



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO BASADO EN
EL ANÁLISIS DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN
DE DISTORSIONES ARMÓNICAS MEDIANTE BLACK BOX
TESTING EN MATLAB

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTOR: JHON JAIRO CEVALLOS MEDINA

TUTOR: ING. JORGE LUIS PAUCAR S.

RIOBAMBA – ECUADOR

2016

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: DETERMINACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO BASADO EN EL ANÁLISIS DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE DISTORSIONES ARMÓNICAS MEDIANTE BLACK BOX TESTING EN MATLAB, de responsabilidad del señor Jhon Jairo Cevallos Medina, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Titulación, quedando autorizada su presentación.

Ing. Washington Luna
DECANO DE LA FACULTAD DE
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

Ing. Freddy Chávez
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

Ing. Jorge Luis Paucar
DIRECTOR DEL TRABAJO
DE TITULACION

Ing. Henry Vallejo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL
.....

DOCUMENTALISTA
SISBIB ESPOCH
.....

NOTA DEL TRABAJO
DE TITULACION

Yo, Jhon Jairo Cevallos Medina soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente trabajo de titulación y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo

JHON JAIRO CEVALLOS MEDINA

DEDICATORIA

Dedico todo el esfuerzo y sacrificio empleado para la culminación de este trabajo a todas las personas que lo hicieron posible.

A Dios y la Virgen Dolorosa a quienes les debo todo y siempre me cuidan y protegen.

A mis padres Loly y Fabian quienes con su sacrificio y ejemplo guiaron mis pasos.

A mis hermanos y confidentes Stefy y Anthony quienes con su granito de arena me empujaron a seguir adelante,

A mi sobrinito Emiliano, quien sin estar aún presente me inyecta esa chispa de alcanzar nuevas metas.

A mis abuelitos parte fundamental de mi formación y a quienes les debo muchas enseñanzas.

A mis tíos y toda mi familia que a pesar que muchos ya no están físicamente presentes, compartimos muchas alegrías y superamos muchas pruebas.

Cada uno de ellos forma parte importante de mi vida y es gracias a ellos que hoy puedo alcanzar un logro más

Jhon Jairo

AGRADECIMIENTO

Dios, tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda, y cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta de los pones en frente mío para que mejore como ser humano, y crezca de diversas maneras.

A la ESPOCH por darme la oportunidad de formarme en sus aulas.

A mis mentores Ing. Jorge Paucar, Ing. Byron Casignia y Dr. Jesús Rodríguez, quienes con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación, me guiaron a culminar mis estudios con éxito.

A mis amigos Doris y Nacho con quienes nos encaminamos en la aventura de la universidad y compartimos muchas cosas.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida estudiantil a las que me encantaría agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Jhon Jairo

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	9
1.1 Armónicos:.....	9
<i>1.1.1 Fuentes de armónicos :.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.2 Cargas lineales y no lineales :</i>	<i>10</i>
<i>1.1.2.1 Cargas lineales :.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.2.2 Cargas no lineales :.....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3 Distorsión armónica total (THD) :</i>	<i>11</i>
1.2. Compensación de armónicos:.....	11
<i>1.2.1. Tipos de compensación:.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.1.1 Compensación activa:.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.1.2 Compensación pasiva:</i>	<i>12</i>
1.3. Filtros:.....	12
<i>1.3.1. Filtro activo:.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.2. Filtro pasivo:</i>	<i>13</i>
1.4. Cargas eléctricas:	13
<i>1.4.1. Cargas resistivas:</i>	<i>14</i>

1.4.2.	<i>Cargas capacitivas:</i>	14
1.4.3.	<i>Cargas inductivas:</i>	14
1.4.3.1.	<i>Equipos de uso doméstico:</i>	15
1.4.4.	<i>Cargas no lineales:</i>	17
1.5.	Muestreo de señales:	17
1.5.1.	<i>Teorema del muestreo de Nyquist:</i>	18
1.6.	Sistema:	18
1.6.1.	<i>Modelo matemático:</i>	19
1.6.2.	<i>Modelo de un sistema:</i>	19
1.6.2.1.	<i>Tipos de modelos:</i>	20
1.6.3.	<i>Métodos de obtención de un modelo dinámico:</i>	21
1.7.	Identificación de sistemas:	21
1.7.1.	<i>Proceso de Identificación:</i>	22
1.7.2.	<i>Consideraciones:</i>	23
1.8.	Testing:	27
1.8.1.	<i>Metodologías de testing:</i>	28
1.8.1.1.	<i>Testing estructural:</i>	28
1.8.1.2.	<i>Testing basado en Modelos:</i>	28
1.8.1.3.	<i>Testing de Caja Gris:</i>	29
1.9.	Matlab:	29
1.9.1.	<i>System identification toolbox:</i>	30
1.10.	Labview:	31
1.10.1.	<i>NI MyDaq:</i>	31
1.10.2.	<i>DAQ Assistant:</i>	33
1.10.3.	<i>Muestreo:</i>	33
1.10.4.	<i>Adquisición buffer:</i>	34
1.11.	Transformadores de Corriente:	35

CAPITULO II

2.	MARCO METODOLOGICO	37
-----------	---------------------------------	-----------

2.1.	Modelo Matemático:	37
2.1.1.	Modelación matemática:	37
2.2.	Técnicas de identificación paramétricas:	38
2.2.1.	Introducción:	39
2.2.2.	Estructura del modelo:	40
2.2.2.1.	Modelos lineales:	40
2.2.3.	Modelos de identificación paramétricos:	40
2.2.3.1.	Modelo de media ajustado (MA):.....	42
2.2.3.2.	Modelo de error en la salida (OE):.....	42
2.2.3.3.	Modelo auto regresivo con variables exógenas (ARX):	43
2.2.3.4.	Modelo auto regresivo de media móvil y variables exógenas (ARMAX):	43
2.2.3.5.	Otros modelos en función del error:	44
2.2.3.6.	Modelo Box-Jenkins (BJ):	44
2.3.	Proceso de identificación experimental:	46
2.3.1.	Determinación del sistema:	46
2.3.2.	Sistema de adquisición DAQ:	47
2.3.2.1.	Frecuencia de muestreo:.....	47
2.3.2.2.	Tamaño de la muestra:.....	48
2.3.2.3.	Selección del sensor:	49
2.3.2.4.	Construcción del DAQ:	50
2.3.3.	Estructuras de identificación experimental:	51
2.3.4.	Validación del sistema:	54
2.3.4.1.	Validación cruzada:	55
2.3.4.2.	Validación de segunda mano:	56
2.3.4.3.	Validación mediante Matlab:	56
2.3.4.4.	Criterio de integral de error absoluto (IAE):	57

CAPITULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS	58
3.1.	Selección de la carga:	58
3.2.	Adquisición de datos del sistema:	59
3.3.	Selección de la estructura:	61

3.3.1. Estimación usando el modelo ARX:	61
3.3.1.1. Aplicando validación cruzada:	62
3.3.1.2. Aplicando validación de segunda mano:	64
3.3.1.3. Selección del mejor candidato modelo ARX:	66
3.3.2. Estimación usando el modelo ARMAX:	67
3.3.2.1. Aplicando validación cruzada:	67
3.3.2.2. Aplicando validación de segunda mano:	69
3.3.2.3. Selección del mejor candidato modelo ARMAX:	71
3.3.3. Estimación usando el modelo OE:	72
3.3.3.1. Aplicando validación cruzada:	72
3.3.3.2. Aplicando validación de segunda mano:	74
3.3.3.3. Selección del mejor candidato modelo OE:	75
3.3.4. Estimación usando el modelo BJ:	77
3.3.4.1. Aplicando validación cruzada:	77
3.3.4.2. Aplicando validación de segunda mano	79
3.3.4.3. Selección del mejor candidato modelo BJ:	81
3.4. Selección del mejor modelo:	82
3.5. Comprobación del modelo:	84
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Orden y secuencia distorsiones armónicas.....	9
Tabla 1-2:	Clasificación del término de linealidad.....	39
Tabla 2-2:	Relación entre el PEM y los casos especiales.....	45
Tabla 3-2:	Funciones identificación paramétrica Matlab (ventana de comandos).....	53
Tabla 4-2:	Funciones selección estructura óptima Matlab (ventana de comandos).....	56
Tabla 1-3:	Calculo de error en la DAQ.....	59
Tabla 2-3:	Criterios de selección modelo ARX (validación cruzada).....	63
Tabla 3-3:	Criterios de selección modelo ARX (validación de segunda mano).....	65
Tabla 4-3:	Criterios de selección modelo ARX (validación inversa).....	66
Tabla 5-3:	Criterios de selección modelo ARMAX (validación cruzada).....	68
Tabla 6-3:	Criterios de selección modelo ARMAX (validación de segunda mano).....	69
Tabla 7-3:	Criterios de selección modelo ARMAX (validación inversa).....	71
Tabla 8-3:	Criterios de selección modelo OE (validación cruzada).....	73
Tabla 9-3:	Criterios de selección modelo OE (validación cruzada).....	74
Tabla 10-3:	Criterios de selección modelo OE (validación inversa).....	76
Tabla 11-3:	Criterios de selección modelo BJ (validación cruzada).....	78
Tabla 12-3:	Criterios de selección modelo BJ (validación de segunda mano).....	79
Tabla 13-3:	Criterios de selección modelo BJ (validación inversa).....	81
Tabla 14-3:	Comparación entre los cuatro modelos (ARX, ARMAX, OE Y BJ).....	82
Tabla 15-3:	Estimación de los cuatro modelos usando set de datos nuevos.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Distorsión en H1 (fundamental) y H3 (armónico tercer orden).....	9
Figura 2-1.	Forma de onda voltaje y corriente carga lineal.....	10
Figura 3-1.	Forma de onda voltaje y corriente carga no lineal.....	11
Figura 4-1.	Esquema filtro activo de potencia.....	13
Figura 5-1.	Esquema filtro pasivo de primer orden.....	13
Figura 6-1.	Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Resistiva.....	14
Figura 7-1.	Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Capacitiva.....	14
Figura 8-1.	Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Inductiva.....	15
Figura 9-1.	Funcionamiento horno microondas.....	15
Figura 10-1.	Funcionamiento cocina de inducción.....	16
Figura 11-1.	Esquema de una cocina de inducción.....	17
Figura 12-1.	Corriente demanda por un foco.- Carga No Lineal.....	17
Figura 13-1.	Esquema muestreo de una señal.....	18
Figura 14-1.	Representación de un sistema.....	18
Figura 15-1.	Esquema general de la identificación de sistemas.....	22
Figura 16-1.	Proceso de identificación.....	23
Figura 17-1.	Entrada binaria aleatoria para sistemas lineales.....	24
Figura 18-1.	Entrada escalonada aleatoria para sistemas no lineales.....	25
Figura 19-1.	Esquema modelo de caja blanca.....	28
Figura 20-1.	Esquema modelo de caja negra.....	29
Figura 21-1.	Esquema modelo de caja gris.....	29
Figura 22-1.	System identification toolbox (IDENT) Matlab.....	30
Figura 23-1.	NI myDAQ.....	32
Figura 24-1.	DAQ Assistant.....	33
Figura 25-1.	Muestreo por intervalo de dos canales.....	34
Figura 26-1.	Muestreo Round Robin de dos canales.....	34

Figura 27-1.	Proceso creación de buffer Labview.....	35
Figura 28-1.	Esquema Efecto Hall.....	35
Figura 1-2.	Esquema modelado matemático.....	37
Figura 2-2.	Proceso de modelado.....	38
Figura 3-2.	Sistema general con presencia de ruido.....	41
Figura 4-2.	Diagrama de bloques modelo general con ruido.....	41
Figura 5-2.	Diagrama de bloques modelo OE.....	42
Figura 6-2.	Diagrama de bloques modelo ARX.....	43
Figura 7-2.	Diagrama de bloques modelo ARMAX.....	44
Figura 8-2.	Diagrama de bloques modelo BJ.....	45
Figura 9-2.	Diagrama de bloques del modelo general (PEM).....	45
Figura 10-2.	Esquema Proceso de Identificación Experimental	46
Figura 11-2.	Sistema de eliminación de distorsiones armónicas.....	47
Figura 12-2.	Partes de un sistema DAQ.....	47
Figura 13-2.	Influencia de los armónicos de acuerdo a su orden.....	48
Figura 14-2.	Sensor de corriente YHDC SCT-013-000 CT.....	49
Figura 15-2.	Resolución de un sistema DAQ a 3 y 16 bits.....	51
Figura 16-2.	Diagrama de bloques Labview sistema DAQ.....	51
Figura 17-2.	Herramientas de análisis IDENT Matlab.....	54
Figura 18-2.	Error de desvío (BIAS) y varianza (variance).....	55
Figura 19-2.	Validación cruzada de n iteraciones.....	55
Figura 20-2.	Cargar datos de validación en IDENT Matlab.....	56
Figura 1-3.	Cocina de inducción marca INDURAMA.....	58
Figura 2-3.	Desviación estándar DAQ.....	59
Figura 3-3.	Datos de entrada y salida del sistema (determinación del modelo).....	60
Figura 4-3.	Datos de entrada y salida del sistema (validación cruzada).....	60
Figura 5-3.	Datos de entrada y salida del sistema (validación de segunda mano).....	60
Figura 6-3.	Parámetros estructura ARX (IDENT Matlab).....	61

Figura 7-3.	Estructura de selección modelo ARX (validación cruzada).....	62
Figura 8-3.	Salida de los modelos ARX seleccionados (validación cruzada).....	62
Figura 9-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARX (validación cruzada).....	63
Figura 10-3.	Estructura de selección modelo ARX (validación de segunda mano).....	64
Figura 11-3.	Salida de los modelos ARX seleccionados (validación de segunda mano).....	64
Figura 12-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo (val. segunda mano) ARX.....	65
Figura 13-3.	Comparación entre los modelos ARX [6 1 2] y ARX [8 10 6].....	66
Figura 14-3.	Parámetros estructura ARMAX (IDENT Matlab).....	67
Figura 15-3.	Salida de los modelos ARMAX seleccionados (validación cruzada).....	67
Figura 16-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARMAX (validación cruzada).....	68
Figura 17-3.	Salida de los modelos ARMAX seleccionados (validación de segunda mano).....	69
Figura 18-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARMAX (val. segunda mano).....	70
Figura 19-3.	Comparación entre los modelos ARMAX [4 4 3 7] y ARMAX [4 5 3 8].....	71
Figura 20-3.	Parámetros estructura OE (IDENT Matlab).....	72
Figura 21-3.	Salida de los modelos OE seleccionados (validación cruzada).....	72
Figura 22-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo OE (validación cruzada).....	73
Figura 23-3.	Salida de los modelos OE seleccionados (validación de segunda mano).....	74
Figura 24-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo OE (val. segunda mano).....	75
Figura 25-3.	Comparación entre los modelos OE [5 4 4] y OE [4 4 0].....	76
Figura 26-3.	Parámetros estructura BJ (IDENT Matlab).....	77
Figura 27-3.	Salida de los modelos BJ seleccionados (validación cruzada).....	77
Figura 28-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo BJ (validación cruzada).....	78
Figura 29-3.	Salida de los modelos BJ seleccionados (validación de segunda mano).....	79
Figura 30-3.	Autocorrelación y correlación cruzada modelo BJ (val. segunda mano).....	80
Figura 31-3.	Comparación entre los modelos BJ [3 2 3 1 0] y BJ [2 3 2 1 0].....	81
Figura 32-3.	Datos de entrada y salida (datos nuevos).....	82
Figura 33-3.	Salida de los modelos – Graficas de autocorrelación y correlación cruzada.....	83
Figura 34-3.	Comprobación del modelo BJ.....	84

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A. DESCRIPCION TECNICA NI myDAQ
- ANEXO B. ESPECIFICACIONES TECNICAS SENSOR SCT-013-000
- ANEXO C. ESPECIFICACIONES TECNICAS Y DE USO FLUKE 434/435
- ANEXO D. COMPORTAMIENTO MODELO BJ [3 2 3 1 0]

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Amperaje
A/D	Convertor Analógico-Digital
ARX	Modelo Auto Regresivo Exógeno
ARMAX	Modelo Auto Regresivo de Media Móvil Exógeno
BJ	Modelo Box Jenkins
C	Capacitancia
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CT	Current Transform
DAQ	Data Acquisition
D/A	Convertor Digital -Analógico
DC	Corriente Directa
FIR	Finite Impulse Response
Fm	Frecuencia de Muestreo
Hz	Hercio
I	Corriente
IDENT	Identification Toolbox
J	Joule
K	Constante de ganancia
L	Inductancia
MA	Modelo de Media Ajustada
NI	National Instruments
PEM	Prediction Error Method
PRBS	Pseudo Random Binary Signal
R	Resistencia
T	Periodo de muestreo
THD	Total Harmonic Distortion
V	Voltaje
VI	Virtual Instrument
W	Vatio
Z	Impedancia

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar un modelo matemático paramétrico de un filtro activo de potencia para eliminación de distorsiones armónicas producidas por una carga inductiva como continuación del trabajo desarrollado por el Ing. Lenin Gavilanes quien diseñó y construyó el sistema. En esta investigación, se aplicaron cuatro estructuras de identificación de sistemas el Modelo Autoregresivo con variables exógenas (ARX), el Modelo Autoregresivo de media móvil y variables exógenas (ARMAX), el Modelo de Error en la Salida (OE) y el Modelo de Box-Jenkins (BJ) como enfoque para resolver el problema, el sistema es considerado como una caja negra sobre el cual se realiza este proceso de identificación. Primero se desarrolló un sistema de adquisición en Labview para obtener los datos de entrada y salida del sistema, luego se estimó modelos de diferentes órdenes con la ayuda del System Identification Toolbox (IDENT) de Matlab, basado en los criterios de BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE, además del análisis de las gráficas de autocorrelación y correlación cruzada, y así optar por el mejor candidato de cada estructura aplicando los métodos de validación cruzada y de segunda mano. Finalmente se obtuvo cuatro modelos los cuales fueron sometidos a un proceso de validación con datos de segunda mano diferentes a los utilizados en la etapa de estimación y validación, para al final decidir que el mejor modelo matemático paramétrico que se adapta al comportamiento del sistema es el estimado en base a la estructura de Box-Jenkins con coeficientes de orden [3 2 3 1 0] y con un porcentaje de estimación de 98.87%. Con el modelo estimado se recomienda aplicar una estrategia de control más óptima y fácil de implementar a la usada en el filtro analizado.

Palabras clave: <TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <INGENIERIA DE CONTROL>, <BLACK BOX (TECNICA)> <DISTORSIÓN ARMÓNICA> <IDENTIFICACION DE SISTEMAS > <MODELO MATEMÁTICO> < VALIDACIÓN DE SEGUNDA MANO > <VALIDACIÓN CRUZADA >

SUMMARY

The present investigation had as objective to determine a parametric mathematical model of an active filter of power for elimination of harmonics distortions produced by an inductive load as continuation of the work developed by the Ing. Lenin Gavilanes who designed and built the system. As an approach to solve the problem in this research, there were applied four identification structures of system, which ones are: the Autoregressive Model with Exogenous Variables (ARX), the Autoregressive of Media Mobile Model (ARMAX), the Output Error Model (OE) and the Box-Jenkins Model (BJ). The system is considered as a black box on where this process of identification is done. First it was developed an acquisition system in Labview to get the input and output system data, then it was taken in account different models with the help of Toolbox Identification System (IDENT) of Matlab, it was based on the view of BEST FIT, LOSS FUNTION and FPE, the analysis of autocorrelation and cross-correlation graphs also was important. In this way to choose the best option for each structure by the application of Cross-Validation and Second Hand Method. Finally it was gotten four models which were exposed for a process of validation with data of second hand different to those used in the stage estimation and validation, at the end to decide that the best parametric mathematical model that is adapted to the system behavior is the estimated based on the structure of Box-Jenkins with coefficient of order [3 2 3 1 0] and with an estimated percentage of 98.87%. With the estimated model is suggested to apply a strategy of control more optimal and easy of implementing to the used in the analyzed filter.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AN ENGINEERING SCIENCE>, <CONTROL ENGINEERING>, <BLACK BOX (TECNIQUE)>, <HARMONIC DISRTORTION>, <IDENTIFICATION SYSTEM>, <MATHEMATICAL MODEL>, <SECOND HAND VALIDATION>, <CROSS VALIDATION>.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, la identificación de sistemas se ha convertido en una herramienta importante en la ingeniería y otras áreas tan diversas como medicina y economía, entre otras, que requieren de modelos que posibiliten el análisis, la simulación y el diseño e implementación de estrategias de control.

Existen fenómenos físicos muy complejos que dificultan la obtención del modelo que facilite el análisis, diseño e implementación de estrategias de control; los factores que intervienen en estos casos suelen ser difíciles de evitar; de allí se genera la necesidad de obtener el modelo de un sistema usando variables externas fáciles de medir aplicando métodos experimentales.

En un sistema interactúan variables de diferentes tipos para producir señales observables. Estas señales se las conoce como salidas del sistema, en cambio las señales de entrada pueden ser manipuladas libremente. Muchas otras señales no pueden ser manipuladas e influyen en el resultado de la salida, también son conocidas como perturbaciones o ruido.

Para diseñar los controles de un sistema dinámico es necesario tener un modelo que describa adecuadamente el comportamiento de un sistema, siendo una herramienta muy útil el desarrollo de modelos paramétricos (matemáticos) que permitan al diseñador o supervisor de un sistema o planta controlar de mejor manera los procesos que se desarrollen en la misma, y más aún si se habla de sistemas con fluctuaciones muy rápidas en el tiempo donde es muy complicado observarlas a simple vista, es así que se propone la determinación de un modelo matemático basado en el análisis de un filtro activo para la reducción de distorsiones armónicas mediante Black box Testing en Matlab que permitan obtener de forma específica y concreta el comportamiento del filtro.

La información con la que dispone el diseñador para este propósito es tener un conocimiento de física, biología y las otras ciencias que a través de los años han permitido el desarrollo de la ecuación para explicar una respuesta dinámica de cuerpos rígidos y flexibles, circuitos y motores eléctricos, líquidos, reacción química, y muchos otros componentes del sistema que se controlará.

Sin embargo, a menudo en el caso de los fenómenos físicos que son extremadamente complejos, las leyes de las ciencias no son adecuadas para dar una descripción satisfactoria de la planta dinámica que se desea controlar; en estas circunstancias, el diseñador toma datos experimentales para excitar la planta y medir su respuesta. A este proceso de construir modelos a partir de datos experimentales se llama ‘‘identificación de sistema’’.

Si es necesario conocer el comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones y con ciertas entradas, se puede acudir a las técnicas de experimentación y observación de dichas entradas aplicadas al sistema.

Pero en algunas circunstancias aplicar las técnicas de experimentación puede resultar muy complejo o casi imposible de aplicar, es en estos casos donde se puede trabajar con alguna representación de la realidad, la cual es conocida como modelo.

En pocas palabras, un modelo es una herramienta muy utilizada que nos ayuda a predecir el comportamiento de un sistema sin la necesidad de tener que experimentar sobre él.

Antecedentes

Históricamente, la calidad de la energía no había sido un problema mayor hasta la década de los 80's, en forma genérica se consideraba que excepto por la continuidad, el suministro para la mayoría de los usuarios de la energía eléctrica era completamente satisfactorio. Sin embargo, existen tres cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del usuario y del sistema de potencia que conciernen a la calidad de la energía.

1. La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas a nivel residencial, comercial e industrial. Los microprocesadores modernos han resultado en dispositivos más rápidos, complejos y con mayor capacidad de memoria para una misma superficie. La lógica de estos circuitos requiere de niveles de tensión y de energía menores, reduciendo el consumo de potencia y que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de la energía.
2. La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo cualquier dispositivo que incorpora electrónica de potencia es sensible a las variaciones rápidas del voltaje como son los abatimientos del voltaje. También este tipo de equipo genera distorsión armónica y bajo ciertas condiciones puede deteriorar la magnitud y forma de onda del voltaje suministrado a tal grado que sea inadecuado para la mayoría de los usuarios que comparten la misma fuente. Estos mismos dispositivos basados en la electrónica de potencia producen perturbaciones en la calidad de la energía los cuales para la microelectrónica resultan muy sensibles.
3. Mientras que estos cambios dramáticos se están dando en las cargas, las empresas eléctricas y los clientes industriales continúan aplicando capacitores para corregir el factor de potencia, para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos. Estos capacitores influyen en los muchos tipos de problemas de calidad de la energía, ya que son la puerta para corrientes de

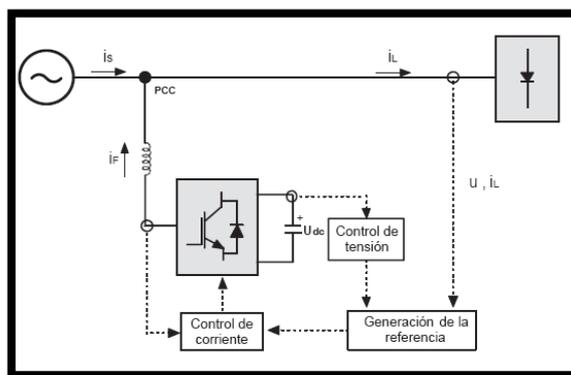
alta frecuencia y pueden mejorar o agravar la situación significativamente al incrementar los niveles de armónicas, dependiendo de los parámetros del sistema.

Es por esto que se ha registrado en los últimos años en los países industrializados una creciente preocupación hacia la **CALIDAD DEL LA ENERGIA ELECTRICA** o en palabras más técnicas a la **CALIDAD DE LA ONDA DE TENSION**. Dichas alteraciones tienen lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, dependiendo también de los diferentes tipos de receptores.

Es por esto que en los últimos años ha crecido en un gran nivel la preocupación sobre la calidad tanto para las distribuidoras como para los usuarios, y es así que identificamos dos causas:

1. Los Procesos Industriales hoy en día requieren cada vez más una mayor calidad de los productos que intervienen en estos procesos en particular de la energía eléctrica ya que se hacen más sensibles a las alteraciones que puedan existir.
2. En cambio la creciente utilización de receptores los cuales generan perturbaciones hacen que el nivel de contaminación general de las redes eléctricas siga en aumento, lo que incide en el normal funcionamiento de los demás receptores conectados a la red lo que hace que el problema se extienda más.

En base a lo expuesto anteriormente hoy en día se están desarrollando alternativas para mitigar estos efectos y mejorar la eficiencia de los procesos industriales, tal es el caso de la trabajo de titulación desarrollado por el Ing. Lenin Gavilanes denominada **DISEÑO DE UN SISTEMA DE POTENCIA PARA LA ELIMINACIÓN DE DISTORSIONES ARMÓNICAS PROVOCADAS POR CARGAS INDUCTIVAS**, en la cual se desarrolló un Controlador que hace una comparación de la señal de salida con la señal de referencia para obtener un error, la señal de error será cuantificada y modulada usando la Modulación de Ancho de Pulso para activar o desactivar los dispositivos de potencia que conforman el convertidor los mismos que generan a la salida la corriente de compensación deseada. (Gavilanez, 2015, p. 15)



Esquema General Filtro Activo de Potencia
Fuente: Lenin Gavilanes, 2015

Esta es una muestra de la necesidad de continuar con la línea de desarrollo de este tipo de trabajos que permitan ofrecer a la industria alternativas de mejoramiento de la calidad de energía y de la vida útil de sus maquinarias al mitigar los efectos de las distorsiones armónicas

Delimitación del Problema.

Para continuar con la línea de desarrollo y una vez construido el filtro, se pretende obtener el modelo matemático de un filtro activo de potencia para la eliminación de distorsiones armónicas el mismo que se implementó en el trabajo desarrollado por el Ing. Lenin Gavilanes y fue donado para la presente investigación que se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Informática y Electrónica, siendo necesario determinar todas las características principales del sistema, posteriormente se necesita obtener los datos del sistema para aplicar a las estructuras que se acoplen al funcionamiento del mismo, finalmente se plantea aplicar diferentes procesos de validación que nos permitan mostrar el grado de descripción del modelo obtenido con relación al comportamiento real del sistema. Todo este proceso se estima se de en tres fases: la primera donde se recopilara toda la información del sistema con una duración aproximada de dos meses, la segunda donde se construirá el sistema de adquisición de datos (hardware y software) y se obtendrá los datos del sistema la misma que tendrá una duración aproximada de dos meses y la tercera fase donde se estimara y validara el modelo en base a los datos obtenidos siendo esta la etapa de mayor duración con un aproximado de tres meses

Planteamiento Del Problema

¿Es posible determinar un Modelo Matemático Basado en el Análisis de un Filtro Activo para la Reducción de Distorsiones Armónicas mediante Black Box Testing en Matlab?

Sistematización del problema

¿Es posible mejorar la calidad de Energía Eléctrica entregada, afectada por la introducción de distorsiones armónicas?

¿Cuáles son los modelos matemáticos existentes para la elaboración de un filtro?

¿Aplicar un Filtro Activo de Potencia es el método más adecuado para eliminar los armónicos producidos por una carga Inductiva?

¿Cuáles son los Parámetros de la Energía Eléctrica y de la Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución, exigidos por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).?

¿Cuáles son los instrumentos y técnicas apropiadas para la elaboración y validación de un modelo matemático mediante Black Box Testing?

¿Es posible comparar los datos arrojados por el Modelo Matemático con los obtenidos por el Filtro Activo de Potencia para validar nuestro modelo?

Justificación Teórica

En la actualidad una de las herramientas más interesantes que disponemos para analizar y predecir el comportamiento de un sistema es la construcción y posterior simulación de un modelo matemático.

Un modelo de un sistema consiste en una descripción conveniente de algunas de sus propiedades, y de acuerdo a un propósito particular. El modelo no necesita ser una exacta descripción del sistema, y el usuario debe saber esto para poder llevar a cabo su propósito.

El primer paso en la identificación de sistemas es determinar una clase de modelos, dentro de la cual se hallará el modelo más conveniente.

- Modelos Lineales
- Funciones de Transferencia
 - Estructura ARX
 - Estructura ARARX
 - Estructura ARARMAX
 - Estructura de Error de Salida
 - Estructura Box-Jenkins

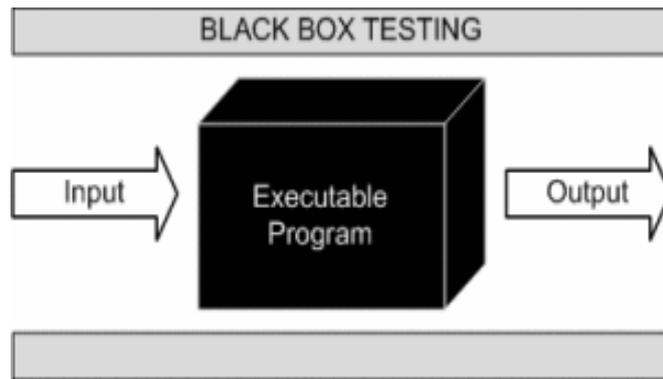
Es una técnica de pruebas de software que se centra en el análisis de la funcionalidad del software, analizando las necesidades del cliente, las especificaciones y estrategias de diseño de alto nivel.

Ventajas Black Box Testing:

- Simplicidad
- Conserva los recursos
- Casos de Prueba

Flexibilidad Desventajas Black Box Testing:

- Caso de prueba / diseño de la escritura y el mantenimiento puede ser problemático porque las herramientas de prueba de recuadro negro dependen de insumos conocidos. La prueba sólo cubre las funciones de aplicación.

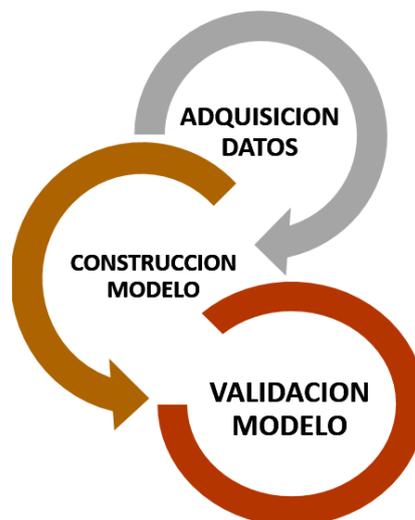


Esquema de Caja Negra (Black Box)
Fuente: Lenin Gavilanes, 2015

BLACK BOX TESTING es empleado frecuentemente porque no necesita tener un conocimiento en particular del sistema a analizar ya que se basa en la introducción de parámetros al sistema y en la observación del comportamiento del mismo frente a diferentes parámetros y en base a este comportamiento identificar las variables, formularse una posible realidad y desarrollar el modelo matemático adecuado que se ajuste a las necesidades del sistema en este caso la reducción de los armónicos producidos por una carga inductiva.

Al desarrollar un modelo matemático se tiene la capacidad de implementar un filtro adecuado para la disminución de armónicos producidos en una carga inductiva que puede adaptarse a los cambios de comportamiento de la misma, en particular a la potencia suministrada por el ignitor de la cocina de inducción.

Justificación Aplicativa



Proceso de Modelación Matemática
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Teniendo en cuenta que el controlador hace una comparación de la señal de salida con la señal de referencia para obtener un error, la señal de error será cuantificada y modulada usando la

modulación de ancho de pulso PWM para activar o desactivar los dispositivos de potencia que conforman el convertidor, los mismos que generan a la salida la corriente de compensación deseada. (Gavilanez, 2015, p. 18)

Se propone realizar una adquisición de datos en base a sensores de corriente que permita obtener los valores respectivos a la entrada y salida, teniendo en cuenta en el modelamiento influirá:

- Determinar el Tamaño de la Muestra
- Tipo de Distribución de los Datos

Suele ser un proceso de ensayo y error, donde se estiman los parámetros de varias estructuras y comparan los resultados. Las más simples estructuras de recuadro negro lineales requieren menos opciones para configurar:

- Función de transferencia
- Modelo lineal ARX
- Modelo de espacio de estados

Se puede configurar un modelo de estructura utilizando el orden del modelo. La definición de orden del modelo varía en función del tipo de modelo que se seleccione.

Independientemente de cómo ha sido obtenido el modelo, siempre es posible utilizar un set de datos Z para evaluar y determinar si el mismo se comporta en forma útil y adecuada para los propósitos finales.

1. COMPARACIÓN:

- Comparación con sets de datos frescos
- Comparación con sets de datos de segunda mano

2. VALIDACIÓN:

1. ¿Se adapta lo suficientemente bien el modelo a los datos observados?
2. ¿Es el modelo lo suficientemente adecuado para nuestro propósito?
3. ¿Describe el modelo al sistema real?

