

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Electrónico

Identificación de un Modelo para una Estructura Flexible

Concepción, Diciembre de 2014

Jorge Andrés Fuentes Stuardo

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Identificación de un Modelo para una Estructura Flexible

Jorge Andrés Fuentes Stuardo

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Diciembre 2014

Resumen

En este documento se muestran los aspectos necesarios para proponer un modelo matemático que represente el comportamiento dinámico de una estructura flexible de aluminio montada en el Laboratorio de Control del Procesos (Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción) usando datos de entrada y salida del sistema.

Para comenzar, se realizan estudios de la teoría de Identificación de Sistemas, los métodos de identificación, la selección de modelos, la estrategia de ajuste de parámetros y la validación del modelo propuesto.

Luego se muestra el Set-Up experimental del sistema que se trabaja, específicamente el diseño de la estructura flexible y la descripción del conjunto de equipos proporcionados por la marca BECKHOFF que componen el sistema completo.

Además, se implementa el hardware y se programa el software disponible para realizar experimentalmente un sistema que entregue datos de entrada y salida para la identificación del modelo.

Se diseña un experimento para realizar la adquisición de datos teniendo en cuenta cómo responde la aceleración de la estructura (salida del sistema) respecto a la aceleración de un motor que rige como actuador (entrada del sistema), para obtener un modelo que caracterice la relación matemática existente entre estas dos variables.

Posteriormente, se proponen las estructuras de modelos discretos A.R.X, A.R.M.A.X y Box-Jenkins para ajustar los datos obtenidos a la curva de salida, para así obtener un modelo de la estructura y validarla.

Finalmente, se proponen métodos de validación de la propuesta, donde se constata que los modelos propuestos tienen un ajuste cercano a un 90% de la salida del sistema, pero se dejan trabajos futuros enfocados mayormente para mejorar su ajuste a su realidad física.



“Gracias por tanto, perdón por tan poco”.

Agradecimientos

A mis padres, María Lila y Jorge Alejandro. A mis hermanos, Paulina y Diego, esto es de ustedes. Por el amor, el apoyo irrestricto y la comprensión en los momentos más duros de mi carrera. A mi Meme, Tío Pablo, Tía Vanessa, Tío Arán y Francesca, por su cariño y apego incondicional. A mi Tía Laura, por sus oraciones deseando lo mejor para mí, sobretodo en esta última etapa.

A los Pesadillas, los más lúdicos momentos en mi periplo por la UdeC se los debo a ellos: Andrés Jerez, Renzo Rivera, Iván Faúndez, Agustín Alarcón, Francisco Anabalón y Rodrigo Ávila. Quedarán para el recuerdo siempre grandes conversaciones paseándonos por los más diversos temas (mujeres, fútbol, tecnología, televisión, etc), así como también todas las salidas a comer y las que aún tenemos pendientes. Por todos estos años de amistad, respaldo y apoyo mutuo académico. Mi respeto y admiración hacia ustedes, como personas son indiscutiblemente categoría superclase. A Christopher San Juan y Rodrigo Arrau, que también aportaron su granito de arena para que mi día a día fuera más ameno.

Fruto de esta inconmensurable lealtad, creamos un experimento disfrazado de equipo de babyfútbol para competir en el Campeonato DIE: *Pesadillas FC*, del cual me tocó llevar el estandarte con mucho orgullo en su última etapa. A Gerardo, “Mago”, “Chino” y Emilio, por acompañarnos y sentirse parte de esta locura que dio paso al mejor camarín del mundo. A los cracks de Roja Electrónica y ElectroTintos por apañarnos con amistosos y pasar un rato agradable dentro de una cancha.

A Don Christopher y Mario Castro, a la Sra. Érika Vicente, a la Srta. Romina Morales y a todo el equipo de colegas en **Full Planet**. Hasta la fecha me han hecho sentir imprescindible en la Empresa y han sido un pilar fundamental en mi formación laboral. Por su comprensión y por estar ahí cuando más los necesité. Al Jose, mi compañero de cada domingo y festivo, somos los mejores.

Al Sr. Patricio Orellana, el popular “Don Pato”, por la disposición desde un tornillo hasta su música que me permitió desarrollar este trabajo en un ambiente grato. Al Sr. Ramón Lillo, por el inicio de este proyecto, y a la Srta. Inés Lillo, por su candidez y por aguantar que entregásemos las tareas a última hora.

A todos los compañeros y docentes que tuve desde Plan Común hasta los últimos ramos.

A Dios, mi familia, tíos y primos, y amigos, por los momentos de desahogo y compañía.

A mi profesor patrocinante y a mis profesores de comisión, por su orientación y sus consejos.

Y por último, a todos aquellos que estuvieron conmigo y jamás se dieron cuenta.

...GRACIAS.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	X
ABREVIACIONES.....	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1.1 <i>Generalización</i>	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	1
1.2.1 <i>Identificación de Sistemas: Teoría y Aplicaciones.</i>	1
1.2.2 <i>Estructura Flexible</i>	2
1.2.3 <i>Software y Hardware</i>	3
1.2.4 <i>Discusión</i>	4
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	5
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	7
2.2. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN	9
2.3. ANTECEDENTES EN EL TEMA	9
2.3.1 <i>Modelado basado en el Sistema Masa-Resorte</i>	9
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SET-UP DE TRABAJO.....	12
3.1. INTRODUCCIÓN	12
3.2. ESTRUCTURA	12
3.2.1 <i>Diseño</i>	12
3.2.2 <i>Construcción</i>	13
3.3. GABINETE DE CONTROL.....	14
3.4. ACTUADOR	15
3.5. SENSADO DE DATOS	15
CAPÍTULO 4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
4.1. INTRODUCCIÓN	16
4.2. ASPECTOS ESENCIALES	17
4.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	18
CAPÍTULO 5. OBTENCIÓN DE DATOS.....	20
5.1. INTRODUCCIÓN	20
5.2. EXCITACIÓN DEL SISTEMA	20
5.3. FILTRADO DE SEÑALES.....	22
5.4. OBTENCIÓN DE DATOS MEDIANTE TWINCAT	23
5.5. EXPORTACIÓN DE DATOS MEDIANTE MATLAB	25
5.6. PROCESAMIENTO Y SELECCIÓN DE DATOS PARA IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN.	28
CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE MODELO.....	30

