



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Identificación y diseño del controlador para un sistema de control de velocidad en un motor de inducción”

## **TESINA DE SEMINARIO**

Previo a la obtención del Título de:

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

Presentada por:

Cristhian Alexander Camacho Salvatierra.

Alex Omar Echeverría Cuadrado.

GUAYAQUIL - ECUADOR  
AÑO: 2011

# AGRADECIMIENTO

A Dios que nos ha conservado con vida, con salud, que nos ha dado inteligencia, nos ha guiado y cuidado en este paso de la vida.

A nuestro director, M.Sc. César Martín por aportarnos con sus conocimientos y ser ejemplo de tenacidad y confianza. Al profesor M.Sc. Alberto Larco, y al Ayudante de Laboratorio, Raúl Intriago, por el préstamo de la planta y proveernos de las herramientas necesarias para el desarrollo del estudio realizado.

De una manera muy especial, a nuestros familiares y amigos que siempre nos apoyaron y estuvieron con nosotros

## DEDICATORIA

*A Dios, por ser quien bendice cada paso que doy. A mi madre, Nelly, por su infinito amor, entrega y cuidados de toda una vida. A mi padre, Carlos, por ser mi ejemplo de fuerza, responsabilidad y confianza. A mi hermana, Karla, que ha sido mi empuje para seguir adelante, a mi abuelita Lucy, a mis tías y tíos, primas y primos que me han apoyado desde siempre y a Estefanía por estar conmigo en cada momento y ser un pilar más de mi vida*

*Cristhian A. Camacho S.*

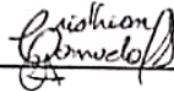
*Dedico este trabajo a Dios, como muestra de agradecimiento por haberme premiado con la madre que tengo. A mi familia por haber creído en mí, a mis amigos por brindarme su confianza y ayuda. Y a todas aquellas personas que hicieron posible este trabajo, mi gratitud.*

*Alex Echeverría C.*

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la **Escuela Superior Politécnica del Litoral**"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



---

Cristhian Alexander Camacho Salvatierra



---


Alex Omar Echeverría Cuadrado

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



**MSc. César Martín.**

PROFESOR DEL SEMINARIO



**MSc. Holger Cevallos.**

PROFESOR DELEGADO

DEL DECANO

# RESUMEN

En esta tesina se trata el análisis, la identificación y el diseño de un controlador para un motor de inducción jaula de ardilla mediante modelaciones matemáticas - estadísticas.

El primer capítulo se describirá el proceso a identificarse, detallaremos una reseña histórica sobre los componentes a emplearse, y los métodos existentes para controlar motores de inducción.

El segundo capítulo se menciona la fundamentación teórica, las ecuaciones principales y las herramientas necesarias para cumplir una buena identificación. Las ecuaciones físicas del sistema.

El tercer capítulo trataremos sobre el diseño del sistema, sus componentes, la adquisición y generación de datos de la planta mediante LabVIEW, de qué manera actúa la planta al someterse a diversos experimentos con diferentes diseños de señales de entrada empleando MATLAB, realizando un análisis de correlación empleando métodos no paramétricos y de esta manera obtener las características necesarias de la planta.

El cuarto capítulo empleando métodos paramétricos se arma el diseño del modelo matemático de nuestra planta, explicando detalladamente cuáles fueron las técnicas empleadas, y de qué manera se realizó la selección de la

mejor técnica para obtener nuestro modelo matemático. Se muestran comprobaciones mediante experimentaciones simuladas con datos reales de la planta.

El quinto capítulo Se analizará la función de transferencia para realizar el diseño del controlador adecuado.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XX
ABREVIATURAS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIV
CAPÍTULO 1 .....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2 El motor de inducción.....	2
1.3 Historia y actualidad del control de velocidad de un motor de inducción.....	4
1.3.1 Técnicas para el control de velocidad.....	5
1.4 Variadores de velocidad.....	7
1.4.1 Variadores de frecuencia .....	7
1.5 Sistema.....	8
1.6 Identificación de un Sistema.....	9
CAPÍTULO 2 .....	12
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	12
2.1 Principio de Funcionamiento del Motor de Inducción Jaula de Ardilla	12



2.1.1	Deslizamiento del rotor.....	15
2.1.2	Frecuencia en el rotor. ....	16
2.1.3	Circuito Equivalente del Motor de Inducción. ....	17
2.2	Tipos de Cargas. ....	23
2.3	Control voltaje - frecuencia.....	24
2.4	Programas Empleados. ....	24
2.4.1.1	Configuración De La Tarjeta De Adquisición De Datos.....	32
2.5	Identificación de sistemas. ....	37
2.5.1	Etapas de un proceso de identificación.....	37
2.5.2	Métodos de Identificación de sistemas.....	39
2.5.2.1	Métodos no paramétricos.....	39
2.5.2.2	Métodos Paramétricos .....	42
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>47</b>
<b>3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN. ....</b>		<b>47</b>
3.1	Planta Real.....	47
3.1.1	Partes de la Planta Real.....	47
3.1.1.1	Motor de Inducción Trifásico.....	47
3.1.1.2	Carga Terco MV-1045. ....	48
3.1.1.3	Tarjeta de Adquisición de Datos DAQ NI-USB 6009. ...	50
3.1.1.4	Variador de Frecuencia ATV31HU15M2. ....	51
3.1.1.5	Circuitos de Acondicionamiento. ....	53
3.1.1.5.1	Circuito de acondicionamiento de señal de entrada. ...	53
3.1.1.5.2	Circuito de acondicionamiento de señal de salida.....	55
3.1.2	Diagramas de conexiones del sistema.....	57

3.1.2.1	Diagrama de Control. ....	57
3.1.2.2	Diagrama de fuerza del sistema. ....	59
3.2	Adquisición y generación de datos.....	61
3.2.1	Programación en LabVIEW.....	62
3.2.1.2	Diagrama de Bloques.....	64
3.2.1.2.1	Lazo de Adquisición.....	65
3.2.1.2.2	Lazos de Generación.....	66
3.2.1.3	Configuración De La Tarjeta De Adquisición De Datos.....	67
3.3	Características de la Planta.....	71
3.3.1	Tiempo de estabilización del Sistema.....	71
3.3.2	Tiempo pico de la Planta.....	72
3.3.3	Obtención del Tao Dominante de la planta.....	72
3.3.4	Obtención de la Ganancia.....	73
3.4	Diseño de señales de entrada.....	74
3.4.1	Obtención de la Frecuencia de Muestreo.....	76
3.4.2	Aspectos considerados en las señales de entrada.....	76
3.4.3	Esquema de las Pruebas realizadas.....	79
3.5	Análisis de las señales de entrada.....	79
3.5.1	Secuencia Binaria Aleatoria – RBS.....	79
3.5.2	Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria - PRBS.....	81
3.5.3	Multisenos.....	82
3.6	Análisis de correlación.....	83
3.6.1	Autocorrelación de Entrada.....	86
3.6.2	Autocorrelación de la señal de salida.....	86

3.6.3	Correlación Cruzada .....	87
3.6.4	Respuesta al Impulso.....	88
3.7	Análisis de Respuesta Transiente.....	89
3.8	Parámetros de la señal escogida .....	95
CAPÍTULO 4 .....		98
4. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA.....		98
4.1	Objetivo .....	98
4.2	Trabajo con la señal de entrada escogida.....	98
4.3	Criterios a utilizar en la identificación .....	100
4.4	Modelo ARX (Auto-Regresivo con entrada externa) .....	102
4.5	Modelo ARMAX (Media móvil con entrada externa).....	107
4.6	Modelo FIR (Respuesta al impulso finito).....	113
4.7	Modelo Box Jenkins .....	119
4.8	Método error de salida.....	124
4.9	Elección del modelo más conveniente .....	129
4.10	Obtención de la función de transferencia del modelo.....	130
4.11	Simulación del modelo en lazo abierto.....	131
CAPÍTULO 5 .....		133
5. DISEÑO DEL CONTROLADOR .....		133
5.1	Análisis de la función de transferencia.....	133
5.2	Criterios del diseño del controlador.....	134
5.3	Pasos para obtener el controlador.....	135
5.4	Diagrama de bloques del controlador.....	140

5.5 Resultados Simulados.....	142
5.6 Análisis de resultados.....	143
5.7 Análisis del controlador en Planta Real.....	144
CONCLUSIONES.....	146
RECOMENDACIONES .....	148
BIBLIOGRAFÍA .....	149

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Diagrama de la Planta del Motor .....	1
Figura 1-2	Diagrama principal de un sistema.....	9
Figura 2-1	Deformación de las líneas de campo en el entrehierro.....	14
Figura 2-2	Circuito Equivalente de un motor de inducción.....	17
Figura 2-3	Circuito equivalente por fase de un motor de inducción. ....	19
Figura 2-4	a) MIJA con carga liviana. b) MIJA con carga pesada.....	20
Figura 2-5	Curva Corriente del Rotor vs. Velocidad Sincrónica.....	22
Figura 2-6	Torque vs. Velocidad.....	23
Figura 2-7	Ícono de Matlab.....	25
Figura 2-8	Ícono de LabVIEW.....	26
Figura 2-9	Asistente de la tarjeta de adquisición de datos.....	27
Figura 2-10	Comparación. ....	27
Figura 2-11	Medidor de tonos.....	28
Figura 2-12	Escriba una medición a un archivo.....	28
Figura 2-13	Lea desde una medición a un archivo. ....	29
Figura 2-14	Simular Señal Arbitraria.....	29
Figura 2-15	Exponencial.....	29
Figura 2-16	Esperar.....	29

Figura 2-17 Mayor o Igual qué.....	30
Figura 2-18 Selector .....	30
Figura 2-19 Botón de radio .....	30
Figura 2-20 Lazo de Tiempo.....	31
Figura 2-21 Lazo Repetidor .....	31
Figura 2-22 Estructura de Caso.....	32
Figura 2-23 Graficadores de formas de onda. ....	32
Figura 2-24 Selección de Voltaje en la Adquisición. ....	33
Figura 2-25 Canales Analógicos de Entrada .....	34
Figura 2-26 Ventana de configuración DAQ Assistant.....	35
Figura 2-27 Ventana de Configuración para N-Samples. ....	36
Figura 2-28 Etapas del proceso de identificación. ....	37
Figura 2-29 Estructura de la Identificación.....	38
Figura 2-30 Diagrama de Bloques General de la Estructura de Error de Predicción .....	42
Figura 2-31 Estructura Arx.....	43
Figura 2-32 Estructura Armax.....	44
Figura 2-33 Estructura BJ.....	45
Figura 2-34 Estructura OE.....	45
Figura 2-35 Estructura FIR .....	46
Figura 3-1 Motor de Inducción.....	48
Figura 3-2 Equipo TERCO MV 1045.....	49

Figura 3-3 DAQ NI USB 6009 .....	51
Figura 3-4 Configuración de Velocidades Preseleccionadas .....	52
Figura 3-5 Esquema del circuito de adquisición de datos .....	53
Figura 3-6 Encoder Acoplado con Sensor MOC70T3 al motor.....	54
Figura 3-7 Encoder empleado en la adquisición.....	54
Figura 3-8 Proporcionalidad entre Voltaje y Velocidad en estado estable... 56	
Figura 3-9 Circuito de Amplificación de Voltaje.....	57
Figura 3-10 Diagrama de Control del Sistema .....	58
Figura 3-11 Diagrama de Fuerza del Sistema .....	60
Figura 3-12 Diagrama de la Adquisición y Generación de Datos .....	61
Figura 3-13 Ventana del Panel Frontal .....	63
Figura 3-14 Diagrama de bloques General a) Diagrama de Bloques Principal escogiendo la señal PRBS b) se escoge dentro de la estructura de caso a la señal RBS c) se selecciona dentro de la estructura de caso a la señal Multiseno .....	64
Figura 3-15 Programación del Lazo de Adquisición.....	65
Figura 3-16 Lazo de Estructuras de caso con las diferentes posibles señales de entrada.....	66
Figura 3-17 Selección de Voltaje en la Adquisición.....	68
Figura 3-18 Canales Analógicos de Entrada .....	69
Figura 3-19 Ventana de configuración DAQ Assistant.....	69
Figura 3-20 Ventana de Configuración para N-Samples.....	70

Figura 3-21	Respuesta de la planta real a un Escalón Unitario .....	71
Figura 3-22	Ventana Principal.....	74
Figura 3-23	Ambiente de Trabajo. ....	75
Figura 3-24	Análisis de Correlación .....	85
Figura 3-25	Autocorrelación de Entrada .....	86
Figura 3-26	Autocorrelación de Salida.....	87
Figura 3-27	Correlación Cruzada.....	87
Figura 3-28	Estimación de la respuesta al impulso.....	88
Figura 3-29	Coeficientes de la respuesta al Impulso. ....	88
Figura 3-30	Interfaz de Ident Toolbox. ....	90
Figura 3-31	Señal de salida( $y_1$ ) y señal de entrada( $u_1$ ) .....	90
Figura 3-32	Señales de salida y entrada sin datos aberrantes. ....	91
Figura 3-33	Señales de salida y entrada sin medias. ....	91
Figura 3-34	Señales de salida y entrada sin tendencias.....	92
Figura 3-35	Selección por rangos de señal de Entrada y salida.....	92
Figura 3-36	Estimación del Modelo de Correlación .....	93
Figura 3-37	Respuesta al Escalón. ....	94
Figura 3-38	Características de la señal de entrada .....	95
Figura 3-39	Espectro de potencias de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada. ....	96
Figura 3-40	Autocorrelación de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada. ....	97



Figura 3-41 Serie de tiempo de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada. ....	97
Figura 4-1 Herramienta para la identificación de sistemas .....	99
Figura 4-2 Selección de rango para la planta y validación.....	99
Figura 4-3 IDENT planta y validar.....	100
Figura 4-4 Selección del modelo ARX .....	102
Figura 4-5 Selección de estructura para el modelo ARX .....	103
Figura 4-6 Modelos ARX candidatos .....	103
Figura 4-7 Modelo de salida ARX221 .....	106
Figura 4-8 Análisis Residual ARX221 .....	106
Figura 4-9 Respuesta al escalón ARX221 .....	107
Figura 4-10 Selección del modelo ARMAX.....	107
Figura 4-11 Modelos ARMAX candidatos .....	108
Figura 4-12 Modelo de salida AMX3231 .....	111
Figura 4-13 Análisis Residual AMX3231.....	112
Figura 4-14 Respuesta al escalón AMX3231.....	112
Figura 4-15 Selección del modelo FIR.....	113
Figura 4-16 Selección de orden FIR. ....	114
Figura 4-17 Modelos candidatos FIR.....	114
Figura 4-18 Modelo de salida ARX021 .....	117
Figura 4-19 Análisis Residual ARX021 .....	118
Figura 4-20 Respuesta al escalón AMX021.....	118

Figura 4-21 Selección del modelo Box Jenkins .....	119
Figura 4-22 Modelos candidatos Box Jenkins .....	120
Figura 4-23 Modelo de salida BJ23221 .....	122
Figura 4-24 Análisis Residual BJ23221 .....	123
Figura 4-25 Respuesta al escalón BJ23221 .....	123
Figura 4-26 Selección del modelo error de salida.....	124
Figura 4-27 Modelos candidatos error de salida.....	125
Figura 4-28 Modelo de salida OE221 .....	128
Figura 4-29 Análisis Residual OE2221 .....	128
Figura 4-30 Respuesta al escalón OE2221 .....	129
Figura 4-31 Simulación de la planta en simulink.....	131
Figura 4-32 Entrada Multisenos1.....	132
Figura 4-33 Respuesta con la función de transferencia hallada .....	132
Figura 4-34 Respuesta real.....	132
Figura 5-1 Ventana de trabajo de Sisotool.....	135
Figura 5-2 Editor de Raíces en Lazo abierto. ....	136
Figura 5-3 Requerimientos ingresados en la trayectoria de Raíces.....	137
Figura 5-4 Integrador de sisotool. ....	137
Figura 5-5 Planta con un cero.....	138
Figura 5-6 Respuesta con el Filtro y el Controlador.....	139
Figura 5-7 Diagrama de Bloques del Proceso de control de un motor de inducción.....	140

Figura 5-8 Modelamiento del sistema de Planta Real.....	141
Figura 5-9 Proceso sin Controlador. ....	142
Figura 5-10 Proceso con controlador.....	143
Figura 5-11 Resultados Obtenidos de la Simulación de la planta Real. ....	144

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I – Características eléctricas del Altivar 31a .....	52
Tabla II – Parámetros ingresados a cada señal de entrada.....	79
Tabla III – Resultados al escalón de cada señal.....	94
Tabla IV – Características de la señal Prbs4 .....	95
Tabla V – Resultados ARX .....	104
Tabla VI – Resultados ARMAX .....	109
Tabla VII – Resultados FIR.....	115
Tabla VIII – Resultados Box Jenkins .....	121
Tabla IX – Resultados error de salida.....	126
Tabla X – Resultados al Escalón. ....	129

## ABREVIATURAS

<b>c.a</b>	Corriente alterna.
<b>c.c</b>	Corriente continua.
<b>PWM</b>	Modulación por ancho de pulso.
<b>R.P.M</b>	Revoluciones por minuto.
<b>Fmm</b>	Fuerza magneto motriz.
<b>Fem</b>	Fuerza electromotriz.
<b>MI</b>	Motor de inducción.
<b>MIJA</b>	Motor de inducción jaula de ardilla.
<b>VI</b>	Instrumentos virtuales.
<b>DAQ</b>	Tarjeta de adquisición de datos.
<b>AI</b>	Entrada analógica.
<b>AO</b>	Salida analógica.
<b>NI</b>	National Instruments.
<b>Vdc</b>	Voltaje continuo.
<b>Vac</b>	Voltaje alterno.
<b>mA</b>	Corriente en mili-amperios.
<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>ARX</b>	Autoregresivo con entrada externa.

<b>ARMAX</b>	Autoregresivo con entrada externa y media móvil.
<b>BJ</b>	Box Jenkins.
<b>OE</b>	Error de salida.
<b>FIR</b>	Respuesta al impulso finito.
<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>m(t)</b>	Salida del controlador.
<b>Kc</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>fs</b>	Frecuencia de Muestreo

<b>T<sub>m</sub></b>	Tiempo de muestreo.
<b>T<sub>p</sub></b>	Tiempo pico.
<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.

# INTRODUCCIÓN

La presente tesina nos ofrece la posibilidad de obtener la representación matemática de nuestra planta, sin la necesidad de pasar por un complejo proceso de modelación. El sistema a identificar es el control de velocidad de un motor de inducción trifásico.

El objetivo principal del trabajo es desarrollar una identificación del sistema para obtener una representación fiel de la planta. De esta manera cuando se desee probar nuevas alternativas de funcionamiento, no será necesario trabajar sobre la planta real y en su lugar se podrá trabajar sobre un proceso simulado, evitando así posibles deterioros o pérdidas de tiempo de producción.

Entre los objetivos específicos tenemos:

- Usar las técnicas de identificación clásicas para obtener el modelo matemático del proceso.
- Demostrar la validez y confiabilidad de la identificación, mediante un contraste con los datos reales de la planta.
- Diseñar un controlador basado en el modelo identificado, que permita lograr el desempeño requerido en el dominio del tiempo.

Los motores de inducción son los dispositivos de accionamiento electromecánico más utilizados en el campo industrial. Para su correcta



identificación, es necesario tomar en cuenta los rangos de operación y seguridad del motor. El motor a considerar tiene acoplado un variador de velocidad, por tanto, restringiremos el rango de velocidades en el cual se desarrolla un control voltaje - frecuencia constante, a carga constante.

El método clásico de identificación usando herramientas estadísticas consiste en, primero en diseñar una señal de entrada que sea amigable para la planta, es decir una señal que tenga la suficiente amplitud y frecuencia para que pueda captar su comportamiento adecuado de la planta y que satisfaga los requerimientos de la identificación no paramétrica. Luego, se realiza la identificación paramétrica, probando cuál de los diferentes métodos es el que nos da una mejor representación de la planta real, un mejor ajuste.

Para medir la velocidad, es necesario obtener los datos desde la planta, por lo que vamos a emplear LabVIEW, siendo un fuerte programa para la adquisición, procesamiento y generación de datos. Para usar herramientas estadísticas de análisis y modelación del proceso, emplearemos Matlab.

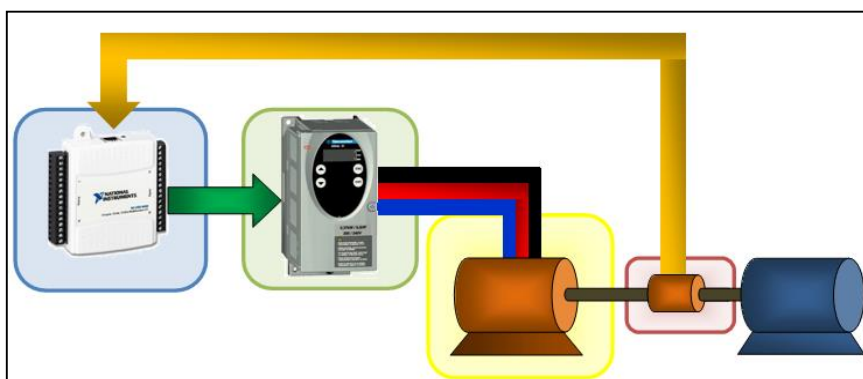
Luego de encontrar la función de transferencia, se necesita diseñar un control sencillo con los requerimientos reales que podrían ser necesarios para nuestro motor en una industria; establecemos que dicho controlador será comprobado vía simulación, no será implementado en la planta real.

# CAPÍTULO 1

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción del proceso a identificar

El problema surge del diseño de un controlador de velocidad para un motor de inducción, el cual forma parte de un sistema experimental para el control de un motor, el sistema funcionará mediante un variador de frecuencia como es el Altivar 31 A, Una tarjeta de adquisición de datos DAQ que empleando LabView y un pequeño circuito electrónico funcionará tomando los datos de velocidad y generación de las señales. Para entender el comportamiento de nuestra planta debemos empezar por conocer los componentes y su funcionamiento.



**Figura 1-1** Diagrama de la Planta del Motor

## 1.2 El motor de inducción.

### Historia.

En 1879 Walter Baily demostró ante la Physical Society de Londres, la posibilidad de rotación de un disco de cobre mediante las corrientes inducidas en este. Ferraris en 1885 hizo el descubrimiento del campo giratorio; el mismo descubrimiento fue hecho casi a la vez por Nikola Tesla que fue quien primero construyó y patentó este tipo de motores en Octubre de 1887, por lo cual se lo considera el inventor de los mismos.

Todos tenían el estator en forma de anillo. El primer tipo tenía un rotor con cuatro polos salientes, dando lugar a un motor de reluctancia que no contaba con auto arranque pero giraba a velocidad de sincronismo, el segundo era un motor asíncrono, poseía rotor devanado que podía arrancar pero giraba a una velocidad por debajo de la de sincronismo y el tercero era un motor síncrono, que funcionaba suministrando corriente continua al devanado del rotor.

Los primeros motores asíncronos eran bifásicos y con polos salientes en el estator, alimentados con dos corrientes desfasadas  $90^\circ$  en el tiempo y utilizando devanados desfasados  $90^\circ$  en el espacio.

En 1891 la Compañía americana Thomson-Houston comenzó la construcción de motores de inducción trifásicos bajo la dirección de H.G. Reist y W.J: Foster.

Por otra parte Dolivo Dobrowolsky, ingeniero de la Empresa alemana AEG, sugirió la utilización de circuitos trifásicos pero no independientes entre sí, sino mutuamente conectados, el llamado encadenamiento de fases, da a entender la dependencia mutua de las tres corrientes que constituyen un sistema trifásico. Para el año 1893 Dolivo Dobrowolsky había construido motores asíncronos de doble jaula de ardilla que mejoraba el arranque de estos motores, también sugirió la construcción del motor de inducción con rotor devanado o con anillos deslizantes, para poder regular la velocidad del mismo conectando a los anillos un reóstato de arranque y regulación de modo similar a los de motores de c.c.

En EEUU, se unieron las Compañías Westinghouse y la Thomson-Houston para fabricar motores asíncronos trifásicos, por lo que resultó de gran utilidad el invento del ingeniero C.F. Scott de la Empresa Westinghouse para transformar un sistema bifásico en trifásico y poder alimentar estas máquinas. El rotor de jaula de ardilla construido mediante barras de aluminio, fue patentado en 1916 por H.G. Reist y H. Maxwell de la compañía General Electric.

### **1.3 Historia y actualidad del control de velocidad de un motor de inducción.**

El motor de inducción es el motor más empleado en la industria por sus múltiples ventajas, bajo costo de mantenimiento, económico precio, rapidez de respuesta, mayor relación de torque/amperio, total control del torque a bajas velocidades, un amplio rango de operación y robustez lo hacen el más óptimo para el desarrollo de diferentes aplicaciones en un proceso. Por esas razones los ingenieros han desarrollado a lo largo de la historia la regulación de velocidad más confiable y exacta para dichos motores. Los convertidores más empleados en la actualidad son:

- a) Los grupos rectificador-inversor que transforman la c.a. de la red de alimentación en c.c. (módulo rectificador) y que luego vuelven la c.c. en c.a. de frecuencia y amplitud variables (módulo inversor)
- b) Los grupos ciclo convertidores, que son cambiadores directos de frecuencia y que transforman una potencia de c.a. en otra de frecuencia diferente, sin el paso intermedio por c.c.

La forma de regulación de velocidad consistió inicialmente, en variar la tensión de alimentación del estator mediante triacs; este método se

caracterizaba por una pobre respuesta tanto estática como dinámica. Un método mejor era regular la frecuencia de alimentación, ya que la velocidad de giro es cercana a la de sincronismo, pero tampoco se lograba una respuesta satisfactoria y los equipos eran caros.

El mejor método era regular el flujo de la máquina, lo que se conseguía con un control simultáneo de la tensión y la frecuencia de alimentación, era la regulación del cociente tensión/frecuencia que requería el uso de sistemas de encendido de los tiristores bastante complicado.

La técnica más avanzada en la aplicación de la electrónica de potencia a los motores de inducción, la constituye el control vectorial. Este sistema introducido a comienzos de la década de los 70's por F. Blaschke, ingeniero de la casa Siemens, fue desarrollado en sus bases teóricas por el profesor alemán Leonard e implementado más tarde con microprocesadores.

### **1.3.1 Técnicas para el control de velocidad.**

Métodos para variar la velocidad de un motor de inducción:

- **Control por voltaje del estator:** se basa en la variación del voltaje de alimentación en el estator, con lo que se varía la velocidad pero de

manera indirecta también se varía el torque. Para lograr la variación de voltaje se pueden usar inversores trifásicos con modulación de ancho de pulso (PWM), entre otros. Su contenido de armónicos es alto y su factor de potencia bajo.

- **Control por voltaje del rotor:** consiste en variar la resistencia del rotor; con este método se aumenta el par de arranque mientras se limita a corriente de arranque, pero este método es ineficiente debido a los desbalances de voltaje y corriente que habrán si las resistencias en el circuito del rotor no son iguales.
- **Control por frecuencia:** Si se mantiene fijo el voltaje en su valor nominal, y se reduce la frecuencia respecto al valor nominal, aumenta el flujo. Eso causaría la saturación del flujo en el entrehierro, y los parámetros del motor ya no serían válidos para determinar las características par-velocidad del motor. A baja frecuencia, las reactancias disminuyen y puede ser que la corriente en el motor sea demasiada alta. En el caso normal, este control por frecuencia no se usa.
- **Control por voltaje del estator y por frecuencia:** si se mantiene la relación de voltaje y frecuencia, por consecuencia el par se mantiene

aproximadamente constante. A este tipo de control se lo suele llamar control por volts/hertz.

- **Control por corriente en el estator:** el par de los motores de inducción se pueden controlar variando la corriente del rotor, este control no es muy usado debido a que hay que utilizar otros métodos adicionales para no permitir que el flujo del entrehierro se sature.
- **Control por voltaje, corriente y frecuencia:** podría ser necesario variar el voltaje, la corriente y la frecuencia para satisfacer los requisitos par-velocidad.

## 1.4 Variadores de velocidad

### 1.4.1 Variadores de frecuencia

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y el par de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables. Se utilizan estos equipos cuando las necesidades de la aplicación sean:

- *Dominio de par y la velocidad*
- *Regulación sin golpes mecánicos*
- *Movimientos complejos*



- *Mecánica delicada*

Los variadores de velocidad están preparados para trabajar con motores trifásicos asíncronos de rotor jaula. La tensión de alimentación del motor no podrá ser mayor que la tensión de red.

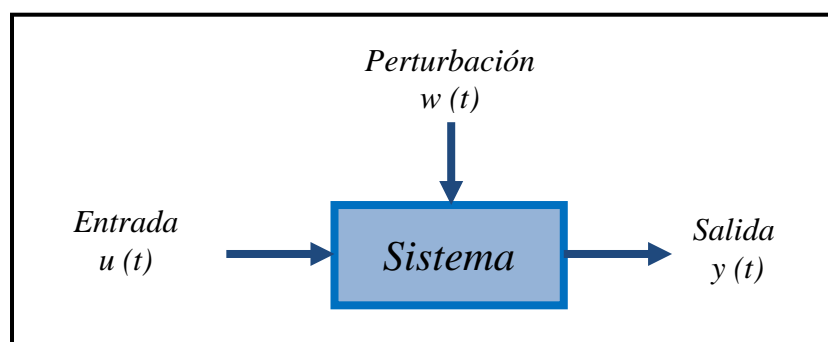
El dimensionamiento del motor debe ser tal que el par resistente de la carga no supere el par nominal del motor, y que la diferencia entre una y otra provea el par acelerante y desacelerante suficiente para cumplir los tiempos de arranque y parada.

## **1.5 Sistema.**

El sistema o muy bien llamado proceso, es aquel en que, un conjunto de variables interactúan entre sí con cierta dinámica, para lograr un funcionamiento predeterminado, y los resultados buscados, al momento de que se le esté aplicando una señal al proceso (señal de entrada) y obteniendo una señal de particular interés como respuesta al proceso (señal de salida).

Un proceso puede verse afectado por causas externas no manipulables por el usuario, como son las señales de perturbación, siendo el ruido el más común de éstas señales de perturbación.

Algo muy importante de un sistema es el tiempo de respuesta del proceso, es decir, de en qué tiempo actúa la entrada con respecto a la salida, de esto va a depender si éste tiene una buena dinámica o muy baja dinámica.



**Figura 1-2** Diagrama principal de un sistema.

## 1.6 Identificación de un Sistema.

### 1.6.1 Historia

Desde tiempos inmemorables el hombre ha buscado la forma en la cual pueda comprender el porqué del medio que lo rodea, es por ello el uso del lenguaje corporal en un inicio, el lenguaje como si mismo, los dibujos, entre otros. A medida que el hombre fue evolucionando, se dio cuenta que no era suficiente identificar que es lo que alguna otra

persona quería decir, sino que era necesario controlar procesos, así como el de la caza, o la construcción de refugios, sistemas de navegación; llegando hasta la actualidad en donde se puede identificar un sistema con las múltiples variables que lo afectan.

### 1.6.2 Concepto

Está claro en la teoría de control que construir modelos para sistemas desconocidos es una base fundamental de dicha teoría, por ello, la identificación de un sistema es un procedimiento que permite que el proceso sea lo necesariamente confiable cuyo objetivo apunta a diseñar controladores eficientes y con una muy buena estabilidad. La metodología más común es la siguiente:

- *Obtención de datos:* Se necesitan obtener y almacenar los datos que sean fielmente confiables, tanto la entrada y la salida del sistema para el diseño de una señal de entrada apropiada.
- *Análisis para aplicar a los datos obtenidos:* Empleando software y métodos basados en análisis estadísticos, tomando los datos útiles para identificar nuestro sistema.
- *La selección de la estructura de modelos:* Tomar el mejor modelo que se requiera y el que mejor satisfaga a nuestro sistema.

- *La estimación de parámetros:* Es el área de la teoría de control que estudia diferentes técnicas y métodos
- Validación del modelo obtenido: Ajustes y verificaciones del sistema de control hasta alcanzar el desempeño deseado.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 Principio de Funcionamiento del Motor de Inducción**

#### **Jaula de Ardilla**

Para realizar este análisis se tomará en cuenta requerimientos físicos, operativos y funcionales.