Objetivos:

Objetivo General

Determinar un Modelo Matemático Basado en el Análisis de un Filtro Activo para la Reducción de Distorsiones Armónicas Mediante Black Box Testing en Matlab

Objetivos Específicos

- Analizar los Modelos Existentes para la elaboración de un Filtro de Distorsiones Armónicas
- Identificar las técnicas de Diseño Experimental existentes y determinar la más adecuada para el desarrollo de nuestro Modelo Matemático mediante Black Box Testing
- Determinar la técnica adecuada para la tabulación de resultados para una correcta formulación del modelo matemático
- Realizar pruebas software de validación cruzada y de segunda mano para la comparación de datos extraídos de nuestro filtro con los arrojados por nuestro modelo
- Comparar los datos obtenidos por nuestro Filtro Activo de Potencia con los datos arrojados por el Modelo Matemático para determinar la eficiencia del mismo

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Armónicos:

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales con una frecuencia que es un múltiplo entero (k) de la frecuencia del sistema de distribución, en el caso del Ecuador (60Hz), denominada frecuencia fundamental.

Cuando los armónicos se combinan con la corriente o la tensión sinusoidal fundamental, distorsionan la forma de la onda de corriente o tensión.

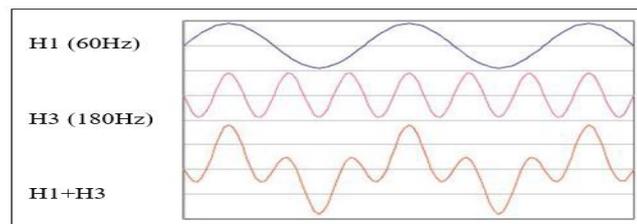


Figura 1.1.-Distorsion en H1 (fundamental) y H3 (Armónico tercer orden).

Fuente: Schneider Electric

Los armónicos que se identifican como H_k , donde k es el orden de los armónicos que dependerá mucho de la naturaleza de la señal.

A continuación se muestra el número, la frecuencia y secuencia propios de los armónicos.

Tabla 1-1: Orden y secuencia distorsiones armónicas

Armónico	Frecuencia(Hz)	Secuencia
0(DC)	0
1(Fundamental)	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	0
10	600	+

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos 2016

Los armónicos de orden par (H2, H4, H6...), al tener igual componente de tensión y corriente tienden a anularse.

Armónicos de triples (H3, H9, H15...) orden y múltiplos de tres. Estos solo circulan por el conductor neutro, además se suman lo que puede suponer importantes sobrecargas en dicho conductor.

Armónicos de secuencia negativa (H5, H11, H13...) anulan el campo producido por la fundamental e invierten el sentido de giro en motores de inducción. (Gavilanez, 2015, p. 20)

1.1.1 Fuentes de armónicos :

Los sistemas eléctricos de potencia son muy vulnerables a la presencia de armónicos debido a la conexión de diferentes tipos de cargas conectadas en los sistemas de distribución. Para alimentar la electrónica con potencia en CC (Corriente Continua), el equipo cuenta con una fuente de alimentación conmutada con un rectificador en la entrada que obtiene las corrientes armónicas.

Algunos ejemplos son los microondas, licuadoras, focos ahorradores, etc. Otras cargas distorsionan la corriente debido a su principio operativo también producen armónicos.

1.1.2 Cargas lineales y no lineales :

La alimentación de la red eléctrica proporciona 60Hz de tensión sinusoidal a las cargas. La forma de onda de la tensión proporcionada por la fuente como respuesta a las necesidades de cargas dependiendo del tipo.

1.1.2.1 Cargas lineales :

La corriente que se obtiene es sinusoidal con la misma frecuencia que la tensión, aunque la corriente puede estar desplazada (Angulo φ) con respecto a la tensión

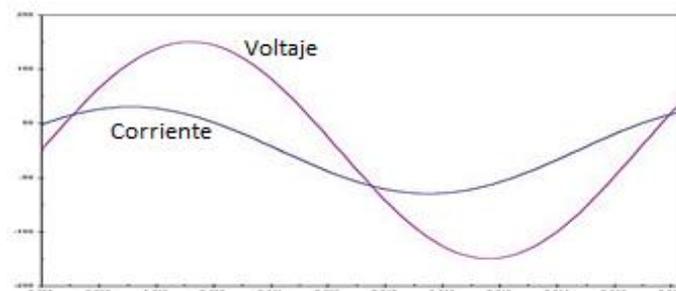


Figura 2.1.- Forma de onda voltaje y corriente carga lineal
Fuente: Salvador Chávez N.- Guadalajara México, 2013

La ley de Ohm define una relación lineal entre la tensión y la corriente ($U=Z*I$) con un coeficiente constante la impedancia de la carga. La relación entre la corriente y la tensión es lineal.

Algunos ejemplos son las bombillas estándar, los calefactores, las cargas resistivas, los transformadores o los motores, este tipo de cargas no contienen componentes electrónicos activos sino únicamente resistencias (R), inductores (L) y capacitores (C).

1.1.2.2 Cargas no lineales :

La corriente consumida por la carga es periódica, pero no sinusoidal ya que la forma de onda queda distorsionada por la corriente de los armónicos.

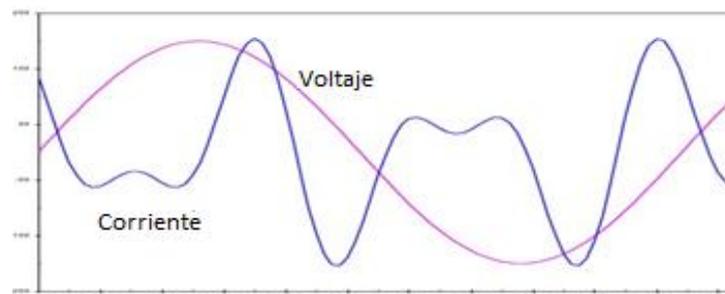


Figura 3.1.- Forma de onda voltaje y corriente carga no lineal
Fuente: Salvador Chávez N.- Guadalajara México, 2013

La ley de Ohm en este caso ya no es válida porque la impedancia de la carga varía más de un periodo a otro, por lo que la relación entre corriente y tensión no es lineal.

La corriente consumida por una carga en este caso es la combinación de una corriente sinusoidal denominada fundamental, armónicos que son corriente sinusoidales de una amplitud inferior con respecto a la fundamental

1.1.3 Distorsión armónica total (THD) :

Para definir el grado de distorsión que tiene una señal se utilizan coeficientes de distorsión dados en porcentaje con respecto a la magnitud de la tensión o de la corriente.

THD para Corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} * 100 \quad \text{Ecu. 1.1}$$

1.2. Compensación de armónicos:

La compensación de armónicos está dividida en la compensación de voltaje o de corriente.

La compensación de voltaje armónico no es muy conocida, debido a que normalmente los voltajes en el punto de acople del consumidor se mantienen dentro de un rango aceptable para sobre voltaje y distorsión armónica.

La compensación de corriente armónica es muy importante en las aplicaciones de baja y media potencia. Una de las ventajas de aplicar técnicas de compensación es que reduce en gran parte la distorsión del voltaje en el punto de conexión de la carga. Las corrientes armónicas producen pérdidas y sobrecalentamiento en los transformadores, calentamiento en los motores de inducción, pérdidas de cobre en los conductores por el efecto piel, pérdidas dieléctricas en los condensadores, incluso pueden producir operaciones anormales y fallas en los equipos, errores en los equipos de medición y efectos de resonancia

1.2.1. Tipos de compensación:

A partir de la existencia de armónicos dentro de las redes eléctricas, existe la necesidad de poder eliminarlos, ya sea reduciendo los efectos que tengan sobre la red o si es posible eliminarlos, dentro de las técnicas existentes se encuentra el adicionamiento activo y pasivo

1.2.1.1 Compensación activa:

Esta compensación se realiza mediante la instalación de sistemas de acondicionamiento en las líneas como son los transformadores conectados de manera especial, filtros pasivos o activos, ya sea para suprimir o contrarrestar los armónicos en el sistema de potencia, estos métodos no logran una eliminación total de la corriente de distorsión armónica.

1.2.1.2. Compensación pasiva:

La compensación pasiva o acondicionamiento pasivo no busca eliminar las corrientes armónicas del sistema, sino adecuar los elementos del sistema eléctrico de manera que los equipos sean menos sensibles a la presencia de estos armónicos.

1.3. Filtros:

Un filtro eléctrico o filtro electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

1.3.1. Filtro activo:

Los filtros activos son parte de los métodos de compensación activos en la actualidad y son de gran importancia para dar solución al problema de generación de ondas de tensión y corrientes a

diferentes magnitudes múltiplos de la frecuencia fundamental de la señal, estos filtros están constituidos por un equipo basado en semiconductores, método que nos permite reducir armónicos pero que debe operar en conjunto con un filtro para poder compensar los armónicos de la corriente de la carga.

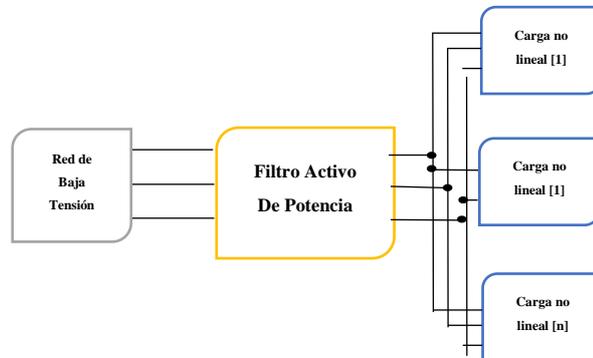


Figura 4.1.- Esquema filtro activo de potencia
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

1.3.2. Filtro pasivo:

Un circuito pasivo es aquel que no genera energía y generalmente están constituidos por resistencias, condensadores y bobinas conectados de diversas formas entre sí, bien sea para seleccionar alguna porción de señal deseada o a su vez para rechazar frecuencias indeseadas y así obtener la información de interés de una señal eléctrica, la combinación de elementos pasivos nos brinda una gran gama de filtros pasivos destinados a diferentes fines, como se mencionó anteriormente los filtros sintonizados fueron ocupados para la construcción del sistema de potencia a analizar, es así como se seleccionó la frecuencia de los armónicos a eliminar del sistema.

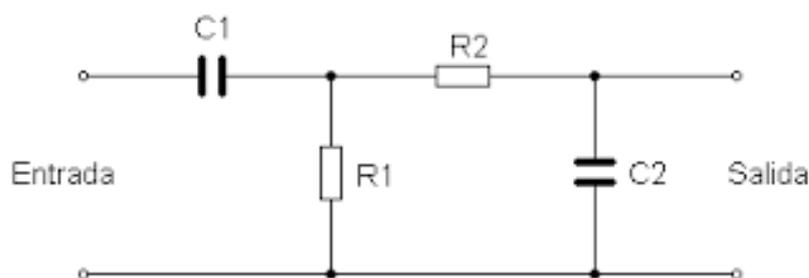


Figura 5.1.- Esquema filtro pasivo de primer orden
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

1.4. Cargas eléctricas:

Todo aquello que consume o utiliza energía eléctrica se denomina carga, la naturaleza imperfecta de cómo son construidos los dispositivos eléctricos o electrónicos causa inductancia, capacitancia y resistencia para ser una parte inherente de muchos dispositivos.

1.4.1. Cargas resistivas:

Un resistor es un elemento que resiste el flujo de electricidad donde parte de la energía retenida es disipada por el denominado efecto Joule o disipación de calor. La corriente eléctrica y la tensión se encuentran en fase uno con otro, es decir si la corriente o la tensión se eleva o cae por consiguiente se elevara o caerá esta.

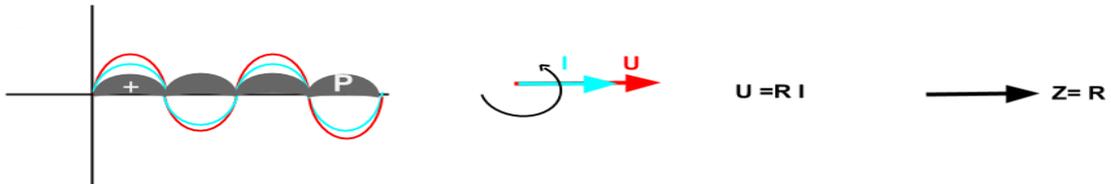


Figura 6.1.- Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Resistiva
Fuente: <https://automatismoindustrial.com/0-1-20-el-factor-de-potencia/>

1.4.2. Cargas capacitivas:

Un capacitor almacena energía eléctrica, ya que sus dos superficies conductoras están separadas por un aislante no conductor. Es por esto que cuando se aplica una corriente eléctrica los electrones se acumulan en la placa adjuntada a la terminal donde se aplica la corriente, una vez retirada la fuente de corriente los electrones fluirán de regreso con el fin de alcanzar la otra terminal del capacitor; su uso es muy variado en motores eléctricos, radio circuitos, fuentes de poder entre otros.

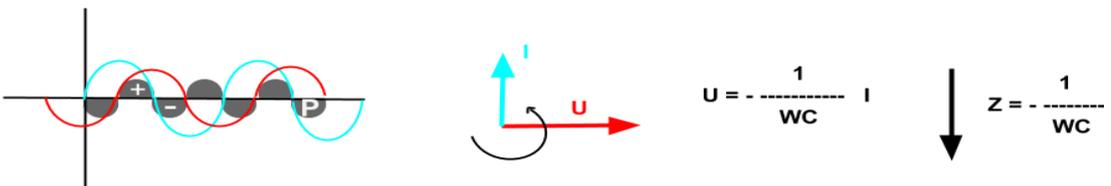


Figura 7.1.- Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Capacitiva
Fuente: <https://automatismoindustrial.com/0-1-20-el-factor-de-potencia/>

La corriente lleva el voltaje de un capacitor, el voltaje a través de las terminales inicia en cero voltios mientras que la corriente se encuentra en su máximo, a medida que la carga fluye en el circuito la magnitud del voltaje se eleva y la corriente disminuye, proceso inverso ocurre cuando el capacitor se descarga la corriente se eleva y el voltaje decae.

1.4.3. Cargas inductivas:

Un inductor puede ser cualquier material conductor, cuando se produce un diferencial de corriente este induce un campo electromagnético alrededor del mismo y si se gira en una bobina incrementa el campo magnético.

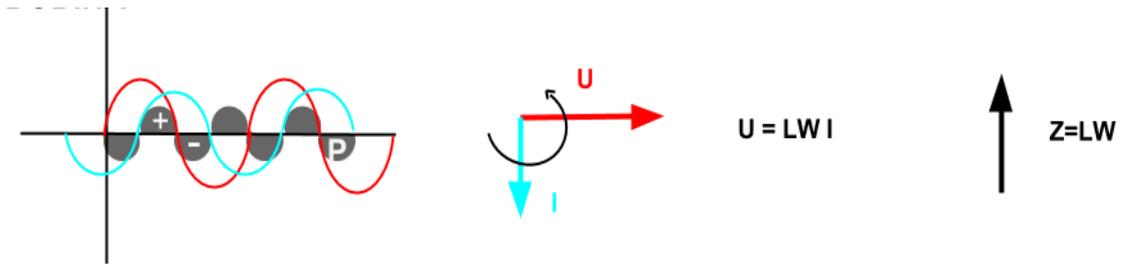


Figura 8.1.- Desfase entre tensión e intensidad.- Carga Inductiva

Fuente: <https://automatismoindustrial.com/0-1-20-el-factor-de-potencia/>

Algo similar ocurre cuando en un campo electromagnético cambiante se coloca un conductor, aquí el campo electromagnético induce una corriente eléctrica en el conductor, un claro ejemplo son los transformadores los cuales están generalmente constituidos por dos inductores denominados primario y secundario, donde en el devanado primario induce una corriente al devanado secundario; también en una bobina almacena energía en un campo magnético que induce cuando un diferencial de corriente pasa a través de este y libera energía cuando la corriente es retirada.

El cambio de voltaje y corriente en un inductor están fuera de fase, a medida que la corriente alcanza su valor máximo la tensión decae.

1.4.3.1. Equipos de uso doméstico:

La mayoría de electrodomésticos de uso diario están constituidos como cargas inductivas, ya sea porque su principio de funcionamiento está dado por electromagnetismos para calefacción o por un motor, y entre los cuales podemos citar:

- **Horno de Microondas:** Mediante la generación controlada de ondas de radio de alta frecuencia que inciden directamente sobre los alimentos actuando en las partículas de agua, grasas y otras sustancias que absorben la energía producida por las microondas en un proceso llamado calentamiento electrónico por radio frecuencia.

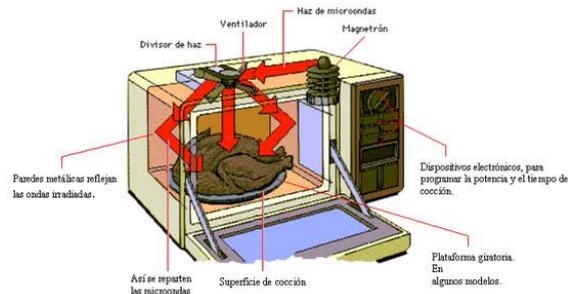


Figura 9-1. Funcionamiento del horno microondas

Fuente: Funcionamiento del horno microondas, Marvy Roa
<http://elmicroondas1.blogspot.com/>

Este calentamiento se debe a que la radiación que se aplica a las moléculas produce que estas vibren con mucha rapidez, lo que provoca una fricción entre ellas y esa fricción produce el calor.

Dentro del horno, hay un dispositivo eléctrico llamado magnetrón que produce microondas de alta intensidad y las transporta hacia un ventilador para que sean transmitido hacia el compartimiento donde ponemos la comida.

El magnetrón es una pequeña cavidad metálica con un filamento calentado a altísima temperatura que emite electrones y con un alto voltaje que los acelera. Un poderoso imán hace girar los electrones y este movimiento giratorio es lo que genera la microonda. Estos electrones son liberados en forma de microondas hacia el interior del horno por el ventilador y una vez allí rebotan hacia todas direcciones hasta impactar en el alimento. (Gavilanez, 2015, p. 23)

- **Cocina de Inducción:** Su funcionamiento consiste en la generación de un campo magnético alternadamente, que en contacto con un recipiente de base metálica, se produce una transferencia de calor por inducción electromagnética; su principio de funcionamiento se basa en la Ley de Inducción de Faraday, la cual señala que la magnitud de la fuerza electromotriz (FEM) inducida en un circuito es igual a la razón de cambio del flujo magnético en el tiempo.

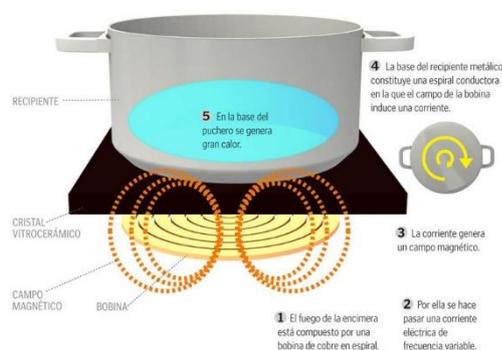


Figura 10-1. Funcionamiento cocina de inducción.

Fuente:http://www.heraldo.es/noticias/suplementos/tercer_milenio/sin_puchero_hay_induccion.html

La electricidad que atraviesa la bobina primaria produce un campo electromagnético de alta frecuencia que por medio de imanes se distribuye hacia arriba, el campo penetra el metal férreo de la base de cocción (olla) que se consideraría como la bobina del secundario cerrando el circuito y produciendo el calentamiento en la base del recipiente (olla).

El circuito eléctrico que conforma la cocina de inducción está constituido principalmente por un circuito rectificador, un alternador de alta frecuencia y una bobina de inducción. (Gavilanez, 2015, p. 24)

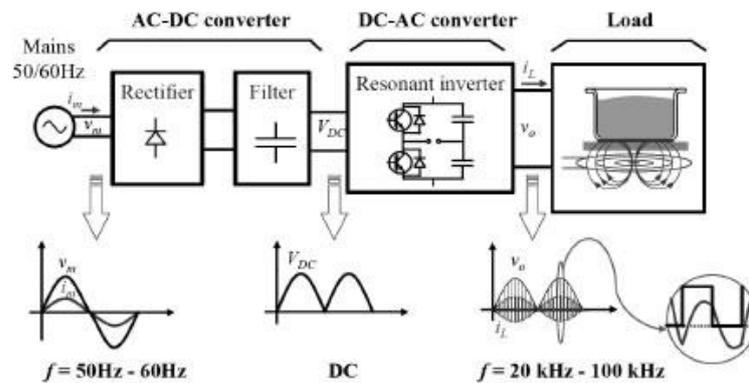


Figura 11-1. Esquema de una cocina de inducción
 Fuente: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/articulo/view/451/2242>

1.4.4. Cargas no lineales:

Es aquella que produce corrientes de forma diferente a las sinusoidales, al inicio este tipo de cargas eran de naturaleza magnética y se originaban en sistemas Eléctricos de Potencia como la corriente de arranque de los transformadores o los balastros magnéticos de las lámparas fluorescentes cuyo uso era escaso.

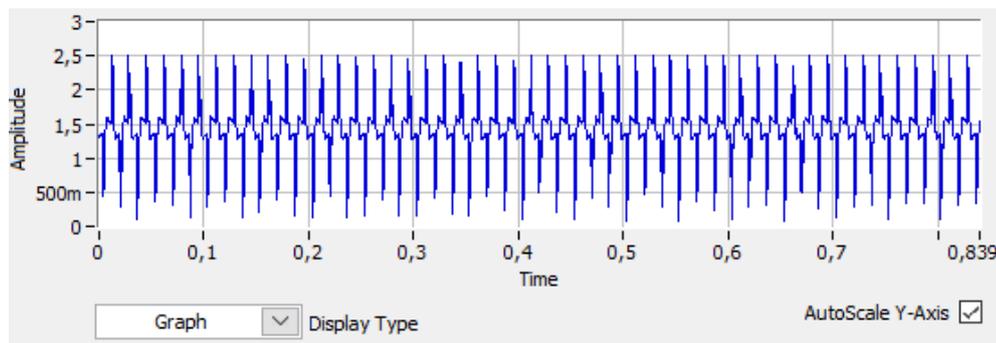


Figura 12.1.- Corriente demanda por un foco.- Carga No Lineal
 Fuente: Jhon Jairo Cevallos

En la actualidad muchos aparatos de uso doméstico como televisores, consolas, estéreos y computadoras producen distorsión, tanto en voltaje como en corriente, pues poseen fuentes de alimentación que utilizan rectificadores de onda completa para la conversión de corriente alterna C.A. a corriente continua C.C. (Suárez et al., 2005).

1.5. Muestreo de señales:

Consiste en la conversión de una señal en tiempo continuo a una señal en tiempo discreto, la cual se obtiene tomando muestras periódicas de una señal continua en un periodo T.

El muestreo de una señal es importante para la reconstrucción de ondas y también para conocer los errores que puede tener una señal muestreada.

1.5.1. Teorema del muestreo de Nyquist:

El teorema nos dice que primero el muestreo no debe ser confundido o asociado con la cuantificación, ya que la cuantificación al contrario del muestreo no es un proceso reversible debido a la pérdida de información en el proceso.

Nyquist afirmaba que una señal analógica puede ser reconstruida, sin error, en base a muestras tomadas en iguales intervalos de tiempo la razón de muestreo debe ser igual o mayor al doble del ancho de su banda de la señal analógica.



Figura 13.1.- Esquema muestreo de una señal

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

“La teoría del muestreo define que para una señal de ancho de banda limitado, la frecuencia de muestreo, f_m , debe ser mayor que dos veces su ancho de banda [B] medida en Hertz [Hz].”

$$F_S > 2F_{MAX}$$

Ecu. 2.1

Cuando la frecuencia de muestreo es inferior a la definida por Nyquist se produce un efecto que causa que las señales continuas distintas se tornen indistinguibles conocido como aliasing lo cual inventa frecuencias fantasmas que no tiene nada que ver con la original donde las más afectadas son las frecuencias más altas. (Briones, 2015, p. 36)

1.6. Sistema:

Un sistema es la combinación de componentes que actúen conjuntamente y cumplen un objetivo determinado, también se puede decir que en un sistema interactúan variables de diferentes tipos que producen señales observables.

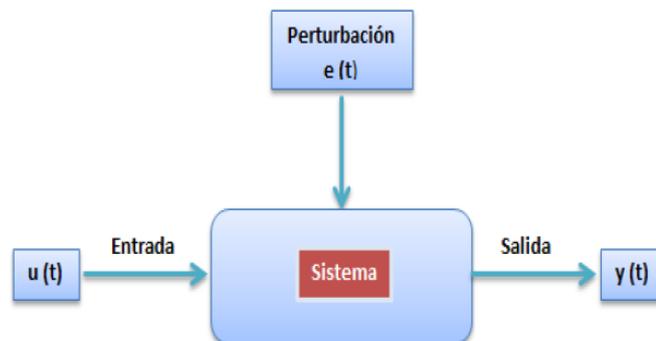


Figura 14.1.- Representación de un sistema

Fuente: Curay, D. y Vaca, A. ESPE-Latacunga

Las señales que son del interés del observador son las salidas del sistema, en cambio las señales de entrada son aquellas que pueden ser manipuladas por el observador. Al resto de señales se las denomina perturbaciones, las cuales no pueden ser manipuladas por el observador. (Escobet T., Morcego B., 2003, p. 16)

1.6.1. Modelo matemático:

Actualmente muchos autores han definido desde su punto de vista a un modelo matemático, donde se destacan los siguientes por su simplicidad y entendimiento:

“Un modelo es una representación de la realidad” (Colin Lee ,1973).

“Un modelo es una representación explícita y externa de parte de la realidad como la ven las personas que desean usar el modelo para entender, cambiar, gestionar y controlar dicha parte de la realidad” (Pidd ,2010).

Lamentablemente el ser humano confunde mucho un modelo con la realidad, en un proceso de metonimia el ser humano crea modelos y los tergiversa con la realidad hasta el punto que estos se adaptan, lo que se lo reconoce como defecto de la mente humana, más no del proceso de modelar.

Se puede decir que los modelos son explícitos ya que se construyen, manejan y modifican como tales; el modelo debe tener una imagen física sobre la que los diferentes actores puedan opinar. (Basmadjian, 1999, p. 6)

Mientras los modelos no tengan una representación externa respecto del modelador son simplemente una teoría mental del mismo, en esta radica una de las grandes ventajas de los modelos: ponen negro sobre blanco los pensamientos, los datos, las hipótesis y las intuiciones. (Rodríguez Velázquez & Steegmann Pascual, 2012, p. 24)

1.6.2. Modelo de un sistema:

Generalmente desde un esquema teórico particularmente de una forma matemática es una herramienta que nos permite predecir su comportamiento sin necesidad de experimentar sobre él, ya que en muchos casos resulta complicado reproducir las condiciones apropiadas para su respectivo análisis.

Un modelo matemático es equivalente a una ecuación o un conjunto de las mismas en base a las cuales podemos conocer el comportamiento general del sistema.

La construcción o determinación de un modelo para sistemas desconocidos es un objetivo importante en la ingeniería de control. Es necesario la simulación del comportamiento real de

estos modelos en los casos donde existe algún conocimiento previo limitado de la estructura del sistema. (Kunush, 2003, p. 46)

1.6.2.1. Tipos de modelos:

Existen diferentes tipos de modelos físicos los cuales se clasifican de acuerdo a diferentes criterios.

De acuerdo al grado de formalismo matemático, tenemos:

- **Modelos mentales, intuitivos o verbales:** Estos modelos poseen un bajo grado de formalismo matemático. Por ejemplo, para conducir un automóvil se necesita un modelo mental o intuitivo para conocer el efecto que produce el movimiento del volante, lo que hace innecesario caracterizar este efecto mediante ecuaciones matemáticas exactas.
- **Modelos no Paramétricos:** Muchos sistemas pueden quedar perfectamente caracterizados por medio de una tabla o un gráfico en el que se observe sus propiedades dinámicas por medio de un número determinado de parámetros. Un ejemplo es cuando un sistema queda definido mediante su respuesta frente a un escalón o impulso, aunque también puede definirse mediante su respuesta en frecuencia.
- **Modelos Paramétricos o Matemáticos:** Cuando es necesario utilizar modelos para aplicaciones más avanzadas donde se describa el tipo de relación entre las variables del sistema, utilizando expresiones matemáticas como ecuaciones diferenciales (Sistemas Continuos) o ecuaciones de diferencias (Sistemas Discretos).

De acuerdo al tipo de sistema y acorde a la matemática utilizada, los modelos pueden ser:

- **Determinísticos:** Son los modelos que se pueden representar por medio de una ecuación exacta, relacionando las entradas y salidas del sistema.
- **Estocástico:** Es un modelo que tiene un cierto grado de incertidumbre, que se puede representar en base de conceptos probabilísticos o estadísticos.
- **Estáticos:** En estos modelos la salida en un instante determinado depende únicamente de la entrada del mismo, la salida en estos sistemas es indiferente del tiempo debido a que existe una relación directa entre la entrada y salida del sistema.
- **Dinámicos:** Son modelos donde al aplicarles una determinada entrada, las salidas evolucionan con el tiempo. Para conocer el valor actual de la salida es importante conocer el tiempo transcurrido desde la aplicación de la entrada.
- **Continuos:** Estos modelos se caracterizan por medio de ecuaciones diferenciales y trabajan con señales continuas.

- **Discreto:** Estos sistemas a diferencia de los continuos son descritos por medio de ecuaciones de diferencias y trabajan con señales muestreadas.

Todo modelo ya sea matemático o paramétrico, consta de una o varias ecuaciones donde se relaciona las entradas con las salidas (si el modelo es dinámico el tiempo juega un papel primordial). Es por esta razón que a los modelos matemáticos comúnmente se los conoce como paramétricos, ya que se pueden definir mediante una estructura y un número finito de parámetros. (López Guillén, 2002)

1.6.3. Métodos de obtención de un modelo dinámico:

Para obtener un modelo de un sistema dinámico existen dos métodos principales:

- **Modelado Teórico:** Se basa en principios analíticos, donde para descubrir el comportamiento dinámico de un proceso o fenómeno se recurre a las leyes básicas de la física.
- **Identificación del Sistema:** Se trata de un método experimental, donde a partir de los datos recogidos en un sistema o planta se puede obtener un modelo.

El modelado teórico tiene un campo de aplicación restringido en particular si el proceso es muy sencillo de modelar o si la aplicación requiere una gran exactitud. En muchos casos no resulta necesario obtener la estructura del modelo a partir de los conocimientos físicos, ya que una planta puede tener un conjunto de parámetros desconocidos y los cuales únicamente se los puede obtener aplicando técnicas de experimentación sobre el sistema real, por lo que resulta necesario recurrir a los métodos de Identificación de Sistemas.

La identificación de los parámetros del modelo mediante el uso de datos reales provee a este una gran exactitud, que mejoraría en gran parte si se tuviera un conocimiento más amplio sobre las leyes físicas que rigen al proceso. Aunque en la práctica lo ideal es recurrir a la combinación de ambos métodos para obtener el modelo final. (Gener, 2013, p. 58)

1.7. Identificación de sistemas:

Consiste en determinar u obtener de forma experimental el modelo de un sistema dinámico que reproduzca con exactitud las características dinámicas del proceso a partir de las mediciones o datos de entrada y salida del sistema en estudio. (Curay Flores & Vaca Guilcamaigua, 2015)

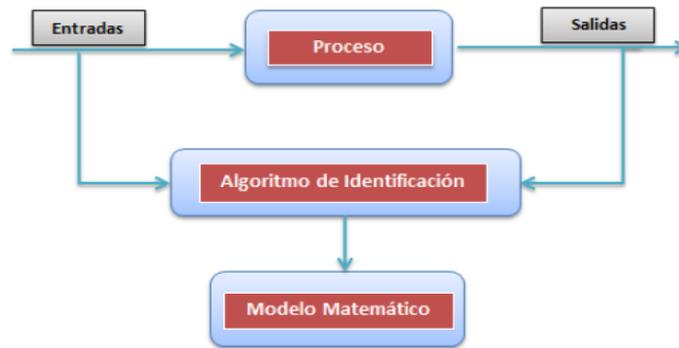


Figura 15.1.- Esquema general de la identificación de sistemas
Fuente: Curay, D. y Vaca, A.ESPE-Latacunga

Según Lofti Zadeh en 1962 “Identificación es la determinación, en base a la entrada y salida, de un sistema, dentro de una clase de sistema especificada, al cual el sistema derivado es equivalente”.

1.7.1. *Proceso de Identificación:*

Para obtener el modelamiento de sistemas dinámicos, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos: (Kunush, 2003, p. 53})

- a) **Obtención de Datos de Entrada-Salida:** Se excita al sistema aplicando una señal de entrada para luego almacenar los datos en un registro durante un intervalo de tiempo la evolución de sus entradas y salidas.
- b) **Tratamiento previo de los Datos Registrados:** Luego de obtener y almacenar los datos se debe tener en cuenta que estos están generalmente acompañados por ruidos indeseados u otro tipo de señales indeseadas que hace necesario un filtrado de los datos antes de iniciar la identificación del modelo, es decir depurar los datos obtenidos y así optimizar el proceso de identificación.
- c) **Elección de la Estructura del Modelo:** Dependiendo del tipo de modelo que se desea obtener (en el caso de estudio un modelo paramétrico), primero se determina la estructura acorde a la planta, este proceso se puede facilitar si se utiliza software de análisis como Matlab.
- d) **Obtención de los Parámetros del Modelo:** Una vez elegida la estructura se pasa a la estimación de los parámetros que se ajusten de mejor manera a la respuesta del modelo basados en los datos experimentales de entrada y salida.

- e) **Validación del Modelo:** Para satisfacer los requerimientos iniciales de la planta y el grado de exactitud necesario para la aplicación, se debe determinar si el modelo tiene los parámetros correctos. Si esto no se cumple, pudo haber sido por una de las siguientes causas:
- No se tiene suficiente información del sistema, debido a que los datos obtenidos de entrada-salida no proporcionan suficiente información.
 - La descripción del modelo es inadecuada debido a que la estructura elegida no es la apropiada.
 - El criterio aplicado no es apropiado para el ajuste de parámetros seleccionados.

