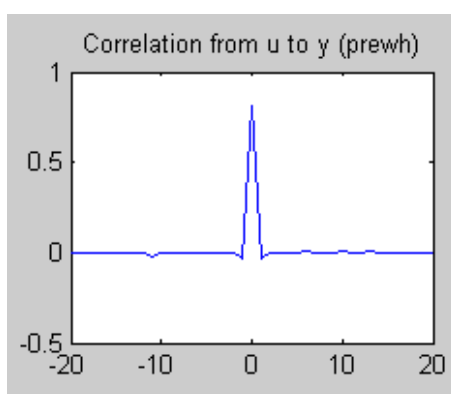
**cra(simout,20,10,2)**



**Figura 3.23** Ampliación de la estimada de la respuesta impulso.

Estos coeficientes son muy bajos (tienden a 0), salvo “bo”, lo que nos da a entender que la relación entre los valores actuales de las señales es alta pero entre los anteriores no.

#### 3.7.1.4 CORRELACIÓN CRUZADA

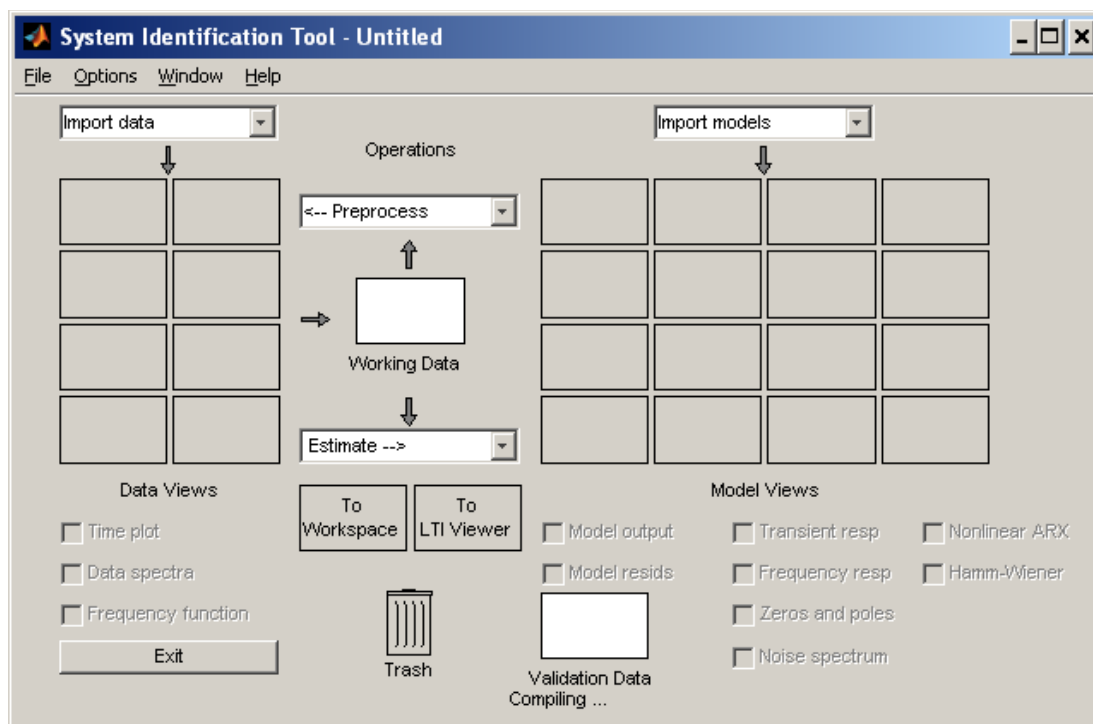


**Figura 3.24** Correlación cruzada.

En este gráfico se puede ver la relación que hay entre la salida y la entrada para los diversos períodos, pese a que no hay una gran influencia de los valores anteriores de la entrada con respecto al valor actual de la salida, su valor actual sí lo afecta; por lo que satisfactoriamente podemos concluir que sí hay un relación entre ambas señales, dándonos confianza para realizar los análisis posteriores.

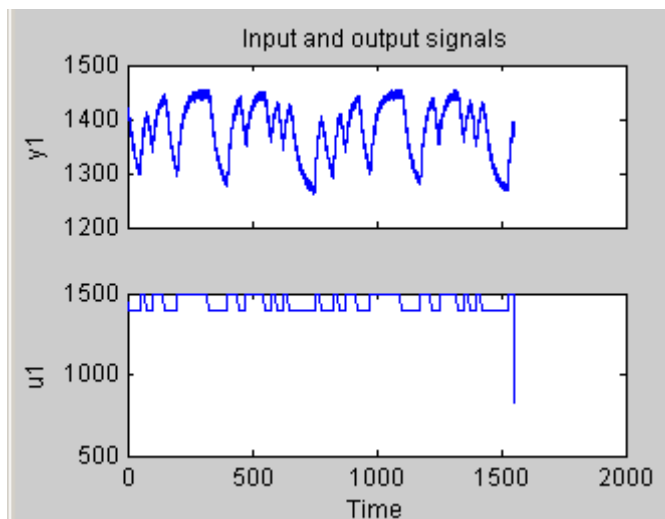
### 3.7.2 RESPUESTA AL ESCALÓN

Para ver su respuesta al escalón nos valemos de la herramienta ident:



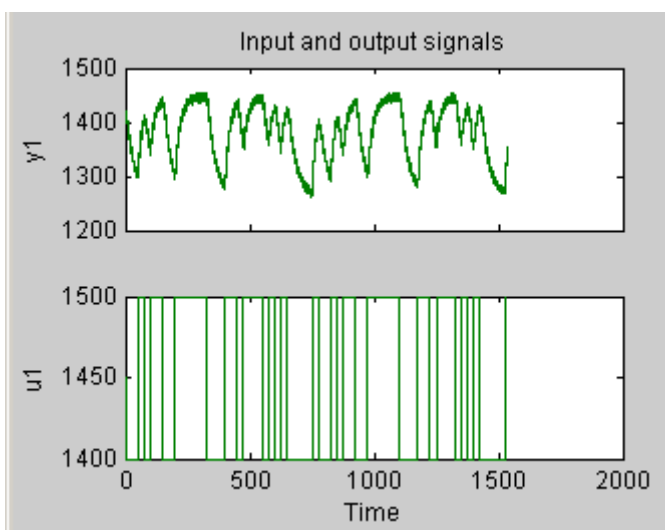
**Figura 3.25** Ident.

Es necesario importar los datos, separando la salida de la entrada, obteniendo:



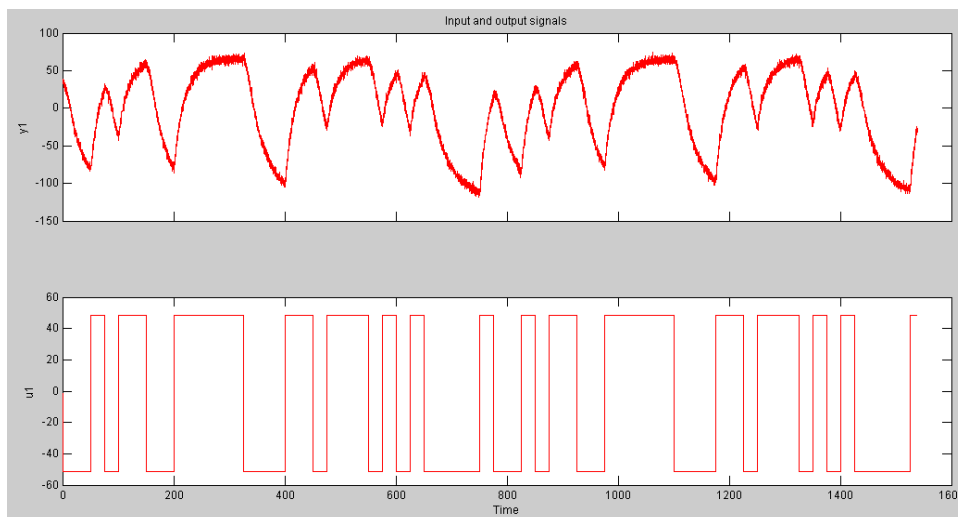
**Figura 3.26** Señal de salida ( $y1$ ) y de entrada ( $u1$ ).

Como se puede ver del gráfico anterior hay un rango en el que ya no se sigue generando la señal PRBS, lo que nos puede perjudicar en el análisis, por lo que hay que limitarlo:



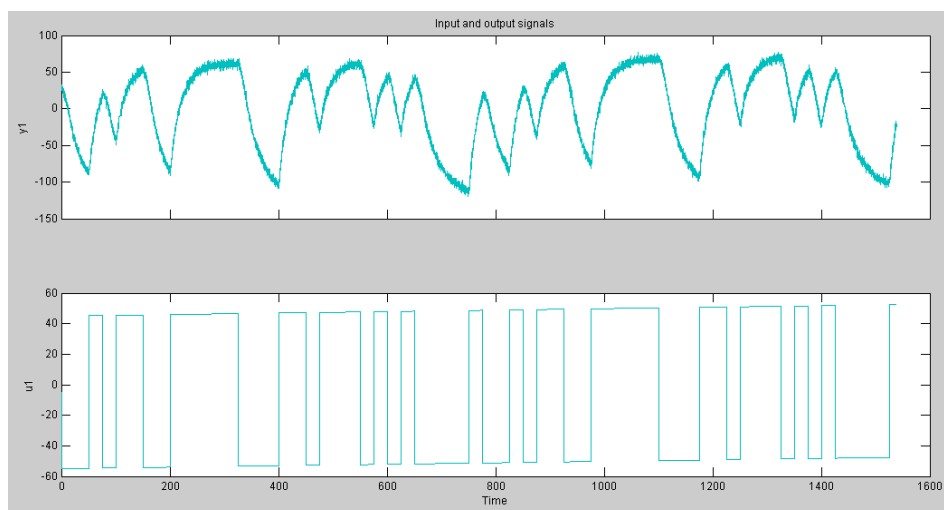
**Figura 3.27** Señal de salida y entrada limitadas.

Además de esto quitamos el valor promedio de la señal (la tendencia), ya que lo que nos interesa analizar son los cambios presentados, no los valores constantes, con lo cual obtenemos:



**Figura 3.28** Señal de salida y entrada sin valor promedio.

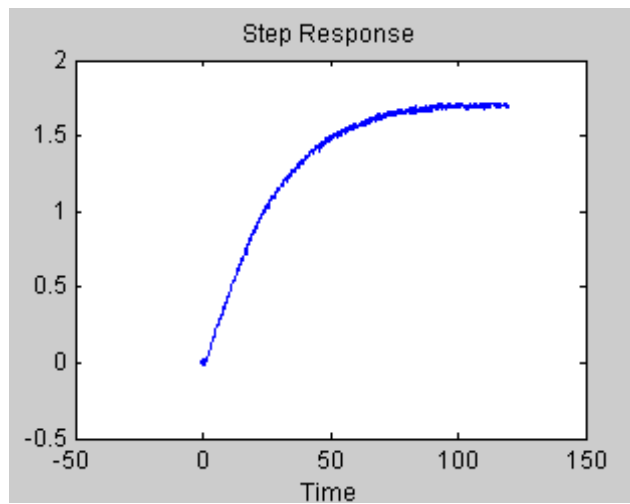
Normalmente las señales tomadas presentan ciertas desviaciones en el tiempo, por lo que es necesario estimar y remover todas las tendencias lineales, tanto de la entrada como de la salida:



**Figura 3.29** Señal de salida y entrada sin tendencia.

**Nota:** Como podemos apreciar nuestras señales no reflejaron gran cambio si le quitamos o no las tendencias lineales, debido a que esta no tenía un gran nivel de oscilación.

Con lo cual ya podemos apreciar la respuesta al escalón de la señal, la cual queda:



**Figura 3.30** Respuesta al escalón de la señal PRBS 4.

**Nota:** Para esto se utilizó un pre-blanqueado = 10.

Obteniendo de la misma:

- **Ku:**1.67
- **Ts:**94
- **Tao:**22

Que al ser muy parecidos a los parámetros de la planta real, fue la mejor señal generada.

En este capítulo comprobamos satisfactoriamente que hay una relación entre la señal de entrada y la señal de salida, además que comparamos los parámetros generados por esta con respecto al de la planta y al ser muy parecidos, tenemos la confianza para indicar que es una buena señal de entrada con la cual se puede describir de forma convincente el comportamiento del proceso.



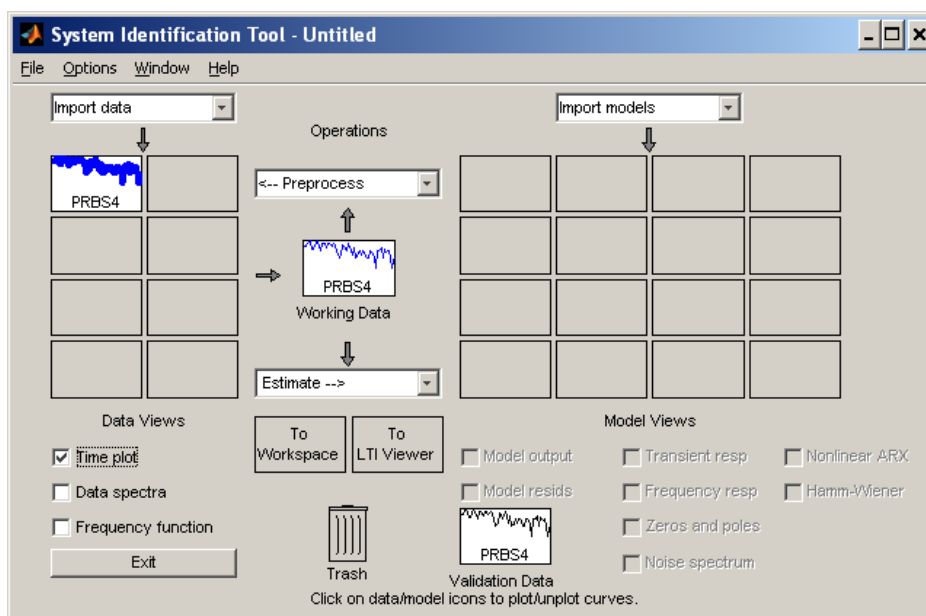
## **CAPITULO IV**

Una vez seleccionada la señal de entrada y salida se procede a obtener la función de transferencia a través de los métodos paramétricos, de los cuales tenemos:

- ARX
- ARMAX
- FIR
- BOX-JENKINS
- OUTPUT ERROR

### ***4.1 TRABAJO CON LA SEÑAL DE ENTRADA***

Antes de aplicar los métodos paramétricos es necesario ingresar la señal de entrada y salida, para esto nos valemos de una herramienta de Matlab, "Ident", con la cual vamos a importar los datos de nuestra señal, misma que se llamará PRBS4:



**Figura 4.1** Ident de PRBS 4.

De la cual como ya se había explicado en el Capítulo 3.6.2 “Respuesta al Escalón” se modificará la señal, misma que se resume en la siguiente tabla:

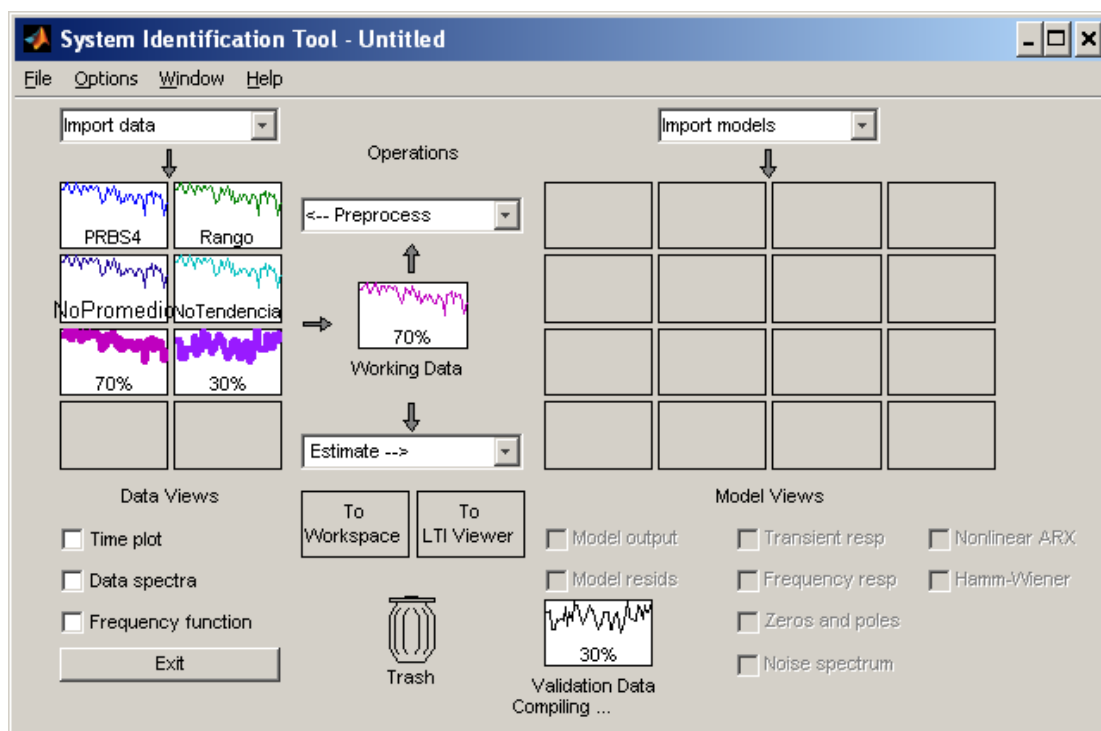
Proceso	Nombre de la Señal
Importar señal	PRBS4
Definir el rango que se va a usar	Rango
Remover el valor promedio de las señales	NoPromedio
Remover las tendencias de las señales	NoTendencia