6.1.	INTRODUCCIÓN	30
6.2.	ESTRUCTURAS DE MODELO	30
6.3.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS	31
CAPÍTULO 7. OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ESTRATEGIA		32
7.1.	INTRODUCCIÓN	32
7.2.	CONSIDERACIONES	32
7.2.1	<i>De los Modelos</i>	32
7.2.2	<i>De la Herramienta de Identificación de Sistemas</i>	33
7.3.	OBTENCIÓN DE MODELOS PROPUESTOS	33
7.4.	MODELOS OBTENIDOS	39
7.5.	VALIDACIÓN DE MODELOS	40
7.5.1	<i>Validación Visual</i>	40
7.5.2	<i>Análisis Residual</i>	40
7.5.3	<i>Respuesta en Frecuencia</i>	42
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES		43
8.1.	SUMARIO	43
8.2.	CONCLUSIONES	43
8.3.	TRABAJOS FUTUROS	44
BIBLIOGRAFÍA.....		46
ANEXO A. HARDWARE UTILIZADO		47
A.1.	PC C6925-0010.....	47
A.2.	SERVO-DRIVER AX5201.....	48
A.3.	SERVOMOTOR AM8022.....	49
A.4.	ACELERÓMETRO SPARKFUN ADXL335.....	50
A.5.	MÓDULO ACOPLADOR EK1100.....	52
A.6.	MÓDULO DE ENTRADA EL3702.....	53
ANEXO B. SOFTWARE UTILIZADO		55
B.1.	TWINCAT XAE.....	55
B.1.1	AMBIENTE PROGRAMACIÓN ST	56
B.1.2	AMBIENTE PROGRAMACIÓN LD	57
ANEXO C. PROGRAMACIÓN EN TWINCAT XAE.....		58
C.1.	BLOQUES DE MOVIMIENTO EN LD.....	58
C.1.1	BLOQUE PRINCIPAL. <i>MC_POWER</i>	58
C.1.2	BLOQUE DE MOVIMIENTO DE IDA. <i>MC_MOVERELATIVE</i>	60
C.1.3	BLOQUE DE MOVIMIENTO DE REGRESO. <i>MC_MOVEADDITIVE</i>	63
C.2.	PROGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS.	65
ANEXO D. DESARROLLOS MATEMÁTICOS		66
D.1.	ESTRUCTURAS DE MODELOS DISCRETOS	66
D.2.	MÍNIMOS CUADRADOS.....	67
D.3.	ANÁLISIS RESIDUAL	68
ANEXO E. PROGRAMACIÓN EN MATLAB		70
E.1.	EXPORTACIÓN DE DATOS DESDE TWINCAT.....	70
E.1.1	GRAFICADO.M.....	70

Lista de Tablas

Tabla 4-1. Problemáticas de Sistemas de Control.....	16
Tabla 5-1. Variables de movimiento del motor.....	21
Tabla 6-1. Estructuras de Modelos Paramétricos.....	30
Tabla 7-1. Polos modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$	36
Tabla 7-2. Modelos Obtenidos.....	39
Tabla A- 1. Características Técnicas PC C6925-0010.....	47
Tabla A- 2. Características Técnicas Servo-Driver AX5201.....	48
Tabla A- 3. Características Técnicas Servomotor AM8022.....	50
Tabla A- 4. Características ADXL335.....	50
Tabla A- 5. Configuración de Pines ADXL335.....	51
Tabla A- 6. Especificaciones Técnicas EK1100.....	53
Tabla A- 7. Especificaciones Técnicas EL3702.....	54
Tabla C- 1. Entradas y salidas del bloque <i>MC_Power</i>	59
Tabla C- 2. Entradas y salidas del bloque <i>MC_MoveRelative</i>	61
Tabla C- 3. Entradas y salidas del bloque <i>MC_MoveAdditive</i>	63



Lista de Figuras

Fig. 2-1. Algoritmo básico de Identificación	8
Fig. 2-2. Estructura modelada para control con A.M.D	10
Fig. 3-1. Especificación Estructura. (a) Frontal, (b) Diagonal	12
Fig. 3-2. Muestra de Estructura Construida	13
Fig. 3-3. Gabinete de Control.....	14
Fig. 3-4. Actuador y Sensor adosados a la Estructura.....	15
Fig. 4-1. Estructura básica de un Sistema.	16
Fig. 4-2. Modelo Simplificado del Sistema.....	17
Fig. 4-3. Diseño experimental para obtención de datos.	19
Fig. 5-1. Configuración manual de variables de entrada al motor	21
Fig. 5-2. Comparación entre registro de datos sin filtro y con filtro.	22
Fig. 5-3. Datos de entrada registrados en TwinCAT Measurement.....	23
Fig. 5-4. Datos de salida registrados en TwinCAT Measurement	24
Fig. 5-5. Datos de Entrada y Salida obtenidos en MATLAB.	26
Fig. 5-6. Acercamiento de la gráfica generada por la obtención de datos.	27
Fig. 5-7. Espectros de Frecuencia entrada y salida del sistema.	28
Fig. 5-8. Acercamiento Espectros de Frecuencia.....	29
Fig. 6-1. Diagramas de Bloques equivalentes de las estructuras.	31
Fig. 7-1. Selección de mejores estructuras A.R.X	34
Fig. 7-2. Ajuste modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$	35
Fig. 7-3. Mapa de polos y ceros del modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$	36
Fig. 7-4. Ajuste modelo A.R.M.A.X con $n_a=8$, $n_b=2$, $n_c=2$ y $n_k=10$	37
Fig. 7-5. Ajuste modelo B.J con $n_b=1$, $n_c=1$, $n_d=6$, $n_f=2$ y $n_k=10$	38
Fig. 7-6. Análisis residual Modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$	40
Fig. 7-7. Análisis residual A.R.M.A.X con $n_a=8$, $n_b=2$, $n_c=2$ y $n_k=10$	41
Fig. 7-8. Análisis residual modelo B.J con $n_b=1$, $n_c=1$, $n_d=6$, $n_f=2$ y $n_k=10$	41
Fig. 7-9. Respuesta en Frecuencia modelos obtenidos.....	42
Fig. A- 1. Unidad PC C6925-0010 (Imagen Referencial).....	47
Fig. A- 2. Unidad Servo-Driver AX5201 (Imagen Referencial).....	48
Fig. A- 3. Servomotor AM8022 (Imagen Referencial).....	49
Fig. A- 4. Cable de Conexión Servomotor AM8022 (Imagen Referencial)	49
Fig. A- 5. Triple Axis Accelerometer Breakout, ADXL335 (Imagen Referencial).....	51
Fig. A- 6. Unidad EK1100. (Imagen Referencial)	52
Fig. A- 7. Unidad EL3702. (Imagen Referencial).....	53
Fig. B- 1. Ventana de Inicio TwinCAT XAE	55
Fig. B- 2. Ambiente Programación ST.....	56
Fig. B- 3. Ambiente Programación LD	57
Fig. C- 1. Bloque <i>MC_Power</i>	58
Fig. C- 2. Bloque <i>MC_MoveRelative</i>	60
Fig. C- 3. Bloque <i>MC_MoveAdditive</i>	63