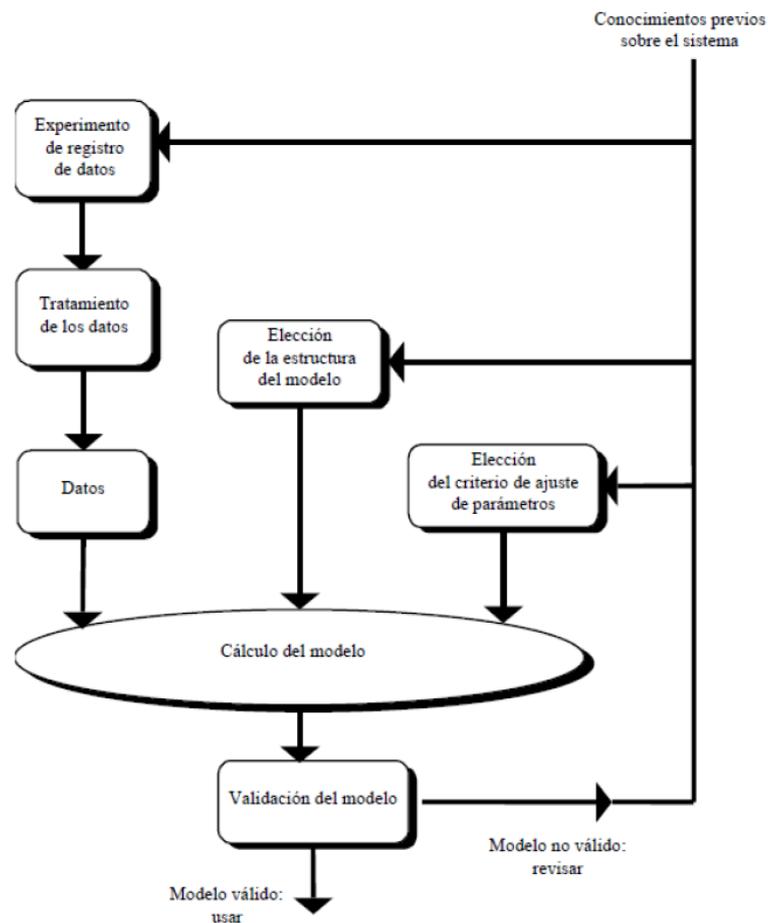


Figura 16.1.- Proceso de identificación

Fuente: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>.

1.7.2. Consideraciones:

Consideraciones practicas a tener en cuenta durante el proceso de obtención de un modelo aplicando el método de identificación de sistemas

1.7.2.1. Obtención de los datos:

En el proceso de identificación, primero se debe realizar un sondeo previo del sistema bajo estudio para obtener datos de entrada-salida que servirán de base.

El objetivo del sondeo es obtener datos que contengan información significativa sobre el sistema, lo que implica un cuidadoso diseño del sistema de adquisición de datos, tomando en cuenta el tipo de señales a ser medidas, el periodo de muestreo, el tipo de entrada más adecuada y el tamaño de la muestra a utilizar. (Curay Flores & Vaca Guilcamaigua, 2015, p. 36)

Elección de la señal a medir: Una vez determinado el sistema de adquisición de datos y el correspondiente sistema de almacenamiento, se debe determinar las señales a ser manipuladas para inyectar al sistema durante el experimento. También hay que tener en cuenta que pueden existir señales, que aunque influyan en la evolución del sistema, no se puedan considerar como entradas debido a su poca influencia sobre ellas.

Elección del tipo de entradas: Los datos adquiridos deben proporcionar información suficiente sobre el comportamiento del sistema, por lo que se debe elegir de manera cuidadosa las entradas del mismo. Para lo cual es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Para que el espectro de frecuencia sea lo suficientemente amplio, la señal de entrada debe contener el mayor número de frecuencias.
- Para sistemas lineales, se puede utilizar señales binarias de duración aleatoria (conocidas como señales binarias aleatorias o Pseudoaleatorias-PRBS), donde es necesario realizar un barrido de todo el rango de variación para dos niveles de entrada.

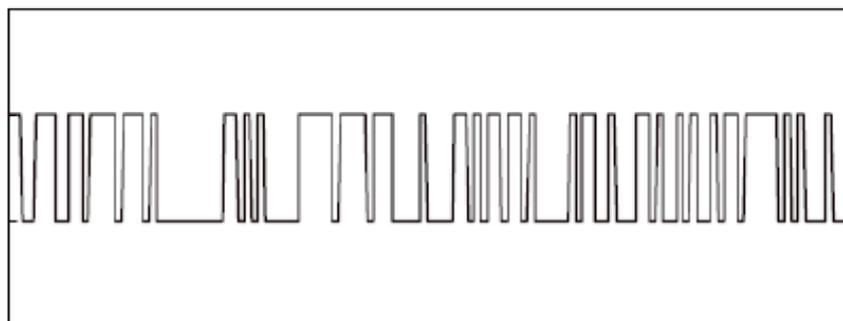


Figura 17.1.- Entrada binaria aleatoria para sistemas lineales

Fuente: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19479/1/1.-%20Caratula.pdf>

Sin embargo, para sistemas no lineales es necesario trabajar con más de dos niveles de entrada

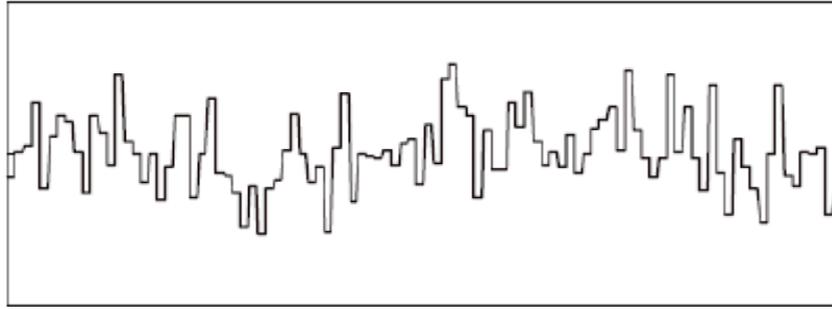


Figura 18.1.- Entrada escalonada aleatoria para sistemas no lineales
Fuente: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19479/1/1.-%20Caratula.pdf>

Elección del Periodo de Muestreo: Se relaciona e influye de manera directa en la identificación del sistema (constantes de tiempo), donde se puede obtener datos redundantes que no aporten con información específica y relevante del sistema, si el rango escogido del periodo es muy pequeño; en cambio un periodo muy grande provoca dificultades al momento de identificar la dinámica del sistema.

Una regla que comúnmente se usa para escoger una frecuencia adecuada es que sea alrededor de diez veces el ancho de la banda del sistema, lo que corresponde a obtener de cinco a ocho datos en el tiempo de subida de la respuesta del sistema frente a una señal de inyección.

Elección de Tamaño de Muestra: Si se necesita un alto grado de exactitud en el sistema, mayor será la información necesaria. Al momento de adquirir los datos nos vemos limitados por el equipo empleado ya que tiene una capacidad limitada.

Es por esto que es importante equilibrar entre un periodo de muestreo adecuado y un número de muestras necesario que nos permitan obtener toda la información del comportamiento del sistema.

1.7.2.2. *Pretratamiento de Datos:*

Los datos adquiridos pueden tener deficiencias o información errónea que puede ocasionar terribles efectos a lo largo del proceso de identificación, tales como:

- a) Señales similares a la fundamental a frecuencias muy superiores (Armónicos), que ocasionan que el sistema trabaje a frecuencias totalmente diferentes.
- b) Obtener datos equivocados o contaminados por señales parasitas, ocasionados por fallas tanto de hardware o software en la etapa de adquisición.
- c) Desplazamiento, desviaciones o perturbaciones a baja frecuencia.

Existen algunas técnicas detalladas a continuación para tratar los diferentes efectos y así poder filtrar los datos para una correcta identificación del sistema:

Eliminación de Perturbaciones de Alta Frecuencia: Este tipo de perturbaciones se producen por fuentes de ruido ajenas al sistema las cuales pueden ser evitadas mediante una correcta elección del periodo de muestreo, otra opción puede ser recurrir al diezmado de datos para evitar el uso de un periodo mucho mayor de muestreo en una nueva etapa de adquisición.

Eliminación de Datos Erróneos: El efecto que ocasiona este tipo de datos resulta ser muy negativo para el proceso particularmente porque su presencia suele presentarse de manera aislada, por lo que es primordial eliminarlos antes de iniciar el proceso de identificación.

Esto se lo puede realizar por medio de un procedimiento manual donde se elimine el dato y a su vez este se le aproxime a un nuevo valor por medio de interpolación, aunque también existe herramientas computacionales basadas en algoritmos de detección de fallos que nos permiten corregirlos. (Martines Bueno, 2011, p. 58)

1.7.2.3. Validación del Modelo:

La disposición de diferentes estructuras aplicables a cada tipo de sistema, permite aplicar cada una de estas estructuras hasta dar con el modelo que mejor se aproxime al comportamiento real del sistema basados en los datos recogidos en la etapa de adquisición.

En síntesis se trata de establecer cuando una determinada estructura se ajusta lo suficiente al sistema proceso que se lo conoce como “Validación del Modelo”. Por lo general el objetivo de la mayoría de los métodos de validación es ajustarse lo suficiente a los datos de entrada-salida obtenidos en la experimentación, por lo que se exponen algunos criterios para poder escoger el modelo que se ajuste de mejor manera como:

Validación en base a la aplicación del Modelo: Comprobar si el modelo determinado se asemeja al comportamiento real del sistema resulta complejo, pero suele ser suficiente el comprobar que el modelo es capaz de resolver el problema o describir el fenómeno para el cual fue desarrollado.

Coherencia con el comportamiento de Entrada-Salida: En este caso es necesario recurrir a distintos métodos de identificación para poder determinar las características del sistema, haciendo una comparación entre los resultados obtenidos. Esto se lo puede realizar dependiendo del tipo del sistema, se puede comparar los diagramas de bode obtenidos por el método de variables instrumentales o por medio de análisis espectral y así poder determinar lo suficientemente las características dinámicas del sistema.

Reducción del Modelo: Al momento de establecer el modelo tenemos que comprobar si el modelo describe todas las características dinámicas del sistema de la manera más simple, es decir

si le aplicamos un método de reducción y si validamos el mismo podemos decir que el modelo era innecesariamente complejo. (Escobet T., Morcego B., 2003, p. 8)

1.8. Testing:

La estimación o determinación de un sistema con calidad implica el uso de metodologías o procedimientos estándares para el análisis, diseño, implementación y prueba del sistema que permitan nivelar la filosofía de trabajo, para así obtener un sistema con una mayor confiabilidad, mantenibilidad, facilidad de prueba y productividad, tanto para el desarrollo como para el control.

El testing es un procedimiento necesario ya que si el desarrollador introduce o comete un error, esto hace el sistema a determinar no se ajuste a su funcionamiento y parámetros definidos en la realidad. (Ljung, 2001, p. 78)

Existen definiciones variadas del Testing que han cambiado con el tiempo entre las cuales tenemos:

“.. ejecutar un programa con la intención de certificar su calidad”. (Mills, 1970)

“..ejecutar un programa o sistema con la intención de encontrar errores” (Myers, 1979)

“..establecer confianza que un programa o sistema hace lo que se supone que debe hacer” (Hetzel, 1973)

Pero una definición más acorde y completa puede ser:

“el proceso de ejercitar el software o un sistema para detectar errores, para verificar si cumple funcional y no funcionalmente los parámetros establecidos, para explotar y entender el estado de los beneficios y riesgos asociados con su liberación”

Hay que tener mucho en cuenta que el Testing no solo consiste en ejecutar tests, por lo que esto constituye solo una parte de todo el procedimiento ya que algunas actividades de prueba tienen lugar antes y después de la ejecución como:

- Planificación.
- Control.
- Determinación de los parámetros.
- Diseño de los casos de prueba
- Comprobación de los resultados.
- Evaluación de criterios de finalización

- Presentación de informes del proceso.

Es importante diferenciar entre dos términos muy importantes que suelen causar confusiones en su interpretación:

- El Testing nos muestra los fallos causados por los defectos.
- En cambio debugar es una actividad de desarrollo que identifica la causa del defecto, la repara y verifica si ha sido corregida correctamente.

1.8.1. Metodologías de testing:

El Testing tradicionalmente se ha dividido en dos estrategias básicas de aplicación universal.

1.8.1.1. Testing estructural:

Denominado también de caja blanca, este test implica un conocimiento previo de la estructura del sistema para poder seleccionar los casos de prueba a aplicar, como los casos de prueba se estiman en base a la estructura del sistema elegido, pero debido a que el sistema es propenso a errores o cambios en la estructura no es posible determinarlos hasta que el sistema haya quedado completamente definido.

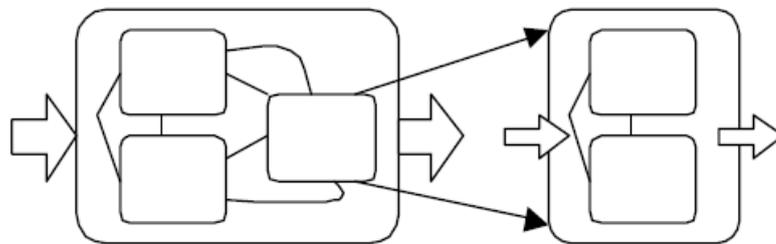


Figura 19.1.- Esquema modelo de caja blanca

Fuente: Centeno, J. -Teoría de Sistemas

Si está constituido por elementos complejos, es decir si está constituido por subsistemas dentro del sistema principal; en un sistema de caja blanca se conoce todas las rutas del sistema, el camino que síguela energía que entra y sale, etc. (Centeno, 2012, p. 18)

1.8.1.2. Testing basado en Modelos:

También conocido como de caja negra lo que significa estimarlo sin tener ningún conocimiento previo tanto de funcionamiento como de su estructura, donde los casos de prueba los determinan las especificaciones o el modelo a aplicar de los varios estudiados

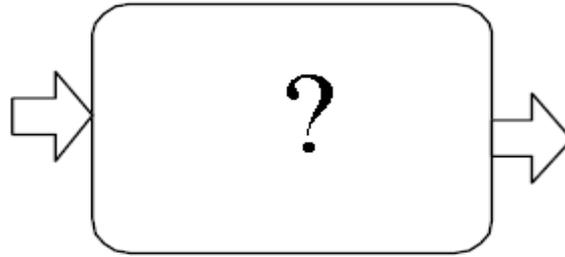


Figura 20.1.- Esquema modelo de caja negra
Fuente: Centeno, J. -Teoría de Sistemas

En un sistema de caja negra, solo se conoce las entradas y salidas, ya que el resto de parámetros como la estructura y la dinámica del sistema son totalmente desconocidos. (Centeno, 2012)

1.8.1.3. Testing de Caja Gris:

El concepto de este test es simple, ya que es una fusión de los dos anteriores, se basa en un test de caja negra donde la diferencia radica en que se lo realiza a personas con conocimiento previo del sistema, se puede conocer las entradas y salidas, la composición interna, pero algunos detalles o componentes son aún desconocidos.

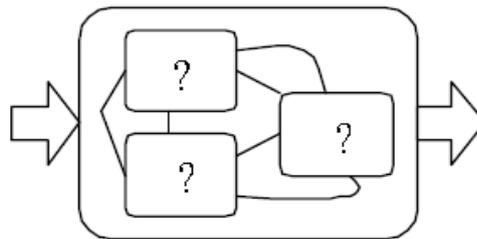


Figura 21.1.- Esquema modelo de caja gris
Fuente: Centeno, J. -Teoría de Sistemas

Es muy útil considerar los siguientes casos:

- **Modelado Físico:** La estructura del modelo puede ser construida a partir de definiciones físicas, que tiene un cierto número de parámetros a estimar a partir de datos. Esto podría, por ejemplo, ser un modelo de espacio de estado de orden y estructura dada.
- **Modelado Semi-Físico:** Una visión física se utiliza para sugerir ciertas combinaciones no lineales de la señal de datos medidos. Estas nuevas señales se someten después a modelar las estructuras de carácter de cuadro negro.

1.9. Matlab:

Matlab es un paquete de software interactivo basado en matrices para cálculos científicos y de ingeniería, su nombre significa Laboratorio de Matrices y fue desarrollado a partir de los paquetes de cálculo matricial LINPACK y EISPACK

Desde el punto de vista del control Matlab se puede considerar como un entorno matemático de simulación que puede utilizarse para modelar y analizar sistemas ya sean estos continuos, discretos, lineales o no lineales, a lo largo de su desarrollo se han ido añadiendo librerías as conocidas como Toolbox especializadas en diferentes áreas científicas como:

- ❖ Simulink Toolbox.
- ❖ Control System Toolbox.
- ❖ System Identification Toolbox.
- ❖ Robust Control Toolbox.
- ❖ Signal Processing Toolbox.
- ❖ Filter Design Toolbox.
- ❖ Symbolic Math Toolbox.

La investigación, resolución de problemas prácticos y cálculos de ingeniería son de las típicas aplicaciones Matlab, el System Identification Toolbox es una herramienta muy útil al momento de trabajar en el modelado de sistemas dinámicos (Curay Flores & Vaca Guilcamaigua, 2015)

1.9.1. System identification toolbox:

El sistema de identificación de Matlab nos ofrece, funciones, bloques de Simulink y una aplicación dedicada para la construcción de modelos matemáticos aplicados a sistemas dinámicos a partir de sus datos de entrada-salida adquiridos, entre sus particularidades nos permite crear y utilizar modelos de sistemas dinámicos complejos de modelar a partir de parámetros o especificaciones básicas.

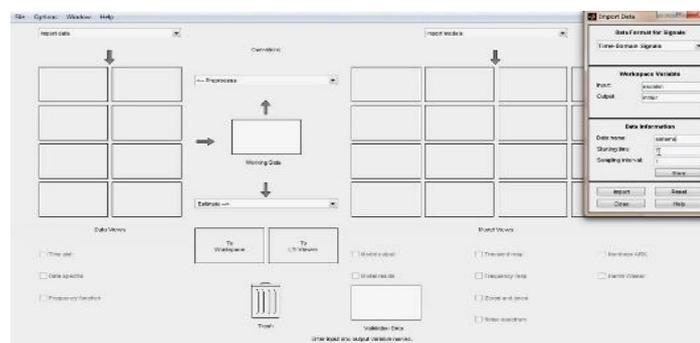


Figura 22.1. - System identification toolbox (IDENT) Matlab
Fuente: Jhon Jairo Cevallos

La versatilidad de esta herramienta nos permite estimar o identificar modelos en tiempo continuo para datos en el dominio del tiempo y modelos en tiempo discreto para datos en el dominio de la frecuencia, así como funciones de transferencia, función de proceso de modelos y los modelos de espacio de estado

Previo al proceso de identificación es aconsejable seguir los siguientes pasos:

- Adquirir los datos de entrada-salida del sistema
- Depurar los datos, eliminar el ruido excesivo y seleccionar porciones útiles de los datos.
- Selecciona una estructura a aplicar
- Determinar si el modelo se ajusta a los parámetros del sistema, caso contrario elegir otra estructura a aplicar hasta que esta satisfaga los parámetros requeridos por el sistema

1.10. Labview:

Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico orientado a objetos para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control, nos permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola visual de desarrollo; una de sus ventajas es que permite una fácil integración entre hardware y software, en particular con tarjetas de adquisición, medición y procesamiento de datos.

Ya que Labview imita la apariencia y operación de instrumentos físicos son llamados VI (Virtual Instrument), que nos permite crearlos a partir de especificaciones diseñadas por el desarrollador.

Un VI está compuesto por dos paneles, el frontal donde se diseña la interfaz con el usuario y el panel de programación o de diagrama de bloques donde se relacionan los elementos utilizados en la interfaz mediante operaciones y así determinar el funcionamiento del programa o sistema.

A diferencia de los lenguajes de programación basados en texto como C++ y Visual Basic, Labview utiliza iconos para crear aplicaciones, lo que permite el desarrollo de aplicaciones mediante un flujo de datos gráfico, los que fluyen a través de nodos en el diagrama de bloques lo que determina el orden de la ejecución. (Gijon, 2006)

1.10.1. NI MyDaq:

Es una tarjeta de adquisición de datos portátil de bajo costo (DAQ), mediante la plataforma NI Labview la cual se basa en instrumentos de software, permite realizar mediciones y análisis de señales del mundo real.

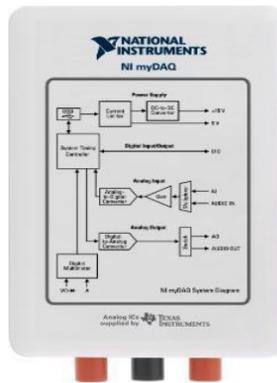


Figura 23.1.- NI myDAQ
Fuente: National Instruments

La NI myDAQ es ideal como herramienta de exploración de la electrónica y el análisis de fenómenos en tiempo real, en conjunto con Labview se puede realizar la adquisición, procesamiento y análisis de señales para posteriormente aplicar y mantener un control de procesos en cualquier momento o lugar

NI ELVISmx es un software de controlador compatible con NI myDAQ, utiliza instrumentos de software basados en Labview para controlar el dispositivo NI myDAQ, proporcionando la funcionalidad de un conjunto de instrumentos de laboratorio. (Jacome Riera & Leon Amores, 2014)

1.10.1.1. Entradas analógicas:

Entradas: 8 referenciadas a masa, 4 diferenciales

- Resolución: 12 bits en modo diferencial
- Resolución: 11 bits en modo RSE
- Velocidad de muestreo: 10 Ks/s
- Rango de Voltaje máximo: [-10,10]
- Precisión máxima del rango de voltaje: 138 mV
- Mínima precisión del rango de voltaje: 37.5 mV

1.10.1.2. Salidas analógicas:

- Canales: 2
- Resolución: 12 bits
- Rango de voltaje: [0,5]
- Precisión máxima del rango de voltaje: 7 mV
- Frecuencia de salida: 150 S/s
- Capacidad máxima de corriente: 5 mA

1.10.2. DAQ Assistant:

DAQ assistant es una interfaz gráfica para crear, editar y ejecutar de manera interactiva los canales virtuales y tareas de la tarjeta NI MyDaq al momento de crear un enlace de los canales físico que posee la tarjeta con los creados en la interfaz en Labview; la configuración de los parámetros de este canal como rango de entrada, escala, temporización, disparo y otras propiedades relacionadas con la adquisición.



Figura 24.1.- DAQ Assistant
Fuente: National Instruments

Cuando se trabaja con entradas analógicas hay que tener en cuenta los siguientes parámetros del bloque del **Sample Clock**:

- **Sample Mode:** Se especifica si el muestreo se lo realizara de manera continua o con un número determinado de muestras.
- **Samples per Channel:** Especifica el tamaño del buffer de memoria si el número de datos es predeterminado.
- **Rate:** Especifica el rango de muestreo que se realiza en cada canal por segundo.
- **Source:** Nos indica el reloj a utilizar, que si no se cablea se utilizada por defecto el reloj interno de la DAQ
- **Activate Edge:** Se selecciona en que flanco se va a realizar el muestreo, de subido o bajada.
- **Task/ channels in:** Se especifica los canales virtuales que cumplen las características para nuestra adquisición.

1.10.3. Muestreo:

Para realizar el muestreo de una señal en Labview, dependiendo de las necesidades del sistema de adquisición se puede aplicar entre:

1.10.3.1. Muestreo del intervalo:

Este es el método más común donde se comparte del convertidor A/D entre todos los canales del dispositivo, la misma que se la realiza alternadamente entre cada canal sincronizado con los pulsos que genera el reloj.

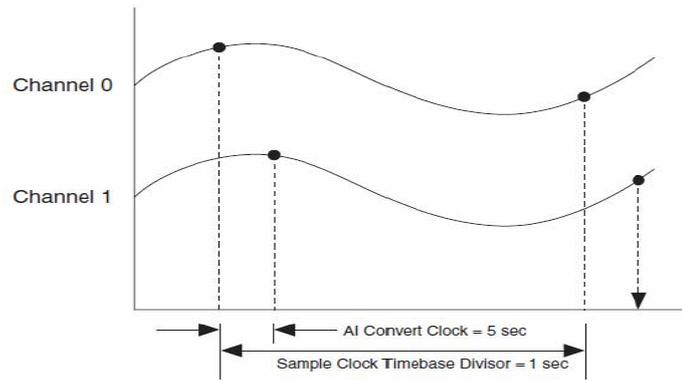


Figura 25.1.- Muestreo por intervalo de dos canales
Fuente: Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal.-National Instruments

1.10.3.2. Muestreo Round Robin:

A diferencia del muestreo de intervalo, este método no utiliza un reloj de escaneo; el reloj del canal comienza con el escaneo y el mismo nos determina el tiempo entre muestras, es decir se alterna el uso del convertidor A/D entre los canales

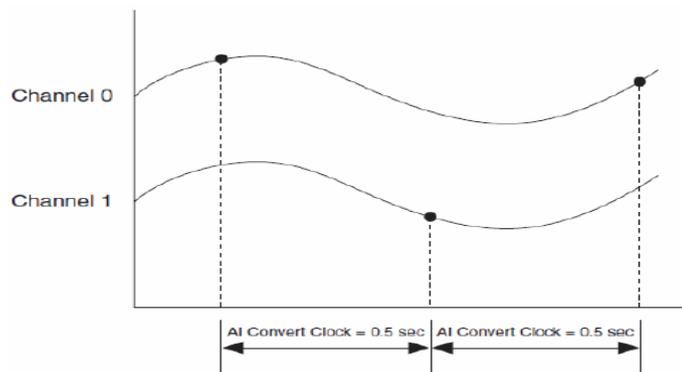


Figura 26.1.- Muestreo Round Robin de dos canales
Fuente: Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal.-National Instruments

1.10.4. Adquisición buffer:

Una adquisición buffer adquiere múltiples puntos con una sola llamada al dispositivo, donde los puntos son transferidos a una memoria intermedia antes que Labview los lea, la lectura no se la realiza hasta que las muestras en cada canal estén disponibles, ya que dependiendo del tamaño del buffer este se llena y los datos se pierden, el bloque de Error nos ayuda a observar los errores ocurridos durante el proceso.

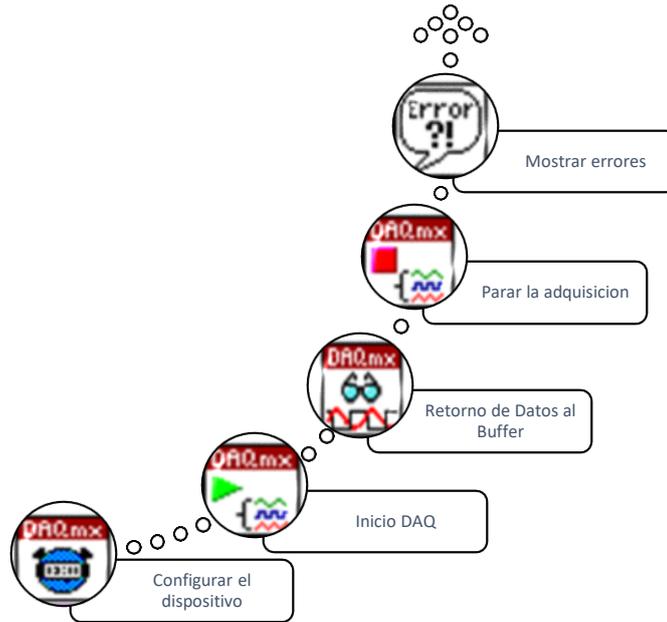


Figura 27.1.- Proceso creación de buffer Labview
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

1.11. Transformadores de Corriente:

Un transformador de corriente o también como CT (por sus siglas en inglés), es un dispositivo que alimenta de una corriente proporcionalmente menor a la del circuito a la que se conecta. Un transformador de corriente por su aplicación se puede subdividir en transformador de medición y transformador de protección, es decir aíslan instrumentos de protección y medición conectados a circuitos de alta tensión y transforman corriente, su corriente nominal en el secundario va de entre 1 a 5 amperios.

El primario del transformador se conecta en paralelo al circuito cuya intensidad se desea medir y el secundario en el caso de los transformadores de Efecto Hall viene a ser el alambre del circuito a medir. El efecto Hall, descubierto por Edwin C. Hall en 1879, consiste en la producción de una caída de voltaje a través de un conductor o semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para esto es necesario que la dirección del campo magnético sea perpendicular a la dirección de flujo de la corriente. (Coronel, 2013)

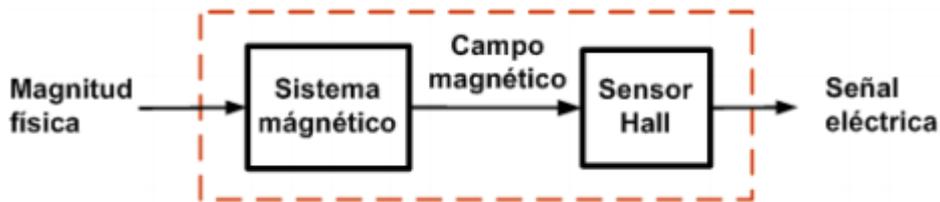


Figura 28.1.- Esquema Efecto Hall
Fuente: Roberto Martin Murdocca

El efecto Hall se presenta en conductores y en semiconductores. Las diferencias de potencial producidas en tiras metálicas son muy pequeñas, siendo a menudo enmascaradas por el ruido. Por esto, los dispositivos comerciales usan materiales semiconductores especiales, donde el efecto Hall es más notable. En estos casos, el elemento básico es generalmente una tira de arseniuro de galio (GaAs) o de indio (InAs) la cual, cuando se polariza mediante una corriente constante y se sumerge en un campo magnético transversal a su superficie, genera un voltaje proporcional a la intensidad del campo. Este voltaje es reforzado por un amplificador operacional incorporado en el dispositivo o por la relación de vueltas en un TC entre el devanado primario y secundario, procesándolo para proporcionar una señal de salida útil. (Murdocca, 2013)

CAPITULO II

2. MARCO METODOLOGICO

2.1. Modelo Matemático:

Un modelo matemático es una descripción en lenguaje matemático, de un objeto o fenómeno existente en un universo no matemático, es una construcción matemática abstracta y simplificada, creada con un propósito particular.

Las bondades de un modelo dependerán de la situación o fenómeno a ser modelado y del problema planteado. Se pueden obtener diferentes modelos de una misma situación y estos producirán a su vez diferentes simplificaciones de la realidad y, en consecuencia dan lugar a distintos resultados. También, un mismo modelo puede servir para distintas situaciones. (Aguirre & Larco, 2010)

Un esquema en el que se representa el proceso de modelado matemático es:

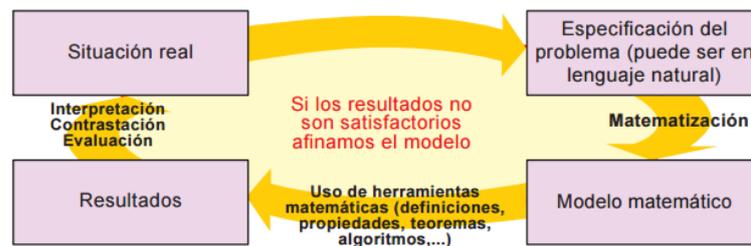


Figura 1.2.- Esquema modelado matemático

Fuente: <http://www.fpolar.org.ve/matematica2>

2.1.1. Modelación matemática:

La modelación matemática es un intento para describir alguna parte del mundo real en términos matemáticos y los elementos que lo componen son tomados del cálculo, algebra, geometría y otros campos afines.

En los modelos matemáticos es natural que sean considerados de analogía incompleta, ya que por lo general reflejan solamente algunas propiedades del objeto modelado; además se caracterizan por una suficiente generalidad, describiendo una clase completa de objetos y fenómenos. En cambio la creación de modelos matemáticos no requiere gastos significativos en materiales, debido a que hoy en día se realiza el proceso de modelación con la ayuda de modernas

herramientas de cómputo que permiten reducir el tiempo de estimación. (Brito VallinaI, et al., 2011, p. 56)

En un modelo matemático se establecen un conjunto de relaciones de igualdad y/o desigualdad definidas en un conjunto de variables que reflejan la esencia de los fenómenos en el objeto de estudio y se puede decir que formalmente un modelo matemático M es una estructura, donde R es el conjunto de relaciones y V el conjunto de variables.

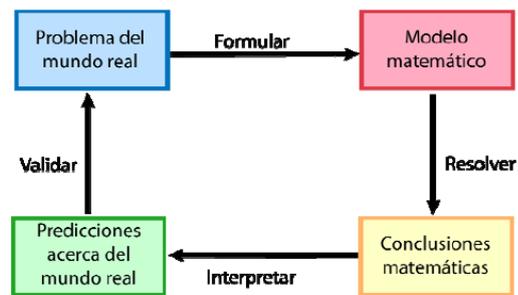


Figura 2.2. - Proceso de modelado
Fuente: Basmadjian, D. The Art of Modeling in Science and Engineering

Para identificar un problema en el mundo real, el primer paso es formular un modelo matemático, para lo cual se identifican las variables, aunque en muchas situaciones no se dispone de alguna ley física que lo determine, por lo que es necesario disponer de una colección de datos para reconocer patrones o aplicar técnicas de testing que permitan determinar el modelo en base a los datos obtenidos o adquiridos. (López Guillén, 2002)

Un modelo matemático no llega a ser una representación completa e ideal de la situación física analizada, en un buen modelo la realidad se logra simplificar lo suficiente para permitir cálculos matemáticos o poder aplicar procesos de optimización al objeto o fenómeno modelado.

2.2. Técnicas de identificación paramétricas:

Los modelos paramétricos a diferencia de los modelos no paramétricos quedan descritos mediante un número finito de parámetros aplicados a una estructura donde se relacionan las señales de interés del sistema.

