



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“IDENTIFICACIÓN Y DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA UN
SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD TIPO CRUCERO EN UN
VEHÍCULO”**

TESINA DE SEMINARIO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DE LOS TÍTULOS:

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

“INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES”

**“INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA”**

PAULO CÉSAR DAQUI LOUREIRO

VICTOR ANDRÉ SOTOMAYOR PAREDES

JUAN CARLOS SUÁREZ LUQUE

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2013

AGRADECIMIENTO

A nuestro director, el MSc. César Martín Moreno, por su guía y orientación en éste proyecto, así como también a todos quienes ayudaron de alguna u otra forma a cumplir con esta meta.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por ser nuestra guía. A mis padres que son ejemplo de vida, me enseñaron sus valores y creen en mí. A mi familia, mi esposa, por su cariño incondicional y mis hijos que son mi inspiración. A mis amigos que siempre me dieron ánimos.

Paulo César Daqui Loureiro.

A Dios por el privilegio de estar vivo. A mi mamá, mi abuelita, mi tía Zoila y mi tío Fico, por su amor incondicional durante toda mi vida, éste logro es suyo. A Miguel por su apoyo y a mi hermana por ser la mejor.

Víctor André Sotomayor Paredes.

A Dios, por permitirme estar aquí y ahora, y ser mi soporte siempre. A mis padres, por su ejemplo y sabiduría durante todos los años de mi vida. A mi esposa, por siempre, mi compañera. A mi amigo Marcos, por su ayuda de siempre. A todos mis familiares y amistades, que de una u otra forma estuvieron en su momento para darme su apoyo y ese aliento para retomar las riendas.

Juan Carlos Suárez Luque.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. César Antonio Martín Moreno

PROFESOR

DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

MSc. Carlos Alberto Salazar López

PROFESOR DELEGADO

POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesina, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

Artículo 12 del Reglamento de Graduación.

Paulo César Daqui Loureiro

Víctor André Sotomayor Paredes

Juan Carlos Suárez Luque

RESUMEN

Haciendo uso de la técnica de identificación de sistemas, se logró modelar matemáticamente el comportamiento de una bicicleta eléctrica con motor de corriente continua, bajo ciertas limitantes; obteniendo una función de transferencia para dicha planta, donde la entrada del sistema es el voltaje en el acelerador de la bicicleta y la salida la velocidad de desplazamiento de la misma. El proyecto concluyó con el diseño de un controlador para la planta, el mismo que fue sometido a pruebas simuladas y reales.

En el capítulo 1, se describe al sistema de velocidad crucero, el estado actual de ésta tecnología y su evolución. También se brinda una breve reseña de la historia de la identificación de sistemas.

En el capítulo 2, se presenta de manera resumida los conceptos teóricos y demás herramientas utilizadas durante el desarrollo del experimento.

En el capítulo 3, se explica detalladamente cómo se diseñó el experimento, bajo que limitantes se trabajó, y de qué manera fueron utilizadas algunas de las herramientas y conceptos presentados anteriormente. En éste capítulo

también se presenta el diseño de varias señales y los análisis realizados para escoger a la señal de entrada del sistema.

En el capítulo 4, se presenta el proceso seguido para estimar la función de transferencia del sistema, los métodos paramétricos utilizados y los resultados obtenidos con cada uno de ellos; es en éste capítulo donde se puede encontrar el diseño del controlador.

En el capítulo 5, se exponen los resultados de las pruebas de simulación del controlador diseñado en el capítulo anterior, y de la implementación del mismo en la planta real.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	v
DECLARACIÓN EXPRESA	vi
RESUMEN	vii
ÍNDICE GENERAL	ix
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xxii
INTRODUCCIÓN.....	xxiv
CAPÍTULO 1	
ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1 Control de velocidad crucero en un vehículo.....	1
1.1.1 Origen y primeros diseños.	2
1.1.2 Actualidad y avances.	5
1.2 Identificación de Sistemas.....	7

1.2.1	Sistema.....	7
1.2.2	Historia.....	9
1.2.3	Concepto.....	10

CAPÍTULO 2

HERRAMIENTAS Y CONOCIMIENTOS.....		12
2.1	Herramientas teóricas.....	12
2.1.1	Velocidad.....	13
2.1.2	Control continuo.....	13
2.1.2.1.	Funciones de prueba más utilizadas.....	13
2.1.2.2	Función de transferencia.....	14
2.1.2.3	Sistemas de primer orden.....	15
2.1.2.4	Sistemas de segundo orden.....	16
2.1.3	Control discreto.....	19
2.1.4	Nociones previas a los métodos de identificación.....	20
2.1.4.1	Selección del período de muestreo.....	20
2.1.4.2	Señales estacionarias.....	21
2.1.5	Identificación de Sistemas.....	21
2.1.5.1	Identificación No Paramétrica.....	22

2.1.5.2	Diseño de señal de entrada.	26
2.1.5.3	Fuentes de error en la identificación.....	28
2.1.5.4	Identificación Paramétrica.	29
2.1.5.4.1	Estructura ARX.	32
2.1.5.4.2	Estructura ARMAX.....	324
2.1.5.4.3.	Estructura FIR.....	35
2.1.5.4.4.	Estructura BOX-JENKINS.....	36
2.1.5.4.5.	Estructura Error de Salida (OUTPUT ERROR).	37
2.1.6	Controlador.	38
2.2	Herramientas tecnológicas.....	41
2.2.1	Matlab.	42
2.2.2	Simulink.	42
2.2.3	System Identification Tool (Ident).	43
2.2.4	Input Design GUI.....	44
2.2.5	Sisotool.	45
2.2.6	Computadora.	46
2.2.7	Equipo de adquisición de datos.....	47
2.3	La planta.	48
2.3.1	Rodillo.....	50

2.3.2	Velocímetro y sensor de velocidad.....	51
-------	--	----

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.	53	
3.1	Análisis de la Planta.....	53
3.1.1	Elementos físicos de la planta.....	53
3.1.1.1	Interfaz física entre el computador y la planta.	55
3.1.1.2	Limitaciones del experimento.....	59
3.1.2	Bloque Esquemático en Simulink.....	59
3.1.2.1	Descripción del bloque esquemático utilizado.....	62
3.1.3.	Determinación de la frecuencia de muestreo.....	70
3.1.4	Respuesta al escalón.....	71
3.1.4.1	Constante de Tiempo (τ).....	73
3.2	Diseño de la señal de entrada.....	74
3.2.1	Parámetros de diseño de las señales RBS.....	75
3.2.2	Parámetros de diseño de las señales PRBS y multi-sinoidal.....	76
3.2.3	Parámetros generales de diseño de las señales.....	78
3.3	Proceso de selección de la señal de entrada.....	78
3.3.1	Análisis de las señales de entrada utilizando la herramienta CRA. .	79

3.3.1.1 Auto-correlación de la señal de entrada.	82
3.3.1.2 Auto-correlación de la señal de salida.	83
3.3.1.3 Estimación de la Respuesta Impulso.	83
3.3.1.4 Correlación cruzada.	86
3.3.2 Señales seleccionadas.	87

CAPÍTULO 4

ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA Y DISEÑO DEL CONTROLADOR.	88
4.1 Estimación de la función de transferencia del sistema mediante análisis paramétrico.	88
4.1.1 Ingreso de las señales a la herramienta Ident.	89
4.1.2 Criterios utilizados para la selección del mejor modelo.	92
4.1.3 Estimaciones realizadas con el modelo ARX	93
4.1.4 Estimaciones realizadas con el modelo ARMAX	97
4.1.5 Estimaciones realizadas con el modelo Error de Salida	100
4.1.6 Modelo BOX-JENKINS (BJ).	102
4.1.7 Modelo FIR.	105
4.1.8 Elección del Modelo más conveniente.	107

4.1.9	Función de Transferencia del Sistema.	110
4.2	Diseño del Controlador.....	111
4.2.1	Análisis en lazo cerrado.	112
4.2.2	Metas de control.....	113
4.2.3	Obtención del controlador.	114

CAPÍTULO 5

	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR.	120
5.1	Resultados y ajustes previos.....	120
5.2	Implementación en planta virtual.....	122
5.3	Implementación en planta real.	126

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

AR	Auto Regresivo
ARMA	Media Móvil y Auto Regresivo
ARMAX	Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs
ARX	Auto-Regressive with eXogenous inputs
BJ	Box Jenkins
FIR	Respuesta finita al impulso
MA	Media Móvil
OE	Error de Salida
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PRBS	Secuencia Pseudo Aleatoria Binaria
τ	Constante de tiempo dominante de la planta.
τ_{dom}^{Hi}	Estimación alta de la constante de tiempo.
τ_{dom}^{Lo}	Estimación baja de la constante de tiempo
α	Alfa
β	Beta
kph	kilómetros por hora
V	Voltios

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Regulador centrífugo. [1].....	3
Figura 1.2	Diagrama del primer sistema de Control Crucero. [4].....	5
Figura 1.3	Diagrama básico de un sistema.	8
Figura 1.4	Bloque identificador.	11
Figura 2.1	Respuesta a señal escalón y valores característicos de un sistema de primer orden. [9]	15
Figura 2.2	Valores característicos de un sistema de segundo orden sub-amortiguado. [12].....	18
Figura 2.3	Diagrama de bloque de la estructura del modelo de predicción de error.	31
Figura 2.4	Diagrama de bloque de la estructura ARX.	33
Figura 2.5	Diagrama de bloque de la estructura ARMAX.....	34
Figura 2.6	Diagrama de bloque de la estructura FIR.....	35
Figura 2.7	Diagrama de bloque de la estructura Box-Jenkins.	36
Figura 2.8	Diagrama de bloque de la estructura Error de Salida.....	37
Figura 2.9	Diagrama de bloques de un controlador PID. [14].....	39

Figura 2.10	Ventana principal de trabajo de Matlab (R2010a).	42
Figura 2.11	Ventana principal del Simulink (navegación de librerías).	43
Figura 2.12	Ventana principal del Ident.....	44
Figura 2.13	Ventana principal del Input Design GUI.	45
Figura 2.14	Ventana principal del Sisotool.....	46
Figura 2.15	Dispositivo de adquisición de datos National Instrument SB- 6009. [15].....	48
Figura 2.16	Planta: Bicicleta eléctrica eZip Trailz. [16].....	49
Figura 2.17	Esquemático de conexiones de la bicicleta. [17]	50
Figura 2.18	Rodillo Kinetic by Kurt. [18]	51
Figura 2.19	Velocímetro Sigma 509. [19].....	52
Figura 3.1	Vista posterior de la planta.....	54
Figura 3.2	Vista lateral de la planta.....	55
Figura 3.3	Puertos de la tarjeta de adquisición de datos <i>NI DAQ USB-</i> <i>6009</i> . [15].....	56
Figura 3.4	Diagrama eléctrico de las conexiones realizadas.....	58
Figura 3.5	Esquemático diseñado en Simulink.	61
Figura 3.6	Entrada del sistema.	62
Figura 3.7	Pulsos provenientes del sensor magnético.	63

Figura 3.8	Procesamiento de la señal del sensor magnético.	64
Figura 3.9	Ganancia multiplicada al número de pulsos.	65
Figura 3.10	Reinicio de contadores.	69
Figura 3.11	Captura final de las señales.	69
Figura 3.12	Tiempo entre cada pulso generado por el sensor magnético. .	71
Figura 3.13	Respuesta al escalón.....	73
Figura 3.14	Ventana del Input Design GUI.	75
Figura 3.15	Función cra (prbs3OUT, 20, 10,2).....	81
Figura 3.16	Autocorrelación de la señal de entrada.	82
Figura 3.17	Autocorrelación de la señal de salida.	83
Figura 3.18	Estimada de la respuesta al impulso.....	84
Figura 3.19	Función cra (prbs3OUT, 20, 10,1).....	85
Figura 3.20	Correlación cruzada entre la entrada y la salida.	86
Figura 4.1	Proceso previo a la Identificación.....	89
Figura 4.2	Señales de Entrada y Salida del sistema.	90
Figura 4.3	Entrada y Salida después de remover sus medias.	91
Figura 4.4	Entrada y Salida sin medias ni tendencias.....	91
Figura 4.5	Entrada y salida divididas en 70% y 30%.....	92
Figura 4.6	Selección de los coeficientes deseados para el Modelo ARX.	94

Figura 4.7	Posibles combinaciones de coeficientes para el Modelo ARX.	95
Figura 4.8	Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.	96
Figura 4.9	Porcentajes de Similitud.....	96
Figura 4.10	Selección de los parámetros deseados para el Modelo ARMAX.	98
Figura 4.11	Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.	98
Figura 4.12	Selección de los parámetros deseados para el Modelo Error de Salida.....	100
Figura 4.13	Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico, 1er bloque.....	100
Figura 4.14	Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico, 2do bloque.....	101
Figura 4.15	Porcentajes de Similitud.....	101
Figura 4.16	Selección de los parámetros deseados para el Modelo Box – Jenkins.	103
Figura 4.17	Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.	103
Figura 4.18	Porcentajes de Similitud.....	104
Figura 4.19	Selección de los parámetros deseados para el FIR.	105
Figura 4.20	Posibles combinaciones de coeficientes para el Modelo FIR.	106
Figura 4.21	Porcentajes de Similitud.....	106

Figura 4.22	Porcentaje de similitud de la estructura seleccionada.	108
Figura 4.23	Análisis residual de la señal escogida.....	109
Figura 4.24	Sistema Lazo abierto.	111
Figura 4.25	Sistema de lazo cerrado.	112
Figura 4.26	Trayectoria de las raíces.....	113
Figura 4.27	Modelo lazo cerrado y valores.	115
Figura 4.28	Trayectoria de las raíces con metas de control propuestas...	116
Figura 4.29	Ventana de diseño de Sisotool.	117
Figura 4.30	Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado.	118
Figura 4.31	Función del Controlador PID en Sisotool.	119
Figura 5.1	Diagrama de bloque del sistema.....	122
Figura 5.2	Diagrama esquemático en lazo cerrado para simulación con planta virtual.	123
Figura 5.3	Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema en lazo cerrado simulado.....	124
Figura 5.4	Salida (en V) de la señal del controlador PID.....	124
Figura 5.5	Diagrama esquemático en lazo abierto para simulación con planta virtual.	125
Figura 5.6	Entrada (amarillo, en V) / Salida (magenta, en kph) de la planta simulada en lazo abierto.	126

Figura 5.7	Diagrama esquemático en lazo cerrado con adquisición de datos en tiempo real.	127
Figura 5.8	Diagrama esquemático del subsistema Planta real.	127
Figura 5.9	Salida (en V) de la señal del controlador PID.	129
Figura 5.10	Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema con planta real.	129
Figura 5.11	Diagrama esquemático en lazo cerrado para adquisición de datos en tiempo real con punto de ajuste fijo.	130
Figura 5.12	Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, aplicando presión estable con el rodillo.	131
Figura 5.13	Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, variando la presión del rodillo (verde,#de vueltas).	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Reseña de la Identificación de Sistemas [6].....	10
Tabla 2	Cuadro conceptual de los valores característicos de un sistema de primer orden.....	16
Tabla 3	Cuadro conceptual sobre los tipos de respuesta de un sistema de segundo orden.	17
Tabla 4	Cuadro conceptual de los valores característicos de un sistema de segundo orden.	19
Tabla 5	Estimación no paramétrica vía análisis de correlación.	25
Tabla 6	Estimación no paramétrica vía análisis espectral.	25
Tabla 7	Estimadores estadísticos relacionados a los procesos de identificación.	26
Tabla 8	Tipos de señal de entrada.....	28
Tabla 9	Términos que componen la estructura del modelo de predicción de error.	30
Tabla 10	Diagrama de bloque de la estructura de los modelos de predicción de error.	32

Tabla 11	Afectación de los tipos de controlador a la respuesta en lazo cerrado.....	40
Tabla 12	Diseño de señales de entrada.....	79
Tabla 13	Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARX).....	97
Tabla 14	Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARMAX)	99
Tabla 15	Análisis de las estructuras generadas (Modelo Error de Salida)	102
Tabla 16	Análisis de las estructuras generadas (Modelo BOX JENKINS)	104

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo general encontrar el modelo matemático de una bicicleta eléctrica con motor de corriente continua, haciendo uso de la técnica de identificación de sistemas, para luego poder diseñar e implementar un controlador sencillo.

Dentro de éste contexto se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Demostrar que la técnica de identificación de sistemas es válida, mediante el desarrollo de una aplicación sobre un proceso real, encontrando por lo menos una estimación de la función de transferencia de la planta, que tenga un porcentaje de similitud mayor al 60 %, así como también una respuesta al escalón y análisis residual aceptables.
- ✓ Mostrar la efectividad de un sistema de adquisición de datos, basado en tarjetas electrónicas.
- ✓ Diseñar un bloque de captura y procesamiento de datos, el cual permitirá obtener los valores de las señales de entrada y salida del sistema.

- ✓ Demostrar que se puede realizar la captura de una señal que refleje el comportamiento de la velocidad de la bicicleta, a partir del uso de un sensor magnético e imanes en la rueda trasera de la misma.

- ✓ Demostrar la validez de las técnicas de diseño de controladores PID basadas en herramientas graficas (Matlab).

- ✓ Comparar los resultados de la implementación del controlador en la planta real, con los obtenidos en simulaciones.

El primer paso en el desarrollo del experimento será definir cuáles serán las señales de entrada y salida del sistema, en torno a esto se construirá una interfaz física entre la planta y la computadora portátil, con la finalidad de capturar los datos necesarios durante el experimento. Se utilizará un bloque esquemático en *Simulink*, en donde se procesarán los datos provenientes de las capturas, y así se obtendrán finalmente los valores de las señales de entrada y salida del sistema.

Se excitará al sistema con una señal de tipo escalón, se observará y se analizará el comportamiento de la señal de salida, se recogerá la información necesaria para el siguiente paso.

Se diseñarán varias señales, las cuales serán analizadas y probadas en la planta con la finalidad de encontrar a las más idóneas, y de éstas escoger una que sea la señal de entrada, para los análisis posteriores.

Una vez escogida la señal de entrada del sistema, se procederá a realizar el análisis paramétrico, donde se harán diversas estimaciones haciendo uso de cinco modelos paramétricos, y se escogerá de estas a la mejor bajo los criterios de selección pertinentes, obteniendo así una función de transferencia del sistema.

En el tramo final del desarrollo de éste proyecto se diseñará un controlador sencillo que cumpla ciertas metas que serán definidas posteriormente, se construirá un bloque en *Simulink*, donde se probará dicho controlador en una simulación, y luego se lo implementará en la planta real .

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE.

1.1 Control de velocidad crucero en un vehículo.

El control de velocidad crucero es un sistema que brinda la capacidad de mantener en movimiento un vehículo a una velocidad constante previamente establecida, sin la necesidad de manipular el acelerador. El conductor ajusta la velocidad, y en ese justo momento el sistema toma el control del acelerador del vehículo para mantener la velocidad sin variaciones. Un buen sistema de control de crucero acelera progresivamente hasta alcanzar la velocidad deseada, sin rebasarla, y la mantiene constante, a pesar de las perturbaciones externas tales como el peso en el vehículo, el grado de inclinación del terreno, así como factores aerodinámicos.

1.1.1 Origen y primeros diseños.

El concepto del control de velocidad crucero en un vehículo ha evolucionado con el pasar de los años, creciendo poco a poco su campo de aplicación a una mayor diversidad de vehículos. El control de velocidad crucero se basa en la teoría del control que tiene sus orígenes a mediados del año 1788, a partir de la necesidad de que el motor a vapor pueda mantener un desempeño constante al variar su carga. Los creadores de éste concepto fueron el ingeniero escocés James Watt, reconocido matemático e inventor en su época, y su socio, el comerciante Matthew Boulton. Ambos contribuyeron a la innovación de la máquina de vapor de Thomas Newcomen, con descubrimientos y hallazgos importantes que aumentaron su eficiencia. En la Figura 1.1 se muestra, entre otros descubrimientos, el regulador centrífugo, que consistía en un controlador que ajustaba la posición del acelerador conforme la velocidad del motor variaba con diferentes cargas.



Figura 1.1 Regulador centrífugo. [1]

Se conoce que los primeros dispositivos de control de velocidad basados en el regulador centrífugo datan del año 1910 cuando Peerless realizó una campaña publicitaria indicando que su sistema mantendría la velocidad tanto cuesta arriba como cuesta abajo. [2]

Luego de un periodo de casi 35 años en donde no se presentaron avances o evolución significativa alguna de esta tecnología, el inventor e ingeniero mecánico, Ralph Teetor, creó el primer control de velocidad moderno. Su idea nació de la frustración de ir en el vehículo de su abogado, quien frenaba y aceleraba continuamente mientras

conversaba. Después de diez años de investigaciones y modificaciones a su invento original, Teetor recibió en 1945 su primera patente. Los primeros nombres de su creación fueron "Controlmatic", "Touchomatic", "Pressomatic" y "Speedostat", sin embargo, el nombre que eligió como definitivo fue "Cruise Control" o Control Crucero en español. El sistema de control crucero consistía en calcular la velocidad del vehículo mientras se desplazaba sobre la carretera. Estos cálculos se basaban en las rotaciones del eje a través del cual se transmite el movimiento desde el diferencial a las ruedas del automotor. Éste diseño usaba una bobina para variar la posición del acelerador según fuera necesario, con el fin de mantener una velocidad constante tal como se muestra en la Figura 1.2.

El término "cruceo", tiene su origen en el lenguaje marítimo "velocidad crucero", que describe la velocidad media en mar abierto de una embarcación con el fin de disminuir el esfuerzo de la marea sobre la misma. [3]

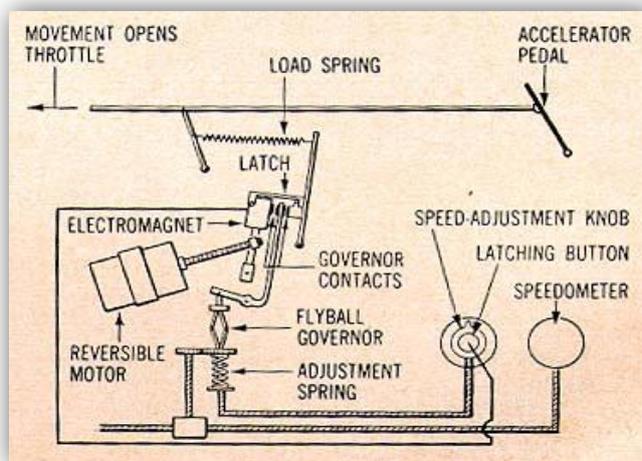


Figura 1.2 Diagrama del primer sistema de Control Crucero. [4]

El primer vehículo en el cual se implementó éste sistema fue el Chrysler Imperial en el año 1958, luego a modelos de carros de Windsor y New Yorker, y continuando en 1960 se lo implementó en los Cadillac. [4]

1.1.2 Actualidad y avances.

Con el transcurrir de los años, las ventajas que ofrecía el control de velocidad crucero fueron llamando la atención de la industria automotriz, por lo que poco a poco fue incorporándose en diferentes clases de vehículos (autos, vans y camionetas) de todas las marcas. Luego, no solo los vehículos terrestres gozarían de éste

descubrimiento: también fue adaptándose éste concepto en barcos, cruceros, lanchas, helicópteros, aviones comerciales, así como también en los vehículos espaciales, logrando de esta forma mantener la velocidad de crucero constante durante largos recorridos.

La curiosidad de los investigadores y personas alrededor del mundo, ha llevado a incorporar los controles de velocidad crucero, ya no solo en vehículos de tamaño mediano o grande, sino también en vehículos pequeños, tales como en motos y bicicletas, construyendo así prototipos de vehículos de transportación con éste tipo de tecnología, debido a la necesidad de buscar maneras eficientes para trasladarse que conlleven a disminuir problemas tanto de factores ambientales (polución, emisión de CO₂ y demás) así como de factores poblacionales (alta densidad en el tráfico automovilístico, saturación de carreteras y demás). Para la incorporación de éste tipo de controles, no solo se ha pensado en el concepto de “mantener una velocidad estable”, sino también en fundamentarse en normas de estandarización internacional, como las muy reconocidas normas ISO (normas 22179, 15622, 26262), así como en calidad y manejo de confort del usuario en el uso de los controles de velocidad crucero, eficiencias energéticas, entre otros.

Las investigaciones en éste campo han logrado desarrollar innovaciones en control de velocidad crucero, dándoles el nombre de control de crucero, de donde se derivan en nuevos tipos, los cuales se indican a continuación:

- Control de Crucero (o su nombre en inglés Cruise Control o su acrónimo CC),
- Control de Crucero Adaptativo (Adaptative Cruise Control o ACC),
- Control de Crucero Adaptativo Mejorado (Enhanced Adaptative Cruise Control o EACC),
- Control de Crucero Adaptativo Mejorado en Completo Rango de Velocidad (Full Speed Range Adaptative Cruise Control o FSRACC).

1.2 Identificación de Sistemas.

Inferir modelos matemáticos a partir de observaciones y estudiar sus propiedades usando métodos estadísticos es de lo que trata la ciencia de la Ingeniería de Control. [5]

1.2.1 Sistema.

Se puede definir como sistema a aquel proceso que interactúa con diferentes tipos de variables, y que producto de esta interacción

resultan señales a su salida. En la Figura 1.3 se muestran las señales más importantes en un sistema o proceso, que son la señal de entrada, las perturbaciones y la señal de salida, donde el comportamiento de esta última depende de la entrada al sistema.

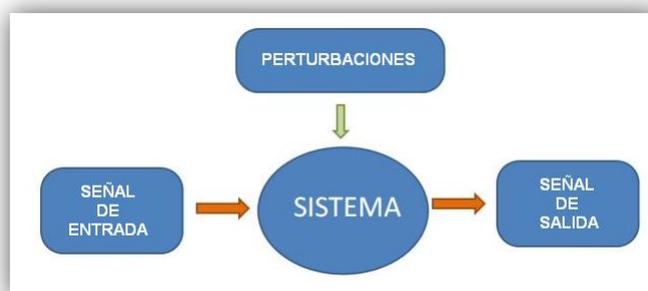


Figura 1.3 Diagrama básico de un sistema.

Se dice que un sistema es *dinámico* cuando al excitarse con una señal la entrada, se produce un cambio en el comportamiento de la señal de salida, es decir, el sistema evoluciona con el tiempo. Para el caso de un sistema real, se debe mencionar que existen señales, que sin ser parte de la señal de entrada, afectan a la señal de salida del sistema. Estas señales son conocidas como perturbaciones, que en la mayoría de los casos no pueden ser medidas y su naturaleza es aleatoria, en donde su presencia implicará una variación en el comportamiento de la señal de salida del sistema. Si bien las perturbaciones no pueden ser eliminadas, se las pueden minimizar en el análisis, dependiendo

del grado de afectación que éstas representen, caso contrario, se puede hacer uso de métodos para atenuar el impacto sobre la salida del sistema.

