



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Identificación y Diseño de un controlador para un sistema de Antenas  
Inteligentes basado en el Algoritmo Adaptativo RLS”

### **TESINA DE SEMINARIO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

Joel Alejandro Camba Verzola

Sara Andreina Villagómez Navarrete

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2012

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestro director, el MSc. César Martín Moreno por su valiosa colaboración para poder desarrollar con éxito el presente proyecto de graduación.

Un agradecimiento especial a nuestros padres, hermanos y a todas aquellas personas que siempre nos brindaron su apoyo y ayuda incondicional.

## DEDICATORIA

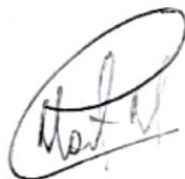
Dedicado a Dios sin cuya asistencia ni esta tesis, ni yo hubiéramos sido escritos, a mis padres por darme la existencia y apoyo permanente, a mis hermanos por su solidaridad manifiesta, a mis profesores por las enseñanzas impartidas y como expresión de gratitud de uno de sus discípulos, a mis tías por sus consejos sabios, a mi compañera de tesis por su colaboración y cooperación para la culminación de las metas que nos propusimos.

Joel Camba Verzola.

Dedico este proyecto a Dios por haberme dado la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de mi vida, a mi padre por haberme ayudado a no desfallecer en los momentos más difíciles, a mis hermanos quienes con su ejemplo y apoyo incondicional me ayudan a seguir adelante, en especial a mi madre que aunque físicamente no esté conmigo, el recuerdo de sus palabras de aliento y ejemplo de mujer fuerte me han dado la guía espiritual y emocional. A mi compañero de tesis que con entusiasmo, esfuerzo y apoyo mutuo hemos podido culminar exitosamente la carrera.

Sara Villagómez Navarrete.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



**MSc. Cesar Martin Moreno**

PROFESOR DEL SEMINARIO



**MSc. María Antonieta Álvarez**

PROFESOR DELEGADO

DEL DECANO

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



---

Joel Camba V.



---

Sara Villagómez N.

## **RESUMEN**

La identificación de sistemas trata de la estimación de modelos de sistemas dinámicos a partir de los datos observados mediante mediciones y experimentos de cualquier planta, a pesar que este proceso es poco utilizado en nuestro medio, es una teoría que ha tomado mucha fuerza durante los últimos años.

En el Primer Capítulo, se encuentra una breve reseña historia de la importancia de la identificación de sistemas, el cual toma diversas áreas del conocimiento (ingenierías, economía, biotecnología, etc.). Así como la introducción al conocimiento de las Antenas Inteligentes o Smart Antennas.

En el Segundo Capítulo, se muestran los recursos que se necesitan para proponer una solución viable con bases teóricas, partiendo de los conocimientos adquiridos durante el proceso de aprendizaje.

En el Tercer Capítulo, se presenta la parte práctica y el diseño de la solución, en la cual, para realizar la identificación del sistemas se trabaja en una planta virtual de antenas inteligentes, donde se diseñan diferentes tipos de entrada escogiendo la más adecuada para continuar con la identificación paramétrica de la planta.

En el Cuarto Capítulo, se muestra la implementación o identificación paramétrica utilizando la herramienta Ident de Matlab donde la mejor señal de entrada es ingresada para ser estudiada por los diferentes tipos de métodos, escogiendo así en base a varios criterios, el más adecuado o el que mejor se adapta a la planta.

Por último, en el Quinto Capítulo, se implementa el compensador de la planta utilizando la herramienta SISOTOOL de Matlab, realizando las pruebas necesarias para demostrar la validez del porqué la elección de este tipo de controlador.



# INDICE GENERAL

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| AGRADECIMIENTO .....                | II           |
| DEDICATORIA .....                   | III          |
| TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....      | V            |
| DECLARACIÓN EXPRESA .....           | VI           |
| RESUMEN.....                        | VII          |
| INDICE GENERAL.....                 | IX           |
| ABREVIATURAS .....                  | XIV          |
| INDICE DE FIGURAS.....              | XVI          |
| INDICE DE TABLAS .....              | XIX          |
| INTRODUCCIÓN .....                  | XX           |
| <br><b>CAPITULO 1.....</b>          | <br><b>1</b> |
| RESEÑA HISTORICA.....               | 1            |
| 1.1 Identificación de sistemas..... | 1            |
| 1.2 Teoría de las Antenas.....      | 3            |
| 1.3 Antenas Inteligentes .....      | 4            |
| 1.4 Algoritmo RLS.....              | 7            |
| <br><b>CAPITULO 2.....</b>          | <br><b>9</b> |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                      | 9  |
| 2.1 Clasificación de Antena .....                              | 9  |
| 2.1.1 Antenas según su forma de radiación .....                | 10 |
| 2.1.2 Antenas según su geometría o construcción.....           | 11 |
| 2.2 Diagrama de Radiación de una antena. ....                  | 12 |
| 2.3 Generalidades sobre Antenas Inteligentes .....             | 13 |
| 2.3.1 Ventajas y Desventajas de las Antenas Inteligentes ..... | 16 |
| 2.3.2 Tipos de Antenas Inteligentes .....                      | 17 |
| 2.3.2.1 Haz Conmutado.....                                     | 18 |
| 2.3.2.2 Haz de Seguimiento .....                               | 19 |
| 2.3.2.3 Haz Adaptativo .....                                   | 20 |
| 2.4 Antenas Adaptivas.....                                     | 21 |
| 2.5 Algoritmos Adaptativos .....                               | 23 |
| 2.5.1 Algoritmos basados en la señal de referencia.....        | 23 |
| 2.5.2 Algoritmo Adaptativo Mínimo Cuadrado Recursivo RLS ..... | 24 |
| 2.5.3 Algoritmos adaptativos ciegos.....                       | 25 |
| 2.6 Identificación.....                                        | 26 |
| 2.6.1 ¿Qué es un modelo? .....                                 | 26 |
| 2.6.2 ¿Que es la Identificación? .....                         | 26 |
| 2.6.3 Tipos de Modelo .....                                    | 27 |
| 2.6.3.1 Modelos mentales .....                                 | 27 |
| 2.6.3.2 Modelos no paramétricos .....                          | 27 |
| 2.6.3.3 Modelos paramétricos o matemático.....                 | 28 |
| 2.6.3.3.1 Deterministas o Estocásticos.....                    | 28 |
| 2.6.3.3.2 Dinámicos o Estáticos .....                          | 28 |
| 2.6.3.3.3 Parámetros Distribuidos o Concentrados .....         | 29 |

|                                                                                           |                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.3.3.4                                                                                 | Tiempo Continuo o Tiempo Discreto .....                   | 29        |
| 2.6.4                                                                                     | Etapas a seguir para la identificación de un modelo ..... | 29        |
| 2.6.5                                                                                     | Métodos de Identificación.....                            | 30        |
| 2.6.5.1                                                                                   | Identificación no paramétrica.....                        | 31        |
| 2.6.5.1.1                                                                                 | Análisis de Respuesta transitoria .....                   | 31        |
| 2.6.5.1.2                                                                                 | Análisis de correlación.....                              | 31        |
| 2.6.5.1.3                                                                                 | Técnicas frecuenciales.....                               | 32        |
| 2.6.5.2                                                                                   | Identificación Paramétrica .....                          | 33        |
| 2.6.5.2.1                                                                                 | Modelo ARX .....                                          | 34        |
| 2.6.5.2.2                                                                                 | Modelo Output Error OE.....                               | 35        |
| 2.6.5.2.3                                                                                 | Modelo ARMAX.....                                         | 36        |
| 2.6.5.2.4                                                                                 | Modelo Box Jenkins (BJ).....                              | 36        |
| <b>CAPITULO 3</b>                                                                         | .....                                                     | <b>38</b> |
| <b>DISEÑO DEL MODELO BASE Y DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA PARA LA IDENTIFICACIÓN.....</b> |                                                           | <b>38</b> |
| 3.1                                                                                       | Análisis del Comportamiento de la planta.....             | 38        |
| 3.2                                                                                       | Diseño de la solución.....                                | 39        |
| 3.2.1                                                                                     | Bloque RLS. ....                                          | 40        |
| 3.2.2                                                                                     | Señal deseada. ....                                       | 41        |
| 3.2.3                                                                                     | Señal de entrada. ....                                    | 42        |
| 3.2.4                                                                                     | Bloque de pesos.....                                      | 43        |
| 3.2.5                                                                                     | Señal de salida.....                                      | 44        |
| 3.2.6                                                                                     | Bloque de fase. ....                                      | 46        |
| 3.2.7                                                                                     | Scope de la planta.....                                   | 47        |
| 3.3                                                                                       | Obtención del Tao dominante de la planta .....            | 50        |

|                                      |                                                             |           |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4                                  | Obtención del tiempo de muestreo máximo .....               | 53        |
| 3.4.1                                | Selección del tiempo de muestreo a utilizar .....           | 54        |
| 3.5                                  | Diseño de la señal de entrada .....                         | 55        |
| 3.5.1                                | Interfaz gráfica para el diseño de la señal de entrada..... | 55        |
| 3.5.2                                | Criterios de selección para la señal.....                   | 57        |
| 3.5.3                                | Diseño de la señal de entrada (PRBS).....                   | 58        |
| 3.5.4                                | Señal Multiseno .....                                       | 65        |
| 3.5.5                                | Análisis de la señal escogida .....                         | 69        |
| <b>CAPITULO 4</b>                    | .....                                                       | <b>75</b> |
| IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y PRUEBAS | .....                                                       | 75        |
| 4.1                                  | Proceso de Identificación.....                              | 75        |
| 4.2                                  | Respuesta total de la planta .....                          | 76        |
| 4.3                                  | Análisis con diferentes modelos de identificación.....      | 78        |
| 4.3.1                                | Método ARX Coeficientes 111 .....                           | 79        |
| 4.3.2                                | Método ARMAX Coeficientes 2200 .....                        | 80        |
| 4.3.3                                | Método BJ Coeficiente 22221 .....                           | 81        |
| 4.3.4                                | Método OE Coeficiente 221 .....                             | 82        |
| 4.4                                  | Análisis y elección del Modelo para la planta .....         | 83        |
| <b>CAPITULO 5</b>                    | .....                                                       | <b>85</b> |
| DISEÑO DEL CONTROLADOR               | .....                                                       | 85        |
| 5.1                                  | Proceso del diseño .....                                    | 85        |
| 5.2                                  | Herramienta Sisotool para el diseño del compensador .....   | 86        |
| 5.3                                  | Diseño del Controlador P para el modelo elegido.....        | 88        |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 5.4 Desplazamiento de la trayectoria de las raíces ..... | 89  |
| 5.5 Pruebas del compensador.....                         | 91  |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                     | 94  |
| ANEXOS.....                                              | 98  |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                        | 101 |

# ABREVIATURAS

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| $T_{ao}$ | Constante de tiempo.                                     |
| $y(t)$   | Señal de salida de la planta.                            |
| $y(z)$   | Señal de salida discreta.                                |
| $u(z)$   | Señal de entrada discreta.                               |
| $m(t)$   | Salida del controlador.                                  |
| $K_c$    | Ganancia del controlador.                                |
| $e(t)$   | Error entre la variable controlada y el punto de ajuste. |
| $T_r$    | Tiempo de levantamiento                                  |
| $T_s$    | Tiempo de asentamiento                                   |
| $T_p$    | Tiempo de pico                                           |
| ARX      | Auto-Regressive with exogenous inputs                    |
| ARMAX    | Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs     |
| OE       | Output error                                             |
| BJ       | Box Jekins                                               |
| FIR      | Respuesta finita al impulso                              |
| P        | Controlador proporcional.                                |
| PI       | Controlador proporcional integral.                       |
| PID      | Controlador proporcional integral derivativo.            |

|                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| PD                              | Controlador proporcional derivativo. |
| T                               | Período.                             |
| W                               | Rango de frecuencia.                 |
| $\tau_{\text{dom}}^{\text{Lo}}$ | Constante de tiempo mínima estimada. |
| $\tau_{\text{dom}}^{\text{Hi}}$ | Constante de tiempo máxima estimada. |
| DSP                             | Procesamiento digital de señales     |

# INDICE DE FIGURAS

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1. 1 COMPONENTES DE UNA ANTENA INTELIGENTE .....               | 5  |
| FIGURA 2. 1 DIFERENTES TIPOS DE ANTENAS.....                          | 10 |
| FIGURA 2. 2 COMPONENTES DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA.....               | 13 |
| FIGURA 2. 3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE ANTENAS INTELIGENTES .....         | 14 |
| FIGURA 2. 4 FORMAS DE RADIACIÓN DE LA ANTENA INTELIGENTE.....         | 15 |
| FIGURA 2. 5 SISTEMA DE HAZ CONMUTADO .....                            | 18 |
| FIGURA 2. 6 SISTEMA DE HAZ DE SEGUIMIENTO.....                        | 19 |
| FIGURA 2. 7 SISTEMA DE HAZ ADAPTATIVO .....                           | 20 |
| FIGURA 2. 8 ESTRUCTURA DE UN ARREGLO ADAPTATIVO DE ANTENAS .....      | 22 |
| FIGURA 2. 9 PROCESO DE IDENTIFICACIÓN SOBRE UN SISTEMA.....           | 27 |
| FIGURA 2. 10 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....  | 30 |
| FIGURA 2. 11 ESTRUCTURA ARX.....                                      | 34 |
| FIGURA 2. 12 ESTRUCTURA OUTPUT ERROR .....                            | 35 |
| FIGURA 2. 13 ESTRUCTURA ARMAX .....                                   | 36 |
| FIGURA 2. 14 ESTRUCTURA BOX JENKIS.....                               | 37 |
| FIGURA 3. 1 BLOQUE DEL FILTRO RLS.....                                | 40 |
| FIGURA 3. 2 BLOQUE DE LA SEÑAL DESEADA.....                           | 41 |
| FIGURA 3. 3 GRÁFICA POLAR DE LA SEÑAL DESEADA .....                   | 41 |
| FIGURA 3. 4 BLOQUE DE LA SEÑAL DE ENTRADA .....                       | 42 |
| FIGURA 3. 5 GRÁFICA POLAR DE LA SEÑAL DE ENTRADA.....                 | 43 |
| FIGURA 3. 6 BLOQUE DE PESOS .....                                     | 44 |
| FIGURA 3. 7 GRÁFICAS EN RESPUESTA DE FRECUENCIA Y MAGNITUD DE PESOS . | 44 |



|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 3. 8 BLOQUE DE SALIDA .....                                                             | 45 |
| FIGURA 3. 9 GRÁFICA POLAR DE LA SEÑAL DESEADA DESPUÉS DE PASAR POR EL<br>FILTRO RLS.....       | 46 |
| FIGURA 3. 10 BLOQUE DE FASE.....                                                               | 46 |
| FIGURA 3. 11 SCOPE DE LAS DIFERENTES SEÑALES DE LA PLANTA .....                                | 47 |
| FIGURA 3. 12 GRÁFICAS EN TIEMPO Y MAGNITUD DE DIFERENTES SEÑALES DE LA<br>PLANTA VIRTUAL ..... | 48 |
| FIGURA 3. 13 MODELO SIMULINK .....                                                             | 49 |
| FIGURA 3. 14 DIAGRAMA DE BLOQUE EN LAZO ABIERTO .....                                          | 50 |
| FIGURA 3. 15 RESPUESTA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA STEP=1 .....                                 | 50 |
| FIGURA 3. 16 RESPUESTA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA STEP=3.....                                  | 51 |
| FIGURA 3. 17 RESPUESTA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA STEP=5.....                                  | 51 |
| FIGURA 3. 18 RESPUESTA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA STEP=-5.....                                 | 52 |
| FIGURA 3. 20 RESPUESTA DE LA PLANTA A UNA ENTRADA STEP=-3.....                                 | 52 |
| FIGURA 3. 20 INTERFAZ GRÁFICA INPUT DESIGN GUI .....                                           | 56 |
| FIGURA 3. 21 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA PRIMERA ENTRADA PRBS .....                            | 59 |
| FIGURA 3. 22 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA SEGUNDA ENTRADA PRBS.....                             | 60 |
| FIGURA 3. 23 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA TERCERA ENTRADA PRBS.....                             | 61 |
| FIGURA 3. 24 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA CUARTA ENTRADA PRBS.....                              | 62 |
| FIGURA 3. 25 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA PRIMERA ENTRADA MULTISENO...                          | 65 |
| FIGURA 3. 26 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA SEGUNDA ENTRADA MULTISENO .                           | 66 |
| FIGURA 3. 27 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA TERCERA ENTRADA MULTISENO ..                          | 67 |
| FIGURA 3. 28 RESPUESTA DE LA PLANTA A LA CUARTA ENTRADA MULTISENO....                          | 68 |
| FIGURA 3. 29 RESPUESTA AL IMPULSO UTILIZANDO EL COMANDO CRA.....                               | 72 |
| FIGURA 3. 30 COMANDO CRA .....                                                                 | 72 |
| FIGURA 3. 31 RESPUESTA DE LA FRECUENCIA UTILIZANDO EL COMANDO SPA....                          | 74 |

|             |                                                      |    |
|-------------|------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4. 1 | INTERFAZ SYSTEM IDENTIFICATION TOOL .....            | 76 |
| FIGURA 4. 2 | INTERFAZ PARA IMPORTAR DATOS .....                   | 77 |
| FIGURA 4. 3 | VALIDACIÓN DE LA SEÑAL .....                         | 78 |
| FIGURA 4. 4 | RESPUESTA ARX 111 .....                              | 80 |
| FIGURA 4. 5 | RESPUESTA ARMAX 2200.....                            | 81 |
| FIGURA 4. 6 | RESPUESTA BJ 22221 .....                             | 82 |
| FIGURA 4. 7 | RESPUESTA OE 221 .....                               | 83 |
| FIGURA 4. 8 | DIAGRAMA EN SIMULINK DEL MODELO BJ22221.....         | 84 |
| FIGURA 4. 9 | RESPUESTA AL IMPULSO DEL MODELO BJ22221 .....        | 84 |
|             |                                                      |    |
| FIGURA 5. 1 | PRESENTACIÓN DE LA VENTANA SISOTOOL .....            | 86 |
| FIGURA 5. 2 | VENTANA DE CONTROL Y ESTIMACIÓN DEL SISOTOOL .....   | 87 |
| FIGURA 5. 3 | RESPUESTA DEL MODELO.....                            | 88 |
| FIGURA 5. 4 | DESPLAZAMIENTO DE LA TRAYECTORIA DE LAS RAICES ..... | 89 |
| FIGURA 5. 5 | SELECCIÓN DEL COMPENSADOR .....                      | 90 |
| FIGURA 5. 6 | RESPUESTA DEL MODELO CON COMPENSADOR.....            | 90 |
| FIGURA 5. 7 | DIAGRAMA EN SIMULINK MODIFICADO .....                | 91 |
| FIGURA 5. 8 | RESPUESTA AL ESCALÓN DEL SISTEMA .....               | 92 |

# INDICE DE TABLAS

|            |                                                                |    |
|------------|----------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 2. 1 | PROCESO DE IDENTIFICACIÓN SOBRE UN SISTEMA .....               | 34 |
| TABLA 3. 1 | RESULTADOS DEL STEP VS TAO .....                               | 53 |
| TABLA 3. 2 | SELECCIÓN DEL TIEMPO DE MUESTREO.....                          | 54 |
| TABLA 3. 3 | RESPUESTAS OBTENIDAS A LAS SEÑALES DE ENTRADAS PRBS .....      | 64 |
| TABLA 3. 4 | RESPUESTAS OBTENIDAS A LAS SEÑALES DE ENTRADAS MULTISENO ..... | 69 |
| TABAL 4. 1 | SIGNIFICADO DE VARIABLES.....                                  | 79 |

# INTRODUCCIÓN

El constante avance tecnológico, la mejora continua y las innovaciones en procesos, han hecho necesario el desarrollo de herramientas que ayuden a identificar y automatizar procesos mucho más complejos para su mejor supervisión.

Este trabajo dirige su esfuerzo principalmente hacia la mejora de la resolución de problemas de identificación de sistemas dinámicos y el control adaptativo de antenas de última generación, para la cual se usa una planta virtual.

Entre los objetivos planteados de "Identificación y Diseño de un controlador para un sistema de Antenas Inteligentes basado en el Algoritmo Adaptativo RLS" tenemos:

- ✓ Realizar un modelo virtual que simule un sistema de Antenas Inteligentes que sea capaz de responder a cambios de diferentes parámetros y perturbaciones.

- ✓ Estudiar una serie de algoritmos para realizar el descubrimiento de usuarios en la fase previa a la transferencia de información de un modo lo más eficiente posible.
- ✓ Demostrar que la Identificación del Sistema sea válido.

Se evalúa la dinámica de la planta sometiéndola a diferentes entradas de tipo escalón con lo que se obtendrá parámetros preliminares que ayudará a tener un conocimiento previo de la misma.

Con estos parámetros se construirá una señal de entrada la cual será evaluada de forma no paramétrica, de manera que nos brinde la mayor cantidad de información posible acerca de la planta. De esta manera escogeremos de entre todas, la señal idónea para la misma.

Las señales seleccionadas pasarán al estudio paramétrico de la Identificación, buscando el mejor modelo a identificar que se acople a los parámetros requeridos con la ayuda del IDENT de Matlab, el cual pueden ser: ARX, ARMAX, Box-Jenkins, Output- Error:

Una vez encontrado el mejor modelo, con la herramienta SISOTOOL realizaremos las simulaciones respectivas para comprobar el rendimiento del sistema, validez del mismo y selección del compensador.

# CAPITULO 1

## RESEÑA HISTORICA

### 1.1 Identificación de sistemas.

“La identificación de sistemas es la teoría y el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos basándonos en las entradas y salidas observadas.” [1]

Como teoría científica, los primeros intentos en modelar series de tiempo fueron usando técnicas Autoregresivas (AR). Pudiendo indicar que la técnica de Identificación de Sistemas está ligada a la rama del Control Automático, el cual está construido en base de técnicas estadística, como referencia los métodos de regresión lineal y no-lineal.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la Ingeniería de control. Estos modelos necesitan simular

el comportamiento real en los casos en que existe un conocimiento previo limitado de la estructura del sistema.

Los métodos de control óptimo se basan en los trabajos de físicos de los siglos XVII a XIX, entre los que destaca Euler, con su cálculo de variaciones. En el desarrollo de estos métodos se deben destacar los trabajos de Pontryagin, La Salle, Bellman y Kalman.

Kalman efectúa la resolución de los problemas de control óptimo cuadrático y lineal cuadrático gaussiano.

El término *Identificación de sistemas* fue acuñado por Lofti Zadeh [2] en 1962, como:

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

Puede decirse que la identificación de sistemas quedó establecida como un campo de investigación reconocido dentro del área de control automático a mediados de los sesenta: en el tercer congreso de la IFAC (International Federation of Automatic Control) en Londres, 1966 en el que fue presentado un artículo de visión general sobre identificación de sistemas (Eykhoff *et al.* 1966).

Un año después fue organizado el primer Symposium IFAC sobre identificación de sistemas en Praga. En la actualidad es el Symposium con una serie más larga de la IFAC. [1]

## **1.2 Teoría de las Antenas**

Las Antenas son las partes de los sistemas de telecomunicación específicamente diseñadas para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

La teoría de las antenas surge a partir de los desarrollos matemáticos de James C. Maxwell, en 1854 ( ecuaciones de Maxwell donde se unifican las fuerzas eléctricas y magnéticas), corroborados por los experimentos de Heinrich R. Hertz, en 1887, (efecto fotoeléctrico y de la propagación de las ondas electromagnéticas) y los primeros sistemas de radiocomunicaciones de Guglielmo Marconi en 1897 (ondas electromagnéticas para la comunicación telegráfica).

La primera comunicación transoceánica tuvo lugar en 1901, desde Cornualles a Terranova. En 1907 ya existían servicios comerciales de comunicaciones.

Desde la invención de Marconi, hasta los años 40, la tecnología de las antenas se centró en elementos radiantes de hilo, a frecuencias hasta UHF. Inicialmente se utilizaban frecuencias de transmisión entre 50 y 100 kHz, por lo que las antenas eran pequeñas comparadas con la longitud de onda. Tras el descubrimiento del tríodo por De Forest, se pudo empezar a trabajar a frecuencias entre 100 kHz y algunos MHz, con tamaños de antenas comparables a la longitud de onda.