Nomenclatura

Escalares:

Res_{EL3702} : Resolución EL3702

Res_S : Resolución mostrada

$V_{ADXL,X}$: Voltaje Eje X Acelerómetro

$V_{max,EL3702}$: Voltaje máximo EL3702

p_z : Polo de un sistema discreto

$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|$: Norma del vector $\boldsymbol{\varepsilon}$

Vectores:

$\mathbf{y}(k)$: Vector de k salidas medidas

$\boldsymbol{\varphi}^T(k)$: Vector de k regresores o de información.

$\boldsymbol{\theta}(k)$: Vector de k parámetros

$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$: Vector de k parámetros estimados

$\boldsymbol{\varepsilon}(k)$: Vector error



Abreviaciones

Mayúsculas

A.M.D	: Active Mass Damper (Amortiguador de Masa Activa)
A.R.M.A.X	: Auto-Regressive Moving Average eXogenous Inputs Model
A.R.X	: Auto-Regressive with eXogenous Inputs Model
B.J	: Box-Jenkins Model
E.F	: Estructura Flexible
H.M.D	: Hybrid Mass Damper (Amortiguador de Masa Híbrida)
I.D.S	: Identificación de Sistemas
L.D	: Ladder
L.M.I	: Linear Matrix Inequalities (Desigualdades Matriciales Lineales)
M.C	: Mínimos Cuadrados
M.I.M.O	: Multiple Input Multiple Output (Varias Entradas Varias Salidas)
O.E	: Output Error Model
P.R.B.S	: Pseudo Random Binary Sequence
R.G.O	: Optimización Genética Restringida
S.F.C	: Sequential Funcion Chart
S.I.S.O	: Single Input Single Output (Una Entrada Una Salida)
S.I.T	: System Identification Toolbox
S.T	: Structured Text
T.M.D	: Tunes Mass Damper (Amortiguador de Masa Sintonizada)
XAE	: Extended Automation Engineering

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

1.1.1 Generalización

Hoy en día es útil contar con técnicas de control para estructuras flexibles que puedan contrarrestar movimientos que puedan causarle daños.

Se piensa de inmediato en un contexto de carácter sísmico, donde un movimiento de gran magnitud que afecte a una estructura flexible puede ser contrarrestado por mecanismos que pueden ser diseñados en base a estrategias conocidas de control.

Para que dicha estrategia sea diseñada, se debe plantear antes un modelo matemático que represente al sistema flexible.

Dentro de los métodos principales para la obtención de un modelo están el modelado teórico (basado en la fenomenología física y las leyes para describir el modelo) y la identificación del sistema (modelo desconocido, basado en experimentos y obtenciones de datos de en la planta).



1.2. Trabajos Previos

La revisión bibliográfica está centrada en la teoría de identificación de sistemas, en las distintas alternativas de modelado de una E.F y en el aprendizaje de manejo del equipamiento disponible para la implementación de la planta.

1.2.1 Identificación de Sistemas: Teoría y Aplicaciones.

- ♣ J. Norton, “*An Introduction to Identification*”, Department of Electronic and Electrical Engineering University of Birmingham, Inglaterra: Academic Press, 1986. [1]

Texto que muestra aspectos básicos de Identificación de Parámetros, además de resaltar la importancia de esta técnica de obtención de modelo, con Mínimos Cuadrados como su principal herramienta de estimación de parámetros.

- ♣ M. López Guillén, “*Identificación de Sistemas. Aplicación al Modelado de un Motor de CC*”. Universidad de Alcalá. Alcalá, España, 1999. [2]

Texto que muestra los conceptos básicos de I.D.S aplicados a un motor de C.C. La propuesta que realiza es ajustar el modelo a la estructura A.R.X para caracterizar el sistema. Además muestra un apéndice de la teoría aplicada en MATLAB.

Su principal debilidad radica en la carencia de profundidad en las ejemplificaciones.

- ♣ L. S. Garrido Bullón, “*Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-Lineales mediante R.G.O*”. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España, 2000. [3]

Esta tesis presenta el uso de R.G.O como método para la identificación de sistemas no-lineales dinámicos orientados al control predictivo de un Sistema M.I.M.O de Rotores Gemelos y a la localización de robots mediante sensores. El desarrollo matemático permite entender la propuesta y los ejemplos numéricos la validan.

- ♣ C. Kunusch, “*Identificación de Sistemas Dinámicos*”. Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina, 2003. [4]

Apunte académico que entrega los conceptos generales de I.D.S con una breve introducción conceptual de Sistemas Dinámicos. Aborda también las distintas estructuras y el detalle matemático que requiere para su comprensión. Muestra una clara influencia, en cuanto a la nomenclatura, a lo mostrado en [1].

1.2.2 Estructura Flexible

- ♣ A. Forrai, S. Hashimoto, H. Funato y K. Kamiyama, “*Structural Identification and Control of Flexible Structures*”. Computing & Control Engineering Journal, Institution of Electrical Engineers. Stevenage, UK, 2001. [5]

Texto que aborda desde el punto de vista civil de propuestas de identificación y control de estructuras flexibles aplicadas a edificaciones con el fin de paliar los efectos sísmicos. Las propuestas mostradas en esta obra son el H.M.D, que es una combinación del A.M.D y el T.M.D como estrategia de absorción de vibraciones, el aislamiento híbrido base más un modelo linealizado y generalizado para N pisos de la estructura justamente vista en el presente documento.