1.2.2 Historia.

La Identificación de Sistemas es una rama relativamente nueva en la Ingeniería de control. A continuación un breve abstracto de su desarrollo:

Fecha	Desarrollo Histórico
1965	<p>Año de nacimiento de la teoría de identificación con la publicación de dos trabajos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ho-Kalman. Primera solución para la determinación de una mínima representación de espacio de estados de los datos de respuesta al impulso. • Åström –Bohlin. Introduce los modelos de probabilidad máxima desarrollados por los analistas de series de tiempo para estimar parámetros en los modelos de ecuaciones en diferencias. Se da origen a los modelos ARMA y ARMAX.
1970	<p>Box and Jenkins publican su libro “Time series analysis, forecasting and control”, lo cual da mayor ímpetu a la aplicación de la identificación.</p>
1971	<p>Åström y Eykhoff, publican luego en la IEEE una encuesta sobre la identificación de sistemas y análisis de series de tiempo, explicando el estado del arte de sistemas de lazo cerrado.</p>

1974	Akaike extiende la solución determinística de Ho-Kalman a procesos estocástico, obteniendo el modelo Markovian desde un proceso aleatorio en base a su covarianza.
1978-1979	Los primeros intentos de ver a la Identificación de Sistemas como una teoría de aproximación que busca acercarse a un sistema real, generando modelos fueron publicados por Anderson en 1978 y por Ljung-Caines en 1979. Se cambia así el concepto a mejor aproximación.
1985-1986	Ljung en 1985 y Wahlberg-Ljung en 1986 analizan el orden de los sistemas al infinito. Se investigó sobre el error del desvío y la varianza y los errores en la función de transferencia. Nace una nueva perspectiva de la Identificación de Sistemas como un “problema de diseño”.
1987	Ljung publica su libro ““System identification: Theory for the User” el cual tendrá un gran impacto en la comunidad de ingeniería de Identificación de Sistemas. Establece al modelo como rol central y éste explica los datos de la mejor manera.
1990 en adelante	Crece el campo de investigación en el diseño de experimentos, la identificación en lazo cerrado, la identificación en el dominio de la frecuencia, la estimación de la incertidumbre y el control robusto basado en análisis de datos y diseño.

Tabla 1 Reseña Histórica de la Identificación de Sistemas .[6]

1.2.3 Concepto.

La técnica de Identificación de Sistemas es una herramienta que permite construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos, a partir de la observación de su comportamiento. Dichos modelos se obtienen

de experimentos tipo "entrada-salida" realizados sobre el sistema. En la Figura 1.4 se muestra esquemáticamente un bloque identificador que toma información de la entrada y la salida del sistema para obtener los parámetros de un modelo propuesto.

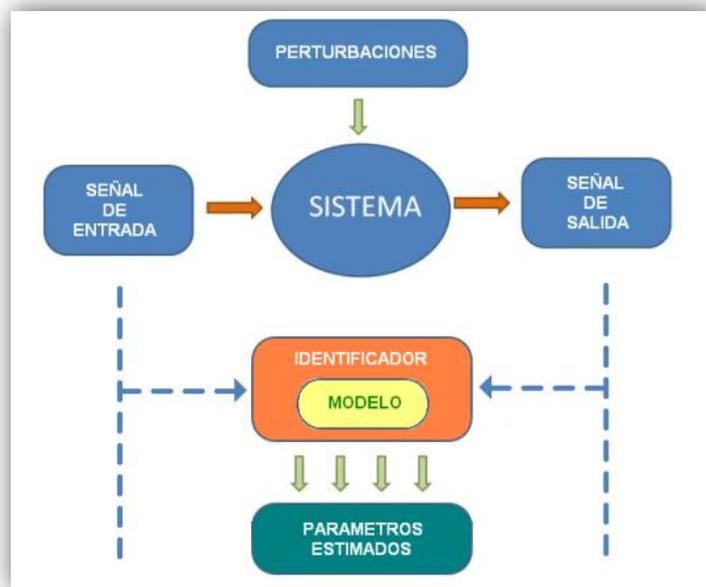


Figura 1.4 Bloque identificador.

Básicamente se puede decir que la identificación es una modelación experimental; sin embargo en la práctica, la identificación de sistemas no solamente utiliza información de observaciones sobre el mismo, sino que también hace uso de información basada en las leyes físicas que lo gobiernan.

CAPÍTULO 2

HERRAMIENTAS Y CONOCIMIENTOS.

El buen uso de herramientas y conocimientos previamente adquiridos colaboran en gran manera con el propósito de resolver o solucionar los problemas planteados. En éste capítulo se revisarán bases teóricas y empleo de herramientas computacionales que pueden ser implementadas con diversos objetivos.

2.1 Herramientas teóricas.

Se analizarán brevemente ciertos conceptos que serán de utilidad para el desarrollo del presente trabajo.

2.1.1 Velocidad.

La conceptualización general del término velocidad apunta a la razón entre la distancia recorrida en un período de tiempo. De éste término se deriva en varios tipos de velocidad, de entre los cuales se enfatiza los siguientes:

- ✓ la velocidad instantánea es aquella velocidad dada en un momento específico, y
- ✓ la velocidad crucero es aquella velocidad que se mantiene constante y uniforme, afectada en lo mínimo por agentes externos.

[3]

2.1.2 Control continuo.

2.1.2.1. Funciones de prueba más utilizadas.

Entre las funciones en el dominio del tiempo existentes, las funciones impulso y escalón, así como la función rampa y senoidal, son las que, debido a sus características propias, colaboran en el campo de la Ingeniería de Control y el Procesamiento de Señales para el análisis de respuesta transitoria, punto de partida para el modelamiento de sistemas. [7]

2.1.2.2 Función de transferencia.

La función de transferencia es aquella que relaciona de manera general la señal de salida con la señal de entrada de un sistema, permitiendo observar el comportamiento del sistema. Dicha relación es un cociente de polinomios, normalmente utilizados en el plano complejo, donde cabe enfatizar la dependencia de la estabilidad del sistema a partir del grado de los polinomios (grado del numerador menor que el grado del denominador).

Los factores del numerador se llaman ceros, y contribuyen con la ganancia del sistema, pero no con la dinamicidad. Los factores del denominador se llaman polos, y contribuyen fundamentalmente en la dinámica del sistema, deduciendo de ellos lo siguiente:

- ✓ contribuyen con un término exponencial,
- ✓ marcan la forma y dinamicidad del sistema (cambio rápido o lento),
- ✓ no pueden ser positivos (indicarían inestabilidad en el sistema),
- ✓ si está muy lejos del origen el sistema tendrá una respuesta muy rápida (sistema sin dinamicidad).

2.1.2.3 Sistemas de primer orden.

Los sistemas de primer orden [8] son la forma más básica de representación del comportamiento de un sistema gracias a sus valores característicos. La Figura 2.1 muestra el comportamiento de un sistema de primer orden y la Tabla 2 resume sus valores característicos.

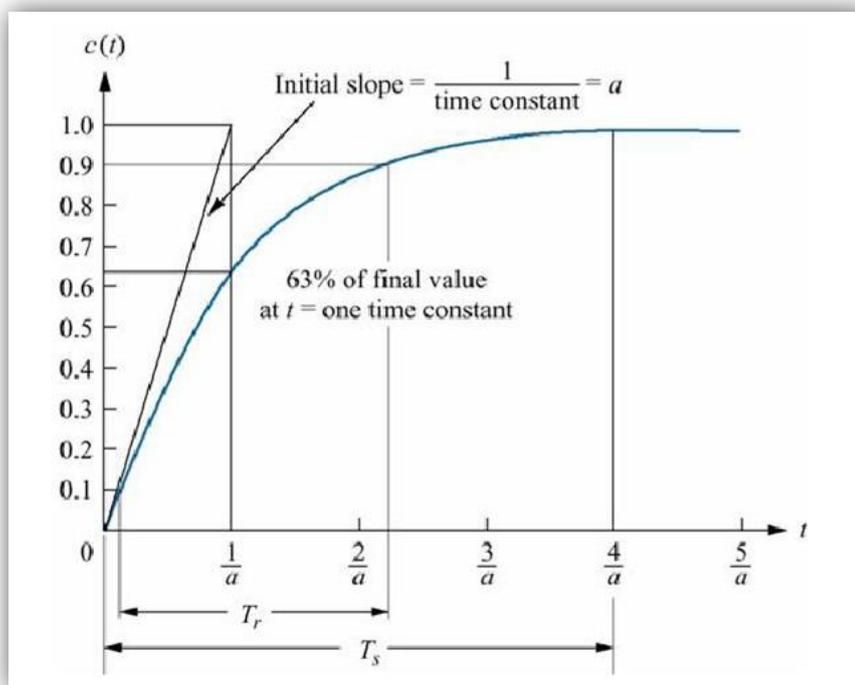


Figura 2.1 Respuesta a señal escalón y valores característicos de un sistema de primer orden. [9]

Valores Característicos de los Sistemas de Primer Orden			
Valor Característico	Símbolo	Definición	Fórmula
constante de tiempo	τ	tiempo que toma la salida en alcanzar el 63% de su valor final	$\tau = \frac{1}{a}$
tiempo de levantamiento	T_r	tiempo que toma la salida en llegar del 10% al 90% de su valor final	$T_r = \frac{2.2}{a} = 2.2 \tau$
tiempo de estabilización	T_s	Tiempo que toma la salida en alcanzar el 98% de su valor final. Se estima también como 4 veces la constante de tiempo τ	$T_s = \frac{4}{a} = 4 \tau$

Tabla 2 Cuadro conceptual de los valores característicos de un sistema de primer orden.

2.1.2.4 Sistemas de segundo orden.

Los sistemas de segundo orden [10], se representan con una función de transferencia de la forma:

$$G(s) = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.1)$$

En donde ω_n es la frecuencia natural de oscilación del sistema sin amortiguamiento y ζ es el factor de amortiguamiento relativo. Debido que el denominador es de tipo cuadrático, estos sistemas generan varios tipos de respuesta, como se indican en la Tabla 3:

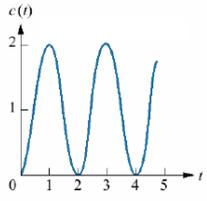
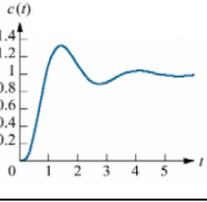
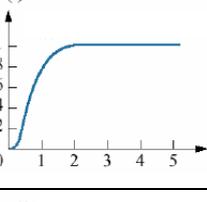
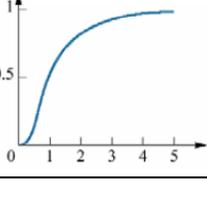
Tipos de Respuesta de Sistemas de Segundo Orden		
Tipo de Respuesta	Distribución de Polos	Respuesta a un Escalón
no amortiguada	dos polos imaginarios en $\pm j\omega_d$	
sub-amortiguada	dos polos complejos en $-\sigma_d \pm j\omega_d$	
críticamente amortiguada	dos polos reales en $-\sigma_d$	
Sobre-amortiguada	dos polos reales en $-\sigma_1$ y $-\sigma_2$	

Tabla 3 Cuadro conceptual sobre los tipos de respuesta de un sistema de segundo orden. [11]

En la Figura 2.2 se muestra gráficamente los valores característicos, o especificaciones de funcionamiento, así como en la Tabla 4 se detalla cada una de ellas.

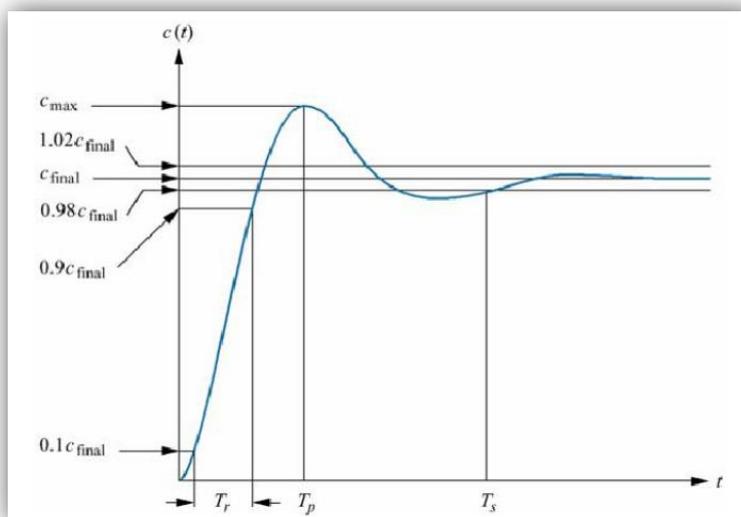


Figura 2.2 Valores característicos de un sistema de segundo orden sub-amortiguado. [12]

Valores Característicos de los Sistemas de Segundo Orden			
Valor Característico	Símbolo	Definición	Fórmula
tiempo pico	T_p	tiempo de pico al tiempo que toma la salida en llegar al primer pico o máximo	$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$

sobrenivel porcentual	$\%OS$	porcentaje del valor final en que la forma de onda sobrepasa el valor en estado estable o final en el momento del tiempo pico	$\%OS = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cdot 100\%$ <p>De donde se deduce que:</p> $\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right)}}$
tiempo de estabilización	T_s	tiempo necesario para que las oscilaciones amortiguadas de la respuesta transitoria alcancen y permanezcan alrededor de $\pm 2\%$ del valor en estado estable	$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n}$
tiempo de levantamiento	T_r	tiempo que toma la salida en llegar desde el 10% al 90% de su valor final	No hay manera analítica de hallarlo, por lo que lo hace mediante aproximaciones por computador

Tabla 4 Cuadro conceptual de los valores característicos de un sistema de segundo orden.

2.1.3 Control discreto

El control discreto mediante el uso de un computador necesitará que se consideren fenómenos tales como el muestreo, las leyes de control discreto, el retenedor y la superposición (aliasing).

La transformada Z ayuda a la solución de las ecuaciones en diferencias de manera algebraica, así como la transformada de Laplace ayuda a la solución de las ecuaciones diferenciales de manera algebraica, ambas lineales e invariantes en el tiempo; mientras que la transformada Z inversa da como resultado la correspondiente secuencia $x[n]$, pero no da una única $x(t)$.

2.1.4 Nociones previas a los métodos de identificación.

2.1.4.1 Selección del período de muestreo.

La selección del período de muestreo tiene sus bases en el Teorema de Nyquist-Shannon, el cual indica que “para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la frecuencia máxima a muestrear”. [13] La siguiente desigualdad permite encontrar el período de muestreo:

$$T \leq \left(\frac{\pi}{\alpha}\right) \tau_{dom} \quad (2.2)$$

Donde T es el período de muestreo, α es un entero múltiplo del ancho de banda, y τ_{dom} es la constante de tiempo dominante del sistema.

2.1.4.2 Señales estacionarias.

Las señales estacionarias son aquellas en donde la serie de tiempo que le representa se encuentra en “equilibrio estadístico”, es decir, no contienen ni tendencias ni desvíos. Además, los procesos estocásticos o aleatorios se denominan “estrictamente estacionarios”, si sus propiedades no se ven afectadas por el cambio en el tiempo. La media y la varianza son el primer y segundo momento univariable de un proceso aleatorio.

2.1.5 Identificación de Sistemas.

Es un proceso experimental que permite modelar matemáticamente un sistema con la finalidad de reproducir lo más exacto posible las características dinámicas de un sistema. Éste proceso comprende los siguientes pasos:

- ✓ obtención de datos: se excita durante un intervalo de tiempo al sistema con una señal de entrada adecuada y amigable para

registrar su señal de salida, registrando su comportamiento, es decir sus datos. Estos datos deben ser previamente tratados con el fin de analizar ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones en la señal que puedan provocar identificaciones incorrectas, debiendo ser manipulados estadísticamente para mejorar y facilitar el proceso de identificación,

- ✓ elección de la estructura del modelo: se debe tener buen criterio para la correcta elección de la estructura a utilizar, decisiva para obtener los resultados deseados, teniendo presente las leyes que rigen en el sistema,
- ✓ cálculo del modelo: se calculan los parámetros mediante estimaciones en base a los datos ingresados y el modelo elegido,
- ✓ validación del modelo: se aprueba o rechaza el modelo escogido. En caso de rechazo, se analiza si la entrada escogida proporcionó las características suficientes necesarias para generar el modelo, caso contrario se debe escoger una nueva entrada.

2.1.5.1 Identificación No Paramétrica.

La identificación no paramétrica permite obtener, mediante análisis estadístico, modelos aproximados a partir de un conjunto determinado de datos, obteniendo una serie de parámetros mediante varios análisis, tal como se indican en la Tabla 4 y 5. En

la Tabla 6 se analizan ciertos estimadores relacionados con los procesos de identificación. Se recomienda un pre-blanqueamiento de la señal de entrada auto-correlacionada para convertirla en una señal de entrada de ruido blanco, logrando que la correlación cruzada entre entrada y salida sea directamente proporcional a la función de respuesta al impulso.

La identificación no paramétrica es una estimación libre de estructura, ayudando a:

- ✓ confirmar o negar la presencia de una relación de función de transferencia entre variables,
- ✓ predecir relaciones de realimentación en los datos,
- ✓ fijar retardos y órdenes de modelo en identificación paramétrica (mediante la ayuda de las respuestas al impulso y escalón obtenidas del análisis de correlación).

Todo esto se puede lograr, considerando que:

- ✓ las señales tanto de entrada como de salida deben ser estacionarias (si la señal es no estacionaria, una solución es usar datos diferenciados),

- ✓ las señales tanto de entrada como de ruido externo deben ser independientes,
- ✓ los coeficientes de la respuesta al impulso pasados “n” tiempos de muestreo sean cero.

Las principales ventajas de éste método son:

- ✓ no requiere procesamiento complejo de los datos,
- ✓ no es necesario tener conocimiento previo sobre la planta, excepto que ésta sea lineal,
- ✓ permite concentrar los datos obtenidos en torno al margen de frecuencias de interés.

La desventaja de éste método es que el modelo resultante no puede ser usado directamente para simulación.

Al trabajar con un conjunto finito de datos, estos pueden ser corrompidos por un ruido significativo, resultando en una varianza significativa en las estimaciones crudas del espectro (auto y cruzado).

Estimación no paramétrica vía análisis de correlación (CRA)	
Estima coeficientes FIR entre entrada provista y salida deseada.	
Análisis	Descripción
Respuesta Transitoria	Obtiene la respuesta del sistema mediante la excitación del sistema a una señal impulso o escalón. Provee una visión rápida del sistema en lo que respecta a la relación causa-efecto entre las señales de salida y entrada, retardos, constantes de tiempos y ganancias estáticas del sistema.
Correlación	Se enfoca a la estimación de los coeficientes de respuesta al impulso de un sistema, aplicándole una entrada candidata y obteniendo una salida deseada. Para esta estimación se asume estacionariedad entre la entrada y salida, e independencia entre entrada y ruido.

Tabla 5 Estimación no paramétrica vía análisis de correlación.

Estimación no paramétrica vía análisis espectral (SPA)	
Análisis	Descripción
Espectral	El suavizado, realizado mediante una ventana de retardo M (comúnmente usada la de Tukey-Hamming, empleando un parámetro de truncamiento de ventana), genera en la estimación una reducción de la variabilidad al costo de un incremento en los desvíos. En otras palabras: aumentos en M disminuyen el desvío en la estimación (más notoriedad en los detalles de la respuesta de frecuencia) pero ocasionan aumentos en la variación asociada a la muestra (generación de picos esporádicos y aleatorios).

Tabla 6 Estimación no paramétrica vía análisis espectral.

Bases estadísticas aplicadas a la identificación de sistemas	
Medidores	Descripción
auto-covarianza	Mide el grado de variabilidad de una señal consigo misma. Se la define también como la croskovarianza de la señal consigo misma.
auto-correlación	Mide el grado de periodicidad (patrones repetitivos) de una señal. Se la define también como la croscorelación de la señal consigo misma.
covarianza cruzada	Mide el grado de dependencia de dos señales.
correlación cruzada	Mide el grado de similitud entre dos señales independientes, así como de cuál es su dirección.

Tabla 7 Estimadores estadísticos relacionados a los procesos de identificación.

2.1.5.2 Diseño de señal de entrada.

Se debe guardar estricta cautela al elegir la señal de entrada, porque los datos obtenidos deben proporcionar información completa sobre el sistema, debiéndose escoger una señal “amigable”, la cual debe cumplir ciertos requisitos, tales como:

- ✓ ser tan corta como sea posible, para no afectar los costos de producción de una planta real, pero al mismo tiempo lo

suficientemente larga, para poder tomar los valores característicos de la planta,

- ✓ ser lo más potente posible, logrando contener el mayor número de frecuencias posibles (señales con cambios bruscos como las escalonadas son útiles por contener un espectro suficientemente amplio de la señal, mas no las de tipo senoidal),
- ✓ causar la mínima interrupción a las variables controladas (pequeñas desviaciones en su salida y baja varianza),
- ✓ no llevar los actuadores al límite o exceder las restricciones del movimiento,
- ✓ la entrada no debe ser correlacionada con la perturbación de la señal.

En la Tabla 8 se resumen los tipos de señales amigables que pueden utilizarse para el análisis de sistemas.

Tipos de señal de entrada	
Señal	Descripción
RBS	<p>RBS son las siglas de Random Binary Sequence.</p> <p>Es una señal enteramente estocástica, determinística y no estacionaria, basada en un nivel alto y uno bajo, conmutándose con una probabilidad determinada. Es útil en plantas que necesitan ser sometidas a cambios bruscos para obtener una buena respuesta.</p>
PRBS	<p>PRBS son las siglas de Pseudo Random Binary Sequence.</p> <p>Es una señal determinística y periódica, basada en un nivel alto y uno bajo, la cual trabaja mediante lógica booleana y registros de desplazamiento para generar la señal. Al igual que las RBS, es beneficiosa para el mismo tipo de plantas que las RBS. Su auto-covarianza es periódica, asemejándose al ruido blanco, al igual que su auto-correlación y su correlación cruzada.</p>
MSS	<p>MSS son las siglas de Multi Sine Sequence.</p> <p>Es una señal formada por una serie de señales sinusoidales, pero al igual que la PRBS, es una señal determinística y periódica. Es útil para analizar plantas en la que la suavidad de esta señal ayuda a obtener una buena respuesta, no así con los cambios bruscos de las otras dos.</p>

Tabla 8 Tipos de señal de entrada.

2.1.5.3 Fuentes de error en la identificación.

En estos modelos siempre se generará errores producidos por la sumatoria de los desvíos (bias) y las varianzas (variance). El desvío es un error sistemático causado por las características de la señal de entrada, el modelo de la estructura y su modo de

operación (lazo abierto o lazo cerrado). La varianza es un error aleatorio producto de:

- ✓ el ruido en los datos que no permite reproducir la salida real de la planta,
- ✓ el número de parámetros del modelo,
- ✓ la duración de la prueba, y
- ✓ el grado de ruido en las señales.

Se puede reducir el error en la varianza simplificando el número de parámetros del modelo a estimar, aumentando la longitud del grupo de datos o incrementando la potencia de la señal de entrada.

2.1.5.4 Identificación Paramétrica.

La identificación paramétrica es un conjunto de métodos que emplean técnicas de regresión lineal o no lineal para encontrar el modelo adecuado, dificultándose en la elección del mismo debido al orden y número de parámetros, por lo que se deben ajustar a los obtenidos por entrada-salida obtenidos vía experimental. Estos modelos suelen ser descritos en el dominio discreto, debido que los datos son obtenidos por muestreo, pero se pueden convertir a dominio continuo en caso sea necesario. Se procederá a analizar

los métodos de predicción de error cuyas estructuras son usualmente utilizadas en el desarrollo de identificación de sistemas de control. La forma general de la estructura del modelo de predicción de error viene dada por la expresión:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t) \quad (2.3)$$

Término	Corresponde a
$A(z)$	polinomio auto-regresivo
$B(z)$	polinomio de entrada externa u
$C(z)$	polinomio media móvil
$D(z)$	polinomio auto-regresivo exclusivo de la señal de error
$F(z)$	polinomio trabajado en tiempo discreto
$u(t - nk)$	valor de la señal de entrada de la planta cada "n" períodos anteriores
$y(t)$	señal de salida de la planta
$e(t)$	señal de ruido presente en la planta
nk	tiempo muerto del sistema, representado como múltiples instantes de muestreo

Tabla 9 Términos que componen la estructura del modelo de predicción de error.

Distribuyendo el polinomio auto-regresivo $A(z)$ de la forma general hacia las señales de entrada y ruido, se observa la dependencia en ambas señales debido a dicho polinomio, como se observa en la Figura 2.3.

$$y(t) = \frac{B(z)}{A(z)F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{A(z)D(z)}e(t) \quad (2.4)$$

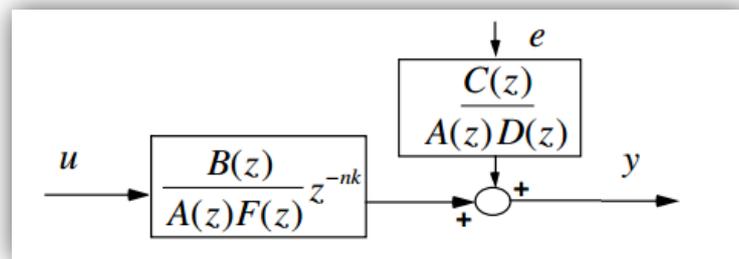


Figura 2.3 Diagrama de bloque de la estructura del modelo de predicción de error.

Debido a los 5 polinomios arriba mencionados, por combinación se puede obtener hasta 32 estructuras distintas, sin embargo, las más comunes y empleadas en los procesos de identificación y control son las que se indican en la Tabla 10 a continuación.

Estructura	Planta	Error
ARX	$\frac{B(z)}{A(z)}; F(z) = 1$	$\frac{1}{A(z)}; C(z) = D(z) = 1$
ARMAX	$\frac{B(z)}{A(z)}; F(z) = 1$	$\frac{C(z)}{A(z)}; D(z) = 1$
FIR	$B(z); A(z) = F(z) = 1$	$A(z) = C(z) = D(z) = 1$
Box-Jenkins	$\frac{B(z)}{F(z)}; A(z) = 1$	$\frac{C(z)}{D(z)}; A(z) = 1$
Output Error	$\frac{B(z)}{F(z)}; A(z) = 1$	$A(z) = C(z) = D(z) = 1$

Tabla 10 Diagrama de bloque de la estructura de los modelos de predicción de error.

2.1.5.4.1 Estructura ARX.

La estructura ARX (**A**uto **R**egressive with **eX**ternal input, o en español estructura auto-regresiva con entrada externa) viene dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{A(z)}u(t - nk) + \frac{1}{A(z)}e(t) \quad (2.5)$$

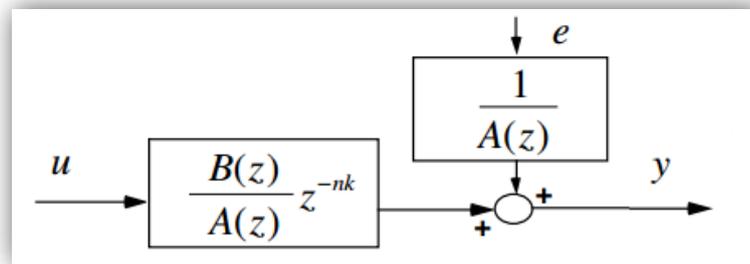


Figura 2.4 Diagrama de bloque de la estructura ARX.

La estimación se convierte en un problema de regresión lineal, en donde determinando correctamente el orden de los polinomios $A(z)$ y $B(z)$ mediante sobre parametrización (uso de orden alto), lo conlleva a una buena aproximación, sin embargo lo vuelve complicado para el diseño de control debido a la varianza en presencia de ruido significativo debido al polinomio auto regresivo ($A(z)$). Estimaciones ARX de bajo orden son problemáticas en la presencia de ruido significativo y cuando se selecciona una estructura de modelo incorrecta. Éste modelo es una buena primera opción para muchas aplicaciones, debido que su porción de error es afectada por el polinomio auto regresivo $A(z)$.