A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron nuevos elementos radiantes (como guías de ondas, bocinas, reflectores, etc). Una contribución muy importante fue el desarrollo de los generadores de microondas (como el magnetrón y el klystron) a frecuencias superiores a 1 GHz.

En las décadas de 1960 a 1980 los avances en arquitectura y tecnología de computadores tuvieron un gran impacto en el desarrollo de la moderna teoría de antenas.

Los métodos numéricos se desarrollaron a partir de 1960 y permitieron el análisis de estructuras inabordables por métodos analíticos. Se desarrollaron métodos asintóticos de baja frecuencia (método de los momentos, diferencias finitas) y de alta frecuencia (teoría geométrica de la difracción GTD, teoría física de la difracción PTD).

En el pasado las antenas eran una parte secundaria en el diseño de un sistema, en la actualidad juegan un papel crítico. Asimismo en la primera mitad del siglo XX se utilizaban métodos de prueba y error, mientras que en la actualidad se consigue pasar del diseño teórico al prototipo final sin necesidad de pruebas intermedias. [3]

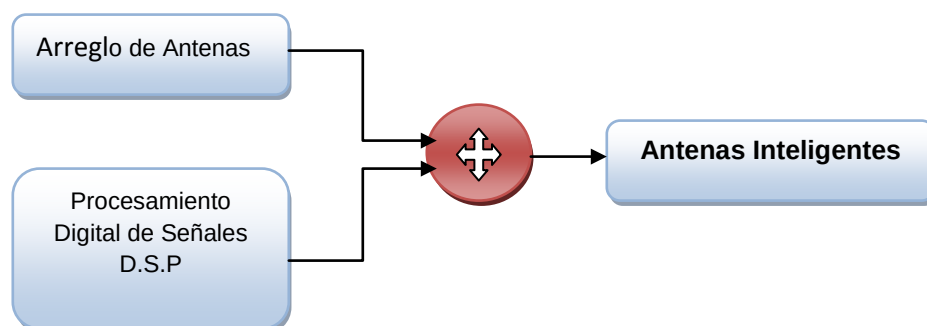
### **1.3 Antenas Inteligentes**

La idea de usar múltiples antenas y la innovación en el procesamiento de la señal para tener celdas más inteligentes ha existido durante muchos años. De hecho, ya se han aplicado variaciones de sistemas

de antenas inteligentes relativamente costosos en sistemas Militares de defensa. Hasta años recientes, las barreras de costo han impedido su uso en sistemas comerciales. Con la llegada de poderosos procesadores (DSPs), procesadores de propósito general, así como las técnicas de procesamiento de señal basadas en software, ha hecho práctico el uso de las antenas inteligentes para los sistemas de comunicaciones celulares.

La demanda del incremento de capacidad de redes inalámbricas ha motivado la reciente búsqueda hacia el desarrollo de algoritmos y estándares que exploten el espacio de manera selectiva.

Una antena inteligente es la combinación de un arreglo de antenas con una unidad de procesamiento digital de señales (DSP) que optimiza los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno (Figura 1.1). Es aquella que en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directos enfocado hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento.



**Figura 1. 1 Componentes de una antena inteligente**

Antenas Inteligentes o Smart Antennas (por su nombre en Ingles) han demostrado su eficacia para la degradación que causa la interferencia cocanal especialmente en las áreas de traslape de las áreas de cobertura.

El principio básico del funcionamiento de las antenas inteligentes es que cada antena recibe una señal separada y definida. Dependiendo de cómo está configurado el sistema inalámbrico, el receptor puede usar una señal para mejorar la calidad de otra señal, o podría combinar los datos de señales múltiples para ampliar el ancho de banda.

La señal que recibe la antena es una señal de radiofrecuencia (RF) sin procesar. Esta RF se encamina inicialmente a circuitos que la manejan con una señal analógica. Después de procesamiento inicial, la RF se convierte en una señal digital que luego se envía al dispositivo como una cadena de datos. Los dispositivos de la antena procesan y aplican los conceptos inteligentes en esta señal digital.

En cuanto a los cambios debidos a la introducción de las antenas inteligentes en un sistema móvil, por ejemplo, se supondrá una reducción en el número de estaciones base necesaria para dar cobertura a una zona de servicio y aumentar el número de usuario que puede atenderse. Por otro lado, es necesario definir y cuantificar un conjunto de parámetros que caractericen las prestaciones de la antena inteligente en diferentes entornos para poder seleccionar el esquema de conformación más apropiado en cada caso.

Este tipo de tecnología se presenta muy beneficiosa para el medio ambiente, puesto que las antenas inteligentes en vez de radiar energía en todas las direcciones como las antenas tradicionales, envía la señal directamente a cada usuario y sólo cuando se requiera el servicio, consiguiéndose, pues, un considerable ahorro energético y una disminución de este tipo de contaminación. [4]

#### **1.4 Algoritmo RLS**

Cuando se desea controlar un determinado sistema o planta, es necesario definir una expresión matemática que sea capaz de modelar correctamente el sistema en cuestión dentro del rango en el que se trabajará. Uno de los métodos existentes para la elaboración de estos modelos es la descripción fenomenológica del proceso mediante sus ecuaciones físicas, lo cual requiere conocer la gran mayoría de los parámetros que influyen en el sistema, sin embargo, cuando el sistema consta de un número importante de variables, el método descrito se torna bastante complejo, sobre todo si no se dispone de las herramientas algebraicas adecuadas.

Existen dos familias principales de algoritmos adaptativos: los algoritmos de mínima media cuadrática (Least Mean-Square, LMS), perteneciente al tipo de algoritmo estocástico y los algoritmos de mínimo cuadrático (Recursive-Least-Squares, RLS). Los primeros trabajos acerca de los algoritmos adaptativos se pueden encontrar en los últimos años de la década de 1950, durante este tiempo gran

cantidad de investigadores estaban trabajando independientemente en distintas aplicaciones de filtros adaptativos.

EL artículo original sobre algoritmo RLS estándar se lo debe a Plackett, aunque se debe decir que muchos otros investigadores han derivado y rederivado el algoritmo RLS.

En 1974, Godard usó la teoría de Kalman de los filtros para derivar una variante RLS, que se conoce a veces en la literatura como algoritmo Godard. Aunque antes de esa fecha, varios investigadores habían aplicado la teoría de Kalman de filtros para resolver el problema de filtrado adaptativo, la aproximación de Godard fue ampliamente aceptada como la aplicación de mayor éxito de la teoría de Kalman de filtro por un periodo de dos décadas.

Después Sayed y Kailath, publicaron un artículo en el cual se dibujó por primera vez la relación exacta entre el algoritmo RLS y la teoría de Kalman de filtros, estableciendo por tanto las bases de cómo explotar la amplísima literatura sobre filtrado de Kalman en la resolución de problemas de filtrado lineal adaptativo.

El filtrado adaptativo se ha empleado con éxito en una gran cantidad de aplicaciones, destacando entre ellas la identificación de sistemas, modelado de las capas de la tierra, deconvolución espectral, detección de señales, supresión de ruido, cancelación de eco, etc.

# CAPITULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

### 2.1 Clasificación de Antena

La antena es un dispositivo formado por una serie de conductores que, junto a un generador, permite la emisión de ondas RF (Radiofrecuencia), o que conectado a una impedancia permite captar las ondas emitidas por una fuente lejana, esto quiere decir que está diseñado para emitir o recibir ondas electromagnéticas.

Ya que existen una gran variedad de antenas en la actualidad, es complicado mencionar cada una de ellas, por lo que se pueden clasificar de la siguiente manera (Figura 2.1)

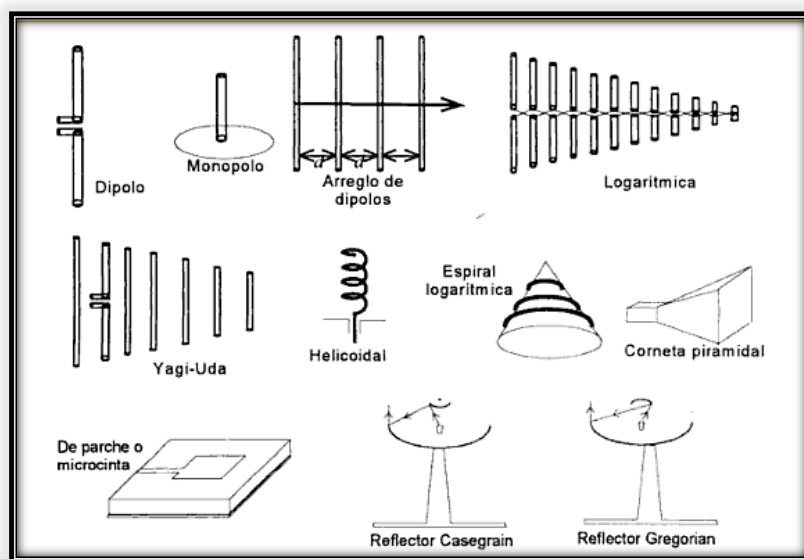


Figura 2. 1 Diferentes tipos de antenas

### 2.1.1 Antenas según su forma de radiación

**Antenas Omnidireccionales.-** Estas antenas son buenas para cubrir grandes áreas, por lo que su radiación trata de ser pareja en todas las direcciones, cubriendo los  $360^\circ$ . Ejm: Dipolos eléctricos y magnéticos, antenas de parche.

**Antenas Direccionales.-** A diferencia de las omnidireccionales, este tipo de antenas son capaces de concentrar la mayor cantidad de energía radiada de manera localizada, aumentando su potencia y evitando interferencias. Ejm: Yagui-Uda, reflectores parabólicos, helicoidales, arreglos dipolares

**Antenas Independientes de Frecuencia (de gran ancho de banda).**- Son antenas que mantienen alguno de sus parámetros constantes como la impedancia, dirección del haz principal o con pequeñas variaciones en un margen de frecuencia grande. Ejm: Logarítmicas, espirales, espirales cónicas (Véase Figura 2.1).

**Antenas Electrónicamente Direccionales y Adaptivas.**- Estas son arreglos de antenas de fase controlada (AAFC) y arreglo de antenas activas de fase controlada o también llamadas antenas inteligentes, sus elementos suelen ser dipolos, antenas de parche, hélice (Véase Figura 2.1)..

### **2.1.2 Antenas según su geometría o construcción**

**Antenas Delgadas.**- Son aquellas que tienen una sección despreciable respecto a la longitud de onda de trabajo, Ejm Dipolos eléctrico y magnéticos, logarítmica, Yagi-Uda, Arreglo de Dipolos.

**Antenas de Apertura.**- Son aquellas que utilizan superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético de forma que concentran la emisión y recepción de su sistema en una sola dirección. Ejm guía de onda, corneta, reflectores parabólicos e hiperbólicos.

**Antenas Planas.**- Este tipo de antenas suele usarse principalmente en satélites de telecomunicaciones, estas están



formadas por la unión de una serie de elementos individuales. Ejm, Antenas de parche (diversas geometrías), espirales. [6]

## 2.2 Diagrama de Radiación de una antena.

Es la representación gráfica de las características de radiación de una antena, en función de la dirección. Lo más habitual es representar la densidad de potencia radiada, aunque también se pueden encontrar diagramas de polarización o de fase. En la Figura 2.2 se puede observar los componentes de radiación de una antena, los cuales se detallan a continuación.

**Dirección de apuntamiento:** Es la de máxima radiación. Directividad y Ganancia.

**Lóbulo principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.

**Lóbulos secundarios:** Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.

**Ancho de haz:** Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma un valor de 3dB por debajo del máximo. Es decir, la dirección en la que la potencia radiada se reduce a la mitad.

**Relación de lóbulo principal a secundario (SLL):** Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.

**Relación delante-atrás (FBR):** Es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.

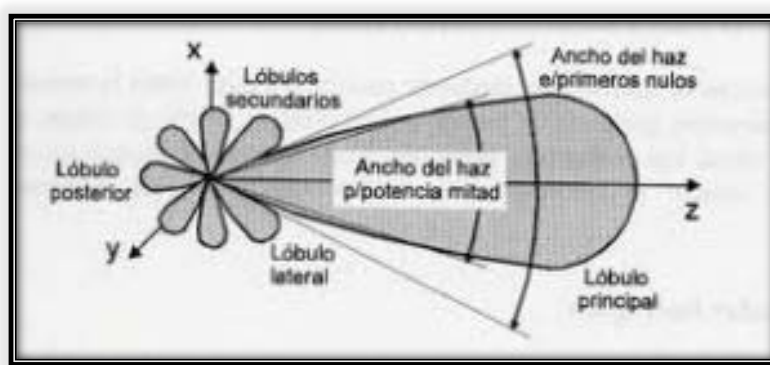


Figura 2. 2 Componentes de Radiación de una antena

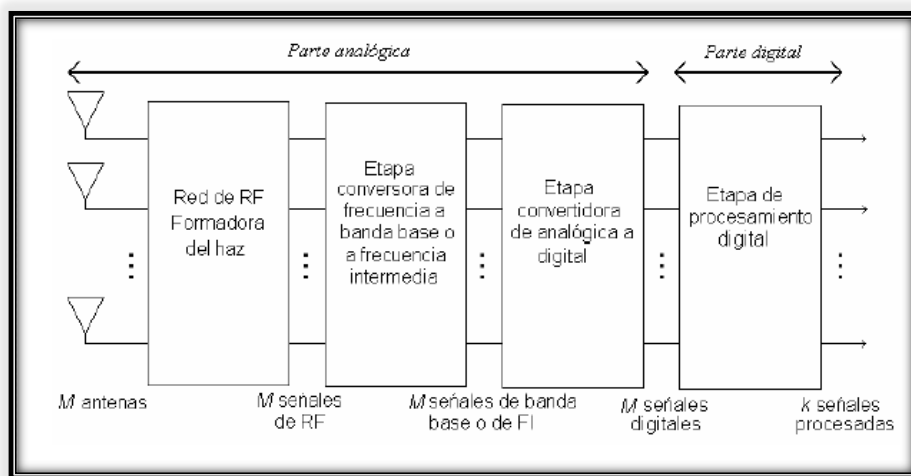
### 2.3 Generalidades sobre Antenas Inteligentes

Las antenas inteligentes son arreglos de antenas que mediante el control de la fase y la amplitud de la excitación de cada uno de los elementos que conforma el arreglo, poseen la capacidad de ajustar su diagrama de radiación de forma predeterminada. El sistema funciona de tal forma que cuando el usuario se desplaza, se modifica el lóbulo para que se mueva con él.

El crecimiento continuo del número de usuarios de sistemas de comunicaciones móviles y la implementación de nuevas plataformas de

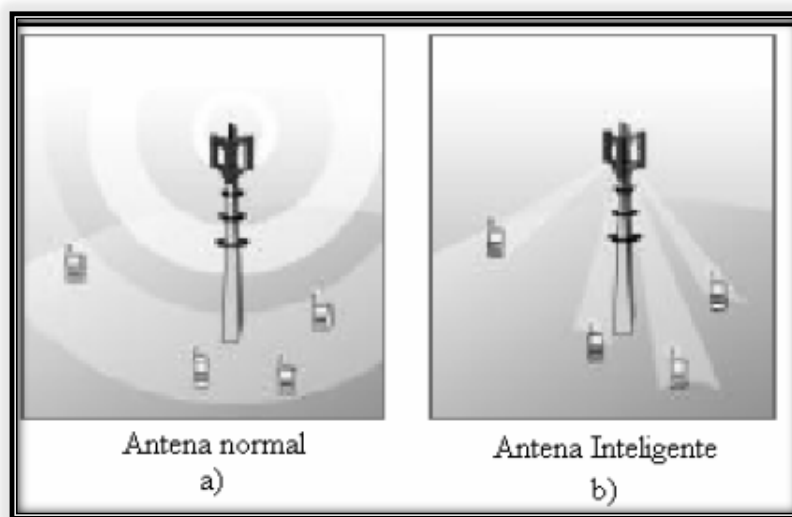
servicios móviles (3G) han provocado la necesidad de aumentar sus capacidades al más alto nivel posible.

En figura 2.3 se puede observar el diagrama de bloque de una antena inteligente, entre las cuales se pueden mencionar: Arreglos de antenas, antenas adaptativas, propagación, teoría de las comunicaciones, procesamiento digital de señales, entre otros.



**Figura 2. 3 Diagrama de bloques de Antenas Inteligentes**

La antena inteligente en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado (Figura 2.4), e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento.



**Figura 2. 4 Formas de radiación de la Antena Inteligente**

Las antenas inteligentes se diferencian de las antenas convencionales porque pueden trabajar de dos maneras diferentes:

**Modo omnidireccional.** La antena en este modo funciona exactamente igual que las antenas convencionales es decir, emite señal con la misma intensidad hacia todas direcciones.

**Modo direccional.** En este modo, la antena emite señal en una sola dirección y con un cierto ángulo de apertura. La consecuencia de transmitir en este modo se traduce en un mayor alcance hacia la dirección donde emite la antena debido a que ésta concentra todo su espectro de potencia en un rango de obertura mucho menor.

### **2.3.1 Ventajas y Desventajas de las Antenas Inteligentes**

Las características de las antenas inteligentes con unos haces de radiación con una mayor directividad (es decir, mayor ganancia y mayor selectividad angular), proporcionan múltiples ventajas:

- ✓ Incremento de la zona de cobertura: Dado que la ganancia es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas.
- ✓ Reducción de la potencia de transmisión: La mayor ganancia de la antena permite incrementar la sensibilidad.
- ✓ Reducción del nivel de interferencia: La mejor selectividad espacial de la antena permitirá al receptor discriminar las señales de usuarios interferentes a favor de la señal del usuario deseado. Incluso se pueden utilizar antenas inteligentes con configuración antena principal y secundaria donde las secundarias anulan las interferencias.
- ✓ Reducción de la propagación multitrayecto: Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada, se reduce el número de trayectorias que debe seguir la señal antes de llegar al receptor.
- ✓ Mejora de la seguridad: Gracias a que la transmisión es direccional, hay una probabilidad muy baja de que un equipo ajeno intercepte la comunicación.
- ✓ Introducción de nuevos servicios: Al poder identificar la posición de usuarios se puede aplicar a radiolocalización, tarificación geográfica, publicidad en servicios cercanos.

- ✓ Sin embargo las Antenas inteligentes también presentan inconvenientes como los que se presentan a continuación:
- ✓ Mayor complejidad de transceptores.- Los sistemas de antenas Inteligentes son mucho más compleja y difíciles de diseñar a diferencia de los sistemas radiantes convencionales
- ✓ Tamaño físico.- Para que una antena obtenga una ganancia razonable, es necesario un arreglo de antenas con varios elementos
- ✓ Dirección del Recurso.- Las antenas inteligentes son principalmente una tecnología de radio, esto implica nuevas demandas de funciones de las redes tales como recursos y dirección de movilidad.
- ✓ Planificación de radio.- Para que puedan tener ganancia deseada, las estaciones base deben poder separar a los usuarios en el dominio angular.

### **2.3.2 Tipos de Antenas Inteligentes**

Los sistemas de Antenas inteligentes se clasifican en tres tipos:

- ✓ Haz Conmutado. (Switched Beam)
- ✓ Haz de Seguimiento. (Scaning)
- ✓ Haz Adaptativo.

### 2.3.2.1 Haz Conmutado

Es la configuración más simple de Antenas Inteligentes. El sistema genera varios haces a ángulos prefijados que se van conmutando secuencialmente dando como resultando un barrido discreto de la zona de cobertura en posiciones angulares fijas, como se muestra en la Figura 2.5.

En cada posición discreta del haz se activa el sistema de recepción para detectar la posible existencia de señales. En caso de recibir señal, el sistema guarda información correspondiente a la posición del haz (ángulo + identificación de usuario) y se establece la comunicación con el usuario en un intervalo de tiempo. Después de este intervalo se conmuta al siguiente haz para detectar la existencia de otros posibles usuarios hasta llegar al límite angular de la zona de cobertura. Este proceso se repite permanentemente en el tiempo.

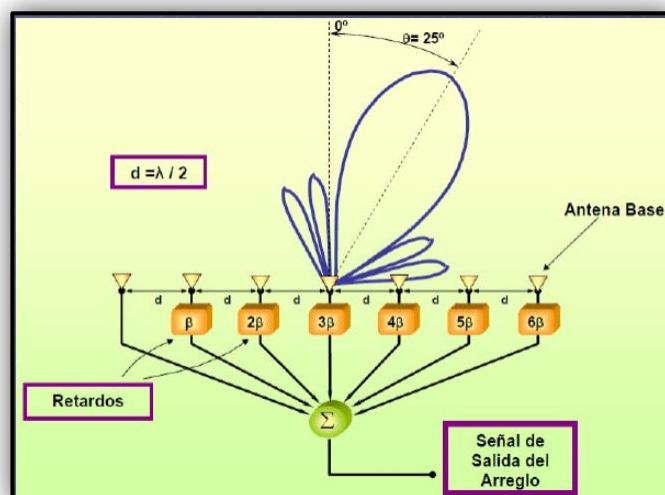


Figura 2. 5 Sistema de haz conmutado

### 2.3.2.2 Haz de Seguimiento

Este sistema es un poco más complejo que el anterior. Está conformado por un arreglo de antenas con una red de excitación que permite controlar electrónicamente las fases de las corrientes de excitación que llegan a los elementos del arreglo para modificar la dirección del haz convenientemente y establecer comunicación con el usuario respectivo.

A diferencia del sistema de haz conmutado, el sistema haz de seguimiento ejecuta algoritmos DoA (Direction of Arrival) para identificar la dirección de arribo de las señales de los usuarios.

Otra diferencia es que los cambios de fase para en el sistema conmutado se realizan a ángulos fijos (Figura 2.6), es decir corresponden a ángulos prefijado en el sistema, el cual el posicionamiento del haz tiene mayor resolución angular.

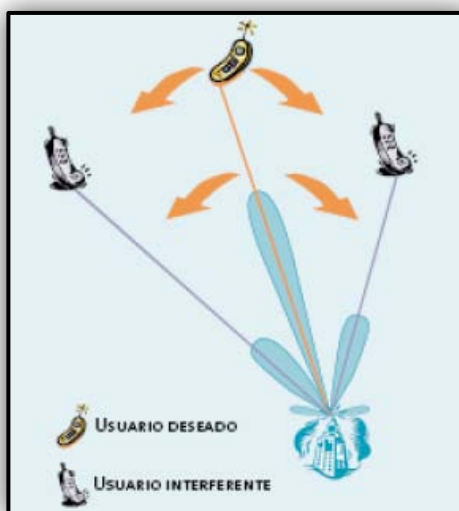


Figura 2.6 Sistema de haz de seguimiento



### 2.3.2.3 Haz Adaptativo

La técnica de haz adaptativo constituye el máximo nivel de inteligencia que se podría dar a un sistema de antenas. En este sistema, las salidas de cada elemento del arreglo de antenas se ponderan con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente para conformar un diagrama de radiación que presente el haz principal hacia la posición del usuario deseado y los haces o lóbulos secundarios hacia las direcciones de las componentes de multitrayecto de la señal deseada y mínimos o nulos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia, Figura 2.7.