- ♣ GMSint. Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes, «Active Vibration Control in Flexible Structures Using LMIs» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=-VxDpuAJhDk>. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Ilha Solteira, Brasil. [6]

Video publicado en YouTube que muestra la acción de control de una estructura flexible similar a la trabajada en el presente documento usando A.M.D y L.M.I, donde se muestra visualmente los efectos del control en la estructura.

Cabe consignar que esta referencia fue el que dio el comienzo al proyecto trabajado en este documento.

1.2.3 Software y Hardware

- ♣ The MathWorks, Inc., «Active Vibration Control in Three-Story Building» [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/robust/gs/active-vibration-control-in-three-story-building.html>. [7]

El sitio oficial de MATLAB aborda una simulación de un sistema para la seguridad de estructuras edificadas durante terremotos usando A.M.D para el aislamiento de vibraciones producidas por el sismo. El A.M.D se ubica en la parte superior del edificio y tiene un sensor en cada piso, transformando el sistema en un sistema M.I.M.O. La aceleración del terremoto se modela como un proceso de ruido blanco filtrado a través de un filtro de Kanai-Tajimi. La propuesta se aplica en una estructura de 3 pisos.

La referencia muestra gráficamente el efecto sin y con el control realizado.

- ♣ BECKHOFF Automation, «BECKHOFF Automation» [En línea]. Available: www.beckhoff.com. [8]

Sitio oficial del fabricante BECKHOFF, para estudiar el funcionamiento y la conexión de los distintos dispositivos usados para el sistema, además del uso de los softwares que ellos proveen para manipular los dispositivos.

Cabe señalar que se tiene alto contenido de documentación descriptiva de cada uno de los productos que ellos comercializan.

- ♣ BECKHOFF Automation, «BECKHOFF Information System» [En línea]. Available: infosys.beckhoff.com. [9]

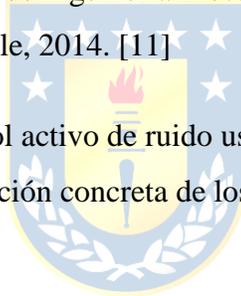
Apartado del sitio oficial que aborda conceptos explicativos acerca de la programación, conexión, entre otros aspectos relevantes para el uso de la tecnología ofrecida por BECKHOFF.

- ♣ R. I. Arrau Aldana y J. A. Fuentes Stuardo, “*Implementación de Estructura para Estudio de Vibraciones, Identificación y Control*”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2013. [10]

Trabajo académico que montó los cimientos del presente trabajo, en él se presenta el montaje de la estructura así como también el uso de software y hardware usado en el presente documento.

- ♣ F.J. Inostroza Lagos, “*Diseño de Controladores con Sobre-Muestreo Aplicado al Control Activo de Ruido*”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2014. [11]

Trabajo académico que realiza un control activo de ruido usando la tecnología BECKHOFF. De este trabajo se rescata el detallado y la aplicación concreta de los dispositivos a utilizar.



1.2.4 Discusión

De la revisión bibliográfica recientemente detallada se desprende que existen las herramientas para proponer un modelo y validarlo.

Existen múltiples estructuras de modelos que pueden servir o no, es por eso que el conocimiento de la teoría de Sistemas Dinámicos y de leyes físicas que rigen los comportamientos de los distintos sistemas que tiene el estudiante de Ingeniería Civil Electrónica deberían ayudar a discriminar cuál sería una opción más real para llevar la estrategia a cabo.

Se ha comprobado también que existen aplicaciones similares a lo abordado en el presente documento, por lo que es posible respaldar el trabajo a lo logrado anteriormente.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- Es posible obtener un modelo analítico que represente una Estructura Flexible a partir de datos de entrada y salida.
- Es posible validar el modelo obtenido mediante experimentación con un Set-Up implementado para los efectos.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Como ya se ha reiterado, el objetivo de este trabajo es obtener una propuesta de modelo de una E.F de aluminio usando teoría y herramientas disponibles de I.D.S.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos de aceleración del sistema de vibración mediante un sensor de aceleración o acelerómetro.
- Proponer una o varias estructuras de modelos que ajusten los parámetros del sistema de vibración.
- Realizar el procedimiento dictado por el algoritmo general de I.D.S.
- En caso de que el modelo no sea el idóneo, buscar alternativas a lo mostrado en el algoritmo.

1.5. Alcances y Limitaciones

El trabajo se limita a lo disponible en el Laboratorio de Control de Procesos, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción y a los insumos proporcionados por el Profesor Guía, Dr. Daniel Sbarbaro Hofer.

- El acelerómetro a utilizar es el Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL335, fabricado por SPARKFUN (<https://www.sparkfun.com/products/9269>).
- El motor que regirá como actuador será el servomotor AM8022, fabricado por BECKHOFF (http://www.beckhoff.fi/english.asp?drive_technology/am8022.htm).

1.6. Temario y Metodología

En los capítulos que vienen a continuación se mostrarán desde el estudio de la teoría de la I.D.S hasta la solución propuesta.

Se comienza ilustrando el algoritmo básico de la I.D.S y se estudiarán algunos antecedentes experimentales encontrados tras la revisión bibliográfica para el problema planteado.

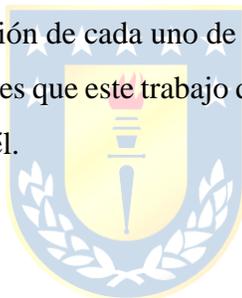
Posteriormente, se describe el Set-Up experimental y la función que cumple cada dispositivo que la compone. Cabe consignar que la descripción de los dispositivos se encuentra en el Anexo A del documento.

Luego se plantea la problemática de obtener el modelo y las consideraciones que se escogen para llevar a cabo la elaboración de la solución.

Se sigue con la obtención de datos que servirán para el proceso de identificación y su posterior procesamiento.