Un motor de inducción básicamente es construido por dos partes, la primera, el estator, el cual es muy parecido al de una máquina sincrónica y su segunda parte, el rotor, tiene una construcción diferente, el que demostraremos es un motor con rotor Jaula de Ardilla.

El Rotor de Jaula de ardilla tiene un conjunto de barras conductoras en paralelo, las que son ubicadas en unas ranuras hechas en la parte

externa del rotor con los extremos colocados en cortocircuito por medio de un par de anillos.

El devanado del estator se constituye por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  entre cada uno de los otros dos, con  $2p$  polos; al introducir por ellos corrientes en una red trifásica de frecuencia  $f_1$ , se generará una fuerza magnetomotriz distribuida fmm sinusoidalmente por todo el entrehierro del estator, produciendo un flujo giratorio en el que se nota q la velocidad de giro es la también llamada como velocidad de sincronismo está dado por la siguiente ecuación:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ r.p.m.}$$

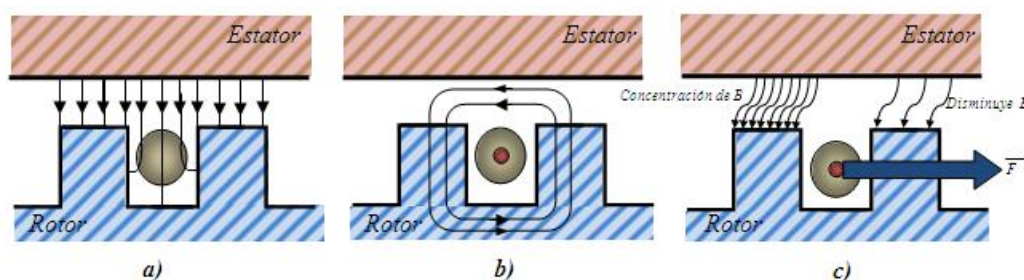
La Fmm generada en el estator, inducirá una fuerza electromotriz fem en los conductores del rotor. Como se puede observar, al momento q cerramos el circuito existirá una densidad de campo magnético las q tratarán de oponerse a las variaciones del flujo magnético.

Según la Ley de Faraday enuncia que la fem inducida en un conductor con longitud  $L$  y con velocidad  $V$  y dentro de una intensidad de campo  $B$  la que ser:

$$e = \int (V \times B) \cdot dl = (V \times B) \cdot L$$

La fuerza de los conductores del rotor y su sentido se obtiene mediante la Ley de Laplace:

$$F = i(L \times B)$$



**Figura 2-1** Deformación de las líneas de campo en el entrehierro.

En las gráficas mostradas, podemos observar que los conductores se encuentran dentro de las ranuras del rotor y dada la ley de Laplace, observamos una incertidumbre. Dado que los enlaces de campo varían. En la figura 2-1 a) se puede observar cómo se induce la intensidad de campo en los dientes del rotor, atravesando apenas al conductor. En la figura 2-1 b), El conductor llevando corriente, y se observa las líneas de inducción producidas por el mismo. En la figura 2-1 c), en la q se observa la deformación de las líneas de inducción, existiendo una fuerza resultante en el sentido indicado actuando directamente a los dientes del rotor, haciendo similitud con respecto al caso de un conductor aislado.

Por lo tanto el movimiento que se va a dar del rotor con respecto al campo magnético del estator, es el que produce por el voltaje inducido en las barras del rotor.

Si multiplicamos la fuerza por el radio del rotor, en conjunto con los conductores que tenemos, se podrá obtener el torque total de la máquina que tendrá que mover al rotor consiguiendo el campo giratorio del estator.

El momento total de estas fuerzas origina el par de rotación de la máquina que obliga a girar al rotor siguiendo el movimiento del campo giratorio, de tal forma que cuanto más se aproxima a la velocidad  $n_1$  del campo, tanto menor resulta la fuerza electromotriz inducida en los conductores del rotor y en consecuencia, resultan también reducidas las corrientes en el mismo.

La velocidad del MI tiene un límite finito, éste puede girar a velocidades muy cercanas a la velocidad sincrónica pero no la alcanzará y por ello es que nuestra máquina es asincrónica. [2]

### **2.1.1 Deslizamiento del rotor.**

El voltaje inducido en una barra del rotor depende de la velocidad con respecto al campo magnético. Ya que el comportamiento del MI



depende de los voltajes y de las corrientes del rotor, es mejor hablar sobre la velocidad relativa empleando dos términos.

La velocidad de deslizamiento de la máquina, el que es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del eje del rotor.

$$n_{desliz} = n_{sinc} - n_m$$

El deslizamiento que corresponde a la velocidad relativa en porcentaje o en por unidad. Que también las podemos expresar en términos de la velocidad angular  $\omega$ .

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} \times 100\%$$

Cuando el rotor gira a velocidad sincrónica tiene un deslizamiento igual a cero, y si el rotor está quieto tiene el deslizamiento igual a uno.

### 2.1.2 Frecuencia en el rotor.

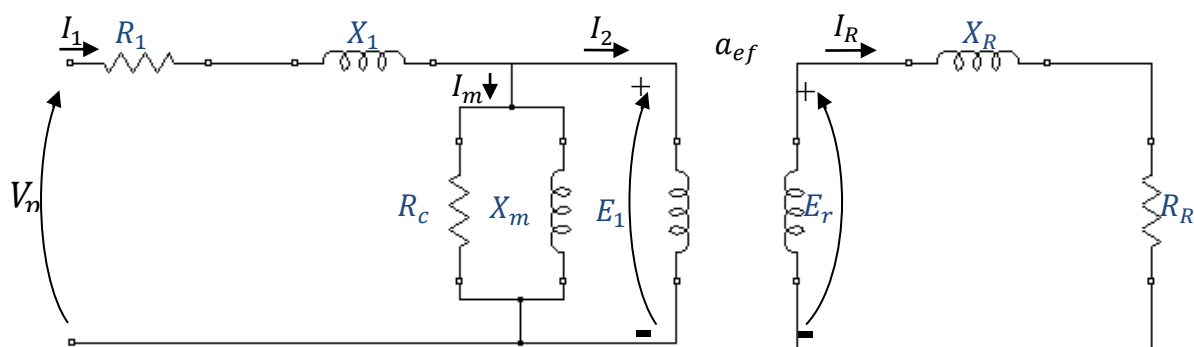
Así como el voltaje se induce del estator al rotor, se induce la frecuencia, pero no necesariamente la misma que hay en el estator, será la del rotor. La frecuencia en el rotor está dada para una velocidad intermedia y por la siguiente relación.

$$f_r = s f_e$$

### 2.1.3 Circuito Equivalente del Motor de Inducción.

Tenemos nuestro circuito equivalente dadas las condiciones inductivas, hacemos una similitud con respecto al transformador, teniendo en el primario una resistencia y una autoinductancia,  $R_1$  la resistencia del estator y  $X_1$  su reactancia.

Debido al entrehierro la reluctancia aumenta y sus efectos en la curva de magnetización [ver anexo1] hacen que se necesite una mayor corriente para generar una cantidad buena de flujo, haciendo que la reactancia de magnetización sea muy pequeña con respecto a un transformador ordinario.



**Figura 2-2** Circuito Equivalente de un motor de inducción.

El Voltaje  $E_1$  del estator está acoplado con el voltaje  $E_R$  del rotor lo que permite que exista una relación de transformación  $a_{ef}$ , siendo esta la relación de número de conductores por fase tanto del estator y del

rotor, ambos modificados por sus factores de paso y de distribución, en el rotor de jaula de ardilla será mucho más difícil definir esta constante, debido a sus devanados no muy bien definidos.

El voltaje  $E_R$  inducido en el rotor producirá un flujo inducido en nuestro circuito de la máquina. La impedancia del primario y la corriente de magnetización del circuito equivalente de un motor de inducción son muy similares a los valores correspondientes del modelo del circuito equivalente de un transformador.

La diferencia fundamental entre los circuitos equivalentes de un motor de inducción y de un transformador, se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en el voltaje inducido  $E_R$  y en la impedancia  $R_R$  y  $jX_R$  del rotor.

Sabemos que un motor en rotor bloqueado, tiene su máximo voltaje, por ello,  $E_R = E_{R0}$  siendo  $E_{R0}$  el voltaje del rotor bloqueado; también conocemos que la impedancia  $X_R = \omega_r L_R$  y la frecuencia en el rotor notada anteriormente  $f_r = s f_e$  entonces tendremos  $X_R = 2\pi f_r L_R = s X_{R0}$  por tanto la corriente en el rotor será  $I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}}$ .

### Circuito Equivalente definitivo:

Reduciendo el circuito equivalente a uno definitivo por fase, se necesita referir el rotor al estator a nivel de voltaje, ya que la impedancia del rotor contiene los efectos de las variaciones de velocidad. Lo haremos tal cual se reflejara un transformador teniendo a nuestra variable  $a_{ef}$  como la relación de espiras efectivas en un motor, teniendo como el voltaje referido, la corriente del rotor, y la impedancia del rotor como las siguientes:

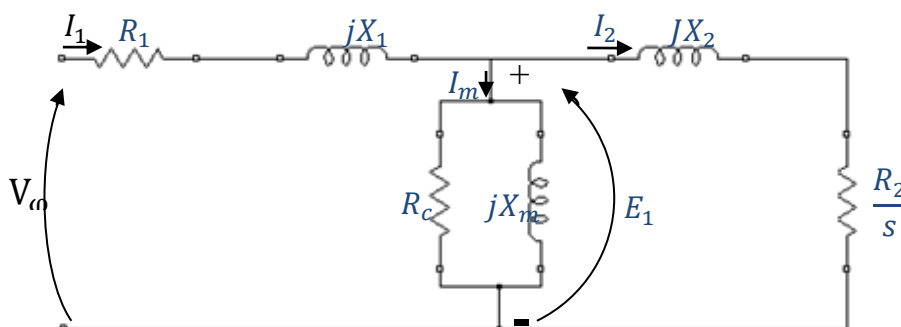
$$E_2 = E_{R'} = a_{ef} E_{R'0} \quad \text{Voltaje Referido.}$$

$$I_2 = \frac{I_{R'}}{a_{ef}} \quad \text{Corriente Referida}$$

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad \text{Impedancia del rotor}$$

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad ; \quad X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad \text{Resistencia y Reactancia del Rotor}$$

Obteniendo el circuito equivalente

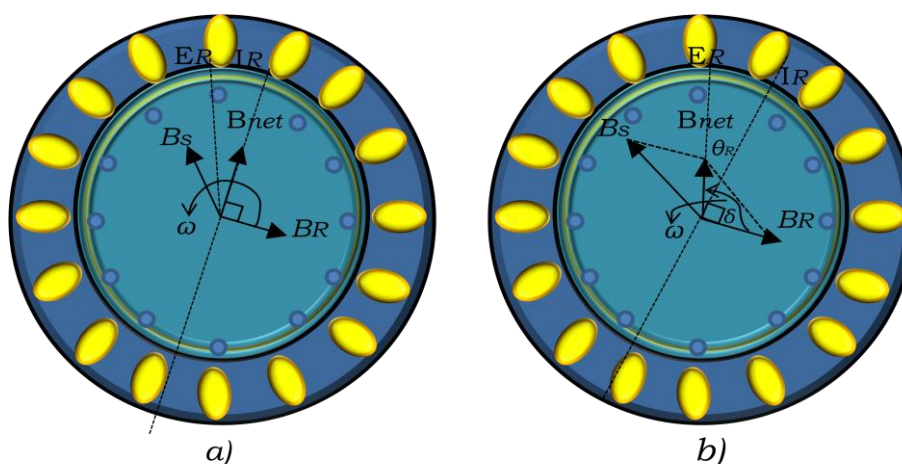


**Figura 2-3** Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

En nuestro motor es demasiado complicado hacer mediciones de la resistencia y la reactancia del rotor, es más la relación de espiras resulta casi imposible por ello, pero se pueden medir la resistencia y la reactancia reflejadas que se detallaron anteriormente.

### Característica Torque - Velocidad del motor de inducción.

Básicamente el torque que mantiene el rotor en movimiento se da mediante el producto cruz entre el campo magnético del rotor y el campo neto del motor.



**Figura 2-4** a) MIJA con carga liviana. b) MIJA con carga pesada.

La figura 2.4a es de un motor que está trabajando en vacío, en donde la velocidad con la cual está girando es aproximadamente igual a la sincrónica, aquí la corriente de magnetización  $I_M$  mostrado en el circuito equivalente, generará un campo magnético  $B_{net}$ . Estos dos

factores son directamente proporcionales al voltaje  $E_1$ . Si  $E_1$  es constante, el campo magnético neto del motor es constante.

En realidad, al momento que la carga varía  $E_1$  también variaría. Ya que las impedancias del estator producirían caídas de voltaje, que son variables con la carga, estas impedancias son relativamente pequeñas, de tal manera que son constantes con las variaciones de la carga.

Dadas estas condiciones el deslizamiento del rotor es pequeño por ende, la frecuencia en el rotor, el voltaje inducido en el rotor  $E_R$ , la corriente resultante  $I_R$  son muy pequeños, estando ambos prácticamente en fase. Esta corriente pequeña origina a un pequeño campo  $B_R$ . Que se encuentra atrasado al  $B_{net}$ .

$$\tau_{ind} = k B_R x B_{net}$$

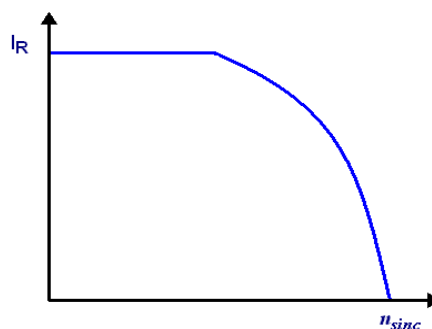
Y la magnitud

$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \text{sen} \delta$$

A medida que aumenta la carga aumenta la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator, como se muestra en la figura 2.4b, produciendo una corriente del en el rotor mayor, dado un mayor deslizamiento la frecuencia crece, y la reactancia en el rotor aumenta.

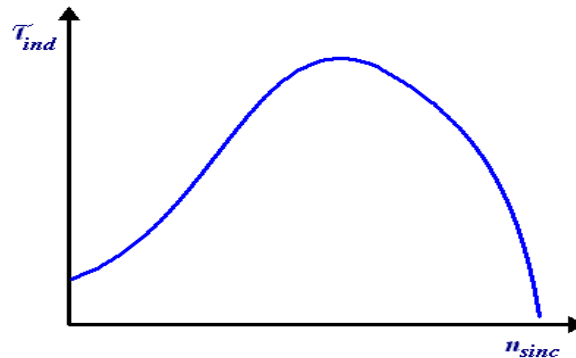
Por ello se puede ver que al incrementar  $B_R$ , tendremos un mayor torque para atender a la carga aumentada.

Se pueden observar en la siguiente gráfica una curva característica de torque-velocidad, específicamente una representación de la corriente del rotor en función de la velocidad. Las corrientes, a velocidades bajas, lejanas a las sincrónicas son mayores que las corrientes generadas a velocidades cercanas a la sincrónica, en donde la corriente disminuye.



**Figura 2-5** Curva Corriente del Rotor vs. Velocidad Sincrónica.

La curva característica resultante del torque en función de la velocidad es la siguiente.



**Figura 2-6** Torque vs. Velocidad.

Estas dos curvas serán nuestra base fundamental para el trabajo con nuestro motor de inducción jaula de ardilla.

## 2.2 Tipos de Cargas.

Existen diferentes tipos de cargas, las cuales se pueden acoplar al motor de inducción, ésta carga dependerá del sistema, es decir, a qué se le está dando trabajo u/o generando torque en el sistema. Cada uno de los ejemplos son tipos de cargas que tendrán su funcionamiento generalmente como su nombre lo indique.

Dentro de las más conocidas tenemos:

- Carga constante.
- Carga Lineal.
- Carga Exponencial.
- Carga cuadrática.



## **2.3 Control voltaje - frecuencia**

Debido a la necesidad de mantener constante la velocidad, con el aumento o disminución de la carga para un motor de inducción; se creó el control v/f que consiste en variar tanto el voltaje de alimentación, así como la frecuencia; obteniendo así, si se quiere disminuir la velocidad, por ende la frecuencia, se disminuirá también el voltaje de alimentación, dejando la relación entre ambos constante, por consecuente el par del motor se mantendrá constante también.

El control v/f se lo realiza para velocidades por debajo de la velocidad base, ya que cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la nominal del motor, con el voltaje mantenido constante en su valor nominal, el par desarrollado disminuye, puesto que disminuye el flujo.

Si se reduce la frecuencia eléctrica del motor y o se reduce el voltaje, se pueden generar corrientes de magnetización muy altas que saturarán el núcleo de acero del motor.

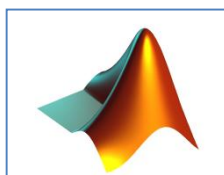
## **2.4 Programas Empleados.**

Herramientas principales tales como los programas que se utilizan nos dan el apoyo que necesitamos para llevar a cabo nuestro objetivo, con los cuales se permitirá tomar datos de la planta, diseñar circuitos

electrónicos y analizar los datos que hemos tomado. A nuestra consideración, son programas de fuerte utilización.

- **Matlab:** Como su nombre lo indica es un Laboratorio matemático, que ofrece un entorno de desarrollo integrado, empleando programación en el Lenguaje M.

Las funciones básicas son: Manejar matrices, representación de datos y funciones, implementar algoritmos, crear interfaces gráficas de usuario. A parte de éstas funciones, Matlab permite la instalación de herramientas que el usuario necesite, tales como Simulink, y GUIDE y la instalación de diferentes Toolboxes.



**Figura 2-7** Ícono de Matlab.

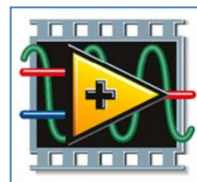
- **Proteus:** Esta herramienta, contiene 2 herramientas básicas. ISIS, es la herramienta simuladora de circuitos electrónicos básicamente, con una amplia gama de componentes, muchos de ellos son interactivos con el usuario, medidores analógicos, medidores digitales, osciloscopios, que permiten hacer más vistoso al circuito una vez simulado. Ares, es la herramienta que permite realizar diseños de los

Circuitos PCB, cuenta con herramientas interactivas tanto de conexión, como de observación.

- **LabVIEW:** una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante programación en lenguaje G, éste lenguaje es netamente gráfico.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica.

Ésta herramienta cuenta con un sinnúmero de paquetes instalables, para que de esta manera Éste se pueda comunicar con diferentes tipos de programas, teniendo en su mayoría un funcionamiento exitoso.



**Figura 2-8** Ícono de LabVIEW

### 2.4.1 Descripción las herramientas más empleadas

**Asistente de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ):** Crea, edita e inicia pruebas usando el asistente expreso de una DAQ VI para editar esta tarea. Que permite configurar la DAQ para la medición continua o la generación de datos.



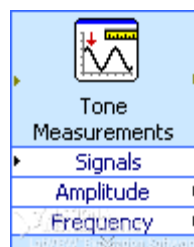
**Figura 2-9** Asistente de la tarjeta de adquisición de datos.

**Comparación:** El valor que sea colocado en la entrada se comparará dependiendo de la configuración de la condición de comparación que tenga asignado este bloque y la comparación de las entradas. Permitted conditions include equal, not equal, greater, greater or equal, less, less or equal, equal with tolerance, ranges of input, ranges of output and comparisons of the inputs as the value or signal of input to be compared.



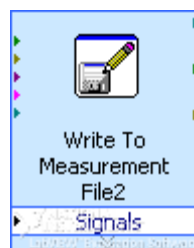
**Figura 2-10** Comparación.

**Medidor de Tonos:** Encuentra el tono de la señal simple con la más alta amplitud y busca el rango de una frecuencia específica para encontrar el tono simple con la más alta amplitud. También se puede encontrar la frecuencia y la fase para una señal simple.



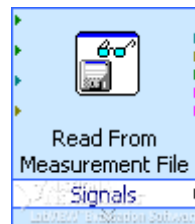
**Figura 2-11** Medidor de tonos

**Escriba una medición a un archivo:** Escribe los datos en texto hacia un archivo de texto basado en la medición con extensión .lvm, o desde un archivo binario de medición con las extensiones .tdm o tdms



**Figura 2-12** Escriba una medición a un archivo.

**Lea desde un archivo de medición:** Lee datos desde un archivo de texto basado en la medición con extensión .lvm, o desde un archivo binario de medición con las extensiones .tdm o tdms



**Figura 2-13** Lea desde una medición a un archivo.

**Simular Señal Arbitraria:** Simula una señal que usted defina.



**Figura 2-14** Simular Señal Arbitraria

**Exponencial:** Permite un valor de entrada, y en su salida el valor de entrada es colocado como superíndice en la función exponencial.



**Figura 2-15** Exponencial

**Esperar (ms):** Espera el número específico de milisegundos y retorna el valor del temporizador de milisegundos.



**Figura 2-16** Esperar

**Mayor o Igual qué:** Compara dos valores, si el valor1 es mayor o igual al valor2, se genera en su salida una salida booleana, un cero o un uno.



**Figura 2-17** Mayor o Igual qué.

**Selector:** Retorna el valor cableado a la entrada t o a la entrada f, dependiendo del valor de s. Si s es verdadero, el bloque retornará el valor cableado en t, sino la de f.



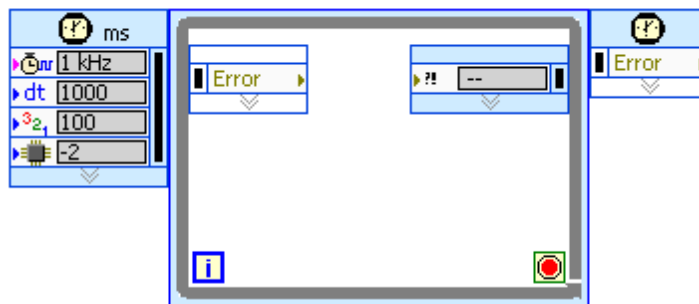
**Figura 2-18** Selector

**Botón de radio:** Permite insertarle las opciones de un menú, escogiendo una señal de entrada a la vez.



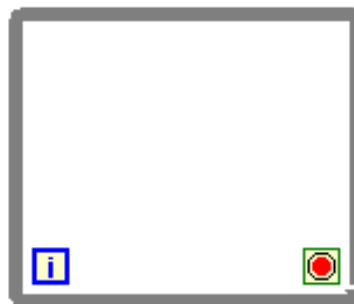
**Figura 2-19** Botón de radio

**Lazo de Tiempo:** permite ejecutar uno o más sub-diagramas o cuadros secuenciales cada iteración del periodo del lazo que usted especifica.



**Figura 2-20** Lazo de Tiempo

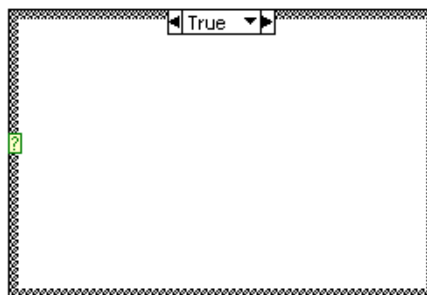
**Lazo repetidor:** Repite el sub-diagrama interior hasta que un terminal condicional, el que es de entrada, recibe un valor booleano en particular. El valor booleano depende del comportamiento de la continuación del lazo de repetición.



**Figura 2-21** Lazo Repetidor

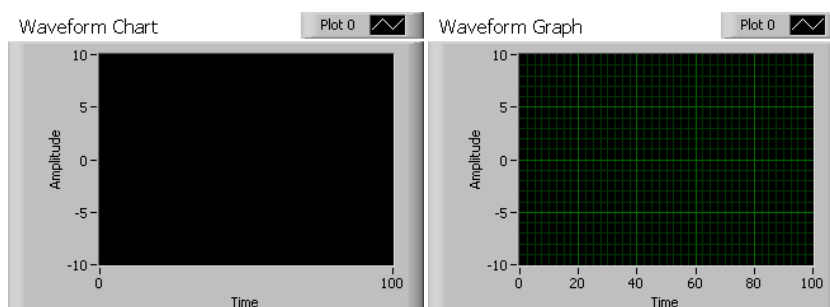
**Estructura de Caso:** Tiene uno o más subdiagramas, o casos, exactamente uno de los cuales se ejecuta cuando el valor cableado al terminal selector sea verdadero. .





**Figura 2-22** Estructura de Caso.

**Graficador de Formas de Onda:** Tenemos dos graficadores, el chart nos permite mostrar los valores desde un arreglo en tiempo de simulación, graficándose punto a punto, en cambio en el graph la información va desplegándose y actualizándose constantemente.



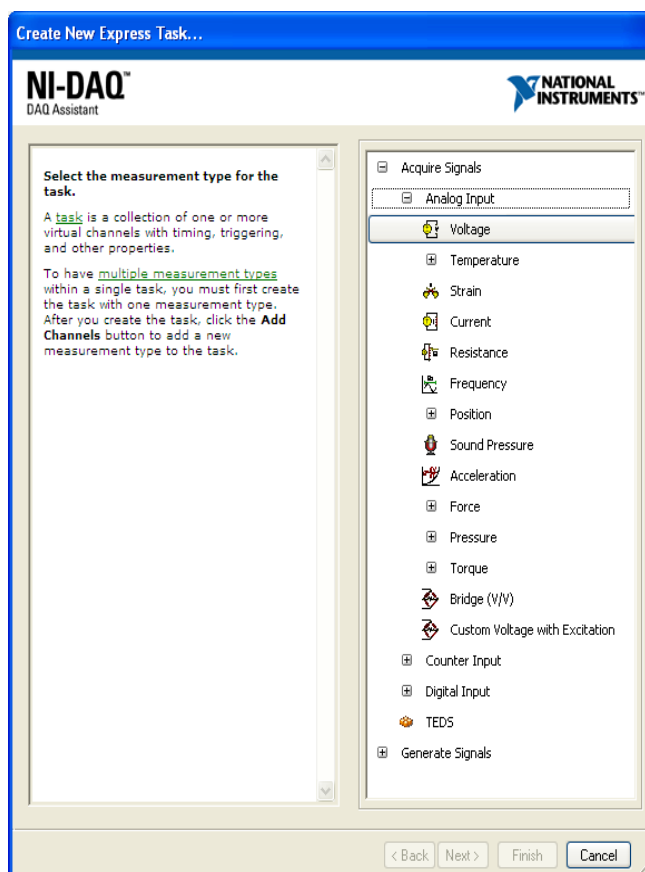
**Figura 2-23** Graficadores de formas de onda.

#### 2.4.1.1 Configuración De La Tarjeta De Adquisición De Datos.

Debemos iniciar a configurar la DAQ entrando por el ícono mostrado en la Figura 3-31 visto anteriormente. Nos aparecerá una ventana, en la que podremos seleccionar tanto como generar o adquirir una señal.

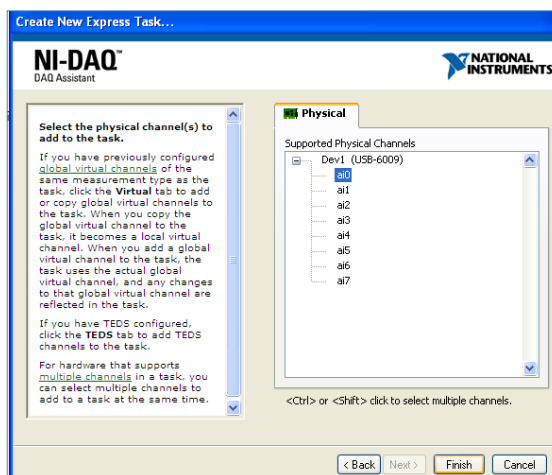
Empezamos adquiriendo una señal, en nuestro caso buscamos obtener la señal analógica de voltaje que nos proporcionará el circuito de encoder.

En la siguiente figura se muestra la ventana, existe una lista de posibles señales análogas, las cuales dependerán de la tarjeta de adquisición de datos en nuestro caso la NIUSB6009 permite entradas análogas de voltaje y de corriente, seleccionaremos la señal de voltaje.



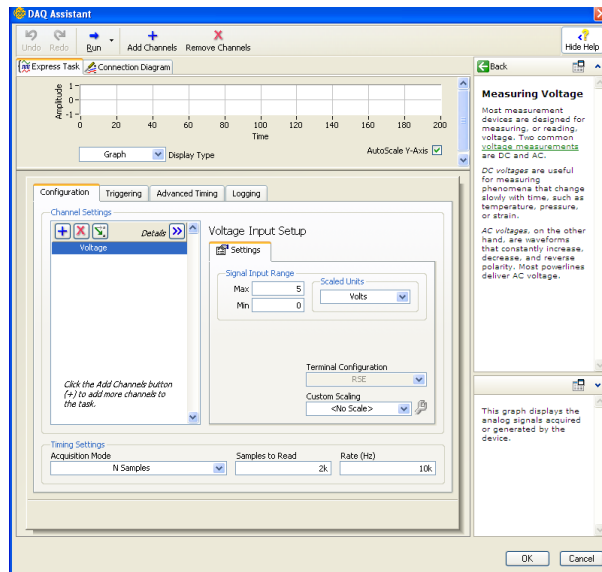
**Figura 2-24** Selección de Voltaje en la Adquisición.

- Se muestran los posibles canales a los cuales se puede colocar un voltaje, de entrada. Esto también dependerá de la tarjeta, hay algunas tarjetas que tienen más entradas que otras. Seleccionaremos la entrada analógica (AIO).



**Figura 2-25** Canales Analógicos de Entrada

- Una vez seleccionado el canal, podremos configurar el tipo de terminal que necesitamos, el voltaje máximo y el mínimo que se va a emplear, el modo de adquisición, la frecuencia de lectura y muestras a leer. Presionando el botón de Arranque (Run), se pueden hacer pruebas dentro de la misma ventana, y verificar la adquisición de los datos.



**Figura 2-26** Ventana de configuración DAQ Assistant.

- Nuestros datos de configuración serán:
  - Máximo Voltaje: 5 [V].
  - Mínimo Voltaje: 0 [V].
  - Configuración del Terminal: RSE
  - Modo de Adquisición: N-Muestras.
  - Muestras a leer: 2 [K/muestras]
  - Frecuencia: 10 [K]

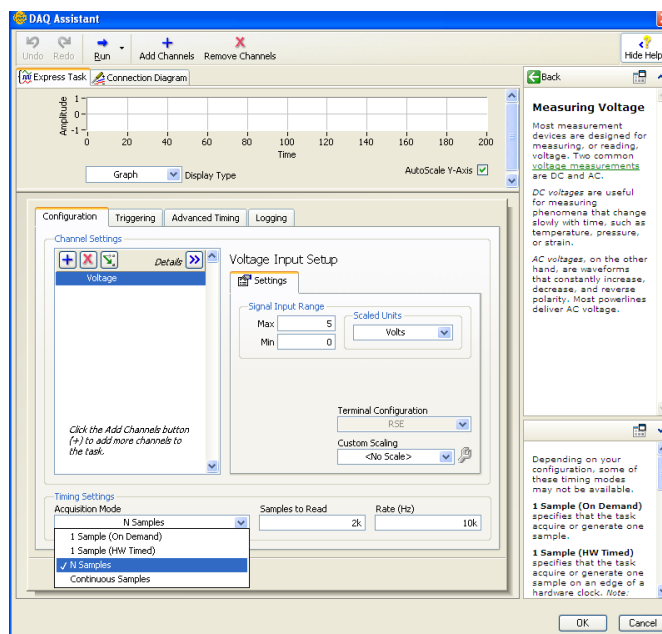
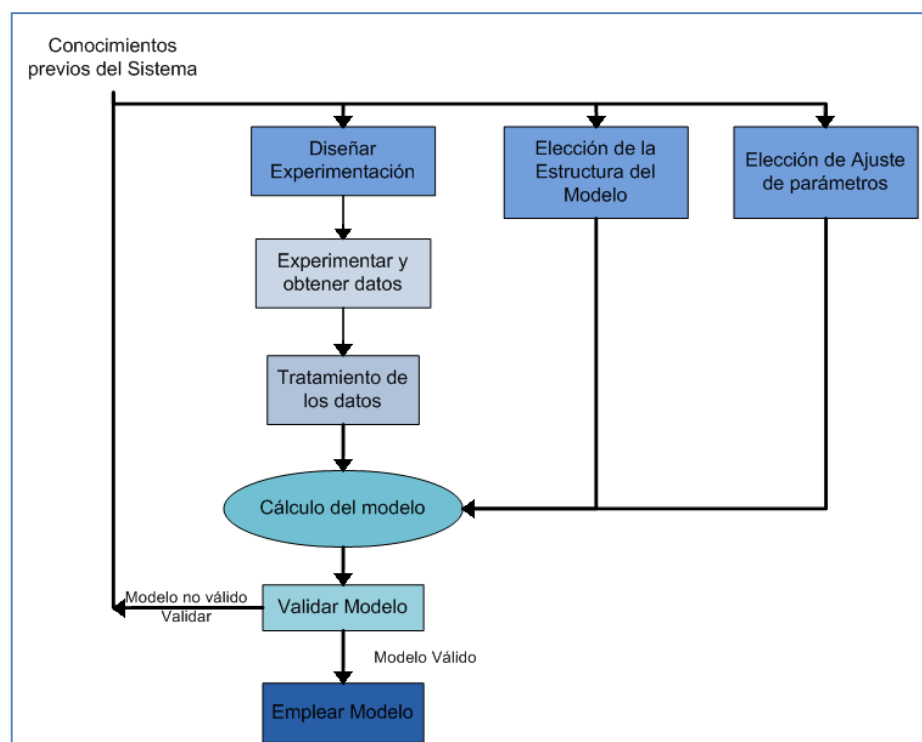


Figura 2-27 Ventana de Configuración para N-Samples.