2.1.5.4.2. Estructura ARMAX.

La estructura ARMAX (Auto Regressive with Moving Average and eXternal input, o en español auto regresivo con media móvil y entrada externa) viene dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{A(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{A(z)}e(t) \quad (2.6)$$

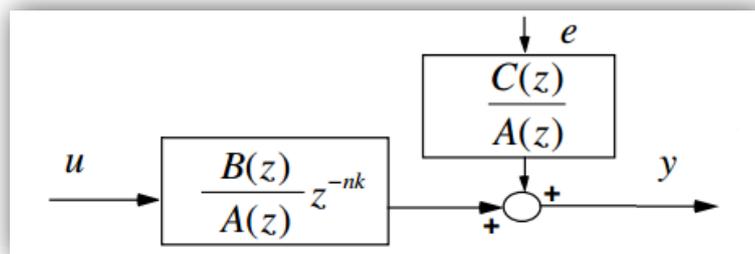


Figura 2.5 Diagrama de bloque de la estructura ARMAX.

La estimación se convierte en un problema de regresión no lineal, en donde usualmente el orden de los polinomios $A(z)$, $B(z)$ y $C(z)$ se escogen bajos. La presencia del polinomio auto regresivo $A(z)$ 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 $C(z)$ contrarrestará algunas veces esos

efectos negativos. Tiene altos índices de aplicación en controles adaptativos.

2.1.5.4.3. Estructura FIR.

La estructura FIR (**F**inite **I**mpulse **R**esponse, o en español respuesta al impulso finito) viene dada por:

$$y(t) = B(z)u(t - nk) + e(t) \quad (2.7)$$

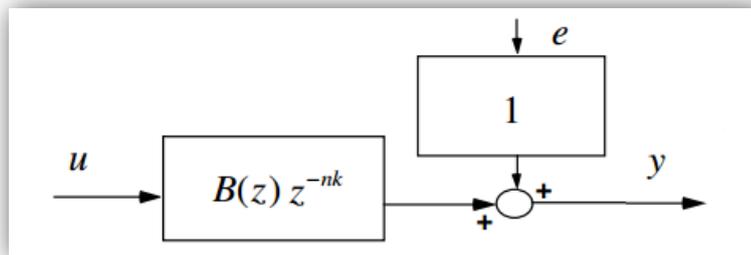


Figura 2.6 Diagrama de bloque de la estructura FIR.

La estimación se convierte en un problema de regresión lineal, en donde el orden correcto del polinomio $B(z)$ depende del tiempo de muestreo seleccionado y del tiempo de estabilización del proceso, cuyo resultado es usualmente alto (30 coeficientes o más),

además de no estimar un modelo para el ruido auto correlacionado.

2.1.5.4.4. Estructura BOX-JENKINS.

La estructura Box-Jenkins viene dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t) \quad (2.8)$$

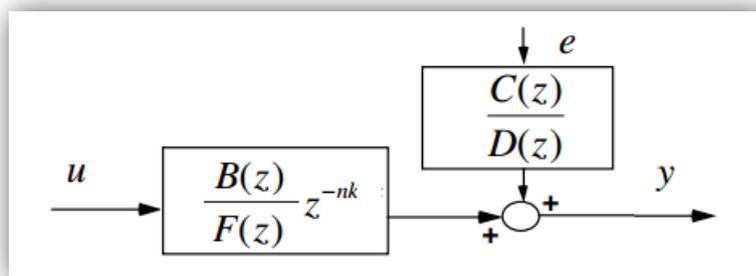


Figura 2.7 Diagrama de bloque de la estructura Box-Jenkins.

La estimación se convierte en un problema de regresión no lineal, en donde el orden correcto de los polinomios $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ y $F(z)$ se escogen bajos. Su ventaja sobre ARMAX radica en su independencia de parámetros entre la planta y el ruido, conllevando a evitar polos comunes entre ellos, mientras que su

desventaja es su alta cantidad de iteraciones y toma de decisiones que se debe realizar.

2.1.5.4.5. Estructura Error de Salida (OUTPUT ERROR).

La estructura de Error de Salida viene dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + e(t) \quad (2.9)$$

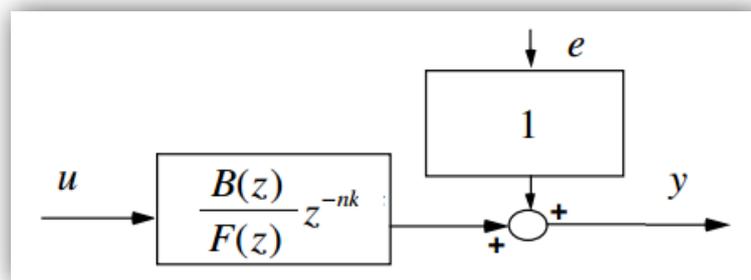


Figura 2.8 Diagrama de bloque de la estructura Error de Salida.

La estimación se convierte en un problema de regresión no lineal, en donde el orden correcto de los polinomios $B(z)$ y $F(z)$ se escogen bajos. Es una estructura Box-Jenkins simplificada en el error. Su parametrización es completamente independiente a la entrada y al ruido, sin embargo no se obtiene un modelo de ruido

auto-correlacionado. Tiene un buen funcionamiento cuando trabaja en conjunto con un pre-filtrado relevante al control.

2.1.6 Controlador.

El controlador es un dispositivo que permite mantener la estabilidad del sistema frente a cambios en su entrada y posibles perturbaciones: éste recibe los datos, lo compara con la salida deseada definida y en caso sea necesario procede a tomar una acción correctiva.

Se representa como una función de transferencia que afecta a la función de transferencia de la planta para tomar los correctivos deseados: dicha función de transferencia consta de una ganancia, dos ceros en el eje real y un polo en el origen. A continuación se muestra la función de transferencia del controlador:

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.10)$$

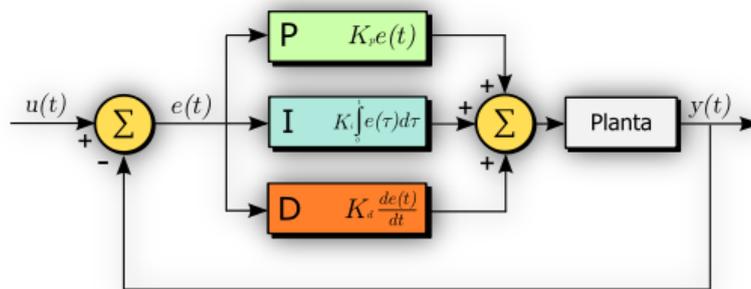


Figura 2.9 Diagrama de bloques de un controlador PID. [14]

Existen varios métodos para el diseño y afinamiento de controladores, entre los que se mencionan los siguientes:

- ✓ método del lugar de las raíces,
- ✓ método de la respuesta en frecuencia (diagrama de Bode),
- ✓ método según el criterio de Nyquist,
- ✓ método según el criterio de Nichols,
- ✓ método de ensayo-error.

El diseño del controlador debe cumplir los siguientes pasos:

- ✓ definir metas de control,
- ✓ determinar la estructura y tipo de controlador,
- ✓ determinar los parámetros del controlador para cumplir las metas.

Para determinar puntualmente qué debe ser mejorado en base a la respuesta de lazo abierto de la planta, se agrega un determinado tipo de controlador, lo cual se indica a continuación:

- ✓ mejorar el tiempo de levantamiento con un controlador proporcional,
- ✓ mejorar el sobrenivel porcentual con un controlador derivativo,
- ✓ mejorar el tiempo de estabilización y eliminar el error de estado estable con un controlador integrativo,
- ✓ obtener la respuesta final deseada: se ajustan cada uno de los controladores anteriores.

Respuesta en lazo cerrado	proporcional	integral	derivativo
tiempo de levantamiento	disminuye	disminuye	poco cambio
sobrenivel porcentual	aumenta	aumenta	disminuye
tiempo de estabilización	poco cambio	aumenta	disminuye
error en estado estable	disminuye	elimina	poco cambio

Tabla 11 Afectación de los tipos de controlador a la respuesta en lazo cerrado.

En la Tabla 11 se observa un cuadro descriptivo de la afectación de cada tipo de controlador a la respuesta en lazo cerrado del sistema.

El afinamiento del controlador mediante el método gráfico del lugar de las raíces en el Sisotool de Matlab, se logra modificando la ganancia y agregando polo en el origen y ceros reales, desplazándolos sobre el eje hasta lograr las metas planteadas por medio de la intersección de la trayectoria de las raíces con las rectas que definen las metas planteadas.

Se enfatiza el hecho de que al agregar un polo a una función de transferencia en lazo abierto la trayectoria del lugar geométrico de las raíces es llevado hacia la derecha, disminuyendo la estabilidad del sistema, mientras que al agregarle un cero esta trayectoria es llevada hacia la izquierda, aumentando la estabilidad del sistema

2.2 Herramientas tecnológicas.

Se analizarán brevemente la finalidad de ciertas herramientas que ayudarán al desarrollo del presente trabajo.

2.2.1 Matlab.

Software matemático que permite al usuario el cálculo numérico, la visualización y la programación, el análisis de datos, el desarrollo de algoritmos, la creación de modelos o aplicaciones y sus respectivas pruebas y simulaciones, entre otros. Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo.

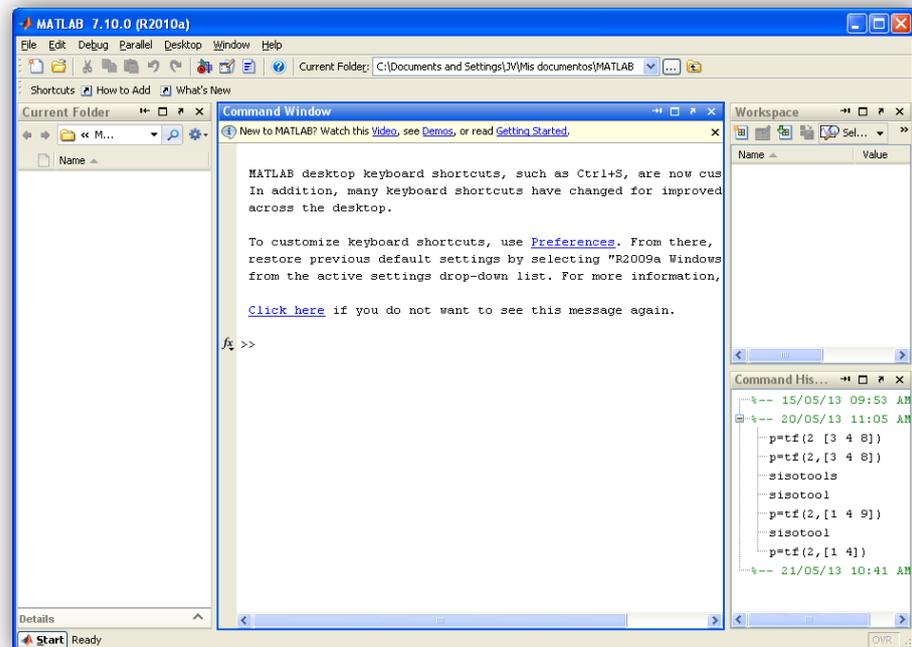


Figura 2.10 Ventana principal de trabajo de Matlab (R2010a).

2.2.2 Simulink.

Herramienta propietaria de Matlab, con entorno de programación visual, que permite al usuario la simulación de modelos o sistemas,

con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos.

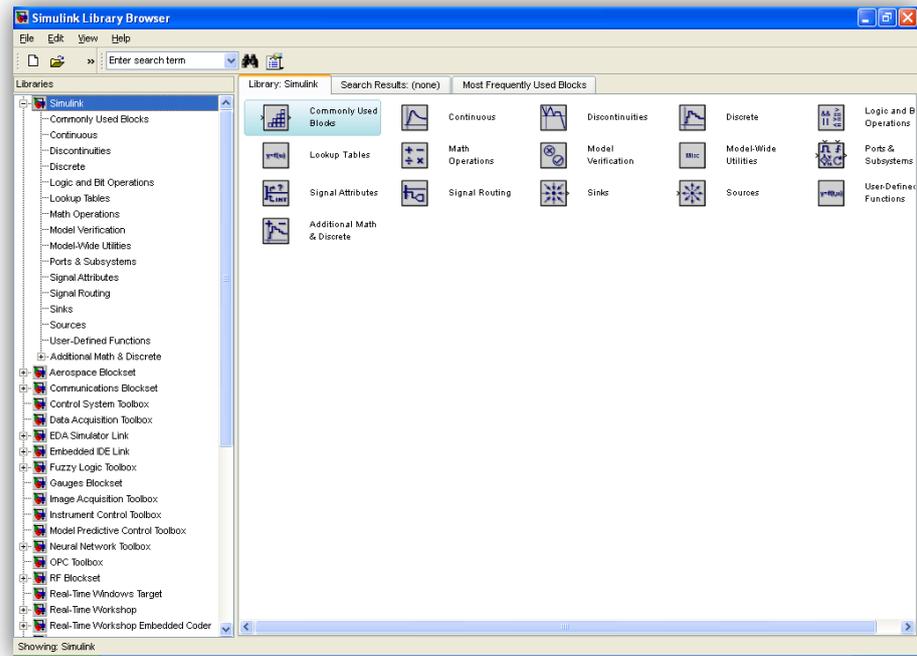


Figura 2.11 Ventana principal del Simulink (navegación de librerías).

2.2.3 System Identification Tool (Ident).

Herramienta propietaria de Matlab, que permite al usuario la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de la medición de datos de entrada-salida, los cuales mediante sus principios o especificaciones no pueden ser fácilmente modelados.

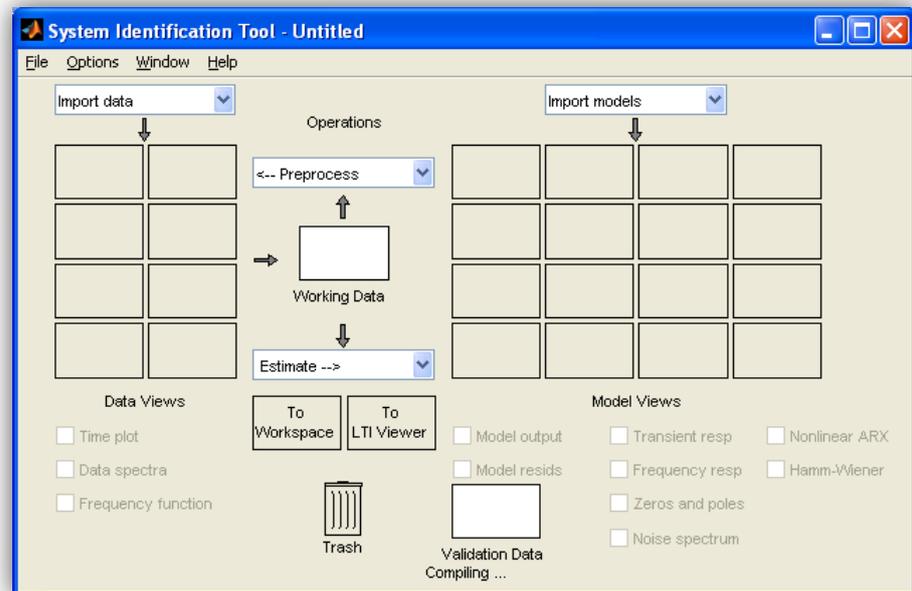


Figura 2.12 Ventana principal del Ident.

2.2.4 Input Design GUI.

Herramienta no propietaria de Matlab, diseñada por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun en el año 2002, con la colaboración de los profesores H. Anthony Barker (Universidad de Wales) y Patrick Guillaume (Vrije Universiteit Brussel), la cual permite al usuario el diseño de señales de entrada para la aplicación en los procesos de identificación de sistemas.

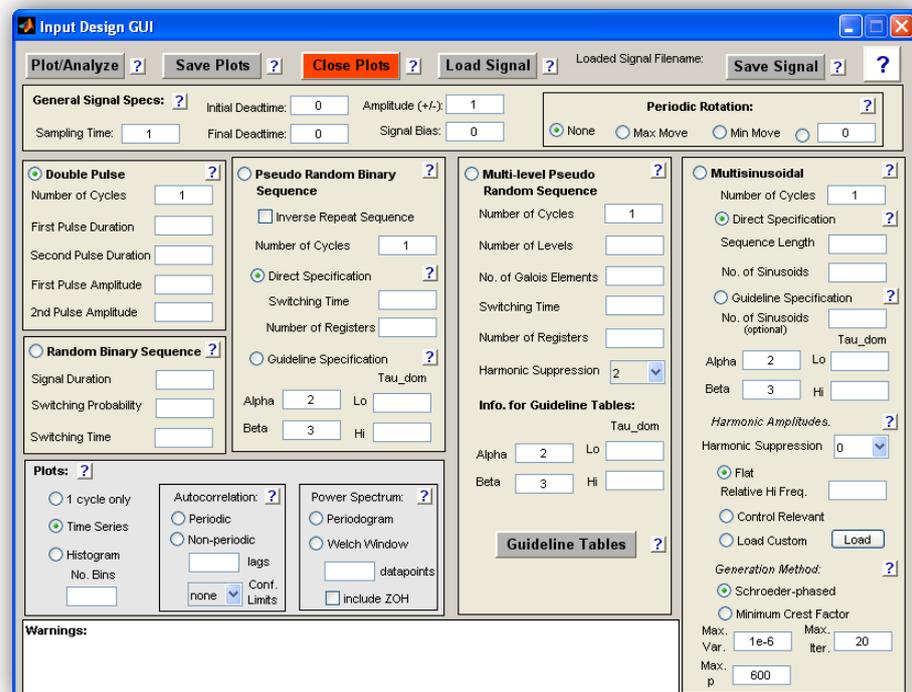


Figura 2.13 Ventana principal del Input Design GUI.

2.2.5 Sisotool.

Herramienta propietaria de Matlab, que permite el diseño de controladores de manera interactiva o automática para lazos de realimentación de una entrada y una salida (o SISO, de sus siglas en inglés **Single In / Single Out**).

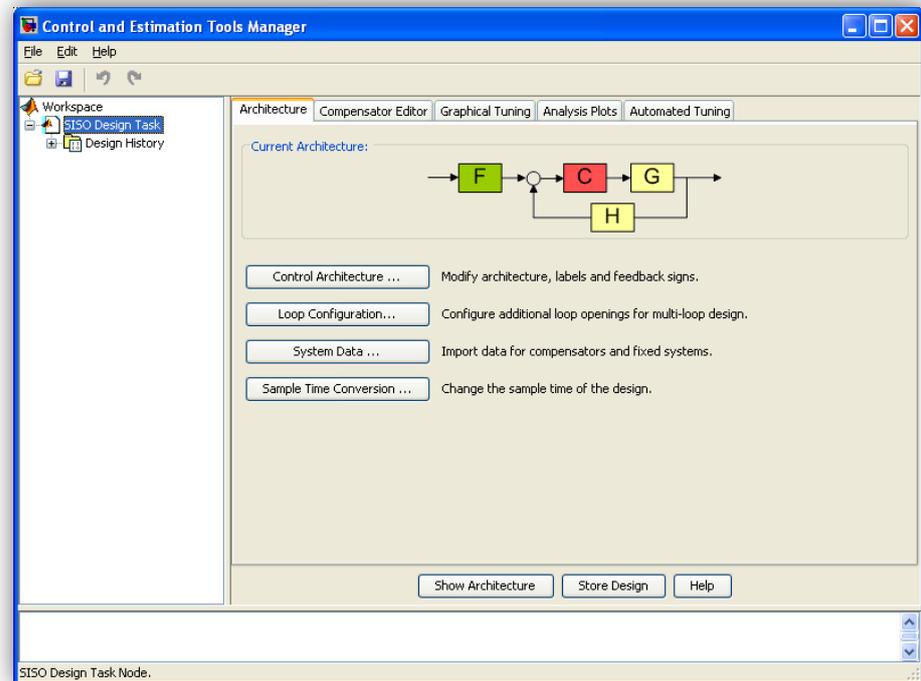


Figura 2.14 Ventana principal del Sisotool.

2.2.6 Computadora.

Un computador es una herramienta esencial hoy en día para cualquier tipo de trabajo, más aún si éste es de carácter técnico, investigativo y de desarrollo. Se tomará como referencia un computador portátil HP Pavilion dm4-3055dx Entertainment PC, con procesador Intel Core i5-2430M de 2.40 GHz (con Turbo Boost Technology alcanzando hasta 3.00 GHz), 8 Gb de memoria RAM y disco duro SATA II de 640 Gb de 5400 rpm y sistema operativo Windows 7 Home Premium de 64 bits.

2.2.7 Equipo de adquisición de datos.

Existen en el mercado variedad de productos para la adquisición de datos. Se tomará como referencia, debido a su disponibilidad y facilidad de empleo, un dispositivo de la empresa norteamericana National Instruments, que se encuentra dentro del grupo de equipos de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés Data Acquisition), modelo NI USB-6009, el cual ofrece la funcionalidad de adquisición de datos básica para aplicaciones como registro de datos simple, mediciones para experimentos académicos de laboratorio, así como para aplicaciones de mediciones más sofisticadas. Sus características principales son las siguientes:

- ✓ interface para conexión a PC vía USB,
- ✓ compatible con sistemas operativos Windows, Linux , Mac OS y Pocket PC,
- ✓ entradas análogas: 4 u 8 (8 de una sola terminal o 4 de canales diferenciales), de 14 bits de resolución, velocidad de muestreo de 48000 muestras/segundo, opera entre +/-10V y memoria interna de 512 bytes,
- ✓ salidas análogas: 2 canales, resolución de 12 bits, opera de 0 a +5V, corriente máxima de salida de 10 mA,

- ✓ entradas/salidas digitales: 12 canales bidireccionales, niveles lógicos TTL, opera entre +/- 5V y corriente máxima de operación de 102 mA,
- ✓ contadores/temporizadores: 1 de tipo TTL de 32 bits de resolución.



Figura 2.15 Dispositivo de adquisición de datos National Instrument SB-6009. [15]

2.3 La planta.

La planta a utilizarse, es una bicicleta eléctrica del tipo recreacional marca Currie Tech, serie Ezip, modelo Trail Z.



Figura 2.16 Planta: Bicicleta eléctrica eZip Trailz. [16]

Las principales características son:

- ✓ motor de escobillas DC de 450W,
- ✓ diseño de cuadro disponible para hombre o mujer, con suspensión delantera, manillar de altura ajustable y sillarín comfortable,
- ✓ alcanza velocidad máxima de 24 kph,
- ✓ distancia máxima a plena carga de batería: 24 - 35 km, dependiendo del peso del ciclista y contingencias del terreno.

A continuación, se muestra el diagrama de conexiones eléctricas de la bicicleta:

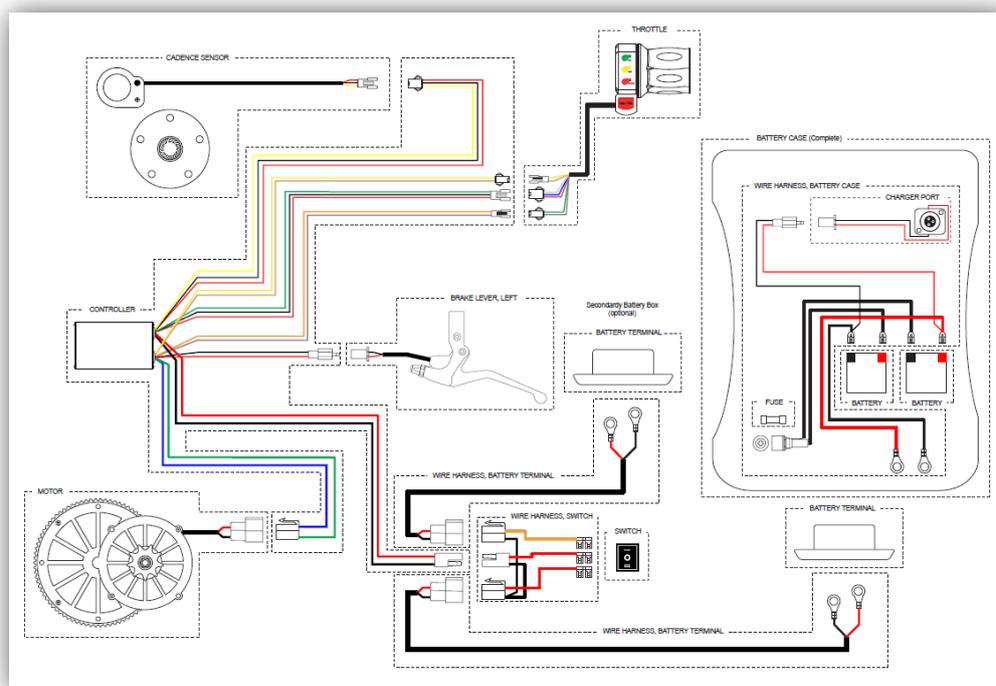


Figura 2.17 Esquemático de conexiones de la bicicleta. [17]

2.3.1 Rodillo.

El rodillo marca Kinetic modelo Road Machine T-002I, es una herramienta de entrenamiento para corredores de ciclismo, el cual les ofrece un soporte para la bicicleta para ejercitar fuera de campo, permitiéndole agregar resistencia al pedaleo mediante un rodillo de

fricción, el cual es controlado por una perilla de ajuste. Posee un disipador de calor para eliminar el calor generado debido a la fricción generada por su funcionamiento.



Figura 2.18 Rodillo Kinetic by Kurt. [18]

2.3.2 Velocímetro y sensor de velocidad.

El velocímetro marca Sigma modelo BC509, denominado también computadora de bicicleta, es un accesorio para la bicicleta de fácil instalación, el cual permite realizar mediciones de velocidad, tiempo y distancia recorrida, en base a un imán apropiado el cual es ubicado en uno de los radios de la bicicleta, en donde su flujo magnético será percibido por un sensor magnético ubicado en la estructura de la bicicleta lo más cercana al radio de la bicicleta donde se instaló el imán. Éste sensor se conecta mediante cables

en una base ubicada en el manubrio de la bicicleta, en donde es montado el velocímetro como tal, el cual posee un display LCD y nos permitirá visualizar los datos de velocidad y distancia, así como también nos provee de una funcionalidad de reloj.



Figura 2.19 Velocímetro Sigma 509. [19]

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.

3.1 Análisis de la Planta.

3.1.1 Elementos físicos de la planta.

Uno de los requerimientos del proyecto era el de trabajar con un vehículo, el cual sería la planta donde se realizaría la identificación, para esto se utilizó una bicicleta eléctrica, como se mencionó en el capítulo anterior.

Se empleó un sensor magnético e imanes que fueron colocados en los radios de la rueda trasera de la bicicleta para capturar pulsos cada vez que un imán pase frente al sensor; además con la finalidad de realizar el experimento sin la necesidad de que el vehículo se desplace, se hizo uso de un banco de pruebas de marca *Kinetic*, utilizado por ciclistas en sus entrenamientos.



Figura 3.1 Vista posterior de la planta.



Figura 3.2 Vista lateral de la planta.

3.1.1.1 Interfaz física entre el computador y la planta.

Se utilizó la tarjeta de adquisición de datos *NI DAQ USB-6009* de National Instruments, que sirvió como interfaz física entre la planta y la computadora portátil, donde se diseñó un ambiente de trabajo haciendo uso del software Matlab.