La siguiente etapa del procedimiento es mostrar estructuras de modelo que permitan ajustarse al comportamiento del sistema y la validación de cada uno de ellos.

Finalmente, se expresarán las conclusiones que este trabajo dejará, así como las propuestas de trabajos futuros en relación con lo contenido en él.



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Identificación de Sistemas

La identificación de sistemas es el proceso de construcción de un modelo matemático, ya sea analítico o empírico, de un sistema dinámico a partir de observaciones de entradas y salidas y del conocimiento previo del sistema. El modelo debe reproducir con suficiente exactitud las características dinámicas del proceso estudiado para los fines deseados.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la Ingeniería de Control de Procesos, ya que los modelos necesitan simular el comportamiento real en los casos en que existe un conocimiento previo limitado de la estructura del sistema.

Las etapas del proceso de identificación están desglosadas de la siguiente forma y se pueden plasmar en el diagrama de la Fig. 2-1.

- *Obtención de datos entrada y salida:* Excitación del sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registro de evolución de la salida durante un intervalo de tiempo.
- *Tratamiento previo de los datos:* En su mayoría, los datos contienen ruidos aportados por los sensores, el ambiente, entre otros factores. Es necesario el procesamiento de estos datos (generalmente uso de filtros) para facilitar y lograr una identificación mejor acabada.
- *Elección de la estructura del modelo:* Para modelos paramétricos, se debe tener en cuenta el conocimiento previo de las leyes físicas rectoras del sistema para elegir la estructura y así facilitar el modelo que lo identifique.
- *Obtención de los parámetros:* Estimación de parámetros de la estructura de modelo que se eligió (el método más usado, Mínimos Cuadrados) que mejor se ajustan a los datos de entrada y salida obtenidos en el primer paso.
- *Validación del modelo:* Consiste en la determinación del grado de ajuste requerido para la aplicación. Si el modelo no es válido, se deben revisar los aspectos necesarios para determinar la causa de la no validación del modelo (set de datos no adecuado, estructura escogida no es buena descriptora del proceso, criterio de ajuste de parámetros elegido no es el idóneo).

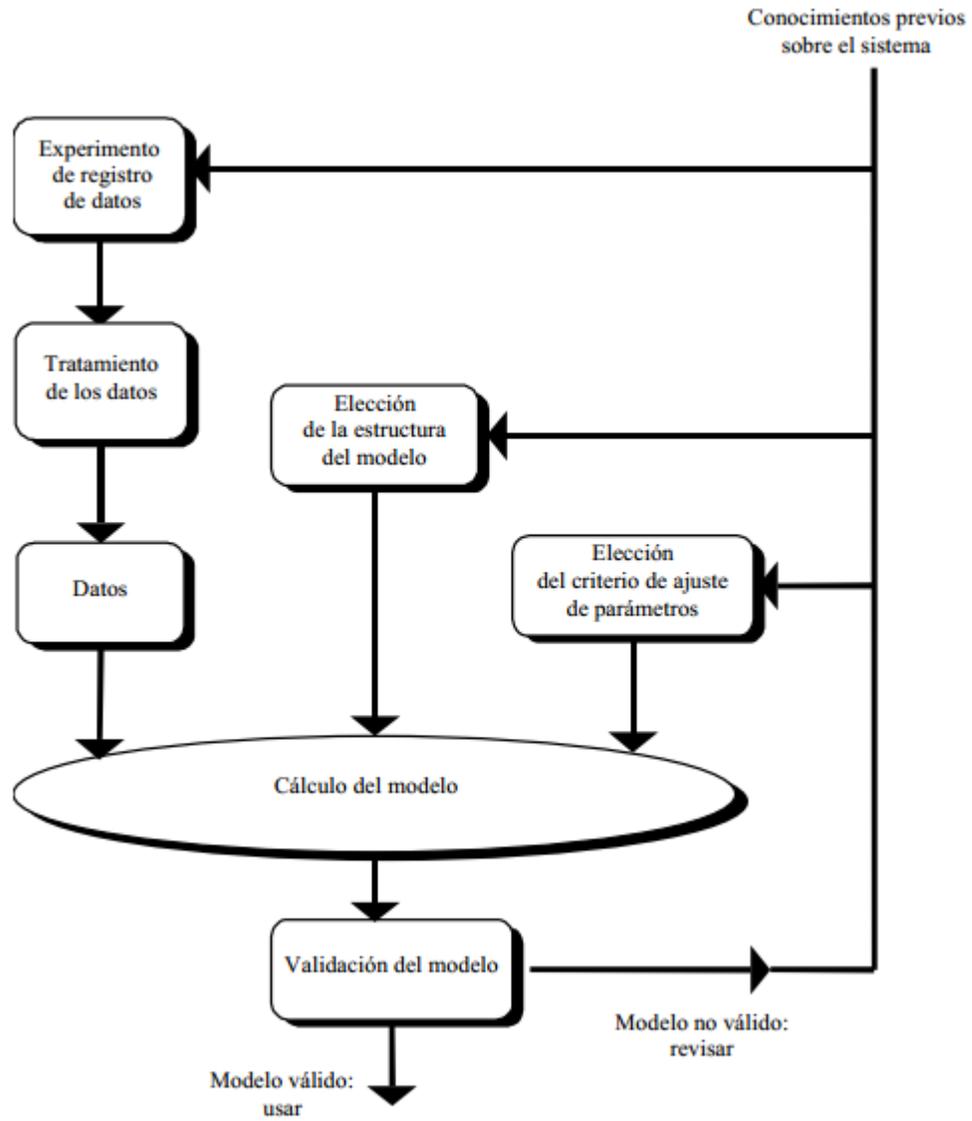


Fig. 2-1. Algoritmo básico de Identificación

2.2. Métodos de Identificación

- Según su algoritmo:
 - *Método recursivo*: Hacen una llamada a una función desde la misma y se utiliza como punto de partida un conjunto de datos que previamente fueron estimados.
 - *Método no recursivo*: Cálculo de parámetros en un solo paso.
- Según el modelo:
 - *Método paramétrico*: Estructura de modelo con parámetros a determinar.
 - *Método no paramétrico*: Identificación en base a análisis gráficos (transitorios, respuesta en frecuencia, Fourier, espectros, correlación, etc).
- Según la aplicación:
 - *Método de identificación offline*: Datos adquiridos del sistema son almacenados, transferidos a un computador y procesados a posteriori.
 - *Método de identificación online*: Datos procesados directamente mientras se efectúa la experiencia y las mediciones.