## 2.5 Identificación de sistemas.

Una identificación de sistemas permite obtener de forma experimental una modelación matemática que reproduzca con la mayor exactitud posible, las características dinámicas de un proceso.

### 2.5.1 Etapas de un proceso de identificación

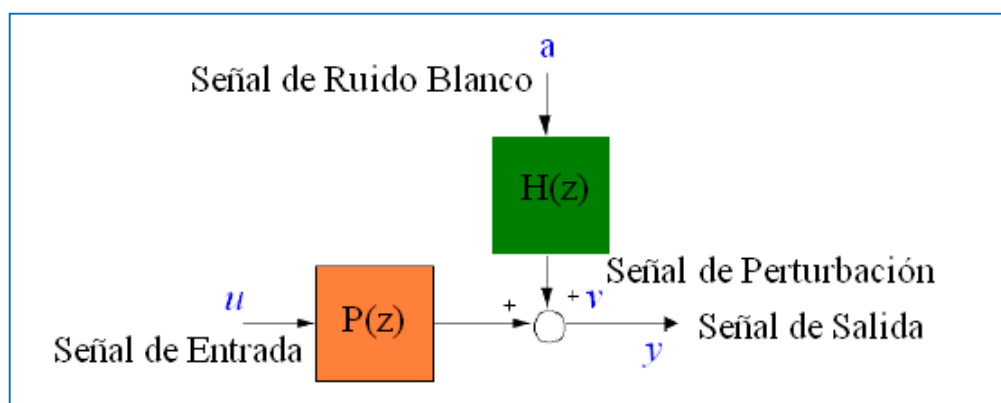


**Figura 2-28** Etapas del proceso de identificación.

El proceso de identificación empezará conociendo sobre el sistema, es decir tener fundamentación teórica, sobre lo que se va a hacer. Se cumplirá con las siguientes etapas:

- **Diseñar Experimentación:** Se determina cuando vamos a hacer la experimentación, basados en la teoría y en el comportamiento del sistema. Se generarán señales de prueba que determinen el momento adecuado para colocar una señal de entrada al sistema, con métodos no paramétricos, estos métodos generarán datos, que se deberán tratar para tener datos óptimos del sistema.
- **Elección de la Estructura del Modelo:** Se harán pruebas con diferentes modelos paramétricos que son los que vamos a usar.
- **Elección de Ajustes de Parámetros:** Observaremos cual es la mejor estructura y la emplearemos.
- **Validación del Modelo:** Validaremos el modelo matemático obtenido, compararemos con la respuesta real del sistema.
- **Emplear Modelo:** con el modelo validado, una vez aprobado, tomaremos como respuesta de nuestra identificación.

#### Estructura de la identificación.



**Figura 2-29** Estructura de la Identificación.

**Señal de Entrada:** Es la señal que se va a diseñar, para poder obtener la planta del sistema, esta debe ser aleatoria y determinística.

**Señal de Ruido:** Es la señal que puede perturbar al sistema, generalmente ruido blanco.

**Señal de Perturbación:** Es la señal que se obtiene como respuesta a la señal de ruido.

**Señal de Salida:** Es la señal que obtenemos debido a la suma de la señal de perturbación más la respuesta de la planta.

Para obtener estas características, especialmente el  $P(z)$  se utilizan los métodos de identificación de sistemas.

## **2.5.2 Métodos de Identificación de sistemas**

Existen diversos métodos para identificar sistemas. Nosotros emplearemos dos métodos que serán herramientas útiles para obtener un modelamiento exitoso.

### **2.5.2.1 Métodos no paramétricos**

Los métodos no paramétricos permiten obtener modelos aproximados de un conjunto de datos no finito de parámetros, siendo modelos estadísticos, haciendo diferentes análisis como el análisis de respuesta transiente y el de correlación.



**Análisis de Respuesta transiente:** Es el análisis que permite determinar parámetros característicos del sistema. En el cual se basa en la respuesta al Escalón o la respuesta al impulso.

**Análisis de Correlación:** Permite hacer un análisis detallado a partir de un conjunto de datos obtenidos directamente del sistema, permitiéndonos obtener una respuesta al impulso que permitirá observar algunos parámetros característicos del sistema.

Las señales que se enviarán a la planta deberán estar regidas a algunos parámetros que se mencionarán a continuación.

### **Señales de Entrada.**

Las señales de entrada deben ser elegidas de forma sigilosa, ya que nuestros datos obtenidos deberían proporcionarnos toda la información sobre el sistema. Los aspectos importantes son los siguientes:

- La señal de entrada debe ser lo más potente como sea posible, teniendo en cuenta el mayor número de frecuencias posibles.
- La señal debe ser tan larga como sea posible, siempre y cuando se tomen los datos característicos de la planta, esto no indicaría que sea una señal que dure mucho tiempo, ya que esto afecta a los costos de producción de una planta real.

- La entrada no debe ser correlacionada con la perturbación de la señal

Se puede diseñar señales amigables al sistema, con las características antes mencionadas como las siguientes:

**Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)** Es una señal totalmente estocástica, basada en un nivel alto y un nivel bajo, el cual va conmutando con una probabilidad  $p$ . Sirve para plantas que necesitan ser sometidas a cambios bruscos para obtener una buena respuesta.

**Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS):** Es una señal determinística y periódica, que funciona mediante lógica booleana y registros de desplazamiento para generar la señal. Se basa en dos niveles al igual que las RBS, siendo beneficiosas para el mismo tipo de plantas que las RBS. Contiene Autocovarianza periódica, asemejándose al ruido blanco.

**Señal Multiseno:** Es una señal que se forma por una serie de señales sinusoidales, pero de igual forma que la PRBS es una señal determinística y periódica. Sirve para analizar plantas que no funcionan con cambios bruscos en su señal de entrada, sino más bien, con suavidad se puede obtener una buena respuesta.

### 2.5.2.2 Métodos Paramétricos

Los métodos paramétricos son métodos que emplean técnicas de regresión para encontrar el modelo adecuado. La regresión puede ser o no ser lineal lo único que lo define es la estructura del modelo.

Siempre se generará un error, necesariamente, éste error, debe ser bajo, nosotros nos encargaremos de disminuir el error lo que más se pueda.

La forma general para el modelo es la siguiente:

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

Donde:

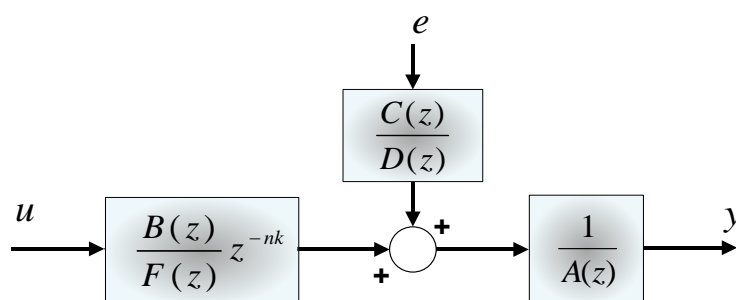
**A(z), B(z), C(z), D(z) y F(z)** son polinomios trabajados en tiempo discreto.

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

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

**e(t):** Ruido presente en la planta.

De donde un diagrama general puede representarse como la Figura 2-11



**Figura 2-30** Diagrama de Bloques General de la Estructura de Error de Predicción

Los modelos de error de predicción son los siguientes:

### Estructura Auto-Regresiva con entrada Externa (ARX).

- ✓ El problema de estimación se convierte en un problema de regresión lineal.
- ✓ Las estimaciones ARX de alto orden ( $n_a$  y  $n_b$  grandes) arrojan resultados consistentes pero pueden tener problemas de varianza en presencia de ruido significativo.
- ✓ Estimaciones ARX de bajo orden son problemáticas en la presencia de ruido significativo y cuando se selecciona una estructura de modelo incorrecta.

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

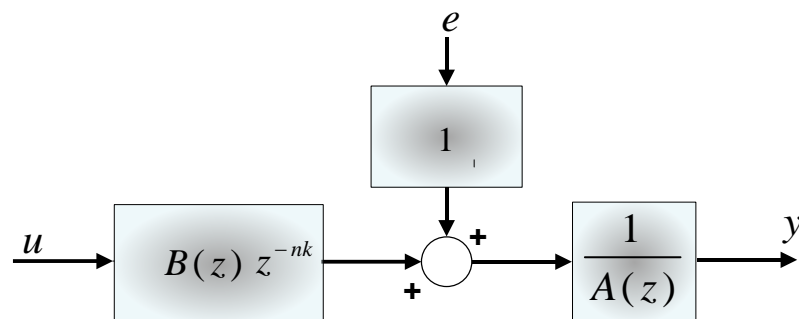


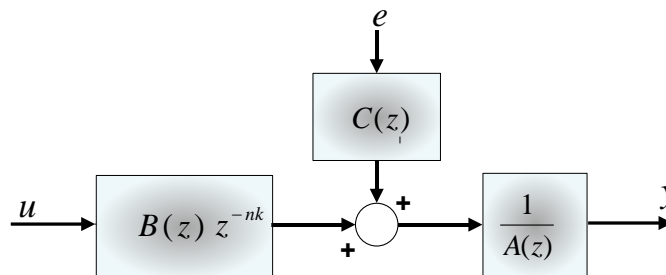
Figura 2-31 Estructura Arx.

### Estructura Auto-Regresiva con media Móvil y Entrada Externa (ARMAX).

- ✓ El problema de estimación es un problema de regresión no lineal.
- ✓ Usualmente el orden del modelo ( $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ ) se escoge bajo.

- ✓ La presencia del polinomio autorregresivo puede traer problemas de desvíos en la presencia de ruido significativo y/o errores en la estructura del modelo; sin embargo el polinomio de media móvil contrarrestará algunas veces los efectos negativos.

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

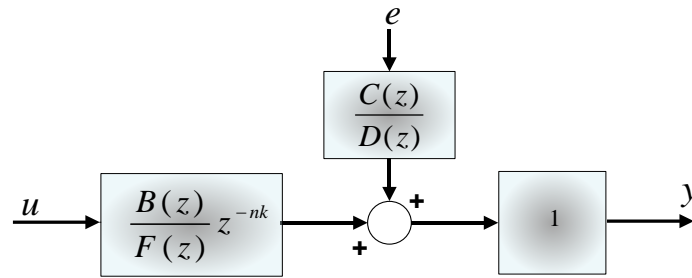


**Figura 2-32** Estructura Armax.

### Estructura de Modelo Box Jenkins (BJ):

- ✓ Es un problema de regresión no lineal
- ✓ Usualmente los órdenes del modelo ( $n_b$ ,  $n_c$ ,  $n_d$  y  $n_f$ ) se escogen bajos.
- ✓ Parametriza independientemente los modelos de la función de transferencia y el ruido; el problema radica en la cantidad de decisiones e iteraciones que tendrá que hacer el usuario

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

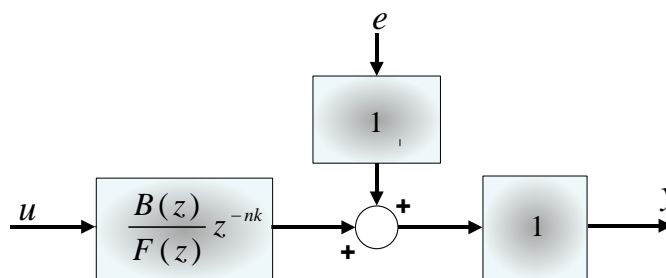


**Figura 2-33** Estructura BJ.

**Estructura de Modelo de Error de Salida (OE):**

- ✓ Es un problema de regresión no lineal.
- ✓ Usualmente los órdenes del modelo ( $n_b$  y  $n_f$ ) se escogen bajos.
- ✓ Parametriza independientemente la entrada y el ruido, sin embargo no se obtiene un modelo de ruido auto correlacionado.
- ✓ Trabaja muy bien en conjunto con un pre filtrado relevante al control.

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

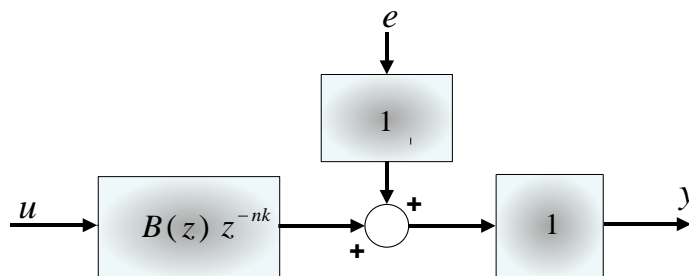


**Figura 2-34** Estructura OE.

### Respuesta al Impulso Finito (FIR):

- ✓ Representación de modelo “libre de estructura”, equivalente a lo encontrado en análisis de correlación. Traduce directo la respuesta al escalón
- ✓ La estimación es una regresión lineal.
- ✓ El orden apropiado del modelo ( $n_b$ ) depende del tiempo de muestreo seleccionado y el tiempo de estabilización del proceso, el resultado es usualmente alto (20 coeficientes o más).
- ✓ No se estima un modelo para el ruido auto correlacionado.

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



**Figura 2-35** Estructura FIR

# CAPÍTULO 3

## 3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.

### 3.1 Planta Real

#### 3.1.1 Partes de la Planta Real.

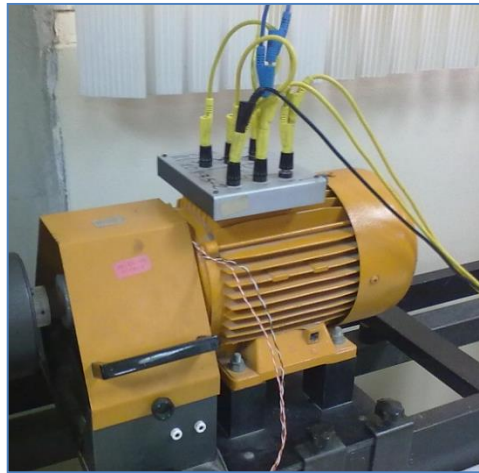
En la planta real de nuestro proyecto se utilizan 5 partes fundamentales las cuales son:

- ✓ Motor de Inducción Jaula de Ardilla 3 $\Phi$ .
- ✓ Carga TERCO MV 1045.
- ✓ Tarjeta de adquisición de Datos DAQ NI USB 6009
- ✓ Variador de Frecuencia ATV31HU15M2
- ✓ Circuitos de Acondicionamiento.

##### 3.1.1.1 Motor de Inducción Trifásico.

El motor se encuentra conectado en delta para que el voltaje de alimentación sea el máximo que entrega la fuente, es decir 220V-240V, ya que si lo conectamos en estrella tendremos como máximo entre línea y línea 173V y no son suficientes para alimentar al motor.



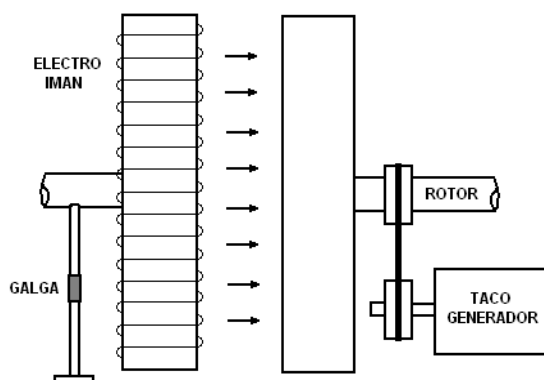
**Características Eléctricas:****P= 1.5 [KW]****Fp: 0,7****V:  $\Delta \rightarrow 220[V]$ ,  $Y \rightarrow 380[V]$** **I:  $\Delta \rightarrow 6,95 [A]$ ,  $Y \rightarrow 4 [A]$**  **$\omega_n = 1400[RPM]$** **Figura 3-1** Motor de Inducción.

Necesitamos que el motor no supere a sus características eléctricas, como la corriente y la velocidad. Por ello se ha trabajado con un ochenta y cinco por ciento ya sea de la corriente nominal y de la velocidad nominal respetando los límites para trabajar con el motor colocándole la carga respectiva.

**3.1.1.2 Carga Terco MV-1045.**

Para proporcionar una carga variable al motor de una manera controlada, utilizaremos el equipo TERCO MV 1045.

La unidad está constituida por un disco conductivo conectado al rotor, que gira frente a un electroimán montado sobre un eje independiente al rotor que solo está fijo mediante una varilla de metal; de este modo, se inducen corrientes llamadas de Eddy sobre el disco del rotor, estas corrientes junto con el campo producen una fuerza que se opone a la rotación del disco provocando el frenado, esta fuerza en nuestro caso será utilizada para someter al motor a distintas cargas.



**Figura 3-2** Equipo TERCO MV 1045

El equipo proporciona dos salidas analógicas de 0 a 20mA, en un rango de 0 – 3000 rpm para la velocidad y 0 – 15 Nm para el torque. La carga podrá ser variada utilizando el potenciómetro de la unidad de control o utilizando la entrada analógica de 0 – 20 [mA] de la misma. Nosotros necesitamos una carga constante para realizar nuestras experimentaciones. Al suministrarse la corriente, de 0 a 20 [mA], se generará una fuente de voltaje sinusoidal a la entrada de la carga; el voltaje irá desde los 0 [Vac] hasta los 70 [Vac]; nosotros hemos hecho

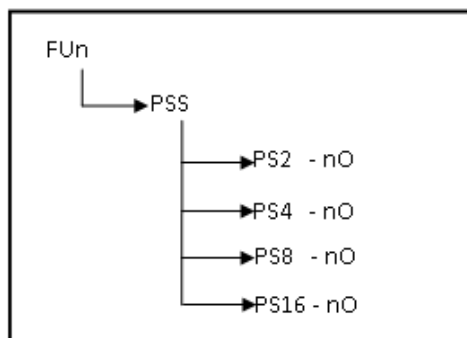
algunos experimentos, en donde la carga necesaria, va a ser la generada por la entrada de 55 [Vac].

### **3.1.1.3 Tarjeta de Adquisición de Datos DAQ NI-USB 6009.**

Por medio de la DAQ podremos enviar datos de voltaje al variador de frecuencia y recibir datos de voltaje desde el encoder del motor de inducción; y procesarlos mediante LabVIEW, Las características principales son las siguientes:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- La versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos





**Figura 3-4** Configuración de Velocidades Preseleccionadas

Con lo cual la consigna es 1, refiriéndose a que la entrada de velocidad va a ser controlada por la entrada AI0.

Es importante mencionar que el variador posee sus propias protecciones por sobre corriente, sobre tensión, falla en alguna fase, o porque sobrepasa alguno de los parámetros límites puestos en su configuración.

Características eléctricas			
Alimentación	Tensión	V	200 - 15% a 240 + 10% monofásica para ATV 31ppppM2p 200 - 15% a 240 + 10% trifásica para ATV 31ppppM3X 380 - 15% a 500 + 10% trifásica para ATV 31ppppN4p 525 - 15% a 600 + 10% trifásica para ATV 31ppppS6X
	Frecuencia	Hz	50 - 5% a 60 + 5%
Tensión de salida			Tensión máxima trifásica igual a la tensión de la red de alimentación

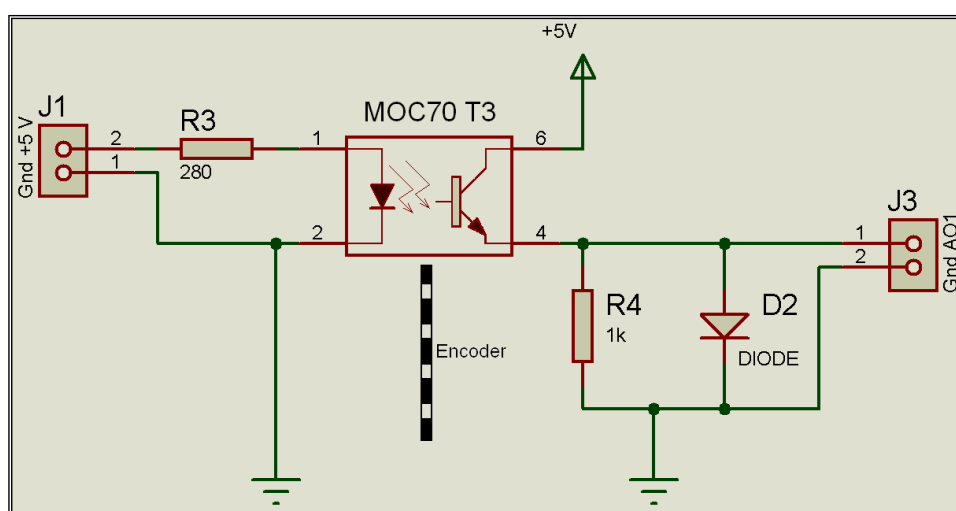
**Tabla I** – Características eléctricas del Altivar 31a

### 3.1.1.5 Circuitos de Acondicionamiento.

Hemos empleado dos diseños acondicionadores de señales detallados en los siguientes literales.

#### 3.1.1.5.1 Circuito de acondicionamiento de señal de entrada.

En el eje del motor hemos acoplado un encoder de 32 ranuras, y a su vez un sensor óptico un MOC70T3, cada vez que se haga una interrupción por encoder como se observa en la figura tendremos a la salida del interruptor un voltaje bajo, (0[V]) y cuando no se haga la interrupción un voltaje alto (1,73 [V]).



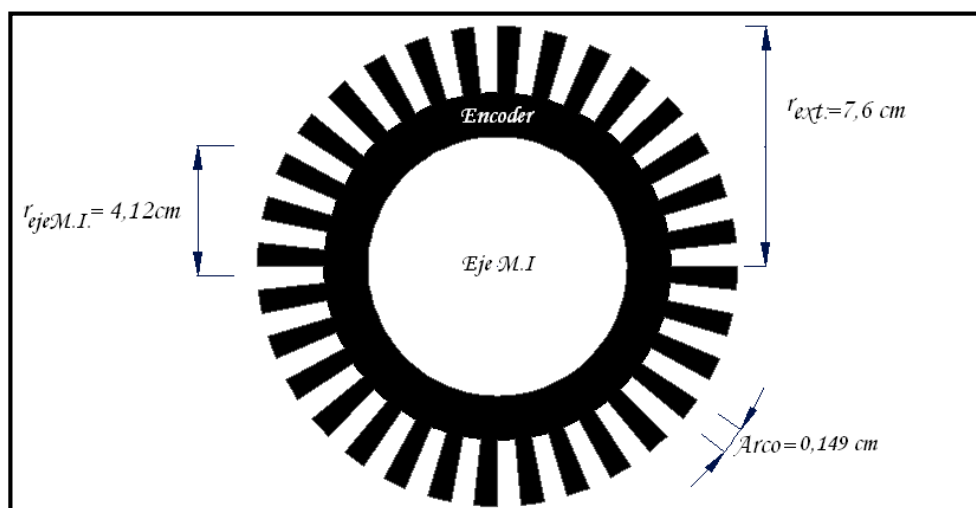
**Figura 3-5** Esquema del circuito de adquisición de datos

Como se muestra en la figura, nuestro circuito transductor nos enviará una señal analógica (AO1) que irá conectada a la entrada analógica de la DAQ NI-USB-6009.



**Figura 3-6** Encoder Acoplado con Sensor MOC70T3 al motor.

**Encoder:** Un encoder de 32 ranuras es suficientemente útil para hacer una buena lectura de la medición. Éste es un dispositivo elaborado con fibra plástica.



**Figura 3-7** Encoder empleado en la adquisición.

En el momento de la adquisición de datos nos generará una constante que afectará directamente a la lectura de la frecuencia, ya que se cuentan las interrupciones que se vayan a dar mediante al dispositivo.

$$\text{Grados por División} = \frac{360^\circ}{64^\circ} = 5,625^\circ$$

$$\text{Grados de lectura por Interrupción} = \frac{5,625^\circ}{2} = 2,8125^\circ$$

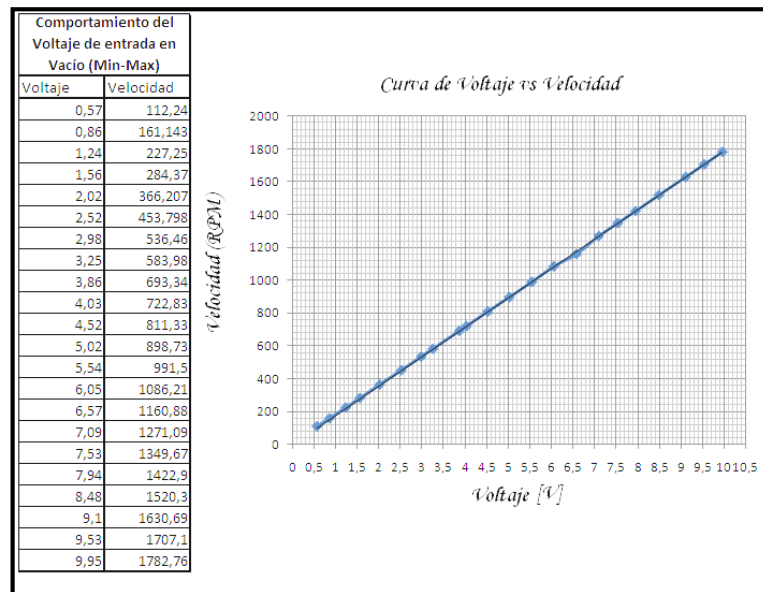
El arco es aproximadamente 0,1494 centímetros calcularemos la constante que va a hacer parte de la programación posterior, por lo que determinamos la constante de la siguiente manera:

$$K_1 = \frac{0,1494 \text{ cm}}{1 \text{ interrupción}} \times \frac{5,625^\circ}{1 \text{ división}} \times \frac{1 \text{ interrupción}}{2,8125^\circ} \approx 0,2988 \frac{\text{cm}}{\text{división}}$$

#### **3.1.1.5.2 Circuito de acondicionamiento de señal de salida.**

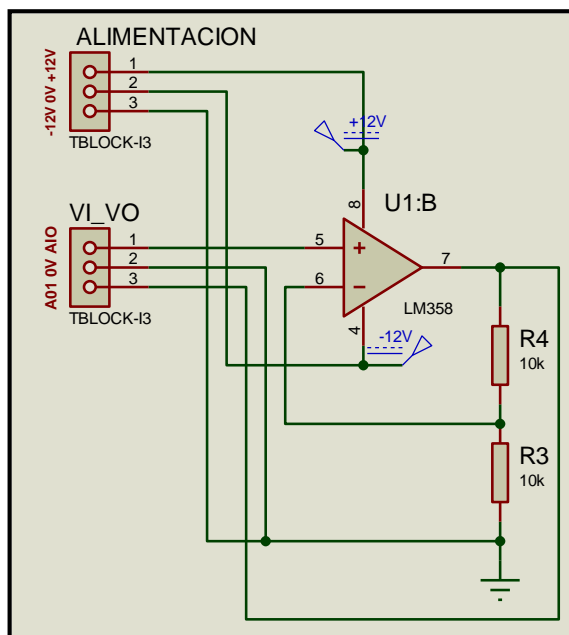
Necesitamos acoplar el voltaje de salida de la tarjeta de adquisición de datos, el voltaje máximo enviado por la DAQ-NI-USB6009 es de 5 voltios. Al hacer las pruebas experimentales, hemos comprobado la proporcionalidad que existe entre el voltaje que es suministrado desde la DAQ con la velocidad del motor sin carga y en estado estable.





**Figura 3-8** Proporcionalidad entre Voltaje y Velocidad en estado estable.

Otra de las características por las cuales hay que tener en cuenta es que al momento que se le aplica una carga para poder observar la dinámica del sistema cumpliendo con las características del control que se va a realizar tendremos que emplear los rangos de voltaje mayores a 5 voltios por lo que se utilizará un sencillo amplificador no inversor y se trabajará en el rango que nos sea útil, teniendo en cuenta que el máximo voltaje de salida de la DAQ es de 5 V. y el voltaje de entrada del Variador de la planta es de 10V.



**Figura 3-9** Circuito de Amplificación de Voltaje

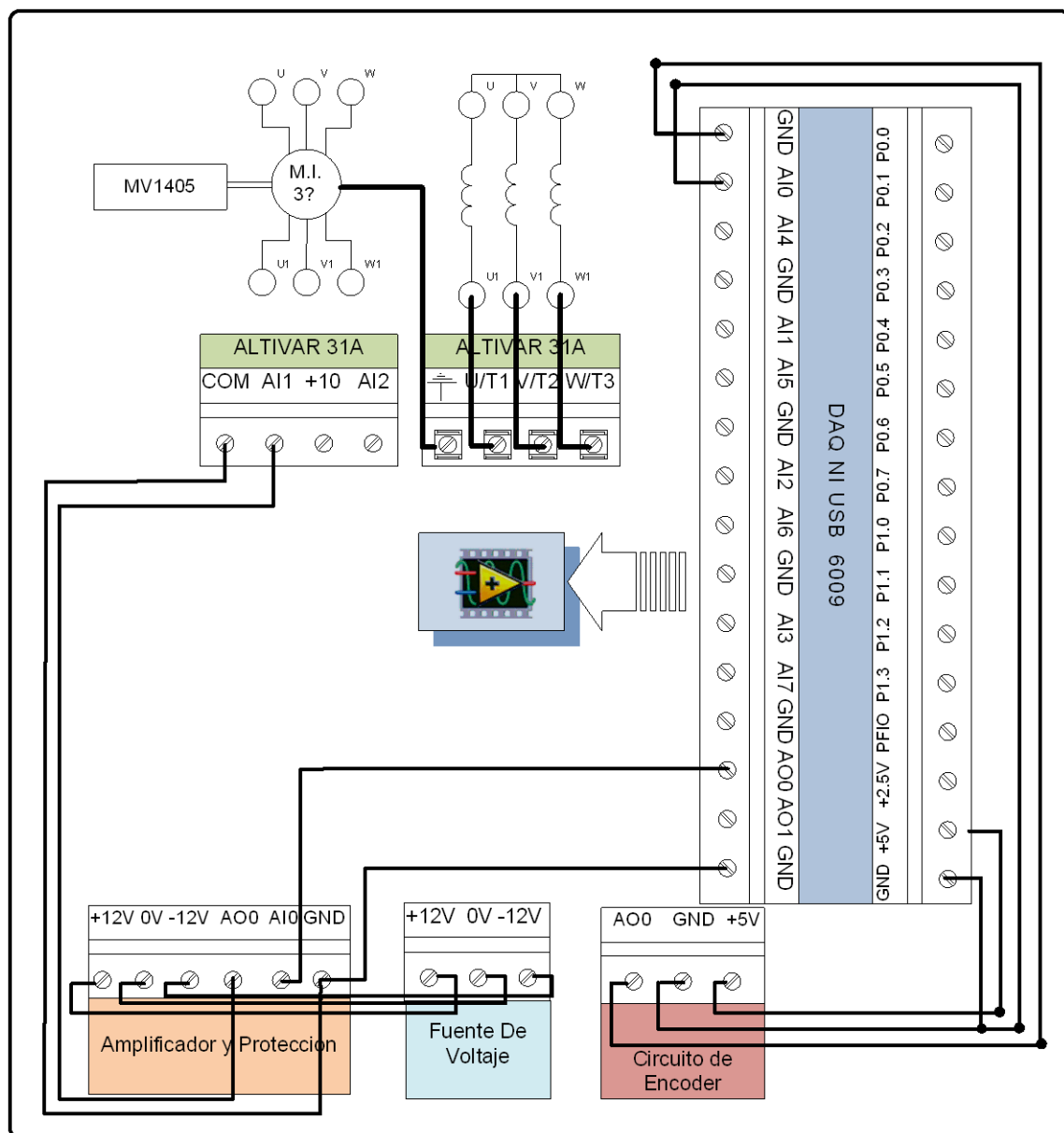
### 3.1.2 Diagramas de conexiones del sistema.