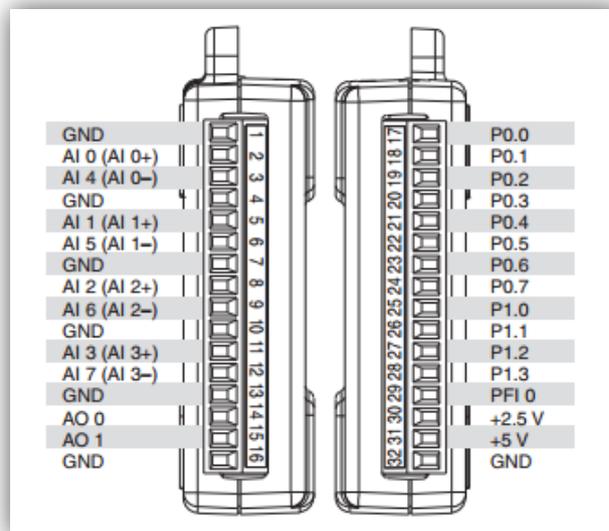


Figura 3.3 Puertos de la tarjeta de adquisición de datos *NI DAQ USB-6009*. [15]

Como se observa en la Figura 3.3, la tarjeta de adquisición utilizada posee entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Se utilizaron las entradas analógicas diferenciales (*AI 0+*, *AI 0-*; *AI 1+*, *AI 1-*; *AI 2+*, *AI 2-*; *AI 3+* *AI 3-*), ya que bajo ésta modalidad de captura se puede obtener una diferencia de voltaje, que era lo que se buscaba, como se lo muestra más adelante.

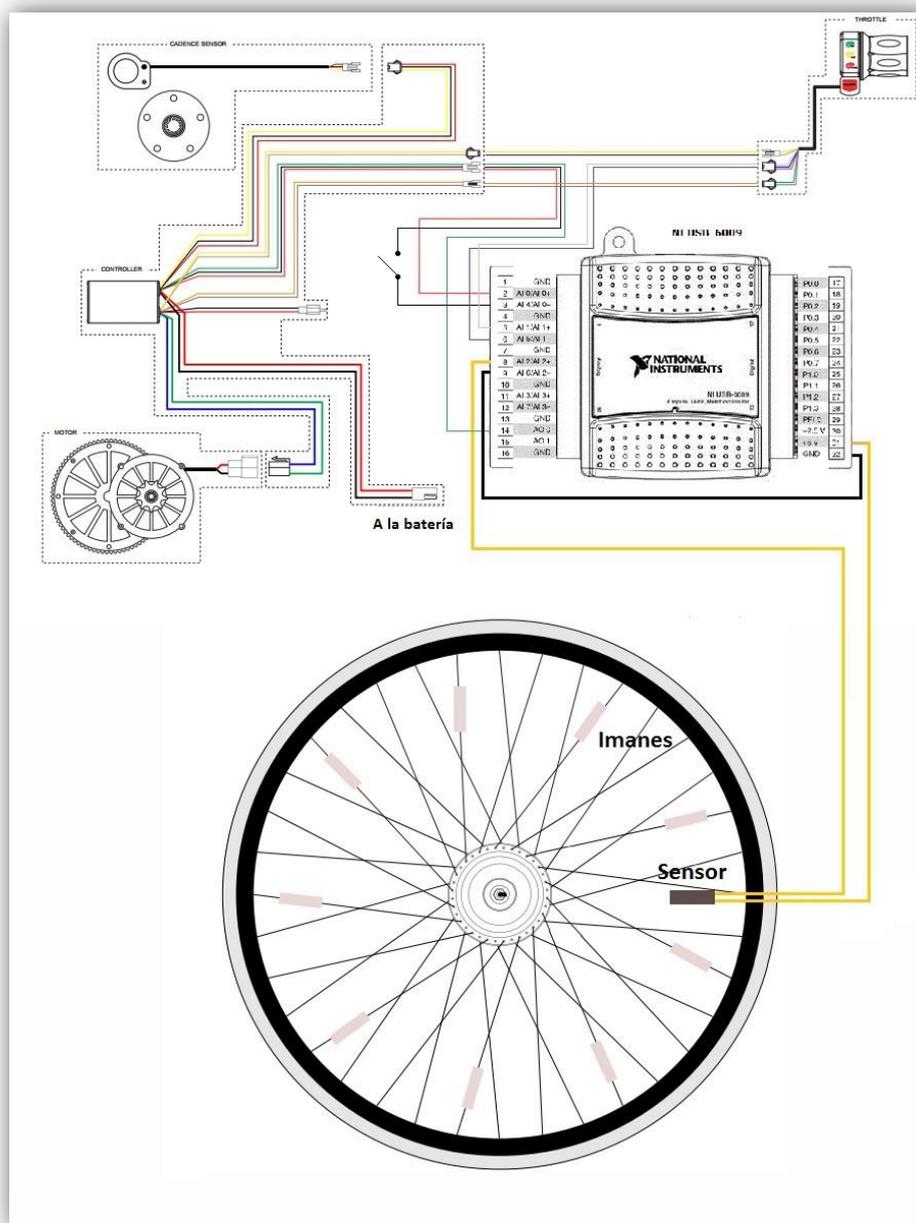
También se hizo uso de la salida analógica *AO 0*, para ingresar señales de voltaje a la planta. A continuación se presenta un detalle de los puertos utilizados y las conexiones realizadas:

- ✓ **Puertos 8, 9, 31 y 32:** Fueron empleados para registrar el comportamiento de la rueda trasera de la bicicleta; se conectó el sensor magnético a los puertos 8 y 31, haciendo las veces de un interruptor que se cierra cada vez que un imán pasa frente al sensor, permitiendo que el voltaje del puerto 31 (+5v), se transmita al puerto 5, mientras que con la finalidad de referenciar a tierra al puerto 9, se lo unió con el puerto 32.

- ✓ **Puertos 2, 3, 5 y 6:** Fueron empleados con la finalidad de capturar la señal de voltaje proveniente del acelerador de la bicicleta y la del voltaje de referencia; para esto se conectó los cables provenientes del acelerador a los puertos 5 y 6, y los cables con el voltaje de referencia a los puertos 2 y 3. Es importante recalcar que ésta conexión fue implementó y utilizada solo al comienzo del experimento, como ayuda para comprender el comportamiento de la planta.

- ✓ **Puerto 14: Salida** analógica utilizada para entregar voltaje al controlador del motor de la bicicleta; se reemplazó el cable que iba originalmente desde el acelerador, transmitiendo el voltaje generado por el mismo, mediante una conexión con el puerto 14.

A continuación se presenta en la Figura 3.4, el diagrama eléctrico de las conexiones realizadas:



3.1.1.2 Limitaciones del experimento.

Es importante mencionar que debido al uso del banco de prueba, se dejó de lado la influencia de la resistencia del aire ante el movimiento de la bicicleta, así como también las variaciones de la fricción entre las ruedas y el terreno, así como, la contribución del pedaleo, entre los más relevantes.

También se podría ver al rango de operación del motor como una de las limitantes, debido que éste trabaja entre los 0.8 y 4.2 voltios, aunque al ingresar un voltaje mayor a 3.8 voltios recae en zona de saturación.

Para minimizar cualquier variación en el comportamiento de la planta, producto de la descarga de la batería de la bicicleta, ésta se mantuvo conectada al cargador durante todo el experimento, y se le dio el tiempo necesario para recargarse después de cada captura de datos.

3.1.2 Bloque Esquemático en Simulink.

Una vez escogida la planta, el siguiente paso fue el desarrollo del bloque esquemático en Simulink, el cual sirvió para realizar las

diferentes pruebas y capturas de datos durante el experimento; el diseño del mismo giró en torno a la necesidad de registrar el comportamiento de las señales de entrada y salida del sistema.

Teniendo claro que el voltaje entregado por el acelerador de la bicicleta, y la velocidad que alcanzare la misma serían las señales de entrada y salida respectivamente, se procedió a armar por partes el esquemático, el cual debería brindar la capacidad de establecer comunicación con la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-6009, para enviar y recibir las señales de entrada y salida hacia y desde la planta, procesar la señal de los pulsos generados por el sensor magnético, y capturar en una matriz los datos que servirán luego para realizar la identificación. A continuación se presenta en la Figura 3.5 el bloque esquemático utilizado:

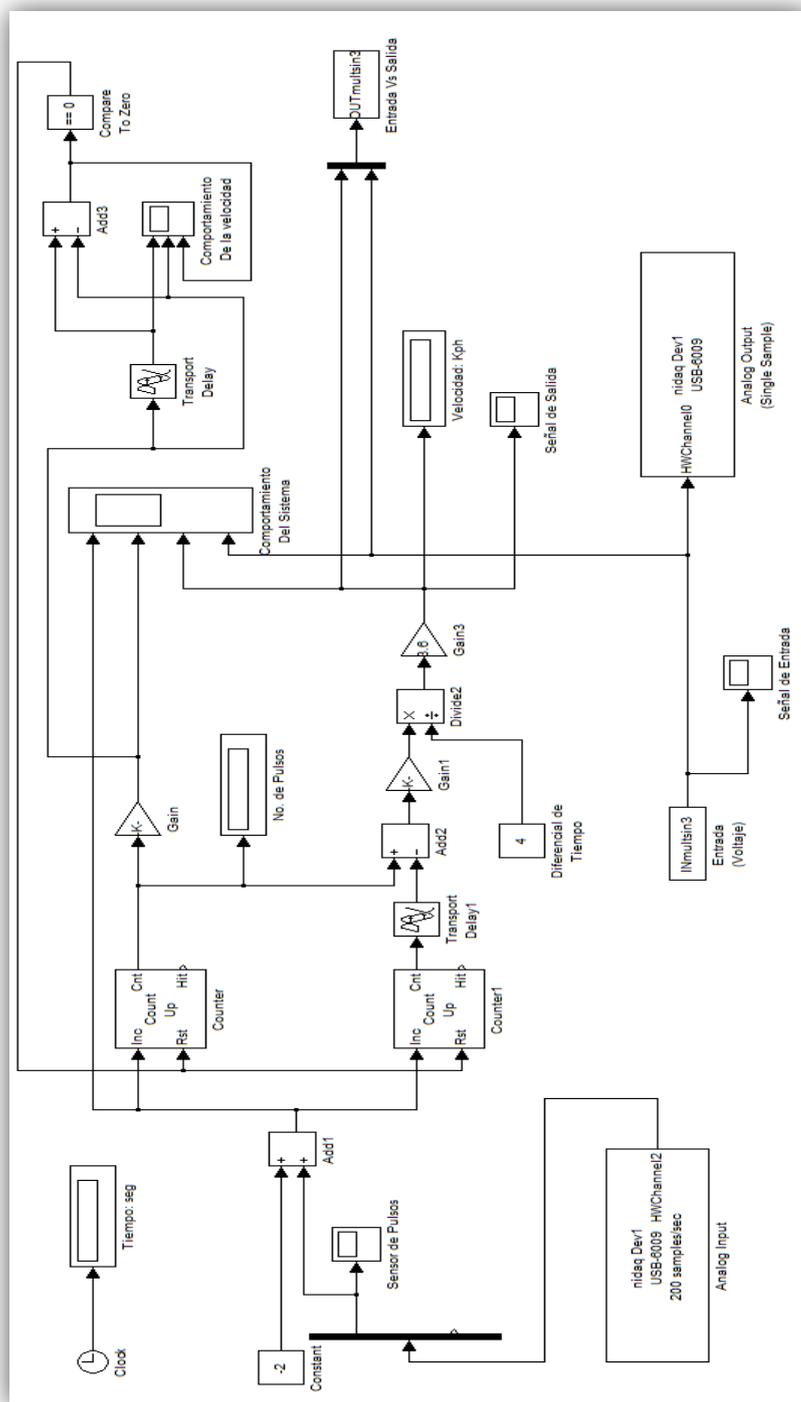


Figura 3.5 Esquemático diseñado en Simulink.

3.1.2.1 Descripción del bloque esquemático utilizado.

A continuación se realiza un resumen de los diferentes elementos utilizados en el diseño en Simulink, y de sus principales funciones:

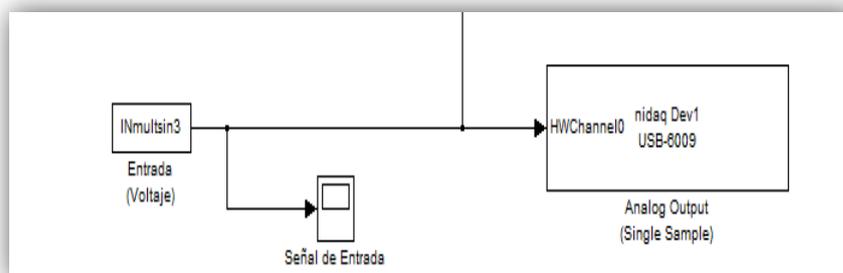


Figura 3.6 Entrada del sistema.

En la Figura 3.6 se observa de izquierda a derecha: el bloque que permite cargar desde el ambiente de trabajo en Matlab las diferentes señales de entrada a la planta, un visualizador para observar dichas señales, y por último, un bloque que se encarga de que ésta señal sea transmitida hacia la tarjeta de adquisición de datos.

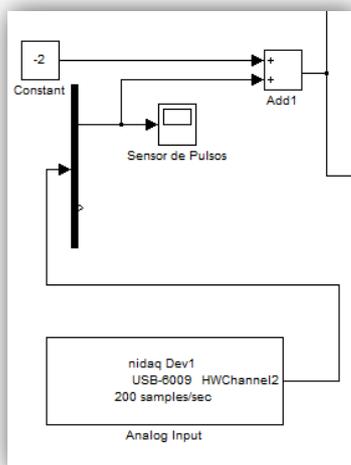


Figura 3.7 Pulsos provenientes del sensor magnético.

En la Figura 3.7 se puede observar cómo se realizó la captura de los pulsos generados por el sensor magnético cada vez que al girar la rueda un imán pasaba frente al mismo, con un bloque que recoge la señal enviada por la tarjeta de adquisición y la ingresa al ambiente de trabajo, donde se la descompone en dos con la ayuda de un *demux*, esto debido a las características de las conexiones realizadas (modo diferencial como se explicó en el numeral 3.1.1.1 del presente capítulo), que genera dos señales idénticas por cada una capturada por la tarjeta de adquisición.

También se observa un visualizador, para observar la señal en cuestión y un bloque sumador que hace que la amplitud de la señal varíe en un rango positivo desde los cero voltios.

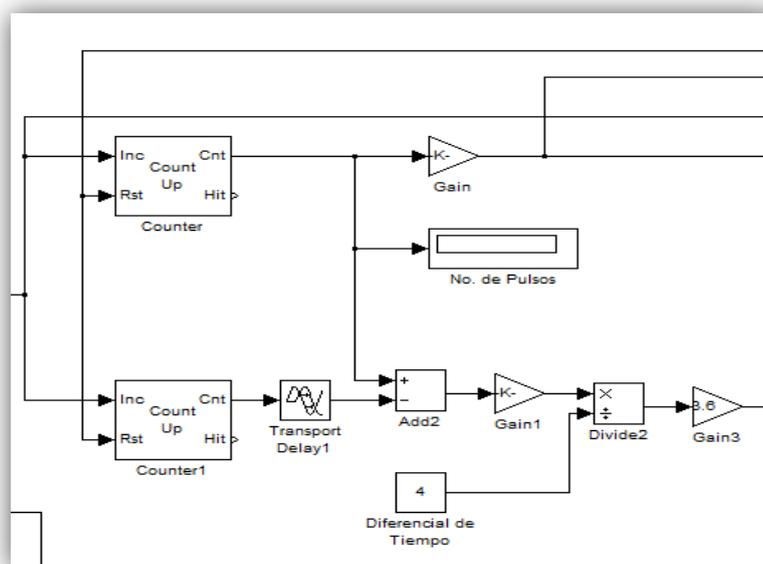


Figura 3.8 Procesamiento de la señal del sensor magnético.

En éste gráfico (figura 3.8), se observa cómo se procesa la señal proveniente de los bloques de la figura 3.7; con la finalidad de obtener una señal que refleje el comportamiento de la velocidad de la bicicleta, se hicieron varios intentos y varias pruebas para procesar la información generada por el sensor magnético.

Al principio se utilizó un bloque contador, que se encarga de contar el número de pulsos enviados por el sensor magnético, que se generan producto del paso de nueve imanes ubicados en los rayos de la rueda de manera uniforme y equidistantes, luego a ese valor se lo multiplicaba por una ganancia, esto debido a que cada pulso implica que la rueda posterior de la bicicleta se está moviendo y los imanes están cruzando la zona del sensor: al ser nueve los imanes colocados cada 40 grados, con el objeto de tener una resolución aceptable, se entiende que por cada pulso enviado existe un desplazamiento y si se aplica un diferencial se tiene una velocidad instantánea, por lo que se utilizó la siguiente ganancia:

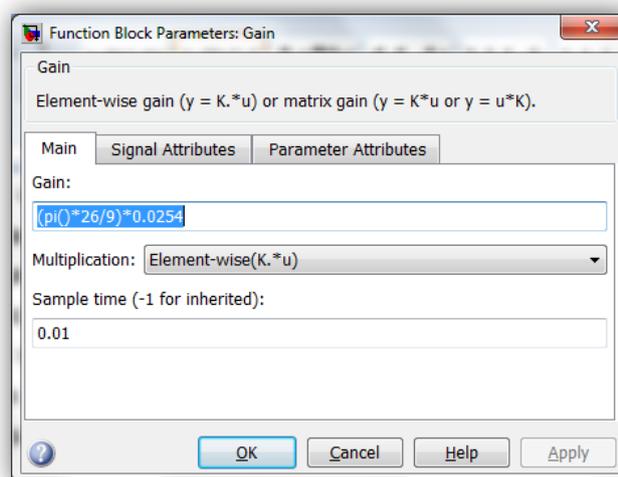


Figura 3.9 Ganancia multiplicada al número de pulsos.

Como se puede ver se multiplica al número de pulsos por el radio (26 pulgadas), y a éste valor se lo divide para nueve, que representa la porción del perímetro de la rueda que se recorre por cada vez que un imán atraviesa el sensor, por último se multiplica a ese valor por 0.0254 para convertirlo de pulgadas a metros, obteniendo así una señal que refleja la distancia recorrida.

Volviendo a la descripción del bloque representado en la Figura 3.8, en el intento anterior por capturar la velocidad, se utilizó la misma ganancia antes descrita para luego dividir a ese valor para el tiempo transcurrido, el mismo que era suministrado por un bloque de reloj (*clock*).

Sin embargo, luego de realizar las diferentes pruebas de las señales de entrada, se descubrió una deficiencia en el planteamiento que se había hecho, debido que, después de suministrar un voltaje a la planta al momento de que se le inyectaba un voltaje menor al anterior o ninguno, la señal de salida demoraba demasiado en disminuir y nunca alcanzaba el valor real de velocidad; esto se debía a que se cometió el error de hallar la velocidad media al dividir a la distancia total recorrida para el tiempo transcurrido, cuando lo que se

necesitaba era la velocidad instantánea, por lo que se buscó un diferencial de desplazamiento y un diferencial de tiempo, luego de varios intentos fallidos y de señales con mucha distorsión, lo que se hizo fue tomar un diferencial de la señal de los pulsos provenientes del sensor magnético, como se puede observar en la Figura 3.8, para lo cual se utilizó dos contadores.

Se observa también que al contador de la parte inferior en la Figura 3.8 se le aumentó un bloque de retardo, el cual entrega una señal con un retraso, escogido previamente, tomando así la señal original y restándole la señal con retraso para obtener el número de pulsos generados en el tiempo que se escogió como retraso, dicho de otra manera, se obtuvo así un diferencial de la cantidad de pulsos enviados por el sensor en un tiempo que se definió, y que a su vez, sería el diferencial de tiempo que se había buscado.

Luego se restó las dos señales y a esa diferencia se la convirtió en velocidad utilizando el mismo procedimiento que se mencionó anteriormente, es decir, se multiplicó la señal de pulsos por una ganancia que daba como resultado la distancia recorrida por la bicicleta en ese diferencial de tiempo escogido, y por último, a esa

señal se la dividió para el diferencial de tiempo y se la multiplicó por una ganancia de 3.6 para convertirla a kilómetros por hora, lo que dio como resultado una señal que refleja el comportamiento de la velocidad instantánea de la bicicleta, la que a su vez es la señal de salida del sistema.

Es importante mencionar que la calidad de la señal de salida depende del tamaño del diferencial de tiempo que se tome, esto es algo que se lo descubrió por inspección, debido que lo que se buscaba era tener un diferencial de tiempo pequeño, por lo que se empezó probando valores como 0.02 segundos (el doble del tiempo de muestreo, ver numeral 3.1.3), pero se obtuvo señales demasiado distorsionadas, luego se fue incrementando dicho valor hasta observar que cuanto más grande era, resultaba una señal más nítida.

Sin embargo, al ser más grande el diferencial de tiempo, la señal de velocidad demora más en estabilizarse y deja de reflejar el verdadero comportamiento de la planta, por lo que luego de diferentes pruebas se escogió un diferencial de tiempo de 4 segundos.

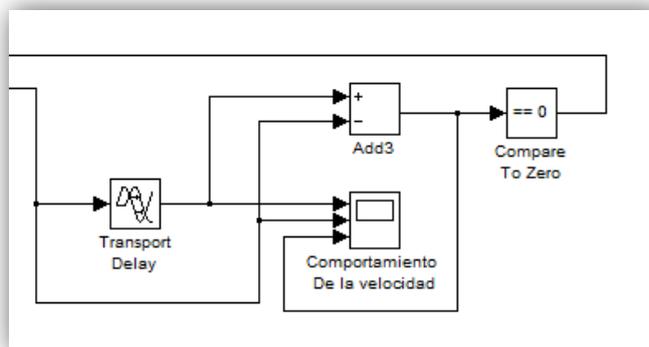


Figura 3.10 Reinicio de contadores.

Con estos bloques se compara la señal de la distancia consigo misma retrasada 0.7 segundos, esto sabiendo que solo cuando la bicicleta se detiene la señal de distancia deja de variar, por lo que utilizando la lógica y un comparador, se envió una señal a la señal de reinicio (reset) de los contadores para que se reinicien cada vez que la rueda se detenga.

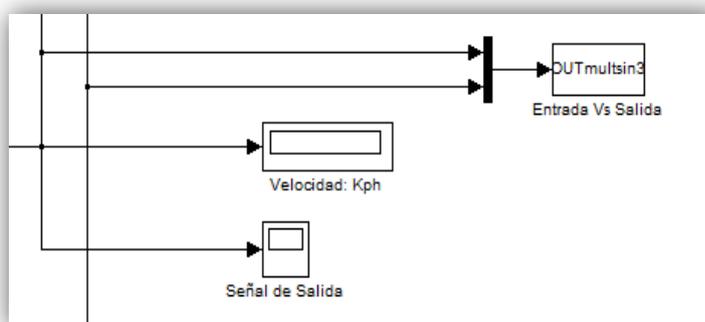


Figura 3.11 Captura final de las señales.

Utilizando el bloque de la derecha de la Figura 3.11, se logró cargar en el ambiente de trabajo de Matlab, los valores de las señales de entrada y salida del sistema, también se observa un visualizador de señal y un visor numérico para observar el comportamiento de la velocidad.

3.1.3. Determinación de la frecuencia de muestreo.

Los sistemas de control, son sistemas discretos en los que las señales se trabajan mediante muestras tomadas a un determinado período de muestreo, o como generalmente se dice, a una determinada frecuencia de muestreo. Esta frecuencia fue escogida de tal manera que refleje el comportamiento de la señal continua del proceso. Según el teorema de Nyquist-Shannon, la frecuencia de muestreo “ f_s ” debe ser por lo menos el doble de la frecuencia de la onda a muestrear “ f_o ”, donde f_o es la componente de más alta frecuencia en la señal de tiempo continuo. Para seleccionar la frecuencia de muestreo de la señal generada por el sensor magnético, se tomó en cuenta el criterio antes mencionado; por lo que al ser la frecuencia de dicha señal aproximadamente 33.33 Hz, se escogió una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

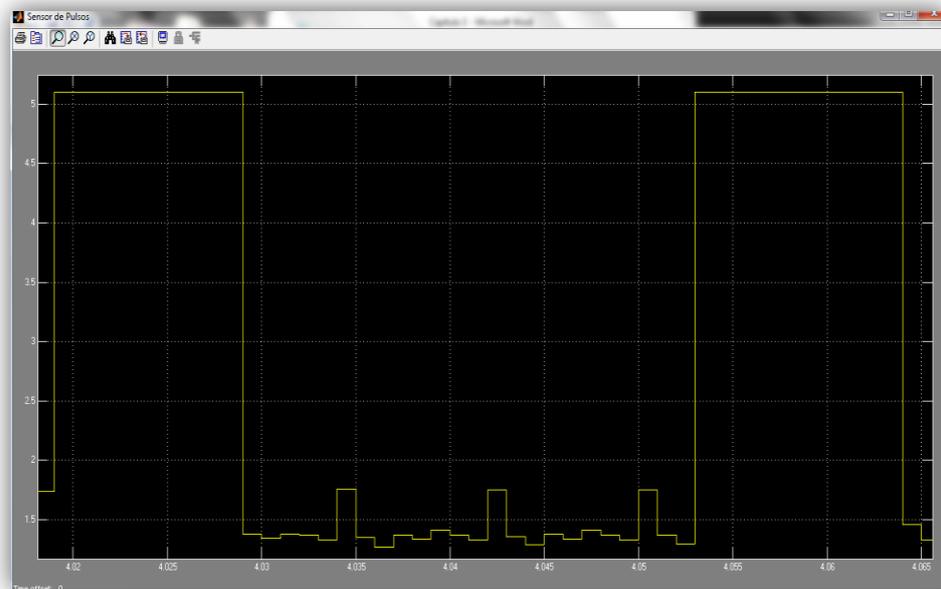


Figura 3.12 Tiempo entre cada pulso generado por el sensor magnético.

Es importante mencionar que el tiempo de aproximadamente 0.03 segundos (frecuencia 33.33 Hz) que hay entre cada pulso generado por el sensor de la Figura 3.12, fue tomado cuando la rueda alcanzaba a su máxima velocidad, así se aseguró cubrir hasta la máxima frecuencia que puede alcanzar dicha señal.

3.1.4 Respuesta al escalón.

Se diseñó una señal de tipo escalón con una amplitud de 3.5 voltios, la cual fue aplicada a la planta; sin embargo luego con el transcurso del

experimento, específicamente en la etapa del diseño de las posibles señales de entrada, se encontró que si bien se obtenían los datos de la respuesta del sistema ante ésta señal, se encontraron problemas debido a que no se había considerado como se comportaría la salida al momento de dejar de aplicar un voltaje a la entrada.

Cuando se probó señales que dejaban de suministrar voltaje a la planta por un tiempo considerable se observó que la salida demoraba mucho en responder (disminuir la velocidad): dicho comportamiento se debía a la inercia de la rueda. Para contrarrestar éste fenómeno se aplicó fricción en la llanta, con la finalidad de obtener una salida que responda en un tiempo similar ante un incremento o un decaimiento de voltaje en la entrada del sistema. Es importante mencionar que se mantuvo fricción durante todo el experimento para contrarrestar dicho suceso.