El método de identificación mostrado en este trabajo se clasifica como un método *no recursivo*, *paramétrico* y *offline*.



2.3. Antecedentes en el Tema

Debido a que el modelado y control de estructuras flexibles se ha vuelto necesario para aplicarlos a grandes escalas, como edificios y construcciones que puedan mitigar los efectos de fenómenos naturales que impliquen movimientos bruscos, se han rescatado propuestas que pueden dar luces a lo que se busca pensando en la motivación del trabajo.

2.3.1 Modelado basado en el Sistema Masa-Resorte

El Sistema Masa Resorte es un tipo de movimiento armónico simple que puede resultar de gran analogía respecto al sistema mostrado en este documento. Dado que su modelo es conocido, sirve de base para implementar uno que pueda representar la dinámica de una E.F mostrada en la Fig. 2-2.

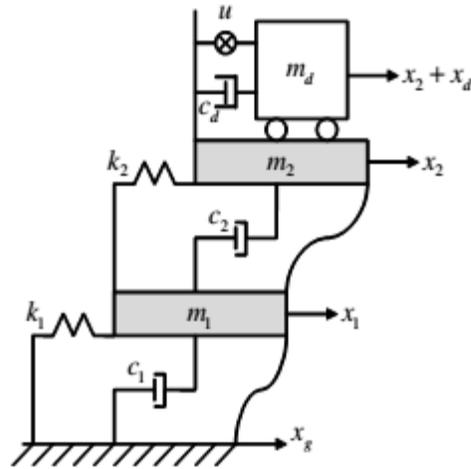


Fig. 2-2. Estructura modelada para control con A.M.D

Un modelo propuesto (Chopra, 2001) es el clásico modelo con una fuerza externa aplicada [21].

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_e \quad (2.1)$$

donde,

- m : componente de masa del sistema
- c : componente de amortiguación del sistema
- k : componente de rigidez del sistema
- f_e : fuerza externa aplicada a la estructura
- \ddot{x} : aceleración de la estructura
- \dot{x} : velocidad de la estructura
- x : posición de la estructura

Para el caso de estructuras de n-pisos, se asume que la masa de la estructura está distribuida en cada uno de los pisos, es por eso que la ecuación (2.1) se puede considerar matricialmente como:

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + F_s = -F_e \quad (2.2)$$

donde,

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$



$$F_s = Kx(t) \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) define la fuerza de rigidez del sistema cuando F_s resulta lineal en relación a la deformación que describe x . En caso de que la relación fuese no-lineal, la componente de rigidez es vista como inelástica. Esto ocurre cuando la estructura es excitada por una fuerza de gran magnitud que deforma la estructura más allá de su límite de su comportamiento elástico lineal.

La fuerza F_e externa es el modelo de la acción de la fuerza ejercida por los movimientos de la naturaleza tales como vientos o terremotos.

Capítulo 3. Descripción del Set-Up de Trabajo

3.1. Introducción

En este capítulo se mostrarán las especificaciones consideradas para la estructura, además de una breve descripción de cada software y hardware necesarios para la implementación de la planta y la obtención de datos.

3.2. Estructura

La E.F de dos pisos escogida para la obtención del modelo matemático será construida en aluminio, un material flexible y a la vez resistente para movimientos bruscos y aleatorios proporcionados por el actuador.

3.2.1 Diseño

La estructura está fabricada en aluminio, cuyas especificaciones están en la Fig. 3-1.

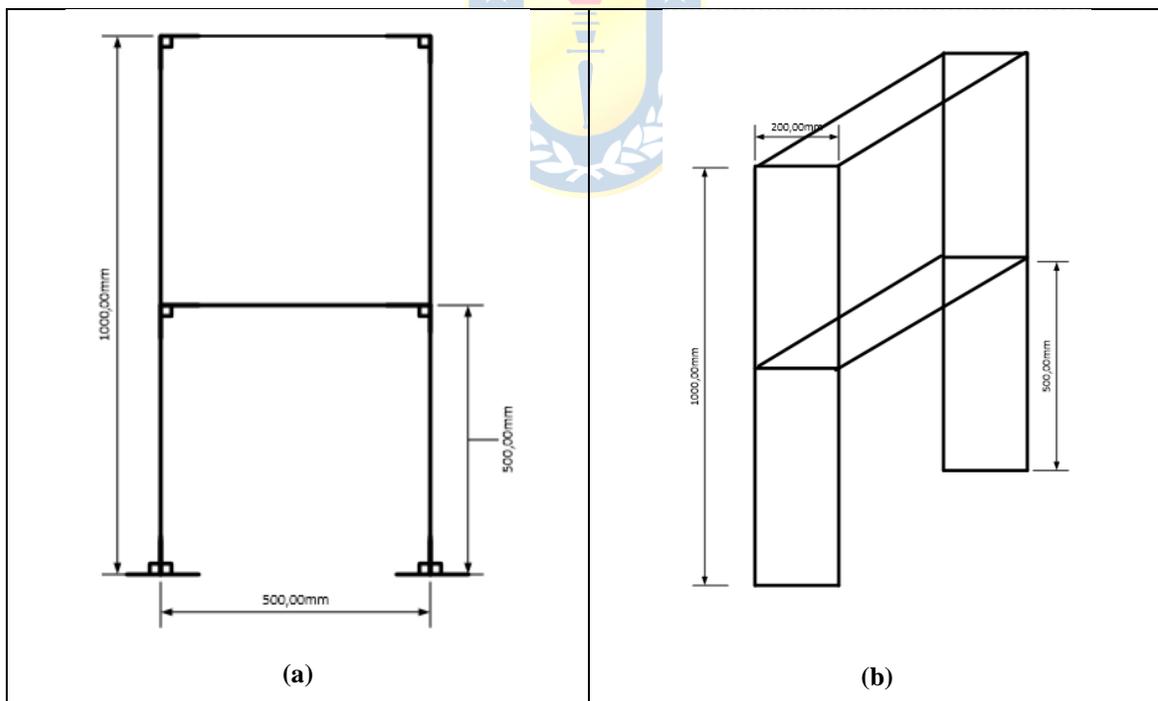


Fig. 3-1. Especificación Estructura. (a) Frontal, (b) Diagonal

Para obtener el modelo, se deberá excitar la E.F mostrada mediante un vibrador, obtener los datos de aceleración de la estructura y armar un modelo que pueda identificar el comportamiento dinámico del proceso, para así poder establecer estrategias de control asociadas al movimiento de la estructura.