**Tabla 4.1** Procesos realizados en el Ident.

#### 4.1.1 DIVISIÓN DE LAS SEÑALES

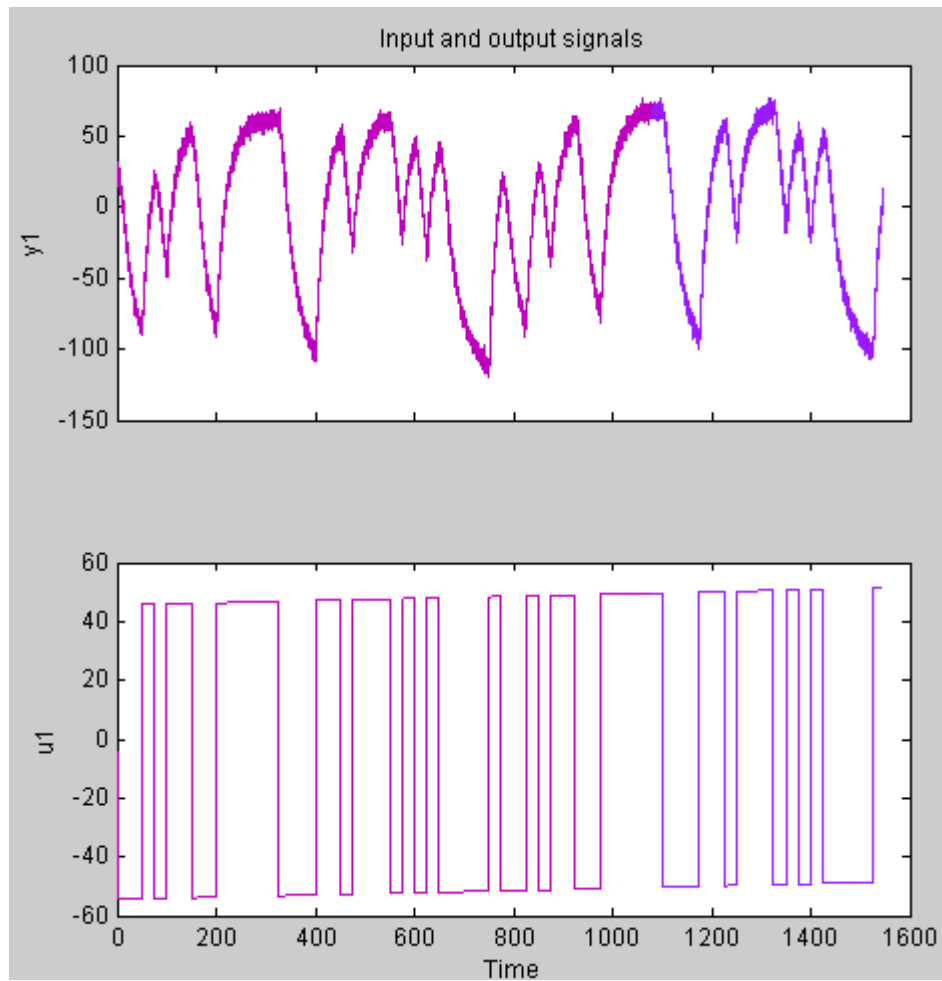
De esta señal ya procesada se tomará el 70% para hacer el respectivo análisis paramétrico y el 30% restante para comprobar la efectividad del

mismo, siendo los estos porcentajes sus nombres, con lo cual en el “Ident” tendremos:



**Figura 4.2** División de las señales.

La señal del 70% (color violeta) y del 30% (color azul) son:

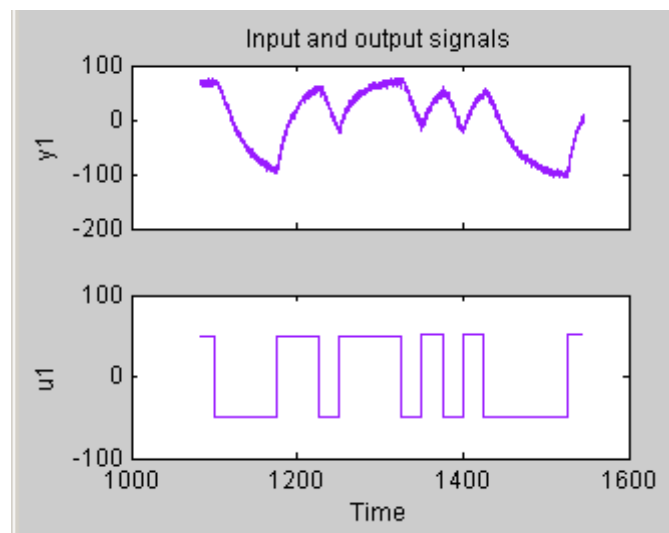


**Figura 4.3** Señal de salida y entrada (70% y 30%).

## **4.2 CRITERIOS EMPLEADOS**

Para elegir el mejor método de parametrización de la planta nos valdremos de los siguientes criterios:

**Modelo de Salida:** Una vez hallado la función de transferencia, se la excitará con la entrada almacenada en el arreglo llamado 30%, por lo que esperamos que su respuesta sea muy parecida a la salida también almacenada en el mismo arreglo.



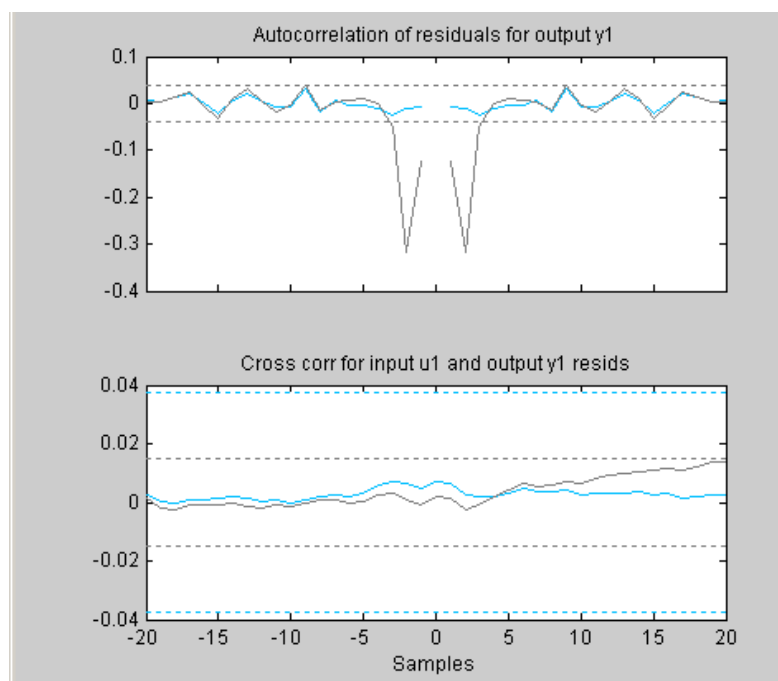
**Figura 4.4** Señal de salida y entrada del 30%.

**Análisis residual:** Residual es la diferencia entre el valor observado y el valor estimado, por lo que se lo conoce también como error de predicción; lo que se obtiene del mismo es un análisis residual del sistema, en nuestro caso, la auto correlación residual de la salida (para saber si los errores son independientes) y la correlación cruzada residual entre la salida y la entrada; de la misma tenemos también el intervalo de confianza.

**Intervalo de confianza:** Todo modelo de estimación tiene un grado de incertidumbre, la cual está marcada por las líneas segmentadas; con lo cual la región que está dentro de la misma es la verdadera respuesta del sistema (con un 99% de confianza), mientras que la región restante da una respuesta dudosa; razón por la cual por más aproximada que sea la respuesta de una

señal parametrizada, si esta sale de los rangos de confianza no podrá ser tomada en cuenta, ya que no podremos confiar de su idoneidad.

A continuación se muestra una señal ploma que es incierta pues sale del rango de confianza, y una celeste que goza de un 99% de confianza.

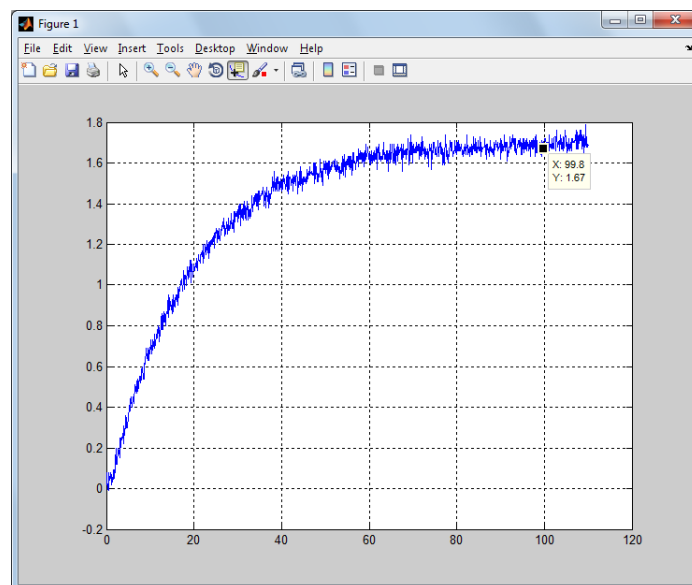


**Figura 4.5** Intervalo de confianza.

**Modelo no viable:** Indicará que no se puede hallar una función de transferencia, se dará cuando una vez hallado el modelo discreto, los coeficientes del numerador son mayores a los del denominador, lo cual expresado matemáticamente indica que somos capaces de obtener valores futuros y al ser esto imposible se genera un mensaje de error en MatLab.

**Parsimonia:** Se basa en hallar una representación sencilla del modelo que tenga una buena aproximación al comportamiento de la planta real.

**Respuesta al escalón:** Como se hizo en el capítulo 3.6.2 “Respuesta al escalón”, nos valdremos de la respuesta de la señal escalón como último recurso para comprobar que nuestra función de transferencia es una buena aproximación de la planta ( $T_s=92$  segundos,  $K=1.67$ ,  $T_{ao}=20$  segundos).



**Figura 4.6** Respuesta escalón de la planta de presión.

Con lo cual ya estamos listos para aplicar los métodos paramétricos:

### 4.3 MODELO ARX

Como se vio en el capítulo 2.4 “Identificación paramétrica”, la fórmula que describe a este proceso es:

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

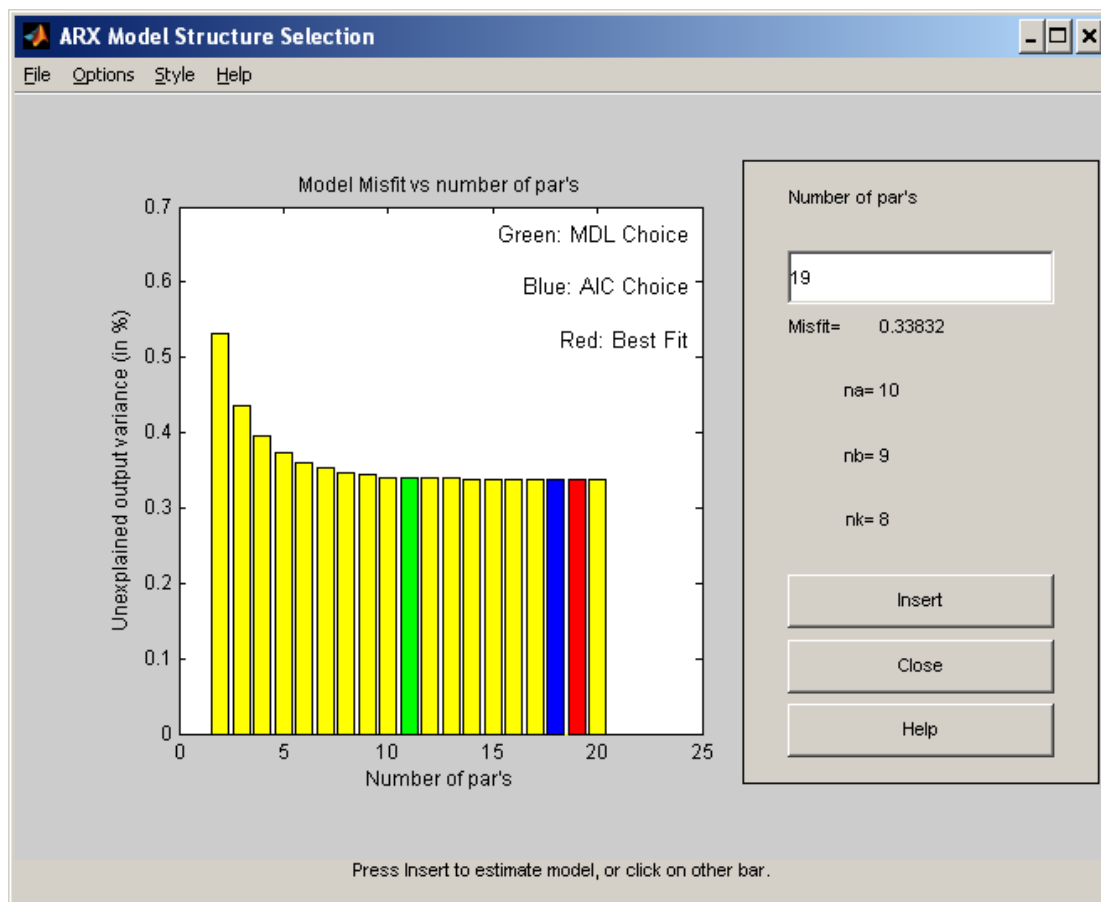
Para este método tenemos la siguiente ventana:

**Figura 4.7** Ventana de parámetros del ARX.

**Formato del nombre de las señales:** ARX: na,nb,nk

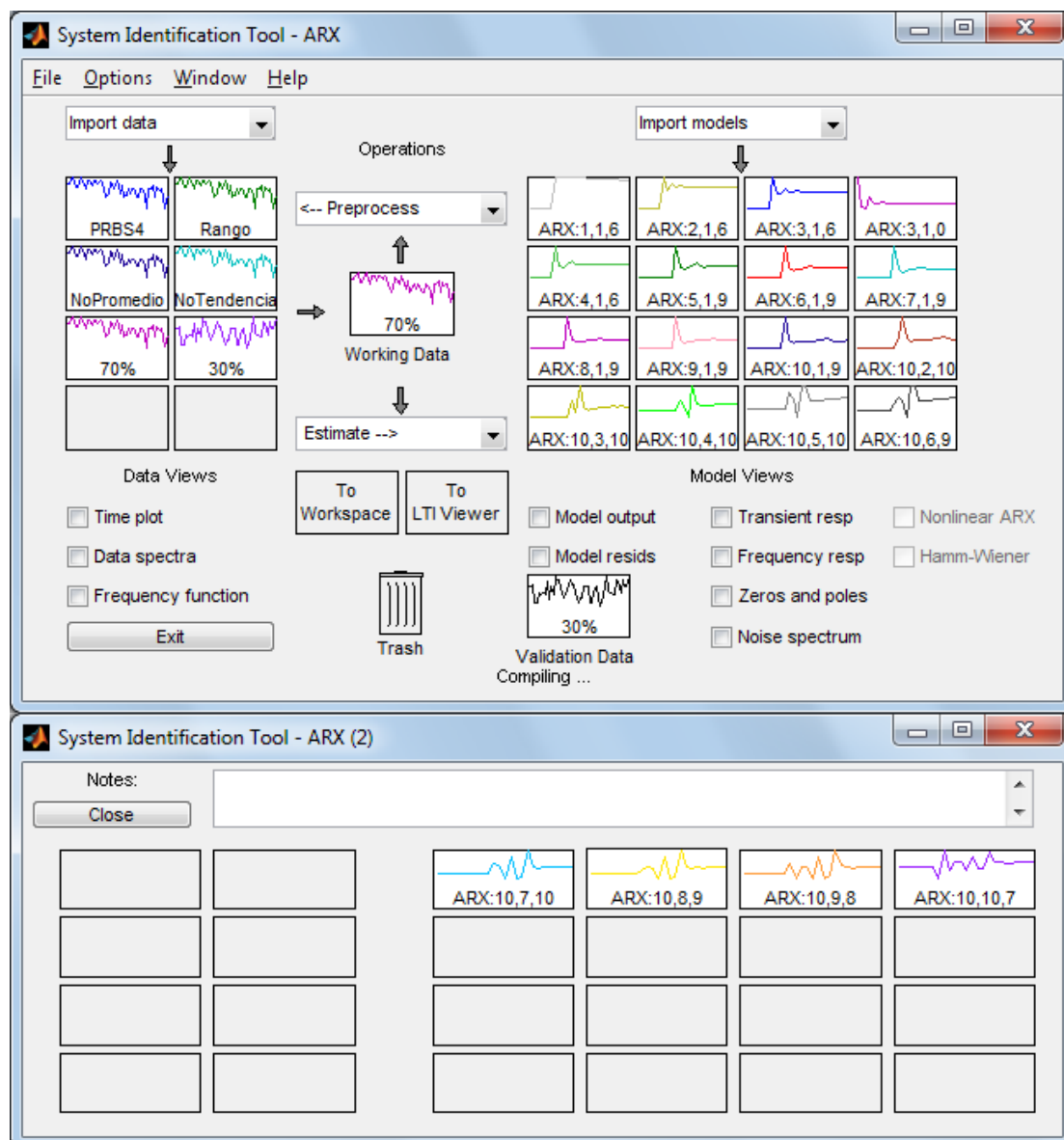
De la cual se puede buscar el orden de los coeficientes más apropiados mediante la opción “Selección de orden”, con lo cual obtenemos:





**Figura 4.8** Coeficientes sugeridos del ARX.

Lo que vemos en este gráfico son diversas combinaciones de los coeficientes, los cuales se generaron en el ident:



**Figura 4.9** Coeficientes estimados del ARX.

Al comparar su respuesta con la señal del 30%, el análisis residual y la parsimonia del modelo obtenemos los siguientes niveles de similitud:

**Tabla de Análisis:**

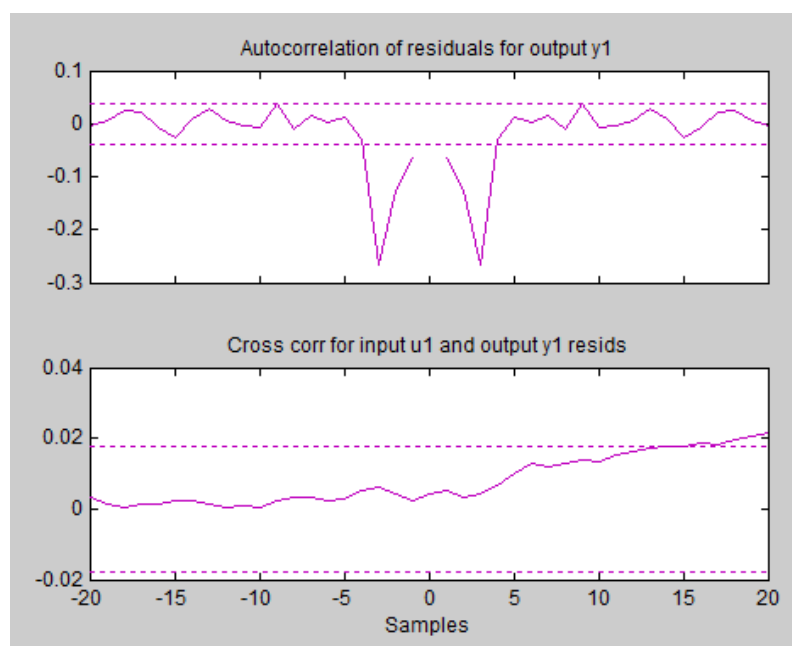
<b>Señal</b>	<b>% de similitud</b>	<b>Nivel de confianza</b>	<b>Función de Transferencia</b>
ARX:1,1,6	53.82	Incertidumbre	1 polo, retardo
ARX:2,1,6	69.48	Incertidumbre	2 polos, 1 cero, retardo
ARX:3,1,6	75.91	Incertidumbre	3 polos, 2 ceros, retardo
ARX:3,1,0	76.17	Incertidumbre	3 polos, 3 ceros
ARX:4,1,6	78.2	Incertidumbre	4 polos, 3 ceros, retardo
ARX:5,1,9	79.1	Incertidumbre	3 polos, 2 ceros, retardo
ARX:6,1,9	79.61	Incertidumbre	4 polos, 2 ceros, retardo
ARX:7,1,9	79.88	Incertidumbre	7 polos, 6 ceros, retardo
ARX:8,1,9	80.06	Incertidumbre	8 polos, 7 ceros, retardo
ARX:9,1,9	80.17	Incertidumbre	9 polos, 8 ceros, retardo
ARX:10,1,9	80.27	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,2,10	80.21	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,3,10	80.19	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,4,10	80.16	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,5,10	80.14	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,6,9	80.15	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,7,10	80.05	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,8,9	80.06	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,9,8	80.09	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo
ARX:10,10,7	80.03	Incertidumbre	10 polos, 9 ceros, retardo

**Tabla 4.2** Resultados de las señales ARX.

La parametrización del modelo ARX se lo puede hacer tanto de bajo como de alto orden, la problemática con nuestra planta es que en bajo orden, presenta problemas si la señal tiene una frecuencia alta y ya que nuestra planta tiene un ruido pronunciado, perjudica al método; mientras que cuando se trabajó con modelos ARX de órdenes elevados, era necesario tener suficientes datos, y al ver el análisis residual comprobamos que no fueron suficientes.

Como podemos apreciar, la señal más cercana es la "ARX:10,1,9" con un porcentaje de similitud del 80.27%, el inconveniente es que la misma tiene un coeficiente muy elevado ( $n_a=10$ ), por lo que es necesario aplicar el criterio de la parsimonia, la cual indica que una señal que no tiene muchos coeficientes y logra representar bien al sistema es mejor que otra que la represente aún mejor pero con más coeficientes.

En vista de esto, la señal de tipo ARX más conveniente es la "ARX:3,1,0" con un porcentaje de similitud del 76.17%, pero ya que esta al igual que todas salen del rango del 99% de confianza del modelo residual, se convierten en modelos dudosos, por lo cual no se puede trabajar con ninguna.



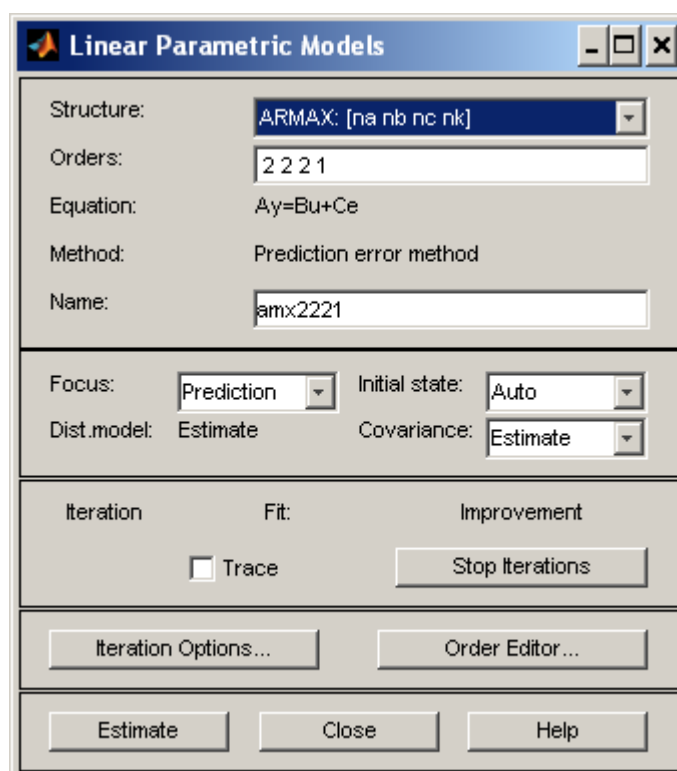
**Figura 4.10** Análisis residual de la señal ARX:3,1,0.

## 4.4 MODELO ARMAX

Como se vio en el capítulo 2.4 “Identificación paramétrica”, la fórmula que describe a este proceso es:

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

La ventana que se presenta en la misma es:



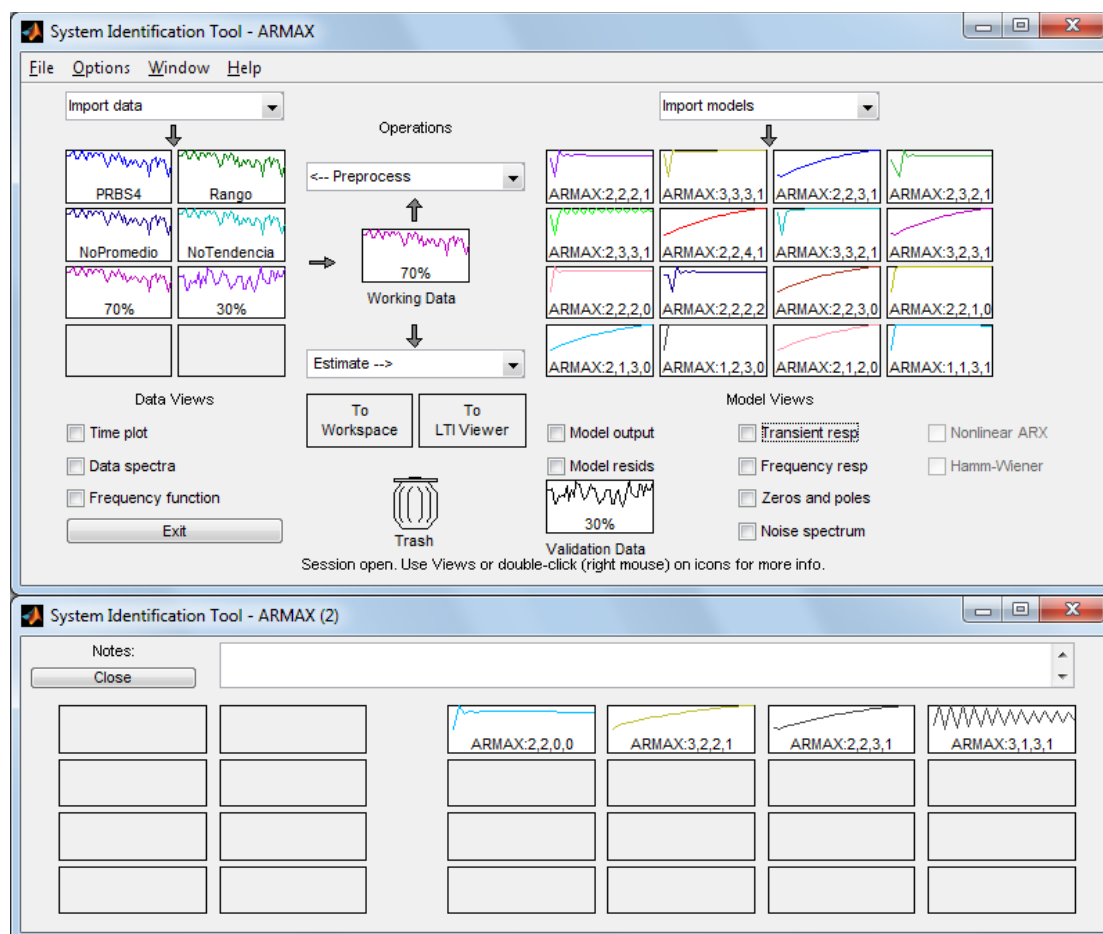
**Figura 4.11** Ventana de parámetros del ARMAX.

**Formato del nombre de las señales:** ARMAX: na,nb,nc,nk

Como vemos este modelo es representado por 4 coeficientes (na, nb, nc, nk), además que la solución para encontrar los valores de estos corresponde a un

sistema de ecuaciones cuya respuesta no es exacta por lo que se la aproxima a través de los métodos iterativos.

Lo que se presenta a continuación son las diferentes parametrizaciones que se realizaron de la señal a través del modelo ARMAX.



**Figura 4.12** Coeficientes estimados del ARMAX.

Al comparar su respuesta con la señal del 30%, el análisis residual y la parsimonia del modelo obtenemos los siguientes niveles de similitud:

**Tabla de Análisis:**

<b>Señal</b>	<b>% de similitud</b>	<b>Nivel de confianza</b>	<b>Función de Transferencia</b>
ARMAX:2,2,2,1	80.36	Incertidumbre	2 polos, 1 cero
ARMAX:3,3,3,1	77.84	99% de confianza	3 polos, 2 ceros
ARMAX:2,2,3,1	78.68	99% de confianza	Modelo no viable
ARMAX:2,3,2,1	80.56	Incertidumbre	Modelo no viable
ARMAX:2,3,3,1	80.53	Incertidumbre	Modelo no viable
ARMAX:2,2,4,1	78.57	99% de confianza	Modelo no viable
ARMAX:3,3,2,1	78.07	Incertidumbre	3 polos, 2 ceros
ARMAX:3,2,3,1	78.63	99% de confianza	3 polos, 2 ceros
ARMAX:2,2,2,0	80.46	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
ARMAX:2,2,2,2	80.56	Incertidumbre	2 polos, 1 cero, retardo
ARMAX:2,2,3,0	79.01	99% de confianza	Modelo no viable
ARMAX:2,2,1,0	80.45	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
ARMAX:2,1,3,0	78.36	99% de confianza	Modelo no viable
ARMAX:1,2,3,0	80.54	Incertidumbre	Modelo no viable
ARMAX:2,1,2,0	78.34	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
ARMAX:1,1,3,1	80.54	Incertidumbre	Modelo no viable
ARMAX:2,2,0,0	70	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
ARMAX:3,2,2,1	78.53	99% de confianza	3 polos, 2 ceros
ARMAX:3,1,3,1	80.34	Incertidumbre	3 polos, 2 ceros
ARMAX:3,2,3,0	79.04	99% de confianza	3 polos, 3 ceros

**Tabla 4.3** Resultados de las señales ARMAX.

En este modelo, se parametriza también al ruido, lo cual es conveniente ya que nuestra planta presenta un considerable nivel del mismo, lo que se busca es encontrar una relación entre la entrada y la salida; al igual de una

relación entre el ruido y el comportamiento de salida, pero ambos tienen un denominador común, lo cual no es muy aconsejable ya que la señal de entrada y del ruido son señales sin ninguna dependencia.

Como primer análisis descartamos todos los modelos inciertos, quedándonos sólo con aquellos que estén dentro del 99% de confianza del análisis residual; descartando posteriormente los modelos no viables ya que no podremos obtener su función de transferencia.

Observando la tabla nos damos cuenta que los modelos restantes tienen un porcentaje de similitud muy parecido, por lo que nos valdremos nuevamente del principio de la parsimonia, escogiendo aquella que tenga menor número de coeficientes y que logre representar bien a la señal.

Por este análisis, se concluye que del modelo ARMAX, la mejor parametrización fue la ARMAX:3,2,3,1 con un 78.63% de similitud y estando comprendida dentro del rango de confianza como se muestra a continuación:

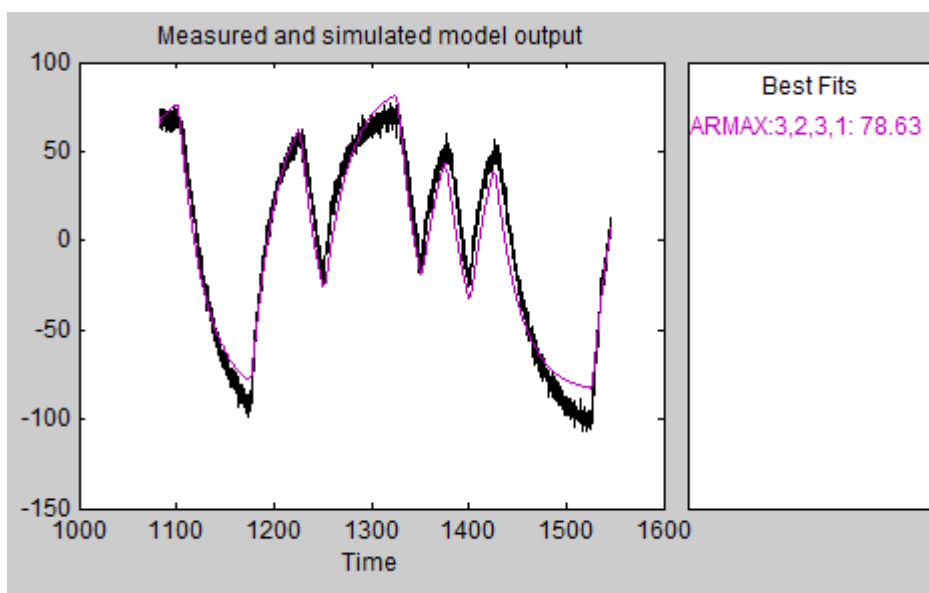
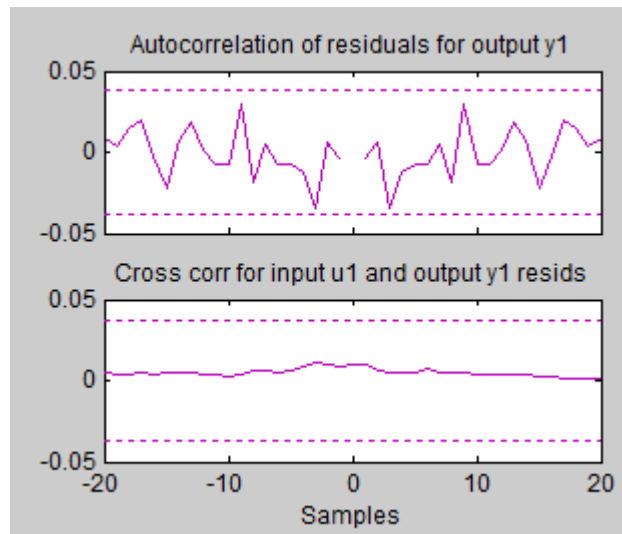


Figura 4.13 Modelo de salida del ARMAX:3,2,3,1.





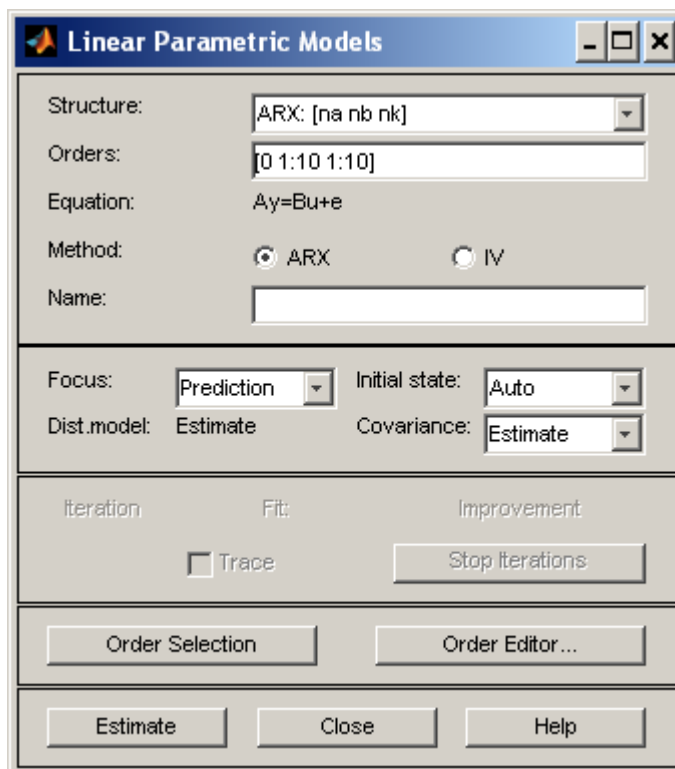
**Figura 4.14** Análisis residual del ARMAX:3,2,3,1.