Para observar la respuesta, se diseñó una entrada de tipo escalón con una amplitud de 3.5 voltios y de 25 segundos de duración, con la finalidad de observar la respuesta del sistema ante los cambios repentinos de voltaje, obteniendo lo siguiente en la Figura 3.13.

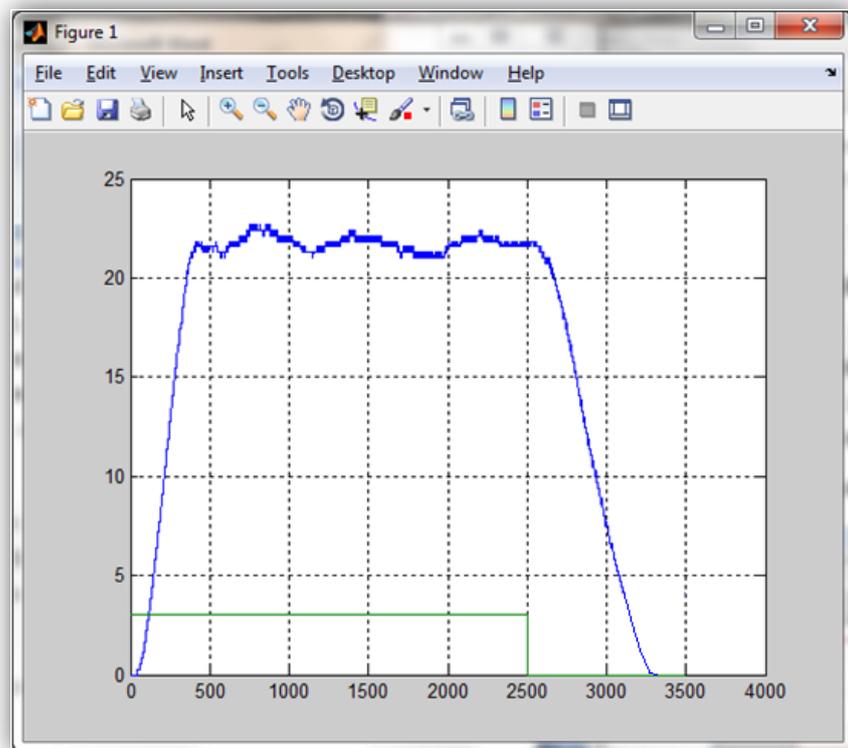


Figura 3.13 Respuesta al escalón.

3.1.4.1 Constante de Tiempo (τ).

Se puede observar que la señal de salida no se estabiliza en un valor constante, sino que varía, esto se debe a diversos factores, tales como el tipo de sensor utilizado y que el trabajo fue realizado sobre una planta real, por lo que se asumió un valor de estabilización de 22 kph, el 63.2% de dicho valor es de:

$$0.632 \times 22 \text{ kph} = 13.904 \text{ kph} \quad (3.1)$$

Por lo tanto se tiene que:

$$\tau_1 = 2.65 \text{ segundos}, \quad \tau_2 = 3.68 \text{ segundos.}$$

Donde τ_1 y τ_2 se los encontró gráficamente, en el ascenso y en el descenso de la señal de salida, respectivamente.

3.2 Diseño de la señal de entrada.

Se diseñaron posibles señales de entrada tomando en cuenta las consideraciones pertinentes, por lo que se usaron los siguientes tipos de diseño:

- Secuencia Binaria (RBS)
- Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)
- Señal multi-senoidal.

Para generar dichas señales se hizo uso del *Input Design GUI*, herramienta diseñada en Matlab por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun, como se muestra en la Figura 3.14.

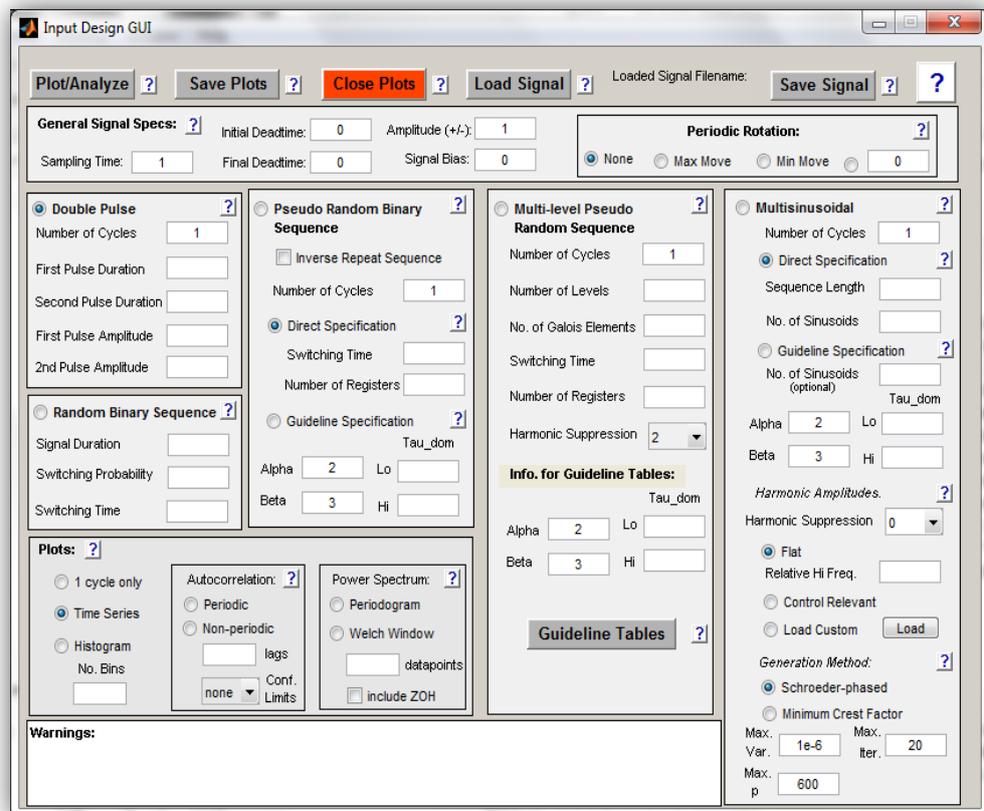


Figura 3.14 Ventana del Input Design GUI.

3.2.1 Parámetros de diseño de las señales RBS.

- ✓ **duración de la señal:** tiempo total en el cual se va a dar la señal.
- ✓ **probabilidad de conmutación:** probabilidad de cambio de la señal.
- ✓ **tiempo de conmutación:** tiempo de duración de cada pulso.

Para el diseño de las señales RBS no se requiere ningún parámetro propio de la planta, por lo que el análisis se basó principalmente en la selección del tiempo de duración de la prueba y del ancho de los pulsos, la probabilidad de cambio quedó fija en 50% para todos los casos, debido que lo que se buscaba es generar una señal netamente aleatoria.

La importancia de escoger bien del ancho de los pulsos radica en que si estos son muy finos, la planta no va a poder reaccionar tan rápido ante estos cambios, y si los mismos son muy gruesos la señal podría llegar a estabilizarse, y quedar en un valor constante por mucho tiempo, ambos casos representarían pérdida de información, por lo que se trató de generar señales ni muy rápidas ni muy lentas.

3.2.2 Parámetros de diseño de las señales PRBS y multi-sinoidal.

- ✓ **número de ciclos: total** de ciclos de la señal diseñada.
- ✓ **α** : factor representativo de la velocidad de respuesta de lazo cerrado con respecto a la de lazo abierto
- ✓ **β** : factor representativo del tiempo de estabilización del proceso.
- ✓ **τ_{dom}^{Lo}** : Constante de tiempo mínima estimada.

✓ τ_{dom}^{Hi} : Constante de tiempo máxima estimada.

Para el caso de las señales PRBS y Multi-sinusoidales, se establece un rango de valores entre los cuales se encuentre la constante de tiempo del sistema, mediante el τ_{dom}^{Lo} y el τ_{dom}^{Hi} . Tomando en consideración el análisis explicado en el numeral 3.1.4.1 del presente capítulo, se asumió como constantes de tiempo encontradas τ_1 y τ_2 , a los τ_{dom}^{Lo} y τ_{dom}^{Hi} respectivamente.

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

$$\frac{1}{\beta \cdot \tau_{dom}^{Hi}} \leq \omega \leq \frac{\alpha}{\tau_{dom}^{Lo}} \quad (3.2)$$

3.2.3 Parámetros generales de diseño de las señales.

Además de los mencionados anteriormente, existen parámetros generales de diseño en el Input Design GUI como se puede observar en la Figura 3.14, estos son:

Tiempo de muestreo: Se lo escogió igual para todos las señales diseñadas (0.01 segundos).

Amplitud: Se la mantuvo en 1.8 para todos los diseños.

Desvío (Bias): Al igual que los anteriores se mantuvo, en 2.1.

3.3 Proceso de selección de la señal de entrada.

De las señales que se generaron, se escogió para el siguiente análisis las 3 mejores por cada tipo de señal de entrada; a continuación en la Tabla 12 se muestran sus diseños y resultados:

Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)					
	Duración de la señal	Probabilidad de conmutación	Tiempo de Conmutación		
RBS1	600	0.5	2.5		
RBS2	660	0.5	2.2		
RBS3	592	0.5	1.6		
Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)					
	No. de Ciclos	α	β	T_{dom}^{Lo}	T_{dom}^{Hi}
PRBS1	19	2	3	2.65	3.68
PRBS2	15	2	3	1.5	1.65
PRBS3	29	3	3	2.65	3.68
Señal Multi-sinusoidal					
	No. de Ciclos	α	β	T_{dom}^{Lo}	T_{dom}^{Hi}
MULTSIN1	19	2	3	2.65	3.68
MULTSIN2	38	4	3	2.65	3.68
MULTSIN3	29	3	3	2.65	3.68

Tabla 12 Diseño de señales de entrada.

3.3.1 Análisis de las señales de entrada utilizando la herramienta CRA.

Antes de escoger la señal de entrada se analizó el grado de relación entre ésta y la señal de salida, así como el tipo de relación existente

entre éstas mismas, para lo cual se utilizó la función CRA del software Matlab:

CRA (Datos, Periodo, Pre-Blanqueado, Tipo de gráfico)

Donde:

- ✓ **CRA (Análisis de correlación):** Muestra gráficamente un análisis de correlación entre dos señales.
- ✓ **Datos:** Ingreso de las señales (entrada y de salida).
- ✓ **Período:** Indicará hasta que período se hallará la correlación.
- ✓ **Pre-blanqueado:** orden de pre-blanqueado a utilizar, por defecto es 10. Hay que tener cuidado en la misma pues con un pre-blanqueado muy alto se puede perder características de la propia señal.
- ✓ **Gráfico:**
 0. no muestra gráficos.
 1. muestra en un gráfico de los coeficientes "bn".
 2. muestra gráficamente la auto-correlación de la señal de entrada, de la salida, la correlación cruzada entre estas señales y los coeficientes bn.

A continuación, se muestra paso a paso como se realizó éste análisis, con la señal PRBS3:

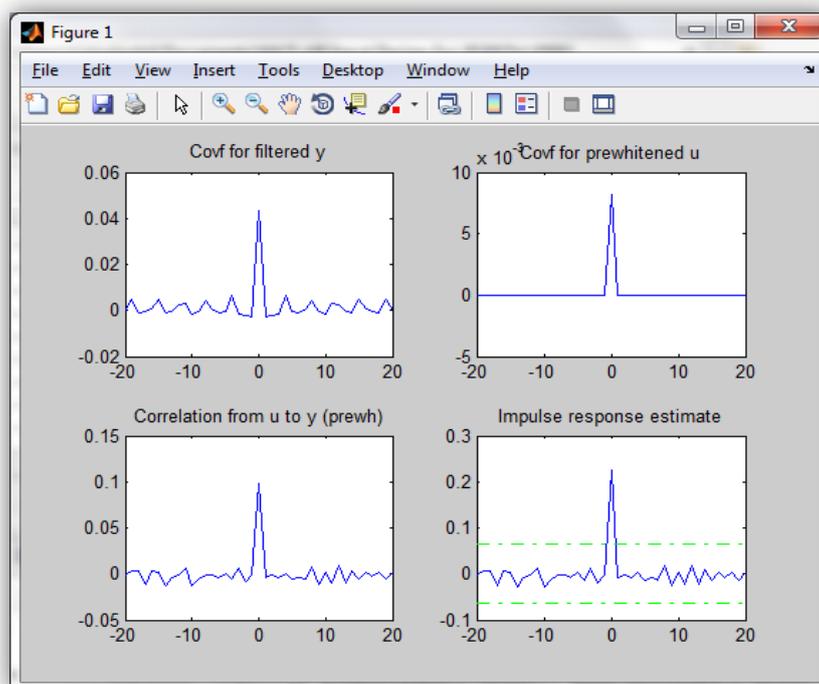


Figura 3.15 Función cra (prbs3OUT, 20, 10,2).

3.3.1.1 Auto-correlación de la señal de entrada.

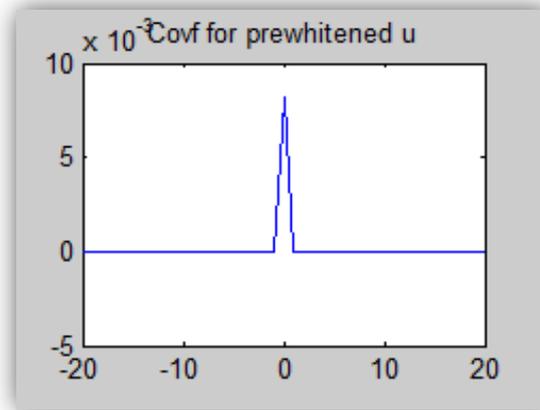


Figura 3.16 Autocorrelación de la señal de entrada.

Con ésta señal de entrada, pese a haber aplicado un preblanqueado, hasta un período atrás “k=1” ésta no se asemeja mayormente al ruido blanco, ya que sí posee cierta relación con valores anteriores; siendo diferente para otros periodos donde son independientes sus comportamientos.

Únicamente hay una gran relación si se compara la señal en un tiempo con la misma señal en el mismo tiempo “k=0” (resultado esperado).

3.3.1.2 Auto-correlación de la señal de salida.

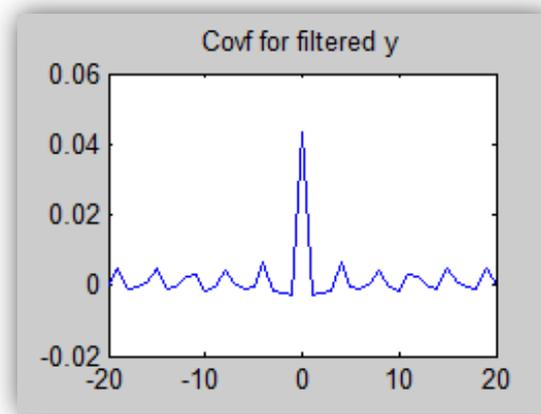


Figura 3.17 Autocorrelación de la señal de salida.

Las conclusiones para la señal de salida son parecidas a las hechas anteriormente para la señal de entrada, debido a que ésta no posee mucha dependencia con respecto a sus valores anteriores.

3.3.1.3 Estimación de la Respuesta Impulso.

La salida del sistema se la puede describir mediante la siguiente ecuación en el dominio del tiempo:

$$y(t) = b_0\mu(t - 0T) + b_1\mu(t - 1T) + b_2\mu(t - 2T) + \dots + b_n\mu(t - nT) + v(t) \quad (3.3)$$

Donde:

T: periodo.

Por lo que al conocer estos coeficientes "bn", se tiene una pauta sobre la relación entre la señal de salida actual con respecto a la señal de entrada n periodos atrás, si dichos coeficientes fueran igual a cero, se debe entender que no hay relación entre las señales, por lo que deberían ser descartadas.

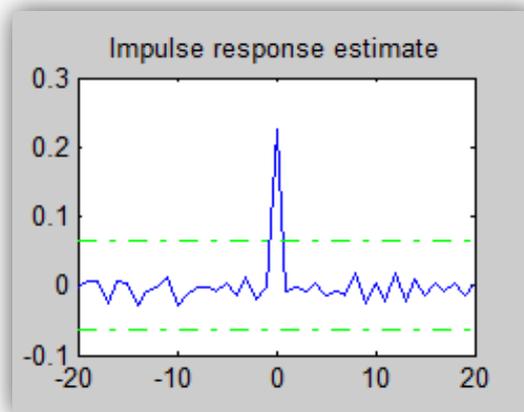


Figura 3.18 Estimada de la respuesta al impulso.

La Figura 3.18 muestra los coeficientes "bn" que se buscaban, para poder apreciarlos más claramente se utilizó la función:

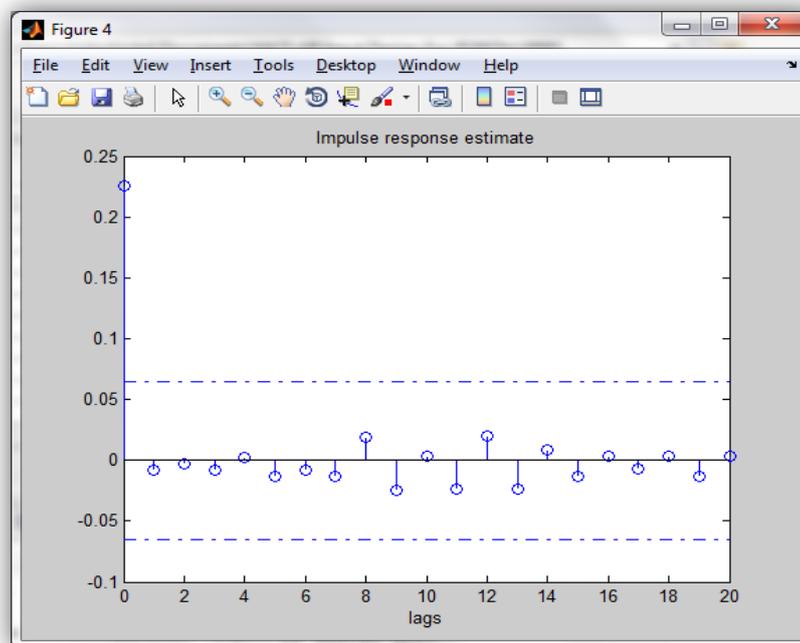


Figura 3.19 Función cra (prbs3OUT, 20, 10,1).

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

3.3.1.4 Correlación cruzada.

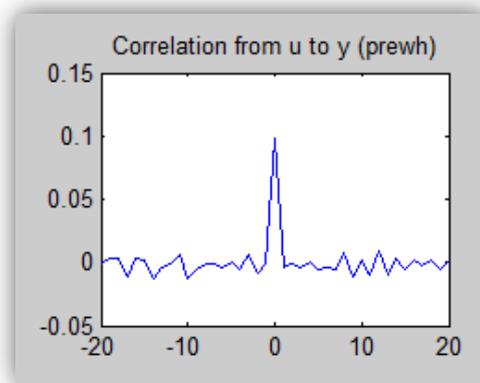


Figura 3.20 Correlación cruzada entre la entrada y la salida.

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

3.3.2 Señales seleccionadas.

Luego de analizar todas las posibles señales de entrada, se llegó a la conclusión de que los grupos de las señales PRBS y multi-sinusoidal, presentaban ligeramente mejores resultados por sobre las RBS, por lo que se descartó a dicho grupo de señales.

Sin embargo se debe mencionar que los resultados obtenidos en ésta etapa del experimento, no brindaron la guía esperada, esto debido a que producto de la forma de captura, y procesamiento de la señal de salida, existe un retardo inherente en el sistema, el cual es el causante de que el análisis de correlación y la respuesta al escalón, realizados en el análisis no paramétrico sean difíciles de interpretar.

Debido a las características de la planta, en la cual no es crítico el hecho de variar abruptamente el voltaje de la señal de entrada, ni se produce un desgaste significativo de los actuadores, se escogió el grupo de las 3 señales PRBS.

CAPÍTULO 4

ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA Y DISEÑO DEL CONTROLADOR.

4.1 Estimación de la función de transferencia del sistema mediante análisis paramétrico.

Éste análisis es el último paso para la identificación de un sistema; como primera parte del mismo se procedió a obtener diversas estimaciones preliminares, con el propósito de escoger la que mejor se ajuste a los criterios de validación establecidos más adelante, y así obtener la función transferencia del sistema, los métodos paramétricos utilizados fueron los siguientes:

- ✓ ARX
- ✓ ARMAX
- ✓ FIR
- ✓ BOX-JENKINS
- ✓ ERROR DE SALIDA

4.1.1 Ingreso de las señales a la herramienta Ident.

Para realizar el análisis paramétrico se hizo uso de la herramienta *Ident* del software *Matlab*, todos los gráficos que se presentan fueron tomados de dicha herramienta, las señales de entrada (PRBS3) y salida original, así como también los pasos previos a la identificación son presentados a continuación:

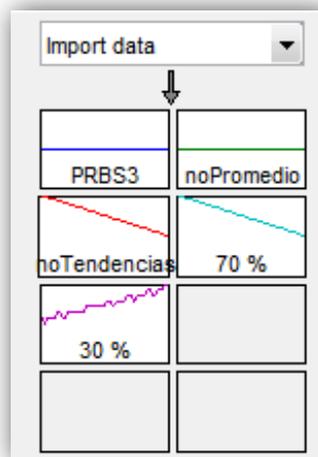


Figura 4.1 Proceso previo a la Identificación.

Como se puede observar en la Figura 4-1, luego de importar las señales (PRBS 3), se procedió a:

- ✓ Remover el valor promedio.
- ✓ Remover tendencias.
- ✓ Dividir la señal, usando un 70% para realizar la identificación y un 30 para validarla, se consideraron estos porcentajes debido a que se cuenta con una gran cantidad de datos por lo que el treinta por ciento es suficiente para la validación.

A continuación se muestran los gráficos de las señales durante el proceso mencionado anteriormente:

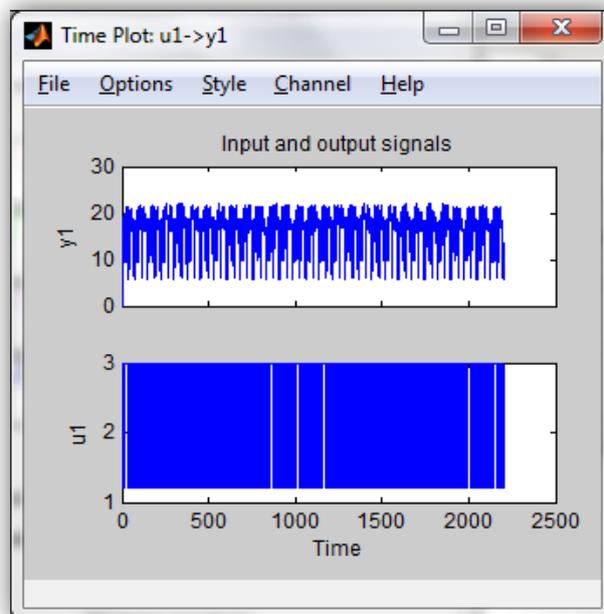


Figura 4.2 Señales de Entrada y Salida del sistema.

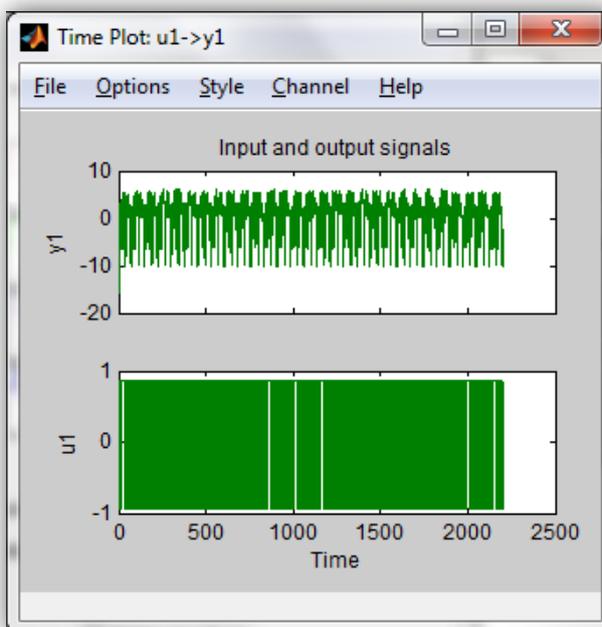


Figura 4.3 Entrada y Salida después de remover sus medias.

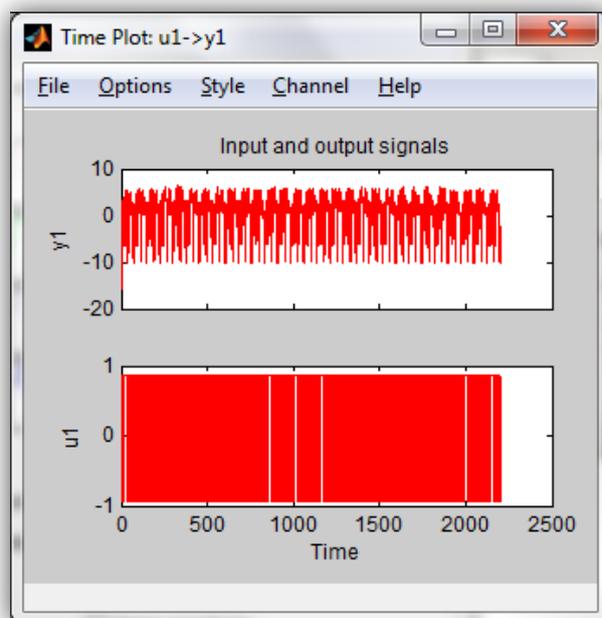


Figura 4.4 Entrada y Salida sin medias ni tendencias.



Figura 4.5 Entrada y salida divididas en 70% y 30%.

4.1.2 Criterios utilizados para la selección del mejor modelo.

Hay varios criterios que se deben tomar en cuenta a la hora de escoger el mejor método de parametrización de una planta, estos son:

- ✓ **Porcentaje de Similitud:** Luego de realizar la estimación de la función de transferencia según el modelo y los parámetros utilizados, se la excita con los valores de entrada almacenados previamente en los datos de validación del arreglo llamado 30%, y se compara la señal resultante con la salida almacenada también en el arreglo antes mencionado; *Ident* permite visualizar

gráficamente dichos resultados y arroja un porcentaje de "*Best Fit*", o porcentaje de similitud.

- ✓ **Análisis residual:** también llamado error de predicción; muestra la auto correlación residual de la salida y la correlación cruzada residual entre la salida y la entrada, se lo utiliza para verificar que tan parecido es el comportamiento de los residuos al del ruido blanco.

- ✓ **Parsimonia:** Consiste en la elección del modelo más simple (menor cantidad de coeficientes, polos o ceros).

- ✓ **Respuesta al escalón:** Se puede comparar la respuesta al escalón de la función de transferencia estimada, con la obtenida en la planta.