3.2.2 Construcción

La elaboración de la E.F fue realizada por 3 placas de aluminio de 1000x200mm con 3mm de espesor, donde 2 de ellas hacen de los soportes y las dos mitades de la placa restante hacen de cada piso, como se muestra en la Fig. 3-2.

La estructura fue realizada en el Taller de Máquinas Eléctricas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción, a cargo del señor Ramón Lillo.



Fig. 3-2. Muestra de Estructura Construida

Luego, la estructura se acondiciona para la fijación del actuador. Esta acción hará que el sistema al excitarse logre responder de una forma más fidedigna y se minimice aquella resonancia que pueda entregar información innecesaria cuando se procese la información.

3.3. Gabinete de Control

La implementación desarrollada netamente en el Laboratorio de Control de Procesos consta de un gabinete, en el cual van los dispositivos hardware, tal como se muestra en la Fig. 3-3.

Las especificaciones técnicas de los equipos más relevantes vistos en la Fig. 3-3 están detalladas en el Anexo A de este documento.

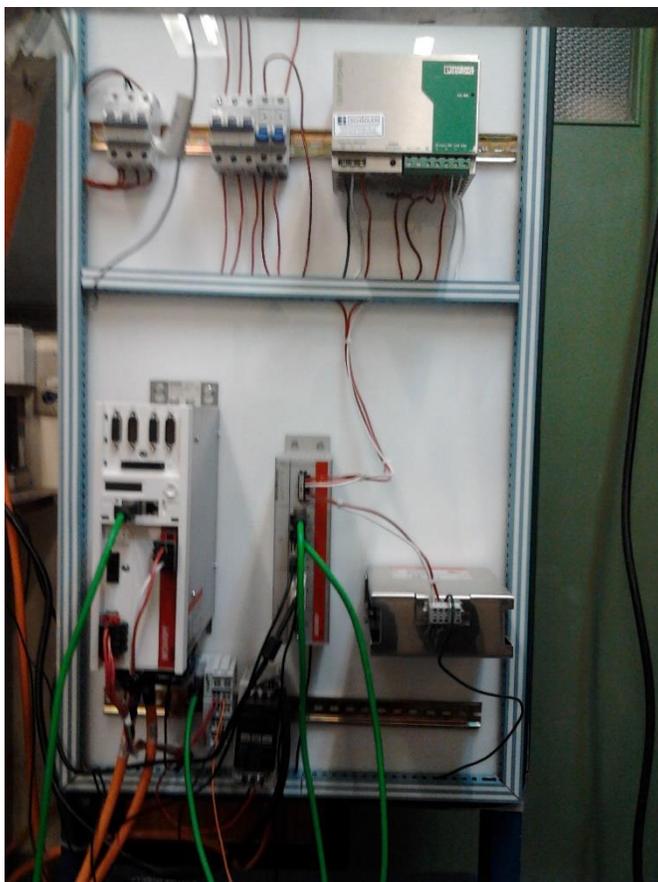


Fig. 3-3. Gabinete de Control

3.4. Actuador

Para excitar la estructura se dispone del Servomotor BECKHOFF AM8022, detallado en el apartado Anexo A-3. Mediante programación en L.D (Anexo C) se entregarán datos de velocidades, aceleraciones y frenados de entradas aleatorios para observar y registrar cómo la estructura responde.

3.5. Sensado de Datos

Para registrar los datos obtenidos, se usará como sensor el Acelerómetro SPARKFUN ADXL335 (Anexo A-4) que enviará los datos registrados al módulo de entrada BECKHOFF EL3702 (Anexo A-6).

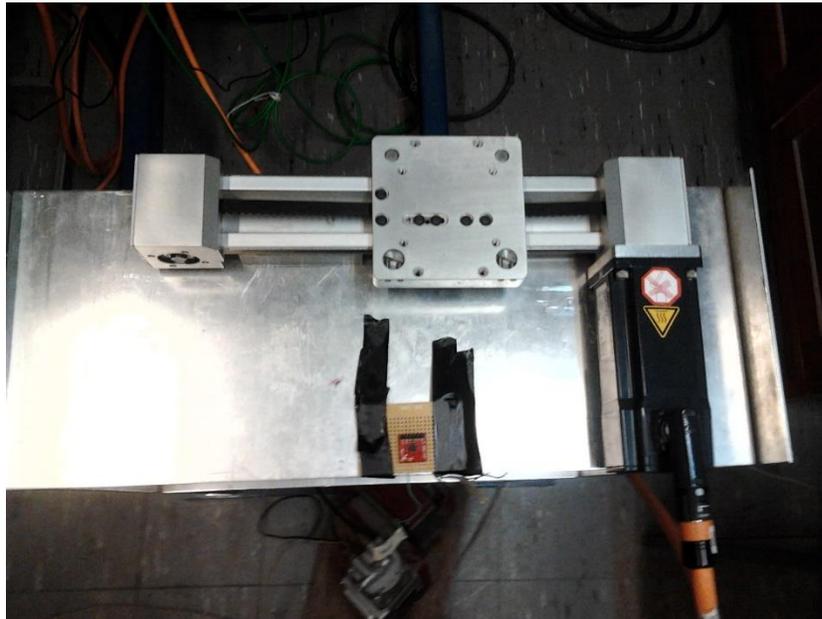


Fig. 3-4. Actuador y Sensor adosados a la Estructura

Capítulo 4. Formulación del Problema

4.1. Introducción

Según lo mostrado en el diagrama de la Fig. 2.1, el proceso de identificación se basa en una serie de pasos, siendo el primero cómo formular el problema.