Esta técnica requiere el uso de algoritmos (DoA) tanto para la detección de las señales de arribo e interferentes como para la optimización de los pesos que conforman el haz. [7]

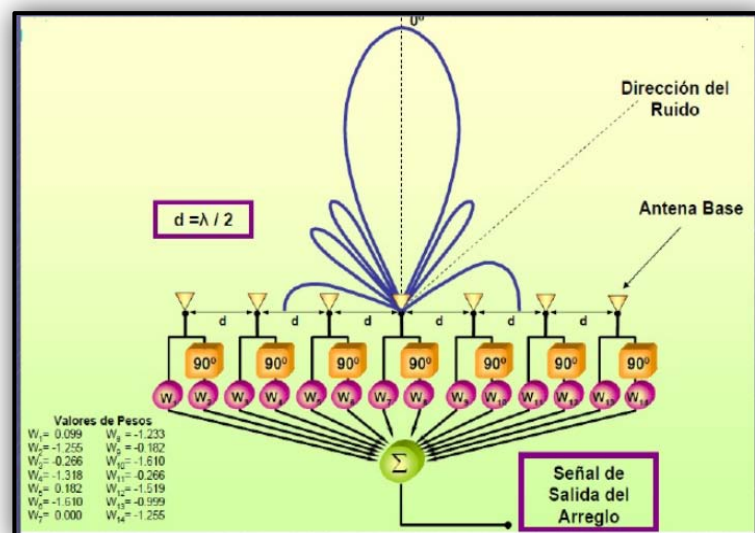


Figura 2. 7 Sistema de haz adaptativo

## 2.4 Antenas Adaptivas

Las antenas cada elemento adaptativas son un paso más en las tecnologías de antenas inteligentes. El control del diagrama de radiación se hace por medio de un algoritmo adaptativo que pretende minimizar una señal de error generada a partir de una referencia en el receptor de la estación base. Para ello, es necesario definir un modelo de canal que tenga en cuenta todas las características del canal. El modelo de señal utilizado es el que se muestra en la Ecuación (1), donde se considera dispersión temporal y angular. El vector de señales recibidas en el array procedente de  $N$  usuarios con  $N_{\text{taps}}$  multitrayectos puede expresarse como:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{N_{\text{taps}}} c(\theta_i + \Delta\theta_{il}) \alpha_{il} \exp(j2\pi v_i t) u_i(t - \tau_{il}) + N(t) \quad (1)$$

Donde  $\alpha_{il}$ ,  $\tau_{il}$  y  $v_i$  son la amplitud, retardo y frecuencia Doppler del trayecto  $l$ -ésimo.

$u_i(t)$  es la señal de datos en banda base del usuario  $i$ -ésimo.

$N(t)$  es el ruido térmico.

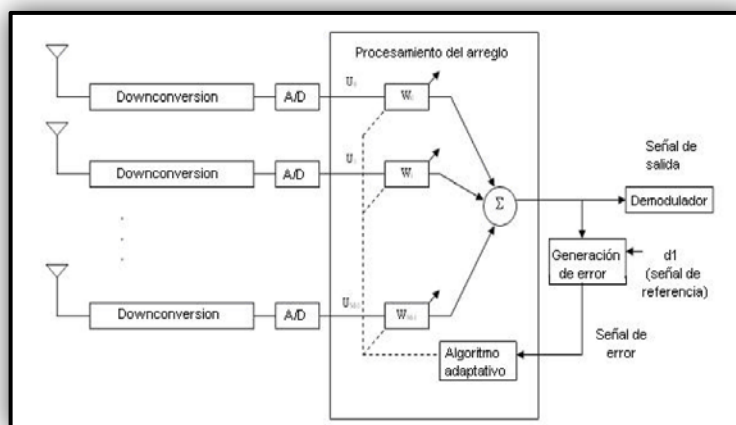
$\theta_i$  es el ángulo incidente en azimut del trayecto principal del usuario  $i$ -ésimo y  $\Delta\theta_{il}$  es la dispersión acimutal respecto de  $\theta_i$

La respuesta del array viene dada por la dirección del vector de cada uno de los  $M$  elementos como se define en la Ecuación (2).

$$c(\theta) = [1 \dots \exp(-j(M-1)\pi \sin\theta)]^T \quad (2)$$

La señal de referencia en el receptor se genera a partir de los códigos CDMA usados por los diferentes usuarios. Con esta señal se obtienen los pesos apropiados del arreglo representados por la letra  $W$  en la Figura 2.8 para reducir la interferencia recibida de usuarios no deseados y seguir a la señal deseada. Por tanto, se trata de un esquema de referencia temporal. Gracias a la ortogonalidad entre los códigos de los diferentes usuarios, puede generarse una señal de error  $e(t)$  cuya potencia se minimizará con el procesamiento adaptativo. Esta señal estará compuesta de la interferencia de otros usuarios y por ruido. Para cada usuario, se correrá la señal recibida con el código correspondiente, se filtra para eliminar la interferencia del resto de usuarios, y se vuelve a correlar la señal filtrada con el mismo código. Esta es la señal de referencia que luego se utilizará para obtener  $e(t)$ .

El algoritmo genera un vector de pesos  $w$ , que minimizará la potencia del error  $e(t)$  en un número de iteraciones dado, con lo que el haz se conformará adecuadamente para maximizar la relación señal frente a interferencias (SIR).



**Figura 2.8 Estructura de un arreglo adaptativo de antenas**

## **2.5 Algoritmos Adaptativos**

El conformador de haces adaptativos es una técnica que rige a los arreglos de antenas para lograr una recepción máxima en una dirección específica, estimando la señal de llegada desde la dirección deseada (en presencia de ruido), mientras que las señales de igual frecuencia proveniente de otras direcciones son rechazadas. La separación espacial se utiliza para diferenciar la señal deseada de las señales interferentes. A través de la ponderación de las señales desde cada antena, se filtran las señales no deseadas. En conformadores de haces adaptativos, los pesos óptimos se calculan iterativamente usando algoritmos complejos.

Los algoritmos adaptativos pueden ser clasificados en categorías, basándose en diferentes técnicas: Las técnicas basadas en información, clasifican los algoritmos de la siguiente manera:

### **2.5.1 Algoritmos basados en la señal de referencia.**

Este tipo de algoritmos se basa en la minimización del error mínimo cuadrado entre la señal recibida y la señal de referencia. Por lo tanto, se requiere que la señal de referencia esté disponible. La señal de referencia tiene una alta correlación con la señal deseada, por ejemplo, el algoritmo SMI (Simple Matriz Inversion), LMS (Least Mean Square) y RLS (Recursive Least Squares). La señal de referencia no es la verdadera señal deseada, de hecho es una señal que la representa de cerca o

tiene una alta correlación con ésta. La señal de referencia, requerida por el algoritmo, es generada de varias maneras. [8]

### 2.5.2 Algoritmo Adaptativo Mínimo Cuadrado Recursivo RLS

Cuando el medio es altamente dinámico se requiere de algoritmos que se adapten rápidamente a los cambios. Para estos casos el algoritmo LMS no nos brinda un buen desempeño. Con esos propósitos se crearon algoritmos de rápida respuesta, tal como el algoritmo RLS. Una manera de aumentar la velocidad de convergencia del algoritmo adaptativo es calcular directamente el vector de pesos a través de la ecuación de Wiener. El algoritmo RLS Ecuaciones (3, 4 y 5) realiza una búsqueda iterativa por el vector de coeficientes óptimos, directamente a través de la ecuación (6):

$$W_{\text{opt}} = R_{xx}^{-1} r_{dx} \quad (6)$$

$$y(t) = w^H x(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon^2(t) = [d^*(t) - w^H x(t)]^2 \quad (4)$$

$$w(k+1) = w(k) + \mu_{\text{LMS}}(k) \quad (5)$$

Las aproximaciones estocásticas de las matrices  $R_{xx}$  y  $r_{dx}$  son actualizadas recursivamente en cada iteración de la siguiente manera:

$$R_{xx}(k) = \varphi R_{xx}(k-1) + x(k)x^H(k) \quad (7)$$

$$r_{dx}(k) = \varphi r_{dx}(k-1) + d^*(k)x(k) \quad (8)$$

Para obtener la ecuación de Wiener, se necesita calcular la inversa de  $R_{xx}(d)$  como se ve en la ecuación (9). Para esto se utiliza la matriz de inversión de Lemma.

$$R_{xx}^{-1}(k) = \varphi^{-1} [R_{xx}^{-1}(k-1) - \frac{R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)}{\varphi + x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}] \quad (9)$$

Para la obtención del vector de ponderaciones óptimas se reemplazan las ecuaciones (9) y (8) en (6), con lo que se obtiene la forma genérica del algoritmo RLS.

$$w(k) = w(k-1) - \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)} x(k)e^*(k) \quad (10)$$

$$\text{Haciendo: } \varphi_{RLS} = \frac{\varphi^{-1}R_{xx}^{-1}(k-1)}{1 + \varphi^{-1}x^H(k)R_{xx}^{-1}(k-1)x(k)}$$

Se obtiene una forma más resumida de la ecuación (11). Esta se presenta a continuación.

$$w(k) = w(k-1) - \varphi_{RLS}x(k)e^*(k) \quad (11)$$

De esta forma se obtiene un algoritmo RLS de rápida convergencia pero con mayor complejidad, por la mayor carga de procesamiento de datos.

### 2.5.3 Algoritmos adaptativos ciegos.

Estos algoritmos no requieren señal de referencia, generan por sí mismos la señal de referencia requerida desde las señales

decepcionadas, para obtener así la señal deseada. Por ejemplo, algoritmos CMA (Constant Module Algorithm), ciloestabilidad y decisión directa.

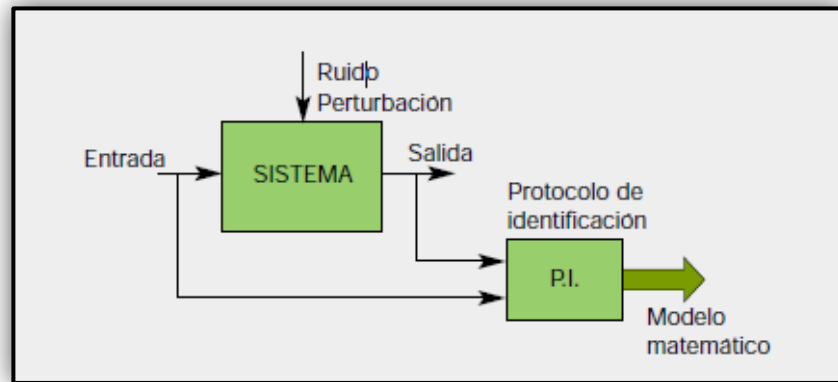
## **2.6 Identificación**

### **2.6.1 ¿Qué es un modelo?**

El diseño de un controlador continuo o discreto, ya sea mediante técnicas clásicas o en variables de estado, requiere de un modelo de la planta a controlar que caracterice su comportamiento dinámico. Este modelo permite al diseñador realizar y validar mediante simulación el ajuste de los parámetros del controlador que permiten obtener una respuesta que satisfaga las especificaciones de diseño.

### **2.6.2 ¿Que es la Identificación?**

Podemos definir como la identificación de sistemas a los estudios de técnicas que persiguen la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones realizadas en el proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y perturbación como lo describe la Figura 2.9.



**Figura 2.9 Proceso de Identificación sobre un sistema**

El enfoque de la identificación se puede realizar en función de la estructura del modelo y del comportamiento físico o no del mismo.

### **2.6.3 Tipos de Modelo**

Existen varias formas de catalogar los modelos matemáticos:

#### **2.6.3.1 Modelos mentales**

Son aquellos que no tienen formalismo matemático.

#### **2.6.3.2 Modelos no paramétricos**

Se caracterizan mediante gráficos, diagramas o representaciones que describen las propiedades dinámicas mediante un número no



finito de parámetros, respuesta al impulso, al escalón o en frecuencia.

### **2.6.3.3 Modelos paramétricos o matemático**

Describen las relaciones entre variables del sistema mediante expresiones matemáticas, ecuaciones diferenciales en sistema continuo o ecuaciones en diferencia en sistema discreto.

En función del tipo de sistema y de la representación matemática utilizada, los sistemas pueden clasificarse en:

#### **2.6.3.3.1 Deterministas o Estocásticos**

Se dice que un modelo es determinístico, cuando expresa la relación entre entradas y salidas mediante una ecuación exacta, se estudia la relación entre la entrada y la salida con una parte no conocida. Por el contrario, un modelo es estocástico si posee un cierto grado de incertidumbre, quedan definidos mediante conceptos probabilísticos o estocásticos.

#### **2.6.3.3.2 Dinámicos o Estáticos**

Un sistema es estático cuando la salida depende únicamente de la entrada en ese instante de tiempo. La función que relaciona las entradas con las salidas, es independiente del tiempo. En un

sistema dinámico las salidas varían con el tiempo, el valor actual de la salida en función del tiempo transcurrido desde la aplicación de la entrada.

#### **2.6.3.3.3 Parámetros Distribuidos o Concentrados**

Un sistema es de parámetros concentrados, cuando no se considera la variación en función del espacio.

Lineales o no Lineales.- Un sistema lineal se define por una función matemática lineal:  $y'(t) + ay(t) = u(t)$  siendo  $y'(t) + ay^2(t) + by^3(t) = u(t)$  no lineal

#### **2.6.3.3.4 Tiempo Continuo o Tiempo Discreto**

Los sistemas continuos trabajan con señales continuas, se formalizan mediante ecuaciones diferenciales. Los sistemas discretos trabajan con señales muestreadas, se describen por medio de ecuaciones en diferencia. [9]

#### **2.6.4 Etapas a seguir para la identificación de un modelo**

- ✓ Obtener el registro de muestras de entrada / salida
- ✓ Reconstruir la respuesta del proceso para una entrada
- ✓ Estimar características de respuesta y momentos
- ✓ Obtener el modelo del proceso
- ✓ Validar el modelo

### 2.6.5 Métodos de Identificación

En la identificación de sistemas existen cuatro conceptos fundamentales que son: El sistema o descripción matemática del proceso, la estructura del modelo, el método de identificación y la condición experimental que es la descripción general de cómo el experimento de identificación es llevado a cabo. Los métodos de identificación se clasifican en métodos no paramétricos y paramétricos.

A continuación se presenta un diagrama de flujo en la Figura 2.10 el cual representa el proceso a seguir para la identificación de un sistema dinámico.

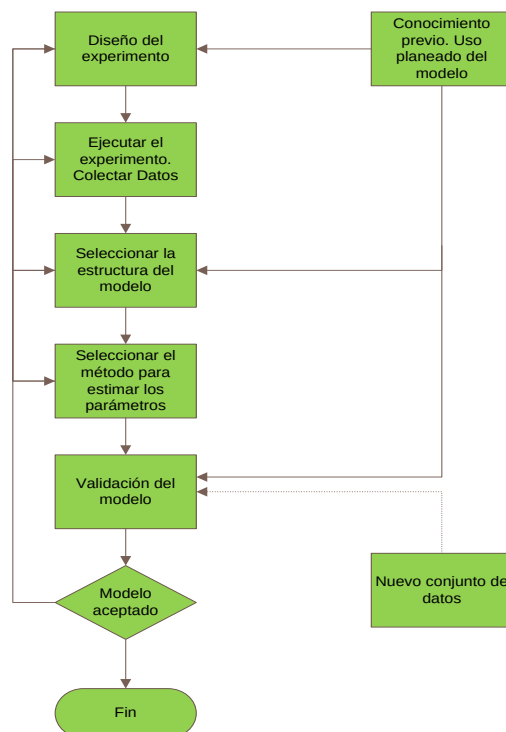


Figura 2. 10 Diagrama de flujo de la Identificación de Sistemas

### **2.6.5.1 Identificación no paramétrica**

Dentro de la identificación no paramétrica se puede citar como las más importantes:

#### **2.6.5.1.1 Análisis de Respuesta transitoria**

Se basa en la obtención de la respuesta del sistema a un impulso o a un escalón. Las señales de prueba a utilizar en este caso son un impulso o un escalón, respectivamente, y la salida registrada da el modelo correspondiente.

#### **2.6.5.1.2 Análisis de correlación**

Es un método en el dominio del tiempo, el cual obtiene la función de correlación entre las variables de interés y como caso especial, una función de ponderación.

Beneficios:

- ✓ Se puede verificar la existencia de relación entre entrada y salida de nuestro sistema.
- ✓ Es una estimación “libre de estructura” la cual nos da un indicio o un buen comienzo para nuestra identificación paramétrica más adelante.
- ✓ Se puede predecir mediante los gráficos de autocorrelación si nuestra entrada o salida dependen de valores pasados dentro de su propia serie de tiempo.
- ✓ Se puede concluir una muy buena estimación de la respuesta al escalón del sistema como base para encontrar

datos primordiales de nuestro sistema, tales como,  $\tau_o$  dominante, tiempo de estabilización, sobre nivel porcentual, etc.

- ✓ Otorga los coeficientes del  $b_n$  de la Respuesta al Impulso Finito (FIR por sus siglas en Inglés Finite Impulse Response).

$$y(t) = (b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n})u(t) + v(t) \quad (12)$$

donde  $v$  es un término de ruido no medido.

#### 2.6.5.1.3 Técnicas frecuenciales.

Consiste en tomar las transformadas de Fourier de los estimadores de muestra “suavizados” para la covarianza y la covarianza cruzada por lo que son utilizadas para estimar la respuesta de frecuencia del sistema. Dentro de las técnicas frecuenciales podemos diferenciar entre el análisis de Fourier y el análisis Espectral.

Beneficios:

- ✓ Nos muestra el ancho de banda en el cual trabaja nuestra planta.
- ✓ Rango de frecuencias en las cuales la toma de datos son válidos.
- ✓ Mediante los diagramas de bode se obtiene la frecuencia de corte de la planta.

### 2.6.5.2 Identificación Paramétrica

Quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salidas y perturbaciones). Los métodos de identificación paramétrica tienen como característica principal que su resultado es un vector de parámetros, por esto se conocen como métodos directos. Los métodos de identificación paramétrica utilizan una estructura de modelo definida:

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

Donde A, B, C D y F son polinomios de algún orden en función de parámetros y  $(q^{-1})$  es el operador retardo. A partir de esta estructura se pueden obtener diferentes estructuras de modelos considerando alguno de los polinomios de cualquier orden iguales a uno. Algunos nombres de estructuras conocidas se encuentran en la tabla 2.1.

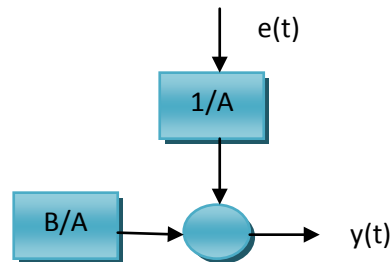
| Tipo de modelo                  | Condición                               | Estructura resultante                           |
|---------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Modelo ARX</b>               | $F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$ | $A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t)$          |
| <b>Modelo Output Error (OE)</b> | $C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$ | $y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + e(t)$ |
| <b>Modelo ARMAX</b>             | $F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$             | $A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t)$ |

|                     |            |                 |                                                                                     |
|---------------------|------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Modelo</b>       | <b>Box</b> | $A(q^{-1}) = 1$ | $A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$ |
| <b>Jenkins (BJ)</b> |            |                 |                                                                                     |

**Tabla 2. 1 Proceso de Identificación sobre un sistema**

### 2.6.5.2.1 Modelo ARX

Es la relación entrada-salida más simple que se puede obtener, este modelo no es el modelo más natural, ya que el ruido es sumado a la salida, luego de pasar a través del denominador del sistema dinámico, representado como diagrama de bloques en la Figura 2.11



**Figura 2. 11 Estructura ARX**

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + b_2 u(t-2) + \dots + b_{n_0} u(t-n_b) + e(t) \quad (13)$$

Debido que el término de ruido blanco  $e(t)$  entra como un error directo en la ecuación de diferencias, la ecuación (13) también es conocido como modelo o estructura de ecuación de error. Donde los polinomios son:

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (14)$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (15)$$

Resultando:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{1}{A(q^{-1})} e(t) \quad (16)$$

El modelo ARX, “AR” hace referencia a la parte autoregresiva,  $A(q)y(t)$  y “X” a la entrada extra,  $B(q)u(t)$  también conocida como variable exógena.

#### 2.6.5.2.2 Modelo Output Error OE

La estructura Output Error conserva la ventaja de parametrizaciones separadas para la entrada y las perturbaciones, no requiere una elección de estructura para el modelo de perturbaciones, la misma que se puede representar mediante diagrama de bloques como muestra la Figura 2.12

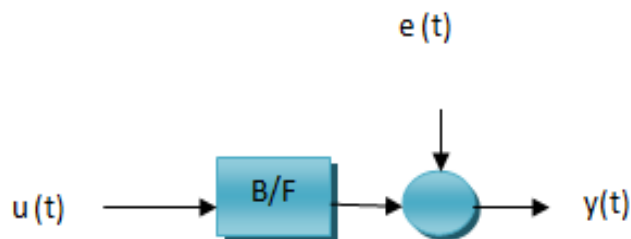


Figura 2. 12 Estructura Output Error

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t) + e(t) \quad (17)$$



### 2.6.5.2.3 Modelo ARMAX

Una desventaja que presenta esta estructura es que no describe de manera adecuada el término de la perturbación  $e(t)$ . Esto se puede solucionar describiendo la ecuación error como ruido blanco de media móvil como se muestra en la Figura 2.13

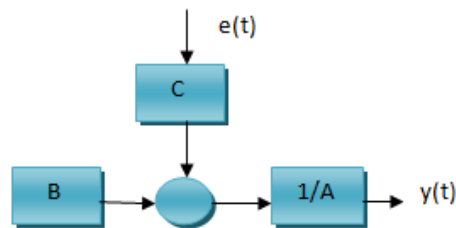


Figura 2. 13 Estructura ARMAX

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c) \quad (18)$$

$$\text{Donde } C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} e(t) \quad (19)$$

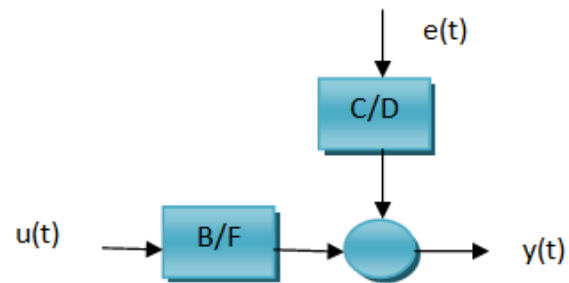
Quedando como resultado la ecuación (20)

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad (20)$$

### 2.6.5.2.4 Modelo Box Jenkins (BJ)

Es un problema de regresión no lineal. Usualmente los órdenes del modelo se escogen bajos. Paramétrica independientemente los modelos de la función de transferencia y el ruido; lo malo es que habrá montones de decisiones y muchas iteraciones que

tendrá que hacer el usuario. Su estructura es definida mediante el diagrama de bloque de la Figura 2.14. [10]



**Figura 2. 14 Estructura Box Jenkins**

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{c(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad (21)$$

## **CAPITULO 3**

### **DISEÑO DEL MODELO BASE Y DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA PARA LA IDENTIFICACIÓN**

#### **3.1 Análisis del Comportamiento de la planta**

Se optó a realizar el enfoque en el algoritmo adaptivo RLS para el uso de la simulación en antenas inteligentes adaptativas ya que la mayor problemática de la misma es la gran cantidad de tráfico y el poco tiempo disponible que involucra la conformación de haces en una dirección deseada, gracias a la rapidez en la velocidad de convergencia del algoritmo RLS este se convierte en el idóneo para la solución de esta dificultad.

Para empezar con el diseño de la solución es importante tomar en cuenta los requerimientos de la planta en un sistema real, así tenemos:

- ✓ Señales interferentes.
- ✓ Ángulo de arribo de la señal de cada usuario.
- ✓ Cantidad de tráfico en el canal y dirección a ser propagada.
- ✓ Tiempo de convergencia de la señal a ser propagada.
- ✓ Cantidad de procesamiento que debe soportar el sistema.
- ✓ Incremento de la capacidad de transmisión y confiabilidad.

Debido a los fines académicos de este proyecto y a las limitaciones del mismo, se ha debido suprimir algunos parámetros y variables, recalcando que el objetivo principal del proyecto es la validación de la planta a identificar, obviando señales interferentes, el algoritmo de detección del ángulo de arribo como también la tasa de transmisión del mismo.

### **3.2        Diseño de la solución**

Se ha creado una planta virtual que simula el comportamiento de las antenas inteligentes mediante el algoritmo RLS, el cual es de gran utilidad para la obtención del modelo final.

La dinámica del modelo está basada en la variación del patrón de radiación de un arreglo de antenas dipolos hacia un ángulo específico pudiendo así aumentar la potencia y disminuir la propagación multitrayecto.

El diseño del modelo cuenta con diferentes tipos de bloques que serán explicados a continuación:

### 3.2.1 Bloque RLS.

El bloque en la Figura 3.1 estima los pesos o los coeficientes necesarios para convertir la señal de entrada en la señal deseada.

Se conecta la señal de entrada que se desea filtrar al puerto de entrada, esta señal de entrada puede ser una señal escalar muestreada o una señal continua, en este caso es una señal muestreada de la sumatoria de un arreglo de antenas dipolo.