#### 3.1.2.1 Diagrama de Control.

Como se puede detallar en la Figura 3.1 se encuentran las conexiones realizadas para el control de la planta, la adquisición y generación de datos. Se observa en la parte superior, el motor de inducción en conexión con el MV1405. El Motor será alimentado mediante la conexión del Variador de Frecuencia, El control lo haremos mediante su entrada analógica de voltaje.

Emplearemos la NIUSB 6009 que permitirá hacer la interfaz con LabVIEW. Las señales tienen que ser acondicionadas por ello se observan los circuitos para la adquisición conectados a la entrada

analógica de la DAQ y un circuito de amplificación y protección que con su respectiva fuente estará conectado a la salida analógica de la DAQ

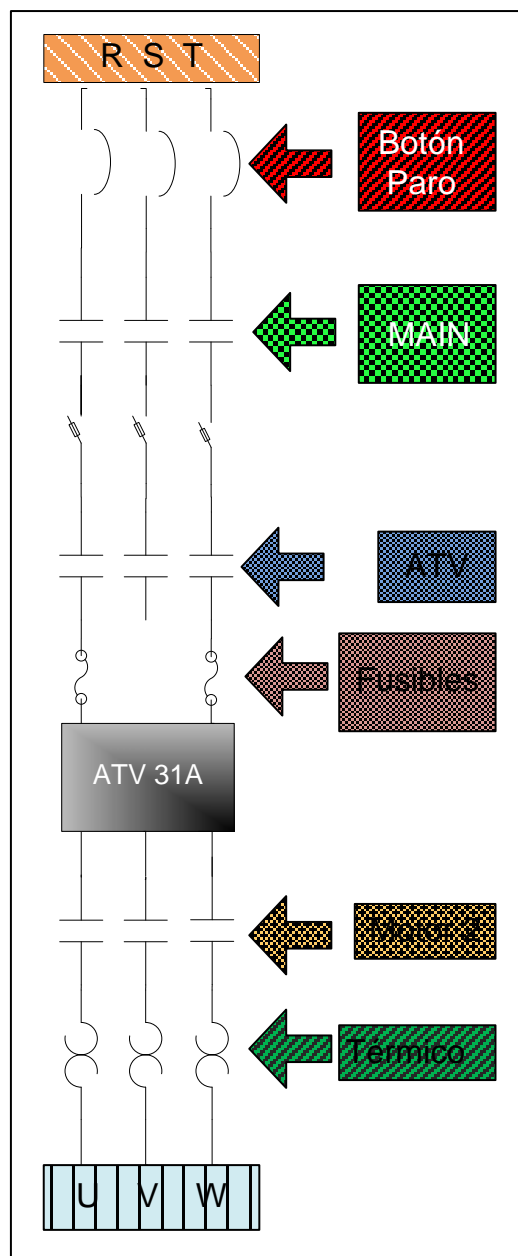


**Figura 3-10** Diagrama de Control del Sistema

### 3.1.2.2 Diagrama de fuerza del sistema.

La parte de fuerza está implementada en nuestra planta, siguiendo el diagrama que se muestra en la Figura 3.2, mediante un conjunto de elementos de fuerza, ya sean estos botones, contactores, fusibles de protección, y térmicos. Se detalla el funcionamiento del diagrama presente.

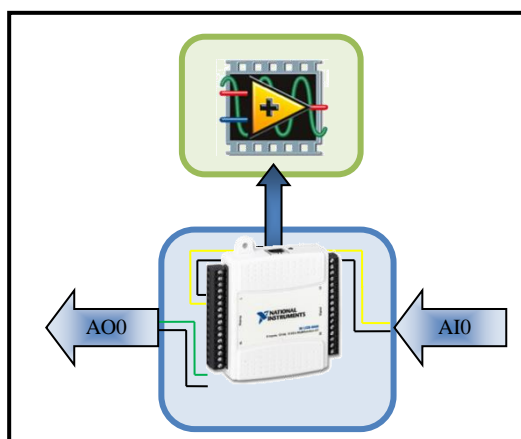
El botón de paro está normalmente cerrado. Para encender el variador de frecuencia tenemos que pulsar el botón principal Main, el que permite cerrar los contactos de Main. Posteriormente tenemos que cerrar el selector ATV. Lo que permite alimentar al variador y éste a su vez hacer el control V/f, se protege al variador con fusibles. Se presiona el botón de Marcha para el motor, además se protege al M.I.J.A mediante térmicos.



**Figura 3-11** Diagrama de Fuerza del Sistema

### 3.2 Adquisición y generación de datos

En el eje del M.I.J.A. se ha acoplado el encoder mencionado anteriormente, el cual generará una señal analógica de entrada en forma de tren de pulsos. Ésta señal analógica estará conectada a nuestra entrada analógica AIO de la Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) USB-NI 6009, la cual será procesada en LabVIEW para obtener la velocidad del M.I.J.A. que vamos a muestrear. También tenemos la necesidad de enviar señales analógicas al motor de inducción empleando el variador de frecuencia y así poder realizar las pruebas respectivas, estas señales las vamos a generar desde la salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos AOO.



**Figura 3-12** Diagrama de la Adquisición y Generación de Datos

### 3.2.1 Programación en LabVIEW

Hemos usado el software de LabVIEW 2009 Service Pack1 en la versión de Evaluación proporcionada gratuitamente con la tarjeta de adquisición de datos, empleando a éste programa como herramienta principal tanto como en la adquisición de datos desde la planta y en la generación de datos hacia la planta.

#### 3.2.1.1 Panel Frontal.

LabVIEW emplea una interfaz gráfica como la que se muestra en la **Figura** que facilita la visualización de tres gráficas importantes para nuestro análisis.

La primera, la Señal analógica de Encoder, el segundo la Señal Analógica de Entrada Diseñada, el tercero, la Respuesta a la Señal de Entrada.

Además se muestra la frecuencia medida y la velocidad del motor.

Se seleccionará que tipo de señal se procederá a enviar.

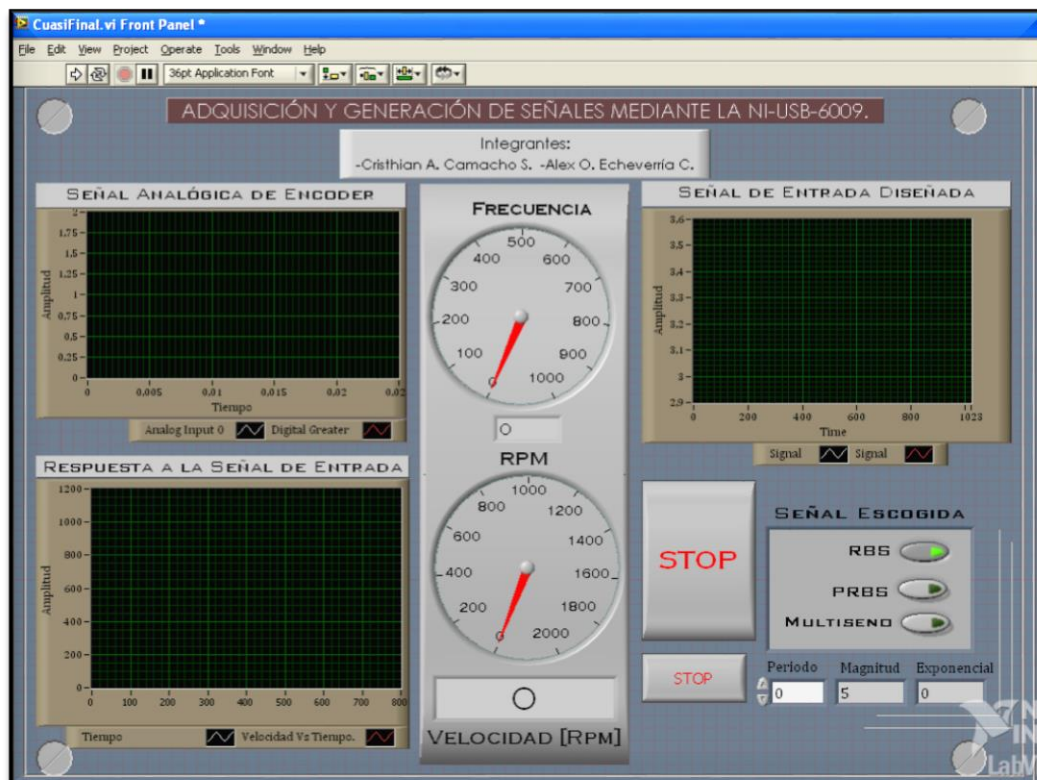
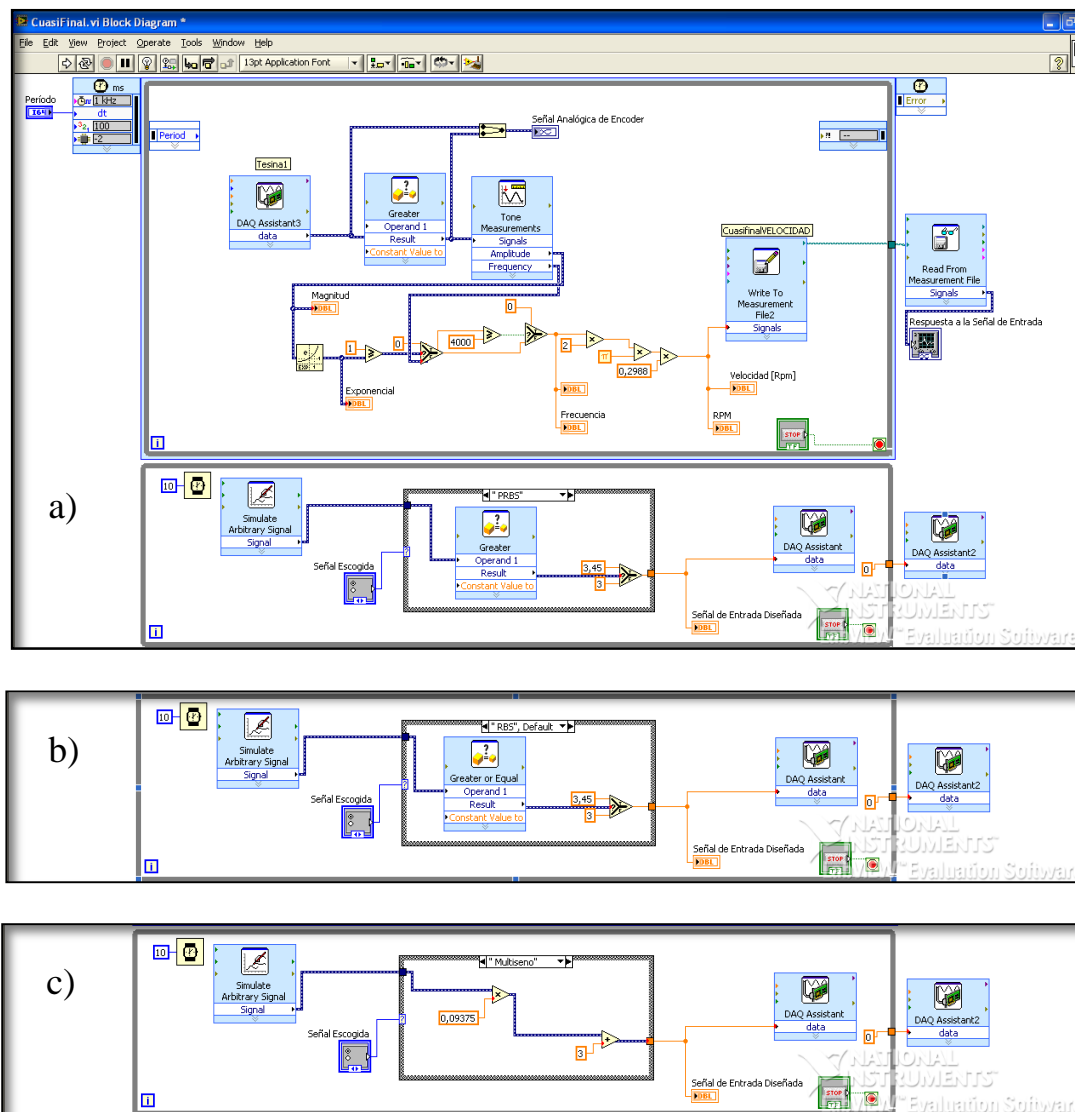


Figura 3-13 Ventana del Panel Frontal



### 3.2.1.2 Diagrama de Bloques

Se emplea programación gráfica, en la cual se ejecutan los procesos:



**Figura 3-14** Diagrama de bloques General a) Diagrama de Bloques Principal escogiendo la señal PRBS b) se escoge dentro de la estructura de caso a la señal RBS c) se selecciona dentro de la estructura de caso a la señal Multiseno

Se ha programado dos lazos principales, uno para la adquisición y otro para la generación, la cual se va a detallar a continuación:

### 3.2.1.2.1 Lazo de Adquisición

El proceso empieza al colocar desde la pantalla principal el periodo de muestreo necesario para la adquisición de los datos que ingresan a nuestro programa mediante la entrada analógica de la NiUSB-6009, éste periodo de muestreo será el periodo del lazo dependiendo del que el usuario le asigne. En el proceso se distinguirá, la adquisición, la adecuación, la medición de tono de la señal, un proceso matemático para obtener la velocidad deseada, la escritura de los datos en un archivo, y la lectura para obtener el gráfico de la respuesta a la señal que se tiene en la entrada.

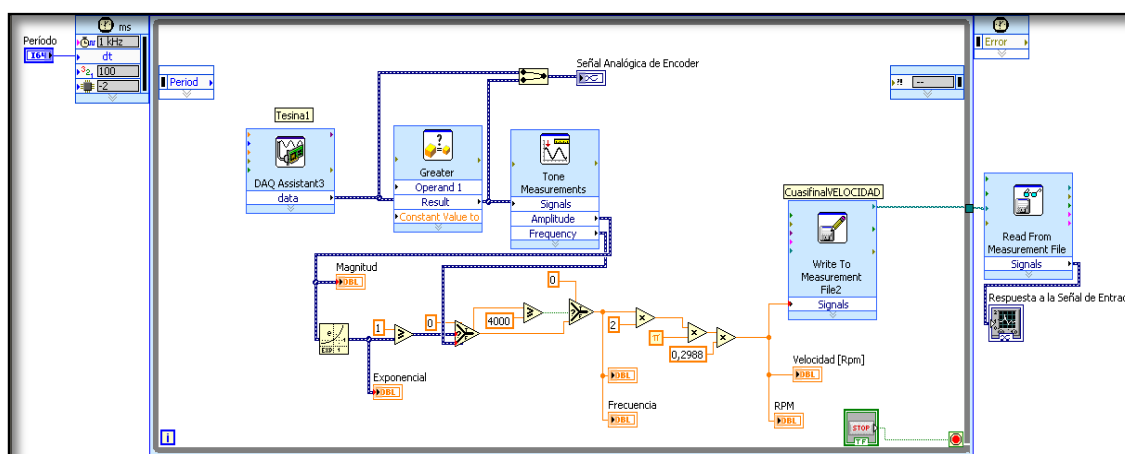


Figura 3-15 Programación del Lazo de Adquisición

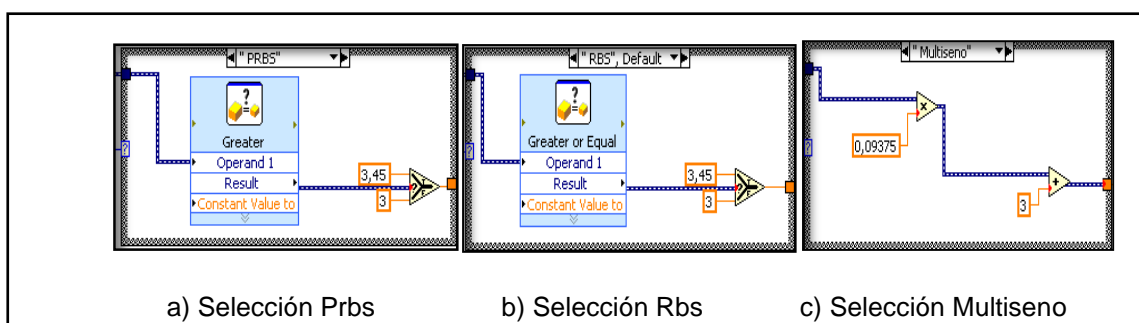
### 3.2.1.2.2 Lazos de Generación

La señal de entrada al sistema la vamos a enviar desde un simulador de señal arbitrario, en el cual se ha colocará la señal diseñada. La señal seleccionada previamente en el panel frontal entrará a una estructura de casos, ya sea ésta una señal PRBS, RBS, o Multiseno.

Se adecuará la señal a las condiciones deseadas y se enviará los datos hacia la planta mediante un asistente de la tarjeta de adquisición y generación de datos.

El periodo lo dirigirá el bloque de transición de tiempo interno del lazo.

Donde para los 3,45 [V] tenemos 1200 rpm y para 3 [V] 1040 rpm.

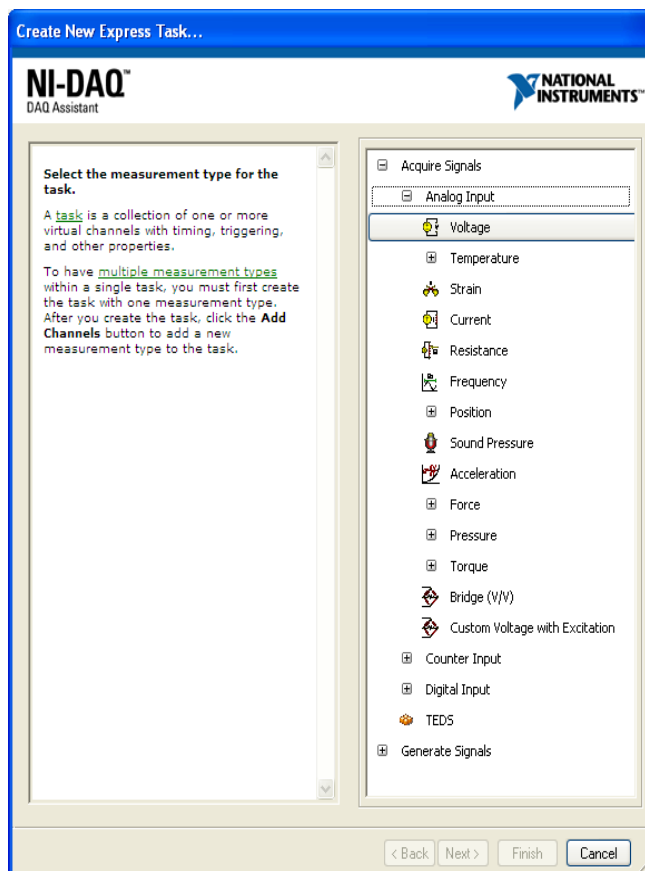


**Figura 3-16** Lazo de Estructuras de caso con las diferentes posibles señales de entrada.

### **3.2.1.3 Configuración De La Tarjeta De Adquisición De Datos.**

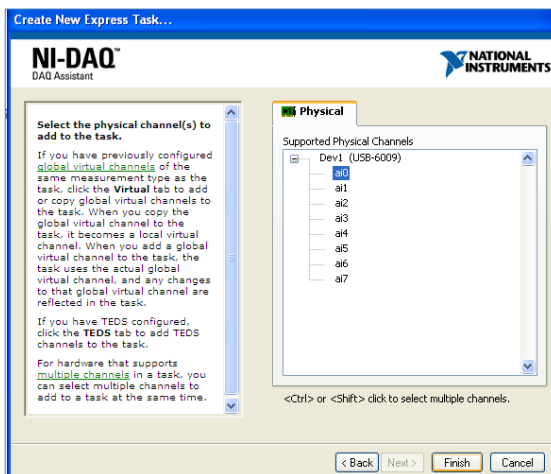
Debemos iniciar a configurar la DAQ entrando por el ícono mostrado en la Figura 3-31 visto anteriormente. Nos aparecerá una ventana, en la que podremos seleccionar tanto como generar o adquirir una señal. Empezamos adquiriendo una señal, en nuestro caso buscamos obtener la señal analógica de voltaje que nos proporcionará el circuito de encoder.

En la siguiente figura se muestra la ventana, existe una lista de posibles señales análogas, las cuales dependerán de la tarjeta de adquisición de datos en nuestro caso la NIUSB6009 permite entradas análogas de voltaje y de corriente, seleccionaremos la señal de voltaje.



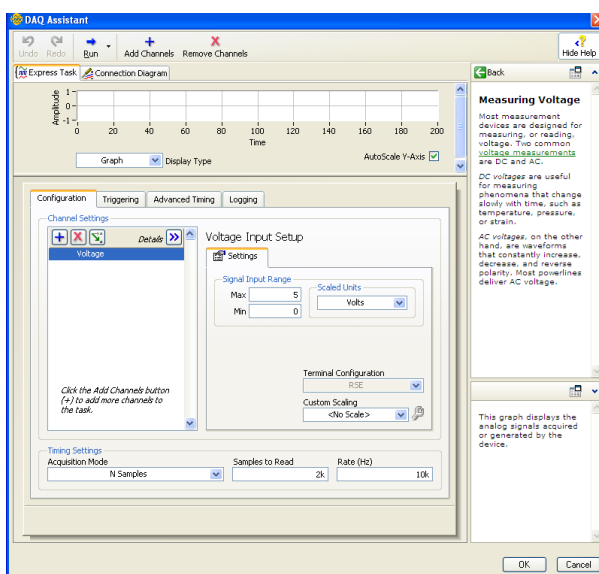
**Figura 3-17** Selección de Voltaje en la Adquisición.

- Se muestran los posibles canales a los cuales se puede colocar un voltaje, de entrada. Esto también dependerá de la tarjeta, hay algunas tarjetas que tienen más entradas que otras. Seleccionaremos la entrada analógica (AIO).



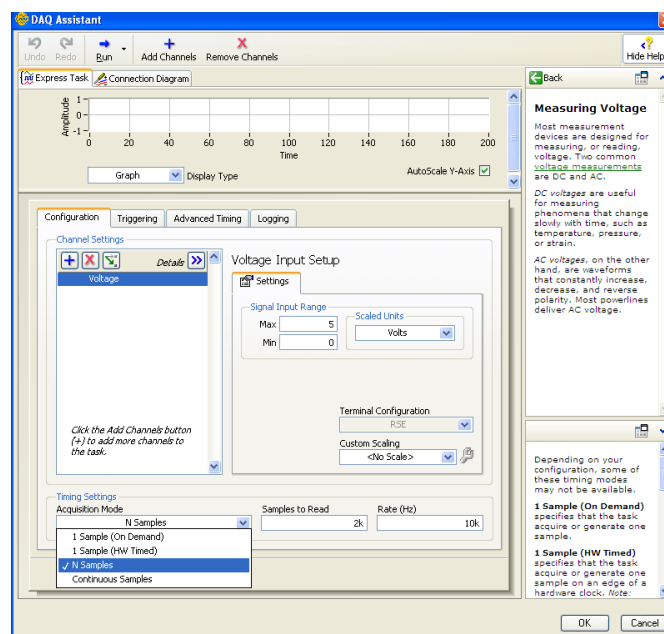
**Figura 3-18** Canales Analógicos de Entrada

- Una vez seleccionado el canal, podremos configurar el tipo de terminal que necesitamos, el voltaje máximo y el mínimo que se va a emplear, el modo de adquisición, la frecuencia de lectura y muestras a leer. Presionando el botón de Arranque (Run), se pueden hacer pruebas dentro de la misma ventana, y verificar la adquisición de los datos.



**Figura 3-19** Ventana de configuración DAQ Assistant.

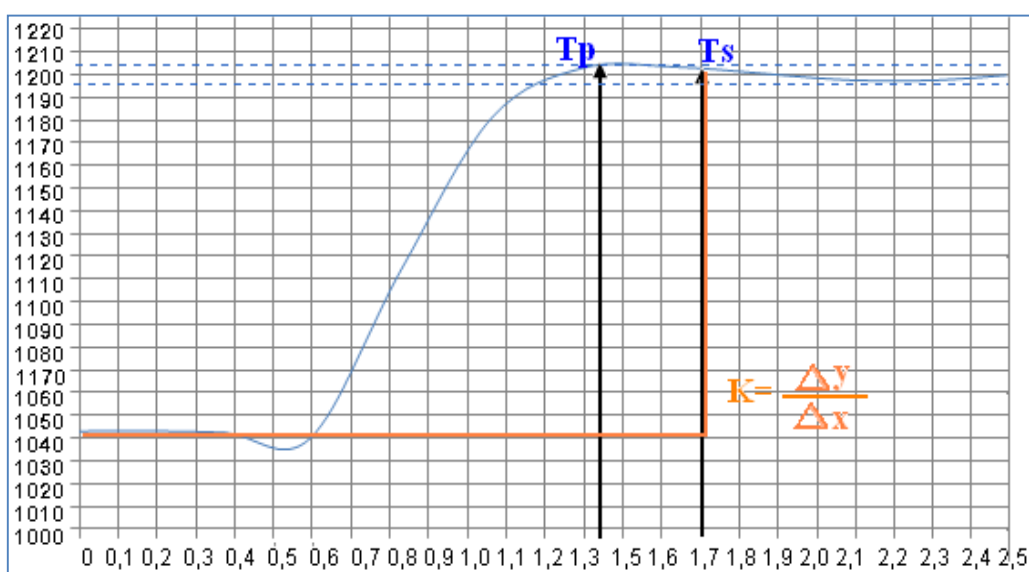
- Nuestros datos de configuración serán:
  - Máximo Voltaje: 5 [V].
  - Mínimo Voltaje: 0 [V].
  - Configuración del Terminal: RSE
  - Modo de Adquisición: N-Muestras.
  - Muestras a leer: 2 [K/muestras]
  - Frecuencia: 10 [K]



**Figura 3-20** Ventana de Configuración para N-Samples.

### 3.3 Características de la Planta.

Ingresamos una señal de prueba, que será la señal escalón. En donde detallamos la obtención de los parámetros adecuados teniendo en cuenta la respuesta de la planta como la Figura 3-21 que se detalla a continuación:



**Figura 3-21** Respuesta de la planta real a un Escalón Unitario

#### 3.3.1 Tiempo de estabilización del Sistema

El tiempo de estabilización es el tiempo en el que la señal tiende a estabilizarse en un rango  $\pm 2\%$  de su amplitud:

$$\text{Rango de Estabilización de Velocidad} = \text{Velocidad Max}(\text{Velocidad Max} - \text{Velocidad Min}) * 2\%$$

$$\text{Rango de Estabilización de Velocidad} = 1200(1200 - 1040) * 0.02$$

$$\text{Rango de Estabilización de Velocidad} = (1200.0 \pm 3.2) \text{ RPM}$$



Cuando la Velocidad se encuentra dentro del rango de estabilización, tomaremos el tiempo del primer valor que se encuentre en el rango.

$$\text{Velocidad} = 1203 \text{ RPM} \rightarrow T_s = 1,7 \text{ s}$$

### 3.3.2 Tiempo pico de la Planta.

El tiempo en que la planta llega a su tiempo pico es:

Tiempo Pico = Tiempo Velocidad Pico - Tiempo Velocidad Inicial

$$T_p = 1,38 \text{ s.}$$

### 3.3.3 Obtención del Tao Dominante de la planta.

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

$$T_p = \frac{\pi^2}{\omega_n^2 - \xi^2 \omega_n^2}$$

$$\frac{T_p^2}{16} = \frac{\frac{\pi^2}{16}}{\frac{\omega_n^2}{16} - \frac{\xi^2 \omega_n^2}{16}}$$

$$\frac{T_p^2}{16} = \frac{\frac{\pi^2}{16}}{\frac{\omega_n^2}{16} - T_s^2}$$

$$\frac{\omega_n^2}{16} = \frac{\frac{\pi^2}{16}}{\frac{T_p^2}{16}} + T_s^2$$

$$\omega_n = \sqrt{16 \left( \frac{\pi^2}{\frac{16}{T_p^2}} + T_s^2 \right)}$$

$$\omega_n = \sqrt{16 \left( \frac{\pi^2}{\frac{16}{1,38^2}} + 1,7^2 \right)}$$

$$\omega_n = 11,3649 \text{ rad/s}$$

$$\xi = \frac{4}{T_s \cdot \omega_n}$$

$$\xi = \frac{4}{(1,7)(11,36)}$$

$$\xi = 0,20703 \text{ rad}^{-1}$$

$$\tau = \frac{1}{\xi \cdot \omega_n}$$

$$\tau = \frac{1}{(0,20703)(11,36)}$$

$$\tau = 0,4252 \text{ s}$$

### 3.3.4 Obtención de la Ganancia.

Relación directa que existe entre el valor de inicio y el valor de estado estacionario del sistema.

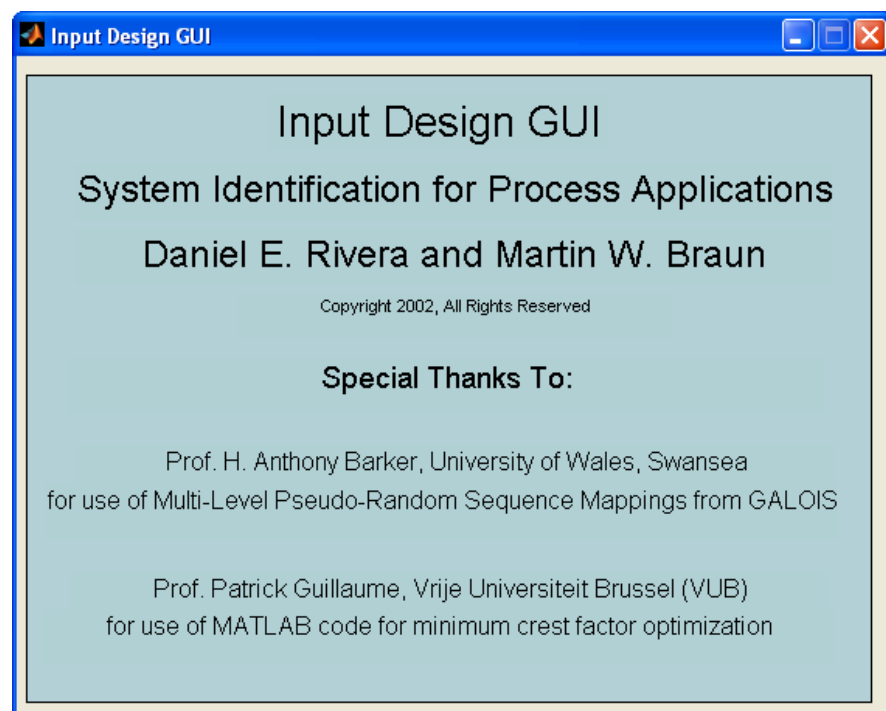
$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$k = \frac{(1200 - 1040)}{1,7}$$

$$k = 94,11$$

### 3.4 Diseño de señales de entrada

Vamos a diseñar las señales en MATLAB con la ayuda de un programa desarrollado por Daniel E. Rivera y MartinW. Braun mediante la interfaz gráfica llamada InputDesignGui.



**Figura 3-22** Ventana Principal

Los parámetros comunes de las señales son:

- **Amplitud:** que será la amplitud que deseamos que nuestra señal tenga.
- **Tiempo de Muestreo:** Tiempo en el cual se va a ir muestreando los valores de la señal,

- **Señal de Desplazamiento:** Es el valor dc que es sumado a la señal.