En general la base de todos los métodos de estimación consiste en minimizar los residuos $\varepsilon(t)$, definiendo $\varepsilon(t)$ como:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \tag{Ecu. 1.2}$$

Donde $y(t)$ es el valor deseado de la salida, $\hat{y}(t)$ el valor de predicción que está en función del modelo estimado; la estimación a aplicar generalmente se la realiza utilizando un criterio cuadrático, la metodología de cálculo a emplear dependerá del tipo de relación entre $\varepsilon(t)$ con los parámetros a estimar. (Parra Rosero, 2011, p. 22)

Si la relación es lineal se podrá emplear métodos de cálculo analítico, mientras que si la relación es no lineal el método de cálculo a utilizar será iterativo

Tabla 1-2: Clasificación del término de linealidad

DINÁMICA	PROCESO	ERROR (respecto al coeficiente \hat{a})	
		lineal	no-lineal
Lineal	$y' + ay = u$	$\varepsilon = y' - \hat{a}y - u$	$\varepsilon = y - w$ $w' - \hat{a}w = u$
No-lineal	$y' + ay^3 = u$	$\varepsilon = y' - \hat{a}y^3 - u$	$\varepsilon = y - w$ $w' - \hat{a}w^3 = u$

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

2.2.1. Introducción:

Para iniciar con el proceso de modelamiento se debe empezar con un conjunto de datos observados, en el caso de los sistemas dinámicos con una entrada en un instante t denominada como $u(t)$ y una salida en un instante t denominada $y(t)$, que en conjunto serán una colección finita de observaciones:

$$Z^N = \{u(0), y(0), u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\} \quad \text{Ecu. 2.2}$$

El problema de los métodos de identificación se centra en encontrar relaciones matemáticas entre las secuencias de entrada y salida; definiéndolo de forma general se tiene la ecuación 3.2:

$$Z^N = \{[y(t), \varphi(t)]\} \quad t = 1, \dots, N \quad \text{Ecu. 3.2}$$

Hay que tener en cuenta la estimación de $y(N + 1)$ ya que a partir de $\varphi(N + 1)$, en el caso de los sistemas dinámicos $\varphi(t)$ contendría la información de las entradas y salidas anteriores a t . Desde este punto se empieza a tratar de construir una función $\hat{g}_N(y, \varphi(t))$ a partir de la cual se pueda estimar $\hat{y}(t)$:

$$\hat{y}(t) = (t, \varphi(t)) \quad \text{Ecu. 4.2}$$

Generalmente se busca una función g que sea parametrizable y que tenga un número finitos de parámetros a los cuales se les denomina con un vector θ ; a las diferentes funciones candidatas se les denomina estructura del modelo, que por lo general se las describe como $\hat{g}_N(t, \theta, \varphi(t))$, la cuales permiten el cálculo del valor de $y(t)$:

$$y(t) \approx g_N(t, \theta, \varphi(t)) \quad \text{Ecu. 5.2}$$

La búsqueda de una estructura adecuada θ y el cálculo del valor $\hat{\theta}_N$ conduce a:

$$\hat{g}_N(t, \varphi(t)) = g(t, \hat{\theta}_N, \varphi(t)) \quad \text{Ecu. 6.2}$$

2.2.2. Estructura del modelo:

2.2.2.1. Modelos lineales:

Un modelo lineal invariante en el tiempo puede ser determinado por su respuesta impulsiva y el modelo de ruido, el cual estaría dado por:

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad \text{Ecu. 7.2}$$

Con $G(q^{-1})$ y $H(q^{-1})$ como:

$$G(q^{-1}) = \sum_{k=0}^{\infty} g(k)q^{-k} \quad H(q^{-1}) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} h(k)q^{-k} \quad \text{Ecu. 8.2}$$

Una vez definidos los términos lo recomendable es elegir estructuras que permitan realizar especificaciones de G y H en términos con un número finito de valores, al que se le conoce como modelado paramétrico e involucra métodos de estimación y predicción en los cuales por lo general no es posible determinar a priori los coeficientes partiendo de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de los sistemas, lo que quiere decir que los coeficientes en cuestión entran al modelo como parámetros a ser determinados denotado como θ y la descripción del sistema se denotara de la siguiente manera:

$$y(t, \theta) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad \text{Ecu. 9.2}$$

Hay que tener en cuenta que la ecuación 8.2 no se refiere solo a un modelo o es la representación de un modelo, sino que es la forma en que se denotara a un grupo de modelos aplicables a este proceso de identificación paramétrica. (Escobet T., Morcego B., 2003)

2.2.3. Modelos de identificación paramétricos:

Los métodos paramétricos tienen como objetivo el cálculo de los parámetros de acuerdo a la estructura escogida, una de las aproximaciones más utilizadas es el método de error de predicción (PEM por sus siglas en inglés), el cual considera al sistema real con la influencia de ruido denotado por:

$$y(t) = G_o(q^{-1})u(t) + v_o(t) \quad \text{Ecu. 10.2}$$

Donde:

$u(t)$ = Entrada del sistema

$y(t)$ = Salida medida del sistema

q^{-1} = Operador lineal de retardo

$v_o(t)$ = Perturbación de salida (ruido)

$G_o(q^{-1})$ se denota como la función de transferencia real que se intenta identificar, hay que tener en cuenta que $v_o(t)$ simboliza todas las posibles fuentes de error como errores de medición, de modelación, etc.

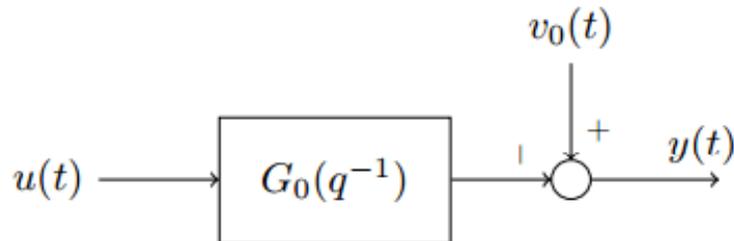


Figura 3.2. – Sistema general con presencia de ruido

Fuente: Andrés Beira- Metodología para la identificación del sistema de excitación de un generador eléctrico de potencia para propósitos de control

El PEM propone una estructura general de modelo para un sistema con ruido donde θ es el vector de parámetros desconocidos.

$$y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + H(q^{-1}, \theta)e(t) \quad \text{Ecu. 11.2}$$

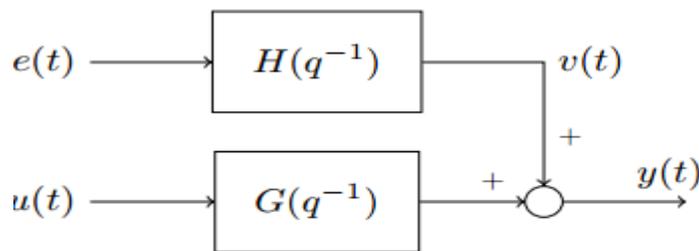


Figura 4.2. – Diagrama de bloques modelo general con ruido

Fuente: Andrés Beira- Metodología para la identificación del sistema de excitación de un generador eléctrico de potencia para propósitos de control

Una característica importante presente en las diferentes estructuras de los modelos paramétricos es la manera de modelizar la parte estocástica más conocida como ruido, la cual variara su posición e impacto sobre el sistema dependiendo del caso; para lo cual se agrupado a los modelos en dos bloques donde:

$$H(q^{-1}) = 1 \quad o \quad H(q^{-1}) \neq 1 \quad \text{Ecu. 12.2}$$

Teniendo en cuenta que $H(q^{-1})$ se refiere al ruido introducido al sistema y tomando en cuenta que para el caso de estudio no se puede determinar que ruido está presente en el sistema, se debe analizar los posibles modelos aplicables para cada caso. A continuación se describen los modelos para cada uno de los casos siendo los dos primeros literales para el caso que $H(q^{-1}) = 1$ y el resto cuando $H(q^{-1}) \neq 1$:

2.2.3.1. Modelo de media ajustado (MA):

A este modelo también se los denomina de respuesta de impulso finita (FIR), el cual está denotado por:

$$y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \quad \text{Ecu. 12.2}$$

Donde:

$$G(q^{-1}) = B(q^{-1})$$

nk = retardo puro del proceso

$B(q^{-1})$ = polinomio de grado nb que tiene la forma:

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad \text{Ecu. 13.2}$$

2.2.3.2. Modelo de error en la salida (OE):

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t - nk) + e(t) \quad \text{Ecu. 14.2}$$

Donde:

$$G(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}, \text{ siendo } f \text{ es un polinomio autoregresivo de orden } n$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf} \quad \text{Ecu. 15.2}$$

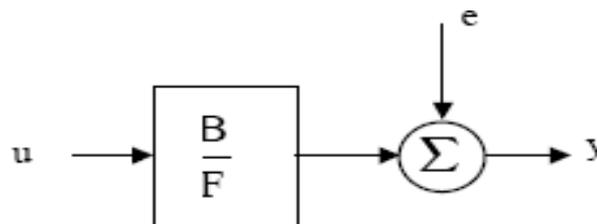


Figura 5.2. – Diagrama de bloques modelo OE
Fuente: Técnicas de identificación paramétrica-Universidad del Cauca

2.2.3.3. *Modelo auto regresivo con variables exógenas (ARX):*

En este modelo se considera que la parte determinista (paramétrica) y la estocástica (ruido) tienen el mismo denominador:

$$G(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad H(q^{-1}) = \frac{1}{A(q^{-1})} \quad \text{Ecu. 16.2}$$

Siendo $A(q^{-1})$ un polinomio auto regresivo de orden n_a :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad \text{Ecu. 17.2}$$

Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente se puede denotar al modelo como:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \quad \text{Ecu. 18.2}$$

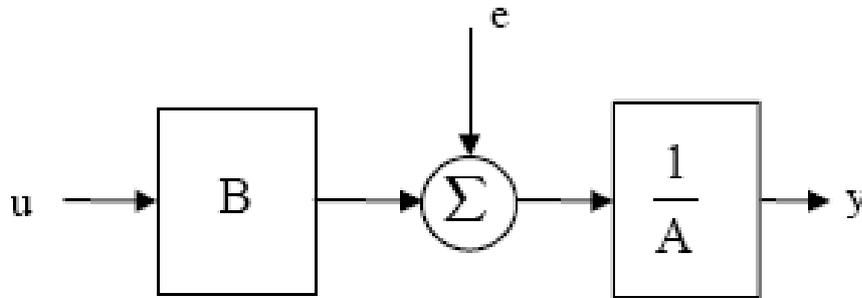


Figura 6.2. – Diagrama de bloques modelo ARX
Fuente: Técnicas de identificación paramétrica-Universidad del Cauca

2.2.3.4. *Modelo auto regresivo de media móvil y variables exógenas (ARMAX):*

Al igual que en modelo ARX $G(q^{-1})$ y $H(q^{-1})$ tienen el mismo denominador como se expresa en la ecuación 16.2, donde en el término $H(q^{-1})$ es un polinomio monoico parecido al expresado en la ecuación 19.2, que esta ocasión se expresa como $C(q^{-1})$, entonces $H(q^{-1})$ quedaría denotado por:

$$H(q^{-1}) = \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad \text{Ecu. 19.2}$$

Quedando el sistema denotado como:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + C(q^{-1})e(t) \quad \text{Ecu. 20.2}$$

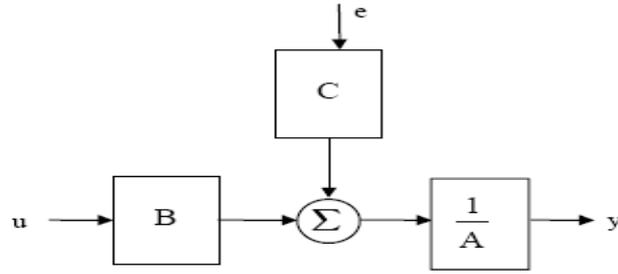


Figura 7.2. – Diagrama de bloques modelo ARMAX
Fuente: Técnicas de identificación paramétrica-Universidad del Cauca

2.2.3.5. Otros modelos en función del error:

En base a los modelos expuestos en los literales anteriores, se puede realizar combinaciones entre ellos y así tomar en cuenta más parámetros con relación al ruido, de ahí se derivan los siguientes dos modelos que son la combinación entre ARX y ARMAX.

- **Modelo ARARX:** En este modelo se toma en cuenta un polinomio monoico auto regresivo de orden nd denotado por $D(q^{-1})$ que reemplaza al termino $C(q^{-1})$ expresado en la ecuación 18.2 quedando el sistema denotado por:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-nk}B(q^{-1})u(t) + \frac{1}{D(q^{-1})}e(t) \quad \text{Ecu. 21.2}$$

- **Modelo ARARMAX:** En cambio en este modelo se toma en cuenta a los dos polinomios en la parte estocástica (ruido) para una definición más robusta de sistema denotada por:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-nk}B(q^{-1})u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad \text{Ecu. 22.2}$$

2.2.3.6. Modelo Box-Jenkins (BJ):

Una característica en particular que permite tomar más consideraciones sobre la variabilidad del sistema debido a que en este caso se dice que $G(q^{-1})$ y $H(q^{-1})$ no tienen parámetros en común, afectando tanto la parte determinística como la estocástica de la estructura del modelo quedando denotado por:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-nk} \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(t) \quad \text{Ecu. 23.2}$$

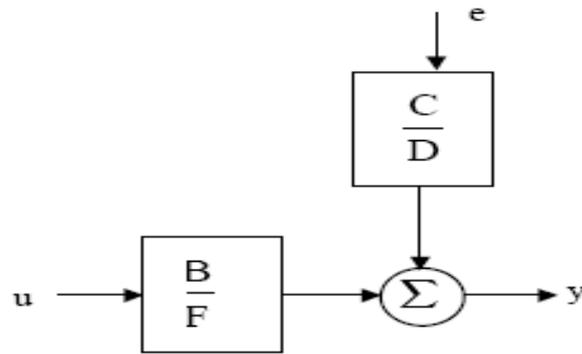


Figura 8.2. – Diagrama de bloques modelo BJ
Fuente: Técnicas de identificación paramétrica-Universidad del Cauca

Considerando este último como la representación general de todas las familias de modelos paramétricos debido a que toma en cuenta los parámetros necesarios tanto para la parte determinística (parámetros del sistema) y la parte estocástica (ruido introducido o producido por el sistema); también conocida como PEM la cual resulta muy útil al momento de elaborar algoritmos para casos especiales

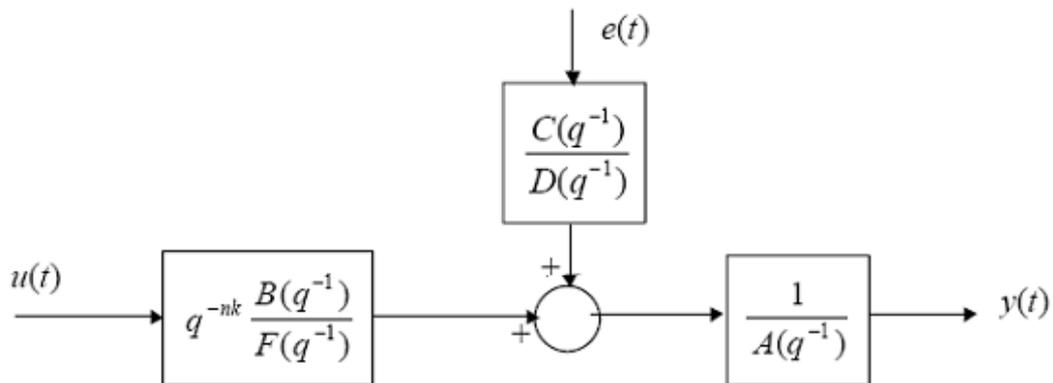


Figura 9.2. – Diagrama de bloques del modelo general (PEM)
Fuente: Técnicas de identificación paramétrica-Universidad del Cauca

A continuación se expone la relación entre los diferentes modelos expuestos anteriormente y los casos particulares derivados a partir del PEM:

Tabla 2-2: Relación entre el PEM y los casos especiales

Polinomios derivados de la ecuación 23.2	Nombre de la estructura del modelo
B	FIR/MA
AB	ARX
ABC	ARMAX
ABD	ARARX
ABCD	ARARMAX
BF	OE
BFGD	BJ

Realizado por: Departamento de Sistemas-Universidad del Cauca

2.3. Proceso de identificación experimental:

El control de procesos e identificación de sistemas implica el uso de diferentes sensores, según las variables o parámetros a controlar en el sistema, para poder obtener la información del proceso en tiempo real, lo que implica seguir cada uno de los pasos existentes descritos a continuación, tomando en cuenta las consideraciones necesarias para cada uno de ellos. (Parra Rosero, 2011, p. 32)

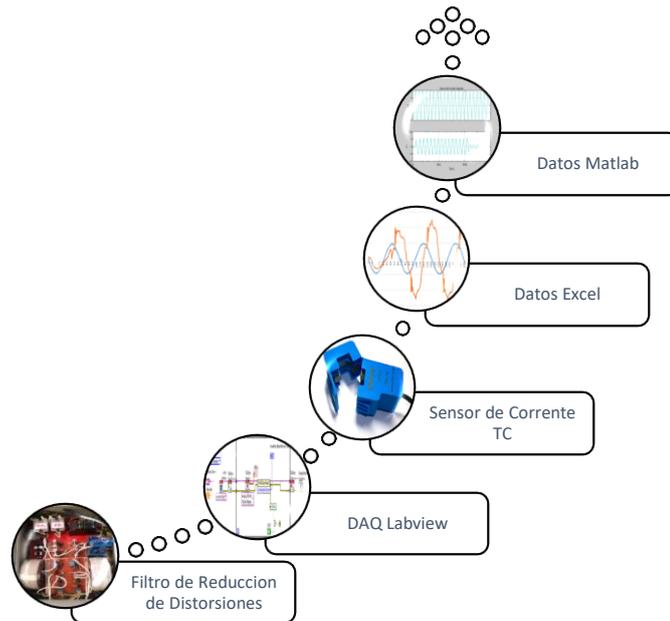


Figura 10.2. – Esquema Proceso de Identificación Experimental
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

2.3.1. Determinación del sistema:

Para iniciar un proceso de identificación es indispensable determinar el sistema a identificar o modelar, independientemente del sistema a modelar hay que tener claro su funcionamiento, para este caso se determinó que el sistema a identificar es un “Sistema de Potencia para la eliminación de Distorsiones Armónicas provocadas por Cargas Inductivas” construido por el Ing. Lenin Gavilánez basado en un principio de control ON-OFF. (Gavilanez, 2015, p. 70)



Figura 11.2. – Sistema de eliminación de distorsiones armónicas
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

2.3.2. Sistema de adquisición DAQ:

Un paso muy importante en el proceso de identificación consiste en preparar y construir un sistema que permita obtener información acerca de la dinámica total del sistema; donde uno de los problemas a enfrentar en esta etapa es la correcta adquisición de datos del sistema, ya que dependiendo del proceso que realice el mismo, se determinara los parámetros mínimos necesarios para la construcción de un sistema adecuado de adquisición.



Figura 12.2. – Partes de un sistema DAQ
Fuente: National Instruments

2.3.2.1. Frecuencia de muestreo:

Una vez determinado el sistema es necesario el conocimiento de su funcionamiento general para determinar el criterio a aplicar en la construcción del DAQ. En la Distorsión Armónica Total THD el análisis de la influencia del orden de los armónicos se lo realiza hasta el armónico de séptimo orden debido a su influencia sobre el valor total, ya que mientras mayor sea su orden, menor es

su influencia en el valor final de THD; con lo expuesto anteriormente se realiza un análisis hasta el armónico de séptimo orden, que para el sistema en estudio sería 420Hz debido a que la frecuencia de la fundamental del sistema es 60Hz derivada de la línea de distribución residencial en el país.

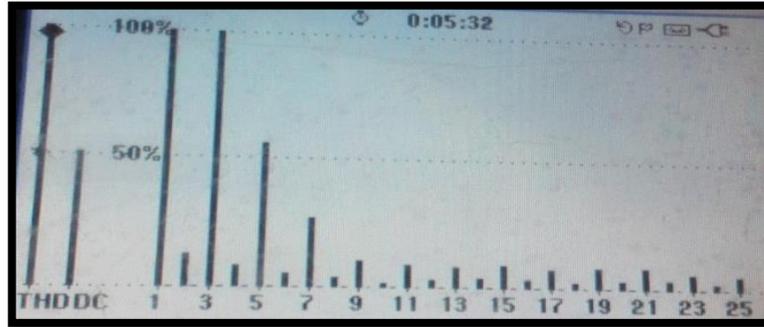


Figura 13.2. – Influencia de los armónicos de acuerdo a su orden
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Aplicando el criterio para la construcción de sistema de adquisición de datos (8 a 10 veces el ancho de banda del sistema), se fija una frecuencia de diez veces el ancho de banda del sistema, que garantiza alrededor de ocho a diez datos en los tiempos de subida y bajada, permitiendo una reconstrucción adecuada del sistema lo más cercana a la realidad.

2.3.2.2. Tamaño de la muestra:

En cuanto al tamaño de la muestra del DAQ, se toma en cuenta que mientras mayor sea la cantidad de datos obtenidos del sistema, más cercano a la realidad será el modelo estimado; el adquirir cerca de 5000 datos por segundo no implica que todos estos serán usados al momento de estimar el modelo, debido a que el fenómeno en estudio se trata de perturbaciones en las ondas de corriente del sistema que son apreciadas a altas frecuencias y que si se tomaran todos los datos se hablaría de 60 ciclos de corriente en un segundo que serían excesivos al momento de estimar el modelo. El tamaño adecuado de la muestra deberá evitar ser muy pequeño careciendo de información suficiente sobre el comportamiento del mismo, o muy grande donde estos cambios queden desapercibidos.

En algunas situaciones se puede considerar que los datos recogidos en diferentes instantes de tiempo contengan un distinto grado de incertidumbre debido a la influencia del ruido en el sistema o que ciertas medidas son menos representativas, considerando esto podemos notar la norma variable en un tiempo t como: (Ljung, 1999, p. 96)

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \iota(\varepsilon(t, \theta), \theta, t) \quad Ecu24.2$$

Así las mediciones menos fiables se asociaran al sistema con un menor peso de impacto; un criterio utilizado en estos casos donde el comportamiento propio del sistema varia en los distintos instantes de tiempo es el cálculo de la desviación estándar (σ) entre los datos de entrada y salida la cual esta denotada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \text{Ecu. 25.2}$$

Donde:

N = número de datos

\hat{y}_i = Dato de salida i

y_i = Dato de entrada i

Aplicando la ecuación 25.2 a los datos obtenidos en la etapa de adquisición se puede obtener la desviación estándar en distintos rangos de la muestra total y apreciar en que parte de la misma se encuentra la mayor variabilidad del sistema. Tomando en cuenta esto se podrá tomar una decisión de cuál es el tamaño de la muestra apropiado para el sistema en estudio y así abarcar todo el comportamiento posible

2.3.2.3. Selección del sensor:

El control de un proceso implica el uso de diferentes tipos de sensores, según la variable a controlar y así obtener información del proceso en tiempo real; en el caso de análisis conocida la frecuencia de trabajo, se debe determinar el tipo de sensor adecuado que permita medir los parámetros de corriente del sistema. Una buena opción es trabajar con un CT, que mide corriente alterna, el modelo es **YHDC SCT-013-000 CT** de núcleo dividido no invasivo, que facilita la conexión de los cables de tensión o neutro debido a que no existe la necesidad de desconectar el sistema a medir ya que su conexión se asemeja a la de una pinza amperimétrica y simplemente hay que engancharlo a los cables. (Aguirre & Larco, 2010, p. 14)



Figura 14.2. – Sensor de corriente YHDC SCT-013-000 CT
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Este sensor presenta dentro de sus parámetros de diseño una salida de 0-50mA, la misma que se puede adquirir con la ayuda de una tarjeta NI MyDaq, que permite obtener datos de corriente hasta un pico de 200mA; una de las ventajas de este sensor es que posee diodos zener que limitan la tensión de salida en el caso que exista una desconexión accidental de la carga.

Este sensor proporciona una salida de corriente con relación a tierra (positiva-negativa) y gracias a que la tarjeta de adquisición si lee datos de corriente positivos y negativos no es necesario realizar un divisor de corriente, pero si se debe determinar que la tensión máxima no exceda los valores permitidos por la NI MyDaq para lo que se determina una resistencia externa de carga adecuada para poder obtener los valores de corriente. (Jacome Riera & Leon Amores, 2014)

Para el cálculo de la corriente máxima en el secundario del transformador se aplica la ecuación 26.2:

$$I_{max} = I_{rms} * \sqrt{2} \quad \text{Ecu. 26.2}$$

$$I_{max} = 0,05A * \sqrt{2}$$

$$I_{max} = 0,0707 A$$

Y para el cálculo de la resistencia de carga se aplica la Ley de Ohm tomando un voltaje de referencia de 2.5V:

$$R_{Carga} = \frac{V_{ref}}{I_{maxs}} \quad \text{Ecu. 27.2}$$

$$R_{Carga} = \frac{2,5 V}{0,0707 A}$$

$$R_{Carga} \cong 35 \Omega$$

En base a los cálculos realizados la resistencia adecuada es de 35 Ω , la misma que no es un valor comercial por lo que se utiliza una resistencia más cercana de 33 $\Omega \pm 1\%$ de tolerancia, lo que permite tener una adquisición adecuada del sistema

2.3.2.4. Construcción del DAQ:

Luego de haber seleccionado el sensor del DAQ, se procede a la construcción de la interfaz de adquisición la cual puede ser desarrollada en Labview, ya que nos otorga una mayor cantidad de herramientas para interactuar y configurar los parámetros necesarios para el sistema, la NI MyDaq es una tarjeta muy utilizada en los procesos de adquisición debido a su versatilidad y a que su

resolución en bits es muy alta (16 bits) mucho mayor a la proporcionada por un arduino (10 bits), lo que nos permite tener un error mínimo de adquisición de los datos del sistema menor al 1%.

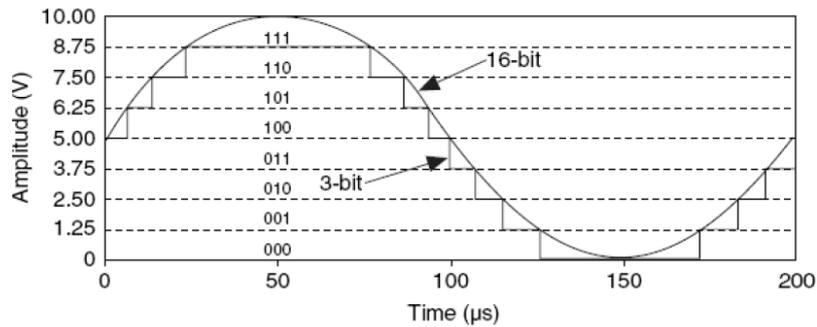


Figura 15.2. – Resolución de un sistema DAQ a 3 y 16 bits
Fuente: Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal-National Instruments

Se debe tener en cuenta los bloques necesarios para la lectura y almacenamiento de datos para la construcción de un VI en Labview, considerando los parámetros previamente establecidos que permitan la reconstrucción del sistema real.

En la figura 16.2 se muestra un diagrama de bloques de un VI construido en Labview donde se aprecia los diferentes parámetros a configurar, los mismos que están relacionados con los elementos del panel frontal.

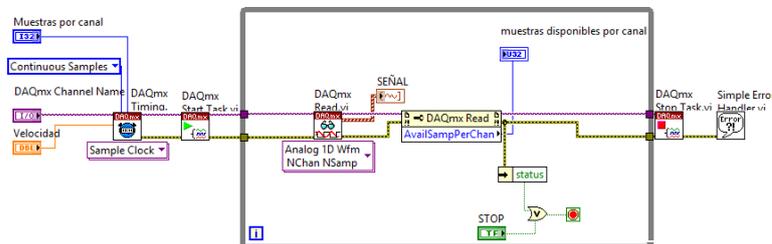


Figura 16.2. – Diagrama de bloques Labview sistema DAQ
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

2.3.3. Estructuras de identificación experimental:

Una parte muy importante en la identificación experimental una vez obtenidos los datos de entrada y salida del sistema es la elección correcta de la técnica a aplicar en el proceso de identificación, para lo cual se han desarrollado muchas técnicas aplicadas a los procesos ingenieriles que en los métodos de identificación por Black Box la mejor estimación se la realiza aplicando técnicas de identificación paramétrica, la cual ha desarrollado los siguientes enfoques:

- **Métodos de modelo referencia:** En este método se simula el proceso a identificar y posteriormente se compara la repuesta calculada con la real, se adecua los parámetros del modelo de manera que se minimice la diferencia entre ambas.

- **Métodos de aproximación estocástica:** Este método es adecuado para sistemas con presencia de ruido, donde se resuelve una ecuación expresada por la anulación del valor medio, donde la elección apropiada de estas medidas es importante para asegurar la rápida convergencia del algoritmo.
- **Métodos de minimización de error de predicción:** Este método es derivado de la teoría de mínimos cuadrados, sus propiedades de convergencia de forma recursiva son las mismas que las que corresponden a sus réplicas no recursivas debido a que las primeras se derivan de las segundas (Ljung, 1991); además son de fácil implementación computacional. Estos métodos se pueden estimar con la ayuda de Matlab y su System Identification Toolbox (IDENT), que nos permite la estimación de sistemas con la aplicación de algoritmos basados en ecuaciones diferenciales.

En muchas ocasiones no se tiene un conocimiento previo del funcionamiento del sistema, por lo que se suele recurrir a los modelos estándar proporcionados por los diferentes métodos de estimación, los cuales describen el comportamiento del sistema pero lo complicado de todo esto es la elección del tipo de modelo a aplicar (incluyendo su estructura, orden, número de parámetros, etc.). (Belaustegui C., Orda C., Galarza C., 2005, p. 21)

Para la identificación experimental se puede hacer uso de las funciones proporcionada por el Toolbox de identificación paramétrica de Matlab que responde al siguiente formato de llamada:

$$\mathbf{th} = \text{función}([\mathbf{y} \ \mathbf{u}], \mathbf{ths}) \quad \text{Ecu. 28.2}$$

Donde:

$[\mathbf{y} \ \mathbf{u}]$ = vectores columna de las muestras de entrada y salida del sistema.

\mathbf{ths} = vector que contiene la información de la estructura escogida

\mathbf{th} = modelo estimado en formato codificado θ .

Dependiendo del sistema y modelo escogido (ARX, ARMAX, OE, BJ) y tomando en cuenta que la técnica de estimación paramétrica en Matlab se basa en la estimación de mínimos cuadrados mediante ODE (Ecuación Diferencial Ordinaria por sus siglas en inglés), métodos de estimación de Runge Kutta y Euler; en el vector \mathbf{ths} se debe expresar el número de coeficientes de los polinomios de acuerdo a la estructura escogida el que se denota como:

$$\mathbf{ths} = [n_a \ n_b \ n_c \ n_d \ n_f \ n_k] \quad \text{Ecu. 29.2}$$

Donde:

na, nb, nc, nd, nf= orden de los coeficientes de los polinomios acorde a la estructura

nk= orden del retardo entre la entrada y salida del sistema.

Si se llega a descartar alguno de los polinomios anteriores debido a la estructura del sistema, se puede suprimir los componentes del mismo dependiendo del caso, además se debe tomar en cuenta que todas las funciones solo retornar el orden de cada uno de los parámetros en formato codificado, para mostrar estos parámetro se puede utilizar el comando **present(th)**; este comando nos permite visualizar un vector con los coeficientes del polinomio acorde al modelo escogido iniciando desde la izquierda por el termino independiente y avanzando a la derecha con las potencias crecientes del operador de retardo q^{-1} .

La versatilidad de Matlab nos ofrece dos opciones en cuanto a identificación paramétrica de sistemas, una de ellas es por medio de la ventana de comandos que a partir de la ecuación 24.2 y dependiendo del modelo a aplicar se puede estimar los diferentes parámetros del sistema los cuales se describen a continuación:

Tabla 3-2: Funciones identificación paramétrica Matlab (ventana de comandos)

ar	Estimación de un modelo AR*.
armax	Estimación de un modelo ARMAX*.
arx	Estimación de un modelo ARX*.
bj	Estimación de un modelo Box-Jenkins*.
oe	Estimación de un modelo Output Error*.
pem	Estimación de un modelo lineal genérico*.
ivar	Estimación de un modelo AR usando variables instrumentales.
ivx	Estimación de un modelo ARX usando variables instrumentales.
iv4	Estimación de un modelo ARX usando variables instrumentales de 4 etapas.
present	Presentación de modelos paramétricos en formato θ .

Fuente: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>

*Usando el método de mínimos cuadrados recursivos

Otra opción que ofrece Matlab es mediante el Sistem Identification Toolbox (IDENT), que aparte de estimar el modelo deseado nos ofrece algunas gráficas para aplicar otros tipos de análisis como:

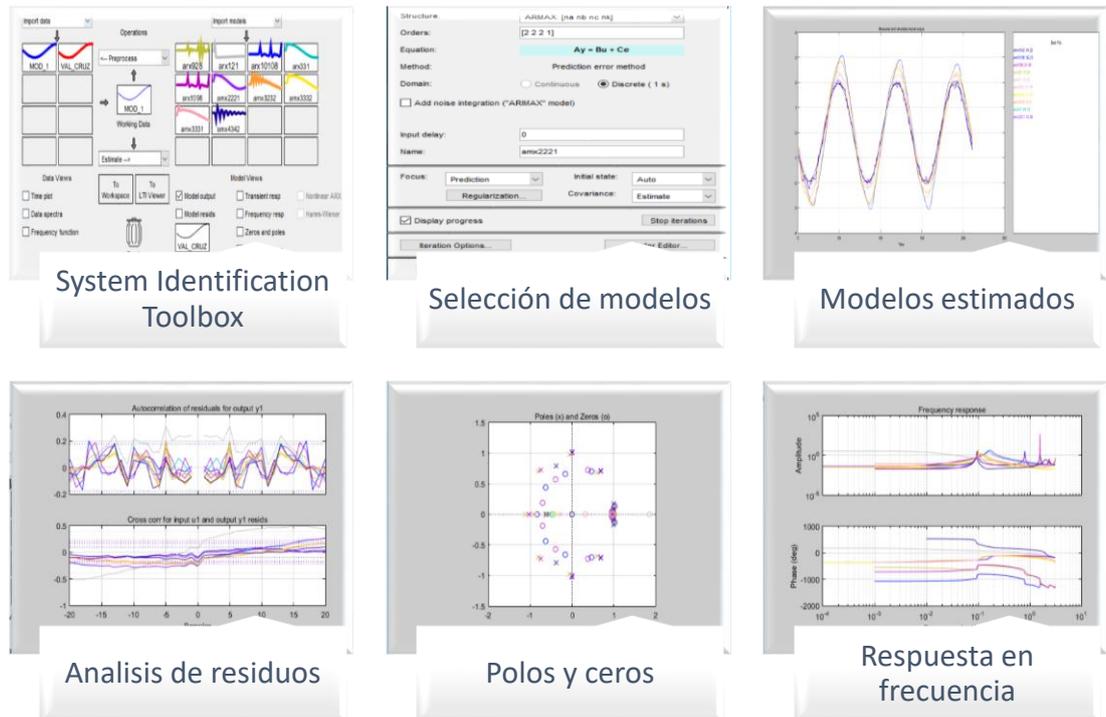


Figura 17.2.- Herramientas de análisis IDENT Matlab

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Al ser una herramienta de análisis con salida grafica ayuda mucho reduciendo el tiempo de análisis y a que las conclusiones derivadas del mismo se ajusten de acuerdo a las necesidades propias del sistema, además que tiene la opción de exportar todos estos análisis a la ventana de comandos.