Se conecta la señal que se desea modelar en el puerto deseado, la señal deseada debe tener los mismos tipos de datos, complejidad y dimensiones de la señal de entrada, la cual será el patrón de radiación al ángulo deseado. El puerto de salida genera la señal de entrada filtrada, la que es una señal muestreada. El puerto de error muestra el resultado de restar la señal deseada menos la señal de salida.

La gráfica de las señales conectadas al bloque RLS se puede observar en la Figura 3.12 más adelante.

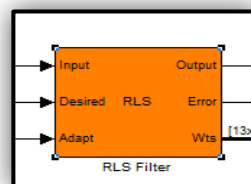


Figura 3. 1 Bloque del filtro RLS

### 3.2.2 Señal deseada.

La señal deseada tiene una alta correlación con la señal de salida (figura 3.2), mas no es la verdadera, de hecho es una señal que la representa de cerca o tiene una alta correlación con la misma.

Para fin práctico del proyecto se escoge una función cuya gráfica polar como lo muestra la Figura 3.3 representa nuestra forma de propagación.

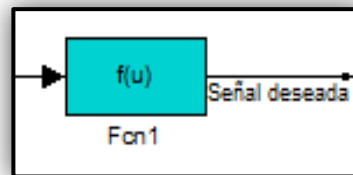


Figura 3. 2 Bloque de la Señal deseada

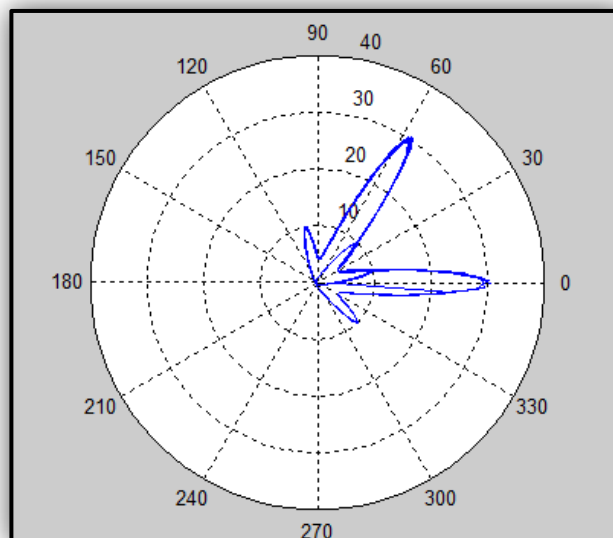


Figura 3. 3 Gráfica polar de la Señal deseada

### 3.2.3 Señal de entrada.

La señal de entrada es la sumatoria de los diagramas de propagación de cada antenna dipolo que conforman el arreglo, la cual es representada por una sumatoria de funciones coseno (Figura 3.4), que presenta en su gráfica polar la forma de propagación de una antenna dipolo como se puede observar en la Figura 3.5.

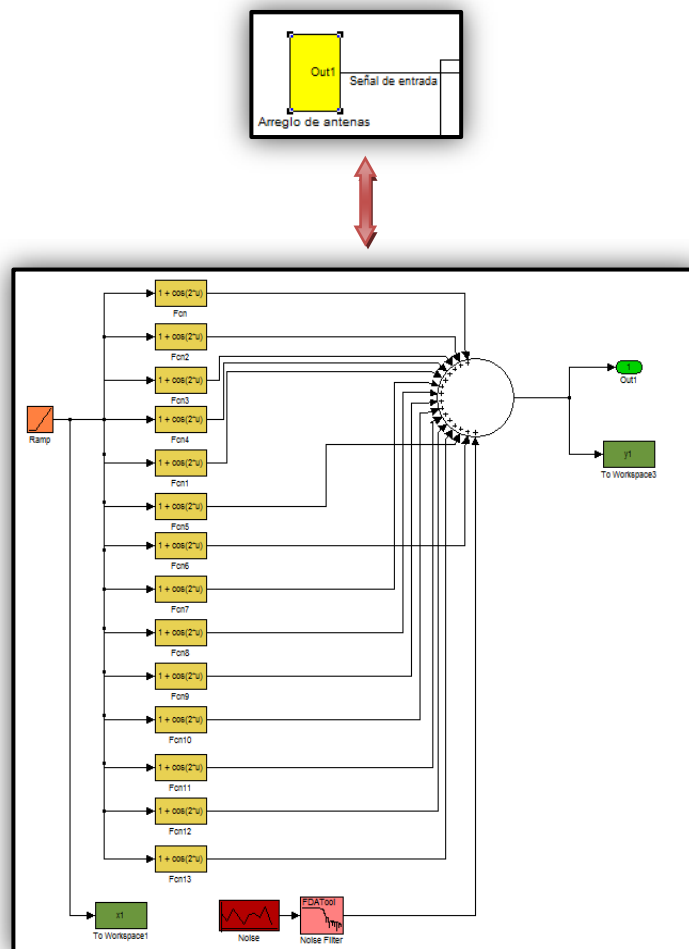
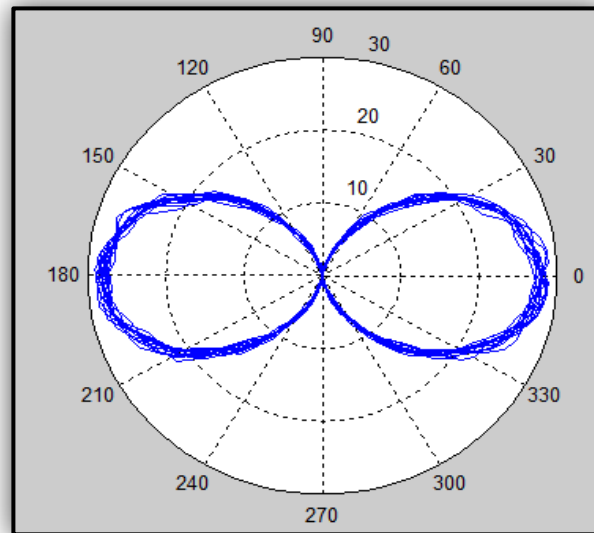


Figura 3. 4 Bloque de la Señal de entrada



**Figura 3.5 Gráfica polar de la Señal de entrada**

#### **3.2.4 Bloque de pesos.**

El bloque muestra la matriz de pesos que se obtiene del filtro RLS con sus respectivas gráficas en respuesta de frecuencia y magnitud en cada periodo de muestreo.

El buffer de 13 pesos otorgado por el bloque RLS (Véase Figura 3.1) es enviado como entrada al bloque “To Frame” como se puede observar en la Figura 3.6, este bloque convierte los valores de un frame mediante un vector unidimensional, los cuales posteriormente son graficados en la Figura 3.7, esta gráfica nos facilita el entendimiento de la adaptación de los pesos para poder así transformar la señal de entrada en la señal deseada con el transcurrir del tiempo



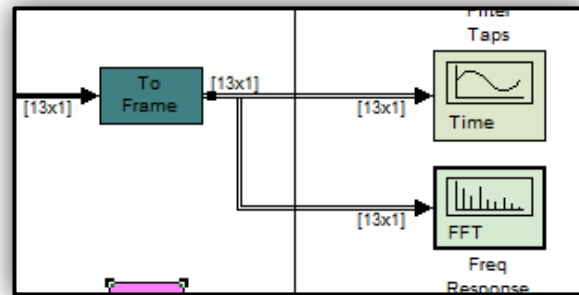


Figura 3.6 Bloque de pesos

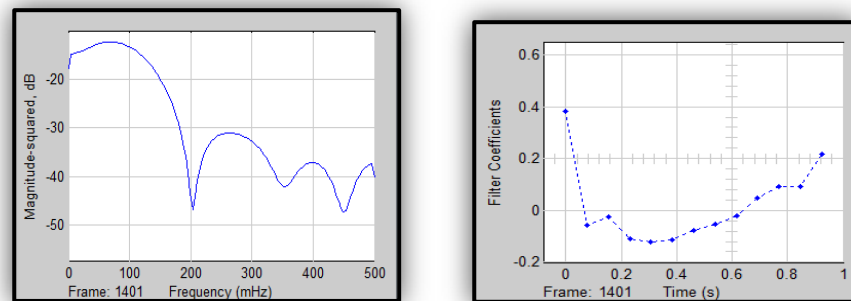


Figura 3.7 Gráficas en respuesta de frecuencia y magnitud de pesos

### 3.2.5 Señal de salida.

Al sistema de salida le ingresa la señal de error proveniente del filtro RLS además de los pesos estimados recursivamente del mismo. Muestra la comprobación de la señal deseada el cual con los coeficientes o pesos desfasan el ángulo de propagación hacia la dirección deseada.

Como se muestra en la figura 3.8 los pesos que ingresan desfasan la señal de error por medio de los bloques "Time delay",

esto permite que la excitación para cada antena varie en fase al transcurrir en tiempo, haciendo que el diagrama de propagación cambie recursivamente hasta obtener lo deseado como se muestra en la Figura 3.9

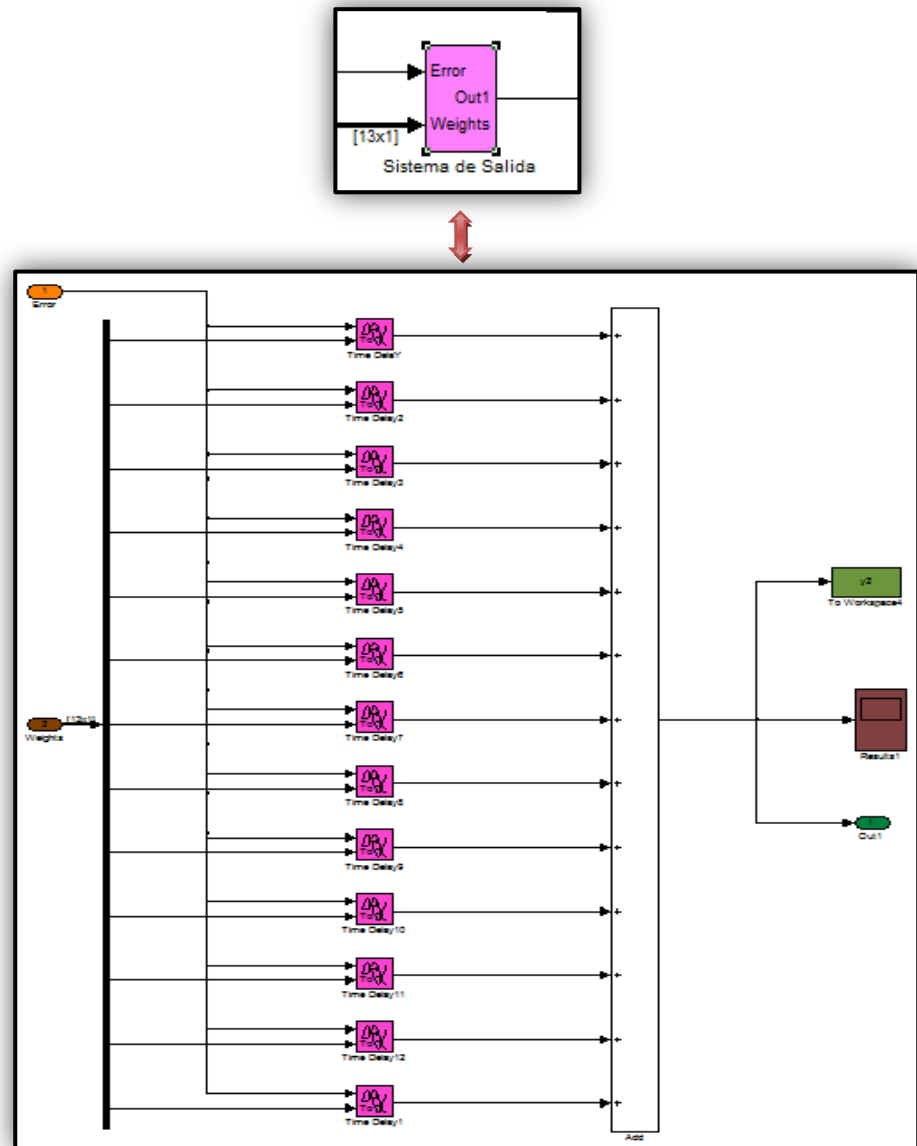
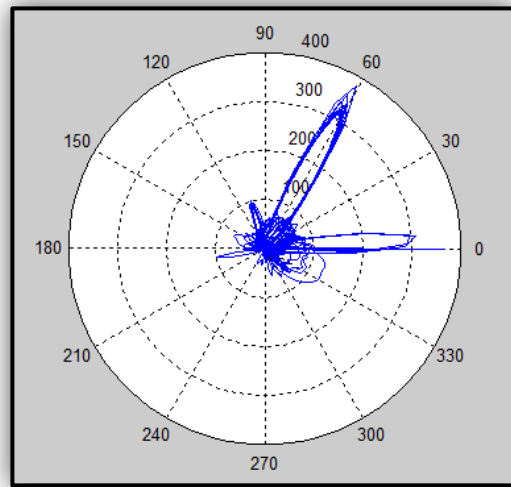


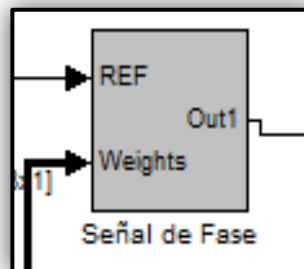
Figura 3. 8 Bloque de Salida



**Figura 3.9** Gráfica polar de la Señal deseada después de pasar por filtro RLS

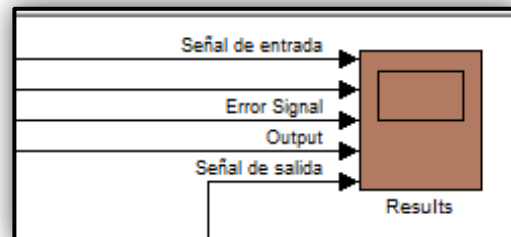
### 3.2.6 Bloque de fase.

La señal de fase es el bloque (figura 3.10) el cual muestra la dinámica del sistema de la variable a modificar, siendo en este caso el ángulo de fase de la señal de salida en el tiempo. Al bloque le ingresan los pesos y un ángulo de referencia ingresado directamente ya que se omitió el algoritmo del ángulo de arribo.



**Figura 3.10** Bloque de fase

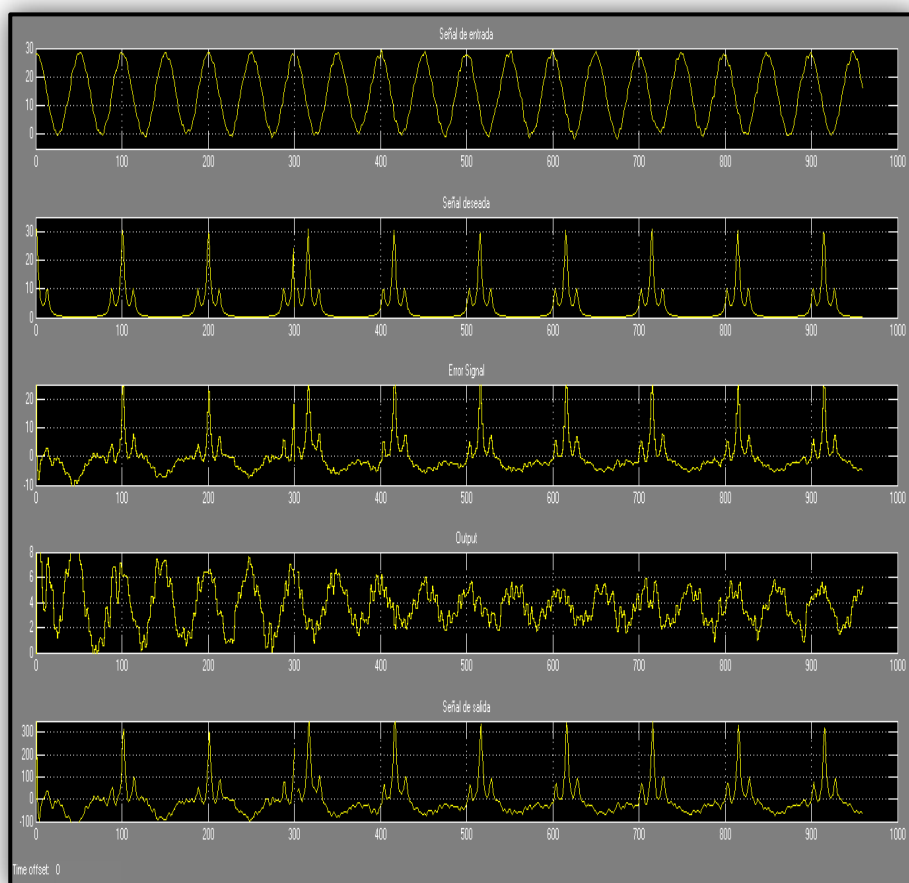
### 3.2.7 Scope de la planta.



**Figura 3. 11 Scope de las diferentes señales de la planta**

La Figura 3.11 muestra las gráficas en tiempo y magnitud de la Señal de entrada, la señal de error, la salida del filtro RLS y la señal de salida en comprobación a la señal deseada.

La Figura 3.13 presenta el modelo final de nuestra planta virtual, la misma que le ingresa la sumatoria de cada una de las señales que excitan al arreglo de 13 antenas implementado para el proyecto, mediante el algoritmo RLS esta señal es convertida en una señal que representa el diagramad de propagación a un ángulo específico simulando la dirección del usuario.



**Figura 3. 12 Gráficas en tiempo y magnitud de diferentes señales de la planta virtual**

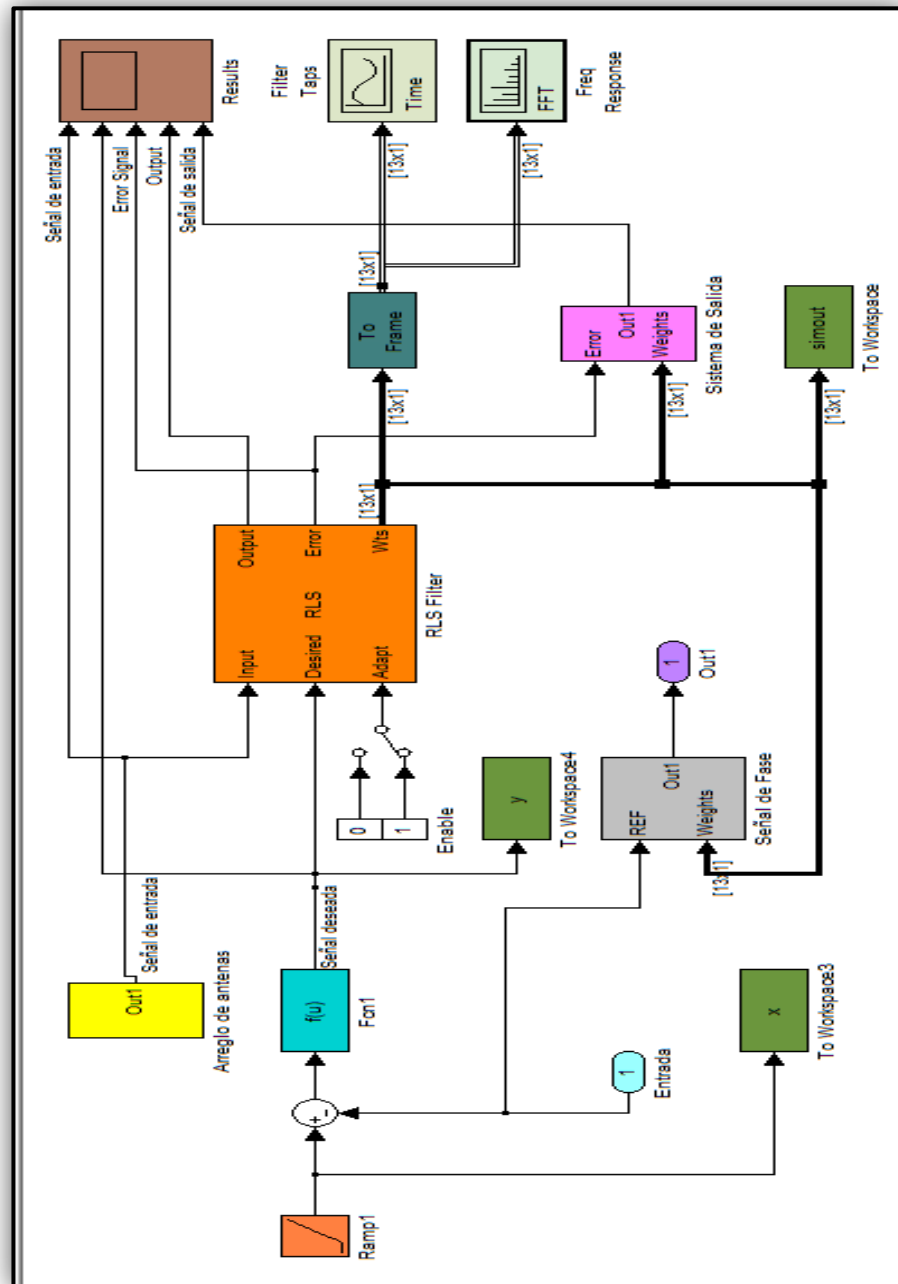


Figura 3. 13 Modelo Simulink

### 3.3 Obtención del Tao dominante de la planta

Para obtener el Tao dominante, se utiliza la respuesta de la planta a una entrada señal escalón. Se estima el 63% del valor final en lazo abierto de la respuesta como se muestra en la figura 3.14.

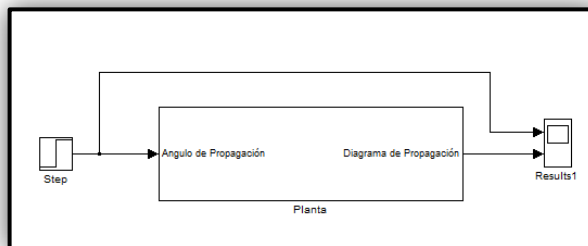


Figura 3. 14 Diagrama de bloque en lazo abierto

La figura 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 muestra la gráfica en respuesta a la entrada escalón de la planta para escoger el Tao dominante de la misma.