The screenshot shows the 'Input Design GUI' window. At the top, there are buttons for 'Plot/Analyze', 'Save Plots', 'Close Plots', 'Load Signal', and 'Save Signal'. Below these is a 'General Signal Specs' section with fields for 'Initial Deadtime', 'Amplitude (+/-)', 'Sampling Time', 'Final Deadtime', and 'Signal Bias'. A 'Periodic Rotation' section has radio buttons for 'None', 'Max Move', 'Min Move', and '0'. The main area is divided into four columns of signal generation options: 'Double Pulse', 'Pseudo Random Binary Sequence', 'Multi-level Pseudo Random Sequence', and 'Multisineoidal'. Each column has its own set of parameters like 'Number of Cycles', 'Duration', 'Amplitude', and 'Harmonic Suppression'. There are also sections for 'Plots' (Time Series, Histogram, Autocorrelation, Power Spectrum) and 'Warnings'. At the bottom right, there are fields for 'Generation Method' (Schroeder-phased, Minimum Crest Factor) and 'Max. Var.', 'Max. iter.', and 'Max. p'.

Figura 3-23 Ambiente de Trabajo.

### 3.4.1 Obtención de la Frecuencia de Muestreo

Según Nyquist-Shannon en su teoría de muestreo menciona que para poder replicar una onda con exactitud se necesita una frecuencia de muestreo mayor al duplo de la frecuencia a muestrear.

$$\omega_n = \frac{\pi}{T} [\text{rad/s}]$$

El ancho de banda del sistema se determina del gráfico de Bode y se relaciona con  $\tau_{dom}$

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

Un criterio que se puede utilizar es que:

$$\omega_n > \alpha * \omega_B$$

Donde  $\alpha$  es un entero múltiplo del ancho de banda, que nos lleva:

$$T_{muestreo} \leq \frac{\pi}{\alpha} \tau_{dom}$$

### 3.4.2 Aspectos considerados en las señales de entrada.

Generamos las señales de entrada teniendo en cuenta el  $\tau_{dom}$  como parámetro principal para el tiempo de conmutación, y seleccionando de entre cada tipo de señal de entradas que se podrían diseñar, a aquellas cuyo espectro de frecuencias muestre un comportamiento adecuado, es decir, con una alta ganancia y que cubra el rango de frecuencias en el cual va a trabajar nuestra planta. Nos basaremos en

los siguientes parámetros, para buscar una mejor aproximación a la repuesta al escalón:

- $K= 94.11$
- $T_s= 1.7$  segundos
- $T_{ao}= 0.425$  segundos

Las señales que vamos a considerar para la entrada del sistema son de tres tipos:

- Secuencia Binaria Aleatoria (RBS).
- Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS).
- Señal Multisenso.

Los parámetros que se van a configurar en la ventana de la interfaz gráfica de usuario, en el InputDesignGui para cada señal serán los que se detallan a continuación:

### ***SECUENCIA BINARIA ALEATORIA (RBS)***

**Duración de la señal:** Tiempo total durante el cual se va a generar la señal; viene dado en segundos.

**Probabilidad de conmutación:** Probabilidad de que se mantenga o cambie el valor actual de la entrada; por ejemplo de alto a bajo o viceversa. El valor recomendado es 0.5 para que en lo posible no afecte a la señal generada.

**Tiempo de conmutación:** Tiempo mínimo de cada pulso.

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

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

#### **Especificación Directa**

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

**Número de registros:** registros a ser utilizados en la operación XOR entre ellos, con un máximo de 8 registros. Generalmente se escoge 6 o 7 para nuestro caso.

#### **Especificaciones por pauta:**

**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.

### **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.

### 3.4.3 Esquema de las Pruebas realizadas.

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

Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)									
N° Prueba	Tiempo de Muestreo	Amplitud	Desvío de la señal	Duración de la señal	Probabilidad de conmutación	Tiempo de conmutación			
1	1	1	0	240	0,5	4			
2	1	1	0	300	0,5	3			
3	1	1	0	150	0,5	3			
4	0,3	0,5	0,5	90	0,5	0,9			
Secuencia Binaria Pseudo - Aleatoria (PRBS)									
	Tiempo de Muestreo	Amplitud	Desvío de la señal	Tiempo de conmutación	Número de registros	Alpha	Beta	Tao_dom LO	Tao_dom HI
1	0,2	2,4	2,4	-	-	2	3	0,31893	0,53147
2	0,15	2,4	2,4	-	-	3	4	0,354334	0,496066
3	0,3	0,5	0,5	1,2	6	-	-	-	-
4	0,4	0,5	0,5	1,6	6	-	-	-	-
Señal Multi - Sinusoidal									
	Tiempo de Muestreo	Amplitud	Desvío de la señal	Tao_dom LO	Tao_dom HI	Alpha	Beta		
1	0,8	2,4	2,4	0,31893	0,53147	2	3		
2	0,2	2,4	2,4	0,354334	0,496066	3	4		
3	0,3	2,4	2,4	0,354334	0,425	2	3		
4	0,3	2,4	2,4	0,425	0,496066	2	3		

**Tabla II** – Parámetros ingresados a cada señal de entrada.

## 3.5 Análisis de las señales de entrada.

### 3.5.1 Secuencia Binaria Aleatoria – RBS

Éste tipo de señal al ser netamente aleatoria, hicimos los cuatro experimentos para ver la respuesta de la planta y la observación de la dinámica del sistema.



La probabilidad de conmutación será constante para los cuatro casos, por lo que se busca una señal que sea aleatoria. La duración de la señal también es importante ya que de esta dependerá el tiempo empleado para ingresar cada señal.

El ancho de pulso permitirá observar como la planta está reaccionando a los cambios, si este grosor es muy pequeño, la planta no podría notar los cambios, en caso de ser muy gruesos, no se daría a notar que tan dinámica es nuestra planta, en los dos casos, se perdería información.

A medida que se hicieron las pruebas percibimos el funcionamiento del sistema, y aun conociendo las condiciones de la planta hicimos las pruebas correspondientes hasta lograr una buena señal de secuencia binaria aleatoria. Fuimos disminuyendo la duración de la señal, y el tiempo de duración de la señal, el tiempo de muestreo, tomando en cuenta el  $\tau$  de la planta.

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.

En la Respuesta al escalón, obtuvimos inestabilidad en las tres primeras señales, ya que no estaban dentro del límite correspondiente al Tao de la planta, lo que enfatiza que se deben considerar con rigidez cada uno de los parámetros. Al estar la cuarta señal estrictamente en los parámetros, obtuvimos una mejor respuesta al escalón.

### 3.5.2 Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria - PRBS

Existen dos criterios para realizar nuestra señal PRBS, por ello decidimos diseñar dos señales para cada uno.

El primero llamado especificación por línea de guía, llamado así por seguir la guía de diseño, consiste en delimitar al Tao de la planta,  $Tao = 0,4252$  segundos, estos límites serán el Tao dominante de alta ( $\tau_{dom}^{Hi}$ ) y el Tao dominante de baja ( $\tau_{dom}^{Lo}$ ), por eso, hemos decidido tomar valores muy cercanos, tomando el Tao de la planta como un valor central para ambos límites, ese fue el criterio empleado, ya que cada persona puede emplear su propio criterio para limitar la señal a diseñarse, obteniendo una respuesta aceptable en las pruebas realizadas.

El valor de alfa ( $\alpha$ ) permite que las frecuencias altas se noten y tenga un buen comportamiento transiente en la aproximación del sistema. Por el contrario, el valor de beta ( $\beta$ ) denota las frecuencias bajas, y aporta con un mejor comportamiento estable en la señal. Dadas estas características hemos diseñado las dos primeras señales PRBS Obteniendo resultados muy acertados.

El segundo, llamado especificación directa, al consistir en tener un tiempo de conmutación y en la colocación de un número de registros, hemos optado por colocar un tiempo de muestreo menor al de las otras señales, y un tiempo de conmutación menor.

### **3.5.3 Multiseno**

Los criterios empleados dentro de éste tipo de señales son muy parecidos a los de la señal PRBS, empleando la guía de diseño, al momento de ingresar nuestras señales Multiseno a nuestro sistema, nos dimos cuenta de cómo esta señal no hacía notar la dinámica característica de nuestro sistema, al momento de tener señales sinusoidales suaves para la reacción de nuestra planta. Dándonos de ésta forma una inestabilidad al momento de que la planta sea sometida a una respuesta al escalón.

### 3.6 Análisis de correlación

Emplearemos MATLAB para hacer los análisis de correlación, determinación de la respuesta al impulso, análisis de covarianza y correlación cruzada de nuestro conjunto de datos.

El comando que vamos a emplear se llama CRA, la que realiza el análisis de correlación para estimar la respuesta al impulso.

**[Matriz]=CRA (Z, M, NA, PLOT)**

**[Matriz]:** Es la matriz resultante con los coeficientes de la respuesta al impulso.

**CRA:** Comando propio de MATLAB que permite la estimación al impulso.

**Z:** Es el conjunto de datos de entrada y salida que la señal emplee, ésta puede ser una matriz o una variable iddata.

**M:** Es el ancho de la ventana a la cual se va a dar el análisis de correlación

**NA:** Es el orden del filtro de pre-blanqueado. Por defecto es 10, debemos tener en cuenta que con un preblanqueado muy alto, las características de la señal se puede perder.

**PLOT:** Es cómo se quiere que se muestren los gráficos. Teniendo en cuenta tres valores, para cuando éste sea 0, no va a mostrar gráfico.

Cuando sea 1, va a mostrar una gráfica de los coeficientes de la respuesta al impulso con un intervalo de confianza del 99%.

Finalmente, cuando este parámetro sea 2, se mostrarán cuatro dibujos en nuestra gráfica, ya sean éstos, la correlación de la entrada, la correlación de la salida, la correlación cruzada, y la respuesta al impulso.

Antes que nada debemos crear nuestro conjunto de datos llamado Z de nuestro comando mencionado anteriormente, podemos crear con sencillez una matriz como también podemos hacer un dato iddata. Ambos tipo de elaboración de conjunto de datos nos es útil.

Para hacer nuestra matriz, únicamente colocamos en la primera fila, el conjunto de datos de salida, y en la segunda columna el conjunto de datos de entrada.

**P4=[y\_Prbs4 u\_Prbs4];**

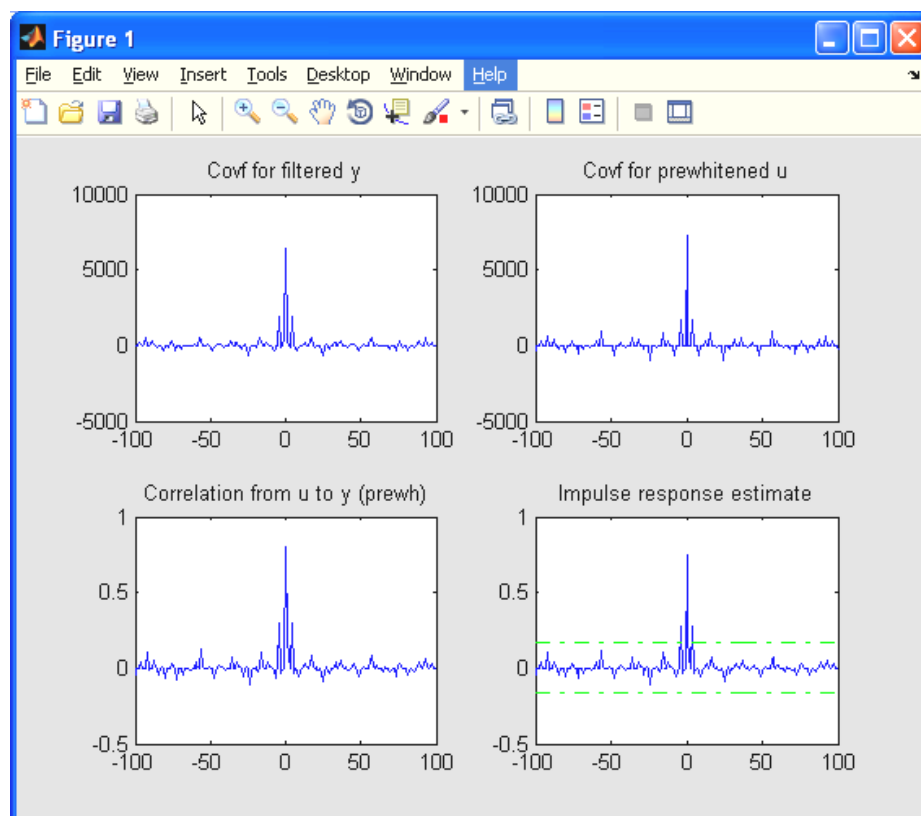
Para hacer el dato iddata, debemos considerar que los parámetros considerados son, el conjunto de datos de salida, el conjunto de datos de la entrada y el tiempo de muestreo, por tanto, nuestro dato será de la siguiente forma.

**dataP4= iddata(y\_Prbs4,u\_Prbs4,0.4)**

Teniendo en cuenta todo lo mencionado con anterioridad, vamos a ejecutar la siguiente función:

```
irP4=cra(P4,100,10,2);
```

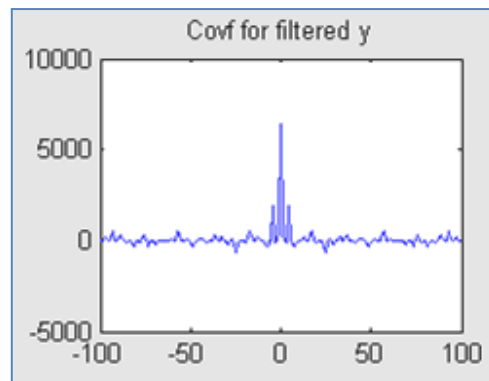
Obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 3-24** Análisis de Correlación

### 3.6.1 Autocorrelación de Entrada

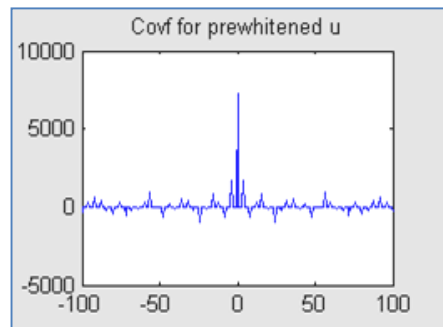
Esta grafica resulta gracias a la autocorrelación de la señal de entrada, la cual nosotros hemos diseñado con las técnicas de identificación paramétrica, podemos observar sus características muy parecidas a las del ruido blanco.



**Figura 3-25** Autocorrelación de Entrada

### 3.6.2 Autocorrelación de la señal de salida

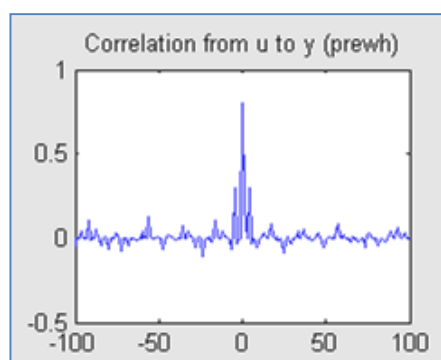
La autocorrelación de la señal de salida, tiene características de ruido blanco, y es muy parecida a la autocorrelación de la señal de entrada, por el preblanqueado, la señal no presenta dependencia de los valores anteriores.



**Figura 3-26** Autocorrelación de Salida

### 3.6.3 Correlación Cruzada.

La correlación cruzada nos ayudará a ver la relación que existe entre la entrada y la salida para todos los periodos. Los valores anteriores de la entrada no afectan a la salida, pero el valor actual de la entrada si afecta al valor actual de salida como se puede observar en el gráfico, cuando estamos en el valor actual, se formará un pico. Por tanto, podemos observar que si hay relación entre la entrada y la salida. Al ver que si hay Correlación Cruzada, podemos continuar con nuestro análisis.

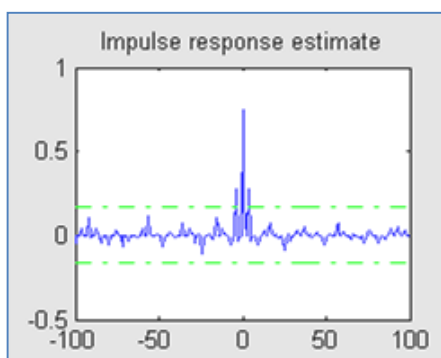


**Figura 3-27** Correlación Cruzada.



### 3.6.4 Respuesta al Impulso.

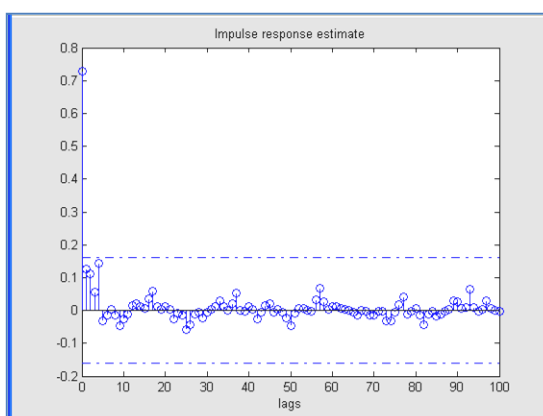
Mostrará los coeficientes de la correlación cruzada, como podemos observar se tiene un amplio margen de confianza, en donde nuestros valores actuales están en dentro del límite.



**Figura 3-28** Estimación de la respuesta al impulso

Para facilitar la gráfica de la respuesta al impulso, en Matlab podemos graficar mediante la función **cra** que mencionamos anteriormente, con el número de gráficas reducida a 1.

**irP4=cra(P4,100,10,1);**



**Figura 3-29** Coeficientes de la respuesta al Impulso.

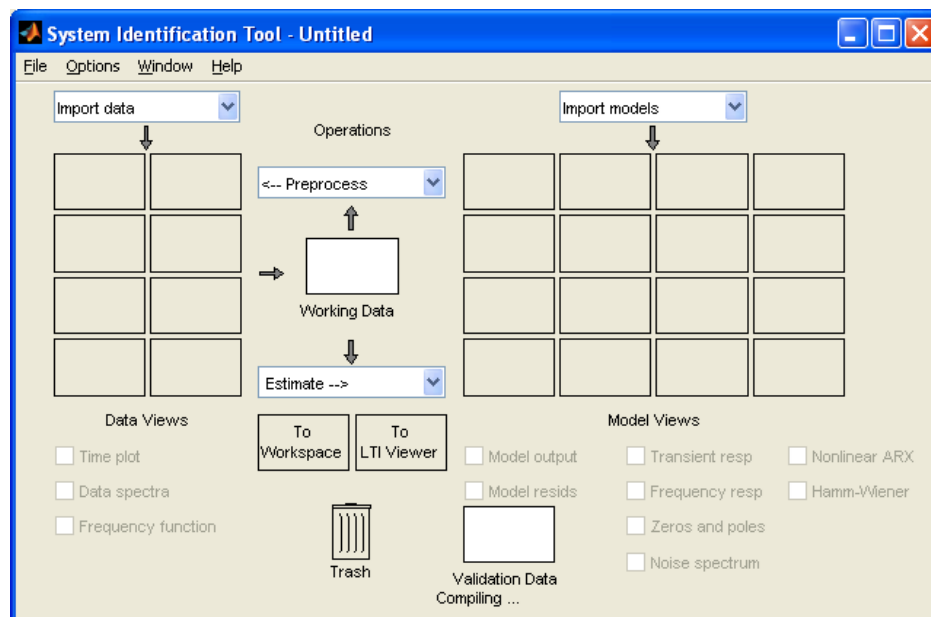
Se pueden distinguir de una mejor manera los coeficientes  $b_n$ , que están dentro del intervalo de confianza

### **3.7 Análisis de Respuesta Transiente.**

Para poder realizar un análisis de respuesta transiente, vamos a emplear MATLAB, específicamente la System Identification Tool, la que ofrece un entorno interactivo para análisis de datos, la estimación del modelo y la visualización de la respuesta.

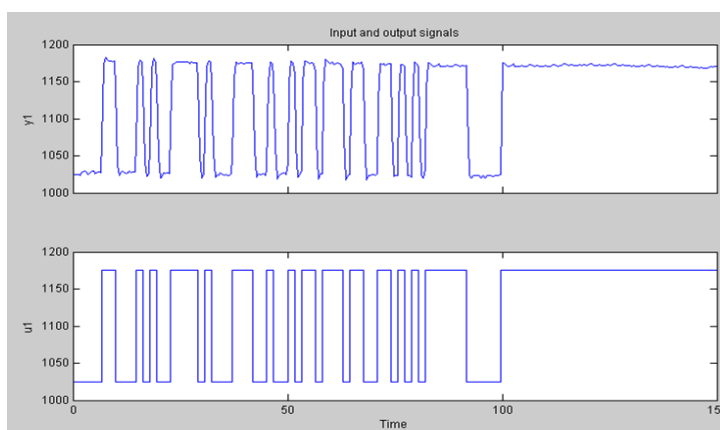
Esta interfaz gráfica de usuario, tiene una variedad de modelos (no paramétricos y lineales o no lineales paramétricos) en donde se puede calcular y visualizar sus respuestas y en comparación el uno con el otro. Basta con tener un conjunto de datos de entrada y salida para poder empezar a trabajar en esta interfaz, para nuestro caso emplearemos un conjunto de tipo de datos `iddata` realizado anteriormente.

En la ventana de comandos, escribiremos `>> ident` el resultado será la siguiente ventana de trabajo:



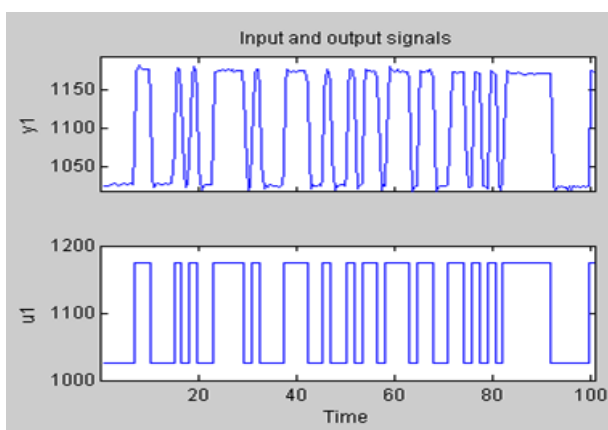
**Figura 3-30** Interfaz de Ident Toolbox.

- En el menú de Import data, seleccionaremos **DataObject**.
- Luego Vamos a importar nuestros datos de nuestra señal escogida PRBS4, que están contenidos en un iddata que lo hicimos anteriormente llamado **dataP4** obteniendo los siguientes resultados:



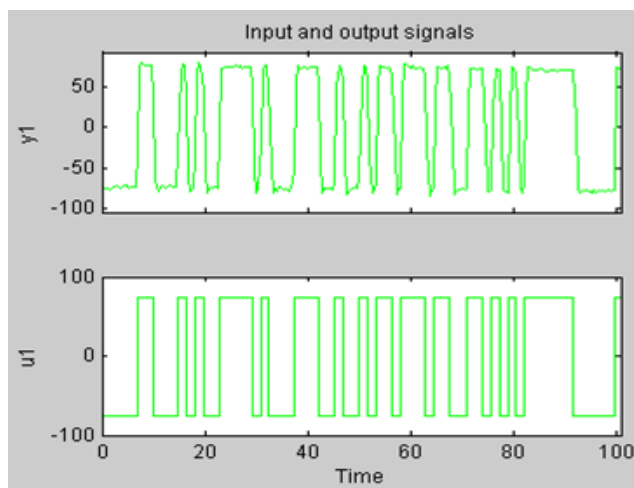
**Figura 3-31** Señal de salida( $y_1$ ) y señal de entrada( $u_1$ )

Como se puede observar la señal Prbs, ya no se sigue generando a partir de ciertos valores pertenecientes a un solo ciclo, por ello se necesita eliminar los datos que se encuentren fuera de rango.



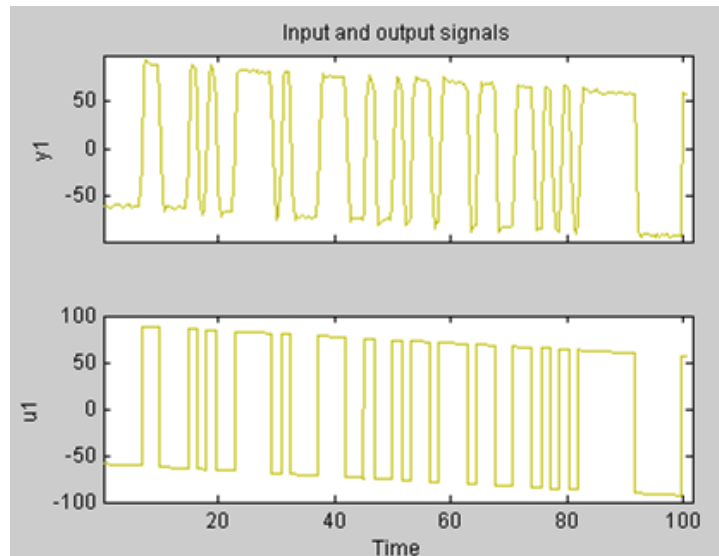
**Figura 3-32** Señales de salida y entrada sin datos aberrantes.

- Procedemos a remover las medias, lo que nos interesa es ver más los cambios más que los promedios de las señales.



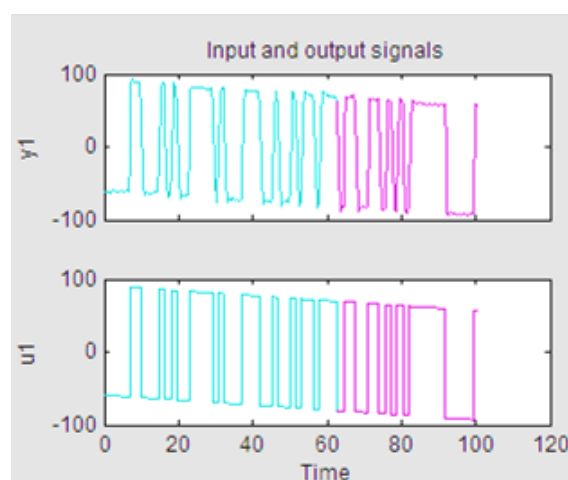
**Figura 3-33** Señales de salida y entrada sin medias.

- También removeremos las tendencias, esto nos ayudará a suprimir ciertas variaciones y tendencias en el tiempo.



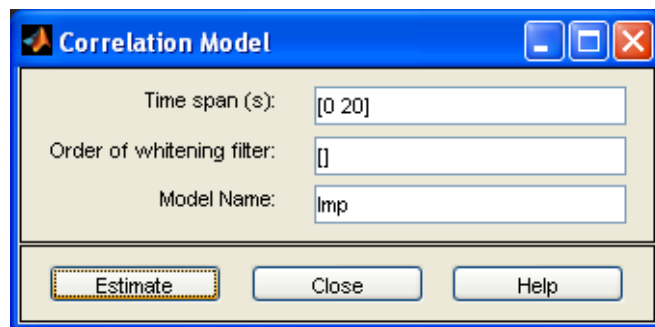
**Figura 3-34** Señales de salida y entrada sin tendencias.

- Luego seleccionamos el rango de datos de trabajo (62.30% - P4planta) y el rango de datos para validación (37.7% - P4validar)



**Figura 3-35** Selección por rangos de señal de Entrada y salida.

- En el menú de Estimar, Vamos a seleccionar Correlation Models, esta opción nos permitirá realizar una respuesta no paramétrica de las señales.



**Figura 3-36** Estimación del Modelo de Correlación

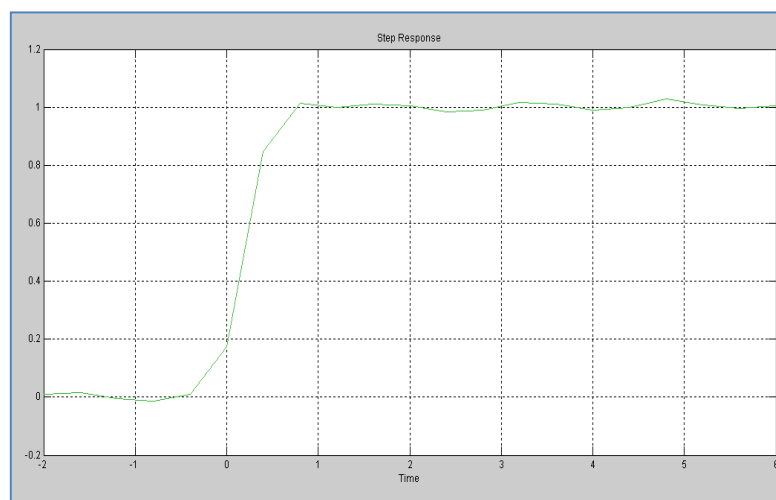
Los parámetros que se seleccionan son:

**Time Span:** Es el lapso de tiempo en el que se va a realizar la parametrización, pueden ir desde tiempos estadísticamente negativos, hasta un valor adecuado al sistema.

**Order of Whitening Filter:** Es el Orden del filtro del pre-blanqueado.

**Model Name:** El nombre del modelo que se le desee asignar.

- Al momento de seleccionar estimar nos aparecerá una gráfica, ésta gráfica será la respuesta al impulso, que es la misma que se obtiene mediante el comando cra.
- Finalmente, Para obtener la respuesta al escalón, basta con seleccionar la opción de respuesta transiente (Transient resp), y observar la gráfica como se muestra a continuación.



**Figura 3-37** Respuesta al Escalón.

De esta forma es como se obtienen las respuestas al escalón para cada señal ya sea una RBS, PRBS, o Multiseno. Hemos comprobado con cada una de las señales que hemos diseñado en nuestro sistema, de ahí la razón de la Tabla III siguiente.

	Tao Obtenido	Tiempo de Estabilización Obtenido	Ganancia Obtenido	Error Absoluto de Tao Obtenido	Error Absoluto de tiempo de Estabilización	Error Absoluto de Ganancia
Multiseno 1	Inestable	Inestable	Inestable			
Multiseno 2	0,147	1	252	91.35%	41,18%	167%
Multiseno 3	Inestable	Inestable	Inestable			
Multiseno 4	Inestable	Inestable	Inestable			
PRBS1	0,55	2,39	77	29.11%	40.52	19%
PRBS2	0,625	2,5	77.2	47%	47.1%	18%
PRBS3	0,4025	1,61	120	5.30%	5.30%	27.51%
PRBS4	0,4	1,6	105	5.88%	5.88%	10.5%
RBS1	Inestable	Inestable	Inestable			
RBS2	0,45	1,8	400	5.88%	5.88%	325%
RBS3	Inestable	Inestable	Inestable			
RBS4	Inestable	Inestable	Inestable			

**Tabla III** – Resultados al escalón de cada señal.

### 3.8 Parámetros de la señal escogida

Escogemos la mejor señal de entrada fundamentalmente dada por los errores que fueron calculados por medio de la fórmula del error absoluto, que para niveles experimentales no deben ser mayores al quince por ciento.