4.1.3 Estimaciones realizadas con el modelo ARX

Éste fue el primer modelo que se utilizó para realizar las estimaciones de la función de transferencia, a continuación se muestra el procedimiento seguido:

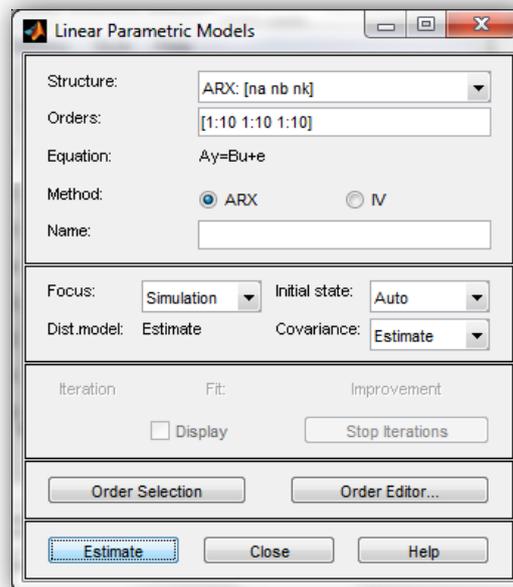


Figura 4.6 Selección de los coeficientes deseados para el Modelo ARX.

Como se observa en la Figura 4.6, se utilizó la opción "Order Selection", que permite generar las mejores estimaciones, con las posibles combinaciones realizadas con el rango de número de polos, ceros y de retardo ingresado.

Con la herramienta utilizada se pueden visualizar dichas combinaciones (Figura 4-7), para luego en el ambiente de trabajo y poder analizarlas.

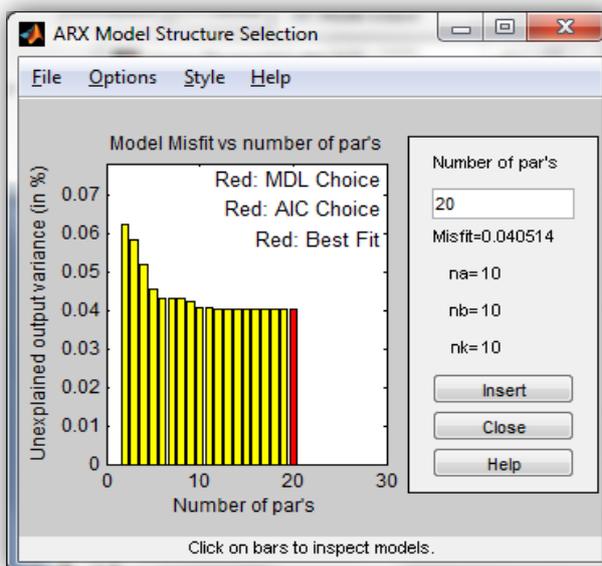


Figura 4.7 Posibles combinaciones de coeficientes para el Modelo ARX.

Se escogieron 8 de las estructuras generadas con éste modelo para realizar el análisis paramétrico, las cuales son presentadas a continuación:

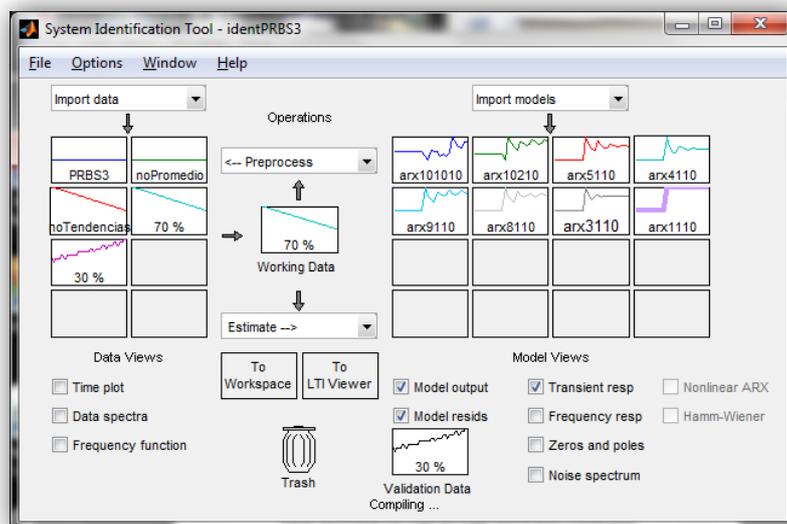


Figura 4.8 Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.

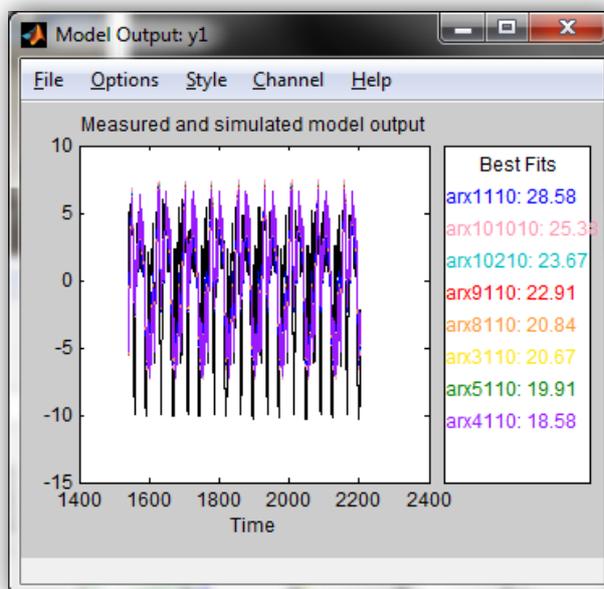


Figura 4.9 Porcentajes de Similitud.

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de transferencia
ARX101010	25.38	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	10 polos, 10 ceros, retardo
ARX10210	23.67		10 polos, 2 ceros, retardo
ARX5110	19.91		5 polos, 1 cero, retardo
ARX4110	18.58		4 polos, 1 cero, retardo
ARX9110	22.91		9 polos, 1 cero, retardo
ARX8110	20.84		8 polos, 1 cero, retardo
ARX3110	20.67		3 polos, 1 cero, retardo
ARX1110	28.58		1 polo, 1 cero, retardo

Tabla 13 Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARX).

Como se puede observar en la tabla anterior, se obtuvo porcentajes de similitud bajos con éste modelo.

4.1.4 Estimaciones realizadas con el modelo ARMAX

Se trabajó con la siguiente ventana:

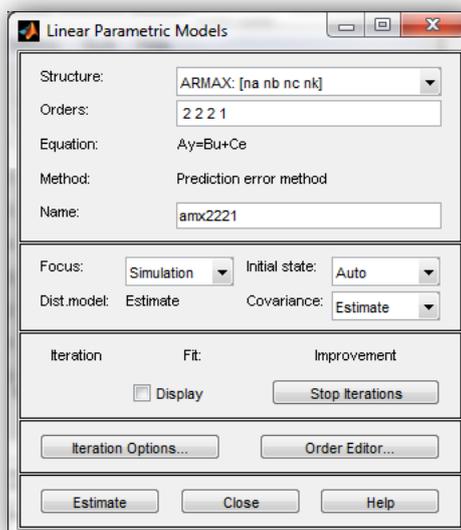


Figura 4.10 Selección de los parámetros deseados para el Modelo ARMAX.

Se generaron 17 estructuras con éste modelo, las mismas que son presentadas a continuación:

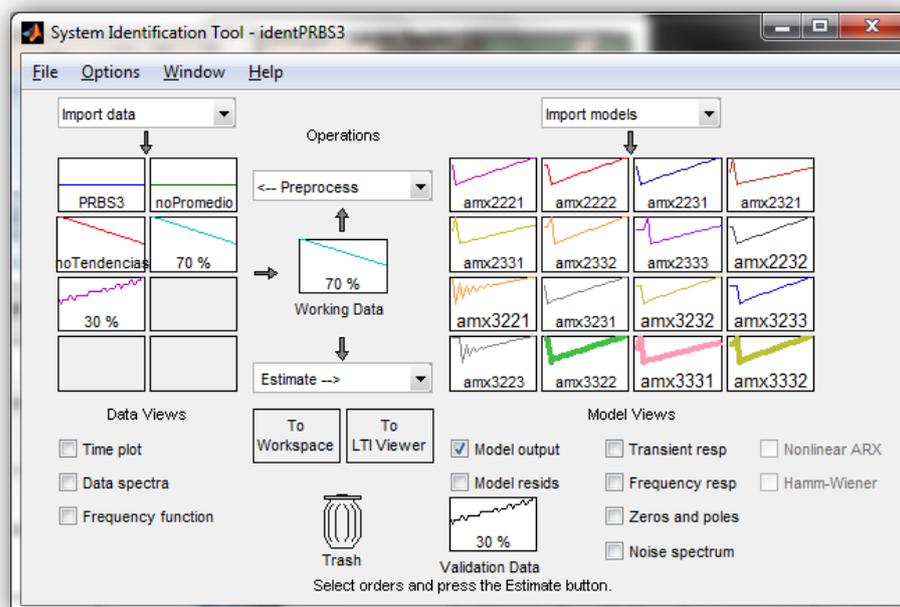


Figura 4.11 Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de Transferencia
ARMAX:2,2,2,1	65.31	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	2 polos, 2 ceros.
ARMAX:2,2,2,2	65.45		
ARMAX:2,2,3,1	65.33		
ARMAX:2,2,3,2	65.44		
ARMAX:2,3,2,1	65.49	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	2 polos, 3 ceros.
ARMAX:2,3,3,1	65.48		
ARMAX:2,3,3,2	65.54		
ARMAX:2,3,3,3	65.93		
ARMAX:3,2,2,1	67.79	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	3 polos, 2 ceros.
ARMAX:3,2,3,1	65.27		
ARMAX:3,2,3,2	65.33		
ARMAX:3,2,3,3	65.41		
ARMAX:3,2,2,3	67.88		
ARMAX:3,3,2,2	67.89	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	3 polos, 3 ceros.
ARMAX:3,3,3,1	65.46		
ARMAX:3,3,3,2	65.46		
ARMAX:3,3,3,3	65.88		

Tabla 14 Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARMAX).

En el modelo ARMAX, se parametriza también al ruido, lo cual es conveniente ya que la planta al ser real presenta una cantidad considerable del mismo.

4.1.5 Estimaciones realizadas con el modelo Error de Salida

La ventana para generar éste modelo es la siguiente:

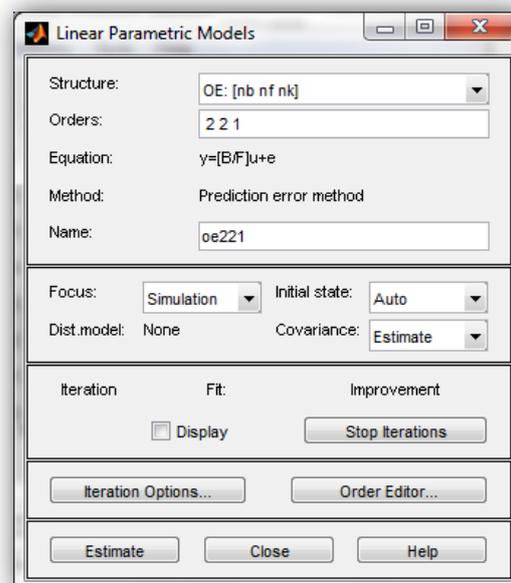


Figura 4.12 Selección de los parámetros deseados para el Modelo Error de Salida.

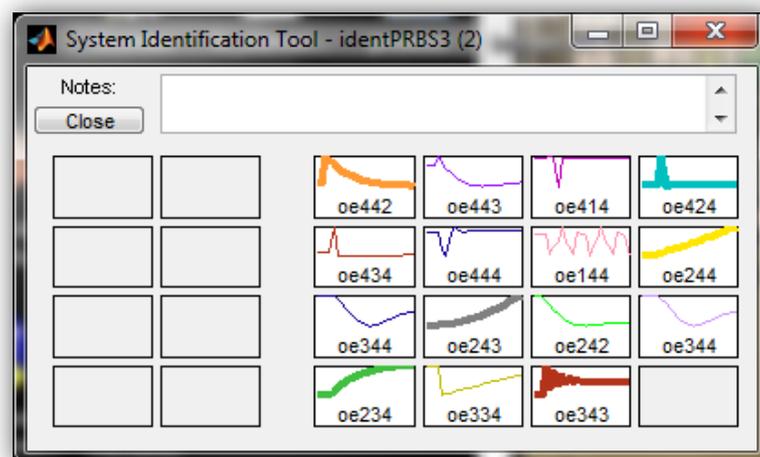


Figura 4.13 Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico, 1er bloque.

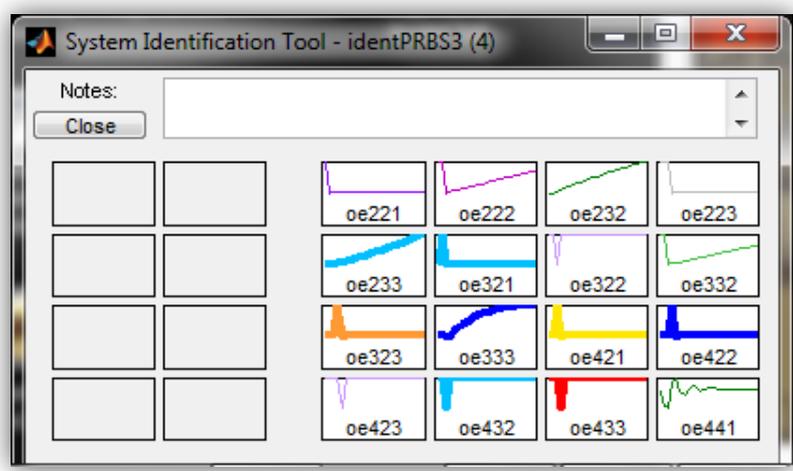


Figura 4.14 Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico, 2do bloque.

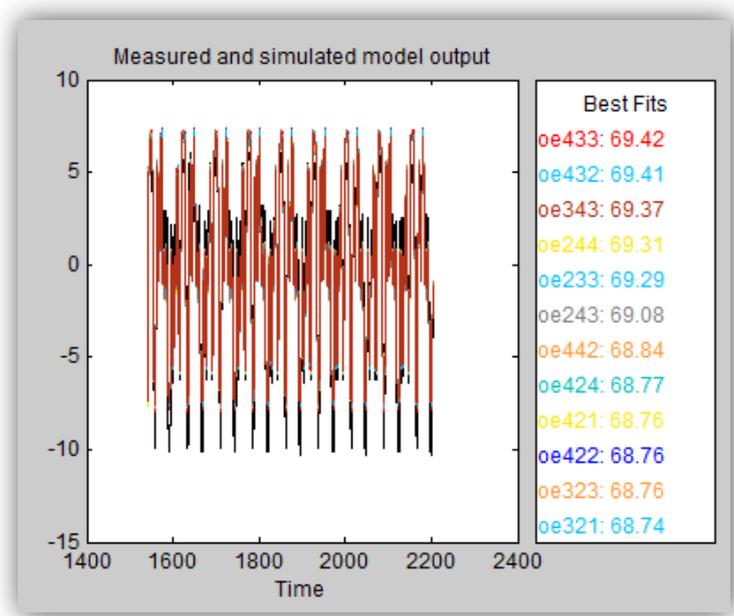


Figura 4.15 Porcentajes de Similitud.

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de Transferencia
OE433	69.42	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	4 polos, 3 ceros
OE432	69.41		
OE343	69.37		
OE244	69.31		4 polos, 4 ceros
OE233	69.29		3 polos, 2 ceros
OE243	69.08		4 polos, 3 ceros
OE442	68.84		
OE424	68.77		
OE421	68.76		
OE422	68.76		
OE323	68.76		
OE321	69.74		

Tabla 15 Análisis de las estructuras generadas (Modelo Error de Salida).

Se encontraron estimaciones con buen porcentaje de similitud, con funciones de transferencia que tienen tres y cuatro polos.

4.1.6 Modelo BOX-JENKINS (BJ).

Se utilizó la siguiente ventana:

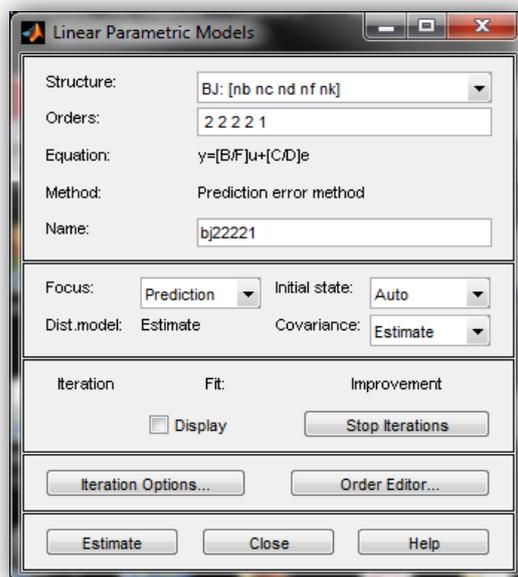


Figura 4.16 Selección de los parámetros deseados para el Modelo Box – Jenkins.

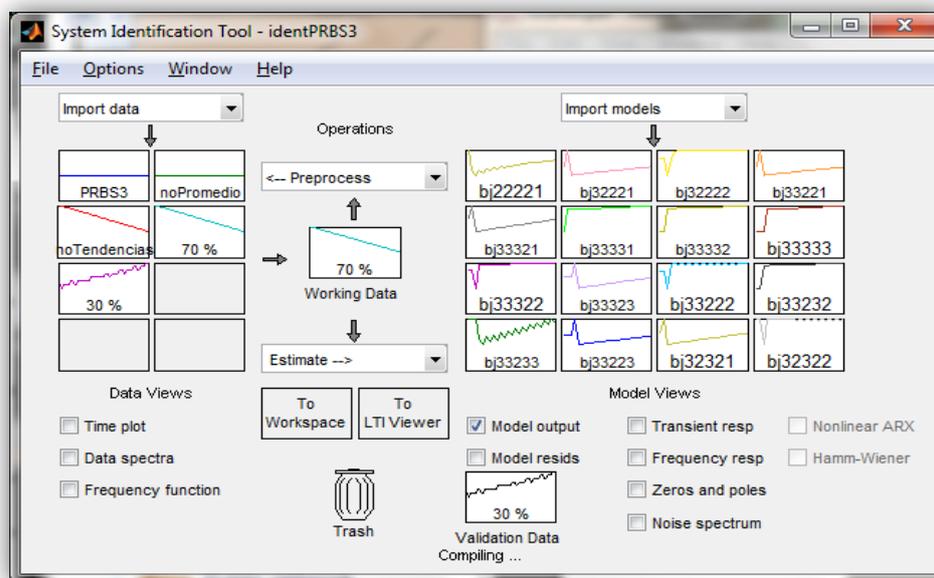


Figura 4.17 Estructuras seleccionadas para el análisis paramétrico.

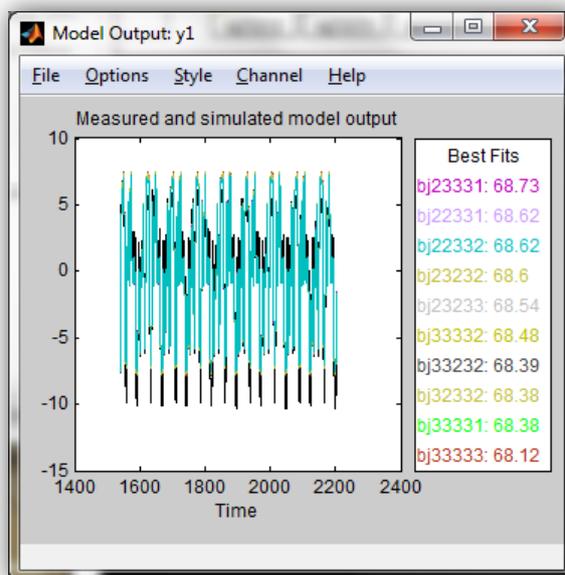


Figura 4.18 Porcentajes de Similitud.

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de Transferencia
BJ23331	68.73	Autocorrelación fuera de intervalos de confianza.	3 polos, 2 ceros
BJ22331	68.62		
BJ22332	68.62		
BJ23232	68.6		
BJ23233	68.54		
BJ33332	68.48		
BJ33232	68.39		
BJ32332	68.38		
BJ33331	68.38		
BJ33333	68.12		

Tabla 16 Análisis de las estructuras generadas (Modelo BOX JENKINS)

En el modelo Box-Jenkins se parametriza el ruido, además los coeficientes que describen la relación de la entrada y el ruido con la salida son distintos, e independientes; sin embargo una desventaja viene a ser el número de coeficientes que eleva el número de posibles combinaciones.

4.1.7 Modelo FIR.

Se utilizó la siguiente ventana, donde se puede observar que se obtuvo las estimaciones utilizando la estructura ARX, con un valor de "na" de cero:

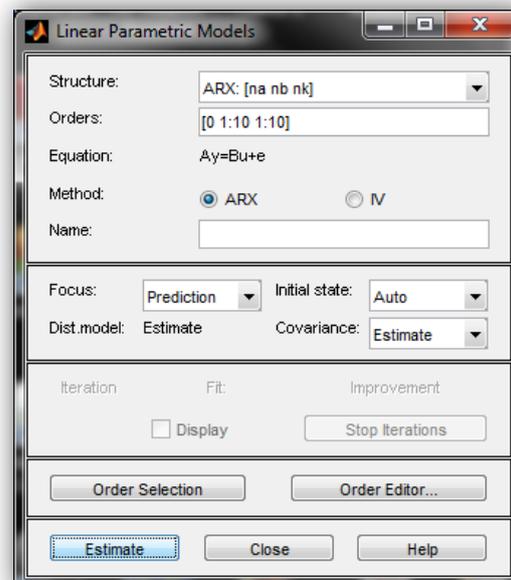


Figura 4.19 Selección de los parámetros deseados para el FIR.

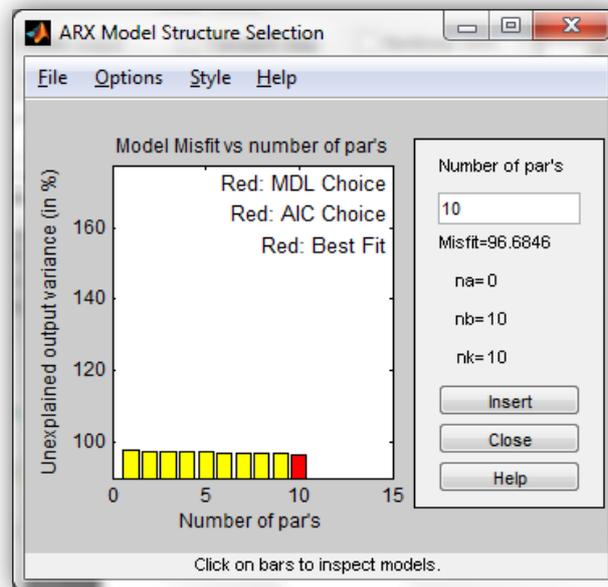


Figura 4.20 Posibles combinaciones de coeficientes para el Modelo FIR.

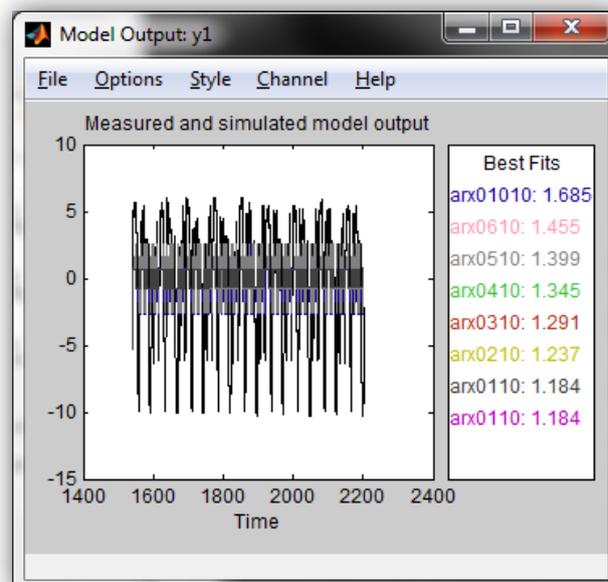


Figura 4.21 Porcentajes de Similitud.

Como se puede observar en la figura 4.21, los porcentajes de similitud conseguidos con el modelo FIR, son los más bajos entre todas las estimaciones realizadas con los 5 modelos, por lo que no se consideró necesario presentar una tabla de datos como en los otros modelos.

4.1.8 Elección del Modelo más conveniente.

Se utilizaron diferentes métodos de modelamiento paramétrico, obteniendo los siguientes resultados:

- ✓ **ARX:** Como se puede observar en la tabla 4.1, el porcentaje de similitud de las estimaciones realizadas con éste modelo es demasiado bajo como para ser consideradas.

- ✓ **ARMAX:** Como se puede observar en la tabla 4.2, se tienen estimaciones con un porcentaje de similitud parecido, de éstas destacan: ARMAX:3,2,2,1; ARMAX:3,2,2,3 y ARMAX:3,3,2,2; sin embargo se tomó en cuenta el concepto de parsimonia y se escogió a la ARMAX:2,2,2,2; como soporte adicional a ésta decisión, se recalca que si bien las tres estructuras mencionadas al principio tienen un mejor porcentaje de similitud, no superan significativamente al de la estructura seleccionada (2.44% en el mayor de los casos).

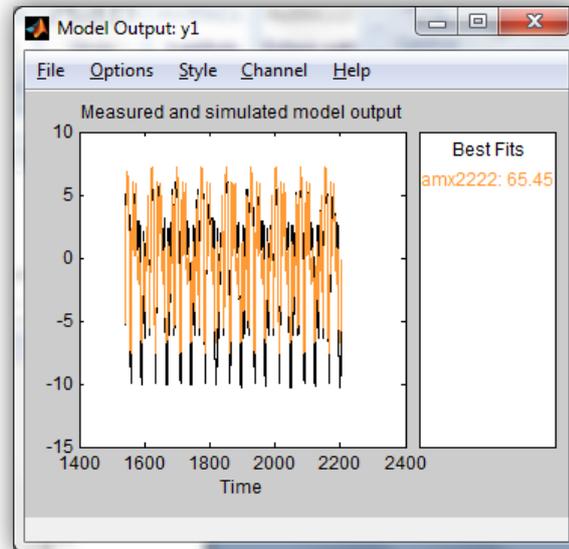


Figura 4.22 Porcentaje de similitud de la estructura seleccionada.

En el gráfico que se muestra a continuación (Figura 4.22), resalta el hecho de que la Auto correlación de los residuos de la salida, se encuentra fuera del intervalo de confianza en varios tramos de la gráfica, esto se debe a las características propias de la planta que al ser real involucra una gran cantidad de ruido, que también es generado por los sensores utilizados; sin embargo se obtuvo una gráfica que muestra variaciones lo que indica que no hay correlación entre los residuos de la salida, que es lo que se busca.

Del gráfico de correlación cruzada de los residuos, se puede concluir que no existe dicha correlación.

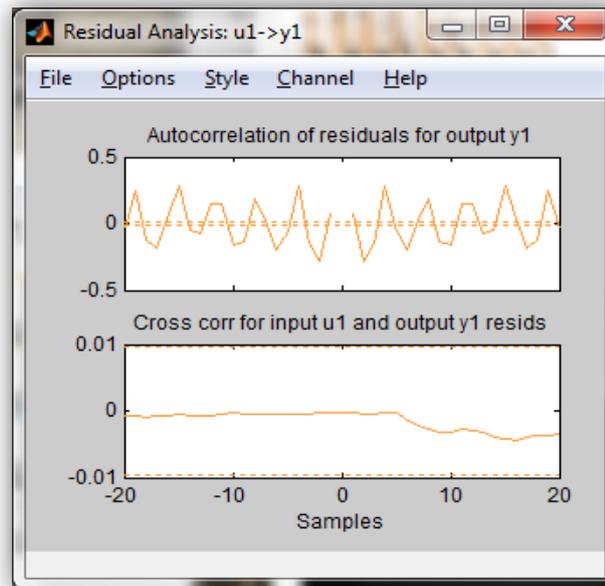


Figura 4.23 Análisis residual de la señal escogida.