**Primera Entrada** escalón Step=1 ;  $(140.793 * 0.63) = 88.27$ ;  $\tau = 0.106$  seg

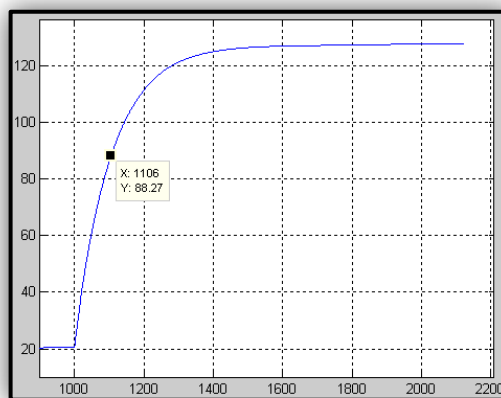
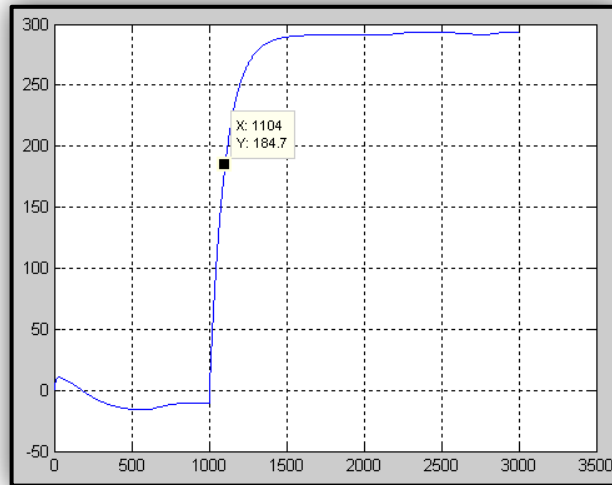


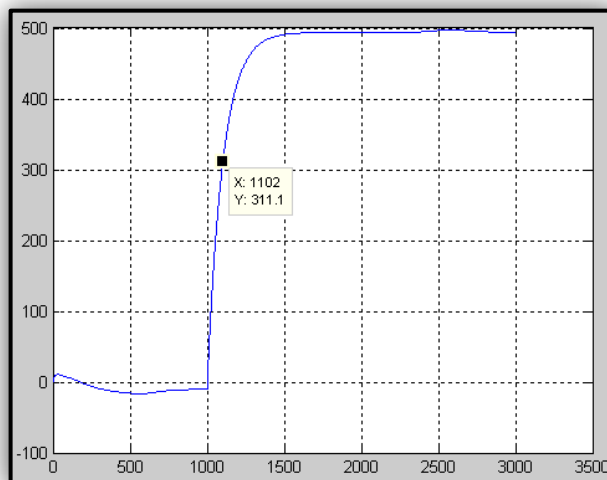
Figura 3. 15 Respuesta de la planta a una entrada Step=1

**Segunda entrada** escalón Step=3;  $(293.174 * 0.63) = 184.7$ ;  $\tau = 0.104$  seg



**Figura 3. 16** Respuesta de la planta a una entrada Step=3

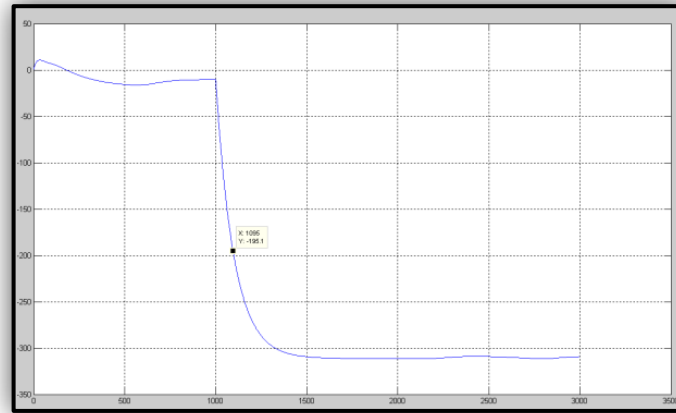
**Tercera entrada** escalón Step=5;  $(493.80 * 0.63) = 311.1$ ;  $\tau = 0.102$  seg



**Figura 3. 17** Respuesta de la planta a una entrada Step=5

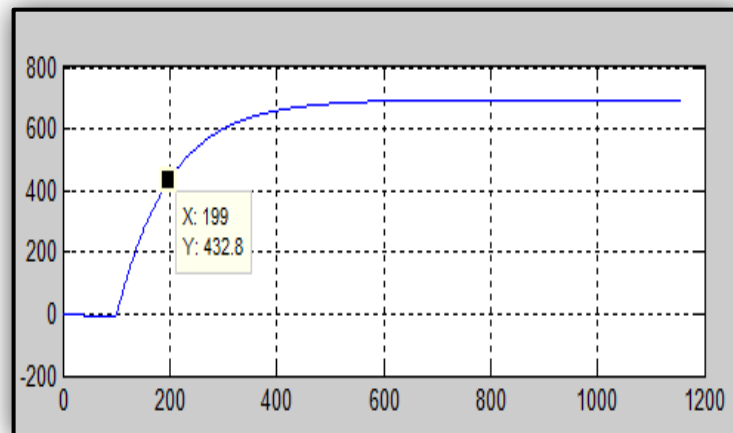


**Cuarta entrada escalón Step=-3; $(309.682 * 0.63) = 195,1; \tau = 0.095 \text{ seg}$**



**Figura 3. 18 Respuesta de la planta a una entrada Step=-5**

**Quinta entrada escalón Step=7; $(639.1 * 0.63) = 436.653 \tau = 0.09 \text{ seg}$**



**Figura 3. 19 Respuesta de la planta a una entrada Step=-3**

Para escoger el Tao dominante de la planta se saca el Tao promedio de las señales a la entrada escalón, como se muestra en detalle en la tabla 3.1

| Step | $\tau_{dom}$ |
|------|--------------|
| 1    | 0.106 seg    |
| 3    | 0.104 seg    |
| 5    | 0.102 seg    |
| -3   | 0.095 seg    |
| 7    | 0.099 seg    |

**Tabla 3. 1 Resultados del Step VS Tao**

$$\tau_{dom\ prom} = 0.1012\ seg$$

### 3.4 Obtención del tiempo de muestreo máximo

Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder replicar con exactitud la forma de una onda, es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear.

En radianes/ seg la frecuencia de Nyquist es:

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

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

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

Un criterio que se puede utilizar es que:

$$W_n \geq \alpha * W_B$$

Donde  $\alpha$  es un entero multiple del ancho de banda:

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

Donde  $\alpha$  son los coeficientes 1,2,3,4, etc.

| $\alpha$ | $\tau_{dom}$ | $\pi$  | $\tau_{muestreo}$ |
|----------|--------------|--------|-------------------|
| 1        | 0.106        | 3.1416 | 0.333             |
| 2        | 0.106        | 3.1416 | 0.166             |
| 3        | 0.106        | 3.1416 | 0.111             |
| 4        | 0.106        | 3.1416 | 0.083             |

Tabla 3. 2 Selección del Tiempo de muestreo

### 3.4.1 Selección del tiempo de muestreo a utilizar

De la tabla 3.2 se puede observar que mientras menor sea el tiempo de muestreo mayor será la cantidad de datos obtenidos. El tiempo de muestreo para lograr una identificación satisfactoria debe de durar lo suficiente para que la respuesta de la planta se estabilice.

En este caso se escoge un tiempo de muestreo favorable para realizar el proceso de identificación, aplicando la fórmula:

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

Debido a que la planta es demasiado rápida, se deberá tomar la mayor cantidad de datos posibles por lo que  $T_{muestreo} = 0.01$ .

### 3.5 Diseño de la señal de entrada

Para el diseño de la señal de entrada existen varios modelos, el cual su uso dependerá de las especificaciones necesarias del proceso que se desea identificar en la planta. Esta entrada brindará gran parte de información al sistema.

Los modelos para la obtención de la planta se mencionan a continuación:

- ✓ Pulso Doble.
- ✓ Secuencia Binaria Aleatoria (RBS).
- ✓ Pseudo Secuencia Binaria Aleatoria (PRBS).
- ✓ Pseudo Secuencia Aleatoria Multi-Nivel (MRS).
- ✓ Multi-Sinusoidal (MSS).

Para el desarrollo de la identificación se analizan dos señales: Pseudo Secuencia Binaria Aleatoria (PRBS) y Multi-Sinusoidal (MSS).

#### 3.5.1 Interfaz gráfica para el diseño de la señal de entrada

La señal de entrada será obtenida mediante una aplicación desarrollada en MATLAB, llamada Input DesignGui, programa realizado por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun. La figura 3.20 muestra la ventana principal de dicha aplicación:

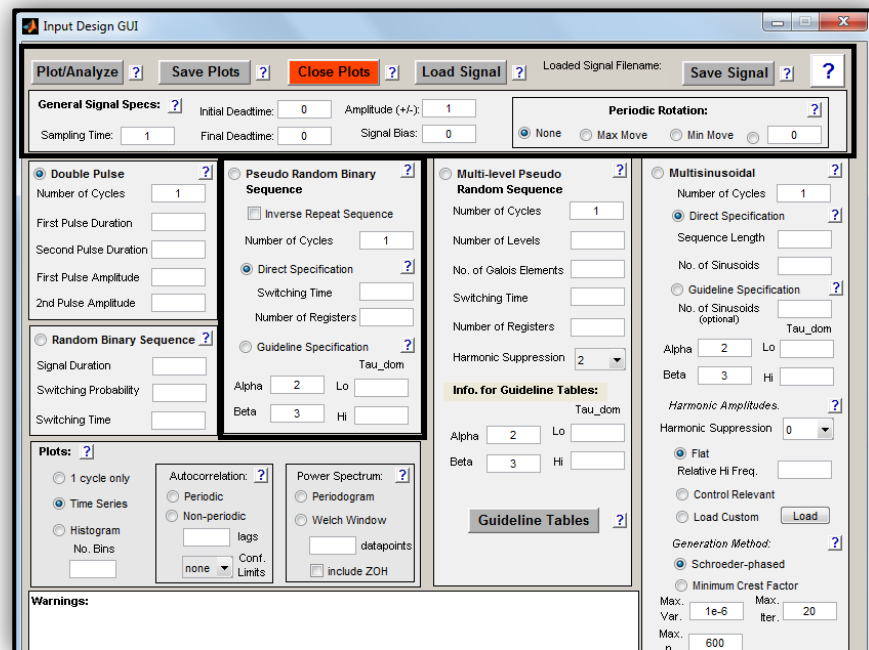


Figura 3. 20 Interfaz gráfica Input Design Gui

La interfaz gráfica Input Design Gui ayuda al diseño de la entrada dependiendo a ciertos valores específicos, los cuales dependen únicamente del comportamiento de la planta y las variables de interés. Estos parámetros son:

### Especificaciones generales de la señal:

- ✓ Sampling Time: Es el tiempo de muestreo, cada sampling time la señal escogerá un dato a muestrear.
- ✓ Amplitude: Amplitud de la señal requerida .
- ✓ Signal Bias: Valor inicial de la señal con respecto al eje x.

### **Aspecto de la señal PRBS (Pseudo Random Binary Sequence).**

- ✓ Guideline Specification: Corresponde a la magnitud de la respuesta en frecuencia del sistema en lazo cerrado alcanzando su ancho de banda.
- ✓  $Tao_{dom}$ : Estimación baja y alta del  $Tao$  para la planta, el cual se obtiene después de realizar varias pruebas a la respuesta escalón de la planta.
- ✓ Alfa: Tiempo de switcheo que asegura el contenido de frecuencia suficientemente alta donde se encuentra disponible la señal de perturbación.
- ✓ Beta: Es el número de pulsos o cantidad de información que se necesita en baja frecuencia que estarán presentes en la señal.

#### **3.5.2 Criterios de selección para la señal**

Para escoger una señal de entrada adecuada a la planta se deben tomar en cuenta ciertos criterios, tales como:

- ✓ Ser tan corta como sea posible
- ✓ No llevar a los actuadores a los límites o exceder las restricciones de movimiento
- ✓ Causar la mínima interrupción a las variables controladas (baja varianza, pequeñas desviaciones del set point)

Algunos requerimientos teóricos pueden entrar en conflicto fuertemente con la operación amigable

### **3.5.3 Diseño de la señal de entrada (PRBS)**

Las señales PRBS debido a sus propiedades de auto correlación y correlación cruzada, se asemejan a las del ruido blanco, además se puede concentrar su potencial en la banda de frecuencia de interés y su función de auto covarianza es periódica.

Dentro de esta prueba, se toma un tiempo de muestreo igual a 0.01 ya que como se demuestra anteriormente, el mismo revelará de una mejor manera el comportamiento de la planta, por consiguiente este tiempo de muestreo se considera como constante a pruebas futuras.

Tanto el  $\tau_{OL}$  como  $\tau_{OH}$  van a ir variando en diferentes pruebas para poder así visualizar el comportamiento de la planta en función de ellos.

Se escoge un  $\alpha$  2 y  $\beta$  3 debido a que con estos valores la entrada PRBS cuenta con un tiempo de switcheo por cada pulso generado menos a la amplitud necesaria para que la planta se estabilice completamente, comportamiento requerido para no tener una respuesta errónea en los coeficientes a la respuesta impulso.

### Señal PRBS1

$T_{muestreo} = 0.01$ ,  $\tau_{domLo} = 0.94$ ;  $\tau_{domHi} = 1.02$ ;  $\alpha = 2$ ;  
 $\beta = 3$  Cycles = 2

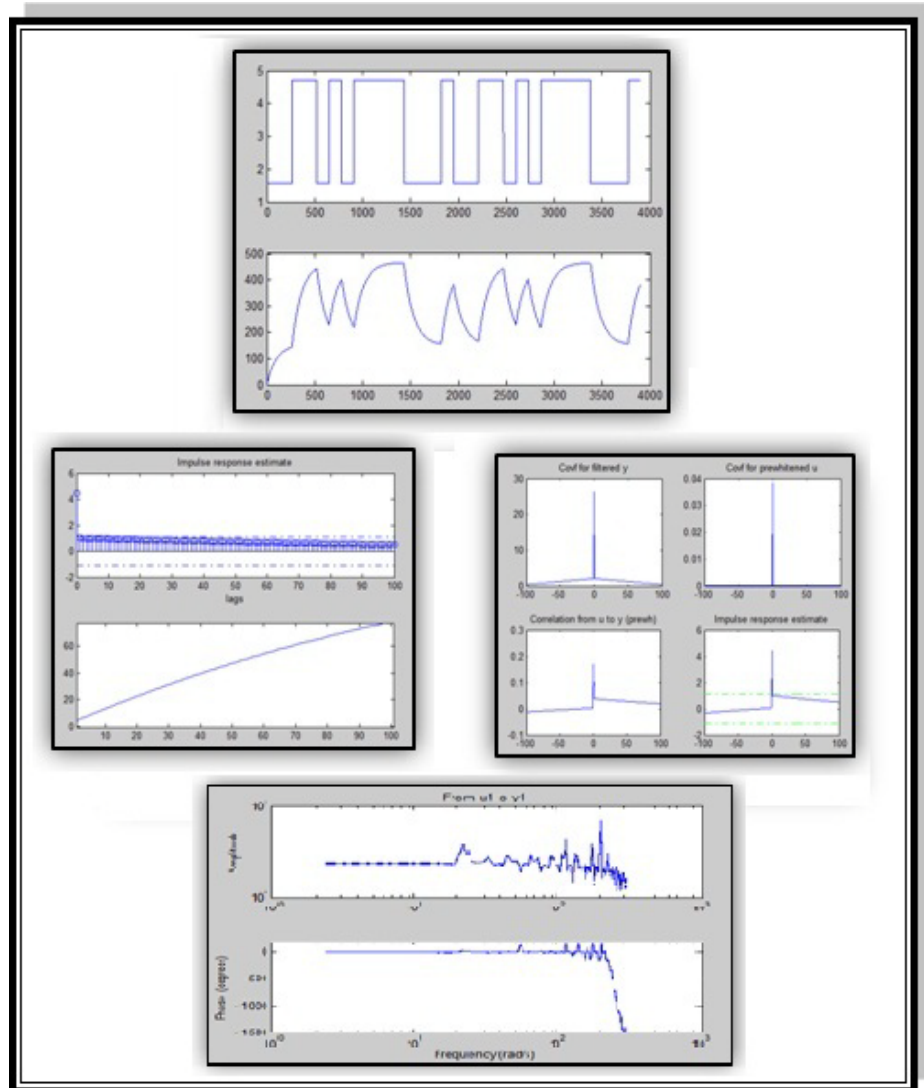


Figura 3. 21 Respuesta de la planta a la primera entrada PRBS



## Señal PRBS2

$T_{\text{muestreo}} = 0.01$ ,  $Tao_{domLo} = 1.06$ ;  $Tao_{domHi} = 1.2$ ;  $Alfa = 2$ ;  
 $Beta = 3$   $Cycles = 3$

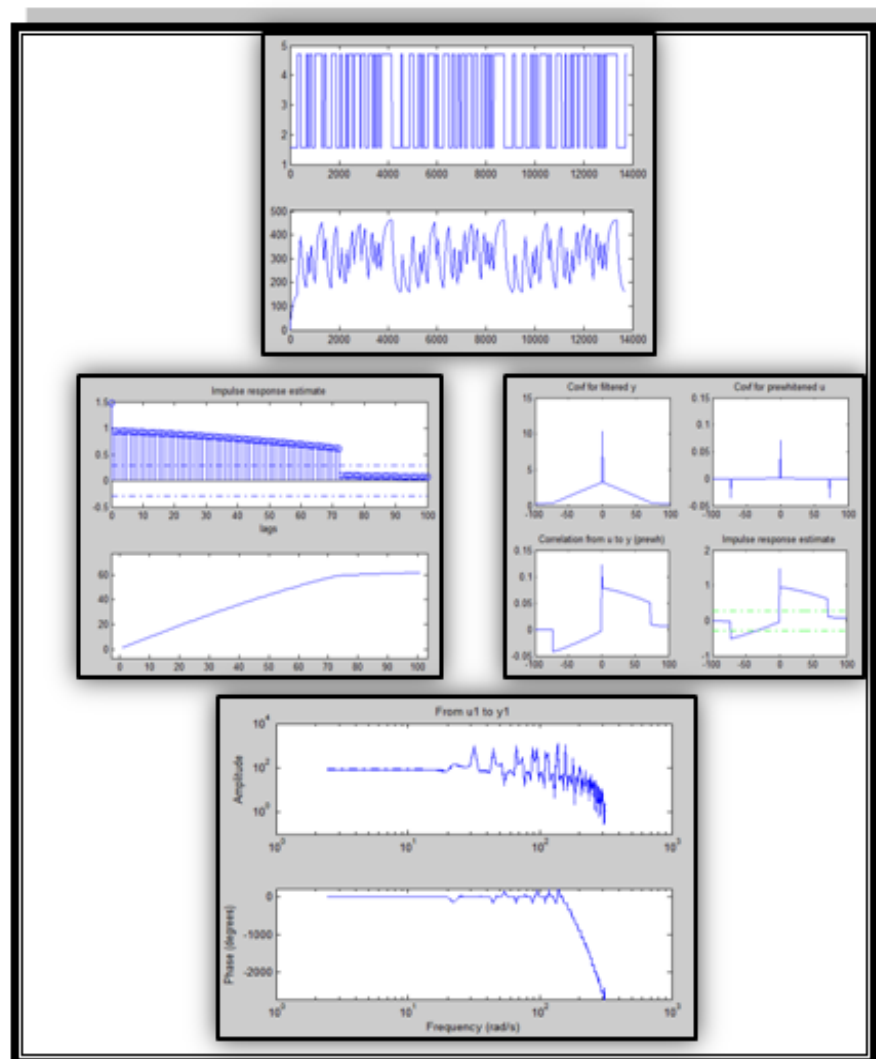


Figura 3. 22 Respuesta de la planta a la segunda entrada PRBS

### Señal PRBS3

$T_{muestreo} = 0.01$ ,  $\tau_{domLo} = 1.01$ ;  $\tau_{domHi} = 1.06$ ;  $\alpha = 2$ ;  
 $\beta = 3$  Cycles = 1

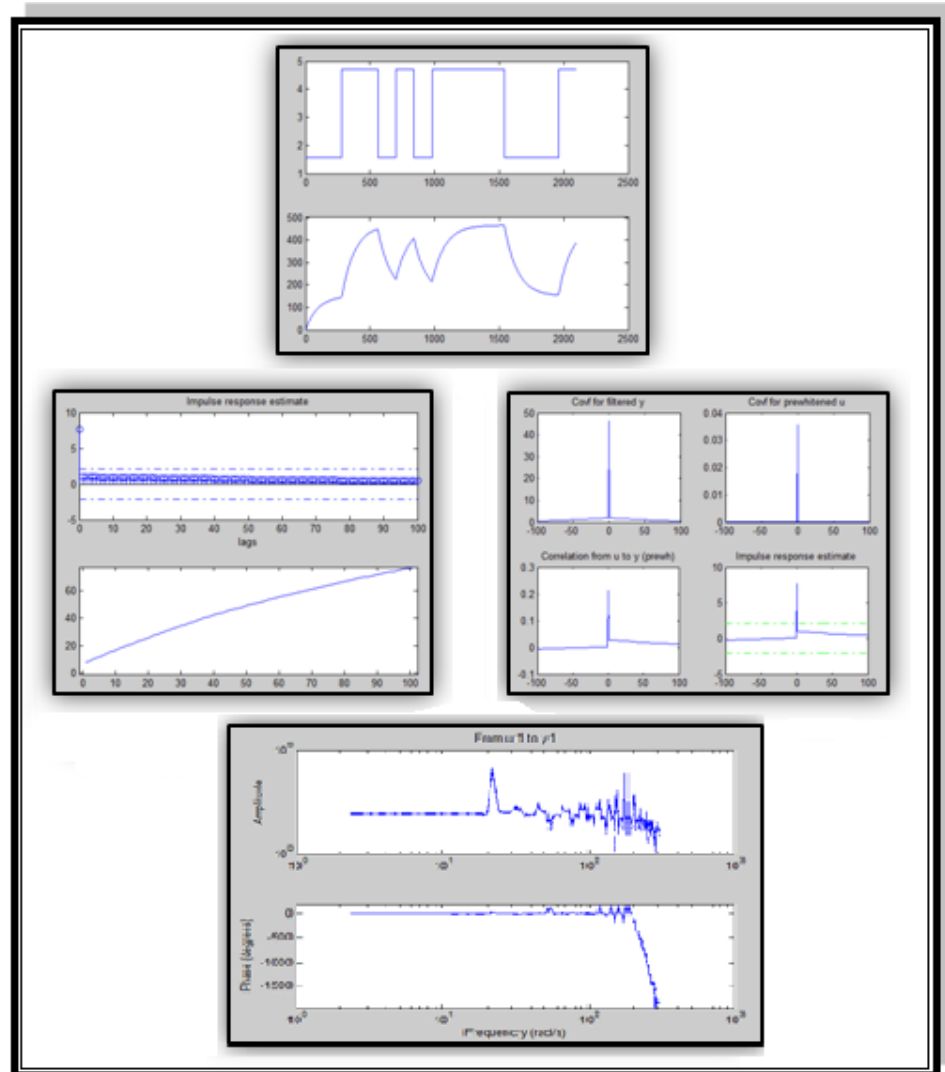


Figura 3.23 Respuesta de la planta a la Tercera entrada PRBS

### Señal PRBS4

$T_{muestreo} = 0.01$ ,  $\tau_{domLo} = 0.9$ ;  $\tau_{domHi} = 1.02$ ;  $\alpha = 2$ ;  
 $\beta = 3$      $Cycles = 3$

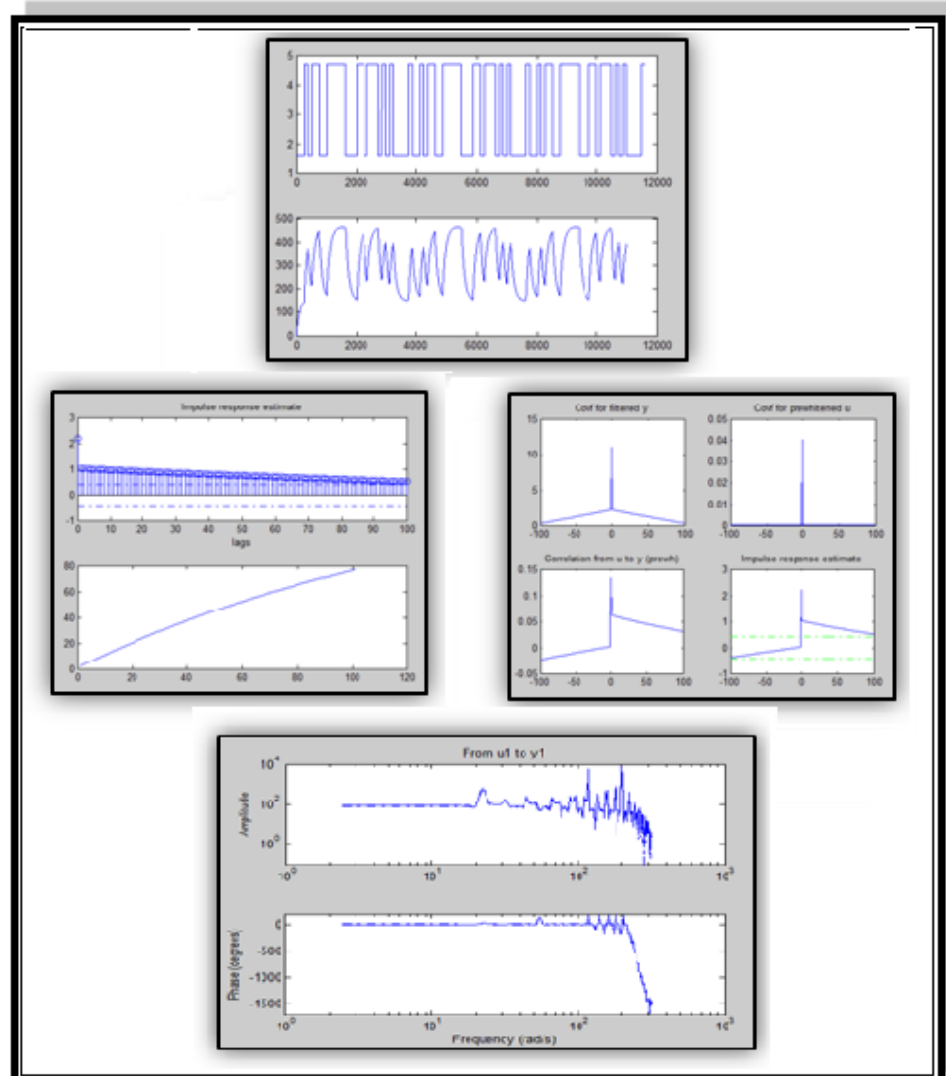


Figura 3. 24 Respuesta de la planta a la Cuarta entrada PRBS

**Señal PRBS1.-** La figura 3.21 muestra la respuesta de la plantada a la señal PRBS creada y los coeficientes de su respuesta impulso. Estos coeficientes llegan a tender a cero pero la gráfica de la respuesta al escalón parece tender al infinito, esto se debe a que la elección del número de lag no es el adecuado para mostrar la estabilización de la planta. También se puede observar en las gráficas de covarianza, correlación y correlación cruzada que tanto la salida “y” responde al ruido blanco al igual que la entrada, lo que indica que los datos de la salida no depende de los datos de la entrada, esto es esenciales para darse cuenta que la entrada creada no otorga los datos necesarios para poder identificar el sistema.