Dado los análisis anteriores, y comprobar los errores hemos decido tomar a la señal PRBS4 ya que cumple como la mejor señal de entrada hacia nuestra planta con los parámetros más importantes:

PRBS 4	
Tiempo de Muestreo	0,4
Amplitud	0,5
Número de Registros	6
Tiempo de Conmutación	1,6

Tabla IV – Características de la señal Prbs4

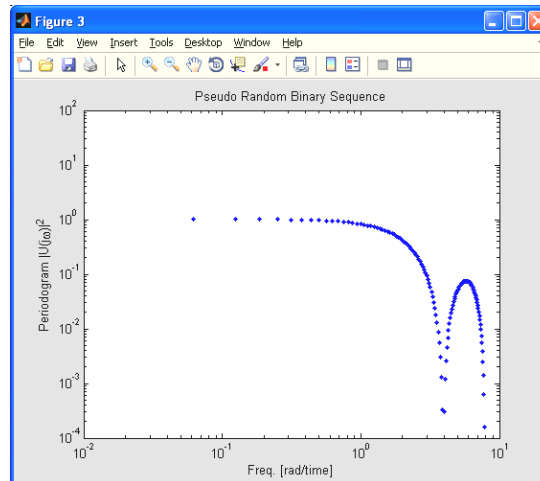
PRBS Design & Analysis Table	
<b>General Signal Specs</b>	
Sampling Time	0.400000
Initial Deadtime	0.000000
Final Deadtime	0.000000
Signal Amplitude	0.500000
Signal Bias	0.500000
<b>Signal Design</b>	
Sampling Time	0.400000
Switching Time	1.600000
Number of Shift Registers	6.000000
Number of Cycles	1.000000
Low Frequency Attained [rad/time]	0.062333
High Frequency Attained [rad/time]	1.737500
Length of 1 Cycle	100.800000
Length of Signal	100.800000
<b>Signal Analysis</b>	
Max value of signal	1.000000
Min value of signal	0.000000
Max change in value of signal	1.000000
Mean of signal	0.507937
Standard deviation of signal	0.500932
Variance of signal	0.250933
Entire signal length (with deadtimes)	100.800000
Crest factor	1.403122
Performance Index For Perturbation Signals (PIPS)	99.987402

Figura 3-38 Características de la señal de entrada



## El Espectro de Potencia

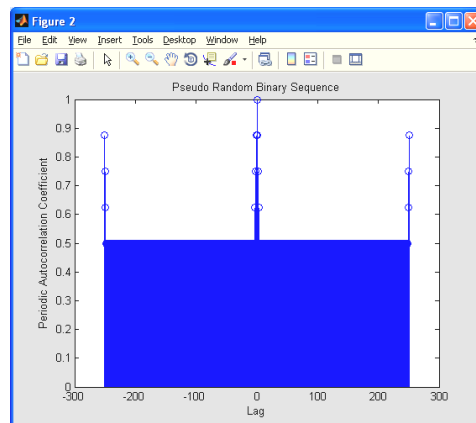
Podemos notar que la señal tiene un fuerte comportamiento de una secuencia binaria pseudo-aleatoria, de tal manera nos podemos dar cuenta y con rangos de frecuencias aceptables al sistema.



**Figura 3-39** Espectro de potencias de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada.

## Autocorrelación.

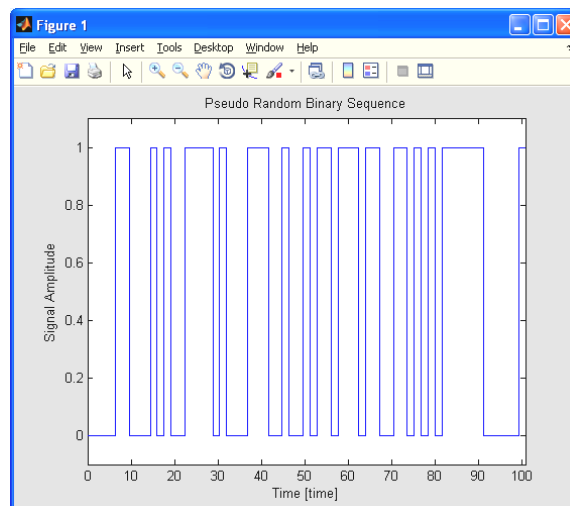
Se puede observar la señal muy parecida al ruido blanco, con un conjunto de datos sombreados menores a 0,5 dado por la señal del desfase colocada en el parámetro Signal Bias.



**Figura 3-40** Autocorrelación de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada.

### Señal en serie de tiempo.

Es la señal resultante de la secuencia binaria Pseudo aleatoria, ésta es la señal que ingresamos a la planta real, que estamos convencidos de que nos mostrará las características dinámicas de nuestro sistema.



**Figura 3-41** Serie de tiempo de la Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS4) Seleccionada.

# CAPÍTULO 4

## 4. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA

### 4.1 Objetivo

El objetivo de de este capítulo es obtener un modelo matemático, en nuestro caso función de transferencia, la cual debe representar a la planta real. Para ello contaremos como herramienta principal con las técnicas de identificación paramétrica estudiadas en el capítulo 2.

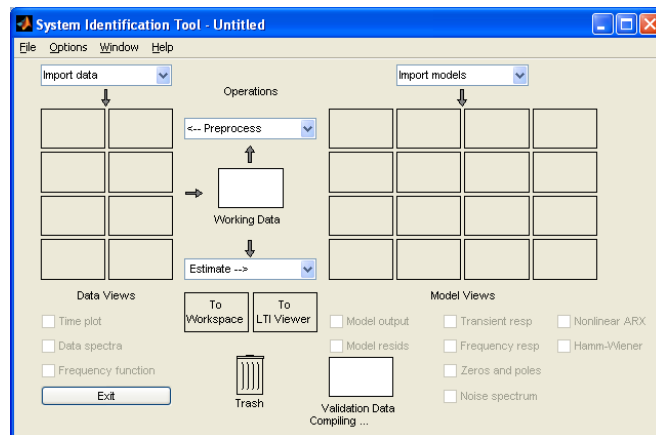
### 4.2 Trabajo con la señal de entrada escogida

Ya seleccionada la mejor señal de entrada con su respectiva salida procedemos a hacer la identificación paramétrica de la planta con los siguientes métodos: ARX, ARMAX, FIR, BOX JENKINS, OUTPUT ERROR; con el procedimiento siguiente:

Se ejecuta el comando en la ventana de Command Window:

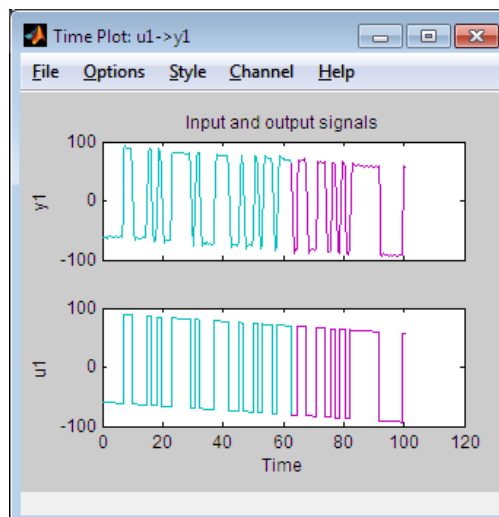
```
>> ident
```

Se abrirá el siguiente entorno de trabajo:



**Figura 4-1** Herramienta para la identificación de sistemas

- Seleccionamos **data object** e importamos la señal escogida como tipo iddata, en nuestro caso la señal escogida es la PRBS4 (dataP4)
- Removemos medias (P4media)
- Removemos tendencias (P4tendencia)
- Luego seleccionamos el rango de datos de trabajo (62.30% - P4planta) y el rango de datos para validación (37.7% - P4validar)



**Figura 4-2** Selección de rango para la planta y validación

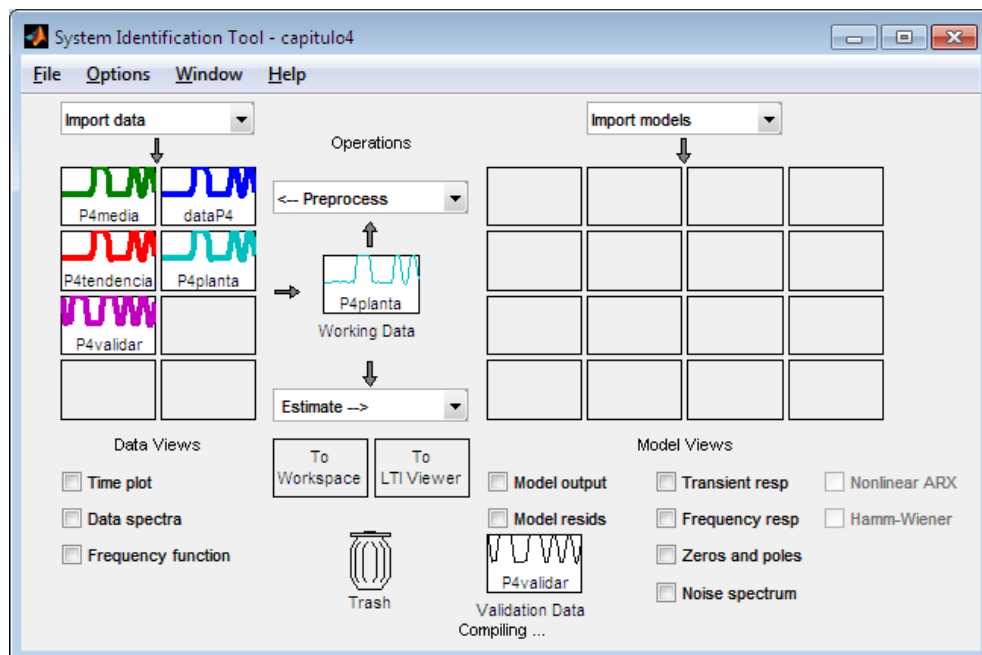


Figura 4-3 IDENT planta y validar

### 4.3 Criterios a utilizar en la identificación

Para elegir el mejor método de parametrización tendremos en cuenta los siguientes criterios:

**Validación:** hallada la función de transferencia basándose en el arreglo P4planta que contiene la entrada y salida real en un determinado rango; a dicha función de transferencia se la excitará con la una entrada diferente, es decir la entrada del arreglo P4 validación y se esperará que su respuesta sea muy parecida a la respuesta real

almacenada en el mismo arreglo. Esto lo hacemos al seleccionar la casilla "model output".

**Análisis residual:** en este análisis obtenemos los residuos o también llamados errores de predicción, que simplemente es la diferencia entre el valor medido y el valor estimado; este análisis también nos muestra la autocorrelación de los residuos de la salida  $y$ , y la correlación cruzada entre los residuos de la entrada  $u$  y la salida  $y$ . Los valores deberían estar dentro del intervalo de confianza de las gráficas de correlación y correlación cruzada para tener una buena aproximación de la planta, pero esto es idealmente. Los residuos de la salida no deben estar correlacionados ni haber correlación cruzada entre los datos de entrada y salida.

**Respuesta al escalón:** nos servirá para comprobar si los parámetros del modelo de la planta hallada se asemejan a los parámetros de la planta real.

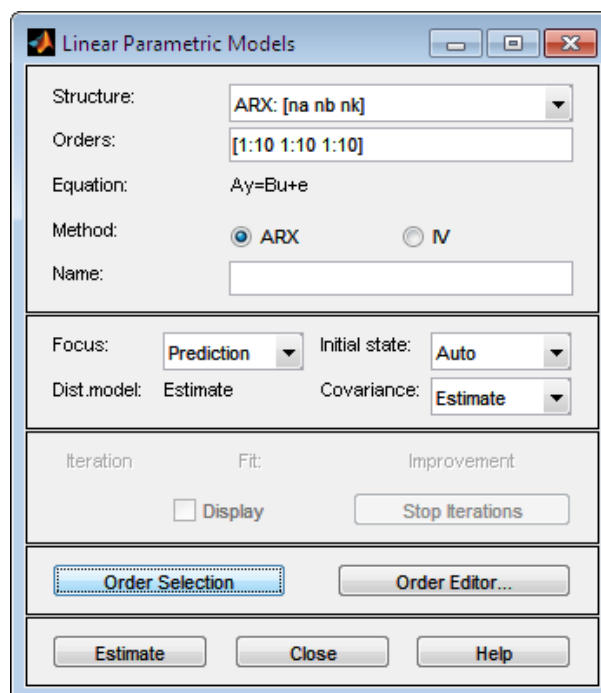
**Otros:** otros criterios a tomar en cuenta serán la parsimonia que consiste en encontrar el mejor modelo que represente bien a la planta y que no sea de tan alto orden; también es necesario tener en cuenta que en la función de transferencia el número de ceros no debe ser mayor al número de polos.

**Importante:** es importante mencionar que esperamos que la función de transferencia de nuestra planta sea de segundo grado, como máximo tercer grado, por lo cual hay que tener en cuenta este detalle.

#### 4.4 Modelo ARX (Auto-Regresivo con entrada externa)

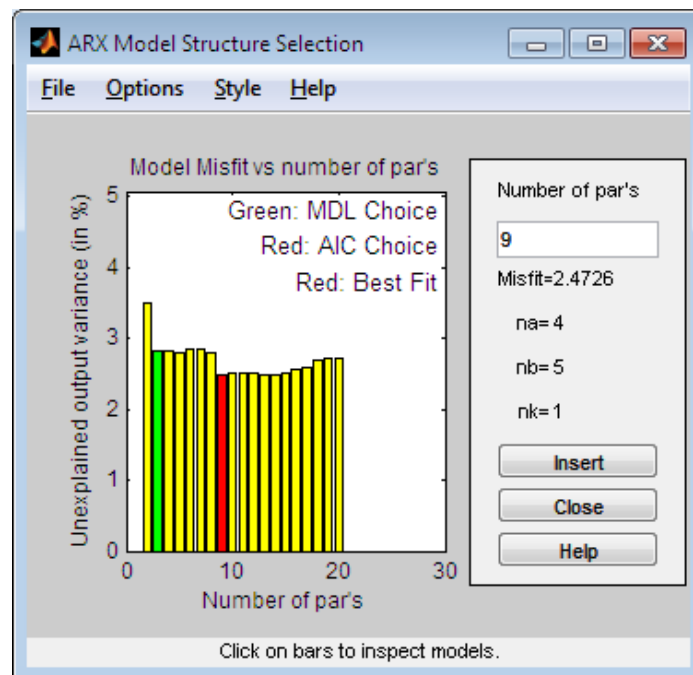
La fórmula utilizada en este método de parametrización es:

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



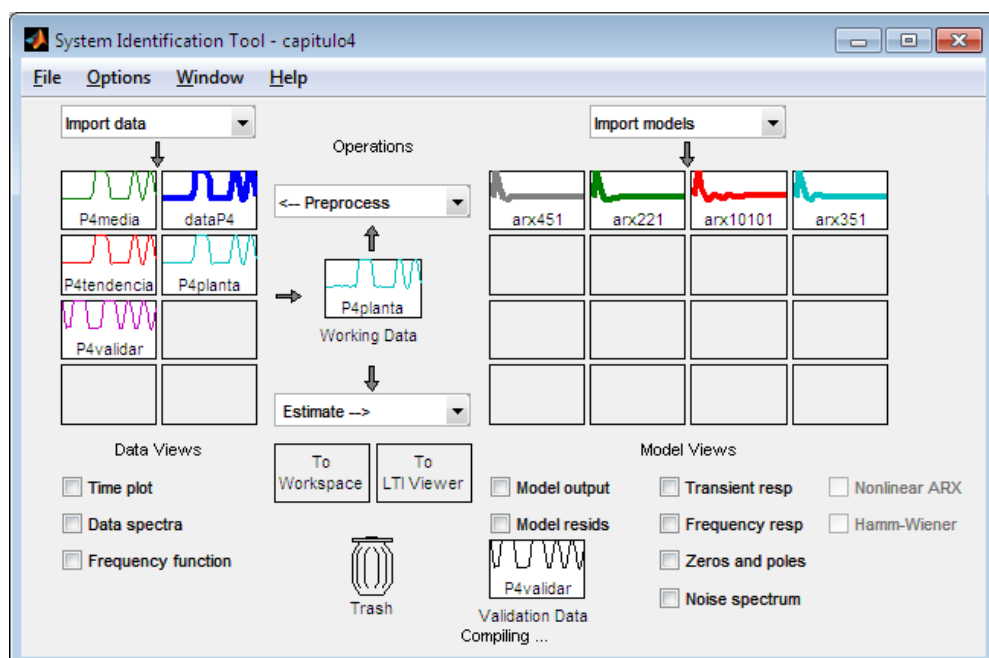
**Figura 4-4** Selección del modelo ARX

De aquí seleccionamos “selección de orden” para que ident nos haga una combinación de diferentes valores para los coeficientes de na y nb.



**Figura 4-5** Selección de estructura para el modelo ARX

Vamos a insertar las 4 estructuras más apropiadas.



**Figura 4-6** Modelos ARX candidatos



Nombre del modelo	Mejor aproximación
ARX 221	83,73%
ARX 10101	83,98%
ARX 351	83,70%
ARX 451	84,70%

**Tabla V** – Resultados ARX

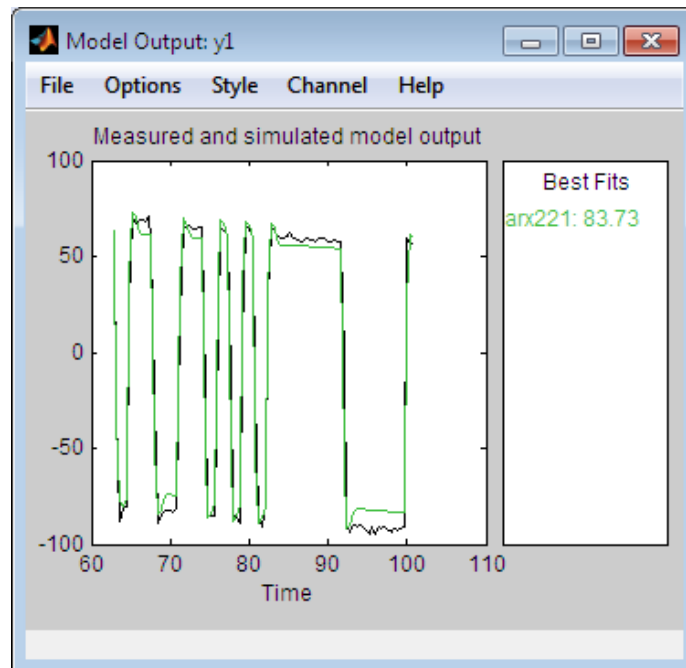
**Validación:** la mejor aproximación la da el ARX 451 con un porcentaje de 84,7%, aunque los otros modelos no nos dan un porcentaje de similitud tan diferente del mejor, por lo cual aún no podemos concluir que para este método escogeremos el modelo ARX 451.

**Otros:** si nos valemos de la parsimonia descartaríamos el ARX 10101 porque sus coeficientes  $n_a$  y  $n_b$  son demasiado altos con lo que se puede tener problemas de varianza a un nivel de ruido significativo. Si nos valemos del número de polos y ceros de la función de transferencia todas las señales tienen mayor número de ceros que de polos, que es lo que se busca, exceptuando el modelo ARX351 que tiene 4 polos y 4 ceros, pero descartaríamos nuevamente el ARX10101 por tener demasiados polos y demasiados ceros, y pondríamos en duda el ARX451 por tener cinco polos y cuatro ceros.

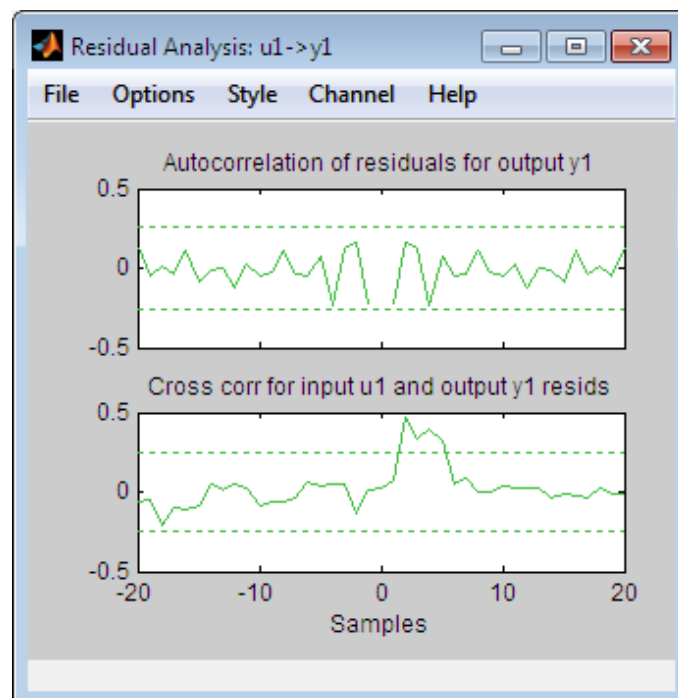
**Análisis Residual:** notamos que la autocorrelación de los residuos de la señal de salida y se encuentra dentro de los intervalos de confianza para todos los modelos candidatos, mientras que la correlación cruzada entre los residuos de la entrada y los residuos de la salida hay cinco muestras para todos los modelos, que se salen un poco del intervalo de confianza, por ello debemos tener en consideración si tomar en cuenta o no estos modelos.

**Conclusión:** basándonos principalmente en la parsimonia y en el hecho que esperamos que nuestra planta sea de grado dos o de grado tres, se escoge al modelo candidato amx2221, con un porcentaje de similitud del 83,73%, y dos polos y un cero.

A continuación mostraremos las gráficas obtenidas por ARX 221



**Figura 4-7** Modelo de salida ARX221



**Figura 4-8** Análisis Residual ARX221

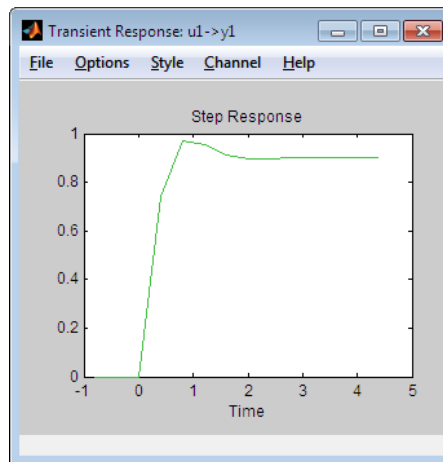


Figura 4-9 Respuesta al escalón ARX221

#### 4.5 Modelo ARMAX (Media móvil con entrada externa)

La fórmula utilizada en este método de parametrización es:

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

Para este método los coeficientes  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_c$  se escogen bajos.

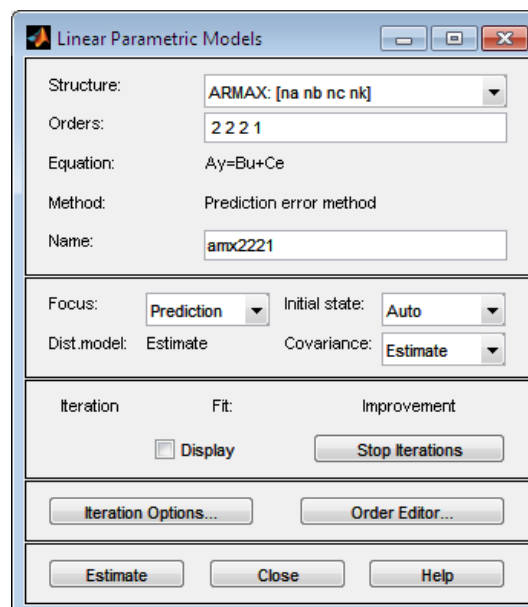
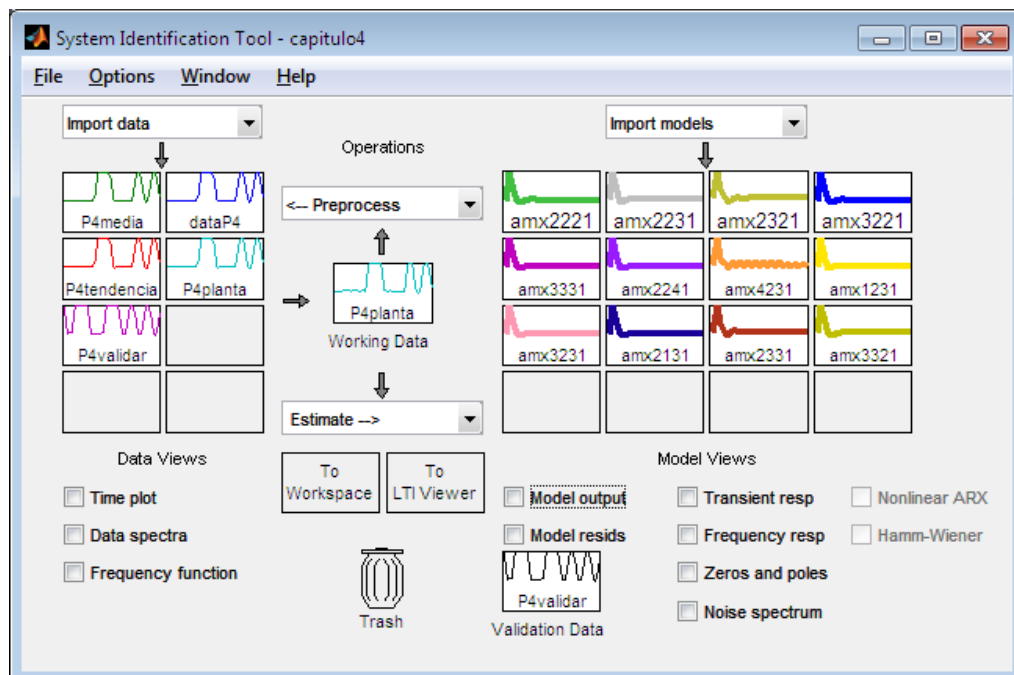


Figura 4-10 Selección del modelo ARMAX

Realizamos una combinación, variando los coeficientes  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_c$  según convenga.

En este método la solución del sistema se la encuentra a través de métodos iterativos, no es lineal como la del ARX; los coeficientes  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_c$  se escogen normalmente bajos, y el coeficiente  $n_k$  es uno.



**Figura 4-11** Modelos ARMAX candidatos

Nombre del modelo	Porcentaje de similitud (%)
amx3331	85,08
amx3321	84,93
amx3231	84,82
amx3221	84,7
amx2241	84,55
smx2221	83,87
amx1231	83,09
amx4231	82,98
amx2131	82,95
amx2231	82,7
amx2331	82,66
amx2321	82,48

**Tabla VI** – Resultados ARMAX

**Validación:** los porcentajes de similitud entre la mejor aproximación y la peor aproximación no distan mucho; por lo cual decir que el mejor modelo candidata para este método es el amx3331 no es posible; ello hace que nos valgamos necesariamente de los demás criterios para encontrar el mejor modelo.

**Otros:** encontramos que todos los modelos para este método de parametrización tienen más polos que ceros, lo cual hace que sea viable poder usar cualquiera de ellos.

Ahora si nos valemos del criterio de parsimonia para todos los modelos candidatos notamos que no superan de tres polos, lo cual no es un sobredimensionamiento para nuestra función de transferencia buscada.

**Análisis Residual:** la conclusión para este criterio no difiere de la conclusión del método ARX, es decir, notamos que la autocorrelación de los residuos de la señal de salida y se encuentra dentro de los intervalos de confianza para la mayoría de los modelos candidatos, mientras que la correlación cruzada entre los residuos de la entrada y los residuos de la salida hay cinco muestras para todos los modelos, que se salen un poco del intervalo de confianza, por ello debemos tener en consideración si tomar en cuenta o no estos modelos; con lo cual puede que sea así para todos los métodos de parametrización y tendremos q escoger uno que obligatoriamente salga del intervalo de confianza. Habiendo ya comprobado que el rango para los datos de trabajo y del rango para los datos de validación fue bien escogido.

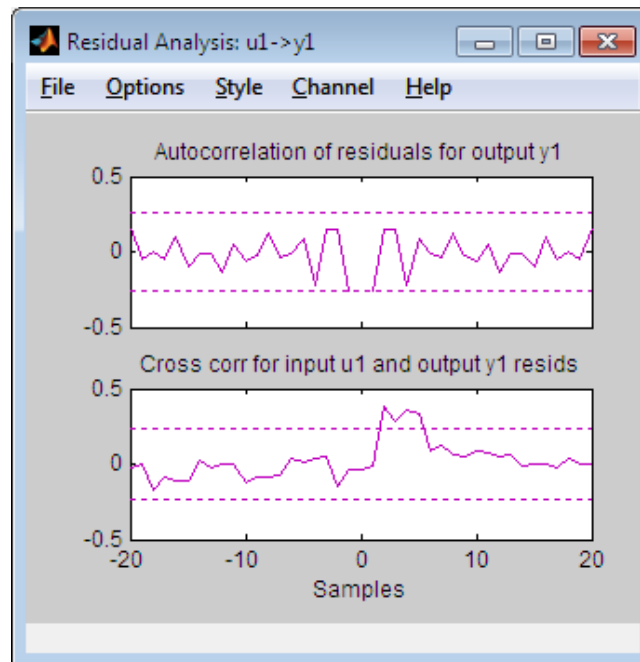
**Conclusión:** en vista de que en la mayoría de criterios empleados los modelos candidatos cumplen con las condiciones exceptuando para el análisis residual donde todos salen del intervalo de confianza, concluimos que el mejor modelo para este método es el amx3231 con un porcentaje de similitud del 84,98%, con tres polos y dos ceros.

A continuación las gráficas del modelo candidato escogido:

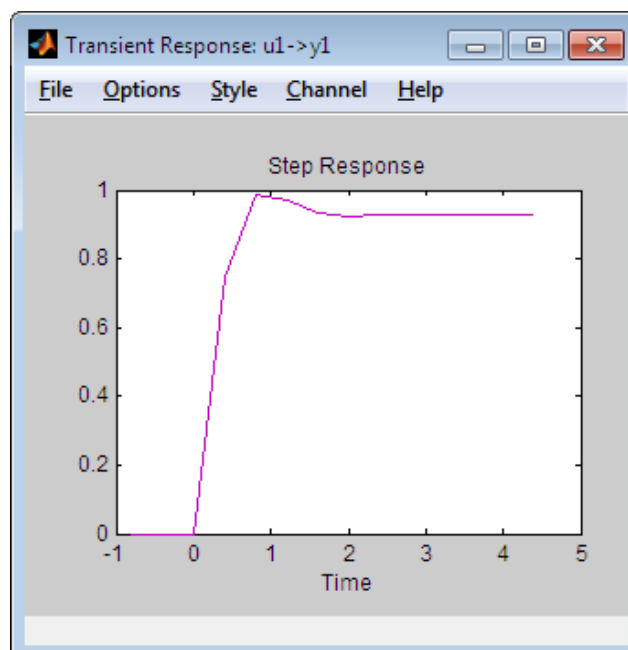


**Figura 4-12** Modelo de salida AMX3231





**Figura 4-13** Análisis Residual AMX3231



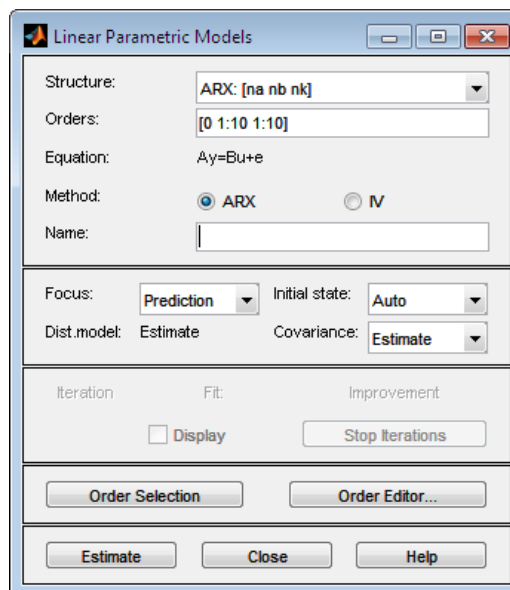
**Figura 4-14** Respuesta al escalón AMX3231

## 4.6 Modelo FIR (Respuesta al impulso finito)

La fórmula utilizada en este método de parametrización es:

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

Notemos que para este método solo se utiliza la parametrización en la entrada, por ello se dice que es un modelo libre de estructura al igual que el análisis de correlación, siendo al igual que el ARX un problema de regresión lineal, con lo cual su respuesta es exacta y no aproximada. Como solo se parametriza la entrada la respuesta de este método va a depender mucho del tiempo de muestreo del sistema.



**Figura 4-15** Selección del modelo FIR

Al igual que para ARX seleccionamos “Order Selection”, dándonos una combinación de nb para diferentes modelos FIR.

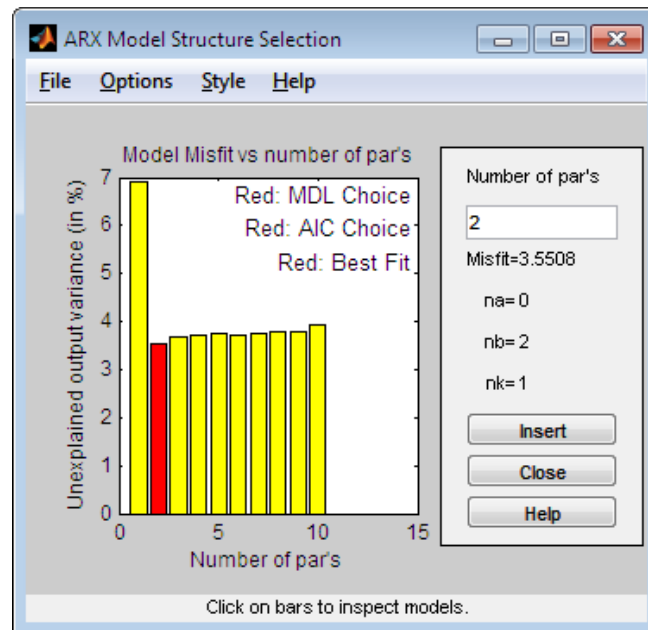


Figura 4-16 Selección de orden FIR.