- ✓ **ERROR DE SALIDA:** En éste modelo se parametriza por separado la entrada y el ruido, sin asignar coeficientes para el modelo del mismo. Se obtuvieron estimaciones con un buen porcentaje de similitud, pero con funciones de transferencia con mayor número de polos comparada con la ARMAX 2,2,2,2, siendo OE233 la mejor; debido a que la diferencia en el porcentaje de ajuste entre éstas dos

no es significativa (3.84 %), se optó por continuar con la estimación antes escogida.

- ✓ **BOX-JENKINS:** Se encontraron buenos porcentajes de similitud, sin embargo como se puede observar en la tabla 4.4, los resultados son parecidos a los conseguidos anteriormente con el modelo Error de salida, con porcentajes de similitud cercanos al 69%, por lo que se aplicó el mismo criterio, es decir el de parsimonia y se mantuvo a la ARMAX 2,2,2,2, como la seña escogida.

- ✓ **FIR:** De éste modelo se obtuvieron los más bajos porcentaje de similitud, por lo que no fueron consideradas ninguna de éstas estimaciones.

4.1.9 Función de Transferencia del Sistema.

Como ya se mencionó anteriormente, la mejor representación de la planta es la ARMAX 2,2,2,2 obtenida a través de MatLab. Como resultado final se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-0.24478 (s - 5.965)}{(s^2 + 0.4792s + 0.2397)} \quad (4.1)$$

4.2 Diseño del Controlador.

A partir de la función de transferencia encontrada anteriormente, se tiene que en lazo abierto la planta puede ser presentada mediante el siguiente gráfico:

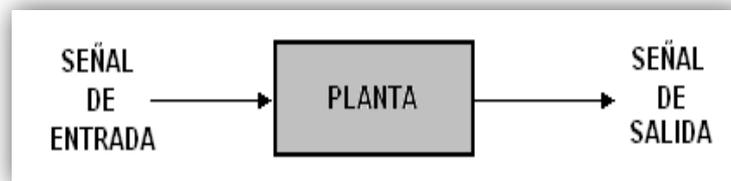


Figura 4.24 Sistema Lazo abierto.

Partiendo de éste hecho se procedió al diseño del controlador, haciendo uso de la herramienta *Sisotool* de Matlab, donde se realizó el análisis de la trayectoria de las raíces, y diversas pruebas hasta encontrar la función de transferencia del compensador. El esquema a utilizar (lazo cerrado), será el siguiente:

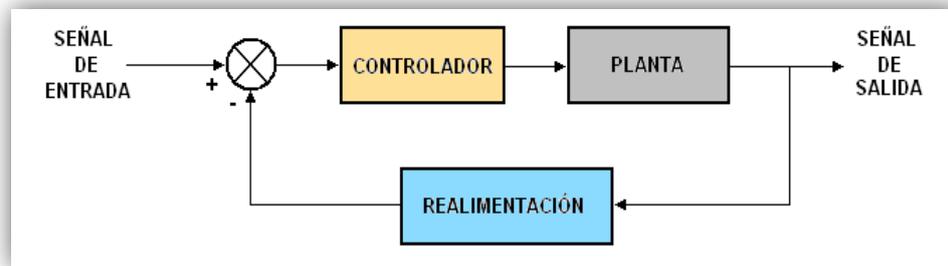


Figura 4.25 Sistema de lazo cerrado.

4.2.1 Análisis en lazo cerrado.

Teniendo que la función de transferencia encontrada anteriormente es:

$$G(s) = \frac{-0.2448s + 1.46}{s^2 + 0.4792s + 0.2397} \quad (4.2)$$

El cual puede ser expresado de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{-0.2448(s - 5.965)}{(s + 0.1198 + 0.3248i)(s + 0.1198 - 0.3248i)} \quad (4.3)$$

Se procedió a cargar desde la ventana de comandos de Matlab la función de transferencia de la planta con el Sisotool mediante el comando **sisotool(G)**, obteniendo:

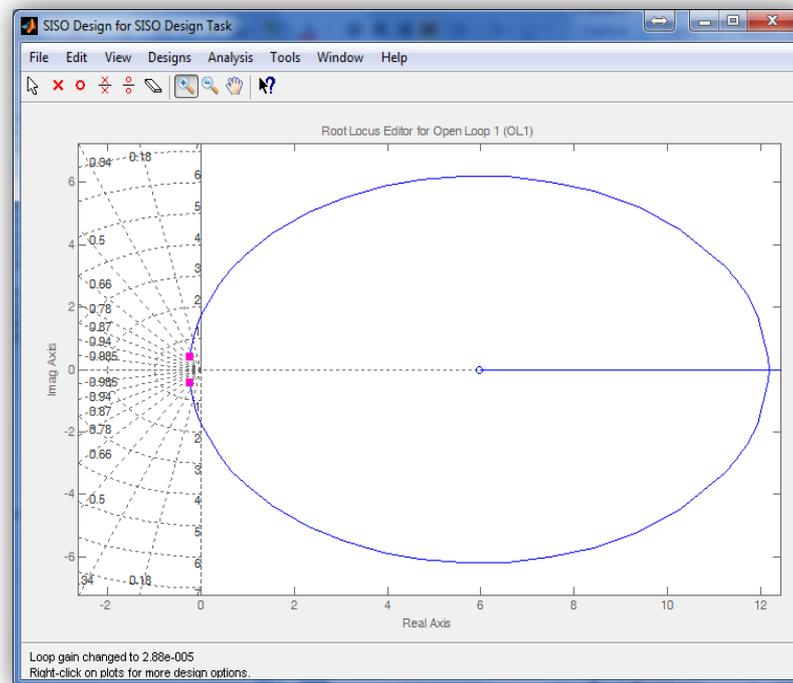


Figura 4.26 Trayectoria de las raíces.

Se observa los 2 polos (imaginarios con parte real negativa) de la función de transferencia, los cuales se encuentran muy cerca al origen, esto sumado al hecho de que se tiene también un cero a la derecha, son indicadores de que el sistema es de alto riesgo.

4.2.2 Metas de control.

La incorporación del controlador, tiene como objetivo minimizar el tiempo de estabilización, definir un nivel sobre nivel porcentual bajo, y

tener un porcentaje de error estacionario cercano a cero, a continuación se presentan las metas de control propuestas:

- ✓ mejorar el sobrenivel porcentual de 17.2% a 5%,
- ✓ mejorar el tiempo de estabilización (menor a 20 %),
- ✓ eliminar el error de estado estable.(menor a 0.01)

Las metas de control fueron escogidas bajo las limitantes del sistema, como se puede observar más adelante, el sistema rápidamente se vuelve inestable.

No se hace mejoras en el tiempo de levantamiento debido que es un buen tiempo para el sistema bajo estudio, el cual es un sistema electro-mecánico.

4.2.3 Obtención del controlador.

Los pasos para el diseño del controlador fueron los siguientes:

1. Se escoge el modelo de la estructura de lazo cerrado, en el diagrama de bloque de Sisotool de lazo cerrado y se verifica que

cumpla las condiciones iniciales: $G=Planta$; $H=1$; $C=1$; $F=1$, como se muestra en la Figura 4.27.

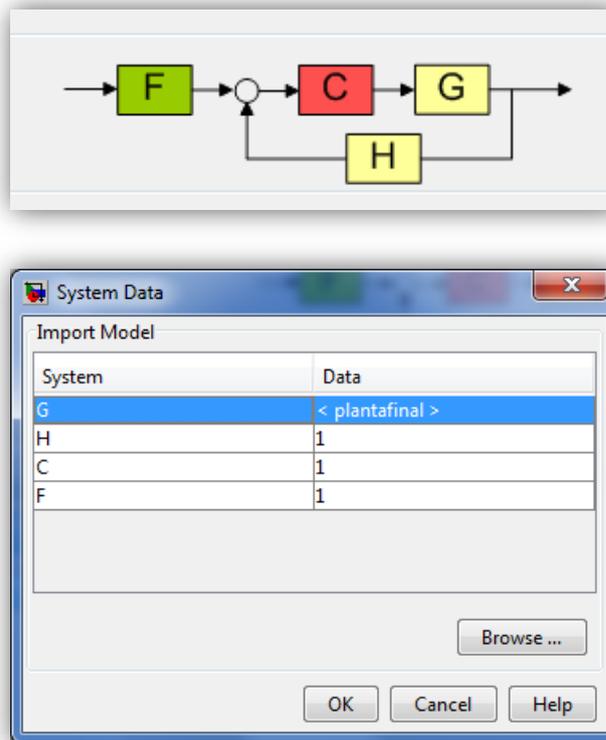


Figura 4.27 Modelo lazo cerrado y valores.

2. Para que el error de estado estacionario sea cero se agrega un integrador con frecuencia 0.
3. Se ingresa los requerimientos a alcanzar en el lugar geométrico de las raíces, que son el sobre nivel porcentual, (percent overshoot

(5)), y el tiempo de estabilización, (setting time (12)), como se muestra en la Figura 4.28.

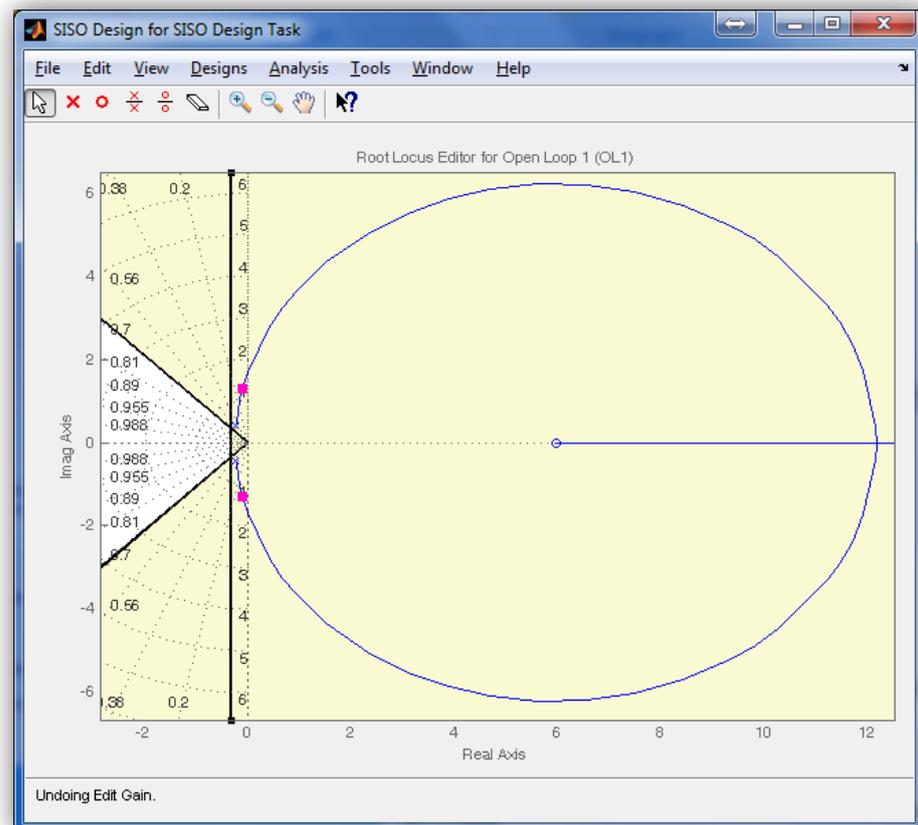


Figura 4.28 Trayectoria de las raíces con metas de control propuestas.

4. Se agregaron 2 ceros reales negativos, debido a que el sistema es inestable, luego con los dos requerimientos se busco coincidir con la trayectoria de raíces y ubicar las raíces complejas en su punto de intersección como se muestra en la Figura 4.29.

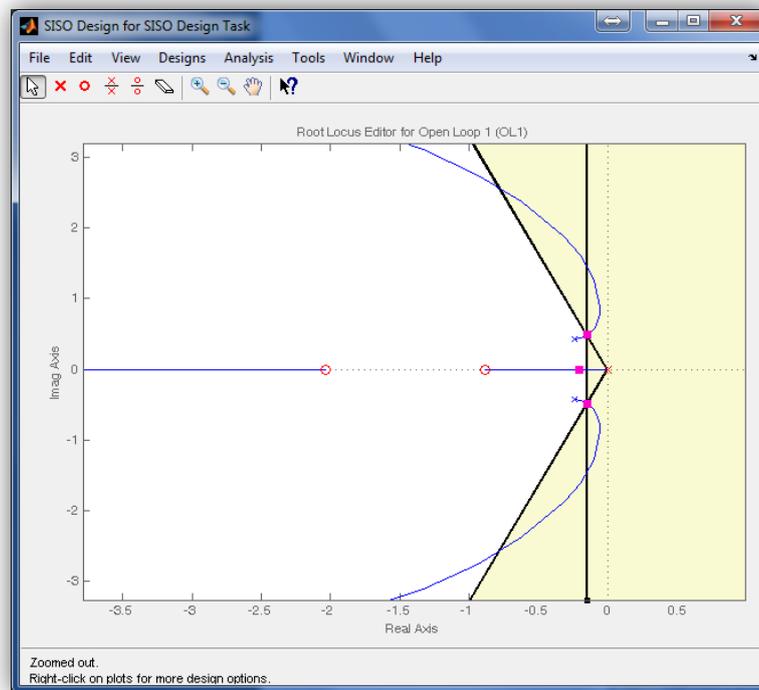


Figura 4.29 Ventana de diseño de Sisotool.

5. Se generó la respuesta al escalón en lazo cerrado, como se muestra en la Figura 4.30, y se observó que el tiempo de estabilización no se logró mejorar al valor deseado, sin embargo, el sobre nivel porcentual es casi nulo.

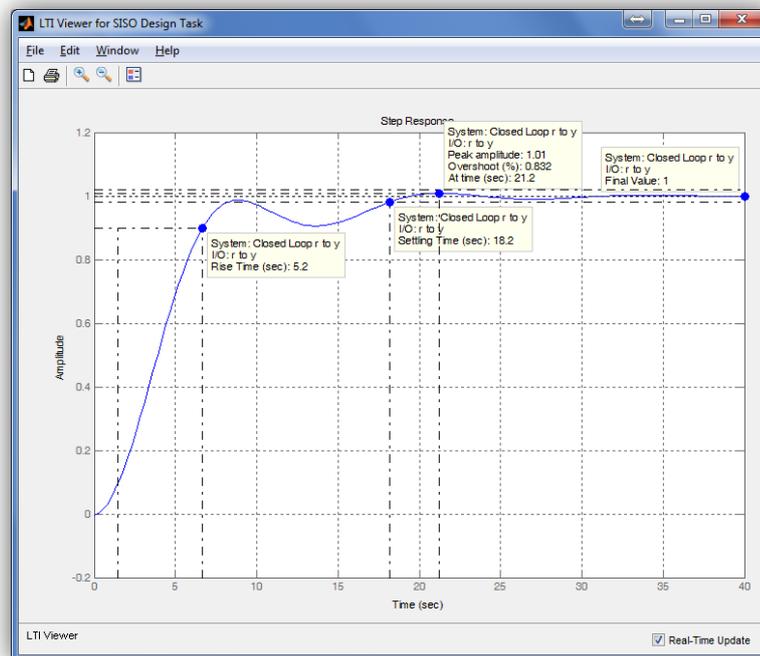


Figura 4.30 Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado.

6. La arquitectura de nuestro compensador queda como se muestra en la Figura 4.31 como un controlador PID, el cual permite controlar la planta según las metas planteadas. Se tiene la función de forma $k_p + k_i(1/s) + k_d(s)$, por tanto:

$$K_p=0.05797, K_i=0.0356 \text{ y } K_d=0.01988$$

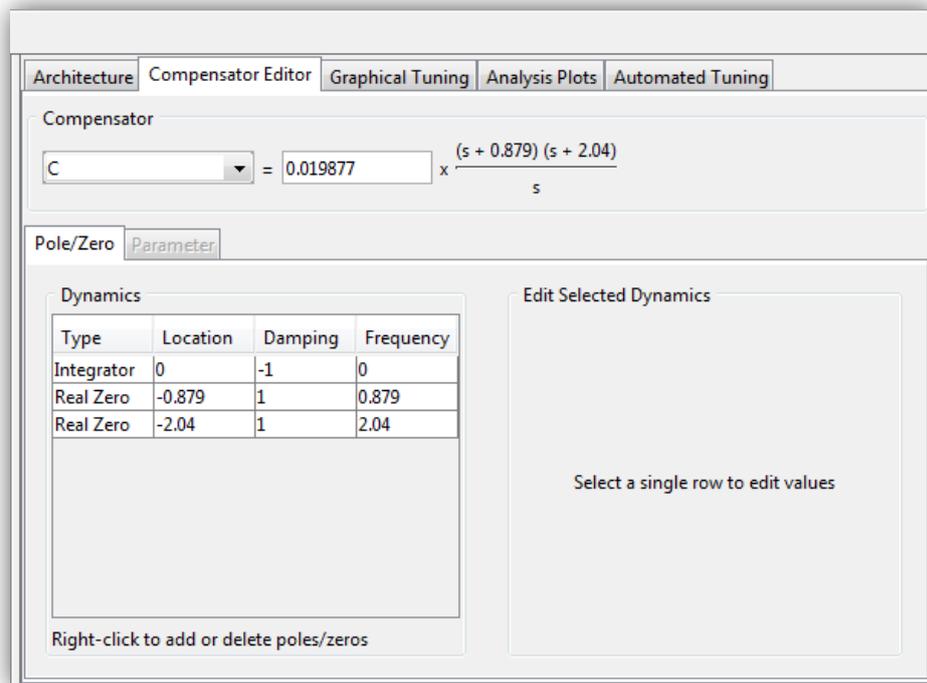


Figura 4.31 Función del Controlador PID en Sisotool.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR.

La meta final del proyecto es la implementación del controlador, el cual fue incorporado a la planta para verificar el comportamiento del sistema planta-controlador como tal, y comprobar así el cumplimiento de las metas planteadas. Esta implementación fue realizada mediante simulación en planta virtual así como implementación en la planta real, todo esto realizable con la ayuda de la herramienta Simulink de Matlab.

5.1 Resultados y ajustes previos.

De los análisis realizados e información obtenida en el desarrollo de la presente tesina, se obtuvo que:

- ✓ la función de transferencia de la planta, está dada por (4.1):

$$G(s) = \frac{-0.24478 (s - 5.965)}{(s^2 + 0.4792s + 0.2397)} \quad (5.1)$$

- ✓ la función de transferencia del controlador PID, está dada por cualquiera de las siguientes expresiones:

$$C(s) = \frac{0.01988s^2 + 0.05797s + 0.0356}{s} \quad (5.2)$$

$$C(s) = \frac{0.01988(s + 0.879)(s + 2.04)}{s} \quad (5.3)$$

$$C(s) = 0.01988s + 0.05797 + \frac{0.0356}{s} \quad (5.4)$$

- ✓ los parámetros del controlador, en base de la función (5.4) son:

$$K_p = 0.05797 \quad (5.5)$$

$$K_I = 0.0356 \quad (5.6)$$

$$K_D = 0.01988 \quad (5.7)$$

El sistema planta-controlador, expresado como diagrama de bloques, con una realimentación unitaria, se indica a continuación en la Figura 5.1:

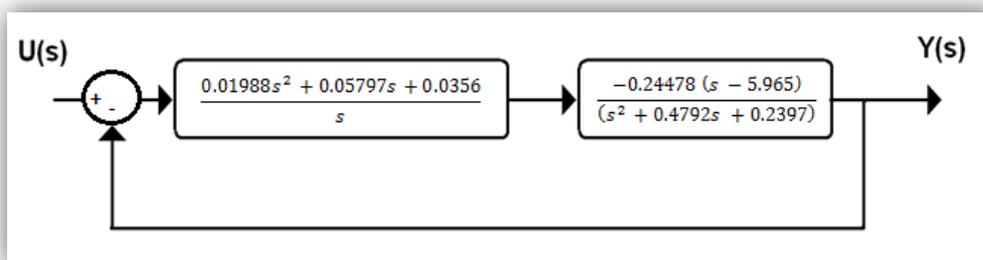


Figura 5.1 Diagrama de bloque del sistema.

5.2 Implementación en planta virtual.

A partir del diagrama de bloques indicado arriba, el cual es un esquema de lazo cerrado, se realizará un esquemático como se indica en la Figura 5.2 el cual está diseñado en Simulink y es el que permitirá realizar las pruebas del sistema.

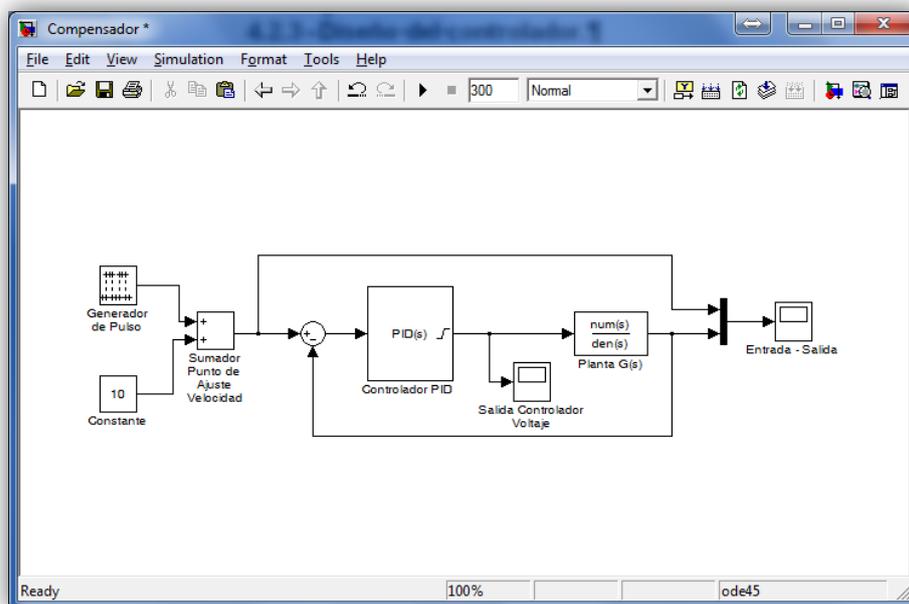


Figura 5.2 Diagrama esquemático en lazo cerrado para simulación con planta virtual.

El funcionamiento del esquemático de la Figura 5.2 se indica a continuación: se genera un tren de pulsos de 0 a 10 kph el cual es sumado a un valor constante de 10 kph, haciendo que la velocidad tome los valores o de 10 kph o de 20 kph, donde esta velocidad será para las pruebas la velocidad de ajuste (setpoint). Este valor ingresa al controlador PID ajustado con los valores (5.5) al (5.7), pasan a la planta virtual la cual tiene la función de transferencia (5.1) para entregar una velocidad sostenida, cumpliendo de esta manera un sobre-nivel

porcentual y un tiempo de estabilización establecido en las metas propuestas, lo cual se observa en las Figuras 5.3 y 5.4, a continuación:

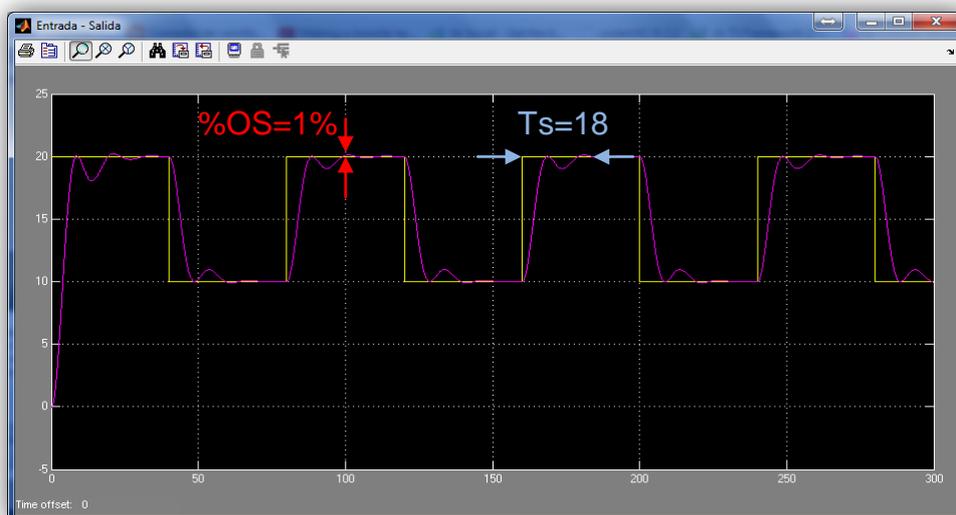


Figura 5.3 Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema en lazo cerrado simulado.

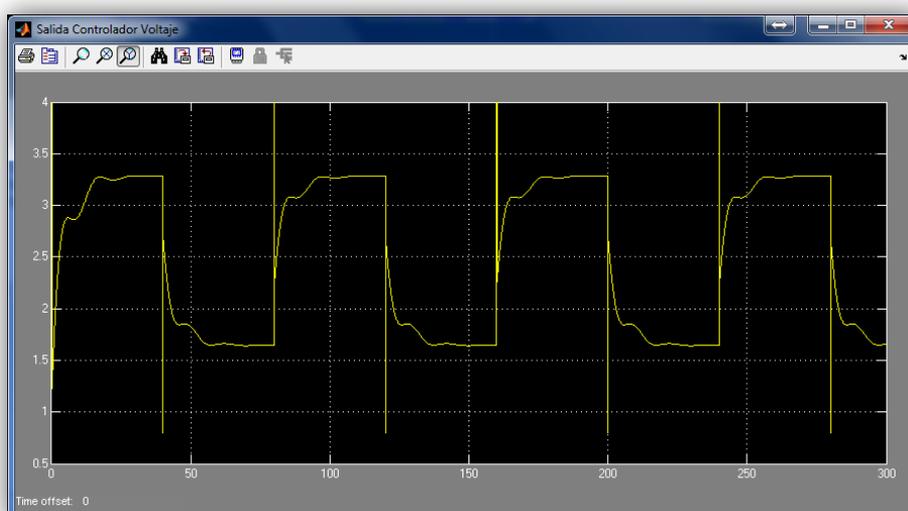


Figura 5.4 Salida (en V) de la señal del controlador PID.