**Señal PRBS2.-** Como se logra visualizar en la figura 3.22 se tiene una señal de entrada con un corto tiempo de switcheo y un rango de tiempo considerable para poder adquirir gráficos más cercanos al comportamiento de la planta, como se puede observar se tiene una respuesta al escalón suavizada muy cercana a la vista anteriormente (véase en la figura 3.16) corroborando esto con las gráficas de correlación y correlación cruzada.

**Señal PRBS3.-** En la gráfica 3.23 se puede observar que la señal de entrada se comporta de la misma manera que la señal PRBS1, lo que indica que no daría una buena estimación en pruebas futuras.

**Señal PRBS4.-** A pesar que se logra observar en la figura 3.24 que existe una relación entre la entrada y la salida, la respuesta al escalón tiende a estabilizarse a mayor tiempo que el escogido, esta entrada tampoco otorga la cantidad necesaria de información sobre la planta ya que tanto la entrada como la salida responde a ruido blanco Gausiano y su correlación cruzada es mínima.

La tabla 3.3 muestra los valores escogidos y el análisis de las respuestas obtenidas para cada señal de entrada PRBS diseñadas.

| PRBS | $\tau_{Ldom}$ | $\tau_{Hdom}$ | Número de ciclos | Amplitud (+/-) | Tiempo total de longitud | Comentario sobre el tiempo de respuesta         |
|------|---------------|---------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| 1    | 0.94          | 1.2           | 2                | $\pi/2$        | 3900                     | Banda de frecuencia no aceptable para trabajar. |
| 2    | 1.06          | 1.2           | 3                | $\pi/2$        | 13700                    | Buena estimación en respuesta al escalón.       |
| 3    | 1.06          | 1.01          | 1                | $\pi/2$        | 2100                     | No existe relación entre la entrada y salida    |
| 4    | 0.9           | 1.02          | 3                | $\pi/2$        | 1162                     | Banda de frecuencia no aceptable para trabajar. |

**Tabla 3. 3 Respuestas obtenidas a las señales de entradas PRBS**

### 3.5.4 Señal Multisenso

Las señales MSS son determinísticas, periódicas y el espectro de potencia puede ser directamente especificado por el usuario a través de la selección del factor de escala  $\lambda$ , los coeficientes de Fourier normalizados  $\alpha_i$ , el número de armónicos  $n_s$ , y la longitud de señal  $N_s$ .

#### Señal MSS1

$T_{\text{muestreo}} = 0.01$ ,  $\tau_{\text{domLo}} = 1.06$ ;  $\tau_{\text{domHi}} = 1.12$ ;  $\alpha = 2$ ;  
 $\beta = 3$       Número de Senos = 1

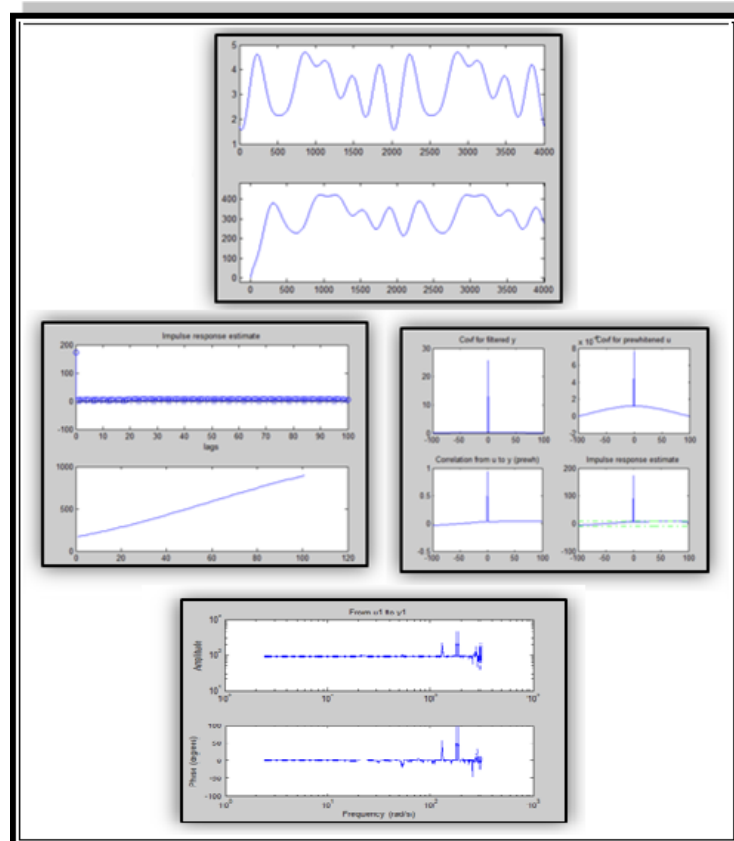


Figura 3. 25 Respuesta de la planta a la Primera entrada MultiSeno

## Señal MSS2

$T_{\text{muestreo}} = 0.01$ ,  $\tau_{\text{domLo}} = 0.9$ ;  $\tau_{\text{domHi}} = 1.12$ ;  $\alpha = 2$ ;  
 $\beta = 3$       Número de Senos = 57

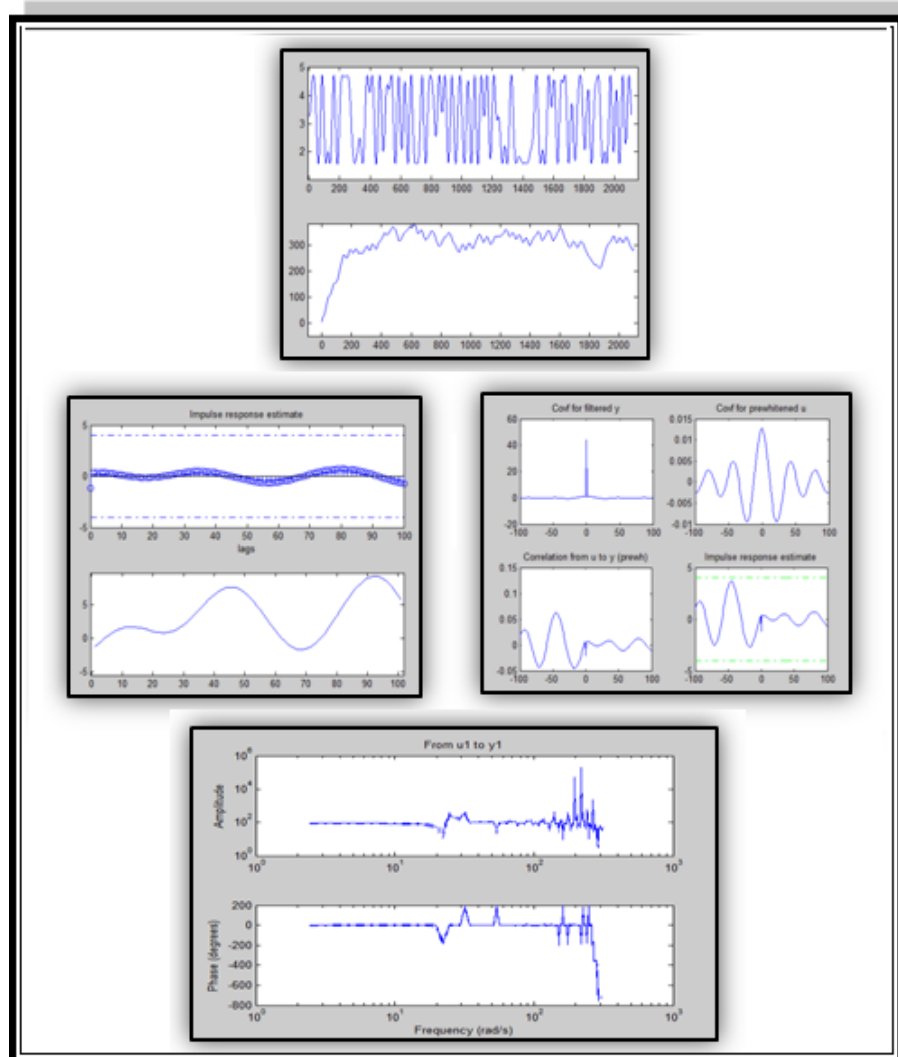


Figura 3.26 Respuesta de la planta a la Segunda entrada MultiSeno

### Señal MSS3

$T_{\text{muestreo}} = 0.01$ ,  $\tau_{\text{domLo}} = 0.9$ ;  $\tau_{\text{domHi}} = 1.01$ ;  $\alpha = 3$ ;  
 $\beta = 4$     Número de Senos = 204

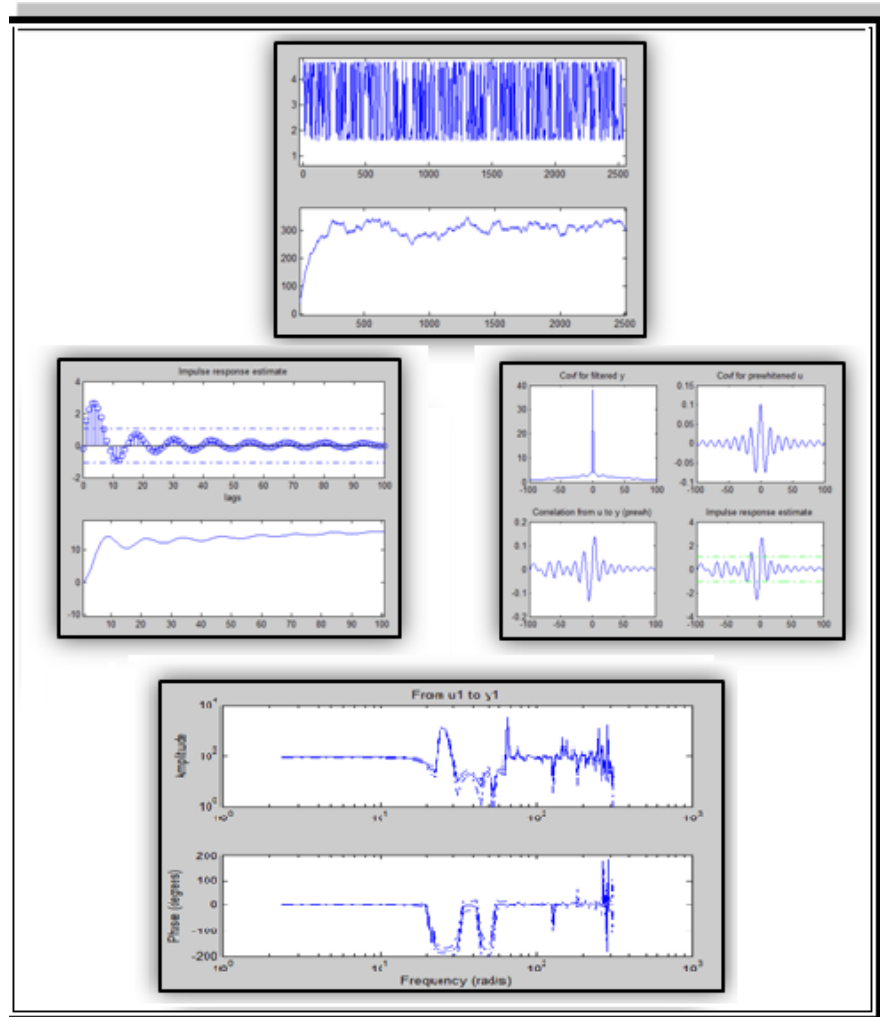


Figura 3. 27 Respuesta de la planta a la Tercera entrada MultiSeno



### Señal MSS4

$T_{muestreo} = 0.01$ ,  $Tau_{domLo} = 1.01$ ;  $Tau_{domHi} = 1.2$ ;  $Alfa = 2$ ;  
 $Beta = 3$  Número de Senos = 377

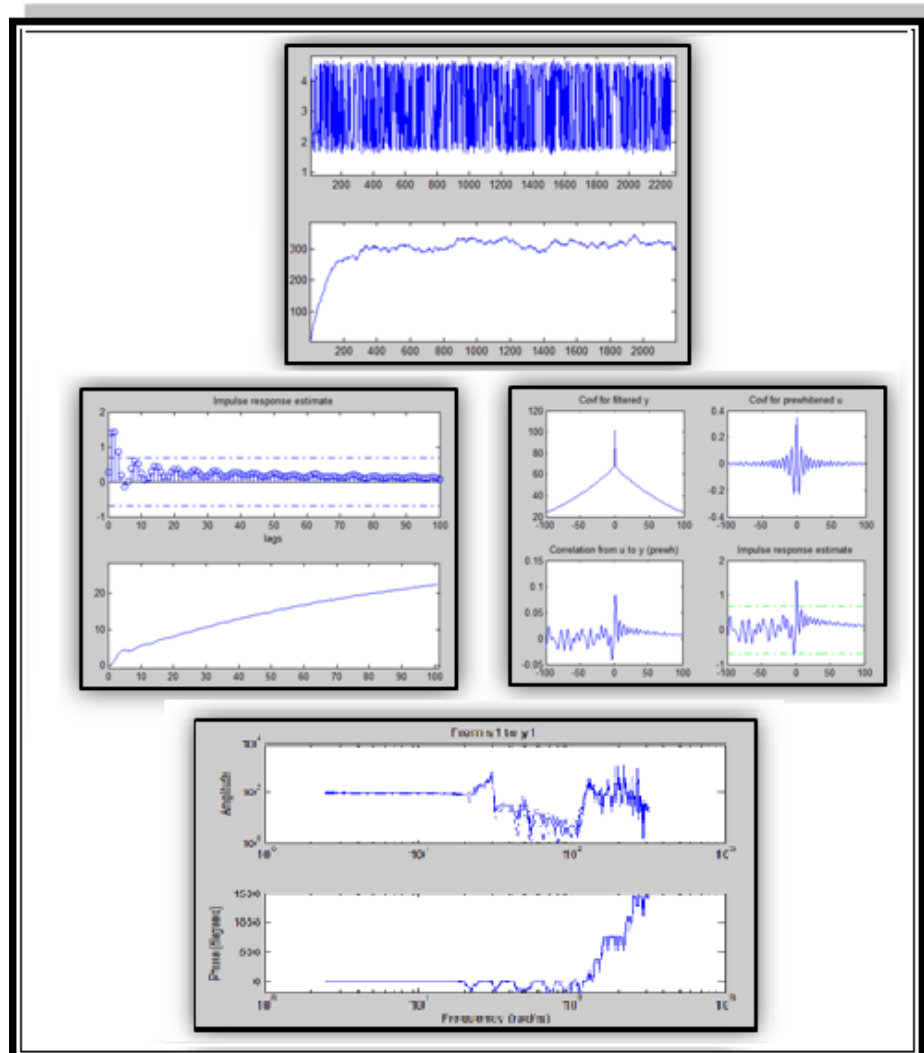


Figura 3. 28 Respuesta de la planta a la Cuarta entrada MultiSeno

| Item | $\tau_{Ldom}$ | $\tau_{Hdom}$ | # de Sin | Amp .   | Aprox. Tiemp | Factor de Cresta | Comentarios sobre la respuesta de tiempo                                |
|------|---------------|---------------|----------|---------|--------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1    | 1.06          | 1.12          | 1        | $\pi/2$ | 4000         | 0                | Mala respuesta a la frecuencia                                          |
| 2    | 0.9           | 1.12          | 57       | $\pi/2$ | 2100         | 1.412            | Correlación y correlación cruzada dentro de los rangos de incertidumbre |
| 3    | 0.9           | 1.01          | 204      | $\pi/2$ | 2500         | 1.401            | Mucha pérdida de datos y pobre respuesta al escalón                     |
| 4    | 1.01          | 1.2           | 377      | $\pi/2$ | 2200         | 1.403            | Repuesta totalmente alejada al set deseado                              |

**Tabla 3. 4 Respuestas obtenidas a las señales de entradas Multiseno**

Como se pudo observar la tabla 3.4 de cada una de las iteraciones con las señales diseñadas multiseno. Las respuestas al escalón se observa que la señal no se estabiliza y en las respuestas de frecuencia no se observa un buen comportamiento de la ganancia a lo largo del ancho de banda, además de tener una gran pérdida de datos, por lo cual no habrá un modelo adecuado para seguir con la identificación.

### 3.5.5 Análisis de la señal escogida

Una vez realizado el análisis de cada tipo de entrada diseñada seleccionada (PRBS y MSS), se continúa con el siguiente paso que es decidir cuál de ellas es la más indicada para el propósito

de la planta. No hay que olvidar que una de las claves para una buena identificación es tener señales lo más amigables posibles para la misma.

Para poder seleccionar la señal más adecuada de la planta virtual, se debe tomar en cuenta criterios tales como: el ancho de banda, la resolución de la señal, el tiempo de estabilización, etc.

La señal que más se apega a la respuesta requerida es la señal PRBS 2 (Véase figura 3.22), donde el factor  $\alpha=2$  asegura que haya suficiente contenido de alta frecuencia y el factor  $\beta=3$  da información de una frecuencia que corresponde aproximadamente al 99% del tiempo de estabilización. La cantidad de datos obtenidos así como el ancho de banda que posee la señal hacen de esta la señal elegida para realizar la identificación.

Con la señal PRBS2, se procede a realizar el estudio de la respuesta al sistema mediante la identificación no paramétrica, vía análisis de correlación el cual permite con el estudio de la respuesta al escalón encontrar el  $\tau_{dom}$  y confirmar el número de orden de la función, para este caso es de primer orden, logrando observar el tiempo de estabilización  $Y(\infty)$ .

Para el proceso del análisis de correlación se hizo uso del comando CRA en la ventana de comandos de Matlab:

```

%Se toma el rango de valores de la matriz de entrada desde
1 a 13700.
zu = prbs14.u(1:13700);
%Señal escalón a ser ingresada.
ystep = transpose(yp3);
%Se toma el mismo rango de valores a graficar para la
señal escalón.
zy = ystep(1:13700);
%Se crea una matriz con los vectores.
z = [zy zu];

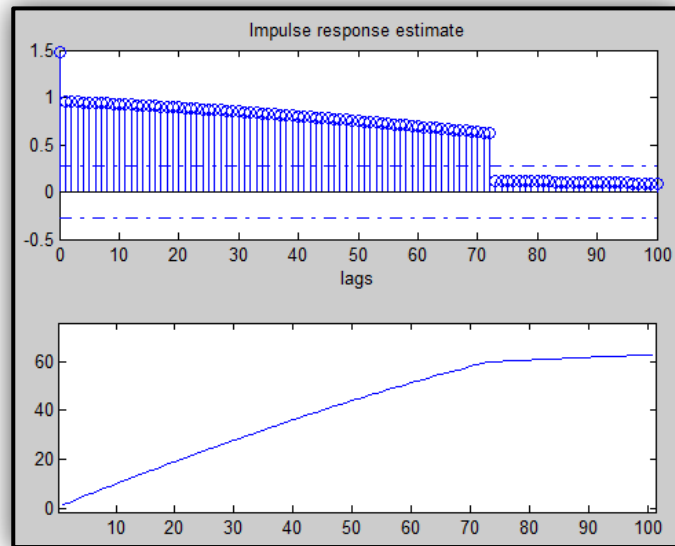
```

Siendo: zy es el vector de datos de la salida  
 zu es el vector de datos de la entrada

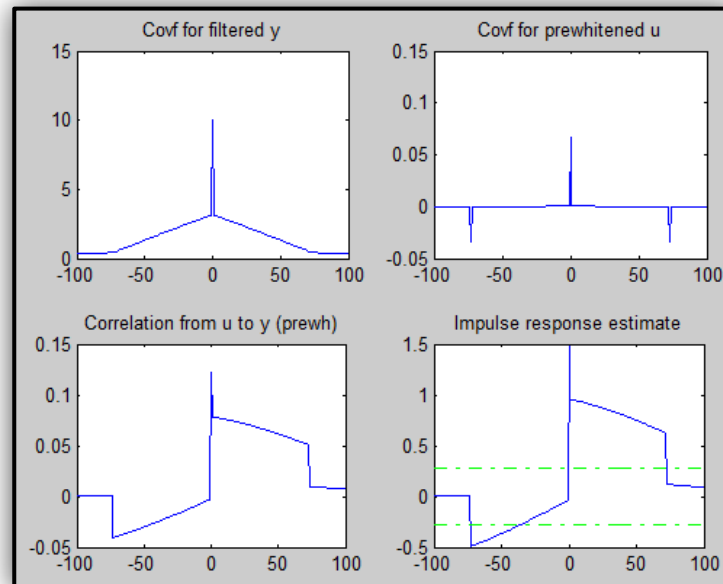
```

%Elimina la tendencia de la matriz z.
z = dtrend(z);
figure
subplot(2,1,1),
%Coeficiente de la respuesta al impulso.
ir = cra(z,100,1);
%Realiza la gráfica al escalón.
stepr = cumsum(ir);
subplot(2,1,2),plot(stepr);
figure
subplot(3,1,3),cra(z,100,1,2);

```



**Figura 3. 29 Respuesta al impulso utilizando el comando CRA**



**Figura 3. 30 Comando CRA**

En la figura 3.30, la gráfica de covarianza para la salida filtrada y mostrada mediante el comando CRA de Matlab, no solo existe un

valor en cero, lo que indicaría que la salida se asemeja al ruido blanco, también se logra visualizar que la entrada no depende de valores anteriores, mediante el cual no se utiliza un orden de filtro pre blanqueado alto ya que la planta no necesita de la misma.

En la figura 3.30, la gráfica de correlación cruzada se puede notar que si existe correlación entre la entrada PRBS y la salida de la planta.

En la figura 3.30, la gráfica de la estimación a la respuesta impulso indica los valores de los coeficientes de la respuesta impulso con los que se puede obtener la respuesta al escalón.

En la figura 3.31 se realiza el estudio Via Análisis Espectral mediante el uso del comando SPA de Matlab, donde se puede observar la banda en la que trabaja la planta, adquiriendo la frecuencia de corte mediante el gráfico de bode en amplitud y fase se puede corroborar que el tiempo de muestreo escogido fue el correcto, ya que este debe ser mayor o igual a dos veces la frecuencia de corte.