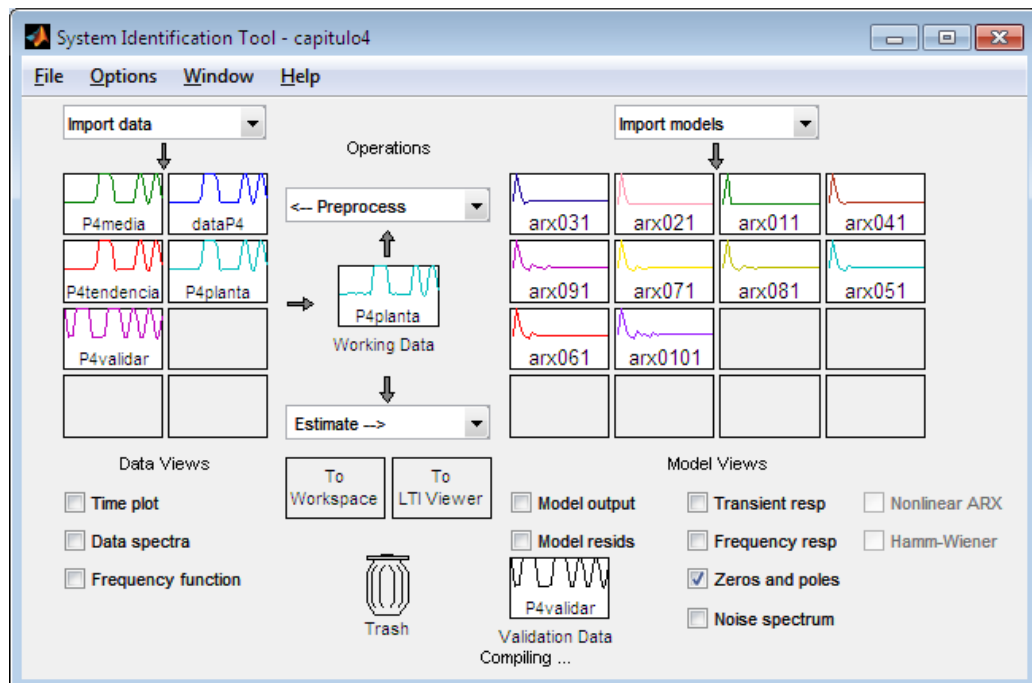


Figura 4-17 Modelos candidatos FIR.

Nombre del modelo	Porcentaje de similitud (%)
arx011	73,4
arx021	81,47
arx031	81,35
arx041	81,2
arx051	81,03
arx061	81,34
arx071	81,3
arx081	81,25
arx091	81,22
arx0101	80,96

**Tabla VII** – Resultados FIR.

**Validación:** el porcentaje de similitud para los modelos candidatos es prácticamente el mismo a diferencia del modelo arx011, esto hace podamos descartar de momento a este modelo. Para poder descartar o aceptar los otros modelos candidatos nos debemos basar en los demás criterios.

**Otros:** en este método es muy curioso que la mayoría de modelos candidatos, exceptuando dos, arx011 y arx021, el resto son modelos no viables, es decir, su número de polos es menor al número de ceros,

posiblemente sea debido a que solo se parametriza la entrada por el término  $B(z)$ , y no contiene parametrización para la salida dada por  $A(z)$ , ni parametrización para el ruido dada por  $C(z)$  o  $D(z)$ .

Hablando de parsimonia solo veremos este criterio en los dos modelos viables; en arx011 solo se tiene un polo y en arx021 se tiene un polo y un cero.

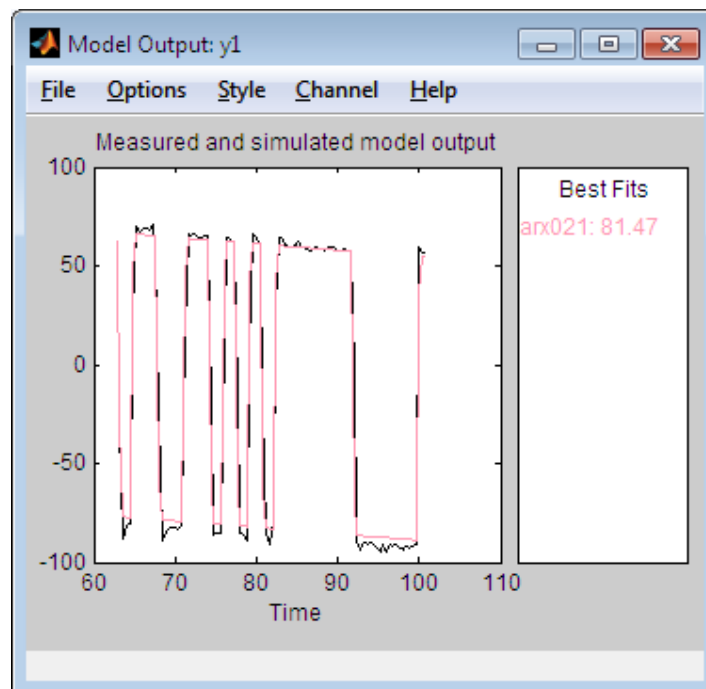
**Análisis residual:** este método difiere de los demás, siendo hasta ahora el más deficiente, teniendo que:

- En la autocorrelación de los residuos de la salida y, para todos los modelos candidatos, la gráfica tiene dos picos que salen del intervalo de confianza, incluso para los modelos cuya obtención de la función de transferencia es viable.
- Para la correlación cruzada entre los residuos de la entrada y los residuos de la salida, vemos que todos los modelos candidatos salen del intervalo de confianza.

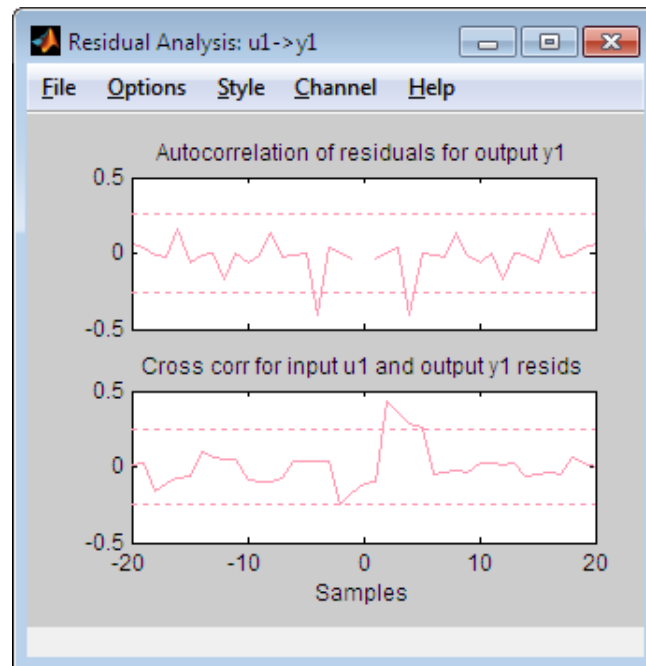
**Conclusión:** podemos concluir que este método ha sido el más deficiente hasta ahora, en comparación a los dos anteriores, ya que nos da solo dos modelos viables, y en su análisis residual tanto para autocorrelación, como para correlación cruzada, las gráficas salen del intervalo de confianza. Si tuviéramos que elegir un modelo candidato

sería el arx021, pero de antemano sabemos que no vamos a utilizar este modelo para hallar la función de transferencia de la planta.

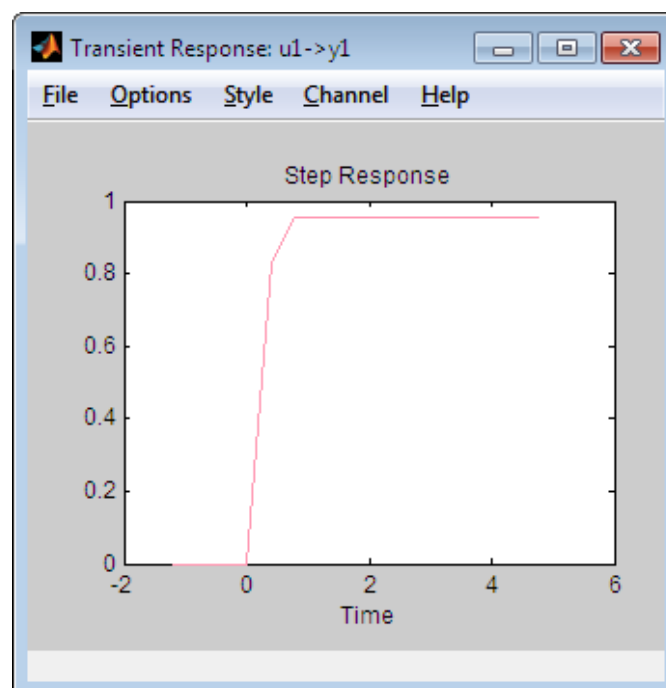
A continuación las gráficas del modelo arx021, con un 85,47% de similitud, con un polo y un cero:



**Figura 4-18** Modelo de salida ARX021



**Figura 4-19** Análisis Residual ARX021



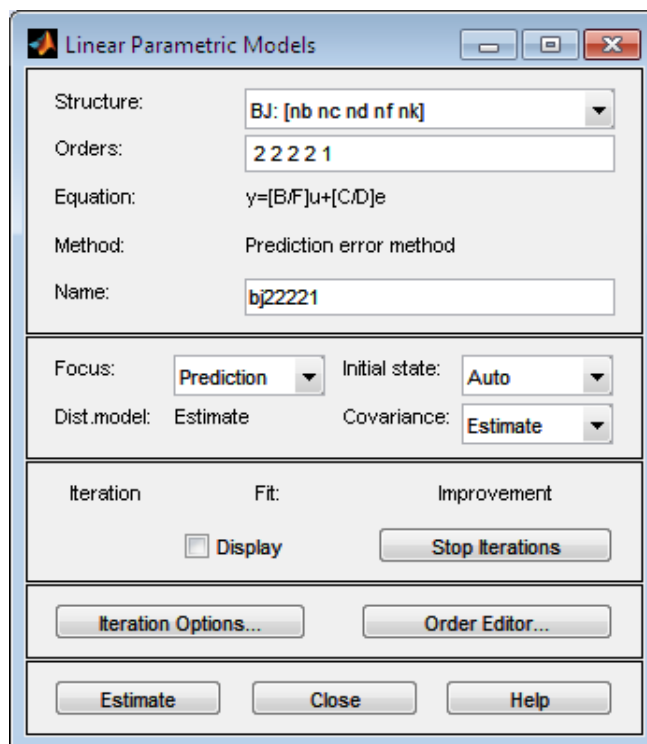
**Figura 4-20** Respuesta al escalón AMX021

## 4.7 Modelo Box Jenkins

La fórmula utilizada en este método de parametrización es:

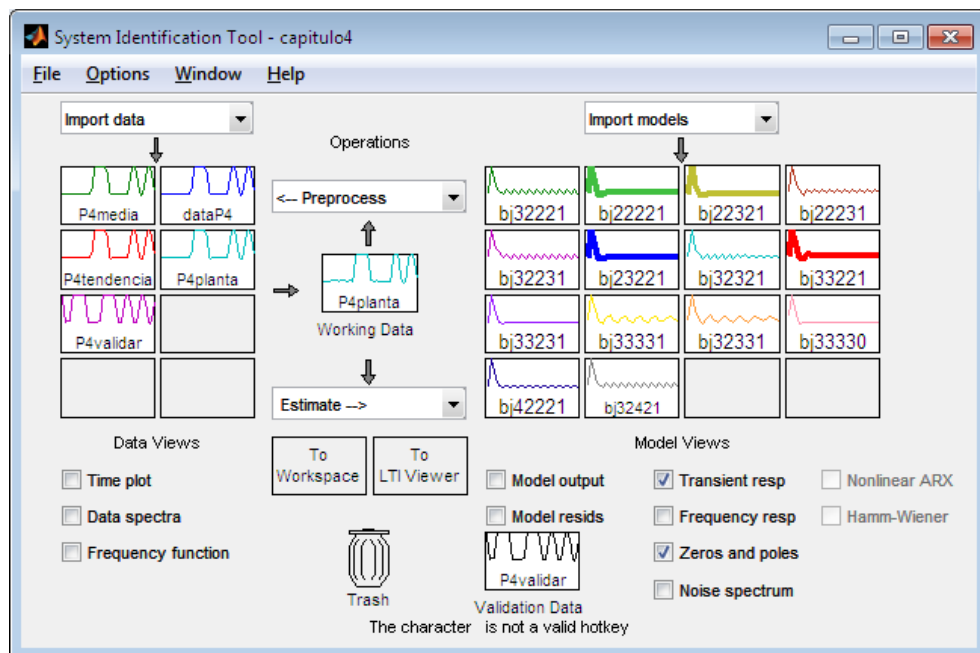
$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t)$$

Vemos que este método parametriza tanto la entrada como el error, pero a diferencia del ARMAX lo hace con dos polinomios autoregresivos para cada uno; podríamos decir que debe ser un método más exacto que el ARMAX.



**Figura 4-21** Selección del modelo Box Jenkins





**Figura 4-22** Modelos candidatos Box Jenkins

Nombre del modelo	Porcentaje de similitud (%)
bj3323	84,13
bj3222	85,1
bj2223	84,73
bj3232	85,01
bj3223	84,88
bj3333	82,84
bj3233	82,85
bj4222	86,45

bj3242	84,98
bj2221	83,4
bj23221	83,54
bj22321	85
bj33221	82,65

**Tabla VIII** – Resultados Box Jenkins

**Validación:** el porcentaje de similitud es muy bueno para todos los modelos candidatos, siendo el más alto 86,45% para bj42221; pero como sabemos un porcentaje alto de similitud no asegura una buena respuesta de la planta.

**Otros:** todos los modelos candidatos tienen mayor número de polos que de ceros, y la parsimonia para todos los modelos es buena, ya que no sobrepasan los tres polos.

**Análisis residual:** todos los modelos salen del intervalo de confianza para la correlación cruzada entre los residuos de la entrada y los residuos de la salida al igual que los anteriores métodos. Hay también quienes no salen del intervalo de confianza en la autocorrelación de la salida, bj2221, bj2322, bj33221, bj32331, bj33331.

**Respuesta al escalón:** hemos necesitado utilizar este criterio debido a que aunque descartamos muchos modelos candidatos, aun nos

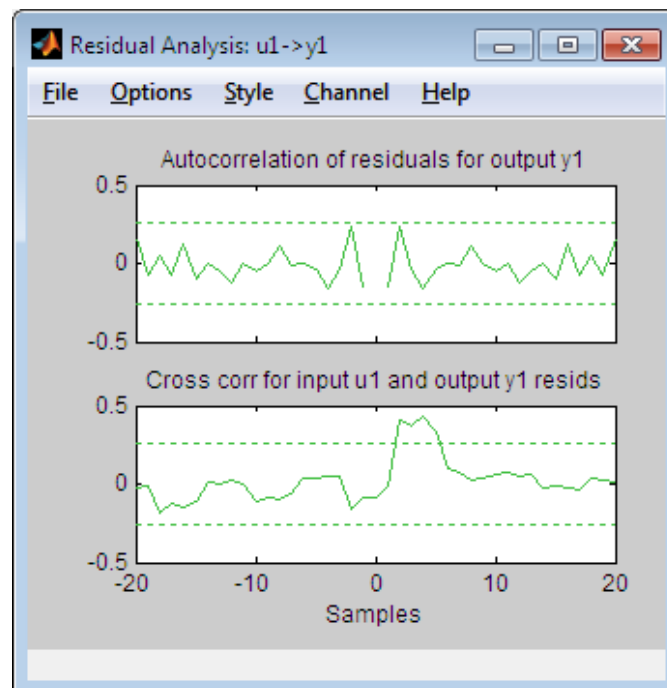
quedan cinco modelos que cumplen los criterios anteriores. Notamos que la respuesta al escalón de dos de estos cinco modelos es inestable, es decir no alcanza un estado estacionario, presentando oscilaciones.

**Conclusión:** valiéndonos de la parsimonia y la respuesta al escalón elegimos como mejor señal para este método a bj23221 con un porcentaje de similitud del 83,54 y su función de transferencia con dos polos y un cero.

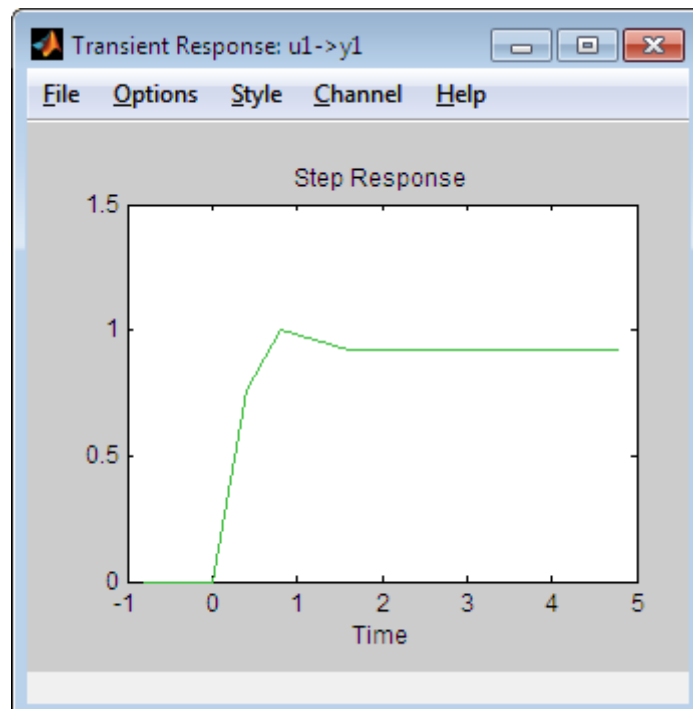
A continuación las gráficas de la señal escogida:



**Figura 4-23** Modelo de salida BJ23221



**Figura 4-24** Análisis Residual BJ23221



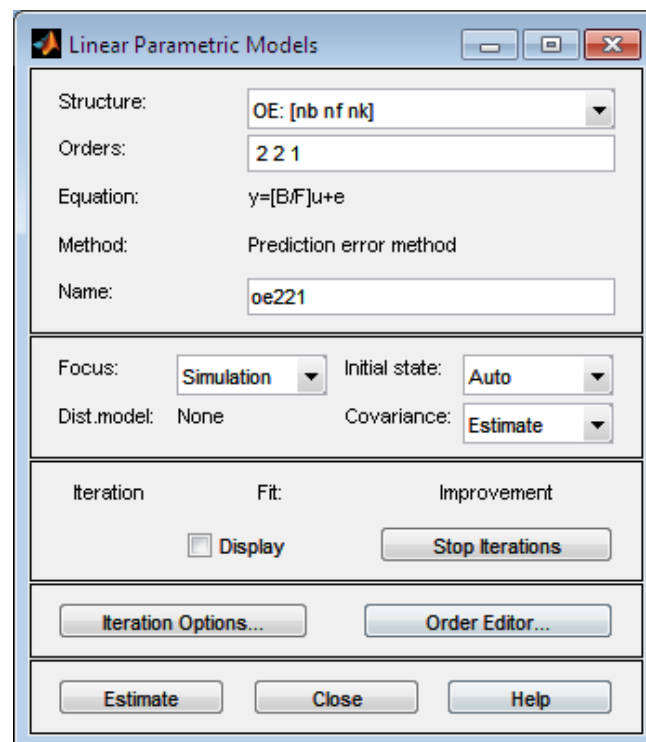
**Figura 4-25** Respuesta al escalón BJ23221

## 4.8 Método error de salida

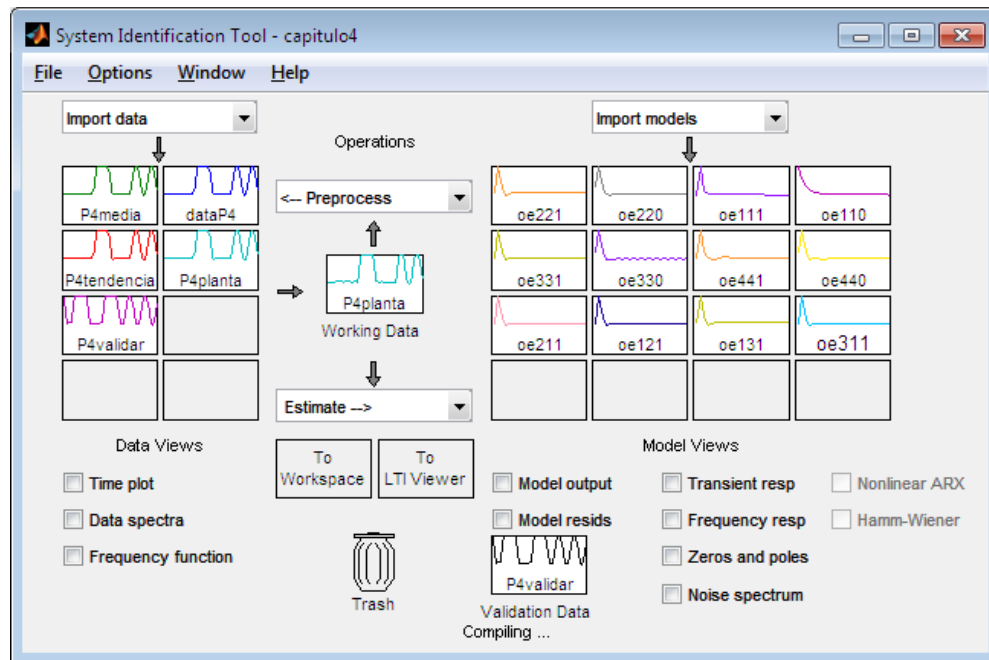
Como se vio en el capítulo 2 la fórmula que describe este proceso es:

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

Este método solo parametriza la entrada externa u, pero a diferencia del FIR, lo hace con dos polinomios: B(Z) y F(Z).



**Figura 4-26** Selección del modelo error de salida



**Figura 4-27** Modelos candidatos error de salida

Nombre del modelo	Porcentaje de similitud (%)
oe221	81,24
oe220	78,53
oe111	80,2
oe110	61,71
oe331	81,15
oe330	78,64
oe441	78,28
oe440	78,64
oe211	81,67

oe121	81,16
oe131	81,35
oe311	81,14

**Tabla IX** – Resultados error de salida

**Validación:** la mejor aproximación la da el oe211 con un porcentaje de similitud de 81,67%. Podemos notar que estas aproximaciones han sido las más bajas en comparación a todos los métodos usados anteriormente; las del FIR también son bajas; ello nos llevaría a concluir que no es suficiente para nuestro caso solo parametrizar el error.

**Otros:** el número de polos para todos los casos es mayor o igual la número de ceros, por lo cual los modelos si son viables, pero en tres de ellos, el oe220, el oe330 y el oe440, uno de sus ceros sale del círculo unitario, por ello debemos descartarlos; otro modelo es el oe4441 el cual descartamos por tener cuatro polos y como sabemos debemos tener como mucho tres. Otro es el oe111 que solo tiene un polo y no puede representar a la planta.

**Respuesta al escalón:** solo la mitad de los modelos tienen una buena respuesta al escalón.

Descartando los modelos que no cumplen con los criterios anteriores, tenemos que nos quedan: oe221, oe211, oe121 y oe131.

**Análisis residual:** todos los modelos candidatos salen del intervalo de confianza tanto para la autocorrelación de los residuos de la entrada, como para la correlación cruzada entre los residuos de la salida y los residuos de la entrada.

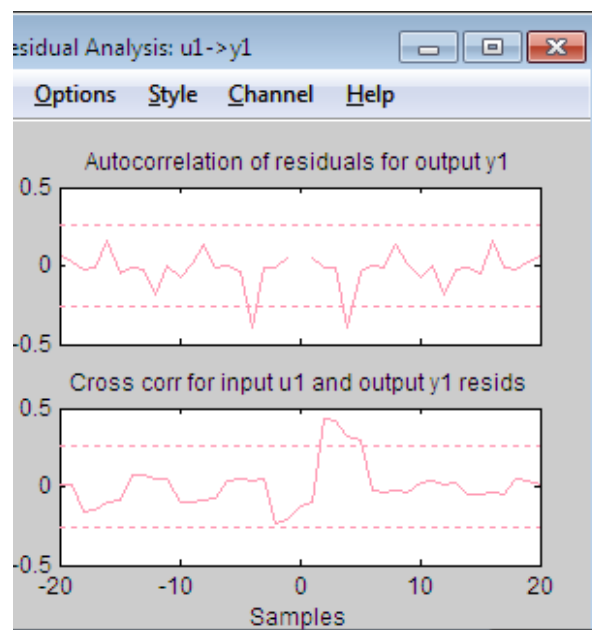
**Conclusión:** al igual que el FIR todos los modelos son erróneos y no serán tomados en cuenta al momento de elegir cuál de todos los métodos no dará el modelo que represente nuestra planta, pero si tuviésemos que elegir uno para este método, sería el oe211 con un porcentaje de similitud de 81,67%, con dos polos y un cero.

A continuación sus gráficas:

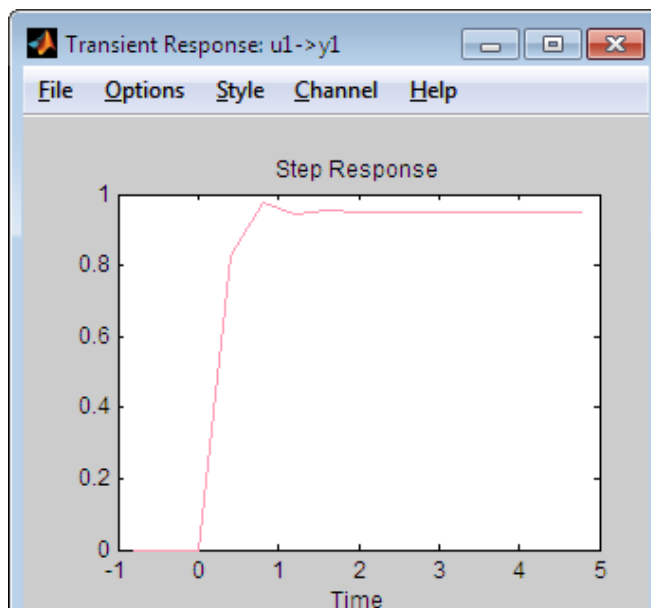




**Figura 4-28** Modelo de salida OE221



**Figura 4-29** Análisis Residual OE2221



**Figura 4-30** Respuesta al escalón OE2221

#### 4.9 Elección del modelo más conveniente

Como ya mencionamos en su respectivo análisis, tanto el modelo FIR, como el ERROR DE SALIDA, van a ser descartado porque no cumplen las condiciones del análisis residual, ni de la respuesta al escalón.

A continuación un cuadro comparativo de los tres modelos candidatos:

Nombre del modelo	Porcentaje de similitud (%)	(Polos, Ceros)	t. Estabilización Obtenido	Tao Obtenido	Ganancia
ARX2221	83,73	2,1	2	0,5	89,8
AMX3231	84,82	3,2	1,6	0,4	95
BJ23221	83,54	2,1	1,6	0,4	95

**Tabla X** – Resultados al Escalón.

Debemos comparar los modelos con las constantes de la planta real:

**Tiempo de estabilización:** 1,7 segundos

**Tao dominante:** 0,425 segundos

**Ganancia:** 94,11

Los dos mejores modelos que representan a la planta real son el AMX 3231 y el BJ23221. Debemos elegir si nos basamos en el porcentaje de similitud o en el número de polos y ceros. En vista de que el porcentaje de similitud solo varía en un 1,28% y en la premisa que teníamos, la cual decía que nuestra planta era de orden dos, elegimos como mejor modelo al BJ23221.

#### 4.10 Obtención de la función de transferencia del modelo

El espacio de trabajo de MatLab nos ayudará a encontrar la función de transferencia de nuestro modelo, recordando que este tiene la forma:

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

El modelo con el que contamos es discreto, lo debemos pasar a continuo, y obtener la función de transferencia:

- Llevamos bj23221 desde el ident al workspace
- En el workspace escribimos:

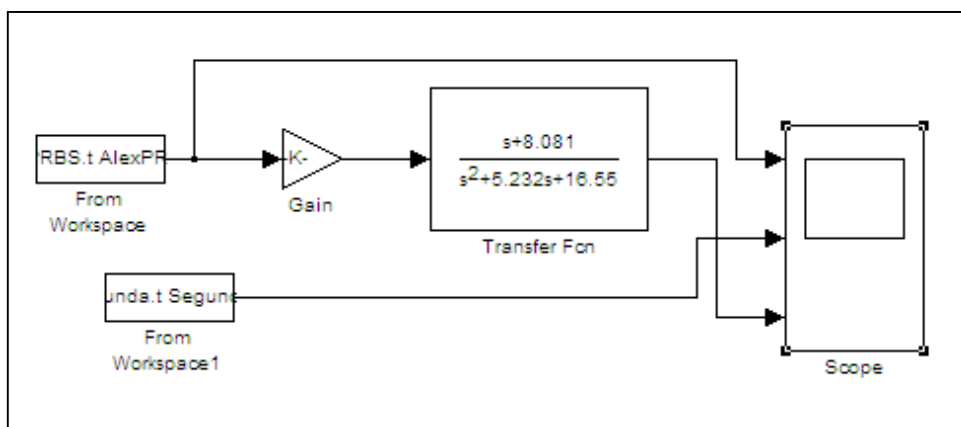
```
>>Planta=zpk(d2c(bj23221))
```

Obteniendo la función de transferencia de la planta:

$$G(s) = \frac{1.8923(s + 8.081)}{(s^2 + 5.232s + 16.55)}$$

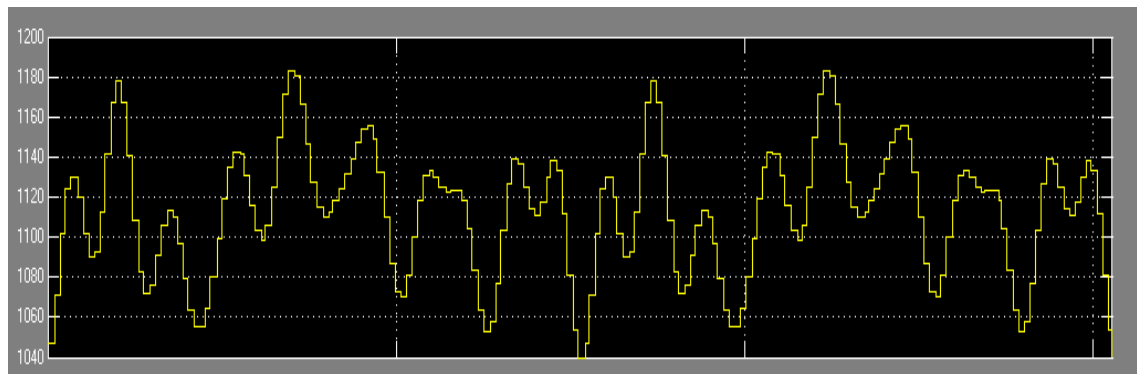
#### 4.11 Simulación del modelo en lazo abierto.

La función de transferencia descrita anteriormente modela muy bien el comportamiento de nuestra planta, para comprobarlo vamos a realizar una simulación de la planta con una señal diferente a la PRBS4 que fue elegida como mejor señal de entrada; vamos a utilizar la Multisen01 y observaremos su respuesta.