## 4.5 MODELO FIR

Como se vio en el capítulo 2.4 “Identificación paramétrica”, la fórmula que describe a este proceso es:

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

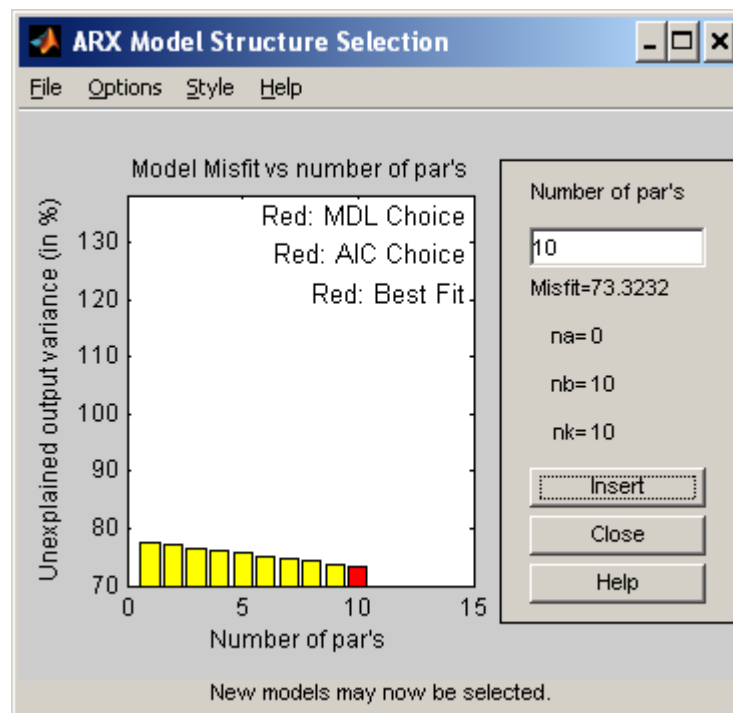
Este tiene la misma forma que el modelo ARX con  $n_a=0$ ; por lo que se lo trabajará de la misma manera:



**Figura 4.15** Ventana de parámetros del FIR.

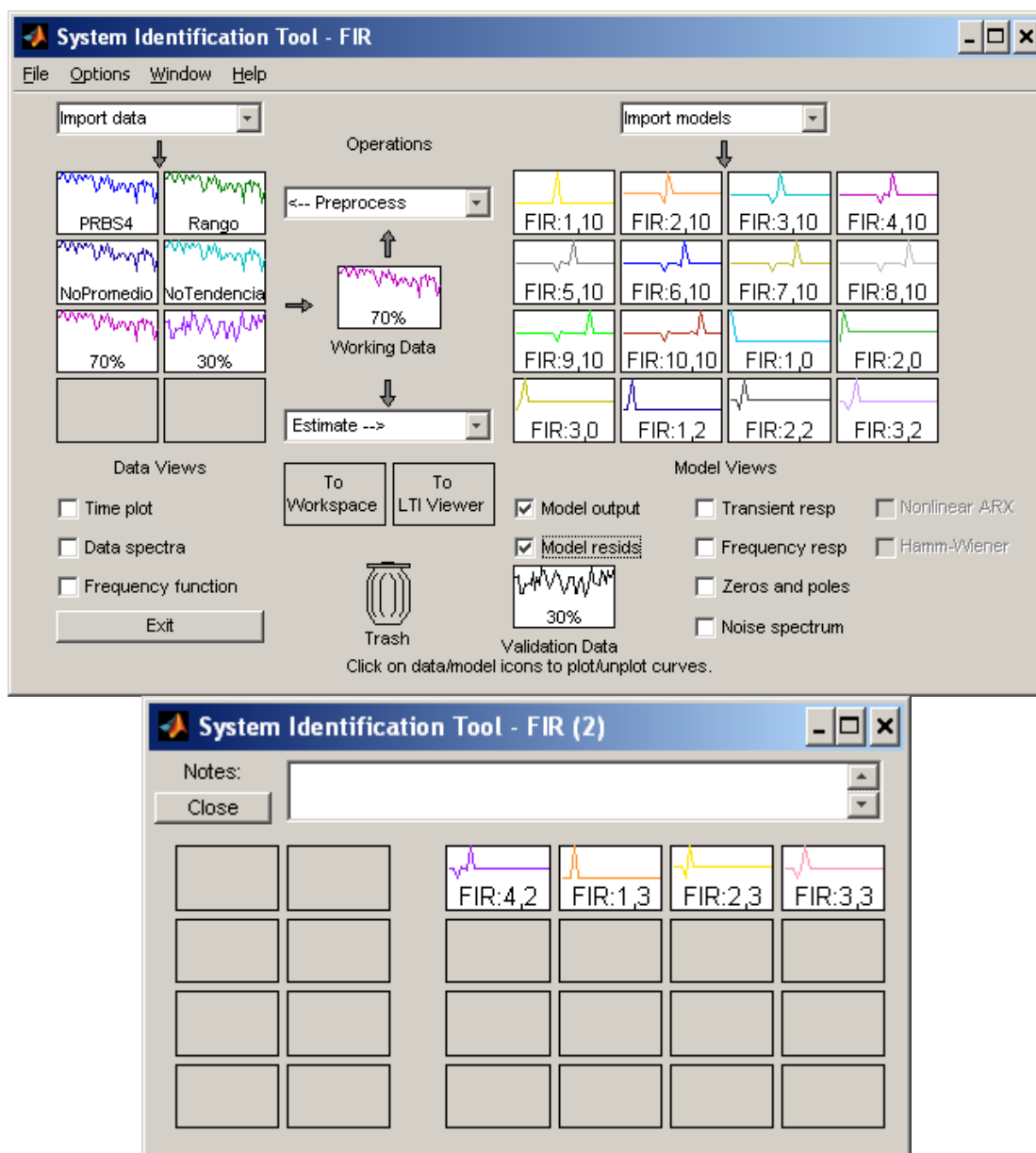
### **Formato del nombre las señales: FIR:nb,nk**

De la cual se puede buscar el orden de los coeficientes más apropiados mediante la opción “Selección de orden”, con lo cual obtenemos:



**Figura 4.16** Coeficientes sugeridos del FIR.

Del cual obtenemos los siguientes modelos parametrizados:



**Figura 4.17** Coeficientes estimados del FIR.

Al comparar su respuesta con la señal del 30%, el análisis residual y la parsimonia del modelo obtenemos los siguientes niveles de similitud:

**Tabla de Análisis:**

<b>Señal</b>	<b>% de similitud</b>	<b>Nivel de confianza</b>	<b>Función de Transferencia</b>
FIR:1,10	12.16	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:2,10	12.45	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:3,10	12.72	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:4,10	13	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:5,10	13.27	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:6,10	13.55	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:7,10	13.83	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:8,10	14.09	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:9,10	14.37	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:10,10	14.64	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:1,0	9.90	Incertidumbre	Ni polos ni ceros
FIR:2,0	10.17	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:3,0	10.41	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:1,2	10.32	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:2,2	10.6	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:3,2	10.85	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:4,2	11.12	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:1,3	10.54	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:2,3	10.82	Incertidumbre	Modelo no viable
FIR:3,3	11.08	Incertidumbre	Modelo no viable

**Tabla 4.4** Resultados de las señales FIR.

El coeficiente del modelo FIR depende de cuál fue el tiempo de muestreo empleado y del tiempo de estabilización ante una señal escalón, razón por la cual este orden es elevado, dándonos el problema de que la función de

transferencia encontrada será muy compleja o en caso contrario, al tratar de tomar coeficientes más bajos, tendremos una mala representación de la misma.

Al igual que en el modelo ARX, todos resultaron dudosos por lo que no son aptos para analizarlos, además que el porcentaje de similitud de los mismos son muy bajos, con lo cual podemos concluir que el coeficiente “na” que tiene el modelo ARX y no el FIR resulta importante para hallar una buena estimación.

#### **4.6 MODELO BOX-JENKINS**

Como se vio en el capítulo 2.4 “Identificación paramétrica”, la fórmula que describe a este proceso es:

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

Para generar este modelo la pantalla que se muestra es:

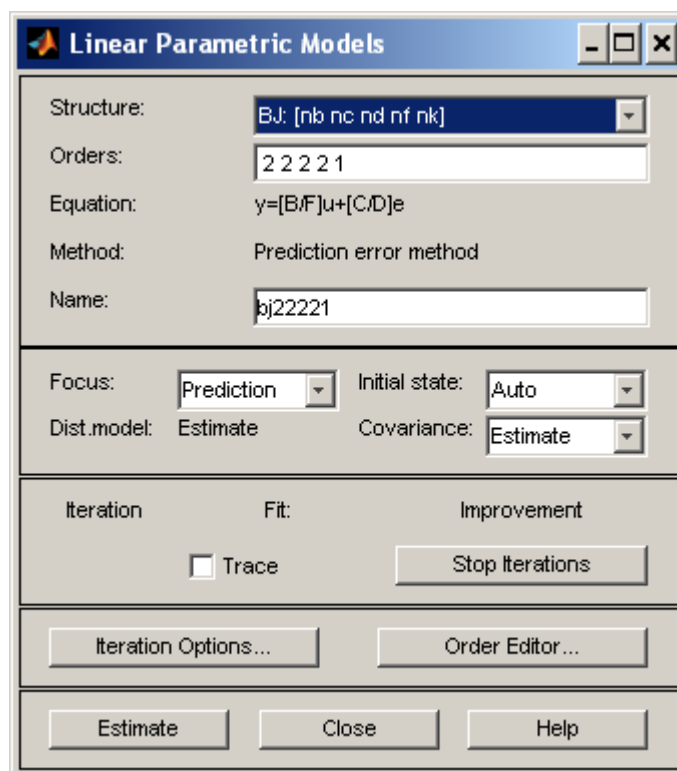
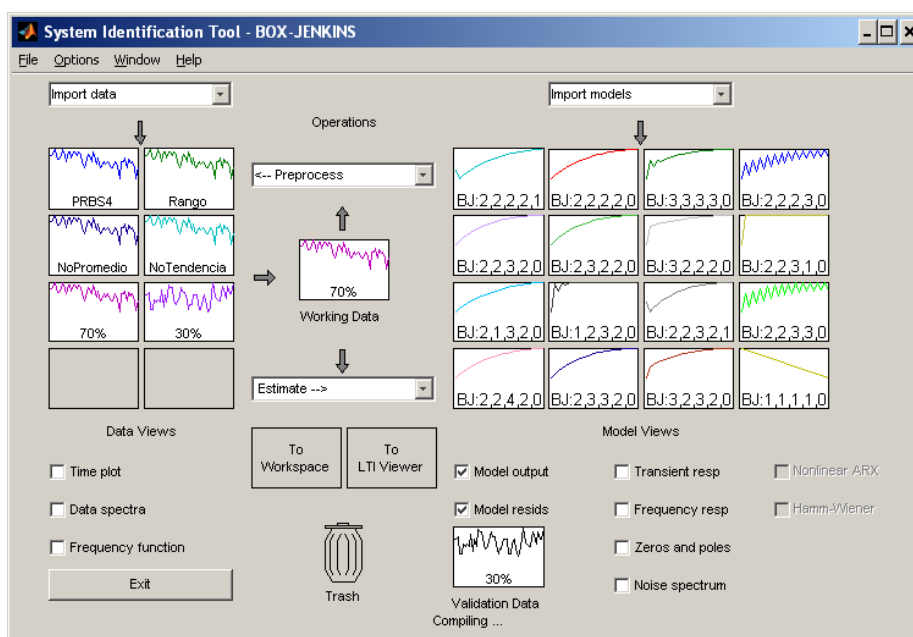
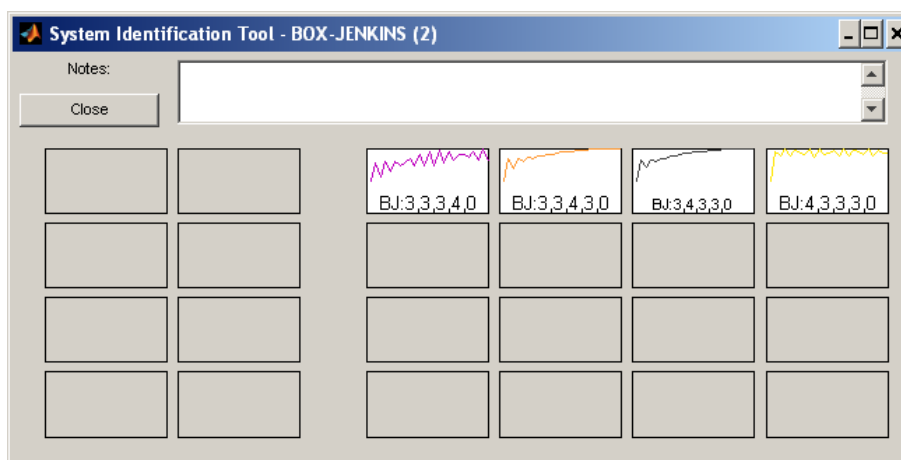


Figura 4.18 Ventana de parámetros del Box-Jenkins.

**Formato del nombre de las señales:** BJ:nb,nc,nd,nf,nk

Del mismo se generaron los siguientes modelos:





**Figura 4.19** Coeficientes estimados del Box-Jenkins.

Al comparar su respuesta con la señal del 30%, el análisis residual y la parsimonia del modelo obtenemos los siguientes niveles de similitud:

**Tabla de Análisis:**

Señal	% de similitud	Nivel de confianza	Función de Transferencia
BJ:2,2,2,2,1	80.70	Incertidumbre	2 polos, 1 cero
BJ:2,2,2,2,0	80.56	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
BJ:3,3,3,3,0	78.96	99% de confianza	3 polos, 3 ceros
BJ:2,2,2,3,0	80.41	Incertidumbre	3 polos, 3 ceros
BJ:2,2,3,2,0	78.79	99% de confianza	2 polos, 2 ceros
BJ:2,3,2,2,0	78.69	99% de confianza	2 polos, 2 ceros
BJ:3,2,2,2,0	80.64	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
BJ:2,2,3,1,0	76.91	Incertidumbre	1 polo, 1 cero
BJ:2,1,3,2,0	80.46	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
BJ:2,1,3,3,0	80.53	Incertidumbre	3 polos, 3 ceros
BJ:2,2,3,2,1	78.88	99% de confianza	2 polos, 1 cero
BJ:2,2,3,3,0	78.74	99% de confianza	3 polos, 3 ceros



BJ:2,2,4,2,0	80.56	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
BJ:2,3,3,2,0	78.87	99% de confianza	2 polos, 2 ceros
BJ:3,2,3,2,0	79.1	99% de confianza	2 polos, 2 ceros
BJ:1,1,1,1,0	80.36	Incertidumbre	1 polo, 1 cero
BJ:3,3,3,4,0	78.74	99% de confianza	4 polos, 4 ceros
BJ:3,3,4,3,0	78.85	99% de confianza	3 polos, 3 ceros
BJ:3,4,3,3,0	78.91	99% de confianza	3 polos, 3 ceros
BJ:4,3,3,3,0	77.71	Incertidumbre	3 polos, 3 ceros

**Tabla 4.5** Resultados de las señales Box-Jenkins.

El modelo Box-Jenkins tiene grandes ventajas, entre las que tenemos el hecho que se halla un modelo del ruido además que los coeficientes que describen la relación de la entrada y el ruido con la salida son distintos, son independientes; pero el problema radica en que al ser tantos coeficientes, se presentan muchas posibles combinaciones.

Nuevamente el análisis consiste en descartar toda señal dudosa y solo tomar en cuenta las que estén dentro del 99% de confianza del análisis residual y encontrándose estos con porcentajes de similitud tan parecidos, tomamos el que esté representado de la manera más sencilla, es decir, con menor coeficientes, dando como resultado que el escogido entre los modelo Box-Jenkins sea BJ:2,2,3,2,1 ya que este tiene una gran ventaja, es el modelo más simple al solo tener 2 polos y un cero manteniendo un buen porcentaje de similitud (78.88%) y estando en el rango del 99% de confianza como se muestra a continuación:

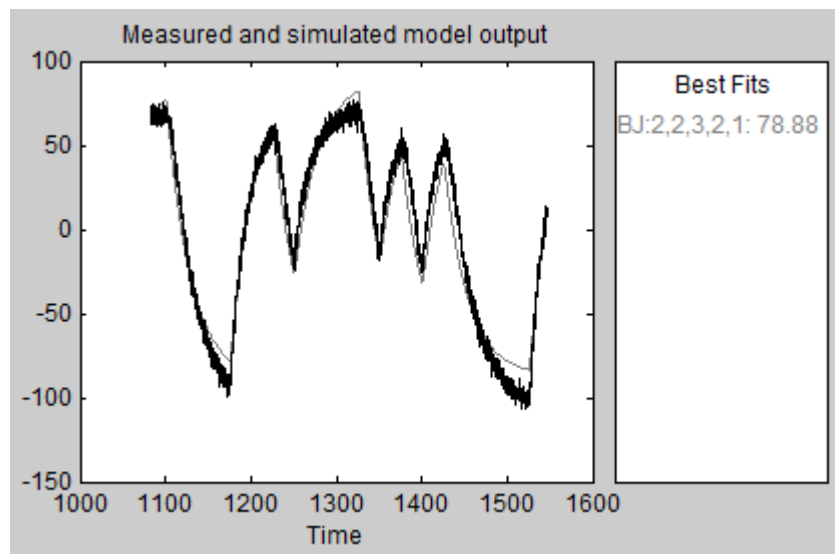


Figura 4.20 Modelo de salida del BJ:2,2,3,2,1

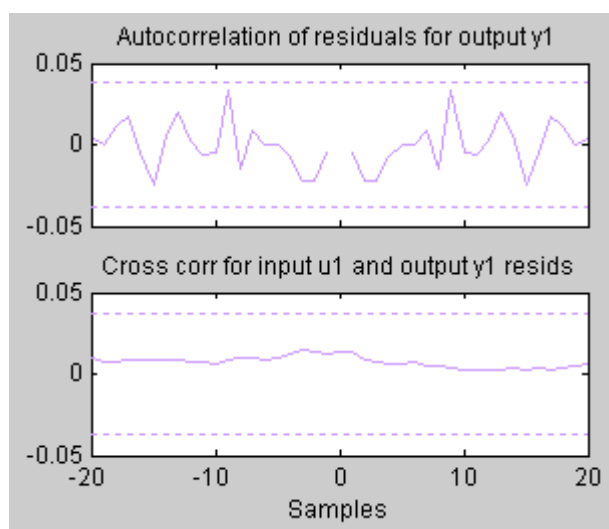


Figura 4.21 Análisis residual del BJ:2,2,3,2,1

## 4.7 OUTPUT ERROR

Como se vio en el capítulo 2.4 “Identificación paramétrica”, la fórmula que describe a este proceso es:

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

La ventana para generar este modelo es la siguiente:

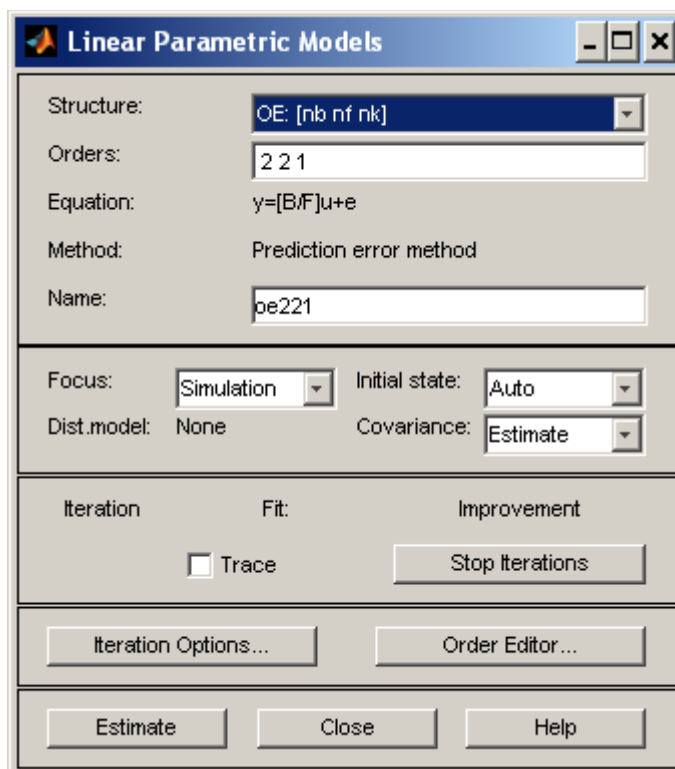
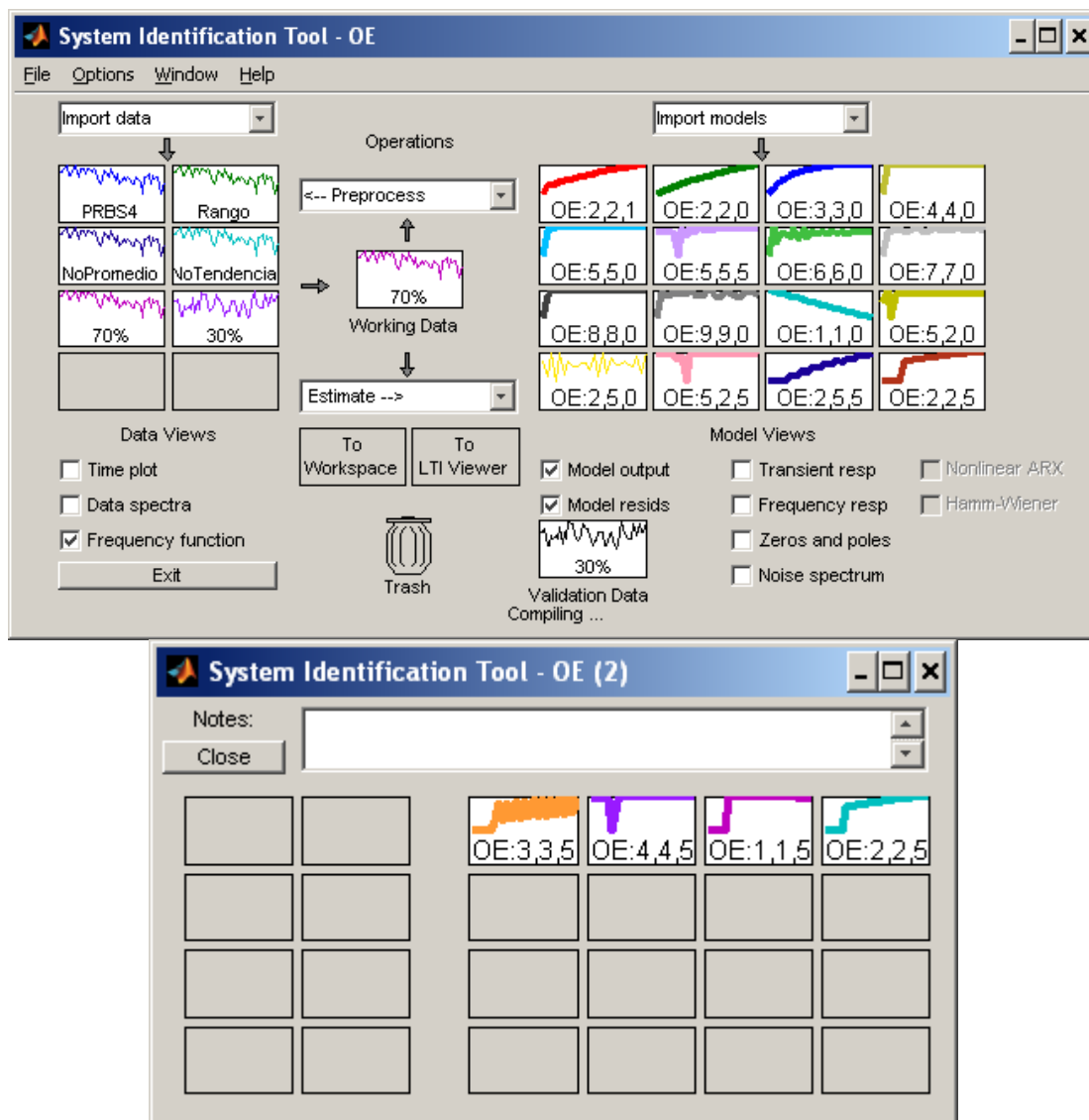


Figura 4.22 Ventana de parámetros del Box-Jenkins.

**Formato del nombre las señales:** OE:nb,nf,nk

De la cual obtuvimos los siguientes modelos:



**Figura 4.23** Coeficientes estimados del Box-Jenkins.

Al comparar su respuesta con la señal del 30%, el análisis residual y la parsimonia del modelo obtenemos los siguientes niveles de similitud:

**Tabla de Análisis:**

<b>Señal</b>	<b>% de similitud</b>	<b>Nivel de confianza</b>	<b>Función de Transferencia</b>
OE:1,1,0	76.43	Incertidumbre	1 polo, 1 cero
OE:2,2,1	76.75	Incertidumbre	2 polos, 1 cero
OE:2,2,0	75.68	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros
OE:3,3,0	76.69	Incertidumbre	3 polos, 3 ceros
OE:4,4,0	75.33	Incertidumbre	4 polos, 4 ceros
OE:5,5,0	76.58	Incertidumbre	5 polos, 5 ceros
OE:5,5,5	76.38	Incertidumbre	5 polos, 4 ceros, retardo
OE:6,6,0	76.38	Incertidumbre	6 polos, 6 ceros
OE:7,7,0	76.37	Incertidumbre	7 polos, 7 ceros
OE:8,8,0	76.35	Incertidumbre	8 polos, 8 ceros
OE:9,9,0	75.48	Incertidumbre	9 polos, 6 ceros
OE:5,2,0	75.94	Incertidumbre	4 polos, 4 ceros
OE:2,5,0	75.53	Incertidumbre	5 polos, 5 ceros
OE:5,2,5	76.15	Incertidumbre	5 polos, 4 ceros, retardo
OE:2,5,5	76.41	Incertidumbre	5 polos, 4 ceros, retardo
OE:2,2,5	75.8	Incertidumbre	2 polos, 1 cero, retardo
OE:3,3,5	76.76	Incertidumbre	2 polos, 2 ceros, retardo
OE:4,4,5	75.5	Incertidumbre	4 polos, 3 ceros, retardo
OE:1,1,5	76.58	Incertidumbre	1 polo, retardo
OE:2,2,5	75.8	Incertidumbre	2 polos, 1 cero, retardo

**Tabla 4.6** Resultados de las señales Output Error.

El Output Error parametriza a la entrada y al ruido por separado, pero no se le asignan coeficientes para el modelo del ruido, lo cual en nuestro caso es un problema ya que el mismo tiene una fuerte presencia sobre la planta, permitiéndonos deducir que este método no es muy conveniente para describir nuestra planta.

En vista que todos estos modelos estuvieron fuera del rango de confianza, no son buenos candidatos, por lo que no es necesario analizar a los mismos pues quedan descartados.

#### ***4.8 ELECCIÓN DEL MODELO MÁS CONVENIENTE***

Se realizaron ya diferentes métodos de modelamiento paramétrico, dando como resultado:

- **ARX:** Modelo fuera del rango de confianza.
- **ARMAX:** Modelo aceptable.
- **FIR:** Modelo fuera del rango de confianza.
- **BOX-JENKINS:** Modelo aceptable.
- **OUTPUT ERROR:** Modelo fuera del rango de confianza.

De los modelos aceptables escogidos tenemos:

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>% de similitud</b>	<b>Nivel de confianza</b>	<b>Número de Polos</b>	<b>Número de Ceros</b>
ARMAX	ARMAX:3,2,3,1	78.63	99% de confianza	3	2
BOX-JENKINS	BJ:2,2,3,2,1	78.88	99% de confianza	2	1

**Tabla 4.7** Modelos más convenientes.

Como se puede apreciar de la tabla, estos dos modelos tienen un porcentaje de similitud muy parecido, por lo que la decisión de cuál será el posible modelamiento que representará a la planta dependerá de cuál es el más sencillo, y al ver que el modelo BOX-JENKINS tiene menor número de polos y de ceros, se convierte en el modelo más deseado para representar a la planta de presión.

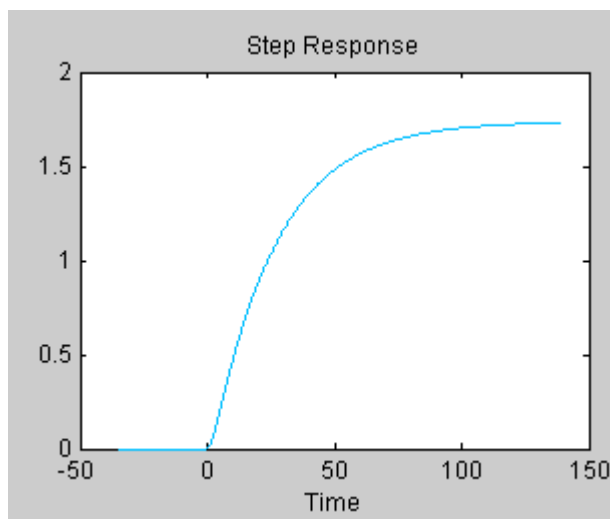
#### **4.8.1 COMPROBACIÓN DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1**

De todos los modelos generados, el más conveniente resultó ser el BJ:2,2,3,2,1; con lo cual se procederá a realizársele una última comprobación a través de su respuesta al escalón.

Compararemos la respuesta al escalón de este modelo con el de la planta real, esperando que tengan parámetros muy parecidos, dándonos aún más confianza que este es una buena representación del sistema.

### 4.8.2 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL BJ:2,2,3,2,1

La respuesta al escalón de este modelo se muestra a continuación:



**Figura 4.24** Respuesta al escalón del BJ:2,2,3,2,1.

La comparación con la respuesta escalón de la planta real es la siguiente:

<b>Respuesta al escalón</b>		
	<b>BJ:2,2,3,2,1</b>	<b>Planta Real</b>
<b>K</b>	1.76	1.67
<b>Tao</b>	28	20
<b>Ts</b>	110	92

**Tabla 4.8** Respuesta al escalón de la BJ:2,2,3,2,1.

Con lo cual podemos apreciar que los parámetros de la respuesta al escalón son cercanos, dándonos la confianza para afirmar que el modelo BJ:2,2,3,2,1 es una buena aproximación del sistema.



### 4.8.3 COEFICIENTES DEL MODELOBJ:2,2,3,2,1

Los coeficientes en el plano discreto de este modelo son:

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

- $B_{(z)} = -0.002706 z^{-1} + 0.003426 z^{-2}$
- $C_{(z)} = 1 - 1.875 z^{-1} + 0.8811 z^{-2}$
- $D_{(z)} = 1 - 2.105 z^{-1} + 1.228 z^{-2} - 0.1228 z^{-3}$
- $F_{(z)} = 1 - 1.883 z^{-1} + 0.8833 z^{-2}$

## 4.9 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE LABVIEW

Además de MatLab, poseemos otra herramienta capaz de hallar modelos paramétricos, LabView.

Lo que se presenta a continuación, es un análisis comparativo de ambos programas para poder apreciar las ventajas y desventajas que poseen en el campo de la identificación de sistemas:

- En MatLab existe una aplicación para generar señales PRBS, RBS y multi-sinusoidales, (Input Design GUI), la cual no se encuentra en LabView, produciéndonos un problema al momento de realizar el análisis no paramétrico.
- En el momento de hallar la función de transferencia de la planta mediante algún método paramétrico, si la misma tenía mayor orden en

el numerador que en el denominador, en MatLab obteníamos un mensaje de error que nos impedía hacer análisis posteriores, mientras que en LabView no se presentó ninguna prohibición por este caso.

- En el método paramétrico MatLab le da la libertad al usuario de escoger el rango de error además del número de iteraciones (dependiendo del método), mientras que en LabView estas opciones no eran acceso permitido.
- La función de transferencia obtenida en MatLab, si es el caso, representa el retardo como una función exponencial, mientras que en LabView no, representa al sistema solo con polos y ceros.

#### **4.9.1 CONDICIONES DE LA IDENTIFICACIÓN**

Como es normal, la identificación por LabView debe tener las mismas condiciones que las de MatLab, es decir:

- Las muestras de entrada y salida deben ser las mismas.
- El método de identificación paramétrica debe ser igual.
- El tiempo de muestreo debe ser de 0.1 segundos.

Para esto, las muestras fueron almacenadas en dos documentos de Excel diferentes, para la entrada y la salida respectivamente.

## 4.9.2 DIAGRAMA DE BLOQUES.

El diagrama de bloques de LabView, que es donde se ejecutan los procesos, se muestra a continuación:

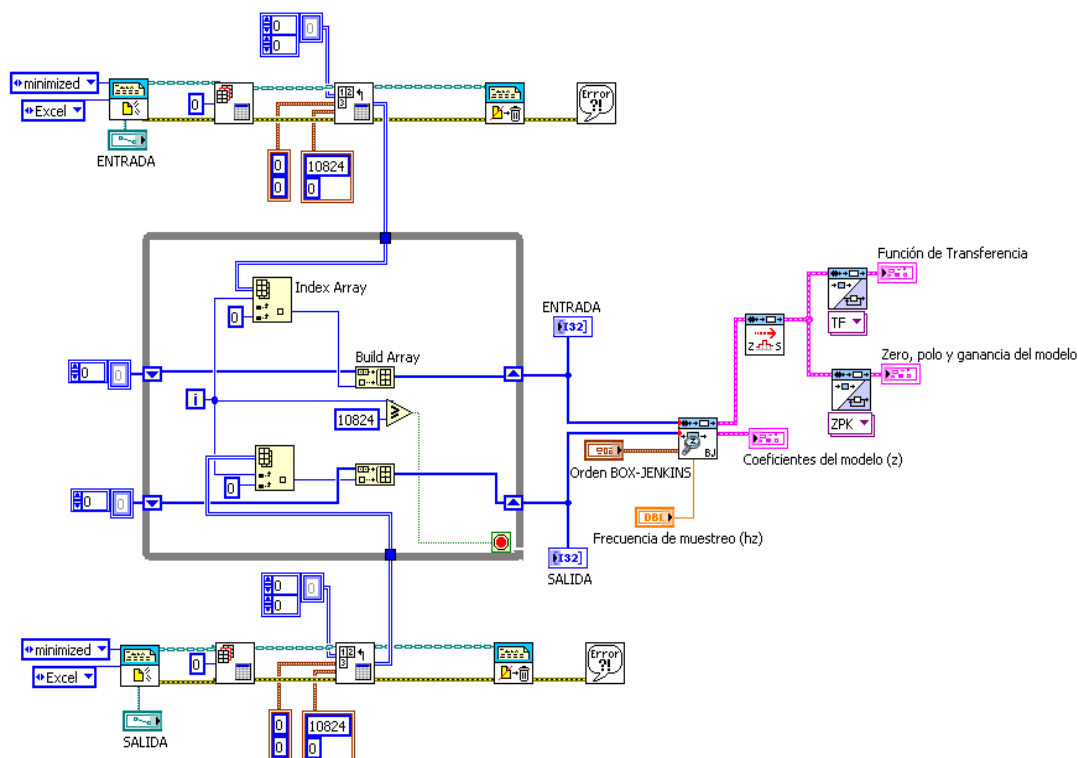


Figura 4.25 Diagrama de bloques.

En el mismo lo que se hace es:

1. Obtener las muestras de Excel.
2. Almacenar las muestras en dos arreglos de una dimensión.
3. Graficar las muestras.
4. Obtener la parametrización del sistema mediante el método escogido.
5. Convertir este modelo de discreto a continuo.
6. Mostrar los coeficientes, la ganancia, polos y ceros de la función de transferencia.

#### 4.9.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL DIAGRAMA DE BLOQUES

Para poder realizar todo lo que se mencionó en el subtítulo anterior, contamos con:

##### 4.9.2.1.1 *Obtener las muestras de excel*

**Nuevo reporte:** Accede a un documento, puede ser de Excel.



**Figura 4.26** Nuevo reporte.

**Ruta:** Se introduce la dirección del documento para poder buscarlo.



**Figura 4.27** Ruta.

**Hoja de trabajo de Excel:** Ingresa a una hoja de trabajo del documento de Excel ya seleccionado.



**Figura 4.28** Hoja de trabajo de Excel.

**Datos de Excel:** Almacena los valores acumulados de Excel (se le indica las celdas a tomar).



Figura 4.29 Datos de Excel.

**Disposición del reporte:** Elimina cualquier cambio que se haya realizado por la toma de los datos.



Figura 4.30 Disposición del reporte.