2.3.4. Validación del sistema:

Una vez escogida la estructura, se obtendrán los parámetros del modelo en función de su tipo y grado, pero ahora se plantea la cuestión que si el modelo estimado es el mejor disponible para los propósitos del sistema lo que usualmente implica:

- Decidir si el modelo estimado es lo suficientemente bueno para la aplicación para la cual fue estimado (capacidad de predicción)
- Determinar la distancia entre las medidas estimadas y las arrojadas por el sistema real (incertidumbre del modelo)
- Determinar la consistencia de los datos sobre la estructura del modelo

En la validación del sistema se puede identificar que el error se compone de dos componentes:

$$\mathbf{ERROR: DESVIO + VARIANZA}$$

$$\text{Ecu. 30.2}$$

- **DESVÍO (BIAS):** Son errores sistemáticos causados por las características propias de entrada del sistema, la elección de la complejidad del modelo escogido (complejidad de representación) y el modo de operación en lazo abierto o cerrado.
- **VARIANZA (VARIANCE):** Son errores aleatorios introducidos al sistema por la presencia de ruido en los datos lo que impide una reproducción exacta de la salida del sistema, además está afectado por los siguientes factores: número de parámetros, duración de la adquisición del sistema y la relación señal-ruido.

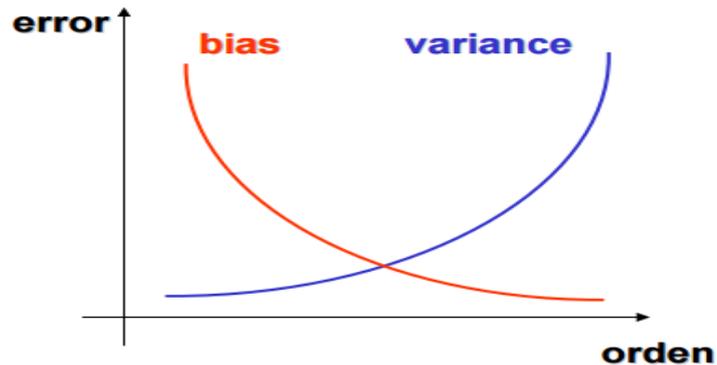


Figura 18.2.- Error de desvío (BIAS) y varianza (variance)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

La estimación por software permite apreciar el comportamiento del sistema de una manera más rápida sin el desperdicio de recursos (hardware y software); la validación de estos modelos estimados dependerá mucho de la estructura y técnica aplicada.

En el caso de identificación paramétrica se pueden aplicar los siguientes procesos:

2.3.4.1. Validación cruzada:

El método de validación cruzada es muy utilizada para calcular el porcentaje de aciertos esperados, este método se aplica con la división de la muestra de los datos adquiridos en un porcentaje aproximado de 70% y 30%, donde el 70% del total se aplica para la estimación del modelo y el 30% restante es usado para la validación del mismo, es decir los datos empleados corresponden al mismo conjunto de datos adquiridos.

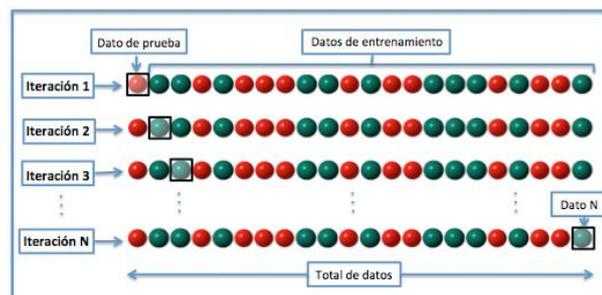


Figura 19.2. – Validación cruzada de n iteraciones

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Validaci%C3%B3n_cruzada

2.3.4.2. Validación de segunda mano:

La validación de segunda mano es muy útil para comprobar el comportamiento del modelo estimado usando un conjunto de datos diferente al empleado en el proceso de identificación del modelo del sistema, se debe tener en cuenta que el set nuevo de datos usados debe ser adquirido condiciones similares a las iniciales para que pueda ser comparado.

2.3.4.3. Validación mediante Matlab:

La elección de la estructura del modelo es una decisión crucial en la identificación experimental de sistemas ya que es tomada por el diseñador y como en la mayoría de casos no se tiene conocimiento previo del sistema Matlab nos ofrece distintas funciones del Toolbox de identificación que permiten el cálculo de pérdidas de las funciones y así escoger el resultado más óptimo, estas funciones se muestran a continuación:

Tabla 4-2: Funciones selección estructura óptima Matlab (ventana de comandos)

<i>arxstruc</i>	Cálculo de las funciones de pérdidas de un conjunto de estructuras ARX.
<i>ivstruc</i>	Cálculo de las funciones de pérdidas de un conjunto de estructuras OE.
<i>selstruc</i>	Selección de la estructura con menor función de pérdidas.
<i>struc</i>	Generación de un conjunto de estructuras.

Fuente: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>

El Toolbox de Identificación de Sistemas (IDENT) nos permite cargar un set de datos diferentes a los insertados para la estimación del modelo, con los cuales se puede realizar una comparación y se obtiene un porcentaje de validez del mismo en función de los datos reservados para la validación; así se podrá estimar un modelo y directamente comprobar su comportamiento frente a datos perteneciente a la misma muestra (validación cruzada) o con datos tomados en otra muestra (validación de segunda mano).

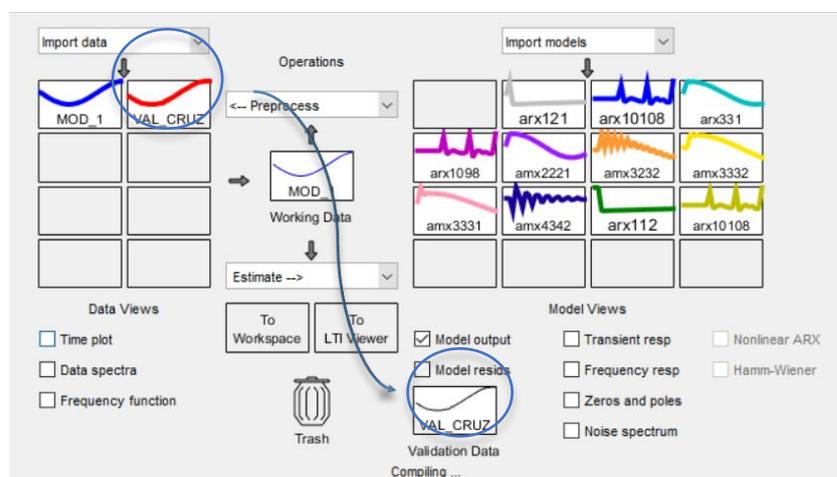


Figura 20.2. – Cargar datos de validación en IDENT Matlab

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

2.3.4.4. Criterio de integral de error absoluto (IAE):

La integral del valor absoluto del error IAE se denota por la ecuación:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad \text{Ecu. 30.2}$$

Este criterio se caracteriza por ser de fácil aplicación, es más sensible a pequeños errores, pero menos sensible a grandes errores; requiere de un costo computacional es muy alto o de una simulación del proceso con mucha precisión y durante un tiempo largo, debida a que la integral está definida hasta un tiempo infinito.

La etapa crucial de un modelo es la de comprobación debido a que se observa el comportamiento del mismo frente al deseado del sistema modelado en diferentes circunstancias, el criterio de IAE es muy utilizado en la sintonización de controladores para poder obtener la mejor respuesta y también es útil para obtener el comportamiento de un sistema y poder realizar una comprobación del mismo.

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS

3.1. Selección de la carga:

Para el caso de estudio se ha determinado que se usara un sistema construido en un trabajo previo por el Ing. Lenin Gavilanes, quien diseñó y construyó un sistema para la eliminación de distorsiones armónicas donde se hace una comparación de la señal de salida con la señal de referencia para obtener un error, la señal de error es cuantificada y modulada usando la modulación de ancho de pulso para activar o desactivar los dispositivos de potencia que conforman el convertidor los mismos que generan a la salida la corriente de compensación deseada (Gavilanez, 2015, p. 75); este filtro se diseñó basado en el funcionamiento de las cocinas de inducción las cuales tienen las siguientes características:

Potencia Nominal=4000 W

Tensión de Alimentación=220 VCA

Frecuencia=60 Hz.

Teniendo en cuenta esta información se estimó que para obtener un modelo lo más cercano al funcionamiento real es necesario usar una cocina de inducción marca INDURAMA de cuatro zonas de inducción (ignitores) cuyas características son:

Voltaje=220VCA

Frecuencia=50/60Hz

Potencia Total=6300W

Consumo de Energía=900 KWh/año

Corriente Máxima=28,6 A



Figura 1.3. Cocina de inducción marca INDURAMA

Fuente: <http://www.indurama.com/inducion-> Lenin Gavilanes

3.2. Adquisición de datos del sistema:

Una vez determinadas las condiciones en las cuales se va a poner en marcha el sistema, se procede a la recolección de los datos del mismo, partiendo de los parámetros especificados con respecto a la frecuencia de muestreo (f_m) y sensor escogido.

Considerando que el dispositivo utilizado para la adquisición de los datos tiene una resolución de 16 bits, y de acuerdo a la resistencia utilizada aplicando la ecuación 27.2 se puede determinar el error que se obtendrá en la etapa de adquisición de datos expresado en la tabla 3-1 el cual no supera el 1%.

Tabla 1-3: Cálculo de error en la DAQ

16	bits ADC resolution
65535	max analog value @ 107,14V
61169,12	analog value @ desired max current
4,667	Vin @ desired max current
1,155987	+/- mA (load) Resolution (Error)
0,277437	+/- Watts error
0,163481	% error

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con respecto al tamaño de la muestra se va a aplicar el criterio de desviación estándar determinado por la ecuación 25.2., que una vez aplicada a los datos adquiridos (4200 datos/s) se puede determinar un tamaño de muestra apropiado que asegure una reconstrucción apropiada del sistema. (Ljung, 1999, p. 93)

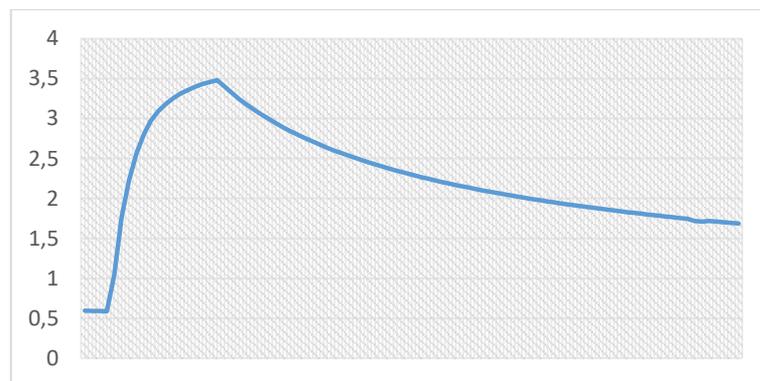


Figura 2.3. Desviación estándar DAQ

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la Figura 2.3., se puede apreciar la desviación estándar de los datos adquiridos a la entrada (datos de corriente con presencia de armónicos) y salida del sistema (señal de corriente compensada), la naturaleza de la señal y los armónicos producidos hacen que el valor de la

desviación aumente hasta un punto máximo (alrededor de 30 ciclos) y luego esta diferencia va disminuyendo con relación a los datos analizados. Es así que se determinó usar 30 ciclos de corriente (70 datos por ciclo) para la determinación del modelo matemático.

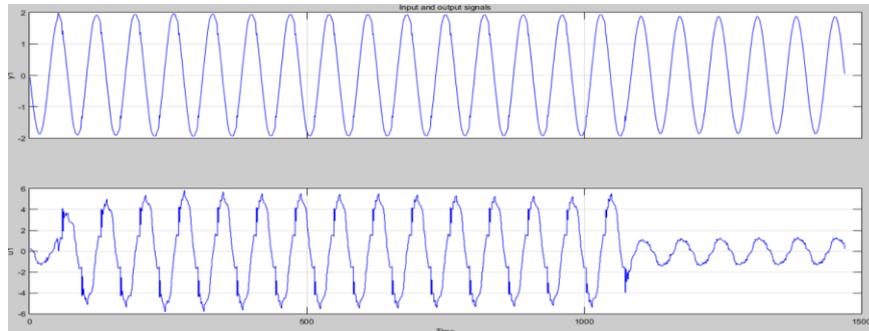


Figura 3.3. Datos de entrada y salida del sistema (determinación del modelo)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Algo que hay que tener presente al momento de la estimar de los modelos es el tipo de validación que se va a emplear, ya que si se decide aplicar una validación cruzada, el tamaño de muestra estimado se divide en dos partes, en este caso 70% para la determinación del modelo (1470 datos) y 30% para la validación (630 datos).

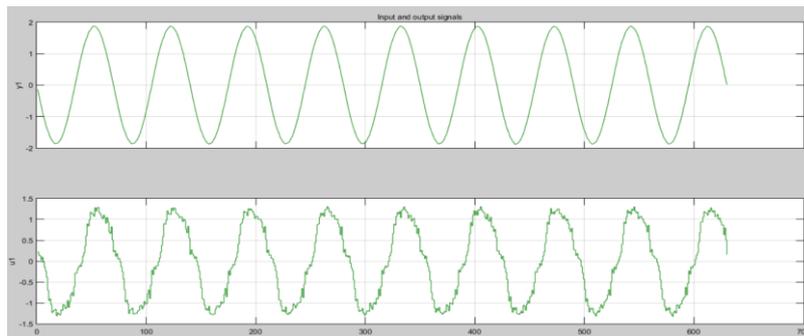


Figura 4.3. Datos de entrada y salida del sistema (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Si se emplear la validación de segunda mano, no es necesario particionar los datos porque los datos de validación serán extraídos de otra muestra del sistema en las mismas condiciones.

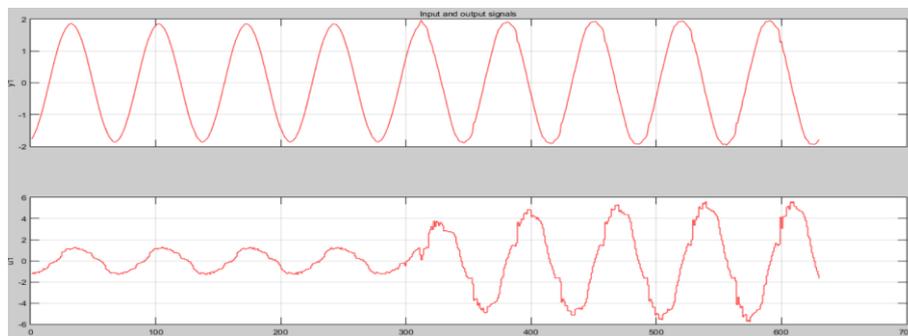


Figura 5.3. Datos de entrada y salida del sistema (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

3.3. Selección de la estructura:

En base a lo expuesto en la sección 2.2.3., con relación a los modelos de identificación paramétricos donde se identifica diferentes tipos de modelos de los cuales se escogió 4: ARX, ARMAX, BJ y OE para determinar el mejor de cada modelo y al final escoger al que mejor se acopla al sistema. (Granja Arboleda, 2016, p. 30)

Como criterio de selección para el mejor candidato de cada modelo se tomaran en cuenta las gráficas de autocorrelación (simetría respecto al origen) y correlación cruzada; además de las características propias de cada estimación en función de su orden como:

BEST FIT= Mejor ajuste de mínimos cuadrados

LOSS FUNCTION (Estimación de la varianza ruido $e(t)$)= Distancia con respecto al modelo real

FPE (Final Prediction Error)=Que tanto se acerca al modelo real

3.3.1. Estimación usando el modelo ARX:

Determinados los parámetros del modelo ARX (Ecu. 18.2) y de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 6.2 se procede a utilizar el System Identification Toolbox (IDENT) para estimar los coeficientes na , nb , nk correspondientes a la estructura ARX.

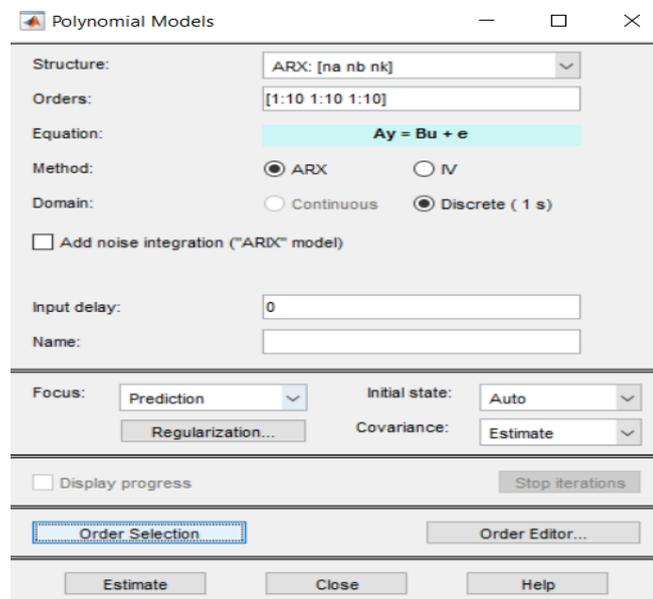


Figura 6.3. Parámetros estructura ARX (IDENT Matlab)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Para obtener el mejor modelo ARX, se genera la interfaz gráfica de selección de la mejor estructura, la cual consta de tres criterios de selección MDL (Best Fit Minimizes Rissanen), AIC (Best Fit Minimizes Akaike), BEST FIT (Mejor ajuste de mínimos cuadrados) para su análisis.

3.3.1.1. Aplicando validación cruzada:

Cargados los datos del sistema DAQ y los datos de validación cruzada se genera el cuadro de selección de estructura ARX como se muestra en la figura 7.3 para determinar los mejores candidatos en base a los criterios (MDL, AIC y BEST FIT).

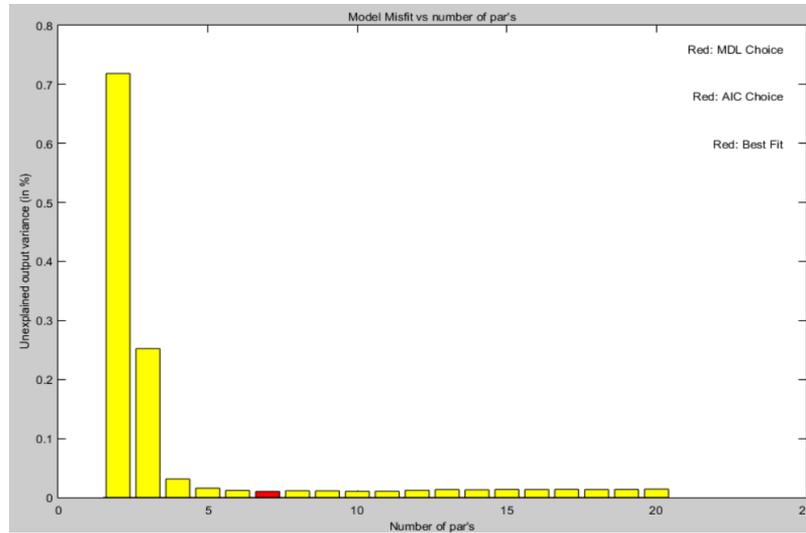


Figura 7.3. Estructura de selección modelo ARX (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De acuerdo a los criterios (MDL, AIC y BEST FIT), la mejor estimación está representada por la barra de color rojo, la mismo que se inserta junto con otro modelos de orden similar al IDENT y se observa su comportamiento con respecto a la salida deseada del sistema.

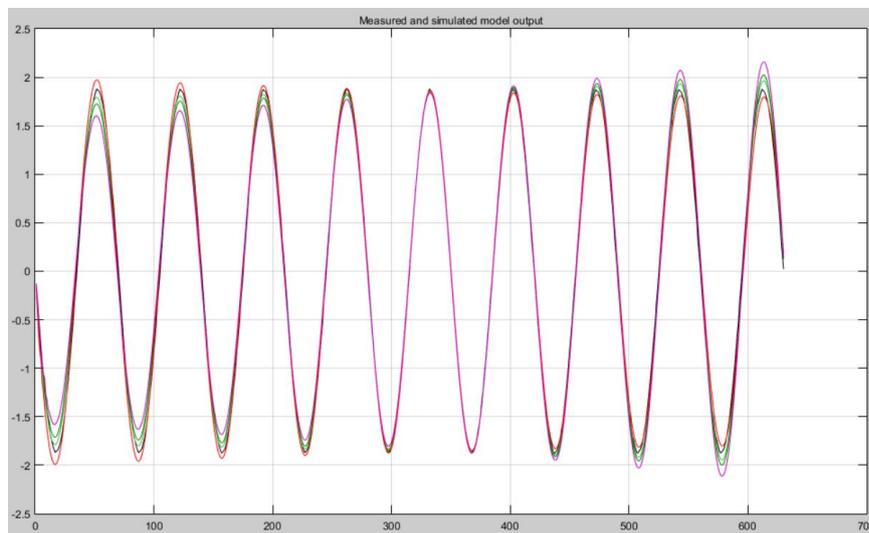


Figura 8.3. Salida de los modelos ARX seleccionados (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Como se observa en la figura anterior se estima modelos cercanos a los coeficientes expresado por el mejor modelo estimado y se elaboró la tabla 2-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

Tabla 2-3: Criterios de selección modelo ARX (validación cruzada)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[5 1 1]	93.75%	0.002375	0.002395	Menos parámetros y buen FIT
[6 1 2]	94.51%	0.002128	0.002148	Mejor FIT, FPE Y LF menor al ARX [5 1 1]
[7 1 3]	93.18%	0.001981	0.002003	FPE Y LF menor al ARX [5 1 1]
[8 1 3]	88.87%	0.001974	0.001998	Menor LF y FPE de todos los anteriores

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Además nos apoyamos en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

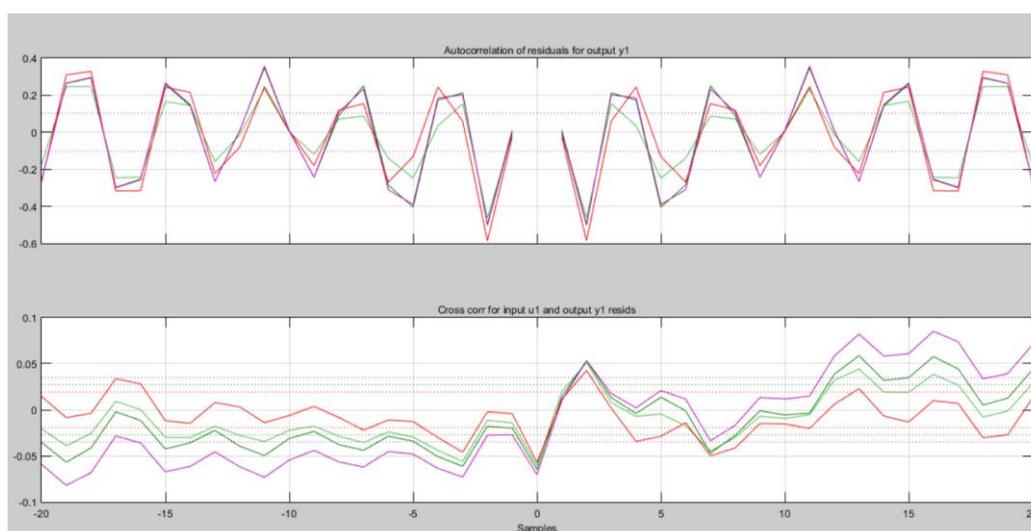


Figura 9.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARX (validación cruzada)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 2-3 y las gráficas de la figura 9.3, se opta por el modelo ARX [6 1 2], debido a que presenta el mejor FIT y sus gráficas de autocorrelación y correlación cruzada son aceptables, los coeficientes de este modelo están expresados a continuación:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad \text{Ecu. 1.3}$$

Donde:

$$A(q^{-1}) = 1 - 0.5776(q^{-1}) - 0.7027(q^{-2}) - 0.1159(q^{-3}) + 0.06412(q^{-4}) + 0.04277(q^{-5}) + 0.3264(q^{-6})$$

$$B(q^{-1}) = 0.0009283(q^{-2})$$

3.3.1.2. Aplicando validación de segunda mano:

Una vez determinado el mejor modelo por medio de validación cruzada, se realiza un proceso similar donde se cambia los datos de validación y se genera el cuadro de selección de estructura ARX como se muestra en la figura 10.3 para determinar a los mejores candidatos en base a los criterios (MDL, AIC y BEST FIT).

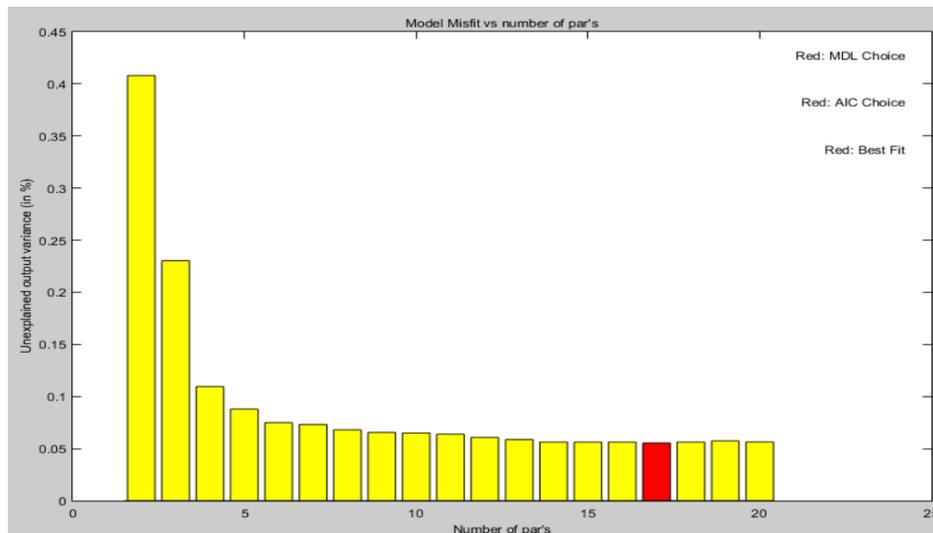


Figura 10.3. Estructura de selección modelo ARX (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la misma manera la mejor estimación está representada por la barra de color rojo, que posee los mejores valores con respecto a los criterios de estimación.

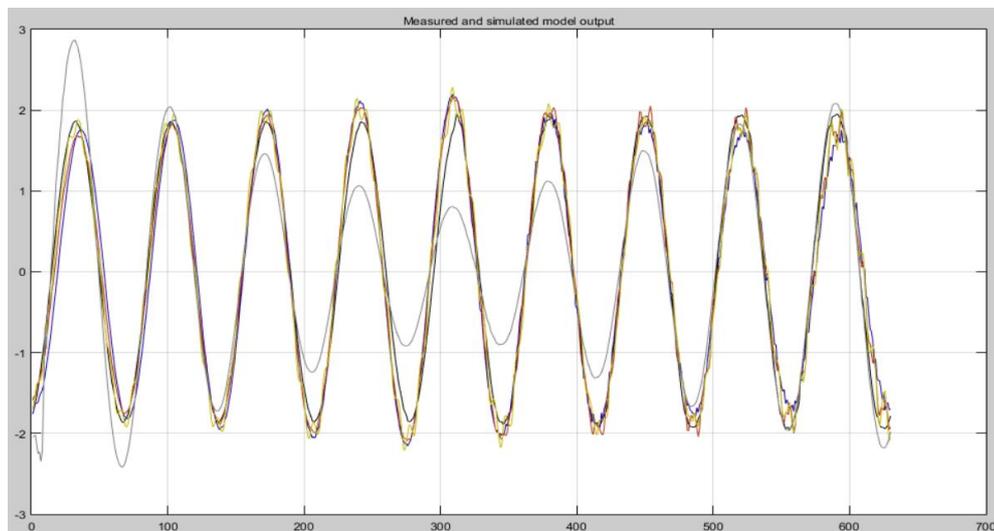


Figura 11.3. Salida de los modelos ARX seleccionados (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Se procede a elaborar la tabla 3-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) con los coeficientes de los modelos cercanos al mejor (barra roja)

Tabla 3-3: Criterios de selección modelo ARX (validación de segunda mano)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[8 10 6]	78.86%	0.001631	0.001671	Menos parámetros y FIT aceptable
[10 9 8]	85.03%	0.001448	0.001484	Mejor FIT, FPE Y LF menor al ARX [8 10 6]
[10 10 8]	84.41%	0.001396	0.001432	Menor FPE Y LF, FIT muy bueno
[10 10 10]	65.57%	0.001708	0.001753	Mayor número de parámetros

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la misma manera nos apoyamos en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

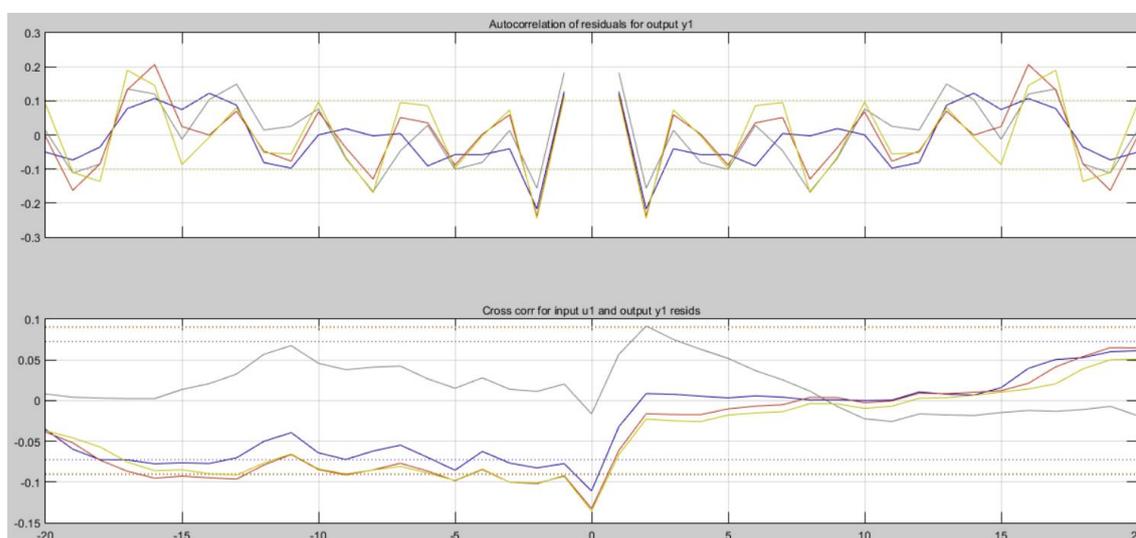


Figura 12.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARX (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 3-3 y las gráficas de la figura 12.3, se opta por el modelo ARX [8 10 6], que a pesar de no tener el mejor FIT, tiene el menor número de parámetros y su gráfica de autocorrelación y relación cruzada es la más aceptable; la ecuación 2.3 muestra los coeficientes del modelo estimado

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad \text{Ecu. 2.3}$$

Donde:

$$A(q^{-1}) = 1 - 0.349(q^{-1}) - 0.6352(q^{-2}) - 0.08527(q^{-3}) + 0.06786(q^{-4}) - 0.1807(q^{-5}) - 0.7126(q^{-6}) + 0.7032(q^{-7}) + 0.2669(q^{-8})$$

$$B(q^{-1}) = 0.08275(q^{-6}) - 0.05526(q^{-7}) - 0.02403(q^{-8}) - 0.01491(q^{-9}) - 0.008762(q^{-10}) + 0.01834(q^{-11}) + 0.0004348(q^{-12}) - 0.01624(q^{-13}) - 0.001509(q^{-14}) + 0.02273(q^{-15})$$

3.3.1.3. Selección del mejor candidato modelo ARX:

Luego de haber escogido al mejor candidato de cada validación, resta aplicar la validación contraria a la empleada en la estimación de los modelos y así escoger la mejor opción de estimación del modelo ARX

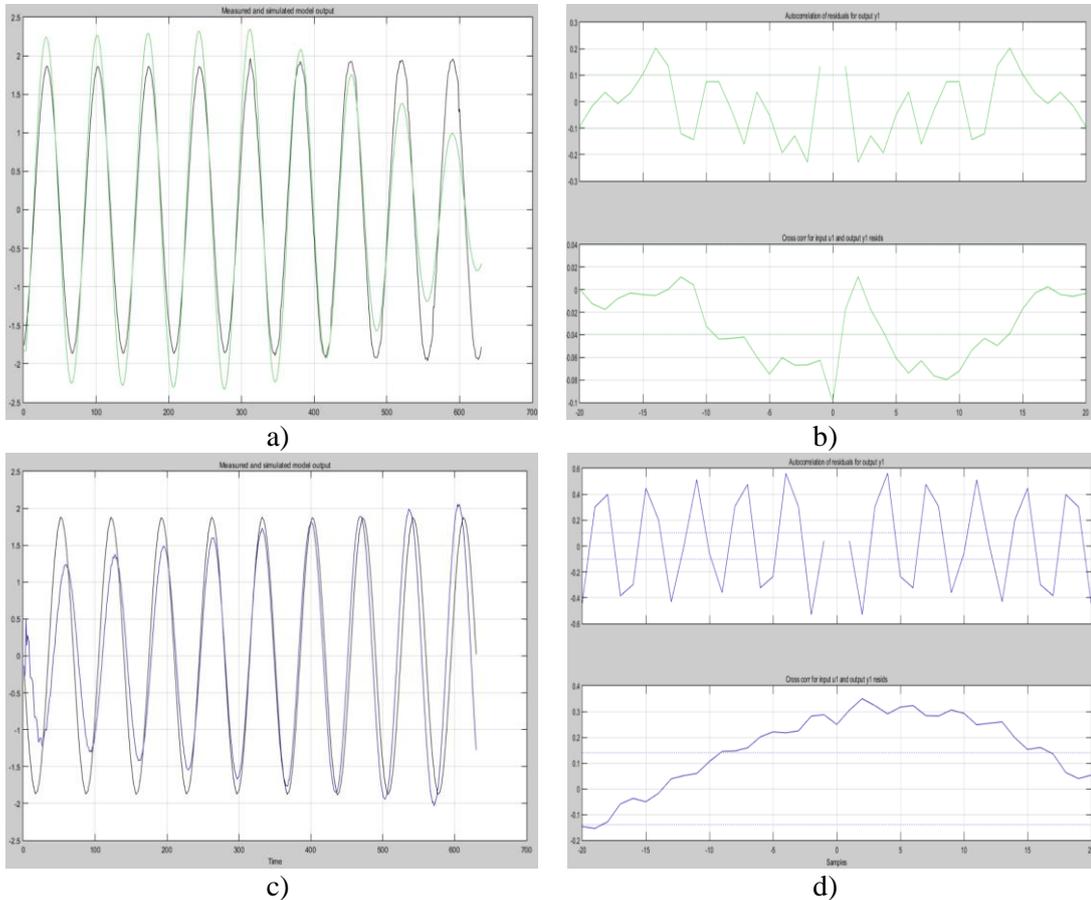


Figura 13.3. Comparación entre los modelos ARX [6 1 2] (a, b) y ARX [8 10 6] (c, d)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En las figuras 13.3.a y 13.3.b se puede observar el comportamiento del modelo ARX [6 1 2] cuando es sometido a una validación de segunda mano donde su FIT baja a **70.6%**; con respecto a las figuras 13.3.c y 13.3.d se aprecia el comportamiento del modelo ARX [8 10 6] sometido a una validación cruzada donde su FIT disminuye a **57.1%**.