Cabe mencionar el tipo de respuesta generada como lazo abierto del sistema, según esquemático de la Figura 5.5 con sus respuestas bosquejadas en la Figura 5.6, a continuación:

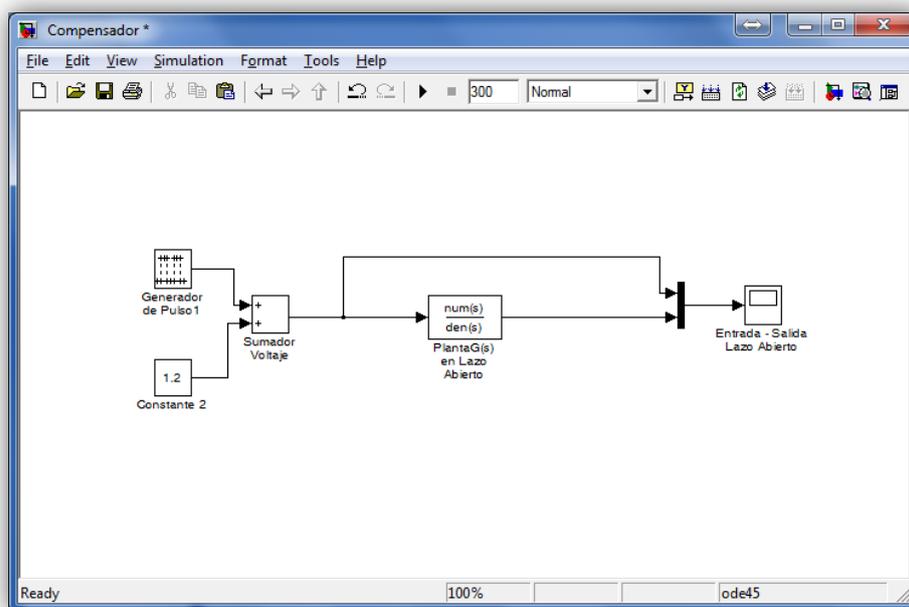


Figura 5.5 Diagrama esquemático en lazo abierto para simulación con planta virtual.

Comparando la simulación entre lazo abierto y lazo cerrado, se observó que el compensador si mejoró el comportamiento de la planta. La salida del sistema presenta un sobre-nivel porcentual muy bajo, menos del 1%, aunque su tiempo de estabilización se mantiene similar en 18.2 segundos, tal como se indica en la Figura 5.3.

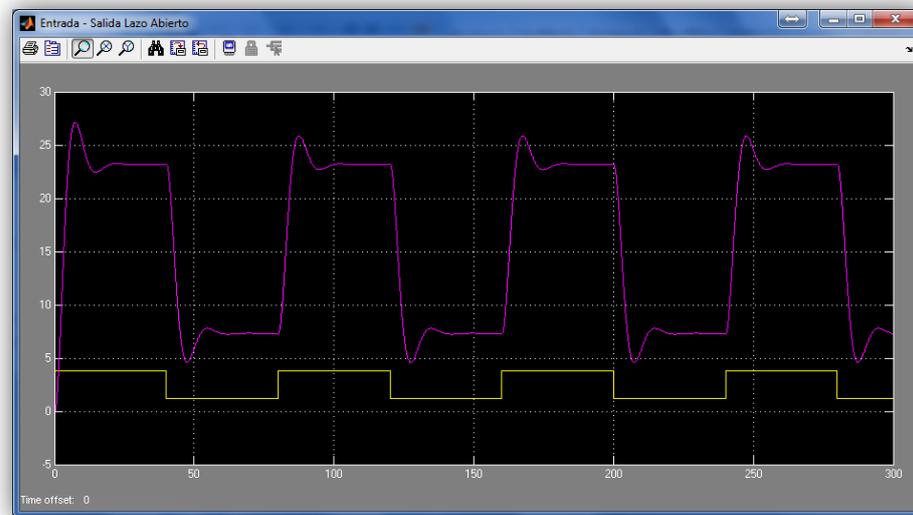


Figura 5.6 Entrada (amarillo, en V) / Salida (magenta, en kph) de la planta simulada en lazo abierto.

5.3 Implementación en planta real.

A partir del esquema de la Figura 5.2, se realizó un nuevo esquemático como se indica en la Figura 5.7 el cual está diseñado en Simulink y fue el que permitió realizar las pruebas del sistema en base a un tren de pulsos que simule los valores de ajuste de la velocidad. Se cambió la función de transferencia por un bloque de adquisición con la planta real como tal, se incluye en la Figura 5.8 el esquemático que se encuentra dentro del subsistema Planta real.

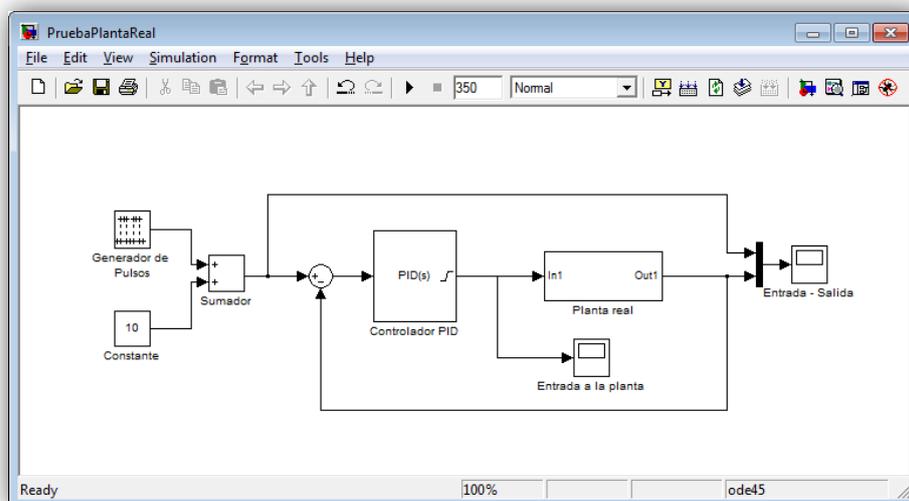


Figura 5.7 Diagrama esquemático en lazo cerrado con adquisición de datos en tiempo real.

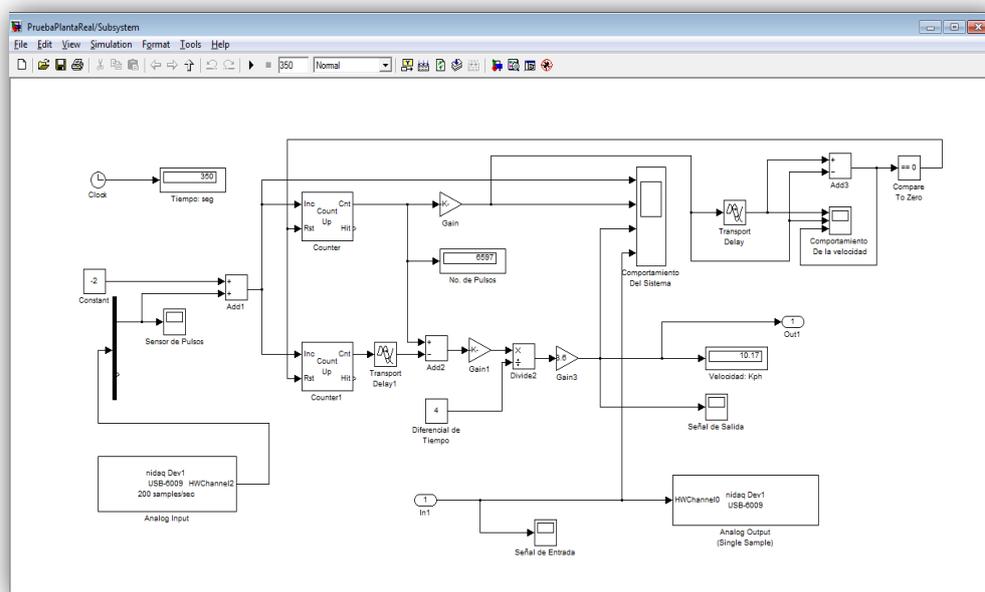


Figura 5.8 Diagrama esquemático del subsistema Planta real.

El funcionamiento del esquemático de la Figura 5.7 se indica a continuación: se genera un tren de pulsos de 0 a 10 kph más un valor mínimo de 10 kph, permitiendo oscilar la velocidad de ajuste o en 10 kph o en 20 kph. Este valor ingresa al controlador PID ajustado con los valores (5.5) al (5.7), y se limita los márgenes de saturación de la salida del controlador PID entre 1.0 V y 3.8 V, que son los rangos aceptables de entrada de nuestra planta real. En la Figura 5.9 se observa la salida del controlador PID que alimenta a la planta real el cual se mantiene dentro de los márgenes antes mencionados. La salida del sistema debiera tener un sobre-nivel porcentual muy bajo, menor del 1%, pero lo que observamos en la Figura 5.10, la cual representa la entrada/salida del sistema con planta real, es la gráfica producto de las características del tipo de sensor empleado, del retardo ocasionado por el procesamiento de los datos capturados, del ruido de la tarjeta electrónica, y de las perturbaciones inherentes en un sistema real, tales como fricción, rodamientos y desbalance del neumático. Sin embargo, se puede apreciar que la estructura de la salida del sistema real se comporta de manera muy similar al del sistema simulado, logrando así cumplir un bajo sobre-nivel porcentual y un tiempo de estabilización dentro de los parámetros de las metas planteadas, logrando de esta manera mantener una velocidad sostenida durante un período de tiempo.

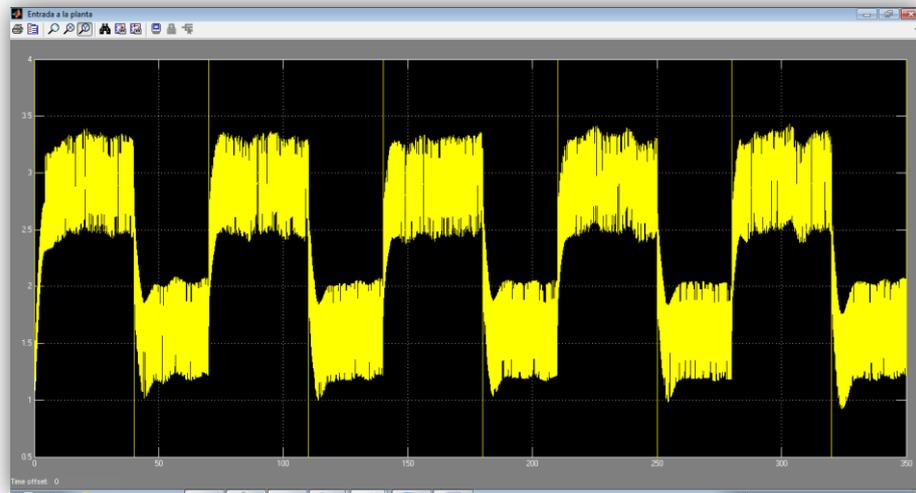


Figura 5.9 Salida (en V) de la señal del controlador PID.

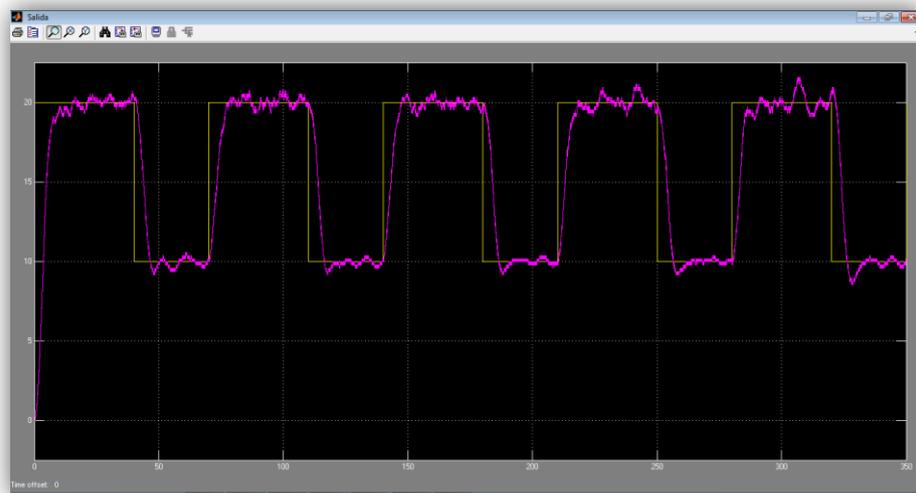


Figura 5.10 Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema con planta real.

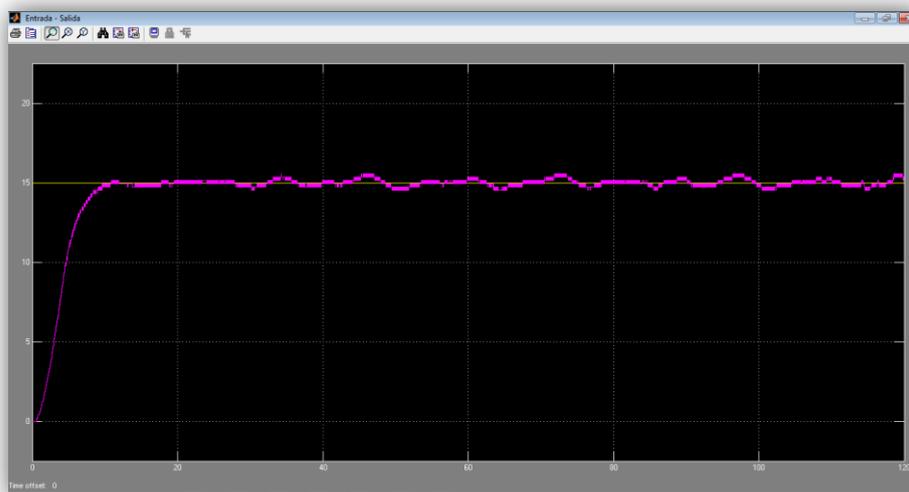


Figura 5.12 Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, aplicando presión estable con el rodillo.

Se prueba finalmente la condición del controlador de mantener la velocidad estable a pesar de la aplicación variable de la presión sobre el neumático, con el rodillo de entrenamiento, se observa en la Figura 5.13, la eficaz operabilidad del controlador, en donde se simula cambios en la pendiente del terreno mediante la aplicación de variaciones de presión al neumático con el rodillo (mayor presión pendiente creciente y menor presión pendiente decreciente, línea verde) la velocidad (línea magenta) tiende siempre a estabilizarse. Cabe recalcar que en esta prueba fue realizada sin saturar al sistema, como es el caso de una velocidad de 15 kph.

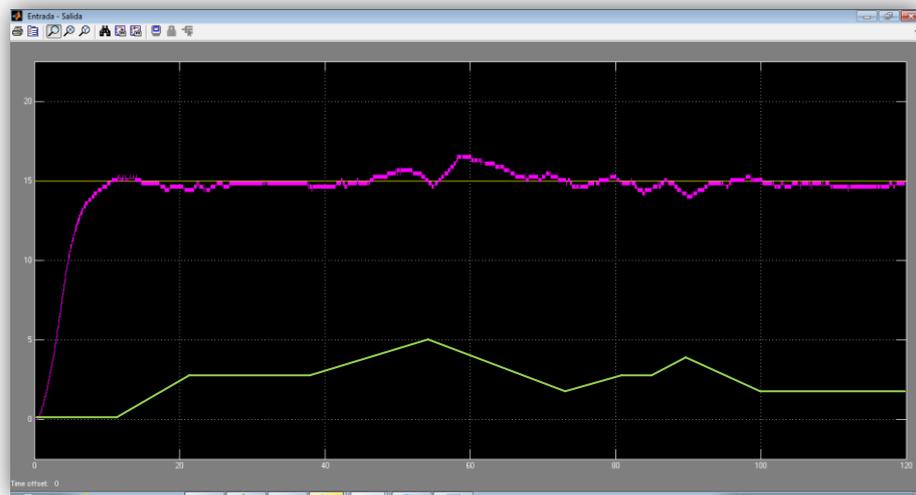


Figura 5.13 Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, variando la presión del rodillo (verde, #de vueltas).

CONCLUSIONES

1. A partir de los resultados obtenidos durante el experimento, se concluye que se cumplió con el objetivo general del proyecto, debido a que se encontró un modelo matemático de una bicicleta eléctrica, haciendo uso de la técnica de identificación de sistemas como se detalló en los capítulos tres y cuatro del presente documento; además de esto se logró diseñar e implementar con éxito un controlador para la planta .
2. Como se puede observar en el capítulo cuatro, después de los diferentes análisis realizados, se logró encontrar varias estimaciones de la función de transferencia de la planta con porcentajes de similitud mayores al 60%, luego de realizar el análisis residual y observar la respuesta al escalón para cada una de las estimaciones y aplicando el criterio de parsimonia, se escogió a la ARMAX 2,2,2,2; q posee un 65,54 % de

3. similitud, comprobando así la validez de la técnica de identificación de sistemas sobre un proceso real.

4. Como parte de la interfaz física entre la planta y la computadora portátil, se utilizó con éxito la tarjeta de adquisición de datos *NI DAQ USB-600*, implementándose así un sistema de adquisición que demostró ser eficiente durante todo el experimento, brindando la capacidad de capturar la señal proveniente del sensor magnético, ubicado en la rueda trasera de la bicicleta, y a su vez ingresar la señal de entrada a la planta, todo esto con una excelente resolución, sin ninguna contribución de ruido significativa, y permitiendo trabajar en tiempo real.

5. Como fue comentado en el capítulo tres de éste documento, se logró diseñar en simulink un bloque esquemático que permitió procesar con éxito la señal proveniente del sensor magnético, convirtiéndola en otra señal que refleja el comportamiento de la velocidad de la bicicleta, obteniendo así la señal de salida del sistema; dicho esquemático fue utilizado durante todo el experimento.

6. Es importante mencionar que si bien los valores de la señal de salida del sistema si reflejan el comportamiento de la velocidad, producto del procesamiento de la señal del sensor, se agregó retardo al sistema, y se

7. obtuvo señales de salida con mediana resolución en algunos casos. Por lo que se concluye que tanto el uso del sensor magnético, y el procesamiento de la señal generada por el mismo, es viable solo para fines académicos.

8. Se demostró la validez de las técnicas de diseño de controladores basadas en el uso del software Matlab, como se puede observar en el capítulo cuatro donde se detalla el procedimiento seguido para diseñar el controlador de la planta, y en el capítulo cinco donde se presentan los resultados de la implementación de dicho controlador los cuales son satisfactorios.

RECOMENDACIONES

1. Emplear sensores tomando en cuenta su “costo-beneficio” y los resultados esperados del proceso de identificación, ya que es un punto esencial para una buena calidad de muestreo de datos en tiempo real. Es posible mejorar la precisión con otro tipo de sensor que entregue un valor referencial de voltaje al medir la rotación de una rueda.
2. En base a lo observado durante el experimento, se observó que el proceso realizado para obtener la señal de velocidad de la bicicleta, no era quizá el más eficiente, ya que agregaba un cierto retardo al sistema, por lo que se recomienda adquirir directamente la señal de salida con otro tipo de sensor, como por ejemplo un velocímetro.

3. Incluir otras variables de la planta, como frenado, nivel de carga de la batería, cadencia, asistencia en el pedaleo y como factores aerodinámicos, con la finalidad de conseguir mejores resultados en la identificación y así poder diseñar también un controlador de mayor precisión y eficiencia.
4. Utilizar un controlador más complejo, como del tipo predictivo, con la finalidad de ser implementado en las pruebas con la planta real y comparar los resultados con los que se obtuvo en el presente experimento.
5. En lo que respecta a la etapa de diseño de la señal de entrada, es recomendable asegurarse de estar capturando correctamente la entrada y la salida del sistema, puesto que de no ser así, no se obtendrán los resultados deseados, como fue el caso de éste experimento, donde se obtuvo señales de salida inaceptables, debido a problemas con el procesamiento de la señal generada por el sensor magnético (ver numeral 3.1.4), generando una demora en la finalización del proyecto.
6. Es importante mencionar también que durante el diseño de la entrada del sistema, específicamente las señales PRBS y Multi-sinusoidal, se prefirió el uso de las *Guidelines*, en el Input Design GUI, debido al tipo de información preliminar que se obtuvo, motivo por el cual no se ahondó.

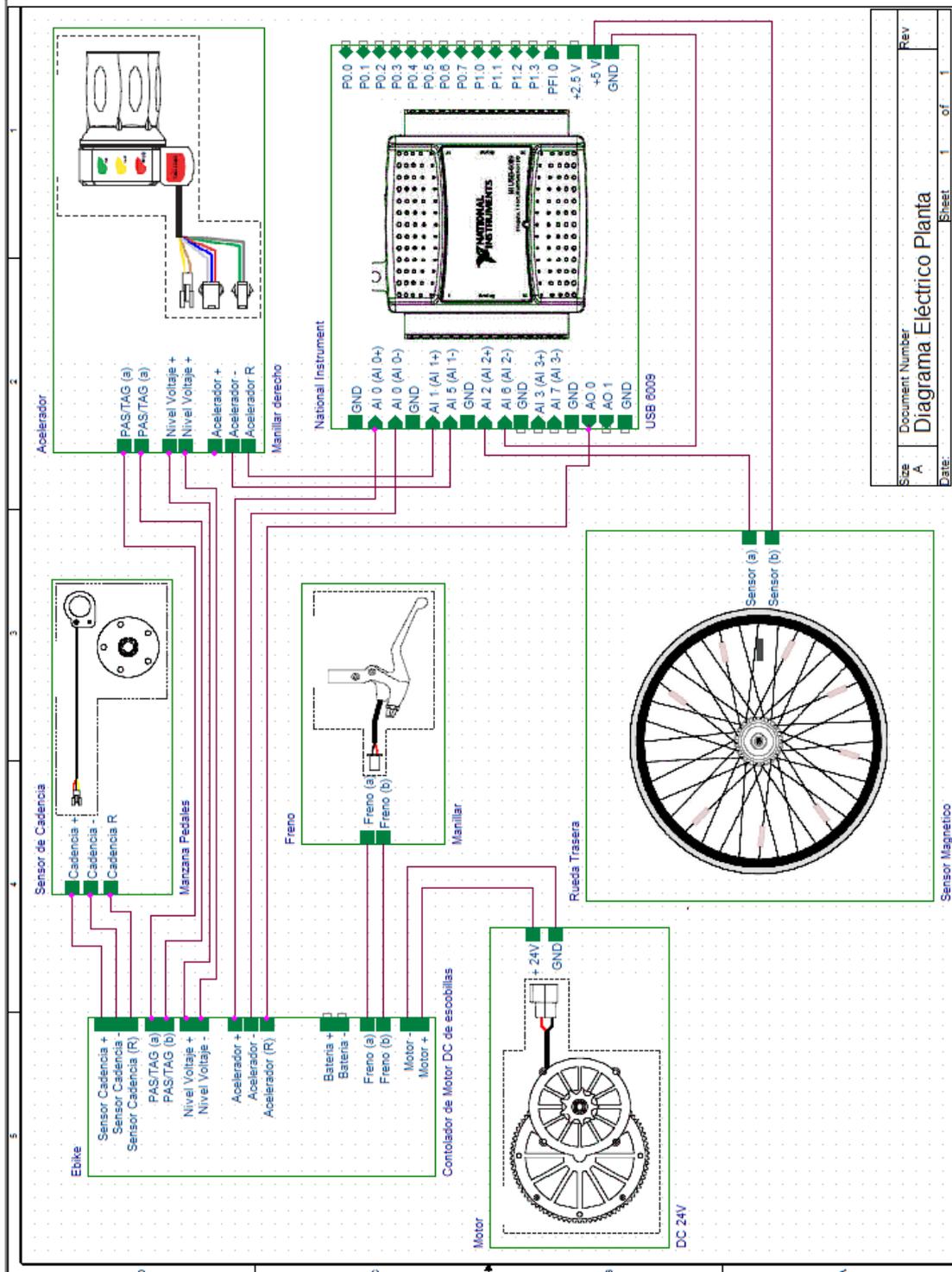
en el uso de la opción *Direct Specification*, por lo que se recomienda realizar pruebas con dicha opción de diseño, con la finalidad de comprobar si existen mejores resultados a los obtenidos.

7. A partir de lo observado en la etapa de análisis no paramétrico, se recomienda tener claro los conceptos teóricos acerca de los indicadores que son parte del análisis de correlación, con la finalidad de interpretar correctamente los resultados y agilizar el desarrollo del experimento.
8. Se recomienda tener claros los criterios de selección al momento de realizar el análisis paramétrico, especialmente el concepto de parsimonia, debido que puede darse que se encuentren estimaciones con un mejor porcentaje de similitud que otras, pero que no representan un beneficio para el proceso que justifique su selección, como fue el caso del presente experimento, por lo que se planteó la premisa de escoger una estimación con mayor número de coeficientes que la "ARMAX 2,2,2,2", solo si su porcentaje de similitud fuera por lo menos diez por ciento mayor; sin embargo, al no encontrarse ninguna estimación con dichas características, se mantuvo a la ya antes mencionada.
9. Se recomienda tener conocimiento en el uso de las herramientas gráficas utilizadas especialmente del software *Matlab*, debido a que de no ser así, se eleva considerablemente el nivel de dificultad del experimento y se incrementa el tiempo de realización del mismo.

ANEXOS

Anexo A

Diagrama eléctrico de la planta y sistema de adquisición de datos



BIBLIOGRAFIA

- [1]. Wikipedia, "Regulador Centrífugo",
http://es.wikipedia.org/wiki/Regulador_centrifugo, fecha de consulta
Mayo 2013.
- [2]. Wikipedia, "Control de velocidad",
http://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_velocidad, fecha de consulta
Mayo 2013.
- [3]. Wikipedia, "Velocidad de Crucero",
http://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_crucero, fecha de consulta Mayo
2013.
- [4]. Imperial Web Pages, "1958 Imperial: What It's Like To Drive An Auto-
Pilot Car", <http://www.imperialclub.com/Articles/58AutoPilot/index.htm>,
fecha de consulta Mayo 2013.
- [5]. Ljung L., "System Identification: Theory for the User", Prentice Hall
Second Edition, 1999.
- [6]. Gevers M., "A PERSONAL VIEW ON THE DEVELOPMENT OF
SYSTEM IDENTIFICATION",

<http://perso.uclouvain.be/michel.gevers/PublisMig/C124.pdf>, fecha de consulta Mayo 2013.

- [7]. Dorf R., Bishop R., "Sistemas de Control Moderno", Pearson Prentice-Hall Décima Edición, 2010.
- [8]. Shahian B., Hassul M., "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall, 1993.
- [9]. Kuo B., "Sistemas de Control Automático", Prentice-Hall Hispanoamericana Séptima Edición, 1996.
- [10]. Ogata K., "Ingeniería de Control Moderna", Pearson Educación Tercera Edición, 1998.
- [11]. Ogata K., "Sistemas de Control en Tiempo Discreto", Pearson Educación Segunda Edición, 1996.
- [12]. Ljung L., "System Identification Toolbox™ User's Guide", http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident.pdf, fecha de consulta Mayo 2013.
- [13]. Ljung L, Glad T., "Modeling of Dynamic System", Prentice-Hall, 1994.
- [14]. Nise N., "Sistemas de Control para Ingeniería". CECSA Tercera Edición, 2002.
- [15]. National Instruments, "NI USB-6009 DAQ Multifunción de Bajo Costo de 14 Bits, 48 kS/s", <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987>, fecha de consulta Mayo 2013.

- [16]. Currie Technologies, “eZip Electric Powered Vehicles”,
<http://www.currietech.com/bicycle-online/ezip-trailz-df/>, fecha de
consulta Mayo 2013.
- [17]. Currie Technologies, “Owner’s Manual”,
[http://www.currietech.com/dealers/wiki/images/0/04/Owner%27s_Manual - Bicycles.pdf](http://www.currietech.com/dealers/wiki/images/0/04/Owner%27s_Manual_-_Bicycles.pdf), fecha de consulta Mayo 2013.
- [18]. Kurt Kinetic, “Road Machine”, <http://www.kurtkinetic.com/road-machine-p-198-l-en.html>, fecha de consulta Mayo 2013.
- [19]. Sigma, “BC 509”,
http://www.sigmasport.com/us/produkte/bikecomputer/topline_2009_wired/bc509/, fecha de consulta Mayo 2013.