Para el proceso del estudio Vía Análisis Espectral se hizo uso del comando SPA en la ventana de comandos de Matlab:

```
id = iddata(zu,zu,0.01);
```

donde: id es el nombre con el que se va a reconocer en el data object

zy es el vector de datos de la salida

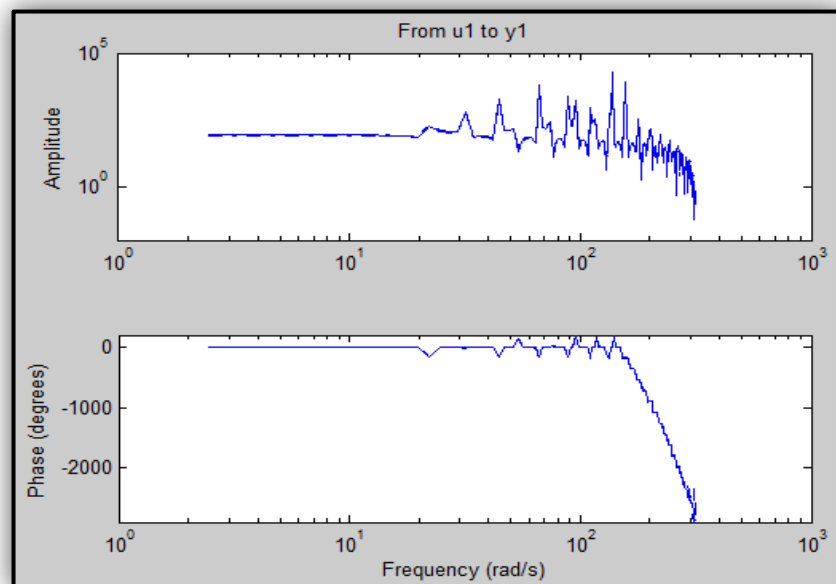
zu es el vector de datos de la entrada

0.01 es el tiempo de muestreo

```
[mag phase] = spa(id);
```

```
Figure
```

```
bodeplot([mag phase],3);
```



**Figura 3. 31 Respuesta de la frecuencia utilizando el comando SPA**

# CAPITULO 4

## IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y PRUEBAS

### 4.1 Proceso de Identificación

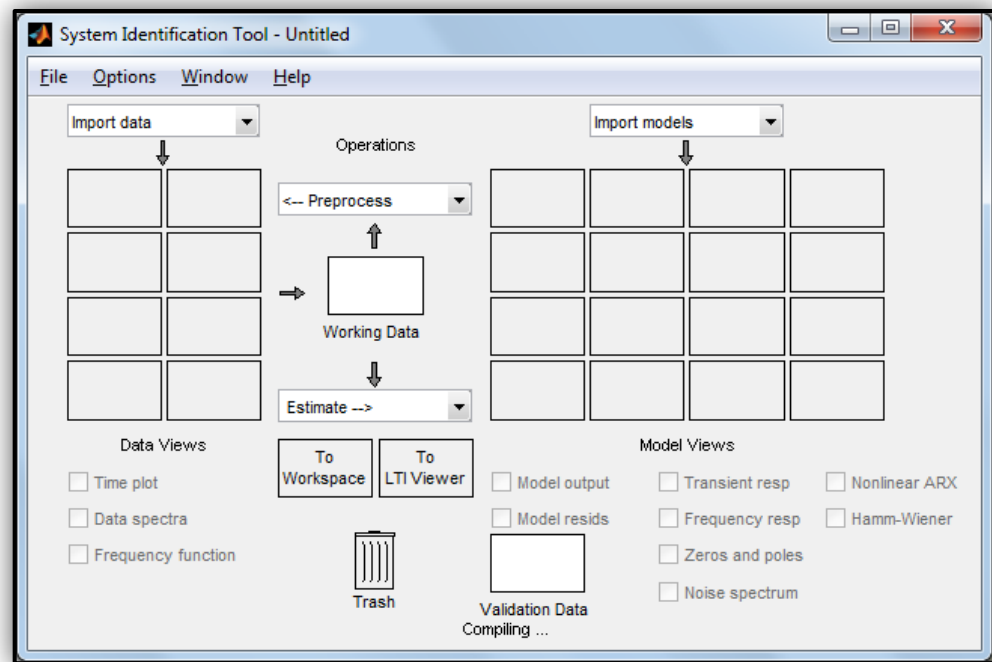
En este capítulo se hace un énfasis más profundo analizando los diversos modelos paramétricos estudiados en clase, el cual servirá para el análisis y control de la planta. El análisis paramétrico es la etapa final para el proceso de identificación de la misma.

Para realizar este proceso se hará uso de la interfaz gráfica IDENT que proporciona Matlab el cual permitirá identificar la planta de estudio.

Esta herramienta System Identification Tool (Figura 4.1) permite de una manera amigable importar los datos, seleccionar los rangos adecuados



que sirven para el proceso de identificación y modelación de los diferentes modelos.



**Figura 4. 1 Interfaz System Identification Tool**

## 4.2 Respuesta total de la planta

De la interfaz Ident (Véase Figura 4.1) en ImportData, se despliega una opción para escoger Data Object, el cual se ha creado con anterioridad en el workspace, donde se abre otra ventana.

En dicha ventana se colocan los nombres de la entrada y salida de la planta a estudiar, en este caso zy y zu, nombre del dato a ser creado, tiempo de inicio igual a 0 y tiempo de muestreo igual a 0.01.

La interfaz para importar los datos requeridos se muestra a Figura 4.2.

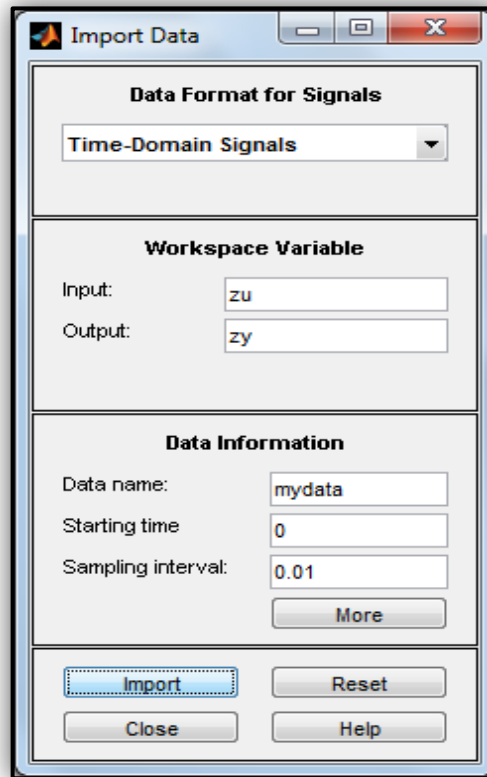
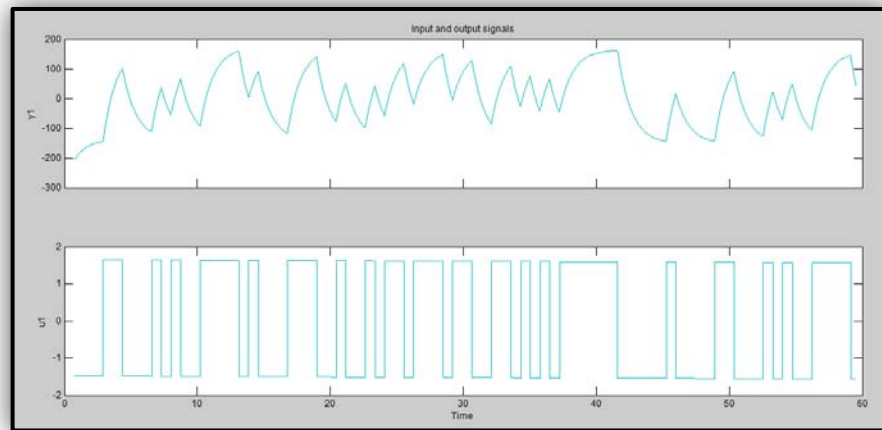


Figura 4. 2 Interfaz para importar datos

Una vez ingresados los respectivos datos, en la mitad de la ventana GUI (Véase Figura 4.1) se encuentran opciones de las diferentes operaciones que se deseen realizar, en este caso se escoge la opción: remove means, es decir que a los datos importados se procederá a quitar la media, en el siguiente análisis se escoge remove trends que elimina la tendencia de los datos.

Se arrastra al recuadro working data (Véase Figura 4.1) el objeto al cual se removió la media y la tendencia, al que se selecciona el rango adecuado para proceder a realizar la estimación de los parámetros,

en este caso se tomó el 70% del total de los datos la identificación de la planta y el 30% para validación de los datos.



**Figura 4.3 Validación de la señal**

### 4.3 Análisis con diferentes modelos de identificación.

Una vez definido el rango de datos se procede a realizar la identificación como tal mediante el análisis matemático visto en el Capítulo 2.6.5.2, se utiliza los diferentes métodos paramétricos en los cuales se establecen la función de error y la convergencia entre la relación lineal del error y los parámetros.

Los diferentes métodos son:

- ✓ ARX
- ✓ ARMAX
- ✓ OE
- ✓ BJ

Estos métodos utilizan diferentes variables que se muestran en la Tabla 4.1.

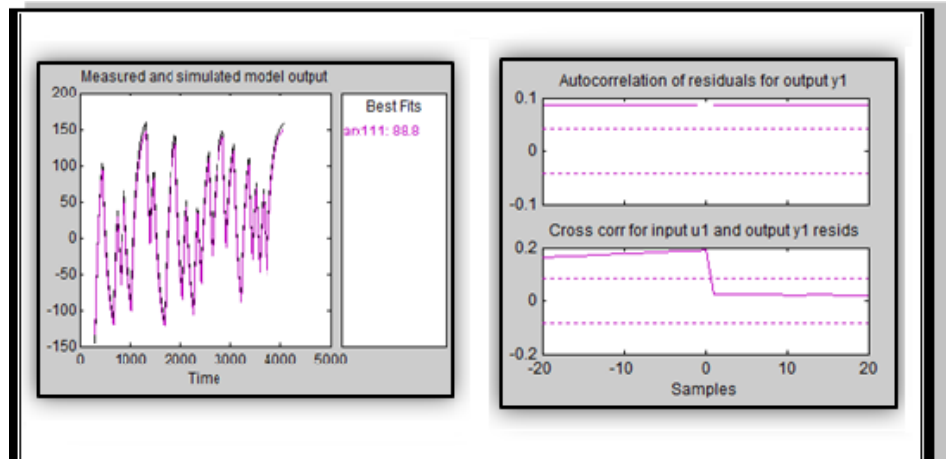
| Nombre    | Significado             |
|-----------|-------------------------|
| <b>na</b> | Número de Polos comunes |
| <b>nb</b> | Número de Zeros+1       |
| <b>nc</b> | Entrada de ruido Zeros  |
| <b>nd</b> | Entrada de ruido Polos  |
| <b>nf</b> | Número de polos         |
| <b>nk</b> | Retardo                 |

**Tabal 4. 1 Significado de variables**

#### **4.3.1 Método ARX Coeficientes 111**

Como se observa en la figura 4.4, el FIT de la estimación del modelo ARX111 es muy elevada, pero a pesar de esto se puede concluir que la estimación es no válida ya que las gráficas de auto correlación y correlación cruzada residual sobresalen de los intervalos de confianza, dando a entender que los residuos de la salida depende de valores pasados y que la correlación cruzada

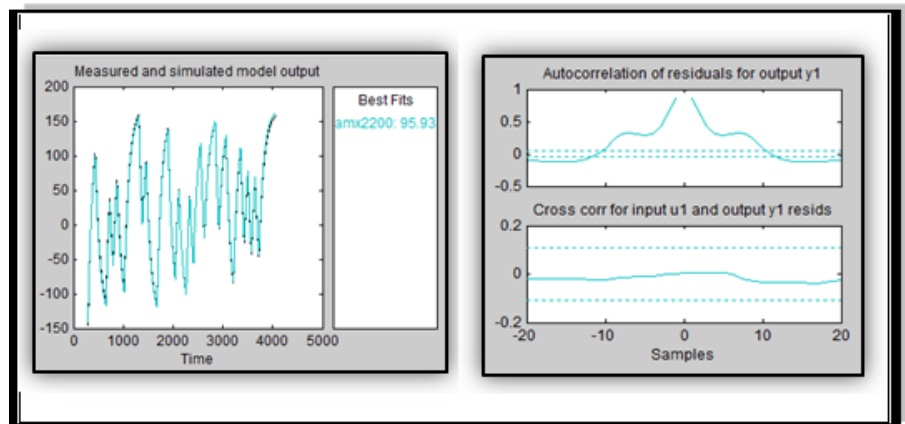
entre los residuos de la entrada y la salida obedecen a valores entre ellos.



**Figura 4.4 Respuesta ARX 111**

#### **4.3.2 Método ARMAX Coeficientes 2200**

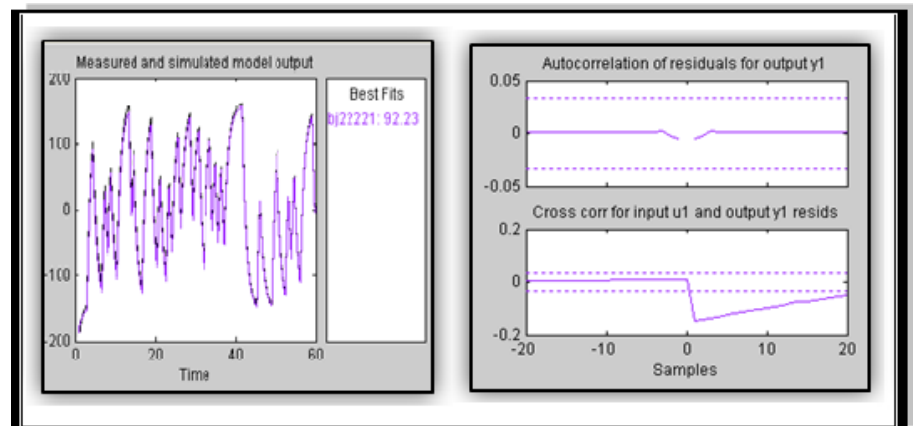
Al igual que en la figura 4.4, se puede inferir que a pesar que el FIT de la estimación es elevada, en la figura 4.5 de autocorrelación residual de la salida responde a valores pasados por lo que la estimación del modelo ARMAX 2200 es inapropiado para la identificación de la planta.



**Figura 4. 5 Respuesta ARMAX 2200**

#### **4.3.3 Método BJ Coeficiente 22221**

Observando la figura 4.6 se puede visualizar una mejora considerable de la estimación, el FIT es excelente el cual quiere decir que la señal dada por el método matemático con la señal de salida de la planta tiene una gran cantidad de datos que responden de similar manera, la gráfica correspondiente a la auto-correlación residual de la salida se encuentra dentro de los intervalos de confianza, a pesar que la gráfica de correlación cruzada sobresale de los intervalos de incertidumbre se toma como una estimación valedera ya que para poder tener una mejor identificación se debe incrementar el grado de la planta aumentando sus polos y sus ceros, creando así una planta muy compleja y de difícil implementación .



**Figura 4.6 Respuesta BJ 22221**

#### **4.3.4 Método OE Coeficiente 221**

La figura 4.7 se puede observar que el porcentaje FIT es alto, sin embargo la Autocorrelación residual de la salida se encuentra fuera del rango de incertidumbre, se puede concluir que la estimación es no válida ya que las gráficas de auto correlación residual sobresalen de los intervalos de confianza, dando a entender que los residuos de la salida depende de valores pasados y que la correlación cruzada entre los residuos de la entrada y la salida obedecen a valores entre ellos.

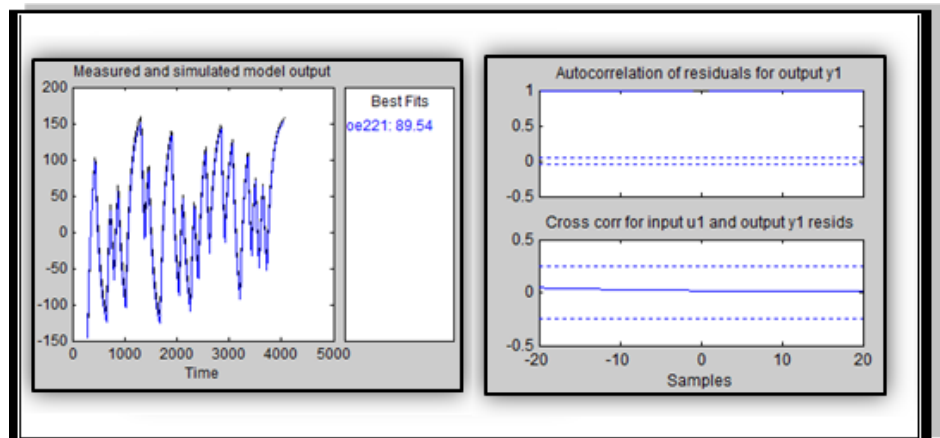


Figura 4. 7 Respuesta OE 221

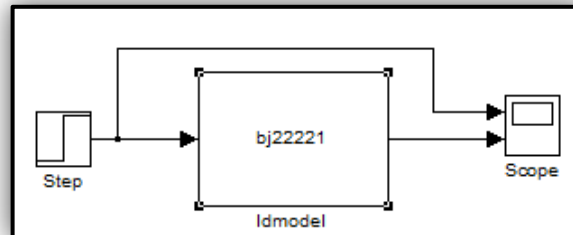
#### 4.4 Análisis y elección del Modelo para la planta

Para realizar la selección del mejor método se debe revisar minuciosamente cada una de las respuestas obtenidas a lo largo de los experimentos realizados, en cuanto al best fit se puede concluir que cada una de las señales posee una muy buena aproximación, más no es un indicador suficiente, sin embargo si la auto-correlación y cross-correlación de residuos están dentro del intervalo de confianza se concluye que no existe error de predicción del modelo matemático.

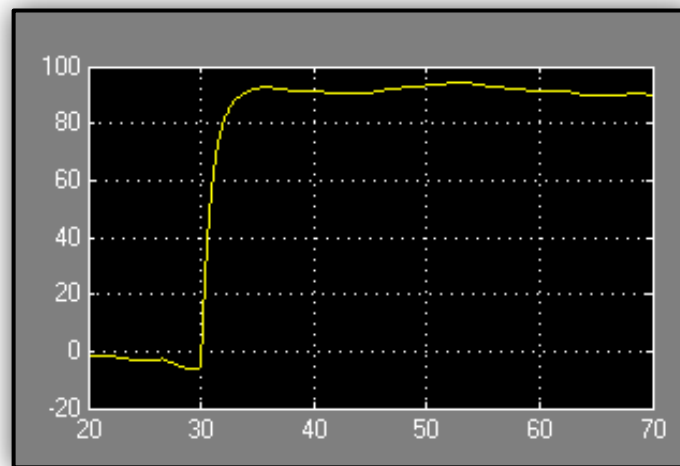
El mejor modelo a escoger para la planta es el BJ, la respuesta de la Autocorrelación residual está dentro de los intervalos de confianza indicando que no existe error de predicción en la salida, se logra observar en la gráfica de Correlación cruzada residual (Figura 4.6) que existe dependencia entre los errores de entrada y salida, sin embargo éste modelo se escogió válido como se explica en el subtema 4.3.3 ya que para solucionar el inconveniente se debe incrementar el grado de



la planta al igual que su complejidad, lo cual no es uno de los objetivos del proyecto.



**Figura 4. 8** Diagrama en Simulink del modelo BJ22221



**Figura 4. 9** Respuesta al impulso del modelo BJ22221

La respuesta obtenida que describe el comportamiento de la planta es:

Modelo para señales discretas:

$$y(t) = [B(s)/F(s)]u(t) + [C(s)/D(s)]e(t)$$

$$B(s) = 341.7 s + 3e004$$

$$C(s) = s^2 + 194.4 s + 3775$$

$$D(s) = s^2 + 178.4 s - 3.686$$

$$F(s) = s^2 + 297.8 s + 301.3$$

# CAPITULO 5

## DISEÑO DEL CONTROLADOR

### 5.1 Proceso del diseño

Una vez terminado el proceso de identificación de la planta, se procede a realizar la implementación de un controlador con el objetivo de efectuar mejoras en el Sistema de Control.

El controlador necesario para este proyecto es un Control P (Proporcional), ya que la planta al incluir el algoritmo RLS otorga una respuesta recursiva, por lo cual indica que la planta ya responde al movimiento del usuario, por lo tanto la variable a mejorar en la planta es el tiempo de estabilización.

La herramienta a utilizar para la elaboración del controlador es SISOTOOL de Matlab, esta herramienta es muy útil para dicho propósito, ya que permite el análisis de sistemas lineales, mostrando la trayectoria de las raíces, gráficas que muestran el Sobrenivel Porcentual, Tiempo de Estabilización, Porcentaje de Error en el Sistema, etc.

## 5.2 Herramienta Sisotool para el diseño del compensador

Como ya se había indicado anteriormente uno de los modelos óptimos para realizar el estudio de la planta es el BJ22221, que cumple con los requerimientos necesarios.

En el workspace de matlab se edita.

`sisotool (bj22221)`

Se abrirá la siguiente ventana (Ver Figura 5.1)

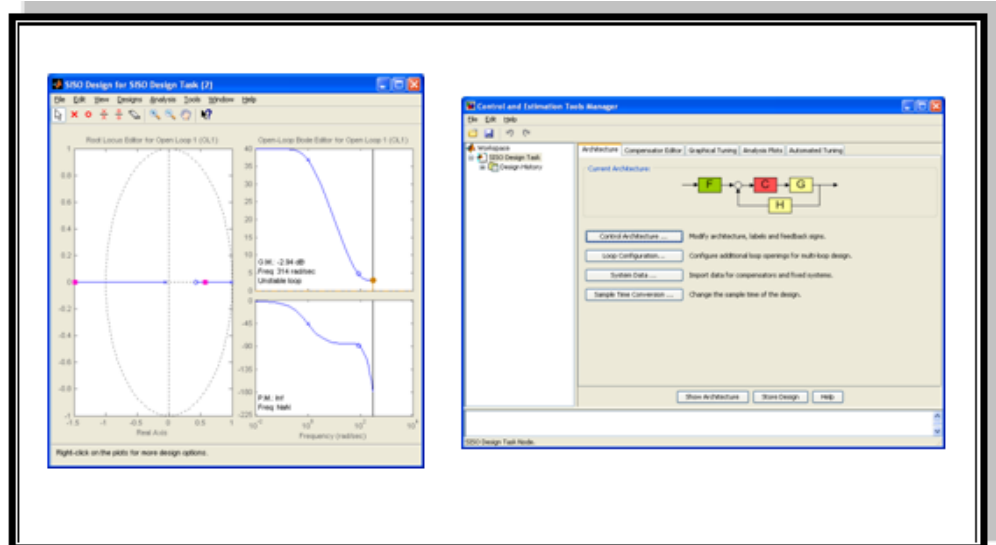
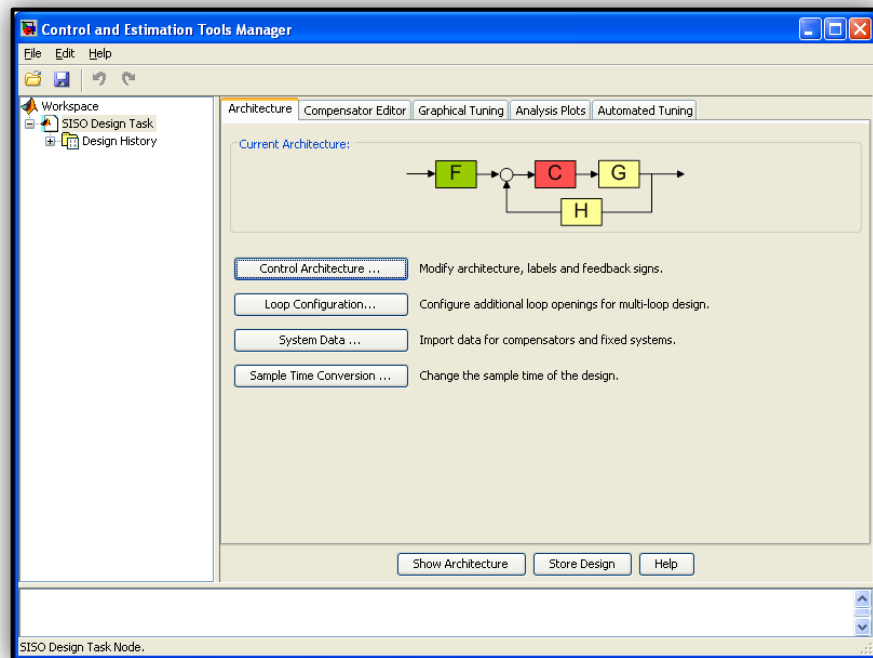


Figura 5.1 Presentación de la ventana Sisotool

La figura 5.1 muestra la trayectoria de las raíces, el esquema del diagrama de bloques que se va a diseñar en lazo cerrado.

Con dicha interfaz se puede modificar la trayectoria de las raíces, agregando polos o ceros al controlador, así también modificando la ganancia moviendo las raíces sobre la trayectoria.