Tabla 4-3: Criterios de selección modelo ARX (validación inversa)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[8 10 6]	57.1%	0.001631	0.001671	Mayor número de parámetros
[6 1 2]	70.6%	0.001448	0.001484	Menos parámetros y mejor FIT.

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Una vez aplicado la validación inversa a cada modelo escogido se determina como la mejor opción del modelo ARX al denotado por la ecuación 1.3, ya que su FIT es el mejor e incluso tiene un número menor de parámetros con un total de 7 coeficientes libres con relación a los 18 coeficientes libres del otro modelo.

3.3.2. Estimación usando el modelo ARMAX:

Determinados los parámetros del modelo ARMAX (Ecu. 20.2) y de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 7.2 se procede a utilizar el System Identification Toolbox (IDENT) para estimar los coeficientes n_a , n_b , n_c , n_k correspondientes a la estructura ARMAX.

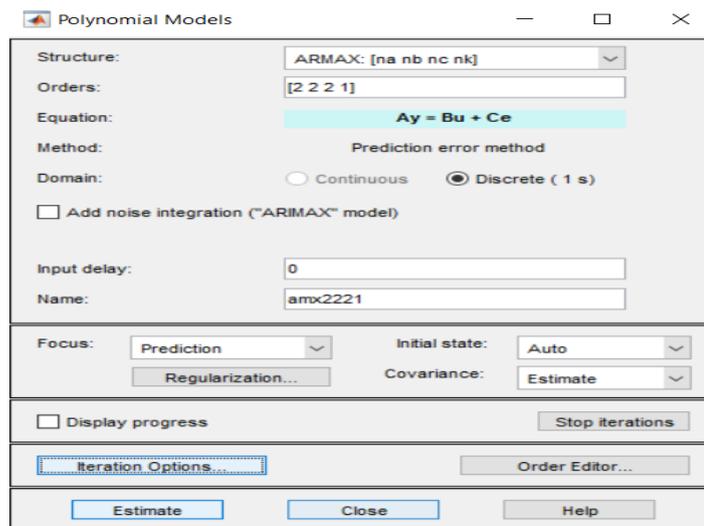


Figura 14.3. Parámetros estructura ARMAX (IDENT Matlab)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

3.3.2.1. Aplicando validación cruzada:

Para la estimación aplicando la estructura ARMAX a diferencia del proceso anterior donde se genera el cuadro de selección de estructura, se tiene que ir variando manualmente los coeficientes para determinar los mejores candidatos en base a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

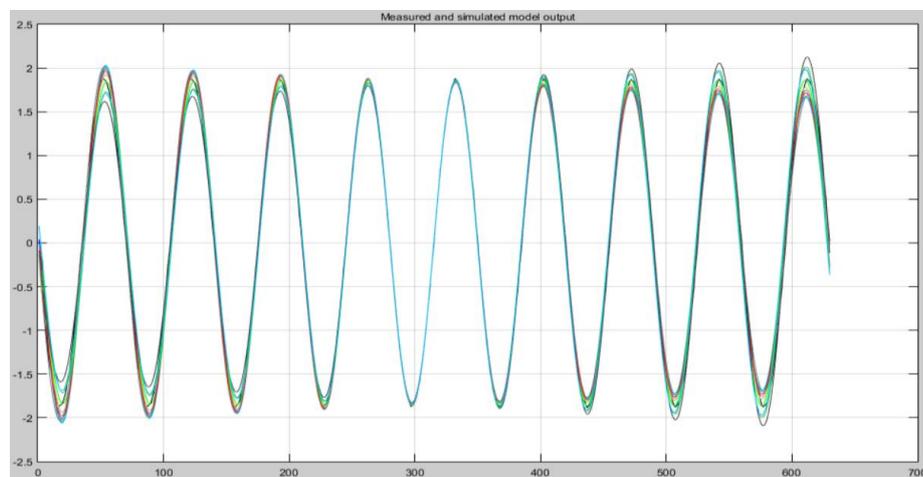


Figura 15.3. Salida de los modelos ARMAX seleccionados (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Como se observa en la figura anterior se estima los mejores modelos cercanos a la salida real y se elaboró la tabla 5-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para este modelo.

Tabla 5-3: Criterios de selección modelo ARMAX (validación cruzada)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[3 4 4 8]	89.48%	0.002236	0.00229	LF y FPE más altos
[4 4 3 7]	90.69%	0.001977	0.002026	Menor número de parámetros, FIT muy bueno
[4 4 4 7]	93.18%	0.002035	0.00209	FPE Y LF menor que ARMAX [4 5 3 7]
[4 4 4 8]	88.09%	0.001974	0.001998	FIT más bajo, LF y FPE menor que ARMAX [4 5 3 7]
[4 5 3 7]	94.2%	0.002047	0.002102	Mejor FIT, LF FPE aceptables
[4 5 3 8]	89.62%	0.002249	0.002309	FPE y LF más altos de todos los modelos
[4 5 5 7]	88.62%	0.002128	0.002194	Mejor FIT pero LF y FPE más altos que ARMAX [4 4 4 8]
[5 5 4 7]	89.73%	0.001458	0.001496	Mejor FIT, LF y FPE más bajos que ARMAX [4 5 5 7]
[5 5 5 7]	90.38%	0.001456	0.001495	LF y FPE menor que ARMAX [5 5 4 7]
[5 6 5 7]	91.15%	0.001453	0.001496	Menor LF y mayor FIT que ARMAX [5 5 5 7]
[5 6 6 7]	90.14%	0.001457	0.001413	Mayor número de parámetros, menor FPE,

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la misma manera nos apoyamos en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

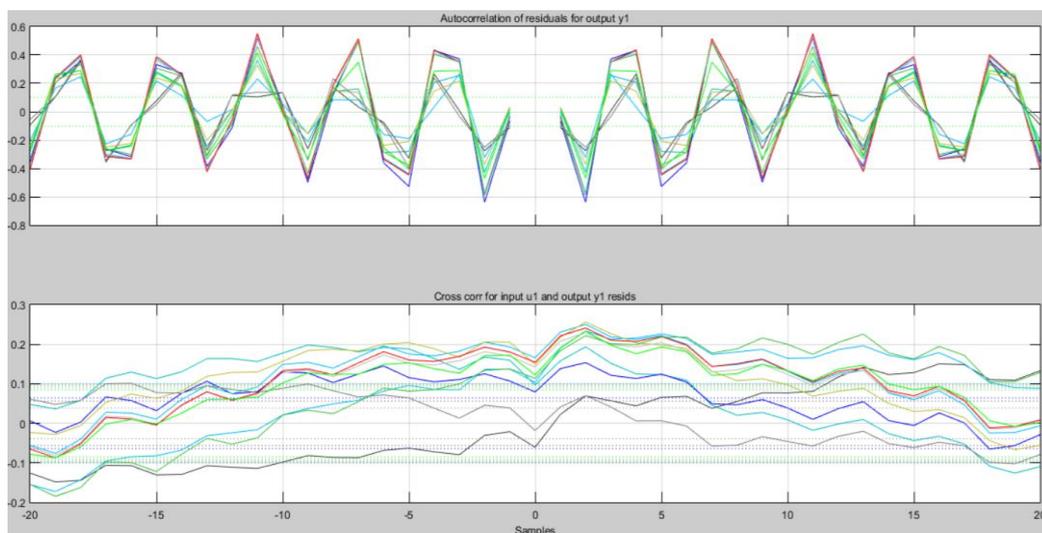


Figura 16.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARMAX (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 5-3 y las gráficas de la figura 16.3, se opta por el modelo ARMAX [4 4 3 7], a pesar de que su FIT no es el más alto pero sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada son las mejores, además que el número de parámetros no es muy alto, los coeficientes del modelo están expresados por la ecuación 3.3

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad \text{Ecu. 3.3}$$

Donde:

$$A(q^{-1}) = 1 - 0.5098(q^{-1}) - 1.421(q^{-2}) + 0.4224(q^{-3}) + 0.5332(q^{-4})$$

$$B(q^{-1}) = 0.01594(q^{-7}) - 0.02071(q^{-8}) - 0.004541(q^{-9}) + 0.00951(q^{-10})$$

$$C(q^{-1}) = 1 - 0.141(q^{-1}) - 0.912(q^{-2}) + 0.229(q^{-3})$$

3.3.2.2. Aplicando validación de segunda mano:

De la misma manera se realiza la misma estimación pero cambiando los datos de validación para estimar los mejores modelos variando manualmente los coeficientes y así determinar los mejores candidatos basado en los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

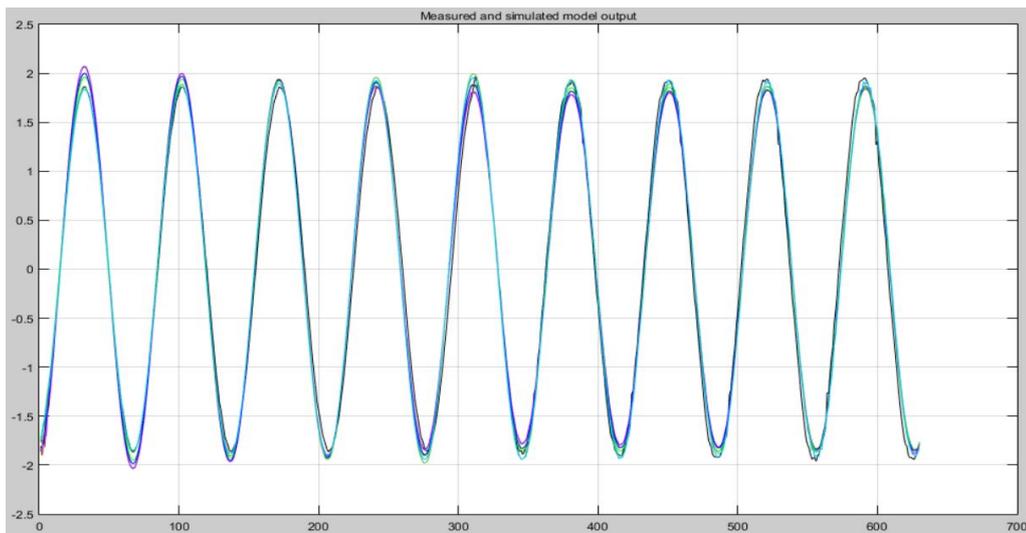


Figura 17.3. Salida de los modelos ARMAX seleccionados (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Como se observa en la figura anterior se estimó los mejores modelos con respecto a la salida real y se construyó la tabla 6-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para este modelo.

Tabla 6-3: Criterios de selección modelo ARMAX (validación de segunda mano)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[4 4 4 7]	89.9%	0.002035	0.00209	FPE Y LF menor al ARMAX [4 5 3 8]
[4 4 4 8]	88.07%	0.002047	0.002102	FPE Y LF menor al ARMAX [4 5 3 8] pero FIT más bajo

[4 5 3 8]	90.58%	0.002249	0.002309	Mejor FIT pero LF y FPE más altos que todos
[4 5 4 8]	88.84%	0.002099	0.00216	FIT similar al ARMAX [5 6 5 8] pero FPE y LF más altos
[4 5 5 8]	88.71%	0.002098	0.002163	FPE y LF mayor al ARMAX [4 5 4 8], menor FIT
[5 5 4 8]	88.79%	0.001473	0.001512	Similar LF y FPE con ARMAX [5 6 4 8]
[5 6 4 8]	88.75%	0.001473	0.001515	Similar LF y FPE con ARMAX [5 5 4 8]
[5 6 5 8]	88.84%	0.002047	0.001517	FIT similar al ARMAX [4 5 5 8], FPE y LF más bajos
[5 6 6 7]	88.87%	0.001413	0.001457	FPE y LF más bajo de todos los modelos

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la misma manera nos apoyamos en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

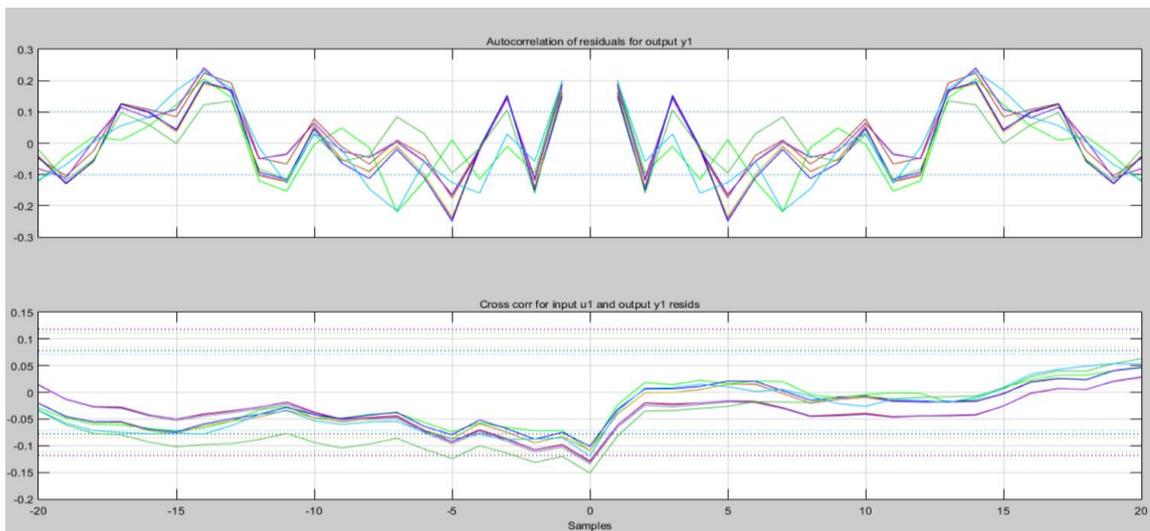


Figura 18.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo ARMAX (validación segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En base a los criterios de selección expuestos en la tabla 6-3 y las gráficas de la figura 18.3, se opta por el modelo ARMAX [4 5 3 8], que a pesar de que los criterios de FPE y LF son los más altos, su FIT y sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada son los mejores, además que el número de parámetros no es muy alto y esto denotado por la ecuación 4.3.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad \text{Ecu. 4.3}$$

Donde:

$$A(q^{-1}) = 1 - 2.063(q^{-1}) + 0.8391(q^{-2}) + 0.5313(q^{-3}) - 0.3026(q^{-4})$$

$$B(q^{-1}) = 0.01246(q^{-8}) - 0.01816(q^{-9}) - 0.001318(q^{-10}) + 0.03131(q^{-11}) - 0.0124(q^{-12})$$

$$C(q^{-1}) = 1 - 1.777(q^{-1}) + 0.8251(q^{-2}) - 0.01267(q^{-3})$$

3.3.2.3. Selección del mejor candidato modelo ARMAX:

Elegido al mejor candidato de cada validación, resta aplicar la validación contraria a la aplicada en la etapa de estimación de los modelos y así escoger la mejor opción del modelo ARMAX.

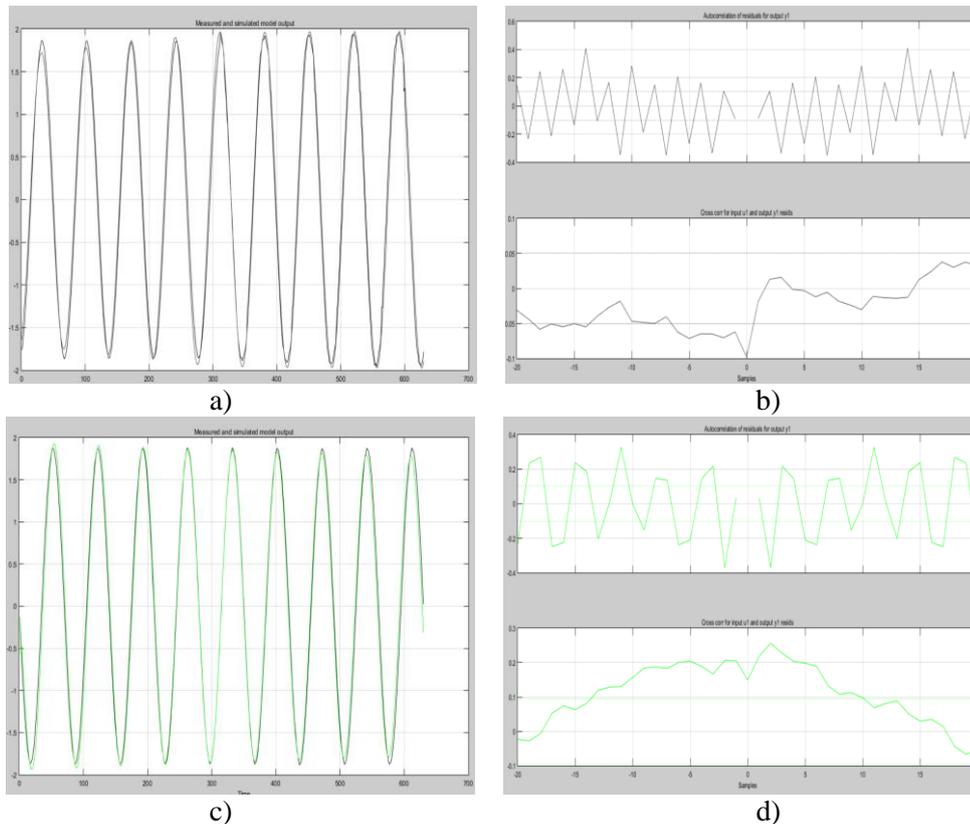


Figura 19.3. Comparación entre los modelos ARMAX [4 4 3 7] (a, b) y ARMAX [4 5 3 8] (c, d)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En las figuras 19.3.a y 19.3.b se puede observar el comportamiento del modelo ARMAX [4 4 3 7] cuando se le somete a una validación de segunda mano donde su FIT baja a **87.84%** y con respecto a las figuras 19.3.c y 19.3.d se observa el comportamiento del modelo ARMAX [4 5 3 8] sometido a una validación cruzada donde su FIT baja a **89.62%**.

Tabla 7-3: Criterios de selección modelo ARMAX (validación inversa)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[4 4 3 7]	87.84%	0.001977	0.002026	Menor número de parámetros, LF y FPE bajos
[4 5 3 8]	89.62%	0.002249	0.002309	Mayor número de parámetros pero mejor FIT.

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Aplicada la validación inversa en cada modelo escogido se determina como la mejor opción del modelo ARMAX al denotado por la ecuación 3.3; a pesar que su FIT es el menor, sus valores de LF y FPE son los más bajos; sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada son mejores e incluso tiene un número menor de parámetros con un total de 11 coeficientes libres con relación a los 12 coeficientes libres y un retardo más que el otro modelo.

3.3.3. Estimación usando el modelo OE:

Determinados los parámetros del modelo OE (Ecu. 14.2) y de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 5.2 se procede a utilizar el System Identification Toolbox (IDENT) para estimar los coeficientes nb, nf, nk correspondientes a la estructura OE.

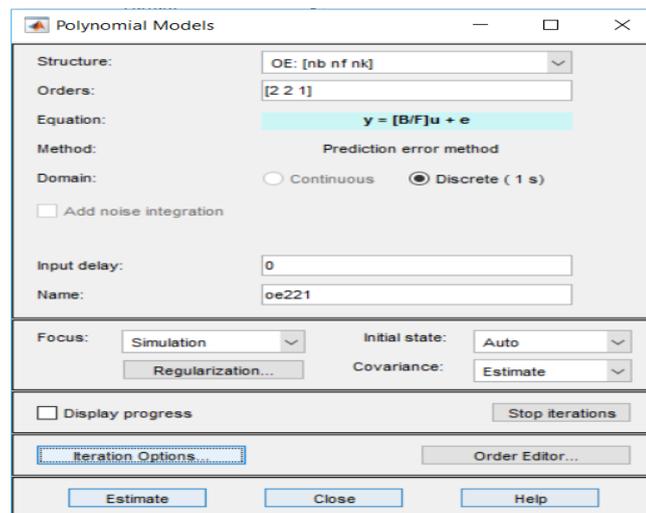


Figura 20.3. Parámetros estructura OE (IDENT Matlab)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

3.3.3.1. Aplicando validación cruzada:

En la estimación con la estructura OE se procede de la misma manera que con el modelo ARMAX variando manualmente los coeficientes para determinar a los mejores candidatos en base a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

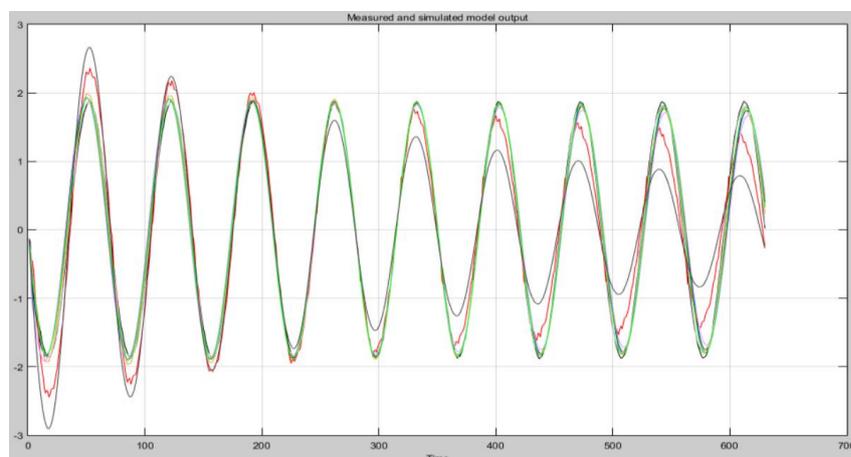


Figura 21.3. Salida de los modelos OE seleccionados (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la figura anterior se observa las mejores estimaciones cercanas a la salida real y se elabora la tabla 8-3 donde se expone los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para este modelo.

Tabla 8-3: Criterios de selección modelo OE (validación cruzada)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[3 2 1]	60.6%	0.2906	0.2938	Menor número de parámetros, FIT bajo, LS y PFE muy altos
[5 3 3]	82.68%	0.1728	0.176	LF y FPE menor que OE[5 3 4]
[5 3 4]	89.58%	0.1732	0.1764	FPE y LF más bajo que OE[6 4 4] pero más alto que OE[5 5 4]
[5 4 4]	97.07%	0.003735	0.003796	Mejor FIT, LF y FPE más bajos de todas las estimaciones
[5 5 4]	89.26%	0.1707	0.1746	FPE y LF más bajo que OE[6 4 4]
[6 3 4]	79.3%	0.2548	0.2603	FIT, LF y FPE más altos que OE [3 2 1]
[6 4 4]	91.86%	0.1838	0.1881	Mejor FIT pero LF y FPE más altos que OE [5 5 4]
[6 5 4]	86.73%	0.1715	0.1759	Mayor número de parámetros, FIT muy bueno

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la igual forma apoyamos nuestra decisión en los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

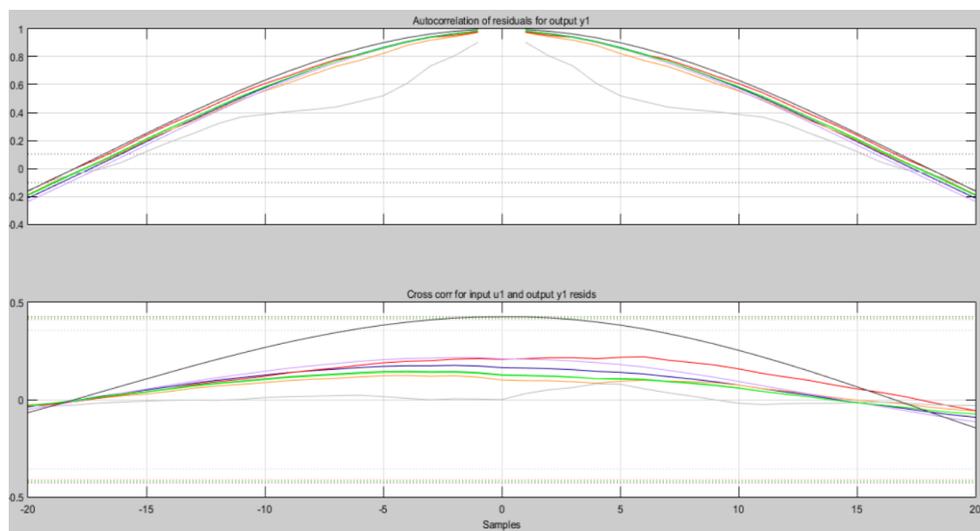


Figura 22.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo OE (validación cruzada)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 8-3 y las gráficas de la figura 22.3, se opta por el modelo OE [5 4 4], debido a que su FIT es el mejor estimado hasta el momento y sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada son muy buenas, además que su número de parámetros no es muy alto y esta expresado por la ecuación 5.3.

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + e(t) \quad \text{Ecu. 5.3}$$

Donde:

$$B(q^{-1}) = -0.07917(q^{-4}) + 0.1402(q^{-5}) + 0.03878(q^{-6}) - 0.1831(q^{-7}) + 0.08317(q^{-8})$$

$$F(q^{-1}) = 1 - 2.565(q^{-1}) + 1.915(q^{-2}) - 0.1212(q^{-3}) - 0.227(q^{-4})$$

3.3.3.2. Aplicando validación de segunda mano:

Se repite el mismo proceso variando manualmente los coeficientes para determinar los mejores candidatos en base a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) pero cambiando los datos de validación

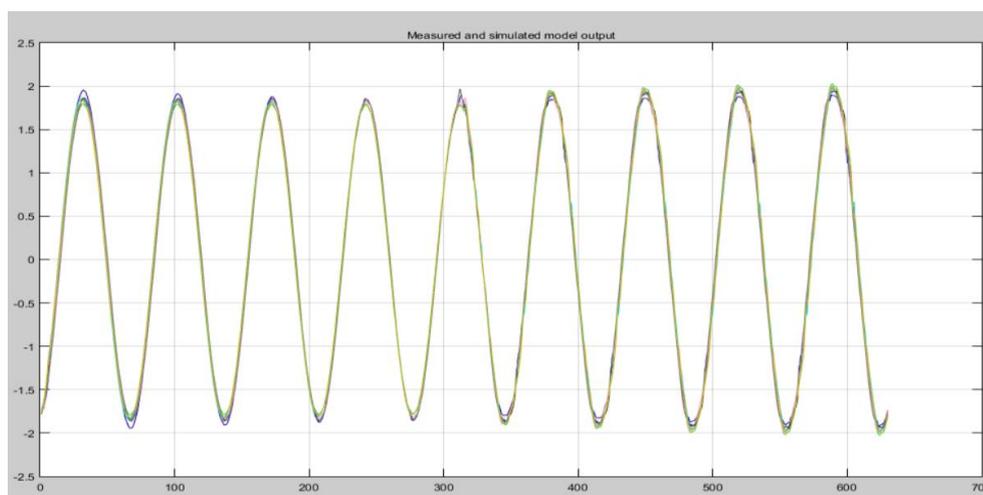


Figura 23.3. Salida de los modelos OE seleccionados (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la figura anterior se observa a las mejores estimaciones cercanas a la salida real y se elabora la tabla 8-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para este modelo.

Tabla 9-3: Criterios de selección modelo OE (validación de segunda mano)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[3 4 0]	97.7%	0.0001319	0.0001296	Menor número de parámetros, FIT muy bueno
[3 4 5]	93.45%	0.005657	0.005719	Buen FIT, LS y FPE más altos de todas las estimaciones
[4 4 0]	97.84%	0.0001005	0.0001019	Mejor FIT, FPE y LS más bajos de todas las estimaciones
[4 4 4]	94.92%	0.003735	0.003796	Mejor FIT, LF y FPE más bajos que OE[3 4 5]
[4 4 5]	92.61%	0.004233	0.004323	FPE y LF más bajo que OE[3 4 5]
[5 4 0]	97.95%	0.0001027	0.0001042	FIT, LF y FPE más bajos que OE [3 4 0]

[5 4 1]	96.11%	0.003513	0.0037	Mejor FIT, LF y FPE más bajos que OE [5 4 4]
[5 4 4]	96.1%	0.003735	0.003796	Mejor FIT, LS y FPE similares a OE [4 4 4]

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Apoyamos la decisión en base a los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

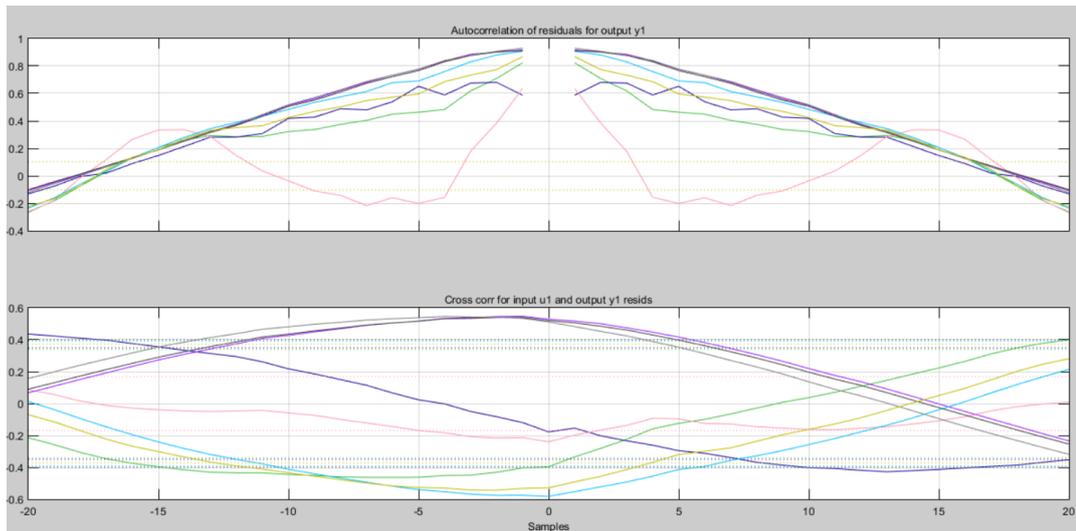


Figura 24.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo OE (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 9-3 y las gráficas de la figura 24.3, se opta por el modelo OE [4 4 0]; porque su FIT supera al estimado en la validación cruzada, sus gráficas de autocorrelación y correlación cruzada son muy buenas y el número de parámetros es el menor de los estimados denotado por la ecuación 6.3, donde se observa que el sistema no tiene retardo.

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + e(t) \quad \text{Ecu. 6.3}$$

Donde:

$$B(q^{-1}) = -0.09988 + 0.1591(q^{-1}) - 0.02047(q^{-2}) + 0.03987(q^{-3})$$

$$F(q^{-1}) = 1 - 1.562(q^{-1}) + 0.1044(q^{-2}) + 0.5081(q^{-3}) - 0.03926(q^{-4})$$

3.3.3.3. Selección del mejor candidato modelo OE:

Determinado al mejor candidato por cada validación, se emplea la validación contraria a la aplicada en la etapa de estimación y así se escoge a la mejor opción de estimación para el modelo OE.

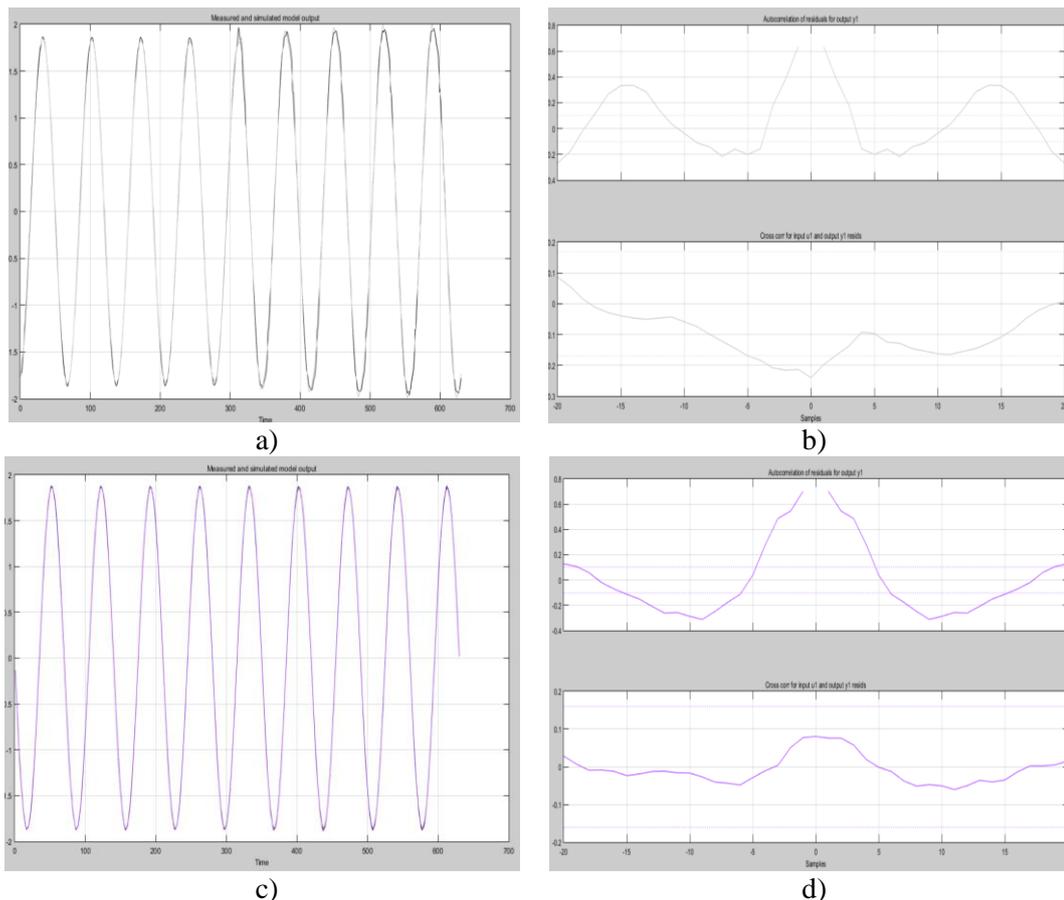


Figura 25.3. Comparación entre los modelos OE [5 4 4] (a, b) y OE [4 4 0] (c, d)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En las figuras 25.3.a y 25.3.b se puede observar el comportamiento del modelo OE [5 4 4] cuando se le somete a una validación de segunda mano donde su FIT sube a **96.1%**; con respecto a las figuras 25.3.c y 25.3.d se observa el comportamiento del modelo OE [4 4 0] sometido a una validación cruzada donde su FIT aumenta a **99.25%**.