**Manejador de error:** Muestra un mensaje de error en caso de darse el mismo.



Figura 4.31 Manejador de error.

#### 4.9.2.1.2 *Almacenar las muestras en dos arreglos de una dimensión*

**Lazo repetidor:** Repite el proceso dentro del él hasta que la condición del mismo sea falsa.



Figura 4.32 Lazo repetidor.

**Índice del arreglo:** Obtiene un valor almacenado en el arreglo indicándole la posición del mismo.



Figura 4.33 Índice del arreglo.

**Construye arreglo:** Une elementos o arreglos para generar un solo arreglo a su salida.



Figura 4.34 Construye arreglo.

**Mayor o igual:** Compara dos valores, si el primero es mayor o igual al segundo genera en su salida “Verdadero”, sino “Falso”.



Figura 4.35 Mayor o igual.

#### 4.9.2.1.3 Graficar las muestras

**Graficador de señales:** Grafica valores (normalmente se usa con arreglos).

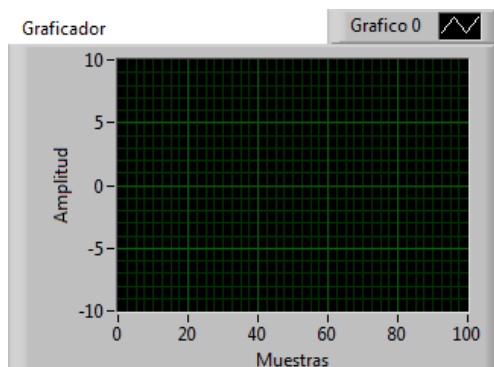


Figura 4.36 Graficador de señales.

#### 4.9.2.1.4 Obtener la parametrización del sistema mediante el método escogido

**Estimador del modelo:** Parametriza una planta, necesita las muestras de entrada, salida, y la frecuencia de muestreo; genera los coeficientes del modelo y la función discreta del mismo.



Figura 4.37 Estimador del modelo.

#### 4.9.2.1.5 Convertir este modelo de discreto a continuo

**Convertidor de discreto a continuo:** Como su nombre lo indica, transforma un modelo de discreto a continuo.



Figura 4.38 Convertidor de discreto a continuo.

#### 4.9.2.1.6 *Mostrar los coeficientes, la ganancia, polos y ceros de la función de transferencia*

**Representación del Modelo:** Puede representar al sistema mediante los coeficientes de la función de transferencia o mediante la ganancia, polos y ceros de la misma.



**Figura 4.39** Representación del modelo.

### 4.9.3 PANEL FRONTAL

Con lo realizado en el diagrama de bloques, se muestra el resultado del mismo a través del panel frontal:



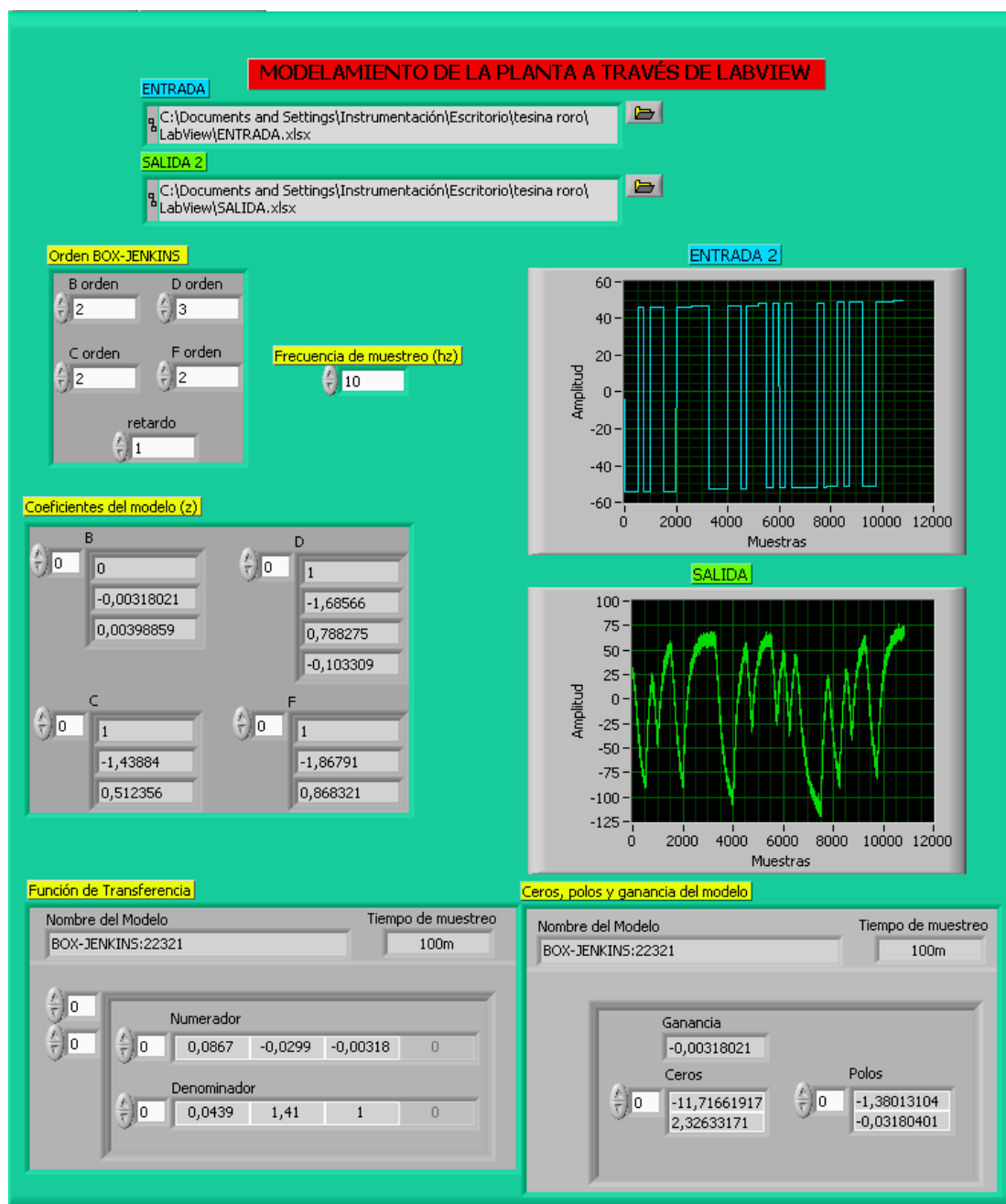


Figura 4.40 Panel frontal.

Obteniendo así la función de transferencia de nuestro proceso a través de LabView.

#### 4.10 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES REALIZADAS EN MATLAB Y LABVIEW

A continuación se tomará la mejor señal de cada método paramétrico para comparar sus resultados a través de los dos programas:

	MatLab	LabView
	<b>ARX:3,1,0</b>	
<b>Función de Transferencia</b>	<b>3 polos, 3 ceros</b>	<b>3 polos, 3 ceros</b>
<b>Ku</b>	1.74	1.73
<b>Tao</b>	29.3	29.0
<b>Ts</b>	116	115
	<b>ARMAX:3,2,3,1</b>	
<b>Función de Transferencia</b>	<b>3 polos, 2 ceros</b>	<b>4 polos, 4 ceros</b>
<b>Ku</b>	1.75	1.78
<b>Tao</b>	27.7	27.7
<b>Ts</b>	103	106
	<b>BJ:2,2,3,2,1</b>	
<b>Función de Transferencia</b>	<b>2 polos, 1 cero</b>	<b>2 polos, 2 ceros</b>
<b>Ku</b>	1.79	1.97
<b>Tao</b>	29.3	32.1
<b>Ts</b>	111	124
	<b>OE:1,1,5</b>	
<b>Función de Transferencia</b>	<b>1 polo, retardo</b>	<b>1 polo, 1 cero</b>
<b>Ku</b>	1.72	1.73
<b>Tao</b>	27.7	27.5
<b>Ts</b>	108	109

**Tabla 4.9** Comparación de señales en MatLab y LabView.

*Nota: En vista que los resultados obtenidos a través del método paramétrico "FIR" fueron tan imprecisos, no se lo tomará en cuenta para este análisis.*

De la tabla anterior, apreciamos que los coeficientes hallados por ambos programas son muy parecidos y esto no es de sorprenderse, ya que estos partieron con las mismas condiciones, la razón por la cual no fueron exactos, se debió principalmente a que en MatLab se puede indicar el número de iteraciones para la parametrización, a diferencia de LabView, además que en MatLab se permite representar el retardo del sistema mediante una función exponencial a diferencia de LabView, que representa al sistema sólo a través de polos y ceros.

En vista que ambos sistemas tienen diferencias despreciables, se procederá a tomar el modelo obtenido a través de MatLab, pues como ya se mencionó anteriormente, en el mismo podemos disminuir libremente el error para asegurar un sistema aún más preciso.

#### **4.11 MODELO DE LA PLANTA (BJ:2,2,3,2,1)**

Como ya se mencionó anteriormente, la mejor representación de la planta es la Box-Jenkins (nb=2, nc=2, nd=3, nf=2, nk=1), obtenida a través de MatLab.

La representación matemática de la planta de presión queda como sigue:

$$G = \frac{-0.032682 (s-2.34)}{(s+1.205) (s+0.03556)} \quad \text{ó} \quad G = \frac{-0.032682 s+0.07649}{s^2+1.24 s+0.04285}$$

**Donde:**

**G:** Función de transferencia de la planta de presión.

## CAPITULO V

### 5.1 ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una vez seleccionado el modelo en el dominio de la frecuencia, de la planta de presión (Capítulo 4), se procede a diseñar un controlador sencillo y apropiado para variaciones en el punto de referencia (Servo-control). Para este diseño se usará como herramienta a Sisotool, de Matlab.

Como se observa en la función de transferencia modelada, nuestro proceso consta de dos polos reales, los cuales describen la dinámica del proceso. Esta dinámica se refiere al tiempo en que la planta se estabiliza ante un cambio en su entrada y si es sobre-amortiguada o sub-amortiguada. En esta planta existe un polo dominante el cual se encargara de definir el tiempo que demora la planta en estabilizarse. En este caso el cero no afecta mucho a la dinámica del sistema, ya que su localización está bien alejada con respecto a su polo dominante. Normalmente un cero adelanta el tiempo de estabilización y si está localizado en la parte positiva del lugar geométrico de las raíces causa un efecto contrario.

La ganancia del sistema sería, según la función de transferencia:

$$G = \frac{-0.032682 (s - 2.34)}{(s + 1.205) (s + 0.03556)}$$

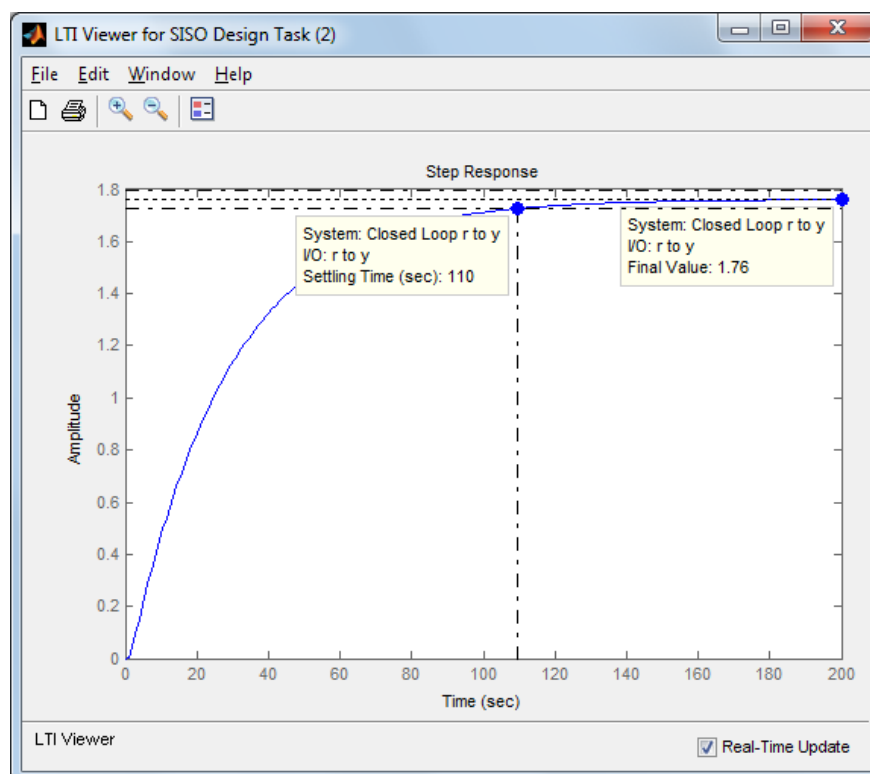
$$K = \frac{-0.032682(-2.34)}{(1.205) (0.03556)} = 1.784$$

El tiempo de estabilización sería, asumiendo que tiene dominancia de primer orden y que el cero no aporta con casi nada en adelanto retraso de:

$$\tau = \frac{1}{0.03556} = 28.12 \text{ seg}$$

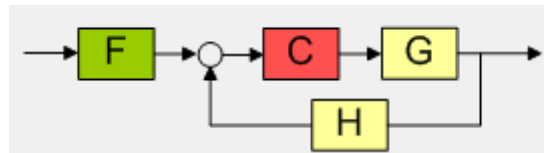
Por lo que se estabilizaría alrededor de 4 veces tao, lo que quedaría que se estabilizará en 112.48 segundos.

Se muestra en la siguiente gráfica realizada en sisotool la misma planta, por lo que se podrá constatar lo antes explicado:



**Figura 5.1** Respuesta al escalón del modelo en lazo abierto (Sisotool).

Sisotool trabaja con el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 5.2** Diagrama de bloques de Sisotool.

Para obtener el gráfico anterior a  $F$  se le dio el valor de 1, donde  $F$  es un Filtro;  $C$  igual a 1, donde  $C$  es el Controlador,  $G$  es la función de transferencia de nuestra planta y  $H$  es la función de transferencia del transductor o realimentación, que para este caso es un valor de cero para simular el lazo abierto.

Se observa claramente que este modelo se parece bastante al escalón original realizado a la planta, ya que se observa sus características de tiempo de estabilización y ganancia (Ver Capítulo 3.4 “Análisis de la Planta”).

## **5.2 CRITERIOS DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR**

Como queremos realizar un controlador que responda ante los cambios de entrada y que no tenga un sobre nivel porcentual elevado, daremos los siguientes criterios:

Primero es necesario que el error de estado estacionario sea cero, pues nos interesa que la planta actúe en el punto de referencia que se le especifique. Así mismo no deseamos que tenga un sobre nivel porcentual elevado, por lo que para este caso podría ser no más del 15%, lo cual también permitirá tratar de encontrar un tiempo adecuado de estabilización.

Se escogió un tiempo de estabilización 50 segundos ya que la planta en lazo abierto es de aproximadamente 110 segundos, con lo cual sería un reto lograr disminuir a más del 50%.

### 5.3 PASOS PARA OBTENER EL CONTROLADOR

#### Paso1:

En el diagrama de bloques con el que trabaja sisotool verificamos que:

F=1; C=1; G=Planta; H=1 (para que exista retroalimentación).

#### Paso 2:

Agregar un integrador para cumplir con el error estacionario de cero, como se muestra en la figura:

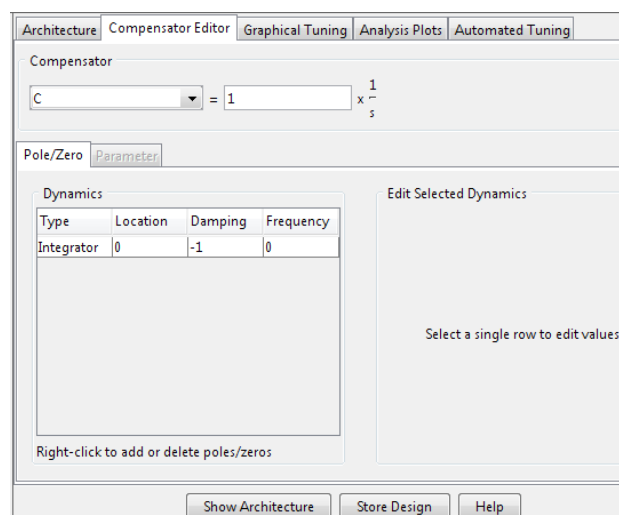
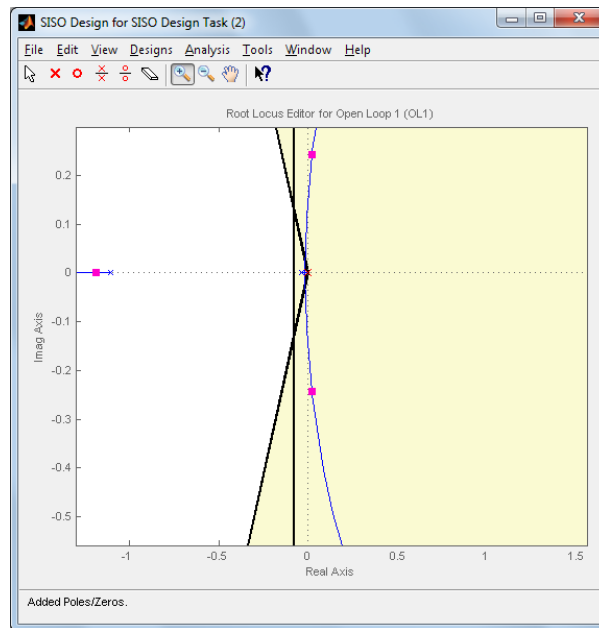


Figura 5.3 Herramientas para la Estimación y Control (Sisotool).