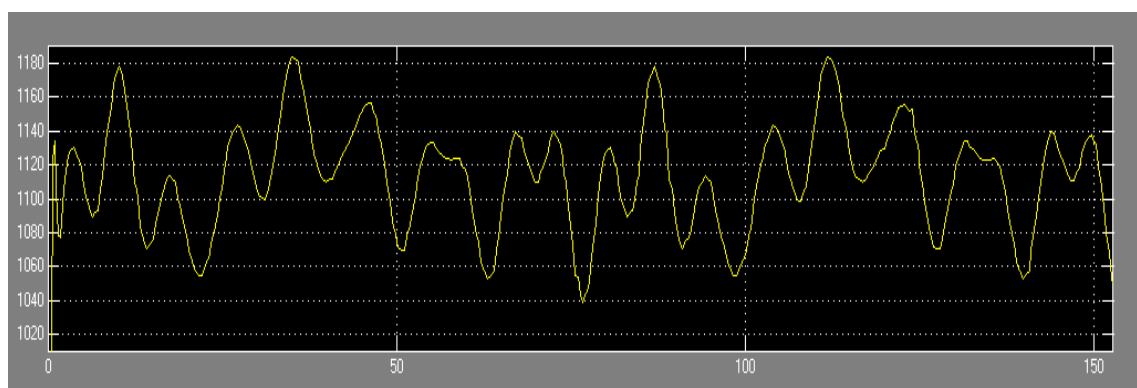


**Figura 4-31** Simulación de la planta en simulink

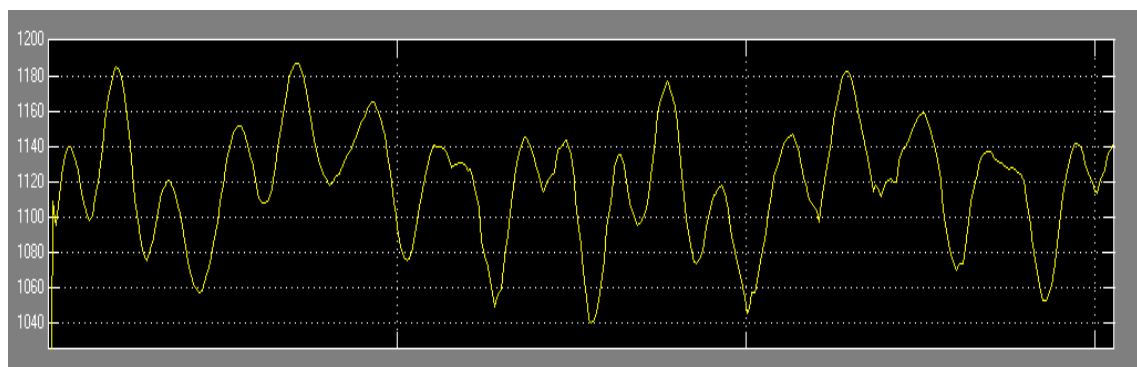
Comparemos la señal de entrada Multisen01, con la respuesta real y la respuesta con la planta hallada.



**Figura 4-32** Entrada Multisenso1



**Figura 4-33** Respuesta con la función de transferencia hallada



**Figura 4-34** Respuesta real

Apreciamos que la respuesta real como la simulada son muy similares, tanto en niveles de voltaje, y un poco desfasada en tiempo.

# CAPÍTULO 5

## 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR

### 5.1 Análisis de la función de transferencia.

Emplearemos Matlab para cumplir con nuestro diseño del controlador, específicamente la herramienta Sisotool, que nos permitirá hacerlo de una forma sencilla.

Vamos a usar nuestra modelación matemática del capítulo anterior y de ésta forma observar el funcionamiento del controlador en el sistema.

Sabemos que nuestro sistema es de funcionamiento rápido, por ello tentamos a pensar que necesitaremos hallar un controlador PID para alcanzar con el objetivo.

De la función de transferencia, obtenida en el capítulo anterior, podemos notar tenemos un cero y un par de polos conjugados. De los cuales se puede denotar que:

- El cero al estar más alejado del origen en comparación a los polos, no afecta demasiado al comportamiento transiente de la planta, pero si tiene efecto en la ganancia del sistema.

- Los polos son los que afectan directamente al comportamiento subamortiguado de la planta, por estar ubicados en el tercer y cuarto cuadrante en el plano complejo s.

## 5.2 Criterios del diseño del controlador.

Se está diseñando un controlador que no tenga un sobre nivel porcentual muy alto y que su respuesta tienda a ser más eficiente, debido a que la mayoría de motores de inducción al hacer cambios bruscos de velocidad, generan picos de corriente y por ende cambios en el factor de potencia, lo que implicaría costos dentro de la planilla de energía eléctrica en la industria; por ello estableceremos estos dos parámetros de forma estricta; se escogerá un controlador que cumpla al menos con los criterios que vamos a mencionar:

- Plantearemos que nuestra planta llegue a estabilizarse en un 70% menos que el tiempo de estabilización de la planta, lo que vendría a ser alrededor de 0.402 segundos.
- El otro parámetro es establecer un sobre nivel porcentual que sea apto para nuestro sistema. Nuestra meta será establecer un sobre nivel porcentual a no más del 4% como máximo. Esto permitirá que el sistema se estabilice de una mejor manera, es decir que el tiempo de estabilización que se logre, pueda ser menor que el tiempo que estamos planteando como objetivo.

### 5.3 Pasos para obtener el controlador.

1. Primero, creamos la función de transferencia en la ventana de comandos de Matlab. Empleamos el comando de función de transferencia

```
>> G=tf([2.048 16.55],[1 5.232 16.55])
```

2. Luego empleamos la herramienta Sisotool, colocando como función a nuestra función de transferencia

```
>> Sisotool(G);
```

3. Seleccionamos la forma del modelo del diagrama de bloques con la cual vamos a trabajar. En la pestaña arquitectura, seleccionamos control de arquitectura.

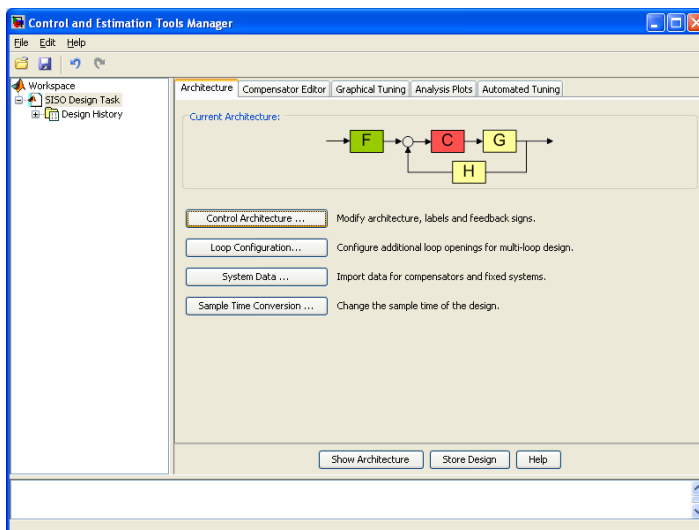
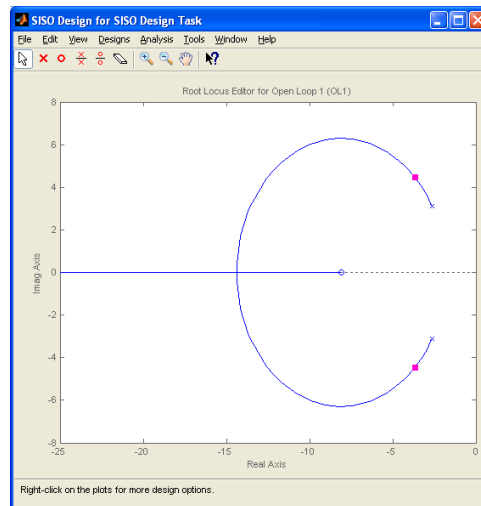


Figura 5-1 Ventana de trabajo de Sisotool

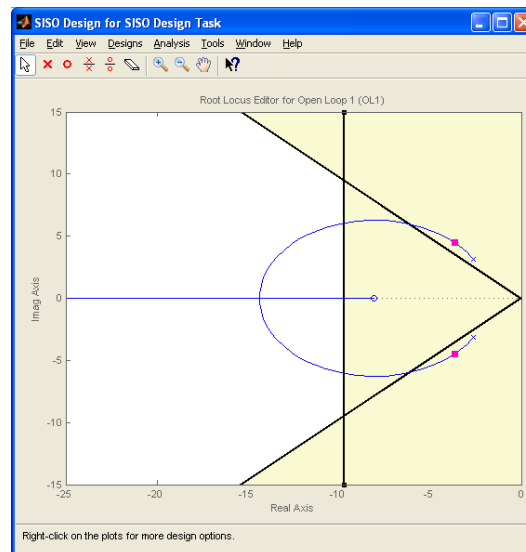


4. En la ventana de trabajo, solo vamos a trabajar con el editor de raíces en lazo abierto hay que seleccionar solamente esta ventana en la pestaña Graphical Tuning.



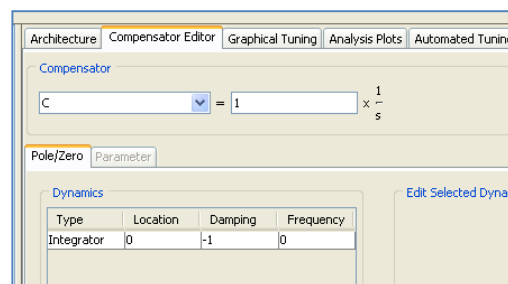
**Figura 5-2** Editor de Raíces en Lazo abierto.

5. Añadimos nuestros requerimientos para el controlador, en nuestro caso vamos a seleccionar un sobre nivel máximo del 4% y un tiempo de estabilización de 0.402 segundos.



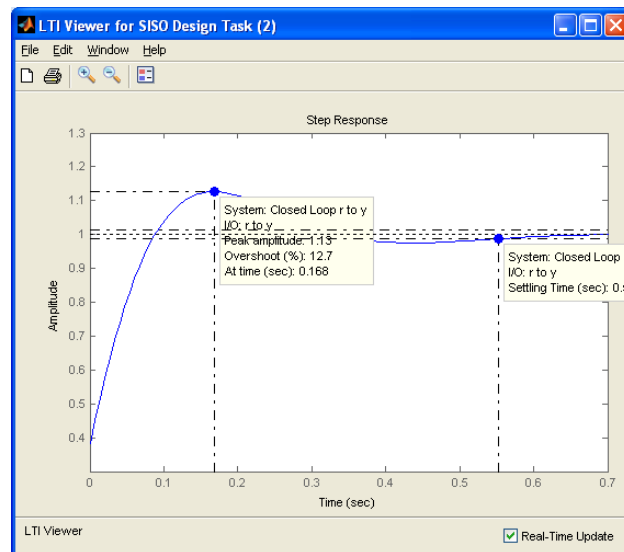
**Figura 5-3** Requerimientos ingresados en la trayectoria de Raíces.

6. Vamos a aplicar un integrador para hacer cero al error de estado estacionario.



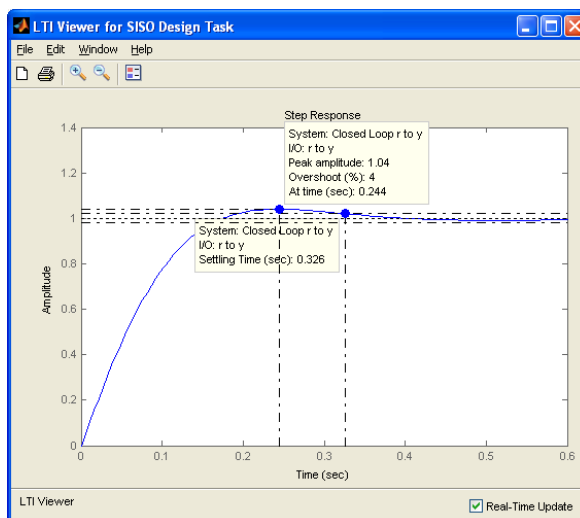
**Figura 5-4** Integrador de sisotool.

7. Vamos a agregar un Cero, para cumplir con los parámetros mencionados en el literal 5, de esta forma estamos haciendo ya un controlador PI.



**Figura 5-5** Planta con un cero

8. Al ver los resultados obtenidos, nos damos cuenta que necesitamos otro cero adicional, y así llegar al controlador PID que necesitamos llegando a parámetros muy parecidos a los necesitados
9. Colocamos un filtro, para disminuir el efecto de los ceros, éste filtro es un polo que lo ubicaremos aproximadamente haciendo un promedio de entre los dos ceros. Resultándonos un diseño exitoso al ver los parámetros de diseño dentro del rango que hemos seleccionado como se observa en las graficas que están a continuación.



**Figura 5-6** Respuesta con el Filtro y el Controlador

10. Una vez teniendo los resultados, vamos a enviar nuestras variables al espacio de trabajo y así obtener nuestras constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de nuestro controlador PID.

La forma general de un controlador es la siguiente:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d(s)$$

El controlador que obtuvimos fue el siguiente:

$$\frac{0.53492(s + 11.11)(s + 25.32)}{s}$$

$$\frac{0.3492s^2 + 19.48715s + 150.4758}{s}$$

$$19.48714 + \frac{150.4758}{s} + 0.53492s$$

Obteniendo:

$$K_p = 19.48714.$$

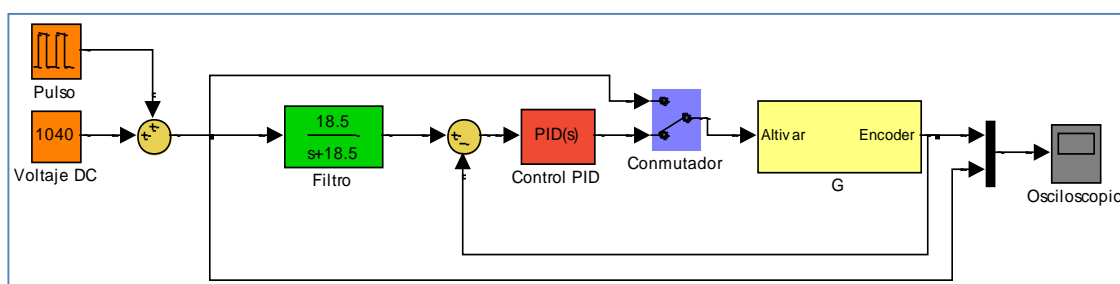
$$K_i = 150.4758.$$

$$K_d = 0.53492.$$

El Filtro seleccionado será:  $\frac{18.5}{(s+18.5)}$

#### 5.4 Diagrama de bloques del controlador.

El diagrama de bloques que tenemos representa a todo el proceso de identificación; haremos una breve descripción del sistema diferenciando por colores cada parte importante.



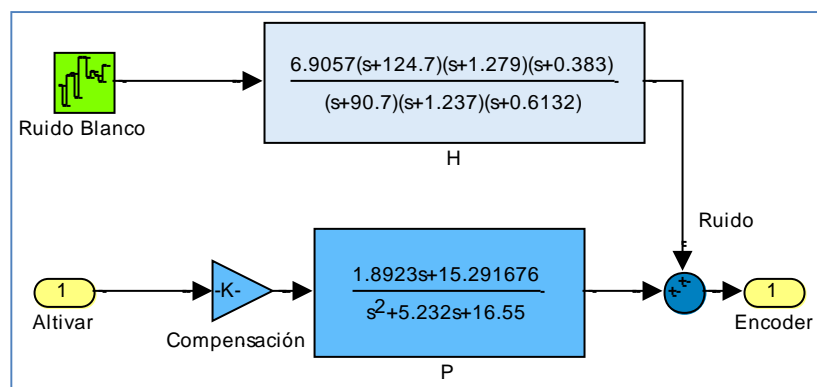
**Figura 5-7** Diagrama de Bloques del Proceso de control de un motor de inducción.

El bloque naranja será el punto de referencia u señal de prueba que el usuario necesite, la cual podrá ser de cualquier tipo, que se encuentre dentro del rango de trabajo especificado en el Capítulo 3.1.1.1

El filtro, se encuentra de color verde. Y el control PID de color café.

Tenemos un conmutador que se encuentra de color azul en la figura anterior; permitirá observar la reacción de la señal o punto de referencia, ingresada al sistema (G) con el efecto del controlador. Si cambiamos la posición del conmutador, la planta trabajará con la señal del punto de referencia pero ésta no va a ser controlada.

El modelamiento del sistema, se detalla con el bloque color amarillo, G; que en realidad es una representación hacia un subsistema en el que se estima la planta. La siguiente figura es el modelamiento del sistema de la planta real que también lo detallaremos:



**Figura 5-8** Modelamiento del sistema de Planta Real.

El ruido blanco es el ruido aleatorio, que se puede generar en la planta, para nosotros, el ruido tendrá una potencia baja, ya que en nuestro caso se dará por vibraciones, corrientes de magnetización del sistema.

El bloque H es el ruido de modelación, es el resultado de los polinomios que se genera en la modelación matemática descrita del

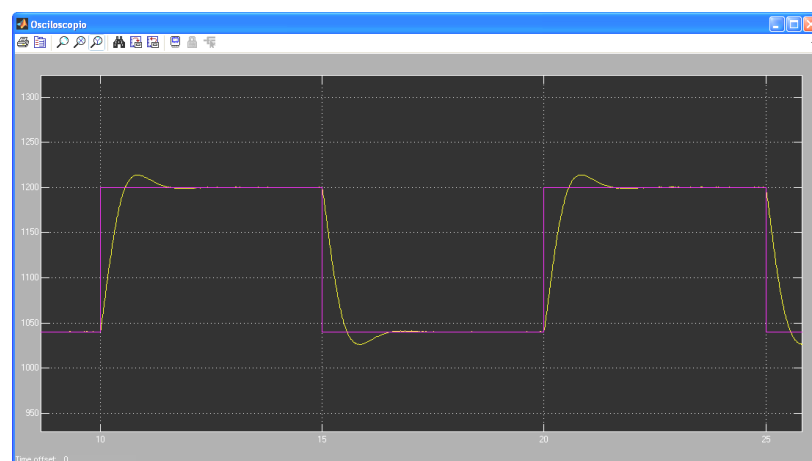
modelo Bob Jenkins en el capítulo 4, realizándose la división de los polinomios C y D.

El bloque P, es el modelo que se genera también por identificación paramétrica, es la modelación matemática que contiene las características dominantes de la planta.

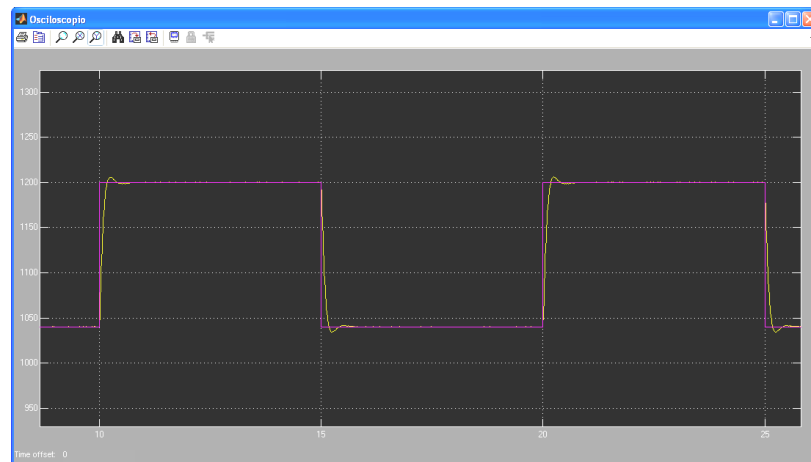
El Bloque de Compensación, se da debido a que tenemos una conversión física de voltaje a velocidad que es una constante, que afecta en la ganancia del sistema.

## 5.5 Resultados Simulados.

Por medio del osciloscopio dado en el diagrama de bloques, observaremos la respuesta del modelamiento matemático y así comprobar los criterios dados al controlador.



**Figura 5-9** Proceso sin Controlador.

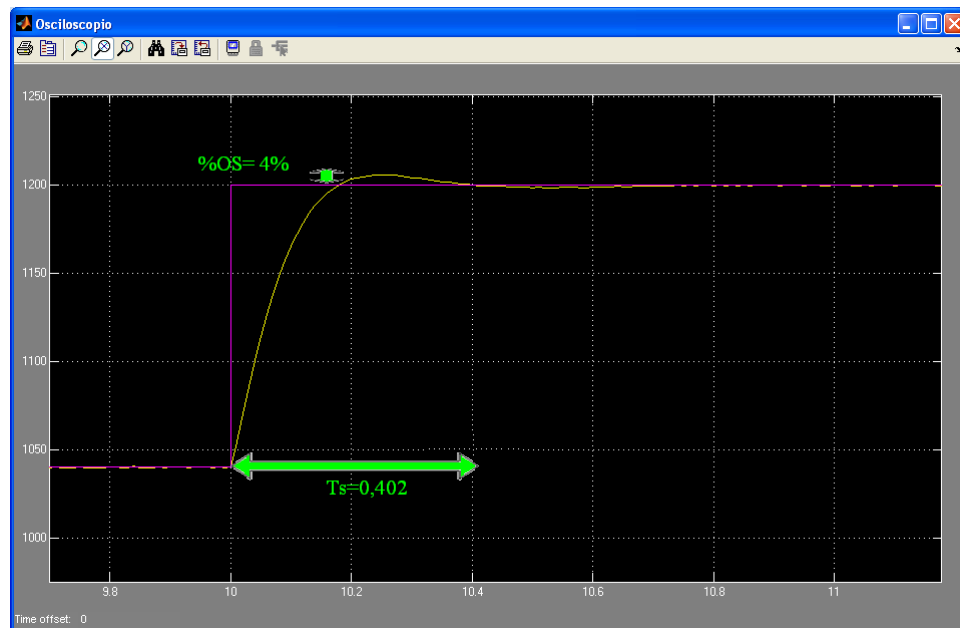


**Figura 5-10** Proceso con controlador.

## 5.6 Análisis de resultados.

Como observamos la figura siguiente el controlador permite que la planta cumpla con los parámetros de tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual. El cero de  $-12$  sobre el plano real tiene el control sobre el nivel porcentual, el otro cero, ayuda a encontrar el mejor ajuste entre sobre nivel porcentual y  $t_s$ . El filtro agrega un polo real que compensa el efecto de los dos ceros anteriores a la planta y da un ajuste final para llegar a los parámetros ajustados.





**Figura 5-11** Resultados Obtenidos de la Simulación de la planta Real.

Como Conclusión, nos vimos con la necesidad de implementar un controlador PID, debido a que un controlador P, o un controlador PI no cumplían con las exigencias requeridas, el P aumentaba mucho el sobre nivel porcentual y el PI disminuía el sobre nivel porcentual pero no el tiempo de estabilización. Luego se agrego un filtro, formado por un polo sobre el eje real para compensar el efecto que los ceros agregados por el PID afecten a la planta en sí.

## 5.7 Análisis del controlador en Planta Real

Pese a que en este capítulo diseñaremos un controlador para nuestra planta, éste no es necesario, pues nuestra planta ya cuenta con un elemento que puede ser usado como controlador, el variador de frecuencia, el cual se

puede cambiar su configuración y obtener una mejor respuesta que la lograda por medio del controlador que encontremos. Como se mencionó en la introducción, no se implementará en la planta real el controlador diseñado, una de las razones es porque nuestra no necesita mejorar su respuesta transiente, ya que en las aplicaciones en donde se usa el motor de inducción, éste se lo usa para propósitos generales y para propósitos donde se requiere una respuesta estricta del motor.

# CONCLUSIONES

1. Se ha cumplido con el debido proceso para la identificación de un sistema, desde abastecernos con información para generar un conocimiento previo sobre el proceso estudiado, hasta aprobar una modelación matemática que represente de forma óptima al comportamiento real del mismo.
2. El análisis de correlación, siendo un método de identificación no paramétrico, nos dio una alta confiabilidad de trabajo para cada señal de entrada diseñada (ver Figura 0-1), se comprueba la existencia de una relación fuerte entre la entrada y la salida.
3. El método no paramétrico que nos resultó eficiente, fue el análisis de respuesta transitoria; la respuesta al escalón del sistema fue trascendental en la selección de la mejor señal de entrada, escogiendo como mejor señal, a aquella que nos dé un menor error absoluto en los aspectos considerados en las señales de entrada.
4. Logramos obtener un modelamiento matemático con un ajuste del 83.84% de similitud a la planta real, que describe el comportamiento de la velocidad en un motor de inducción jaula de ardilla con su respectiva potencia de perturbación.
5. Tuvimos que elegir entre dos métodos de identificación paramétrica los cuales daban resultados muy parecidos, inclinándonos por aquel de

menor orden, pues no es necesario sobredimensionar nuestra función de transferencia.

6. Realizando la comunicación entre LabVIEW y el variador de frecuencia logramos darle a la velocidad un patrón diferente a seguir, patrones que no son posibles configurarlos desde el variador; el cual lo usamos en nuestro caso, como parte de potencia y de control de fallas.
7. Hicimos un control de velocidad, variando directamente el parámetro velocidad mediante LabVIEW, y no variando parámetro de frecuencia, como lo hace el Altivar31A.
8. Logramos diseñar el controlador que cumpla con las especificaciones dadas en los criterios para el diseño del controlador con un Tiempo de Estabilización de 0.402 segundos y un sobre nivel porcentual del 4%. No fue implementado en la planta real por el análisis dado en el capítulo 5.7.

## RECOMENDACIONES

1. Para empezar con el proceso de identificación de un sistema, se necesita tener sólidos conocimientos teóricos sobre la planta a la cual se va a realizar la identificación. Para tentar a la obtención de un buen modelo matemático.
2. Conocer los parámetros nominales de un motor de inducción. Y establecer parámetros de funcionamiento según la carga a la cual sea puesto en marcha el sistema.
3. Es importante recoger la mayor cantidad de datos de velocidad, pues estos deben ser suficientes para obtener un buen análisis no paramétrico.
4. Para la adquisición y generación de datos, dependiendo del parámetro a medir, es recomendable hacerlo desde Matlab. Debido a que sería de gran utilidad tener los datos en misma frecuencia y en misma
5. Se recomienda de ser posible para variar la velocidad de un MIJA un variador de frecuencia y no un controlador PID.

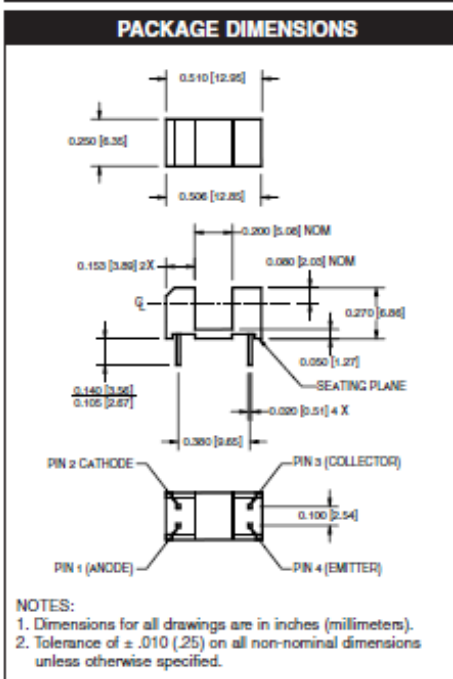
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dorf, Richard C.; Bishop, Robert, “Sistemas de Control Moderno”, Pearson Alhambra, 2005.
- [2] Ogata, Karsuhiko, “Ingeniería de control moderna”, Prentice Hall 1993.
- [3] Schneider Electric, “Manual de Programación Altivar 31A”. Roberto Angel Rivero, “Identificación De Sistemas De Segundo Orden”, Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional-Tucuman. 2003
- [4] Fitzgerald; Kingsley; Kusko, “ELECTRIC MACHINERY”, McGraw–Hill, 1971.
- [5] Stephen J. Chapman, “Máquinas eléctrica”, McGraw – Hill, 1990.
- [6] Guía De Programación Altivar 31, Telemecanique, 2004
- [7] Muhammad H. Rashid, “POWER ELECTRONICS HANDBOOK”, Academic Press, 2000.
- [8] Motion Control, Variadores de Frecuencia, Control escalar v/f.  
<http://www.infopl.net/blog4/category/variadores-de-frecuencia-inverter/>. Fecha de consulta: 20 de junio 2011.



# ANEXOS

## MOC70P1 / MOC70P2 / MOC70P3 PHOTOTRANSISTOR OPTICAL INTERRUPTER SWITCH



### DESCRIPTION

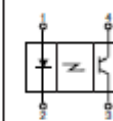
The MOC70PX consists of an infrared light emitting diode coupled to an NPN silicon phototransistor packaged into an injection molded housing. The housing is designed for wide gap, non contact sensing.



### FEATURES

- No contact sensing
- 5 mm gap
- .040" aperture
- Low profile
- PCB mount
- Transistor output

### SCHEMATIC



### NOTES

1. Derate power dissipation linearly, on each component, 1.67 mW/°C above 25°C.
2. RMA flux is recommended.
3. Methanol or isopropyl alcohols are recommended as cleaning agents.
4. Soldering iron tip 1/16" (1.6mm) from housing.
5. As long as leads are not under any stress or spring tension.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)			
Parameter	Symbol	Rating	Units
Operating Temperature	$T_{OPR}$	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{STG}$	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (Iron) <sup>(2,3,4,5)</sup>	$T_{SOL-I}$	240 for 5 sec	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (Flow) <sup>(2,3,5)</sup>	$T_{SOL-F}$	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
<b>EMITTER</b>			
Continuous Forward Current	$I_F$	50	mA
Reverse Voltage	$V_R$	6	V
Power Dissipation <sup>(1)</sup>	$P_D$	100	mW
<b>SENSOR</b>			
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	30	V
Emitter-Collector Voltage	$V_{ECO}$	4.5	V
Collector Current	$I_C$	20	mA
Power Dissipation <sup>(1)</sup>	$P_D$	150	mW

Para mayor información visite:

[http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/489334\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/489334_DS.pdf)

# LM2904, LM358/LM358A, LM258/ LM258A

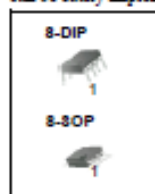
## Dual Operational Amplifier

### Features

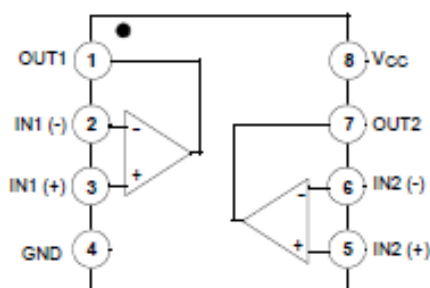
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100dB
- Wide Power Supply Range:  
LM258/LM258A, LM358/LM358A: 3V~32V (or  $\pm 1.5V$  ~ 16V)  
LM2904 : 3V~26V (or  $\pm 1.5V$  ~ 13V)
- Input Common Mode Voltage Range Includes Ground
- Large Output Voltage Swing: 0V DC to  $V_{cc}$  -1.5V DC
- Power Drain Suitable for Battery Operation.

### Description

The LM2904, LM358/LM358A, LM258/LM258A consist of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltage. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP-AMP circuits which now can be easily implemented in single power supply systems.



### Internal Block Diagram



Para mayor información visite:

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/LM358.pdf>



## Menú de funciones de aplicaciones FUN-

---

### Velocidades preseleccionadas

Se pueden preseleccionar 2, 4, 8 ó 16 velocidades, que necesitan de, respectivamente, 1, 2, 3 ó 4 entradas lógicas.

Se debe respetarse el siguiente orden de asignación: PS2, PS4, PS8 y PS16.

Tabla de combinación de las entradas de velocidades preseleccionadas

16 velocidades LI (PS16)	8 velocidades LI (PS8)	4 velocidades LI (PS4)	2 velocidades LI (PS2)	Consigna velocidad
0	0	0	0	Consigna (1)
0	0	0	1	SP2
0	0	1	0	SP3
0	0	1	1	SP4
0	1	0	0	SP5
0	1	0	1	SP6
0	1	1	0	SP7
0	1	1	1	SP8
1	0	0	0	SP9
1	0	0	1	SP10
1	0	1	0	SP11
1	0	1	1	SP12
1	1	0	0	SP13
1	1	0	1	SP14
1	1	1	0	SP15
1	1	1	1	SP16

(1) Véanse los sinópticos de la página 28 y la página 30: consigna 1 = (SP1).

Para mayor información: [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/accionamientos-electricos/practicas-1/P3\\_guiaprogATV31.pdf](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/accionamientos-electricos/practicas-1/P3_guiaprogATV31.pdf)