Tabla 10-3: Criterios de selección modelo OE (validación inversa)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[5 4 4]	96.1%	0.003735	0.003796	Mayor número de parámetros
[4 4 0]	99.25%	0.0001005	0.0001019	Mejor FIT, menor número de parámetros, LS y FPE más bajos

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Aplicada la validación inversa a los mejores modelos, se determina como la mejor opción del modelo OE al denotado por la ecuación 6.3, porque su FIT es el muy alto que aumentó cuando se aplicó el segundo proceso de validación, además tiene un número menor de parámetros con un total de 8 coeficientes libres con relación a los 9 coeficientes libres.

3.3.4. Estimación usando el modelo BJ:

Determinados los parámetros del modelo BJ (Ecu. 23.2) y de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 8.2 se procede a utilizar el System Identification Toolbox (IDENT) para estimar los coeficientes nb, nc, nd, nf, nk correspondientes a la estructura BJ.

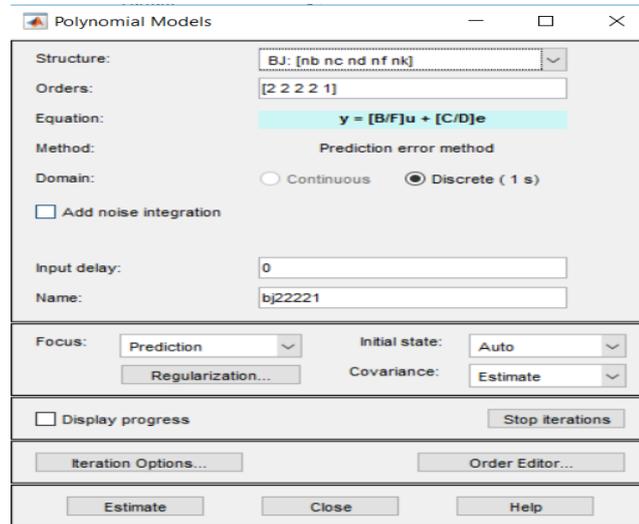


Figura 26.3. Parámetros estructura BJ (IDENT Matlab)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

3.3.4.1. Aplicando validación cruzada:

Para la estimación de los modelo BJ mediante validación cruzada se procede de la misma manera que con los dos anteriores, variando manualmente sus coeficientes para determinar a los mejores candidatos en base a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

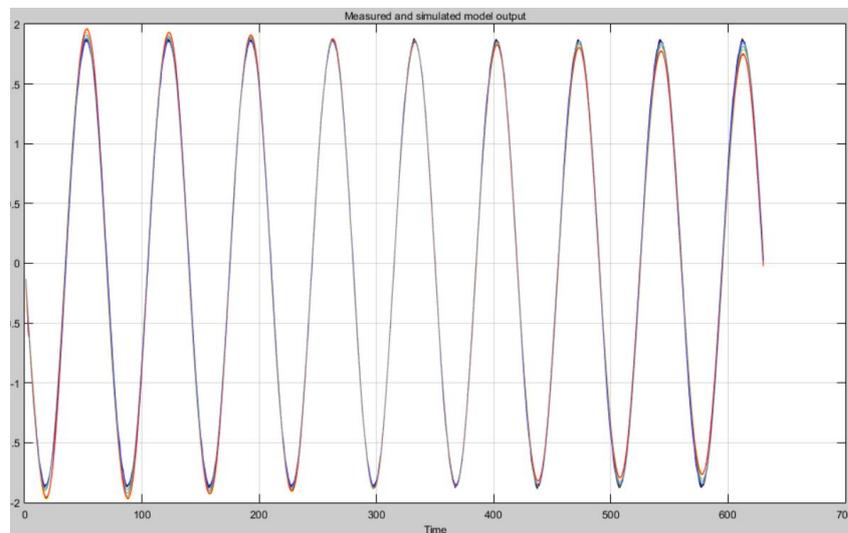


Figura 27.3. Salida de los modelos BJ seleccionados (validación cruzada)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la figura anterior se observa las mejores estimaciones cercanas a la salida real y basándose en la misma se elaboró la tabla 11-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para este modelo.

Tabla 11-3: Criterios de selección modelo BJ (validación cruzada)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[2 2 2 2 1]	95.97%	0.001869	0.001903	Menor número de parámetros, LS y FPE muy buenos
[3 1 3 1 0]	99.32%	7.422 e-5	7.509 e-5	FIT similar, LF y FPE menor que BJ[3 2 3 2 0]
[3 1 3 1 2]	97.84%	0.1732	0.1764	FPE y LF más altos de todas las estimaciones
[3 2 2 2 1]	95.62%	0.001934	0.001971	LF y FPE más bajos que BJ[3 3 3 2 1]
[3 2 3 1 0]	99.33%	7.028 e-5	7.121 e-5	Mejor FIT, FPE y LF más bajos de todas las estimaciones
[3 2 3 2 0]	99.32%	6.667 e-5	6.764 e-5	FIT similar, LF y FPE más altos que BJ[3 1 3 1 2]
[3 3 3 1 2]	97.36%	0.00185	0.001893	LF y FPE más altos que BJ[3 3 3 2 1]
[3 3 3 2 0]	99.31%	6.637 e-5	6.742 e-5	LF y FPE mayor que BJ[3 2 3 2 0]
[3 3 3 2 1]	95.96%	0.0018	0.001846	LF y FPE más bajos que BJ[3 2 2 2 1]
[3 3 3 2 2]	96.2%	0.001821	0.001867	Mayor número de parámetros, LF y FPE mayor que BJ [3 3 3 2 1]

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

De la igual manera se muestran a continuación los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

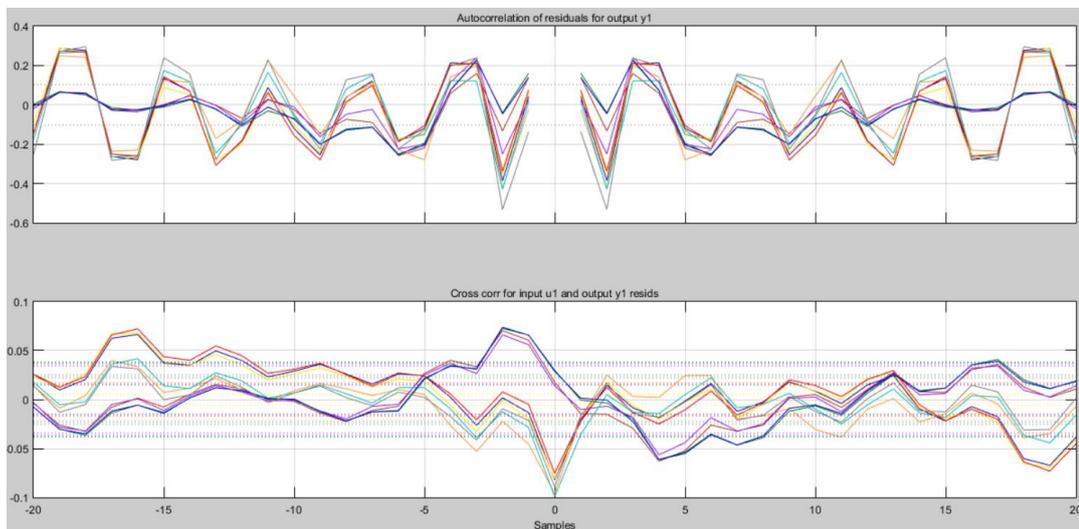


Figura 28.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo BJ (validación cruzada)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Con los criterios de selección expuestos en la tabla 11-3 y las gráficas de la figura 28.3, se escoge al modelo BJ [3 2 3 1 0], debido a que su FIT es el mejor de todos los estimados llegando casi al 100% y a que sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada son muy buenas

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad \text{Ecu. 7.3}$$

Donde:

$$B(q^{-1}) = -0.09937 + 0.1046(q^{-1}) - 0.006294(q^{-2})$$

$$C(q^{-1}) = 1 - 1.434(q^{-1}) + 0.4496(q^{-2})$$

$$D(q^{-1}) = 1 - 1.915(q^{-1}) + 0.8472(q^{-2}) + 0.07672(q^{-3})$$

$$F(q^{-1}) = 1 - 0.9912(q^{-1})$$

3.3.4.2. Aplicando validación de segunda mano

Finalmente se procede a la estimación de los modelo BJ mediante validación de segunda mano de la misma manera que los casos anteriores variando manualmente los coeficientes para determinar los mejores candidatos en base a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE).

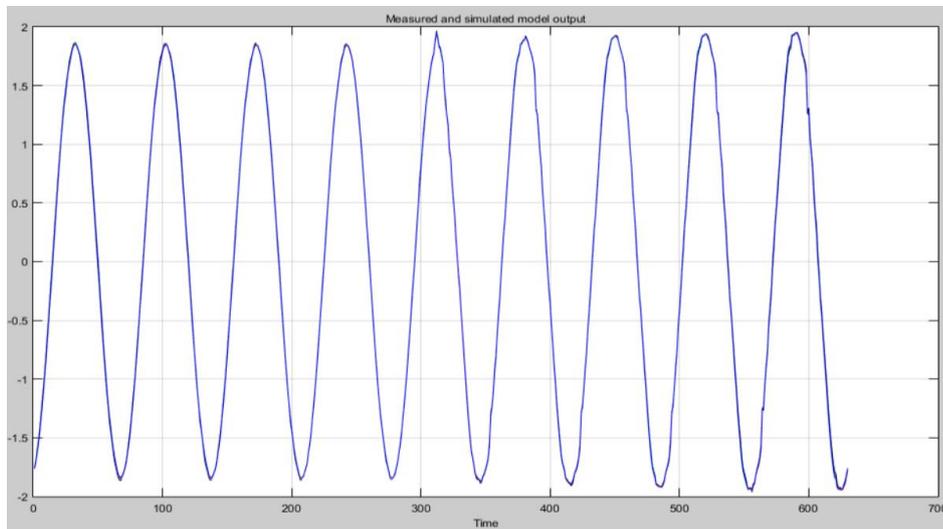


Figura 29.3. Salida de los modelos BJ seleccionados (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la figura anterior se observa a las mejores estimaciones cercanas a la salida real; a continuación se elaboró la tabla 12-3 exponiendo los valores de los criterios de selección (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) para cada modelo.

Tabla 12-3: Criterios de selección modelo BJ (validación de segunda mano)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[2 2 3 1 0]	97.94%	7.649 e-5	7.822 e-5	Menor número de parámetros, LS y PFE más bajo que todos
[2 3 2 1 0]	98.39%	6.873 e-5	6.962 e-5	LF y FPE menor que BJ[3 2 3 2 0]
[3 1 3 1 0]	98.38%	7.422 e-5	7.509 e-5	Mejor FIT, FPE y LF más bajo que BJ[2 2 3 1 0]
[3 1 3 2 0]	98.19%	7.015 e-5	7.109 e-5	LF y FPE similar a BJ[3 2 3 1 0]

[3 2 3 1 0]	98.57%	7.028 e-5	7.121 e-5	Mejor FIT de todas las estimaciones
[3 2 3 2 0]	98.35%	6.667 e-5	6.764 e-5	FIT similar, LF y FPE más altos que BJ[3 2 3 2 0]
[3 3 3 2 0]	98.34%	6.508 e-5	6.612 e-5	Mayor número de parámetros de todas las estimaciones
[3 3 3 1 0]	98.56%	6.861 e-5	6.96 e-5	Mejor FIT, LF y FPE similar BJ[2 3 2 1 0]

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Así mismo se muestran a continuación los gráficos de autocorrelación y correlación cruzada de los modelos expuestos anteriormente para optar por el mejor candidato.

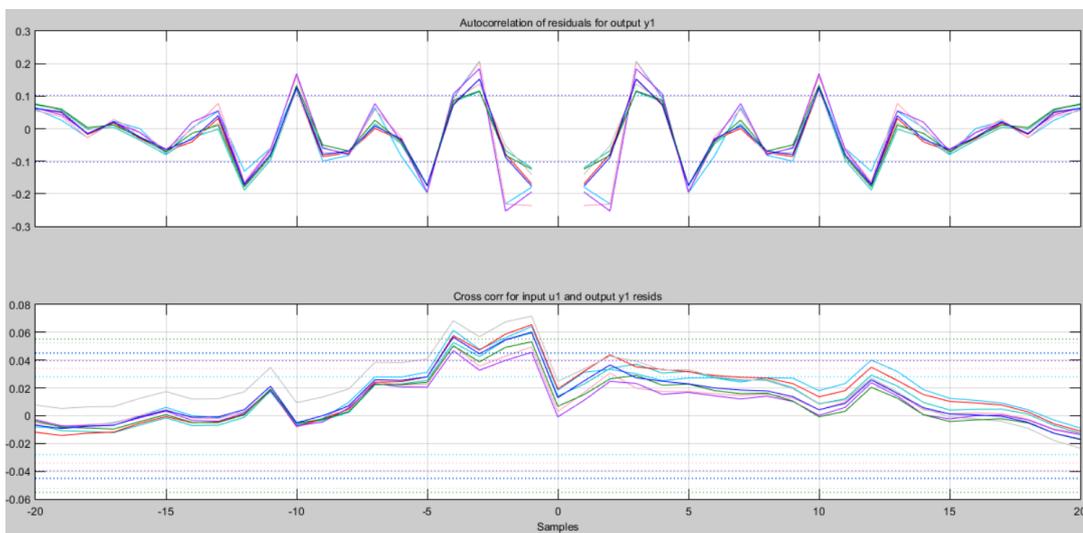


Figura 30.3. Autocorrelación y correlación cruzada modelo BJ (validación de segunda mano)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Basado en los criterios de selección expuestos en la tabla 12-3 y las gráficas de la figura 30.3, se determina como el mejor el modelo al BJ [2 3 2 1 0], ya que su FIT es excelente aproximándose casi al 100% de estimación y el número de parámetros es muy bajo expresado en la ecuación 8.3, además sus gráficas de autocorrelación y correlación cruzada son muy buenas

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(t) \quad \text{Ecu. 8.3}$$

Donde:

$$B(q^{-1}) = -0.09946 - 0.02415(q^{-1})$$

$$C(q^{-1}) = 1 - 2.499(q^{-1}) + 2.013(q^{-2}) - 0.5133(q^{-3})$$

$$D(q^{-1}) = 1 - 1.992(q^{-1}) + (q^{-2})$$

$$F(q^{-1}) = 1 + 0.3009(q^{-1})$$

3.3.4.3. Selección del mejor candidato modelo BJ:

Para concluir con el último modelo de la estimación, empleamos la validación contraria a la aplicada en la etapa de estimación para así escoger la mejor opción de estimación para el modelo BJ

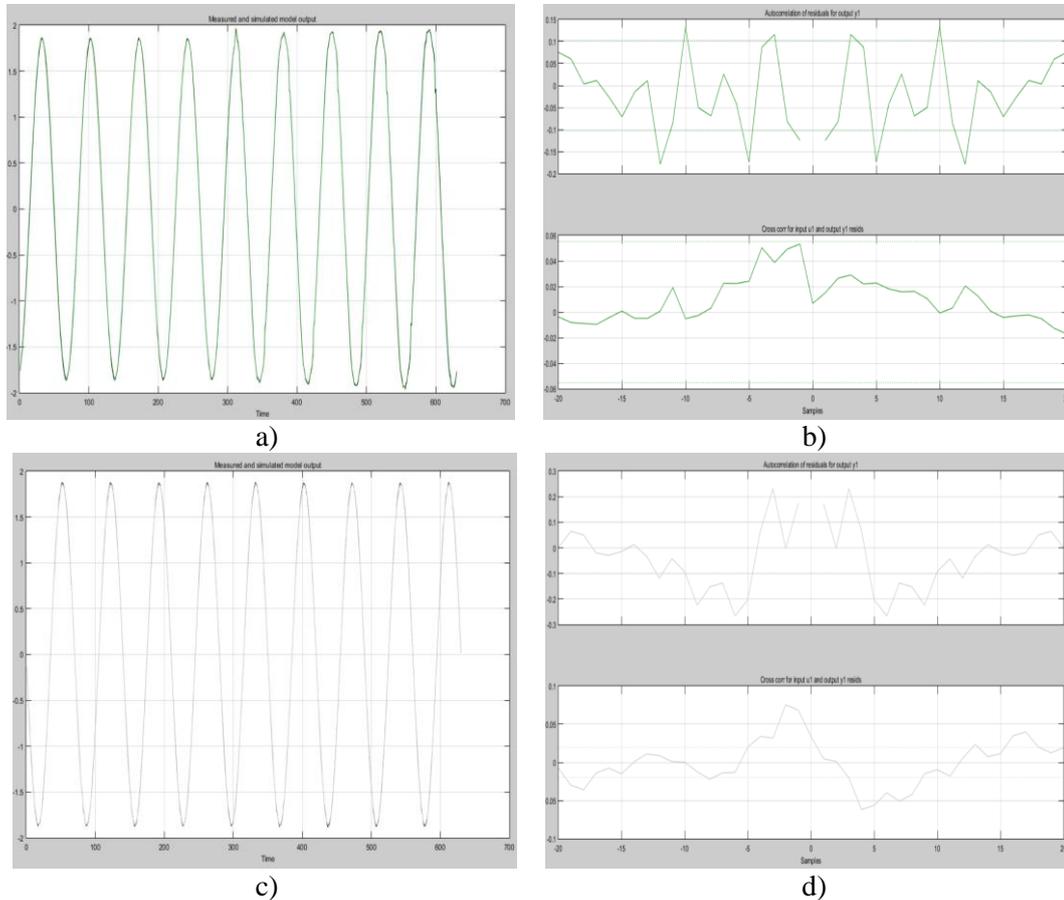


Figura 31.3. Comparación entre los modelos BJ [3 2 3 1 0] (a, b) y BJ [2 3 2 1 0] (c, d)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En las figuras 25.3.a y 25.3.b se puede observar el comportamiento del modelo OE [5 4 4] cuando se le somete a una validación de segunda mano donde su FIT sube a **98.57%** y en las figuras 25.3.c y 25.3.d se observa el comportamiento del modelo OE [4 4 0] sometido a una validación cruzada el cual donde su FIT aumenta a **99.33%**.

Tabla 13-3: Criterios de selección modelo BJ (validación inversa)

ORDEN MODELO	BEST FIT	LF	FPE	OBSERVACIONES
[3 2 3 1 0]	98.57%	7.028 e-5	7.121 e-5	Mayor número de parámetros, LS y FPE más bajos
[2 3 2 1 0]	99.33%	6.873 e-5	6.962 e-5	Mejor FIT, menor número de parámetros,

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En este caso para determinar la mejor opción aplicada la validación inversa se tomó en consideración todos los parámetros y graficas disponibles, llegando a la conclusión de que a pesar

que el FIT era mejor, la diferencia entre los parámetros LS y FPE era muy corta y la gráfica de correlación cruzada tenía un mejor comportamiento, la mejor opción del modelo OE esta denotado por la ecuación 8.3; la diferencia es de apenas uno entre el número de parámetros, alcanzado un total de 9 coeficientes libres sin retardos de estimación.

3.4. Selección del mejor modelo:

Una vez seleccionada la mejor estimación de cada modelo (ARX, ARMAX, OE Y BJ) y de acuerdo a los criterios (BEST FIT, LOSS FUNCTION y FPE) en conjunto con las gráficas de autocorrelación y correlación cruzada se procedió a construir la tabla 14-3 para comparar el valor de los criterios de cada uno de los modelos

Tabla 14-3: Comparación entre los cuatro modelos (ARX, ARMAX, OE Y BJ)

MODELO	ORDEN	BEST FIT		LF	FPE
		VALIDACION CRUZADA	VALIDACION SEG. MANO		
ARX	[6 1 2]	94.51%	70.6%	0.001448	0.001484
ARMAX	[4 4 3 7]	90.69%	87.84%	0.001977	0.002026
OE	[4 4 0]	99.25%	97.84%	0.0001005	0.0001019
BJ	[3 2 3 1 0]	99.33%	98.57%	7.028 e-5	7.121 e-5

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Basándose en los criterios de la tabla anterior se podría decir que el mejor modelo que describe al sistema en estudio es el basado en la estructura BJ, pero se aplicara una estimación más aplicando validación de segunda mano con un set de datos nuevos adquiridos totalmente diferente a los usados en la etapa de estimación, los cuales se muestran en la figura 32.3.

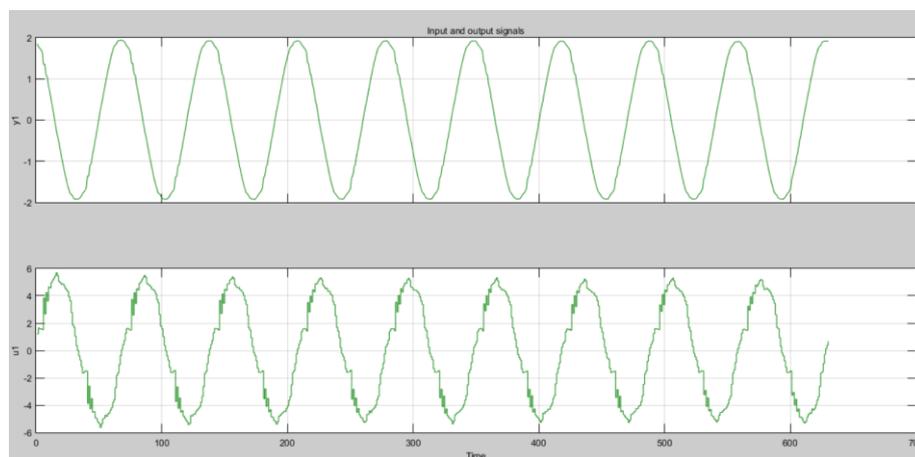


Figura 32.3. Datos de entrada y salida (datos nuevos)

Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

Usando los datos mostrados en la figura anterior estimamos nuevamente los modelos de acuerdo al orden estimado en cada uno, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15-3: Estimación de los cuatro modelos usando set de datos nuevos.

MODELO	ORDEN	BEST FIT	LF	FPE
ARX	[6 1 2]	52.8%	0.001448	0.001484
ARMAX	[4 4 3 7]	96.06%	0.001977	0.002026
OE	[4 4 0]	98.86%	0.0001005	0.0001019
BJ	[3 2 3 1 0]	98.81%	7.028 e-5	7.121 e-5

Realizado por: Jhon Jairo Cevallos, 2016

La figura 33.3 muestra la salida estimada en cada modelo en función de los nuevos datos usados y las gráficas de autocorrelación y correlación cruzada, observando que el modelo ARX baja considerablemente su FIT por lo que se descartando su uso.

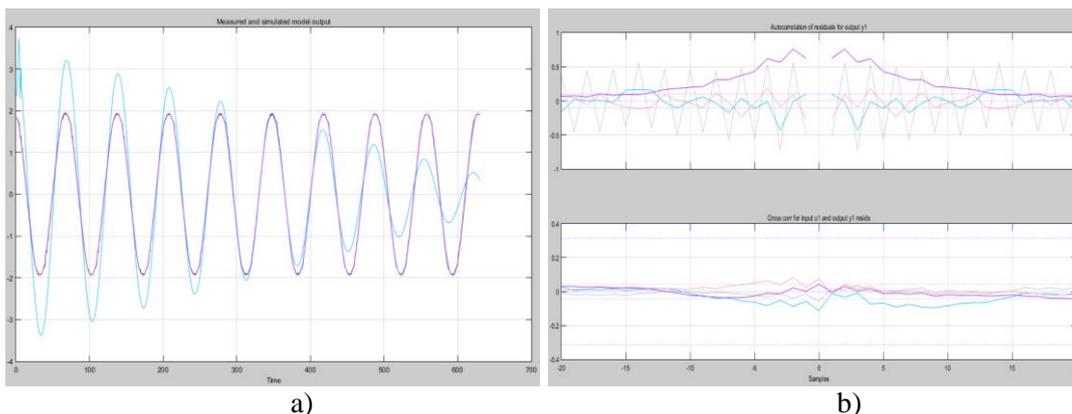


Figura 33.3. Salida de los modelos(a) – Graficas de autocorrelación y correlación cruzada (b)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

A pesar de que el FIT del modelo ARMAX es muy bueno, el número de parámetro es mayor que el resto de modelos por lo que también se descarta su uso. Para tomar la decisión final partimos del porcentaje del FIT de los modelos OE y BJ los cuales son casi similares, en cuanto a los criterios de LS y FPE los del modelo BJ son menores, pero para decidir el mejor modelo se tomó en cuenta sus graficas de autocorrelación y correlación cruzada observando un mejor comportamiento del modelo BJ al cual se eligió como el mejor y esta expresado por la ecuación 9.3.

$$y(t) = \frac{-0.09937+0.1046(q^{-1})-0.006294(q^{-2})}{1-0.9912(q^{-1})}u(t) + \frac{1-1.434(q^{-1})+0.4496(q^{-2})}{1-1.915(q^{-1})+0.8472(q^{-2})+0.07672(q^{-3})}e(t)$$

Ecu. 9.3

3.5. Comprobación del modelo:

Después de haber optado por el modelo expresado por la estructura de Box-Jenkins se procede a realizar una comparación entre el comportamiento del modelo y la salida deseada del sistema, basado en el criterio de IAE expresado por la ecuación 30.2, se estima el error de la estimación del modelo frente al comportamiento del sistema de eliminación de distorsiones armónicas en análisis.

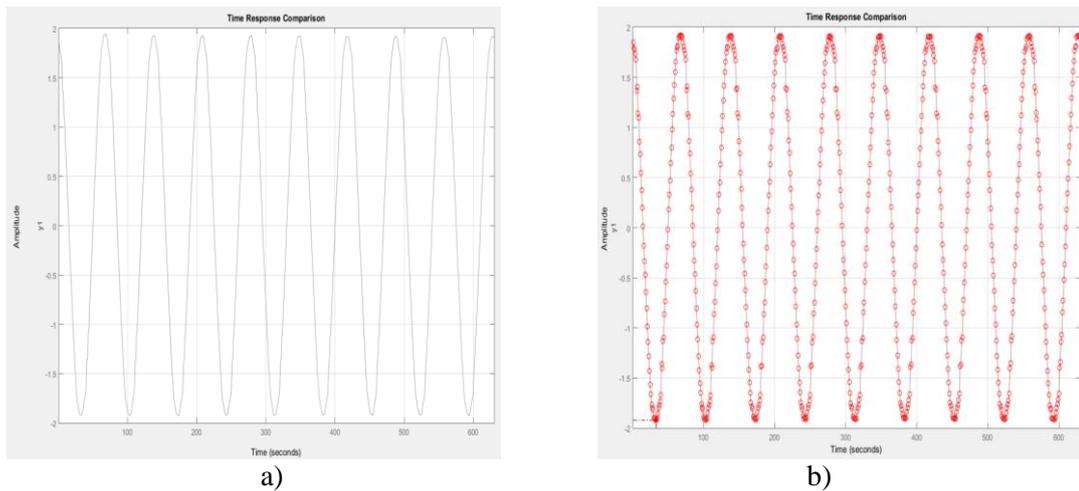


Figura 34.3. Comprobación del modelo BJ. Salida del sistema (a). – Salida del modelo BJ (b)
Fuente: Jhon Jairo Cevallos, 2016

En la figura 34.3 se observa forma de la señal de salida del sistema real (a) y la salida en función del modelo BJ (b), se estima el criterio de IAE y se obtiene que el error de estimación en este caso es de menos del 1%.

Si aplicamos el mismo criterio frente a distintos tiempos de la salida del sistema se obtuvo que el mayor error de estimaciones es de alrededor del 2%, lo que indica que el modelo estimado tiene un comportamiento similar al del sistema en análisis, es decir el modelo describe casi es su totalidad el comportamiento del sistema y se puede usar en reemplazo del mismo para análisis computacionales o para el diseño de controladores.

CONCLUSIONES

- ✓ La parametrización de un sistema es una técnica muy empleada en la identificación de sistemas ya que nos ayuda a estimar los parámetros que se desconocen basándose en los distintos modelos predeterminados.
- ✓ Las estructuras paramétricas para la estimación de un modelo o la identificación de un sistema se basan en obtener el grado y los coeficientes tanto de la parte determinística (parámetros) como de la estocástica (ruido), analizando su posición e impacto sobre el sistema tratando de estimar un modelo que describa de la mejor manera posible al sistema y que no sea tan complejo de analizar usando herramientas de hardware o software
- ✓ En la etapa de adquisición se debe tener mucho en cuenta la precisión de los equipos y sensores empleados, porque la presencia de ruido en el sistema o la baja resolución de los equipos ocasionaran que los datos adquiridos del sistema sean incorrectos. En este caso la resolución de 16 bits de la DAQ garantiza un error mínimo lo que implica que la tabulación de datos no necesite de un filtrado previo.
- ✓ Los criterios (MDL, AIC y BEST FIT) entregados por el IDENT son parte fundamental al momento de comparar los diferentes grados de cada modelo para optar por el mejor candidato; mientras menor sean los valores de LOSS FUNCTION, FPE y numero de parámetros mejor será el modelo, así como las bandas de autocorrelación y correlación cruzada deben estar acotadas a la menor distancia con respecto al origen
- ✓ Las pruebas de validación cruzada y de segunda mano son muy útiles en la etapa de validación del modelo porque permiten observar el comportamiento del modelo frente a las distintas variaciones propias del sistema, observando si la variación del porcentaje de estimación FIT con relación a estos cambios es significativa a la determinada en la etapa de estimación.
- ✓ El System Identification Toolbox (IDENT) es una herramienta de análisis muy buena al momento de obtener el modelo de un sistema del que se desconoce sus características o parámetros de funcionamiento (Black Box)
- ✓ El modelo matemático estimado para el sistema de eliminación de distorsiones armónicas basado en los resultados obtenidos y en los criterios de evaluación se pudo catalogar como muy bueno, además se ajusta a la variabilidad del sistema (propio de un sistema con presencia de THD).

RECOMENDACIONES.

- ✓ Revisar los parámetros de diseño del sistema de eliminación de distorsiones armónicas, ya que si se supera la potencia para la que fue diseñado el sistema puede quemarse.
- ✓ Seleccionar un sensor con mayor grado de precisión y sensibilidad para disminuir el error en la etapa de adquisición.
- ✓ Se debe revisar las gráficas de autocorrelación y correlación de los modelos estimados debido a que un buen porcentaje de estimación no garantiza que el modelo se vaya a acoplar a los cambios propios del sistema.
- ✓ Al momento de comparar el comportamiento de los mejores candidatos de cada modelo es recomendable usar un set de datos diferente a los empleados en la etapa de validación para observar su comportamiento frente a otros comportamientos propios de cada sistema.
- ✓ Basado en el modelo estimado se puede aplicar un mejor tipo de control que al usado en el sistema de eliminación de distorsiones armónicas para obtener una mejor compensación en el sistema. (Gener, 2013, p. 59)

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, P. & Larco, A., *Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de temperatura en un cuarto térmico. Refrigeración.* 2010. [Consulta: 26 Abril 2016].

Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11695>

Basmadjian, D., *The Art of Modeling in Science and Engineering.* New York: CHAPMAN & HALL. 1999. pp. 5-11

Belaustegui C., Orda C., Galarza C., . *Procesos Estocásticos. Notas de clase. Universidad de Buenos Aires.* Buenos Aires: Departamento de Electrónica. 2005. pp. 18-23

Brito VallinaI, M. L. y otros., *Papel de la modelacion matematica en la formacion de los ingenieros.* Cuba: Ingeniería Mecánica. Vol. 14. No. 2. 2005. pp. 56-59

Centeno, J., *Teoria de Sistemas.* España: s.n. 2012. pp. 18-20

Curay Flores, S. D. & Vaca Guilcamaigua, A. E., *Diseño e Implemetacion de un algoritmo de control avanzado aplicado a un proceso de presion, utilizando un controlador de automatización programable para el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas.* 2015. [Consulta: 05 Mayo 2016].

Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9320/1/AC-ESPEL-ENI-0338.pdf>

Escobet T., Morcego B., *Identificación de sistemas. Identificación de sistemas. Notas de clase. Departament d'Enginyeria de Sistemes.* 2003. [Consulta: 02 Junio 2016].

Disponibled en

ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/parte%20II/clase15%20ident/capitulo_07.pdf

Gavilanez, L., *Diseño de un Sistema de Potencia para la eliminacion de distorsiones armonicas porvocadas por una carga inductiva.* 2015. [Consulta: 26 Noviembre 2015].

Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4966>

Gener., *Ciclo de validación de una aplicación Informática.* Barcelona: Universidad Oberta de Catalunya. 2013. pp. 53-60

Gijon, *Diseño de Sistemas de Control por Computador*. 2006 [Consulta: 14 mayo 2016].
Disponible en: <http://isa.uniovi.es/docencia/dscc>

Granja Arboleda, J. D., *Identificación Paramétrica del Modelo Matemático de un Transformador Monofásico mediante el Algoritmo de Mínimos Cuadrados Recursivo*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. 2016. pp. 25-32

Jacome Riera, O. J. & Leon Amores, J. G., *Diseño y construcción de un sistema de medición inteligente para la gestión de la energía eléctrica y medición de agua potable en los hogares*. 2014. [Consulta: 02 Agosto 2016].
Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8293>

Kunush, C., *Identificación de Sistemas de Dinámicos. Catedra de Control y Servomecanismos*. Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires: Universidad Nacional de La Plata. 2003 pp. 46-53

Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*. University of Linköping ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall PTR. 1999 pp. 93-96

Ljung, L., *Black-box Models from Input-output Measurements*. Sweden: University of Linköping . 2001. pp. 75-80

López Guillén, M. E., *Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua..* 2002. [Consulta: 26 Abril 2016].
Disponible en: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>

Martines Bueno, A., *Identificación Experimental De Sistemas*. España: Universidad de Alicante. 2011. pp. 57-59

Murdocca, R. M., *Laboratorio de interfaces. Sensores de Efecto Hall*. 2013. [Consulta: 19 Agosto 2016].
Disponible en: <http://www0.unsl.edu.ar/~interfases/labs/lab09.pdf>

Parra Rosero, P., *Identificación de procesos.* 2011. [Consulta: 30 Mayo 2016].
Disponible en: <http://ings.ups.edu.ec/documents/2497096/2497486/Art1.pdf>

Rodríguez Velázquez, J. A. & Steegmann Pascual, C., *Modelos Matemáticos*. Barcelona: Universidad Oberta de Catalunya. 2012. pp. 25-25

Van den Hof Paul M.J., Bombois Xavier, *The BCS SIGIST Standard glossary of Testing Terms (British Standard BS 7925-1)*. 2004. [Consulta: 15 Junio 2016].