**Paso 3:**

En el lugar geométrico de las raíces ingresar los otros requerimientos (Sobre nivel porcentual y  $T_s$ ):



**Figura 5.4** Ventana de Diseño de Sisotool (a).

**Paso 4:**

Agregar un cero para lograr que el lugar geométrico de las raíces se intercepte con los requerimientos para que así cumpla las especificaciones; luego poner las raíces en las intersecciones:



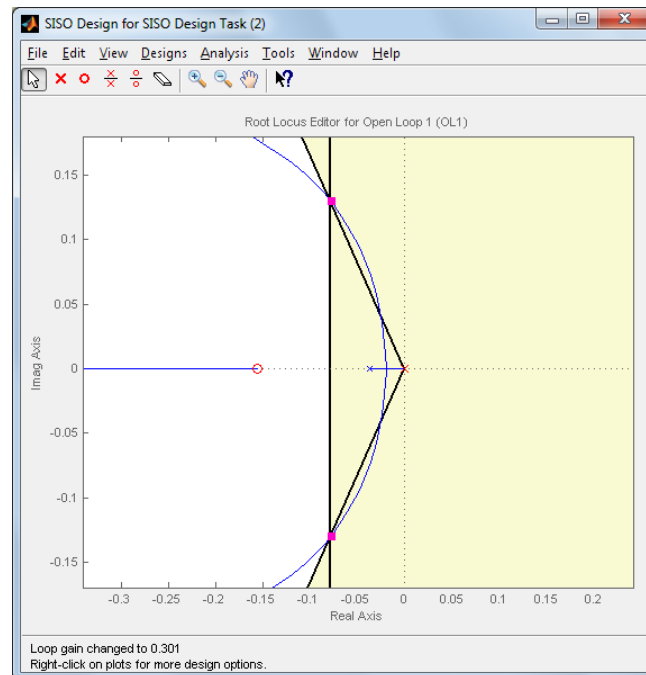


Figura 5.5 Ventana de Diseño de Sisotool (b).

Se muestra a continuación la gráfica de la respuesta al escalón:

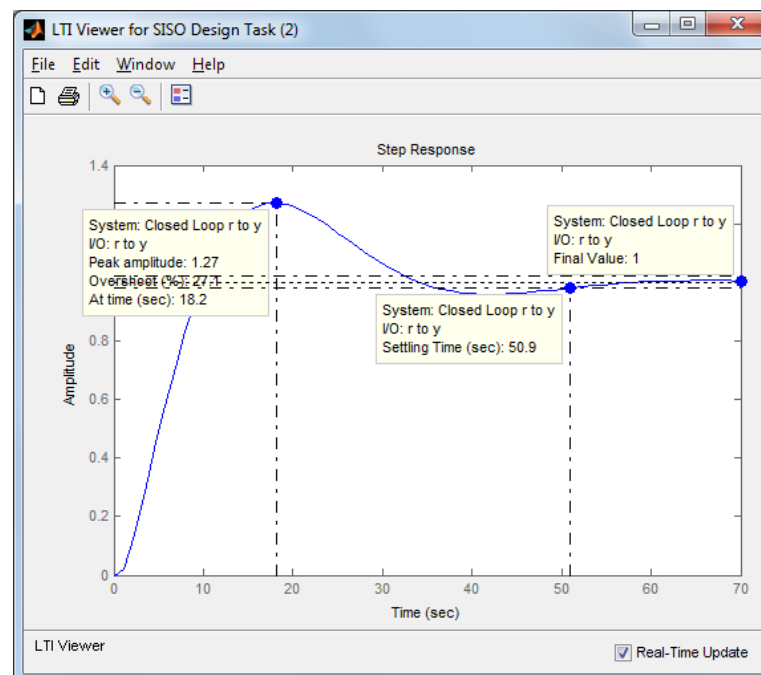
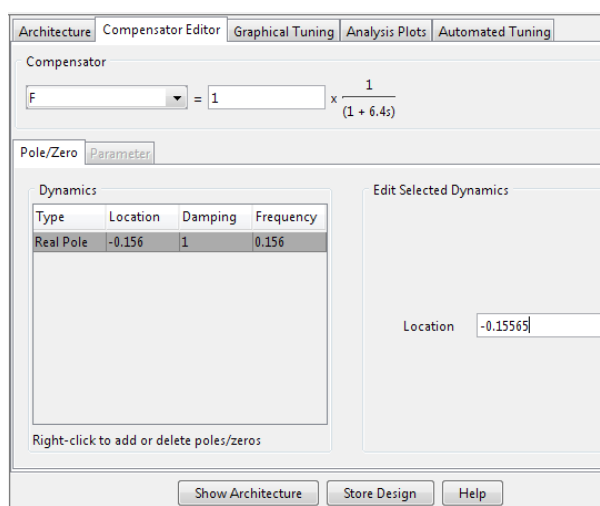


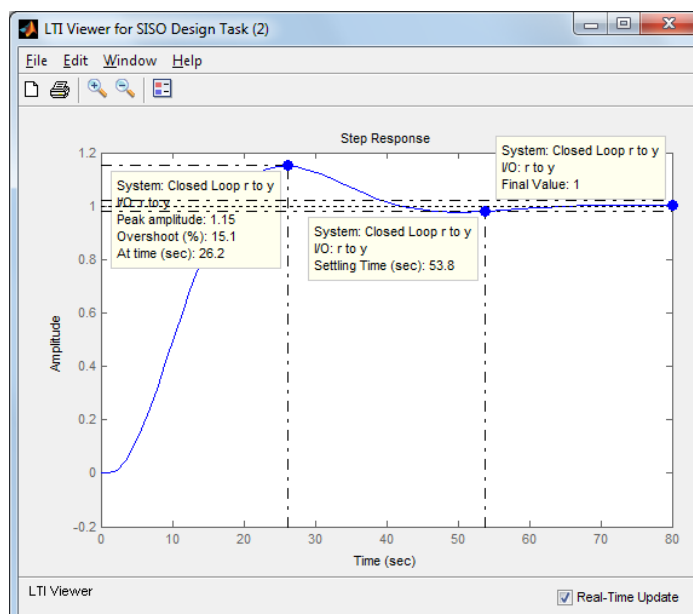
Figura 5.6 Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado (a).

Al observar como es la respuesta al escalón vemos que cumple con todas las características excepto por el sobre nivel porcentual, el cual se debe al cero que agregamos en el lugar geométrico de las raíces. Para disminuir este efecto se ingresa un pre filtro, que consiste en agregar un polo en la sección de filtro localizado en el mismo lugar donde se agrego el cero, para así disminuir su efecto:



**Figura 5.7** Herramientas para la Estimación y Control (Filtro).

Entonces la respuesta al escalón final queda:



**Figura 5.8** Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado (b).

Por lo tanto con la arquitectura mostrada en la figura 5.2 queda:

$$F = 0.15565 \times \frac{1}{(s + 0.156)}$$

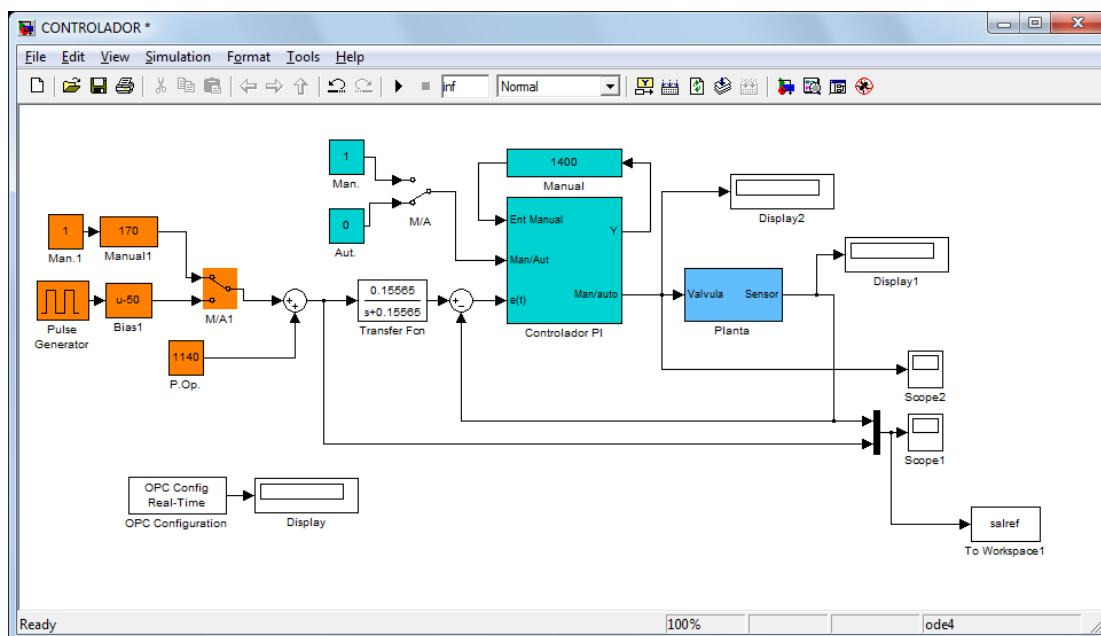
$$C = 1.9346 \times \frac{(s + 0.156)}{s}$$

G es la planta y H=1.

**Nota:** el controlador tiene la siguiente forma en sisotool:  $k_p + k_i(1/s) + k_d(s)$

Por lo tanto:  $K_p=1.9346$  y  $K_i=0.3018$ .

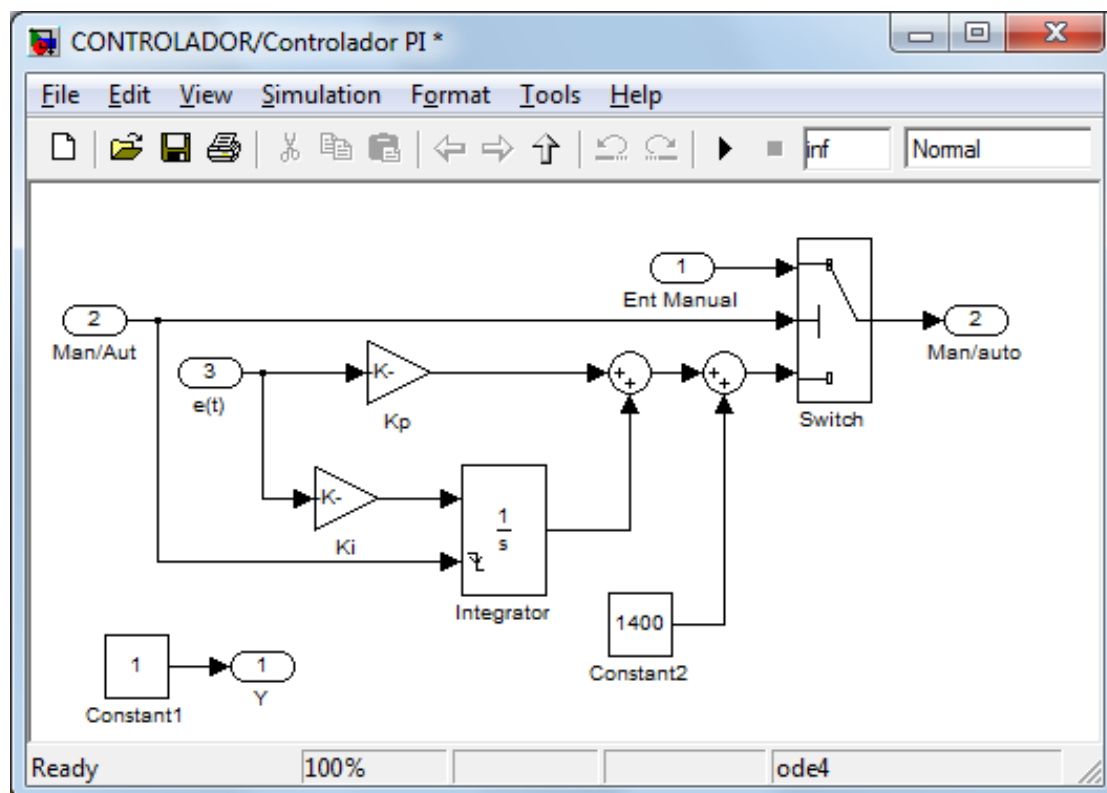
## 5.4 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CONTROLADOR



**Figura 5.9** Diagrama de Bloque del Sistema de control de la planta de regulación de Presión.

La parte naranja es la señal de referencia que se le estará ingresando al sistema, la cual realmente es corriente de 4 a 20 mA. representados entre 820 y 4094 bits, donde nuestro punto de operación sería de 0,59 bar (1140 bits), y se le hará cambios de referencia para ver cómo responde esta planta. (Ver Tabla 3.3 y 3.4).

El controlador (gráfica en azul) es:



**Figura 5.10** Diagrama de Bloque del Controlador de la planta de regulación de Presión.

Se observa claramente que es un controlador PI donde tiene su respectiva constante proporcional e integral que fueron halladas anteriormente. Sin embargo se observa también que puede darse el cambio de manual automático, así como también que el bloque integrador tiene la opción de reiniciarse con cada flanco negativo.

## 5.5 SIMULACIÓN

Con esta simulación se puede tener una idea de los resultados reales. Es por esto que en esta simulación se añade lo que podría ser el efecto del ruido o perturbaciones en el sistema, mediante el modelo hallado en el capítulo 4.11.

Se uso el mismo diagrama de controlador con la excepción que en vez de usar la planta se uso el modelo y todo normalizado a un punto de operación de 0.

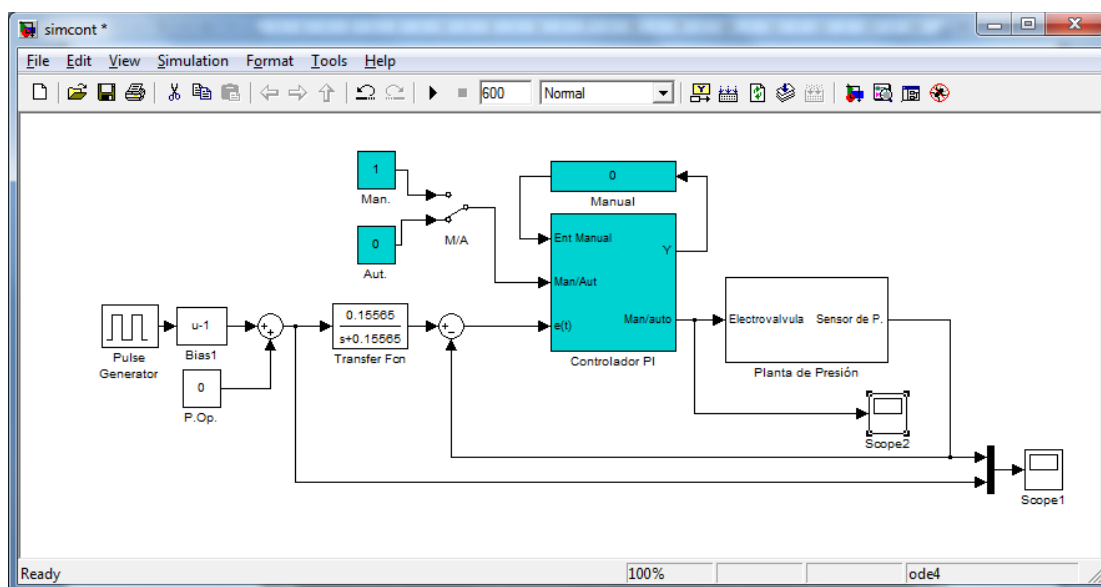


Figura 5.11 Diagrama de Bloque de la Simulación del modelo.

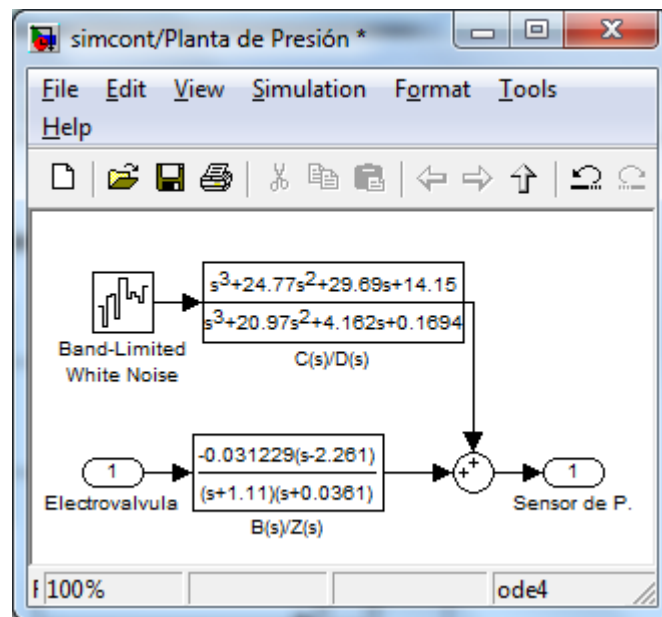


Figura 5.12 Diagrama de Bloque del Modelo hallado en el capítulo 4.11.

En la siguiente gráfica se muestra

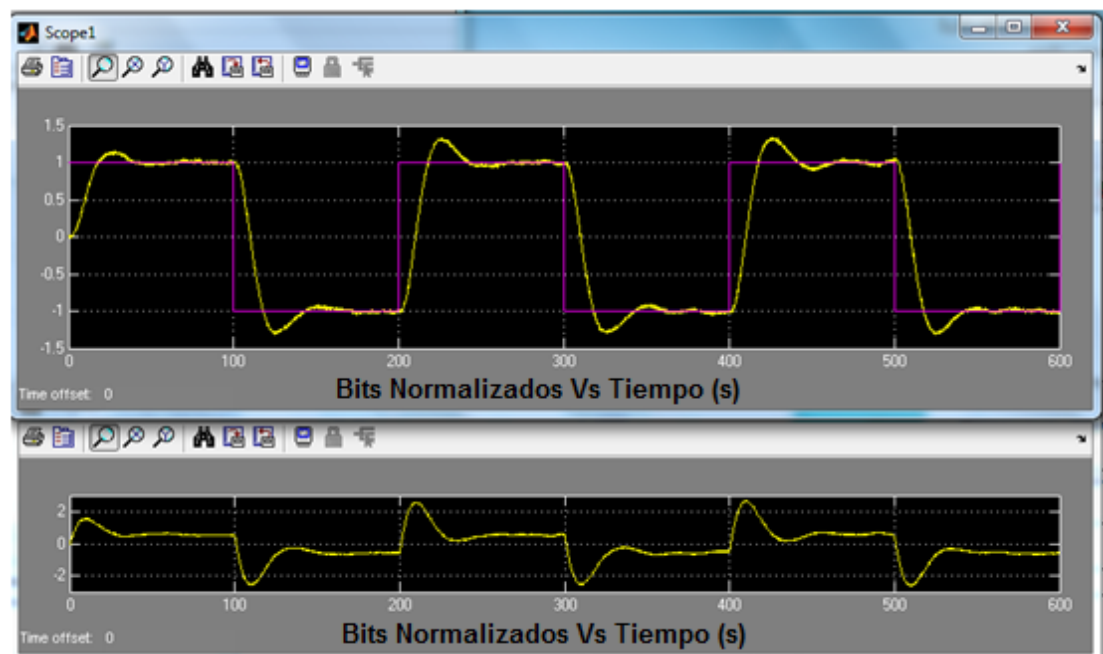


Figura 5.13 Visor de la señal de salida con su referencia y la señal que sale del controlador.