**Figura 5. 2 Ventana de Control y estimación del Sisotool**

Se puede decir que en condiciones normales, los coeficientes de los bloques, significan:

- ✓ H.- Ganancia o función de Transferencia de sensor
- ✓ C.- Controlador
- ✓ F.- Prefiltro .

### 5.3 Diseño del Controlador P para el modelo elegido

Con los datos iniciales de la planta sin compensador se tiene en condiciones normales lo siguiente (Ver Figura 5.3)

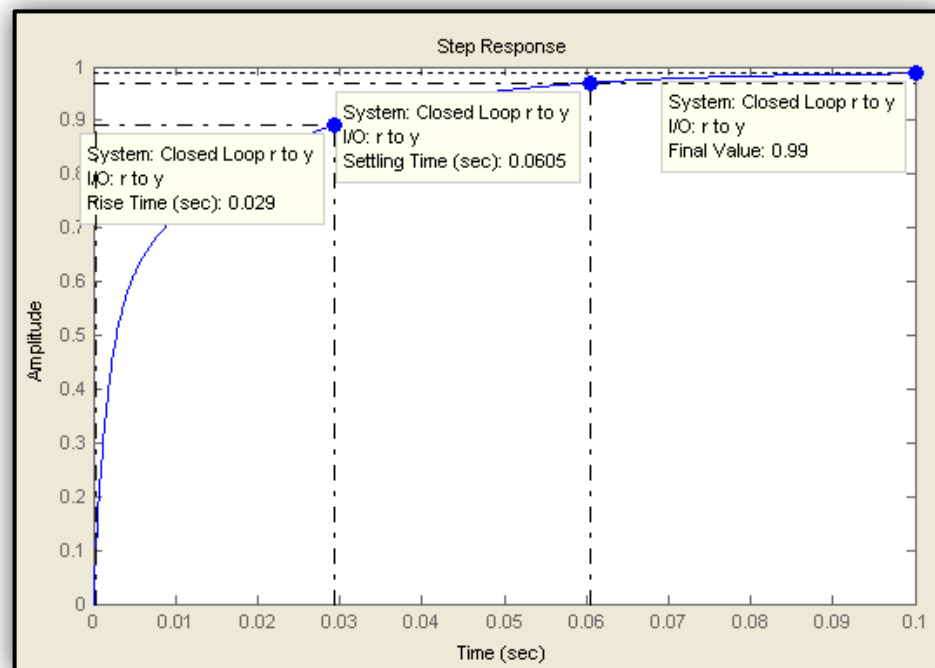


Figura 5.3 Respuesta del modelo

- ✓ Tiempo de estabilización: 0.06 seg
- ✓ Tiempo de levantamiento: 0.029 seg

Los valores indicados deben de mejorar una vez diseñado el controlador.

## 5.4 Desplazamiento de la trayectoria de las raíces

Se realiza el desplazamiento de la trayectoria en raíces para satisfacer los nuevos requerimientos de la planta. Esto se facilita ya que se conocen los valores a mejorar, teniendo un claro objetivo hacia donde se quiere llegar.

Se procede a establecer un parámetro a mejorar de la planta, en este caso el único parámetro adecuado es el tiempo de estabilización ya que la planta al disponer de un algoritmo adaptativo RLS hace que converja muy rápida al solo tomar en cuenta el proceso de las señales eléctricas de la planta, a diferencia del procesamiento del DSP (Procesador Digital de señales) y sensores que implican un sistema de antenas inteligentes. Debido a esto se procede a mejorar el tiempo de estabilización haciendo click derecho sobre la ventana (Véase Figura 5.4) moviéndose sobre la trayectoria de las raíces hasta obtener el tiempo de estabilización requerido.

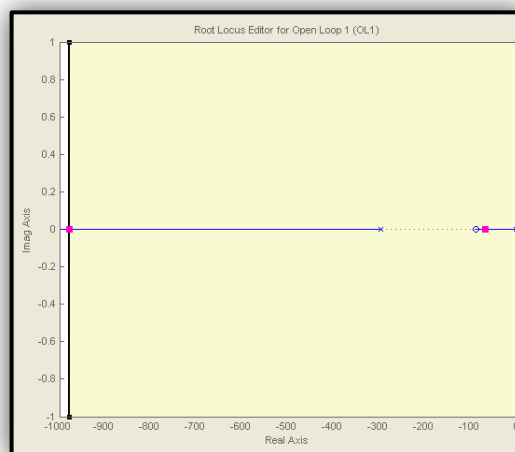


Figura 5.4 Desplazamiento de la trayectoria de las raíces

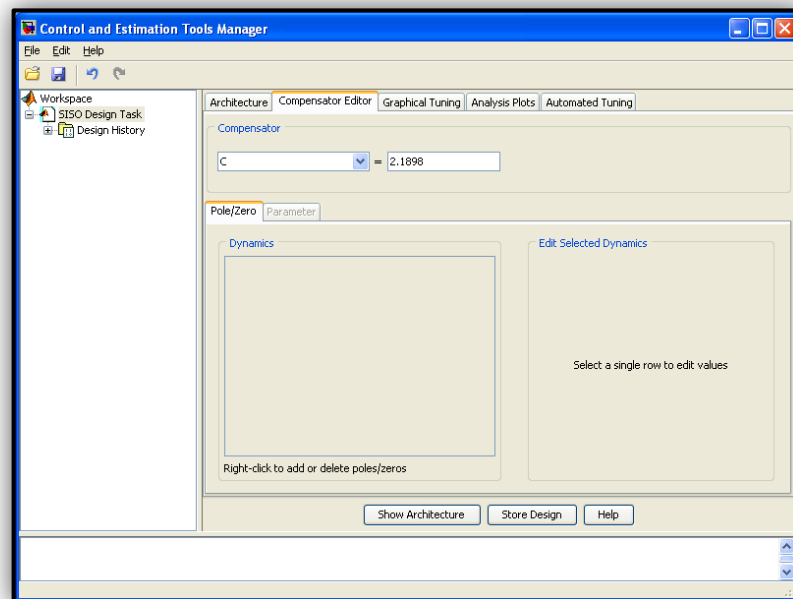


Figura 5.5 Selección del compensador

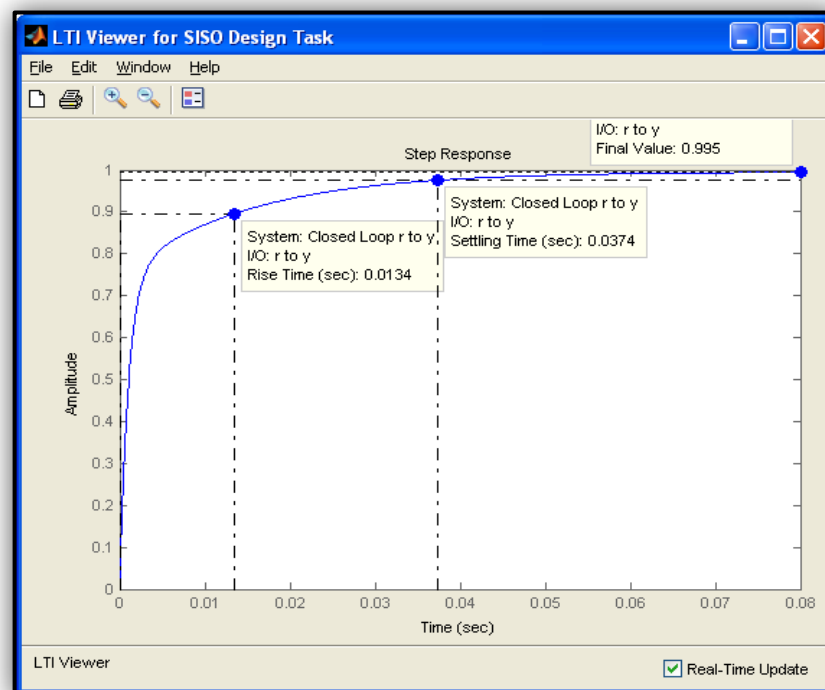


Figura 5.6 Respuesta del modelo con Compensador

La figura 5.5 muestra el valor del compensador para satisfacer el requerimiento de mejorar el tiempo de estabilización de la planta.

La figura 5.6 se observa que se obtuvo un tiempo de estabilización más rápido, el cual es muy indispensable en el comportamiento de antenas inteligentes, pudiendo decir que se ha mejorado el control del sistema, teniendo:

- ✓ Tiempo de estabilización: 0.0374 seg
- ✓ Tiempo de levantamiento: 0.0134 seg

## 5.5 Pruebas del compensador

Una forma de comprobar que el compensador ha sido efectivamente el adecuado, se procede a realizar una sencilla pero importante prueba que es añadir una nueva señal escalón y cambiarle algunos de sus parámetros. Las respuestas obtenidas como se muestra en la figura 5.7

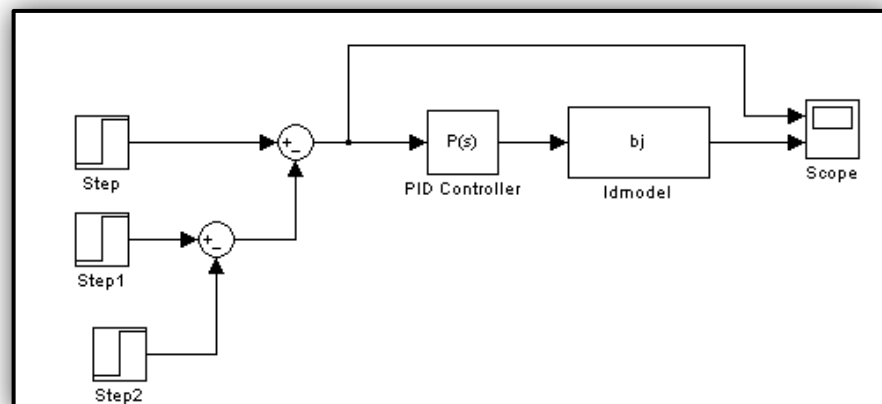
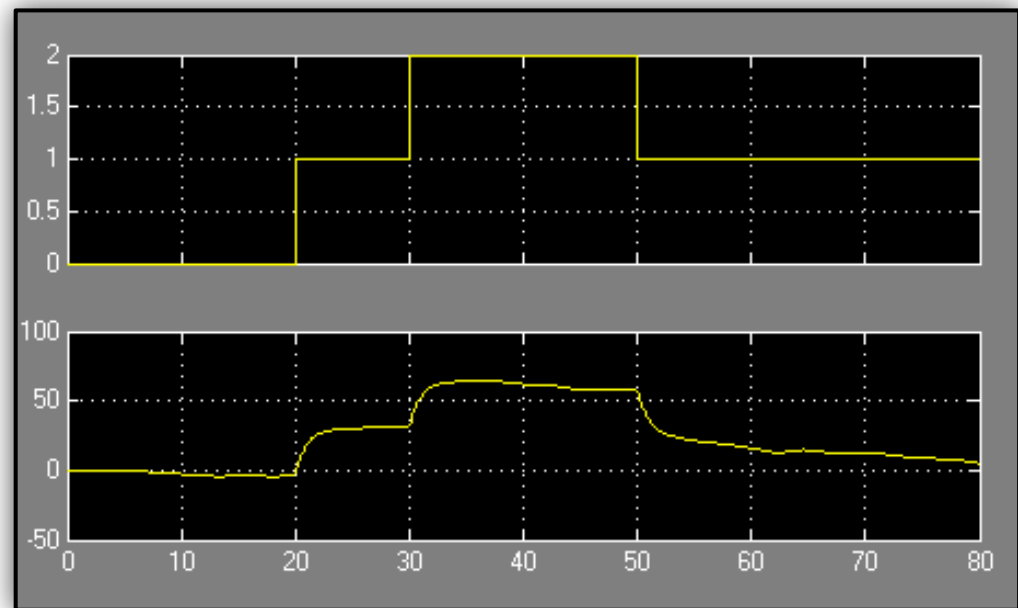


Figura 5. 7 Diagrama en Simulink modificado





**Figura 5. 8 Respuesta al escalón del sistema**

Como se puede observar en la figura 5.7 no se indica la retroalimentación, ya que el algoritmo RLS dentro de la planta al ser un algoritmo recursivo ya tiene implícito en él la retroalimentación en lazo cerrado.

La función de transferencia de la planta está dada por el modelo matemático BJ22221, el cual se escogió en el Capítulo 4. Haciendo uso de la ventana de comandos de Matlab, se obtiene la ecuación (22).

Tf(BJ22221)

$$\frac{341.7s+3e^4}{s^2+297.8s+301.3}u(t) + \frac{s^2+194.4s+3775}{s^2+178.4s-3.686}e(t) \quad (22)$$

La función de transferencia de la planta con compensador, obtenida de Sisotool, diagrama de polos y ceros es:

$$2.1898 \cdot \frac{s+87.8}{(s+979)(s+67.4)} \quad (23)$$

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones.

1. El programa MATLAB es una herramienta muy exacta en cuanto a modelación matemática, su eficacia en el uso de matrices para poder estudiar y desarrollar hipótesis, durante todo este proyecto fueron puntos decisivos para alcanzar nuestros objetivos de la mejor manera por lo cual el uso de esta herramienta es altamente recomendable ya que nos significó una espléndida ayuda y es más una fuente de conocimiento para nuestros propósitos.
2. La herramienta SIMULINK que contiene el programa MATLAB a diferencia de la interfaz de comandos que nos otorga MATLAB en su esencia, es una interfaz mucho más amigable para el programador, ya que mediante su estructura netamente grafica de bloques, que contienen funciones especificas dependientes de entradas para poder cumplir a cabalidad su desarrollo, nos significa una herramienta mucho más eficaz en cuestión de tiempo. Por otro lado esta herramienta también puede ser mal vista ya que el sistema que propone nos oculta la mayor parte del detalle de la programación, de igual manera durante este proyecto nos fue de gran ayuda

ya que mezclando las dos interfaces que este esplendido programa nos brinda logramos encontrar un beneficio tanto en detalles como en ahorro de tiempo.

3. La implementación de nuestra planta de forma virtual nos significó algunos beneficios pero al mismo tiempo algunas complicaciones, ya que al tratar de modelar un sistema con una cantidad considerable de variables tanto mecánicas como lógicas se tuvieron que asumir o dejar por fuera muchas de estas y enfocarnos en la variable que incide en el tema de investigación, se puede concluir que si se quiere tomar en consideración todas las variables que representa una Antena Inteligente la adquisición de una real o implementación de una sería la mejor opción.
4. Al momento de querer encontrar la mejor entrada a nuestro sistema se hallaron algunos inconvenientes ya que al inicio aplicábamos entradas que no eran nada amigables con nuestra planta ni nos otorgaba la cantidad de información necesaria sobre la dinámica, por lo que se profundizo en la obtención de la misma la cual dependía del modelo final este lo más cercano posible al simulado, se debe concluir que la obtención del mejor tipo de entrada para el sistema es un punto decisivo para la Identificación de Sistemas.
5. Durante la identificación no paramétrica vía análisis de correlación y espectral, se pudo obtener la primera aproximación del modelo de nuestra planta, aunque no muy asertiva significó nuestro primer paso para llegar al modelo final. Este tipo de identificación nos confirmo la obtención de una buena señal de entrada ya que si esta no estaba correcta la gráfica de

correlación entre la entrada y la salida nos daba un pulso en cero, lo que nos demostraba que nuestra entrada no tenía ninguna relación con nuestra salida o por lo menos que esa entrada no significaba ningún tipo de información sobre nuestra planta.

6. En la identificación paramétrica usando los diferentes modelos, sean estos, ARIMA, BOX JENKINS, OUTPUT ERROR, ARX se puede concluir que el modelo de BOB JENKINS da la mejor aproximación a la planta que presenta la función de transferencia más sencilla en su respuesta, tanto al impulso como al escalón, fue la más cercana a la que obtuvimos de la identificación no paramétrica anteriormente realizada.
7. La herramienta SISOTOOL en el programa MATLAB nos ayudo de una manera muy eficaz a localizar los polos y ceros de la función de transferencia de nuestra planta, esta herramienta es un GUI de MATLAB dedicado al estudio de funciones de transferencias de sistemas dinámicos, por lo cual nos significo un paso muy grande para encontrar nuestro compensador final el cual mejorara la funcionalidad de la planta.
8. La implementación de nuestro controlador final para la planta fue suficiente con la colocación de un compensador ya que la planta responde como un sistema de primer orden en el cual la única variable significativa a mejorar es su tiempo de estabilización, lo cual nos representa el tiempo de convergencia mucho más rápido en la planta.

**Recomendaciones.**

1. Se recomienda tener una base sólida en cuanto al conocimiento total de la planta que se quiere simular, variables que inciden en el sistema, variables que se tomarán en cuenta en la simulación, variables que no se tomarán en cuenta, etc, ya que de esto depende la profundidad y complejidad de la planta.
2. Se debe tener un buen conocimiento de los modelos de Identificación y las variables que estos manejan ya que sin esta base no se llegaría a comprender la información que nos otorgan las gráficas obtenidas por medio del programa MATLAB.
3. Al momento de utilizar la herramienta SIMULINK de MATLAB, tener en cuenta todas las características de los diferentes bloques a emplear ya que de otra manera al momento de querer correr la simulación se obtendrán errores comunes como por ejemplo: la variable de entrada no es del tipo correcto, el tiempo de muestreo de un bloque con otro no son los mismos y que representa un error en el modelo, etc.
4. Se recomienda que la entrada al sistema sea la más óptima para la planta, queriendo decir con esto, que la señal de entrada la identificación debe otorgar la mayor cantidad de información sobre la planta ya que sin esto el modelo final sería equivocado.

# ANEXOS

TABLA DE TRANSFORMADAS

| Dominio t (Tiempo)                     | Dominio s (Laplace)     | Dominio z                                                                                                      |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\delta(t)$ - Impulso                  | 1                       | 1                                                                                                              |
| $\mathcal{U}(t)$ - Escalón             | $\frac{1}{s}$           | $\frac{z}{z-1}$                                                                                                |
| $t$                                    | $\frac{1}{s^2}$         | $\frac{Tz}{(z-1)^2}$                                                                                           |
| $\frac{1}{2}t^2$                       | $\frac{1}{s^3}$         | $\frac{T^2 z(z+1)}{2(z-1)^3}$                                                                                  |
| $t^{m-1} \quad m=1,2,\dots$            | $\frac{(m-1)!}{s^m}$    | $\lim_{b \rightarrow 0} \left[ (-1)^{m-1} \frac{\partial^{m-1} \frac{z}{z-e^{-bT}}}{\partial b^{m-1}} \right]$ |
| $e^{-at}$                              | $\frac{1}{s+a}$         | $\frac{z}{z-e^{-aT}}$                                                                                          |
| $\frac{e^{-bt} - e^{-at}}{a-b}$        | $\frac{1}{(s+a)(s+b)}$  | $\frac{1}{a-b} \left[ \frac{z}{z-e^{-bT}} - \frac{z}{z-e^{-aT}} \right]$                                       |
| $\frac{1}{a}(1-e^{-at})$               | $\frac{1}{s(s+a)}$      | $\frac{1}{a} \frac{(1-e^{-aT})z}{(z-1)(z-e^{-aT})}$                                                            |
| $\frac{1}{a}(t - \frac{1-e^{-at}}{a})$ | $\frac{1}{s^2(s+a)}$    | $\frac{1}{a} \left[ \frac{Tz}{(z-1)^2} - \frac{(1-e^{-aT})z}{a(z-1)(z-e^{-aT})} \right]$                       |
| $te^{-at}$                             | $\frac{1}{(s+a)^2}$     | $\frac{Tze^{-aT}}{(z-e^{-aT})^2}$                                                                              |
| $\sin at$                              | $\frac{a}{s^2+a^2}$     | $\frac{z \sin aT}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$                                                                      |
| $\cos at$                              | $\frac{s}{s^2+a^2}$     | $\frac{z(z - \cos aT)}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$                                                                 |
| $e^{-at} \sin bt$                      | $\frac{b}{(s+a)^2+b^2}$ | $\frac{ze^{-aT} \sin bT}{z^2 - 2ze^{-aT}(\cos bT) + e^{-2aT}}$                                                 |



|                                                                           |                                                                     |                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $e^{-at} \cos bt$                                                         | $\frac{s+a}{(s+a)^2 + b^2}$                                         | $\frac{z^2 - ze^{-aT} \cos bT}{z^2 - 2ze^{-aT} (\cos bT) + e^{-2aT}}$                                                                                               |
| $e^{-at} \cos(at - \theta)$                                               | $\frac{\cos \theta (s+a) + \omega \sin \theta}{(s+a)^2 + \omega^2}$ | $\frac{z \cos \theta (z - \alpha) - z \beta \sin \theta}{(z - \alpha)^2 + \beta^2}$<br>$\alpha = e^{-aT} \cos \omega T$<br>$\beta = e^{-aT} \sin \omega T$<br>donde |
| $a^k$                                                                     | ...                                                                 | $\frac{z}{z - a}$                                                                                                                                                   |
| $ka^{k-1}$                                                                | ...                                                                 | $\frac{z}{(z - a)^2}$                                                                                                                                               |
| $\frac{1}{2} k(k-1)a^{k-2}$                                               | ...                                                                 | $\frac{z}{(z - a)^3}$                                                                                                                                               |
| $\frac{1}{(M-1)!} \left[ \prod_{i=0}^{M-2} (k-i) \right] a^{k-M+1} \dots$ |                                                                     | $\frac{z}{(z - a)^M}$                                                                                                                                               |
| <b>Teoremas de Valor Inicial y Final</b>                                  |                                                                     |                                                                                                                                                                     |
| $f(0)$                                                                    | $\lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$                                 | $\lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$<br>si el límite existe                                                                                                           |
| $f(\infty)$                                                               | $\lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$                                      | $\lim_{z \rightarrow 1} (z-1)F(z)$<br>si todos los polos de $(1-z^{-1})F(z)$ se ubican en $ z  < 1$                                                                 |

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ L. Ljung, "System Identification. Theory for the user", Prentice Hall, 1987.
- ✓ Giancolli C., Física, Principios con Aplicaciones, 4ta. Ed., Prentice Hall, 1997.
- ✓ Serway A., Beichner J., Física para Ciencias e Ingenierías, McGraw-Hill 5ta. Ed., 2002.
- ✓ Ogata, K., Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Prentice Hall 2da. Ed., 1998.
- ✓ Ogata, K., Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- ✓ Ljung L. y Glad T., Modeling of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1994.

**[1]** GARRIDO, Santiago. "Identificación, Estimación de Sistemas No-Lineales mediante RGO" 1990, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática:

<http://roboticslab.uc3m.es/publications/SGarridoPhD.pdf>, pag,1, 2

**[2]** L. A. Zadeh. From circuit theory to system theory. In *Proc. IRE* 50, pages 856–865, 1962.

**[3]** Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería, [http://www.upv.es/antenas/Tema\\_1/breve\\_r\\_historica.html](http://www.upv.es/antenas/Tema_1/breve_r_historica.html)

**[4]** Escuela Politécnica Salesiana, Antenas Inteligentes, Facultad de Ingeniería Eléctrica <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15/11/Capitulo4.pdf>

**[5]** Algoritmo Adaptativo con estadística de alto orden. Identificación a ciega de Canales. Tesis Doctoral por Enrique Alameda Hernandez, Universidad de Granada, [http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/15003/1/Tesis\\_ealameda.pdf](http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/15003/1/Tesis_ealameda.pdf)

**[6]** Libro, Antenas: Principio Básicos, Análisis y Diseño, Hernández José, pag

**[7]** Antenas Inteligentes, V Encuentro de Ramas IEEE, Ing Rafael Albornoz, TSU Sohaila Mustafá

**[8]** Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para Sistemas de antenas inteligentes, Perla Espinosa Díaz<sup>1</sup> Carlos Villarroel González<sup>2</sup>, 2007

**[9]** Introducción a la Identificación de Sistemas, Javier Sedano Franco y José Ramón Villar <http://www.tecnicaindustrial.es/TIAdmin/Numeros/16/37/a37.pdf>

**[10]** Identificación de Sistemas aplicado a un proceso simple de Intercambio de Calor <http://es.scribd.com/doc/58907327/Identificacion-de-un-sistema-de-transferencia-de-energia>