Disponible en: <http://www.bcs.org/content/ConWebDoc/12416>

ANEXOS

ANEXO A: DESCRIPCION TECNICA NI myDAQ

SPECIFICATIONS NI myDAQ

Français Deutsch 日本語 한국어 简体中文
ni.com/manuals

Analog Input

Number of channels..... 2 differential or 1 stereo audio input

ADC resolution..... 16 bits

Maximum sampling rate..... 200 kS/s

Timing accuracy..... 100 ppm of sample rate

Timing resolution..... 10 ns

Range

Analog input..... ± 10 V, ± 2 V, DC-coupled

Audio input..... ± 2 V, AC-coupled

Passband (-3 dB)

Analog input..... DC to 400 kHz

Audio input..... 1.5 Hz to 400 kHz

Connector type

Analog input..... Screw terminals

Audio input..... 3.5 mm stereo jack

Input type (audio input)..... Line-in or microphone

Microphone excitation (audio input)..... 5.25 V through 10 k Ω

Absolute accuracy

Nominal Range		Typical at 23 °C (mV)	Maximum (18 to 28 °C) (mV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale		
10	-10	22.8	38.9
2	-2	4.9	8.6

Figure 1. Settling Time (10 V Range) versus Different Source Impedance

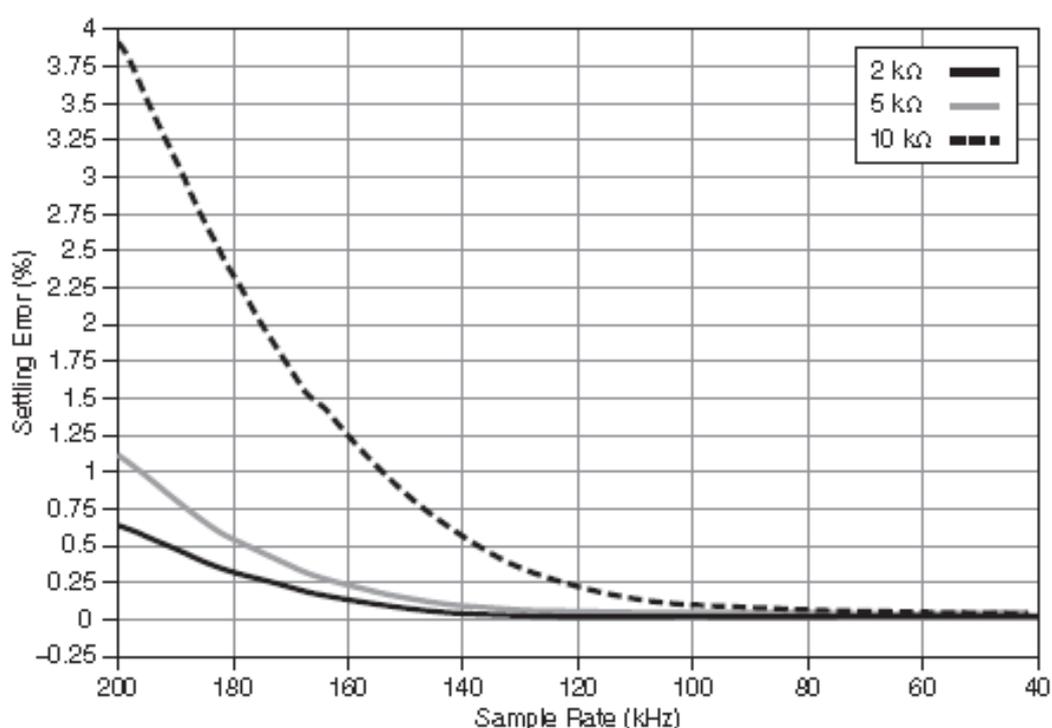
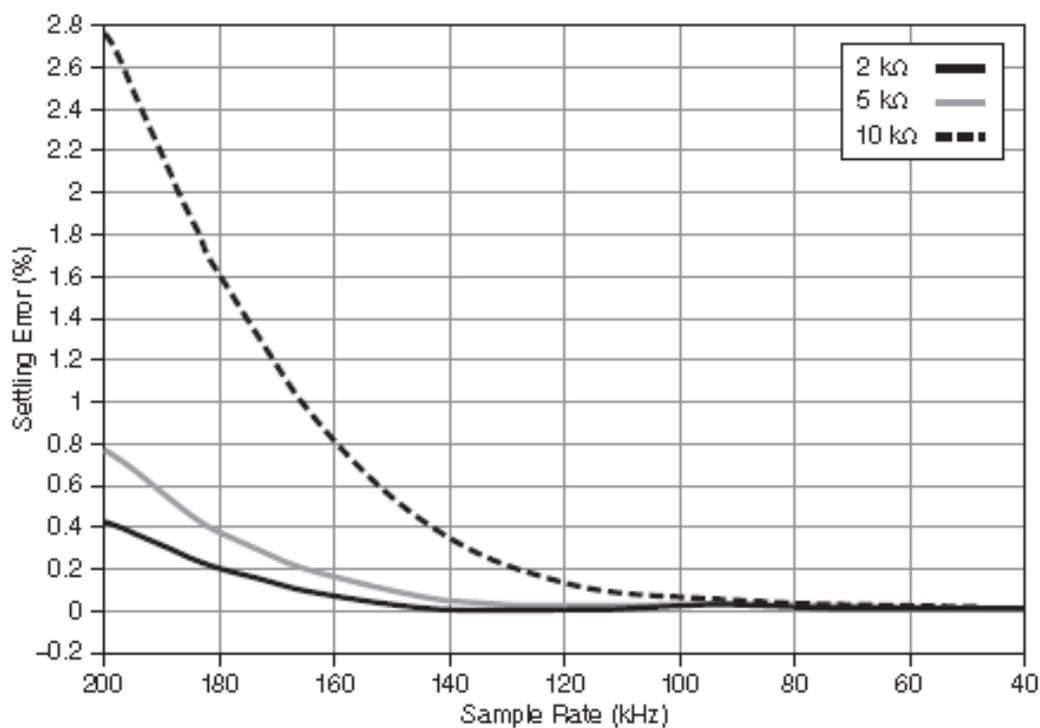


Figure 2. Settling Time (2 V Range) versus Different Source Impedance



Input FIFO size	4,095 samples, shared among channels used
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	± 10.5 V to AGND
Common-mode rejection ratio (CMRR) (DC to 60 Hz)	70 dB
Input impedance	
Device on	
AI+ or AI- to AGND	>10 G Ω 100 pF
AI+ to AI-	>10 G Ω 100 pF
Device off	
AI+ or AI- to AGND	5 k Ω
AI+ to AI-	10 k Ω
Anti-aliasing filter	None
Overvoltage protection	
AI+ or AI- to AGND	± 16 V
Overvoltage protection (audio input left and right)	None

Analog Output

Number of channels	2 ground-referenced or 1 stereo audio output
DAC resolution	16 bits
Maximum update rate	200 kS/s
Range	
Analog output	± 10 V, ± 2 V, DC-coupled
Audio output	± 2 V, AC-coupled
Maximum output current (analog output) ¹	2 mA
Output impedance	
Analog output	1 Ω
Audio output	120 Ω
Minimum load impedance (audio output)	8 Ω

¹ The total power available for the power supplies, analog outputs, and digital outputs is limited to 500 mW (typical)/100 mW (minimum). Refer to the [Calculating Power Consumption](#) section for information on calculating the total power consumption of the components of your system.

Connector type

Analog output Screw terminals
Audio output 3.5 mm stereo jack

AC-coupling high-pass frequency

(audio output with 32 Ω load) 48 Hz

Absolute accuracy

Nominal Range		Typical at 23 °C (mV)	Maximum (18 to 28 °C) (mV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale		
10	-10	19.6	42.8
2	-2	5.4	8.8

Slew rate 4 V/ μ s

Timing accuracy 100 ppm of sample rate

Timing resolution 10 ns

Overdrive protection \pm 16 V to AGND

Maximum power-on voltage¹ \pm 110 mV

Output FIFO size 8,191 samples, shared among channels used

Digital I/O

Number of lines 8; DIO <0..7>

Direction control Each line individually programmable as input or output

Update mode Software-timed

Pull-down resistor 75 k Ω

Logic level 5 V compatible LV TTL input; 3.3 V LV TTL output

V_{IH} min 2.0 V

V_{IL} max 0.8 V

Maximum output current per line² 4 mA

¹ When powered on, the analog output signal is not defined until after USB configuration is complete.

² The total power available for the power supplies, analog outputs, and digital outputs is limited to 500 mW (typical)/100 mW (minimum). Refer to the [Calculating Power Consumption](#) section for information on calculating the total power consumption of the components of your system.

General Purpose Counter/Timer

Number of counter/timers.....	1
Resolution.....	32 bits
Internal base clocks.....	100 MHz
Base clock accuracy.....	100 ppm
Maximum counting and pulse generation update rate.....	1 MS/s
Default routing	
CTR 0 SOURCE.....	PFI 0 routed through DIO 0
CTR 0 GATE.....	PFI 1 routed through DIO 1
CTR 0 AUX.....	PFI 2 routed through DIO 2
CTR 0 OUT.....	PFI 3 routed through DIO 3
FREQ OUT.....	PFI 4 routed through DIO 4
Data transfers.....	Programmed I/O
Update mode.....	Software-timed

Digital Multimeter

Functions ¹	DC voltage, AC voltage, DC current, AC current, resistance, diode, continuity
Isolation level.....	60 VDC/20 V _{rms} , Measurement Category I



Caution Do not use this device for connection to signals or for measurements within Measurement Categories II, III, or IV. For more information on Measurement Categories, refer to the [Safety Voltages](#) section.

Connectivity.....	Banana jacks
Resolution.....	3.5 digits
Input coupling.....	DC (DC Voltage, DC Current, Resistance, Diode, Continuity); AC (AC Voltage, AC Current)

Voltage Measurement

DC ranges.....	200 mV, 2 V, 20 V, 60 V
AC ranges.....	200 mV _{rms} , 2 V _{rms} , 20 V _{rms}

¹ All AC specifications are based on sine wave RMS.

Accuracy

Function	Range	Resolution	Accuracy	
			± ([% of Reading] + Offset)	
DC Amps	20.00 mA	0.01 mA	0.5% + 0.03 mA	
	200.0 mA	0.1 mA	0.5% + 0.3 mA	
	1.000 A	0.001 A	0.5% + 3 mA	
			40 to 400 Hz	400 to 2,000 Hz
AC Amps	20.00 mA	0.01 mA	1.4% + 0.06 mA	5% + 0.06 mA
	200.0 mA	0.1 mA	1.5% + 0.8 mA	5% + 0.8 mA
	1.000 A	0.001 A	1.6% + 6 mA	5% + 6 mA

Input protection..... Internal ceramic fuse, 1.25 A 250 V, fast-acting
 5 × 20 mm, F 1.25 A H 250V
 (Littelfuse part number 02161.25)

Resistance Measurement

Ranges 200 Ω, 2 kΩ, 20 kΩ, 200 kΩ, 2 MΩ, 20 MΩ

Accuracy

Function	Range	Resolution	Accuracy	
			± ([% of Reading] + Offset)	
Ω	200.0 Ω	0.1 Ω	0.8% + 0.3 Ω*	
	2.000 kΩ	0.001 kΩ	0.8% + 3 Ω	
	20.00 kΩ	0.01 kΩ	0.8% + 30 Ω	
	200.0 kΩ	0.1 kΩ	0.8% + 300 Ω	
	2.000 MΩ	0.001 MΩ	0.8% + 3 kΩ	
	20.00 MΩ	0.01 MΩ	1.5% + 50 kΩ	

* Exclusive of lead wire resistance

Diode Measurement

Range 2 V

ANEXO B: ESPECIFICACIONES TECNICAS SENSOR SCT-013-000

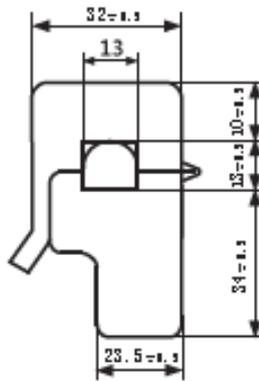
SPECIFICATION

Customer Title : XiDi Technology Product Name: _____
 Manufacture Model : SCT-013-000 _____

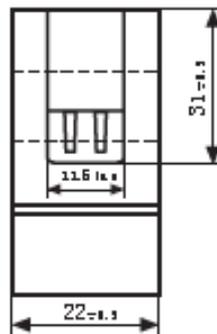
Characteristics: open size:13mm×13mm
 1m leading wire
 Core material:Ferrite
 Fire resistance property:in accordance with
 UL 94-V0
 Dielectric strength: 1000V AC/1min 5mA
 (between shell and output)



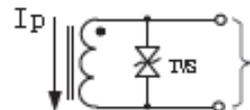
Outline size diagram: (in mm)



Front View



Side View



TVS: Transient-voltage Suppressor
 Current output type

Schematic Diagram

Typical table of technical parameters:

input current	output voltage	non-linearity	build-in sampling resistance (R _s)
0-100A	0-50mV	± 3%	Ω
turn ratio	resistance grade	work temperature	dielectric strength(between shell and output)
100A: 0.05A	Grade B	-25℃~+70℃	1000V AC/1min 5mA

Customer Sign:

Phone: 0355-7929499-803
 Cell: 13693334514
 Contact Name: Engineer Chen

Input Connections

The Analyzer has 4 BNC-inputs for current clamps and 5 banana-inputs for voltages.

Self-adhesive decals are supplied corresponding to wiring color codes used in the USA, Canada, Continental Europe, the UK, and China. Stick the decals that fit to your local wiring codes around the current and voltage inputs.

De-energize power systems before making connections whenever possible. Avoid working alone and work according to the warnings listed in section 'Safety Information'.

For a 3-phase system make the connections as shown in Figure 1. First put the current clamps around the conductors of phase A (L1), B (L2), C (L3), and N(eutral). The clamps are marked with an arrow indicating the correct signal polarity.

Next make the voltage connections: start with Ground and then in succession N, A (L1), B (L2), and C (L3). For correct measuring results, always connect the Ground input. Always double-check the connections. Make sure that current clamps are secured and completely closed around the conductors.

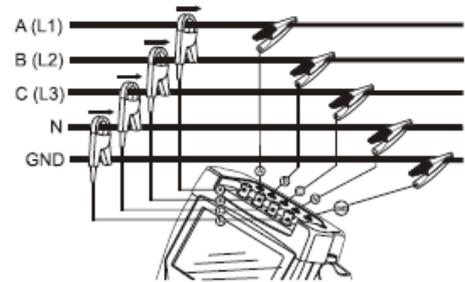


Figure 1. Connection of Analyzer to 3-phase distribution system

For single phase measurements, use current input A (L1) and the voltage inputs Ground, N(utral), and phase A (L1).

A (L1) is the reference phase for all measurements.

Before making any measurements, set the Analyzer up for the line voltage, frequency, and wiring configuration of the power system you want to measure. This is explained in section 'Setting up the Analyzer'.

Fluke 434/435
Getting Started

Measuring Modes, a Quick Overview

This section gives an overview of all measuring modes. The Analyzer's screen information and use of function keys is explained in more detail in the next two chapters.

SCOPE SCOPE MODE. The following features are available:

Measuring Mode	Screen Type	Representation of Measuring Results	Cursor/Zoom
Scope Waveform	Waveform	Oscilloscope display of voltage/current + numerical values.	Yes / Yes
Scope Phasor	Vector Diagram	Voltage/current phase relation + numerical values	No / No

MENU MEASUREMENTS MENU. Measuring Functions accessible via the MENU key. The following features are available:

Measuring Mode	Screen Type	Representation of Measuring Results	Cursor/Zoom
V/A/Hz	Meter screen	Numerical values: voltage, current, frequency, crest factor.	No / No
	Trend	Trend over time of values in the Meter screen.	Yes / Yes
Dips & Swells	Trend	Trend over time with fast update rate: Voltage/current.	Yes / Yes
	Events table	Records events that violate limits: normal/detailed tables available.	No / No
Harmonics	Bar Graphs	Voltage/current/power harmonics, interharmonics, THD, DC	Yes/ No
	Meter screen	Numerical values of a set of (inter)harmonics	No / No
Power & Energy	Meter screen	Numerical values: Active power/Apparent power/ Reactive power /Power factor/Displacement power factor/ Voltage/Current/Energy usage, Energy meter output pulse count	No / No
	Trend	Trend over time of the values in the Meter screen	Yes / Yes

Measuring Mode	Screen Type	Representation of Measuring Results	Cursor/Zoom
Flicker	Meter screen	Numerical values: Short/Long term flicker, Dc, Dmax, TD	No / No
	Trend	Trend over time of values in the Meter screen	Yes / Yes
Unbalance	Meter screen	Numerical values: Voltage/current unbalance percentages, Voltage/current fundamental, Phase angle.	No / No
	Trend	Trend over time of values in the Meter screen	Yes / Yes
	Vector Diagram	Voltage/current phase relation + numerical values	No / No
Transients	Waveform	Voltage/current waveforms + numerical values. Records events that violate adjustable limits.	Yes / Yes
Inrush Current	Trend	Records events that exceed adjustable limits.	Yes / Yes
Mains Signaling	Trend	Trend over time of occurrences of frequency 1 and 2 control signals (amplitude, duration).	Yes / Yes
	Events Table	Records Date, Time, Type, Level, and Duration of events.	No / No
Logger	Trend	Trend over time of selected readings (min, max, average)	Yes/Yes
	Meter screen	Numerical values: all selected readings	No / No
	Events Table	Records events that violate limits: normal/detailed tables available.	No / No

Fluke 434/435
Getting Started

MONITOR

POWER QUALITY MONITOR. The following features are available:

Measuring Mode	Screen Type	Representation of Measuring Results	Cursor/Zoom
Main screen	Bar Graphs	Via start menu: overview of key Power Quality metrics. Detailed information available under function keys F1 (V rms), F2 (Harmonics), F3 (Flicker), F4 (Dips, Interruptions, Rapid Voltage Changes, Swells), and F5 (Unbalance, Frequency, Mains Signaling).	Yes / No
	Events Table	Records events that violate limits: normal/detailed tables available.	No / No
	Trend	Trend over time of data group as selected by F1 ... F5.	Yes / Yes
	Bar Graphs	Detailed bar graph for harmonics.	Yes / No

Screen Symbols

Symbols may appear in the upper and the lower screen areas to show the state of Analyzer and measurements.

Status Indicators in the upper screen area:

 9999:59:59	Time that a measurement has been going on. Format: hours, minutes, seconds. When waiting for a timed start, time counts down with prefix -.
 2x	Horizontal ZOOM on.
	Measurement may be unstable. E.g. for frequency readout during absence of voltage at reference phase A (L1).
	Indicates according to IEC61000-4-30 flagging convention that a dip, swell or interruption has occurred during the displayed aggregation interval. Indicates that an aggregated value may not be reliable.
	Recording of measurement data is on.
	Phase rotation indicator.

	Battery/Line power indication. During battery operation the battery charge condition is displayed.
	Keyboard locked. Press ENTER 5 seconds to unlock/unlock.

Status line in the lower screen area:

	01/21/06	Date of Analyzer's real time clock. Date format may be month-day-year or day-month-year.
	16:45:22	Time of day or cursor time.
	120V 60Hz	Nominal line voltage and frequency; the reference for measurements.
	Full	GPS signal strength indicator.
	3Ø WYE	Number of phases and wiring configuration for the measurement.
	EN50160	Name of the limits used for power quality MONITOR, dips, swells, interruptions, rapid voltage changes.

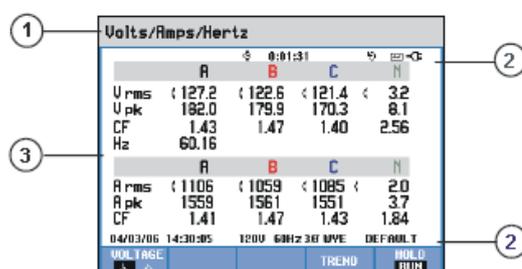
Fluke 434/435 Getting Started

Screens and Function Keys

The Analyzer has five different screen types to show measuring results. Each screen type is arranged to present data in the clearest way. Phases are indicated with individual colors.

Selections are done with arrow and function keys: an active selection is highlighted by a black background. Each screen and its features are explained below. Read this carefully to get acquainted with all functions of your Analyzer.

METER screen



This screen gives a quick overview of important numerical measuring values. An example is the Meter screen belonging to VOLTS/AMPS/HERTZ mode.

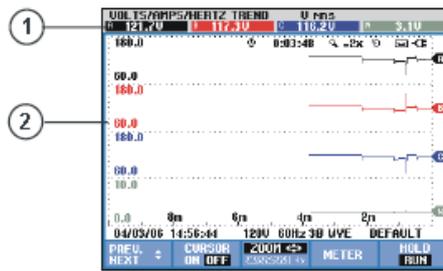
Screen information:

①	Active Measuring Mode in header.
②	Status Indicators and Status Line.
③	Field with Measuring values. Contents depends on measuring mode, number of phases, and wiring configuration.

Function keys:

	F1	Switches between voltage readout per phase (A/L1, B/L2, C/L3, N) or phase-to-phase (AB, BC, CA) for 3-phase Y configuration.
	F4	Access to the TREND screen. For description see below.
	F5	Switches between HOLD and RUN of waveform update. Switching from HOLD to RUN invokes a menu to select immediate start (NOW) or TIMED start which allows you to define start time and duration of the measurement.

TREND screen.



The Trend screen shows the changes over time of measuring values on one row of the Meter screen. An example is the VOLTS/AMPS/HERTZ TREND. Time is displayed horizontally. The display is built up from the right side of the screen. To allow continuous recording of data, the time axis is compressed when necessary.

Screen information:

①	Present values of the trend graphs on the right side of the screen. If CURSOR is ON, the trend values at the cursor are displayed.
②	Trend display area.

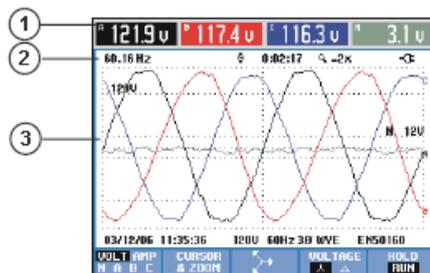
Function keys:

F1	Assigns up/down arrow keys to select a row from the Meter screen to be displayed as a trend. The selected row is indicated in screen header.
F2	CURSOR ON/OFF.
F3	Assigns the arrow keys to CURSOR or ZOOM operation. Moving the cursor across the extreme left or right of the screen makes the next screen out of a maximum of 6 visible. ZOOM allows you to expand or shrink the display to view details or to see the complete graph within the screen area.
F4	Return to previous screen.
F5	Switches between HOLD and RUN.

Fluke 434/435
Getting Started

WAVEFORM screen

An example is the Scope Waveform screen. Voltage and current waveforms are displayed similar to an oscilloscope.



Screen information:

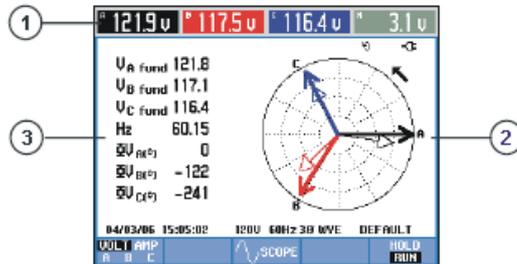
①	The RMS values of the waveforms are displayed in the header.
②	Display of measured frequency.
③	Waveform display area with grid lines at important voltage/current levels.

Function keys:

F1	Selection of waveform set to be displayed: V displays all voltages, A displays all currents. A (L1), B (L2), C (L3), N (neutral) gives simultaneous display of voltage and current of the selected phase.
F2	Switches to submenu for CURSOR and ZOOM operation.
F3	Switches to the Scope Phasor screen. For description see below.
F4	Switches between voltage readout per phase (A/L1,B/L2,C/L3,N) or phase-to-phase (AB,BC,CA) for 3-phase Y configuration.
F5	Switches between HOLD and RUN.

PHASOR screen.

Shows phase relation between voltages and currents in a vector diagram. An example is the Scope Phasor screen:



Screen information:

①	RMS values of the waveforms are displayed in the header.
②	Vector diagram. The vector of the reference phase A (L1) points to the positive X-direction.
③	Additional data such as fundamental phase voltages, frequency, and phase angles.

Function keys:

F1	Selection of data set to be displayed.
F3	Return to Scope Waveform screen.
F5	Switches between HOLD and RUN.

BAR GRAPH screen.

An example is the bar graph screen for Power Quality Monitoring. This screen gives a quick indication if important Power Quality parameters meet requirements.

Parameters include RMS voltages, Harmonics, Flicker, Rapid voltage changes, Dips, Swells, Interruptions, Unbalance, Frequency, and Mains Signaling.

The length of a bar increases if the related parameter is further away from its nominal value.

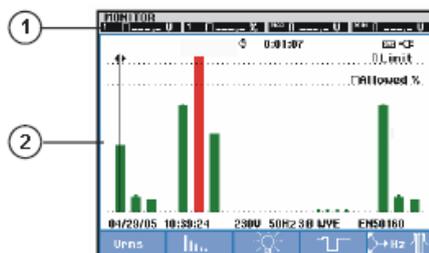
The bar graphs have a wide base (indicating a user definable percentage of the time that a parameter must be within specified levels: for instance 95 % of the readings over 10-minute observation periods must be within level) and a narrow top indicating the fixed 100 % limit. If one of these limits is violated, the related bar changes from green to red. Dotted horizontal lines indicate both limits on the display.

Fluke 434/435 Getting Started

You can use a pre-defined set of limits or define your own. An example of a pre-defined set of limits is that according to the EN50160 standard.

Power Quality Monitoring is accessible via the MONITOR key and a menu for immediate or timed start.

Measuring values of the bar graph under the cursor are displayed in the header of the screen.



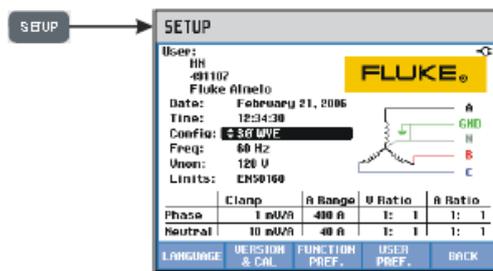
Screen information:

①	Extreme values of the bar graph under the cursor. Use the left and right arrow key to move the cursor to another bar graph.
②	Power Quality monitor screen with bars showing the amount of time parameters are within high and low tolerance.

The function keys give access to submenus with detailed information on:

F1	RMS voltage: events table, trends.
F2	Harmonics: bar graphs, events table, trends.
F3	Flicker: events table, trends.
F4	Dips, Interruptions, Rapid voltage changes, and Swells: events table, trends.
F5	Unbalance, Frequency, and Mains Signaling: events table, trends, and bar graphs for each phase.

Setting up the Analyzer



The SETUP key gives access to a menu to configure the Analyzer for your measurements.

Use the arrow keys to select the item you want to adjust: date, time, GPS time sync with optional adapter, wiring configuration, nominal frequency, nominal voltage, limits, current and voltage probe type. User ID is adjusted under F4 USER ID.

Press ENTER to reach the selected adjustment menu.

Use the arrow keys to select and adjust the selected item.

Press F5 to confirm the selection and to return to the SETUP menu.

Note: Limits gives access to submenus to recall, customize, and save 6 sets of Power Quality criteria. For detailed information refer to *Chapter 18 in the Users Manual* on the accompanying CD-ROM.

Function keys give access to submenus to adjust:

Displayed information language.

Information on Analyzer Version, Options and Calibration date.

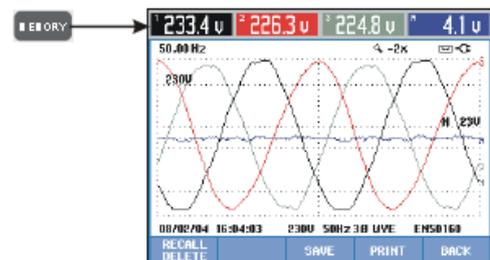
Offset, span, waveform persistence, and other settings to optimize measurements. Adjustment during a measurement is possible to enable better viewing of trends and waveforms.

Fluke 434/435 Getting Started

Phase Identification/Colors, Printer type, RS232 interface, Auto display dimming, Memory configuration, reset to FACTORY DEFAULTS, USER ID, display CONTRAST. Memory configuration: allows to optimize memory configuration for logging or for screens/data storage.

Confirm the selections and return to the previous measurement.

PRINT. A data file includes screen, trends, Meter screens, settings and limits. You may use cursor and zoom after recall.



Save screens

Press to save a screen copy. To recall a screen press the MEMORY key.

Select a file name for the screen to be saved: use the arrow keys to choose characters and their position.

Confirm the selections and return to the previous measurement.

The function keys allow the following selections:

Access to a submenu to recall/delete screens or data.

Saves the current measurement as a Data file.

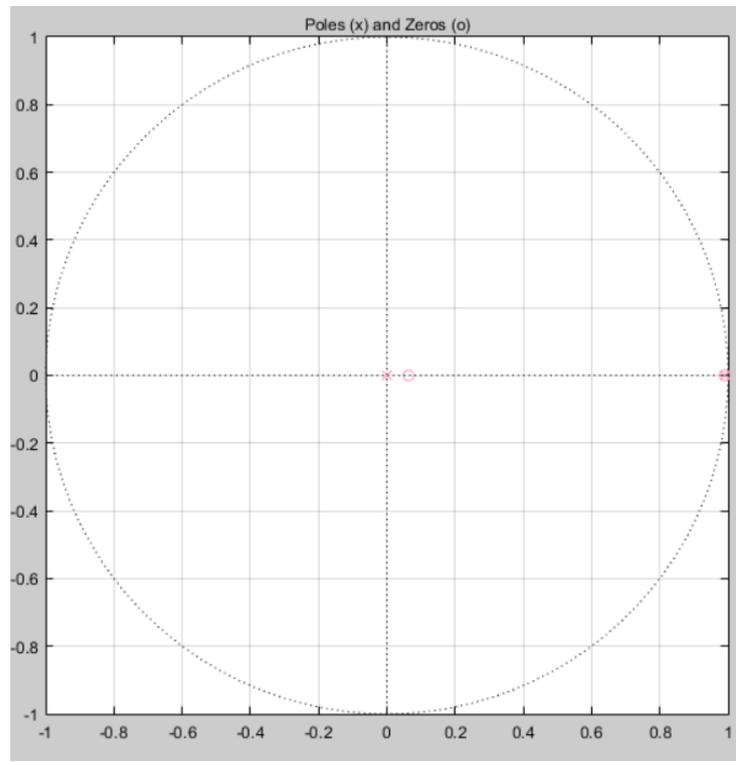
Prints current screen.

Return to the last measurement.

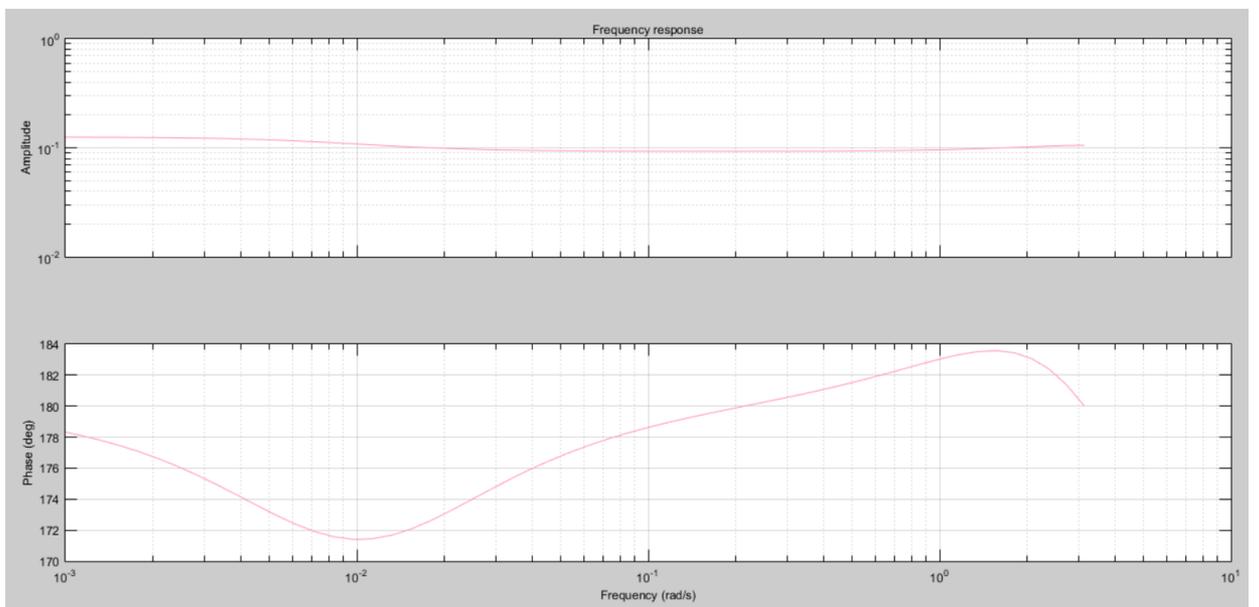
Memory Use

The MEMORY key gives access to a menu to SAVE, RECALL, DELETE Data and Screen copies and to

ANEXO D: COMPORTAMIENTO MODELO BJ [3 2 3 1 0]



Polos y Ceros del modelo BJ [3 2 3 1 0]



Respuesta en frecuencia del modelo BJ [3 2 3 1 0]