Esta grafica muestra como el simulado me da una expectativa de lo que debo esperar al realizar en práctica mi diseño de controlado y me da una pauta para así poder, de ser necesario, tomar medidas correctivas antes de llevarlo a lo real.

Se observa que cumple con las especificaciones especificadas, sin embargo claramente se aprecia como el efecto del ruido está constantemente en la planta permitiéndola oscilar poco alrededor de su punto de referencia.

## 5.6 RESULTADOS REALES

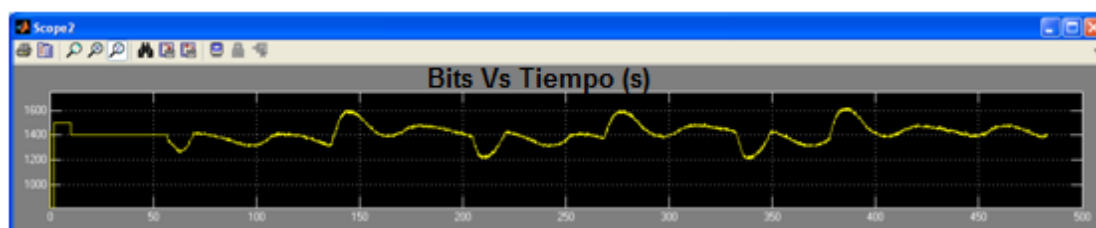
Se muestra la gráfica del “Scope 1”, donde se visualiza la salida de la planta y como responde ante cambios de referencia. Así mismo se visualiza el scope 2 donde se muestra como actúa el controlador y se observa claramente que no tiene problemas de saturación debido al punto de operación donde trabajamos.



Figura 5.14 Visor de la señal de salida con su referencia (Real).



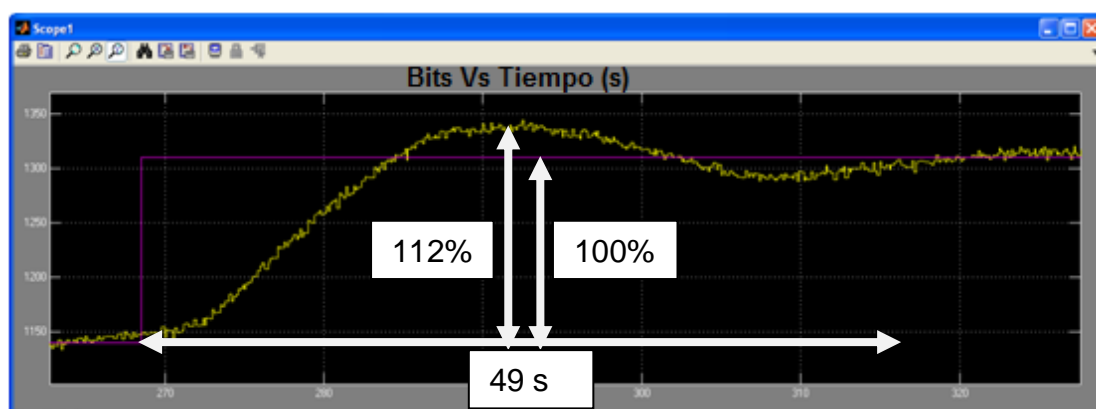
Se muestra como el control PI hace su trabajo permitiendo que la planta busque siempre su punto de referencia y no tenga un sobre nivel porcentual elevado para estos cambios.



**Figura 5.15** Visor de la señal que sale del controlador (Real).

La señal del controlador actúa entre 1400 y 1500 bits, como realmente esperábamos ya que este era el punto de operación cuando se trabajaba en lazo abierto.

Realizando un acercamiento del "Scope 1" se puede observar que cumple con el sobre nivel Porcentual no mayor 15% un tiempo de estabilización de aproximadamente 50 segundos que fue lo especificado al momento de hallar el controlador.



**Figura 5.16** Visor de la señal de salida con su referencia ampliada (Real).

## **5.7 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR**

Basto un controlador PI para el diseño del mismo, ya que si se hubiese dado más importancia en mejorar el tiempo de respuesta, se hubiese podido agregar una tercera variable que es la parte derivativa, que para nuestro caso no fue necesaria.

El controlador hallado cumple a cabalidad con las especificaciones dadas al momento de su diseño, sin embargo se ve que el ruido si afecta un poco más en la práctica que en lo simulado, esto se debe a que las perturbaciones externas que tiene este proceso son más complejas de simular.

Este controlador hallado por nosotros lo consideramos lo suficiente bueno para lo que nosotros requeríamos y concluimos que el procedimiento con el que se obtuvo este es apropiado, así como que la herramienta de Sisotool de Matlab es muy útil al momento de hallar un controlador.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones:

1. Con la identificación no paramétrica podemos comprobar que existe una relación entre la señal de entrada y de salida, lo cual nos permite continuar con los siguientes procesos eliminando las posibilidades de hacer una mala identificación.
2. MatLab cuenta con buenas herramientas para hacer el análisis no paramétrico pues en la misma tenemos el "Input Design Gui" con el que podemos generar las señales de entrada de una manera muy sencilla.
3. En el análisis no paramétrico es necesario que la señal de entrada logre variar bruscamente el comportamiento del actuador para que este logre trabajar de forma adecuada, ya que a cambios mínimos este respondía insatisfactoriamente.
4. Tanto en MatLab como en LabView se pudo hacer el análisis paramétrico, pues ambos contaban con los elementos necesarios, obteniendo de estos resultados muy parecidos.
5. Basándonos en las características de los modelos paramétricos se puede escoger cuál de estos es el más apropiado para nuestra planta ya que los mismos caracterizan de manera única al proceso.

6. LabView resulta ser un programa más amigable al usuario que MatLab, con la desventaja que en el primero no se puede cambiar el error de estimación de los métodos paramétricos.
7. La mejor parametrización de la planta de regulación de presión fue la Box-Jenkins, ya que esta parametrizaba tanto a la señal de entrada como al ruido por separado.
8. Como la planta de presión poseía dos tanques de almacenamiento, se intuía que la función de transferencia encontrada sería de segundo orden, comprobando esto posteriormente.
9. La herramienta Sisotool demostró ser de mucha ayuda al momento de diseñar el controlador ya que en la misma se apreciaba de forma sencilla como debería estar constituido el mismo para lograr el comportamiento deseado de la planta.
10. Se logró identificar a la planta de regulación de presión mediante un modelo matemático que describe muy bien su comportamiento real.
11. El controlador hallado mediante el método de Sisotool de Matlab, fue apropiado para realizar el control en la planta con las especificaciones dadas, ya que como se observó en los resultados reales, la planta de regulación de presión respondió como se esperaba, por lo que se concluye que bastó un PI para obtener un buen control de este proceso permitiendo así un error estacionario de cero.

## Recomendaciones

1. Es importante tener en claro todos los conocimientos teóricos con respecto a la identificación de sistemas para dar una explicación apropiada de los procedimientos y resultados de la misma.
2. Se recomienda tratar de obtener la mayor cantidad de datos de la planta como la constante de tiempo, ganancia, tiempos muertos, entre otros. El obtener correctamente estos valores servirán para procedimientos posteriores como por ejemplo, obtener una correcta frecuencia de muestreo.
3. Previa a toda identificación se debe realizar un análisis no paramétrico para comprobar que exista una relación entre la supuesta señal de entrada y de salida.
4. Es preferible elegir una señal que describa bien a la planta bajo un modelo sencillo a otra que la describa un poco mejor pero con un modelo mucho más complejo.

# ANEXOS

## UNIDADES DE PRESIÓN

	psi(1)	in. H <sub>2</sub> O(2)	in. Hg(3)	kgf/cm <sup>2</sup> (4)	atm(5)	kPa(6)	mbar(7)
psi(1)	1	27.680	2.036	0.0703	0.680	6.8947	68.947
in. H <sub>2</sub> O(2)	3.61×10 <sup>-2</sup>	1	7.3554×10 <sup>-2</sup>	2.54×10 <sup>-3</sup>	2.458×10 <sup>-3</sup>	0.2491	2.491
in. Hg(3)	0.4912	13.596	1	0.0346	0.0334	3.3864	33.864
kgf/cm <sup>2</sup> (4)	14.224	393.7	28.910	1	0.9678	98.07	980.7
atm(5)	14.66	406.7	29.922	1.033	1	101.3	1013
kPa(6)	0.14504	4.0147	0.2953	0.0102	9.869×10 <sup>-3</sup>	1	10.000
mbar(7)	0.01450	0.40147	0.02953	1.02×10 <sup>-3</sup>	9.869×10 <sup>-4</sup>	0.100	1

(1) psi: libras por pulgada cuadrada, (2) in.: pulgadas, a 39°F; (3) a 32°F; (4) kgf: Kilogramo-fuerza  
(5) atm: atmósfera; (6) kPa: kilo-pascales; (7) mbar: milibar.

**TABLA DE DE LA TRANSFORMADA Z Y S**

	$X(s)$	$x(t)$	$x(kT)$ ó $x(k)$	$X(z)$
1			Delta Kronecker $\delta_0(k) = \begin{cases} 1, k=0 \\ 0, k \neq 0 \end{cases}$	1
2			$\delta_0(n-k) = \begin{cases} 1, n=k \\ 0, n \neq k \end{cases}$	$z^{-k}$
3	$\frac{1}{s}$	1(t)	1(k)	$\frac{1}{1-z^{-1}}$
4	$\frac{1}{s+a}$	$e^{-at}$	$e^{-akT}$	$\frac{1}{1-e^{-aT}z^{-1}}$
5	$\frac{1}{s^2}$	t	kT	$\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$
6	$\frac{2}{s^3}$	$t^2$	$(kT)^2$	$\frac{T^2z^{-1}(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})^3}$
7	$\frac{6}{s^4}$	$t^3$	$(kT)^3$	$\frac{T^3z^{-1}(1+4z^{-1}+z^{-2})}{(1-z^{-1})^4}$
8	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1 - e^{-at}$	$1 - e^{-akT}$	$\frac{(1 - e^{-aT})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-aT}z^{-1})}$
9	$\frac{b-a}{(s+a)(s+b)}$	$e^{-bt} - e^{-at}$	$e^{-bkT} - e^{-akT}$	$\frac{(e^{-aT} - e^{-bT})z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})(1 - e^{-bT}z^{-1})}$
10	$\frac{1}{(s+a)^2}$	$te^{-at}$	$kTe^{-akT}$	$\frac{Te^{-aT}z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^2}$
11	$\frac{s}{(s+a)^2}$	$(1-at)e^{-at}$	$(1-akT)e^{-akT}$	$\frac{1 - (1+aT)e^{-aT}z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^2}$
12	$\frac{2}{(s+a)^3}$	$t^2e^{-at}$	$(kT)^2e^{-akT}$	$\frac{1 - (1+aT)e^{-aT}z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^3}$
13	$\frac{a^2}{s^2(s+a)}$	$at - 1 + e^{-at}$	$akT - 1 + e^{-akT}$	$\frac{[(aT - 1 + e^{-aT}) + (1 - e^{-aT} - aTe^{-aT})z^{-1}]z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2(1 - e^{-aT}z^{-1})}$
14	$\frac{w}{s^2 + w^2}$	$\sin wt$	$\sin wkT$	$\frac{z^{-1}\sin wT}{1 - 2z^{-1}\cos wT + z^{-2}}$

	$X(s)$	$x(t)$	$x(kT)$ ó $x(k)$	$X(z)$
15	$\frac{s}{s^2 + w^2}$	$\cos wt$	$\cos wkT$	$\frac{1 - z^{-1} \cos wT}{1 - 2z^{-1} \cos wT + z^{-2}}$
16	$\frac{w}{(s+a)^2 + w^2}$	$e^{-at} \sin wt$	$e^{-akT} \sin wkT$	$\frac{e^{-aT} z^{-1} \sin wT}{1 - 2e^{-aT} z^{-1} \cos wT + e^{-2aT} z^{-2}}$
17	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + w^2}$	$e^{-at} \cos wt$	$e^{-akT} \cos wkT$	$\frac{1 - e^{-aT} z^{-1} \cos wT}{1 - 2e^{-aT} z^{-1} \cos wT + e^{-2aT} z^{-2}}$
18			$a^k$	$\frac{1}{1 - az^{-1}}$
19			$a^{k-1}$ $k=1,2,3,\dots$	$\frac{z^{-1}}{1 - az^{-1}}$
20			$ka^{k-1}$	$\frac{z^{-1}}{(1 - az^{-1})^2}$
21			$k^2 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + az^{-1})}{(1 - az^{-1})^3}$
22			$k^3 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + 4az^{-1} + a^2 z^{-2})}{(1 - az^{-1})^4}$
23			$k^4 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + 11az^{-1} + 11a^2 z^{-2} + a^3 z^{-3})}{(1 - az^{-1})^5}$
24			$a^k \cos k\pi$	$\frac{1}{1 + az^{-1}}$
25			$\frac{k(k-1)}{2!}$	$\frac{z^{-2}}{(1 - z^{-1})^3}$
26			$\frac{k(k-1)\dots(k-m+2)}{(m-1)!}$	$\frac{z^{-m+1}}{(1 - z^{-1})^m}$
27			$\frac{k(k-1)}{2!} a^{k-2}$	$\frac{z^{-2}}{(1 - az^{-1})^3}$
28			$\frac{k(k-1)\dots(k-m+2)}{(m-1)!} a^{k-m+1}$	$\frac{z^{-m+1}}{(1 - az^{-1})^m}$



## PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA Z

	$x(t)$ ó $x(k)$	$X(z)$
1	$a x(t)$	$a X(z)$
2	$a x_1(t) + b x_2(t)$	$a X_1(z) + b X_2(z)$
3	$x(t+T)$ ó $x(k+1)$	$zX(z) - zx(0)$
4	$x(t+2T)$	$z^2X(z) - z^2x(0) - zx(T)$
5	$x(k+2)$	$z^2X(z) - z^2x(0) - zx(1)$
6	$x(t+kT)$	$z^kX(z) - z^kx(0) - z^{k-1}x(T) - \dots - zx(kT-T)$
7	$x(t-kT)$	$z^{-k}X(z)$
8	$x(n+k)$	$z^kX(z) - z^kx(0) - z^{k-1}x(1) - \dots - zx(k-1)$
9	$x(n-k)$	$z^{-k}X(z)$
10	$tx(t)$	$-Tz \frac{d}{dz} X(z)$
11	$kx(k)$	$-z \frac{d}{dz} X(z)$
12	$e^{-at} x(t)$	$X(ze^{aT})$
13	$e^{-ak} x(k)$	$X(ze^a)$
14	$a^k x(k)$	$X\left(\frac{z}{a}\right)$
15	$ka^k x(k)$	$-z \frac{d}{dz} X\left(\frac{z}{a}\right)$
16	$x(0)$	$\lim_{z \rightarrow \infty} X(z)$ si el límite existe
17	$x(\infty)$	$\lim_{z \rightarrow 1} [(1-z^{-1})X(z)]$ si $(1-z^{-1})X(z)$ es analítica dentro y fuera del círculo unidad
18	$\nabla x(k) = x(k) - x(k-1)$	$(1-z^{-1})X(z)$
19	$\Delta x(k) = x(k+1) - x(k)$	$(z-1)X(z) - zx(0)$
20	$\sum_{k=0}^n x(k)$	$\frac{1}{1-z^{-1}} X(z)$
21	$\frac{\partial}{\partial a} x(t, a)$	$\frac{\partial}{\partial a} X(z, a)$
22	$k^m x(k)$	$\left(-z \frac{d}{dz}\right)^m X(z)$
23	$\sum_{k=0}^n x(kT)y(nT-kT)$	$X(z) Y(z)$
24	$\sum_{k=0}^{\infty} x(k)$	$X(1)$

## BIBLIOGRAFÍA

- Giancolli C., Física, Principios con Aplicaciones, 4ta. Ed., Prentice Hall, 1997.
- Serway A., Beichner J., Física para Ciencias e Ingenierías, McGraw-Hill 5ta. Ed., 2002.
- Ogata, K., Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Prentice Hall 2da. Ed., 1998.
- Ogata, K., Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- Ljung, L., System Identification: Theory for the User, Prentice Hall, 1987.
- Ljung L. y Glad T., Modeling of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1994.
- Hakvoort R.G., System Identification for Robust Process Control, Prentice Hall, 1991.
- Stainless Macro Trade, Válvula Sobrepresión,  
[http://www.stainlessmt.com/images/valv/valvula\\_sobrepresion\\_smt.pdf](http://www.stainlessmt.com/images/valv/valvula_sobrepresion_smt.pdf),  
fecha de consulta mayo 2011.
- Gómez, P., Relaciones entre temperatura, volumen y presión,  
<http://eltamiz.com/2010/11/11/termodinamica-i-relaciones-entre-temperatura-volumen-y-presion/>, fecha de consulta mayo 2011.
- Viatran Corp., Constantes en Conversiones de Unidades de Presión,  
<http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/referencia%2011-12-02.pdf>,  
fecha de consulta mayo 2011.