Una vez que se recaba la información necesaria, es necesario trazar las directrices de cuál es el objetivo a realizar, teniendo en cuenta lo que se busca y lo que se debe tener para resolver el problema.

Particularmente, en el caso de las E.F, se ha observado que sus variables de entrada corresponden a las aceleraciones, en su mayoría proporcionadas por fuerzas externas, y la salida es la respuesta en aceleración de la estructura a la aceleración externa de entrada.

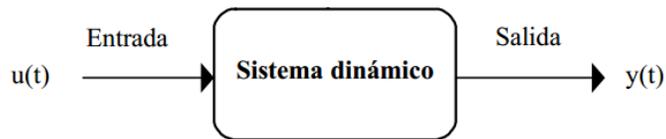


Fig. 4-1. Estructura básica de un Sistema.

La Tabla 4-1 muestra las problemáticas de los Sistemas de Control a los que se atienden, traducidas a lo que se tiene y lo que se busca del sistema mostrado en la Fig. 4-1.

Tabla 4-1. Problemáticas de Sistemas de Control

Dados	Buscado	Problema
Entrada, Modelo	Salida	Análisis
Modelo, Salida	Entrada	Control
Entrada, Salida	Modelo	Identificación

4.2. Aspectos esenciales

Como se señala en la Tabla 4-1, el proceso de identificación es el cual se busca un modelo a partir, básicamente de la entrada y la salida. El conocimiento de la dinámica del sistema es importante cuando se tiene y ayuda a obtener rápidamente un modelo que cumpla con las condiciones requeridas.

Se parten definiendo estas dos variables:

- Entrada: Aceleración del Carril del Actuador
- Salida: Aceleración de la Estructura.

Se escogen estas dos variables ya que estos sistemas responden a las aceleraciones que experimentan al ser sometidos a fuerzas. La idea también a futuro es analizar el comportamiento de una entrada representada por una fuerza, donde la aceleración es propinada por un sistema que tenga una masa no despreciable y diseñar estrategias de control que puedan contrarrestar estos movimientos, así como también crear un sistema M.I.M.O en el que se pueda medir el comportamiento que experimenta la aceleración en los distintos pisos de una estructura de este tipo respondiendo a una o varias aceleraciones de entrada.

Otro ápice que puede entregar la decisión de trabajar con aceleraciones es que el sensor que se tiene a disposición es un acelerómetro, en consecuencia se obtendrán datos de aceleración en dos puntos que se pueden considerar la entrada y la salida del sistema.

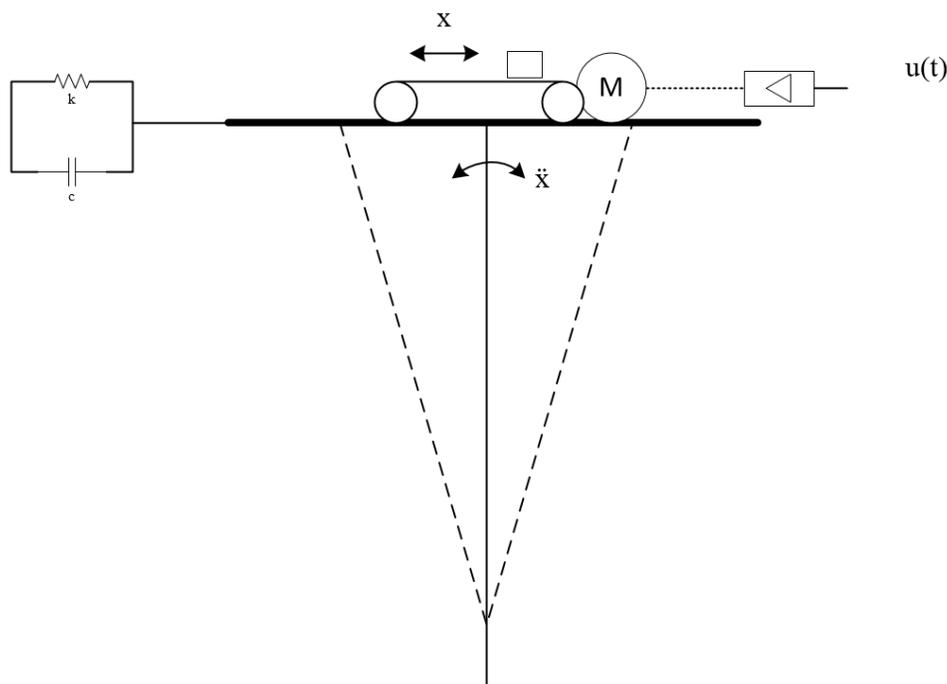


Fig. 4-2. Modelo Simplificado del Sistema

La Fig. 4-2 muestra un modelo que simplifica el sistema a caracterizar. Está basado esencialmente en el modelado que se muestra en la Fig.2-2 cuyo análisis se gesta en el Sistema Masa-Resorte con un amortiguador.

Se observa que el sistema es excitado por una fuerza proporcionada por el motor, el cual ejerce una aceleración que por la cual se mide el sistema.

4.3. Diseño del Experimento

Con el objetivo ya planteado, se comienza a diseñar la experimentación que tendrá por objetivo buscar la solución del problema formulado.

Ya se estableció que las variables de entrada y salida serán la aceleración del carril del servomotor AM8022 y la respuesta que tenga la estructura en términos de la misma variable, medida en el piso superior.

Se decide trabajar con el Eje X del acelerómetro ADXL335 por conveniencia. Una limitante es que sólo se cuenta con un acelerómetro, es por eso que son necesarias dos pruebas idénticas de excitación del sistema, una con el acelerómetro conectado en el carril del motor y otra conectada en el piso superior de la estructura.

Estos datos son leídos en forma de voltaje en el acelerómetro y son transformados por el módulo de entrada EL3702 a números de 16 bits. Esta unidad está a su vez conectada al acoplador EK1100, la cual se comunica mediante protocolo EtherCAT a la unidad PC C6925-0010.

La conexión del Servomotor AM8022 y el Servo-Driver AX5201 es mediante el cable ZK4500-8023, mostrado en la Fig. A-4 del Anexo A de este documento. Este cable es del tipo OCT (One Cable Technology), la cual es capaz de permitir el control de posición, velocidad y frenado del motor.

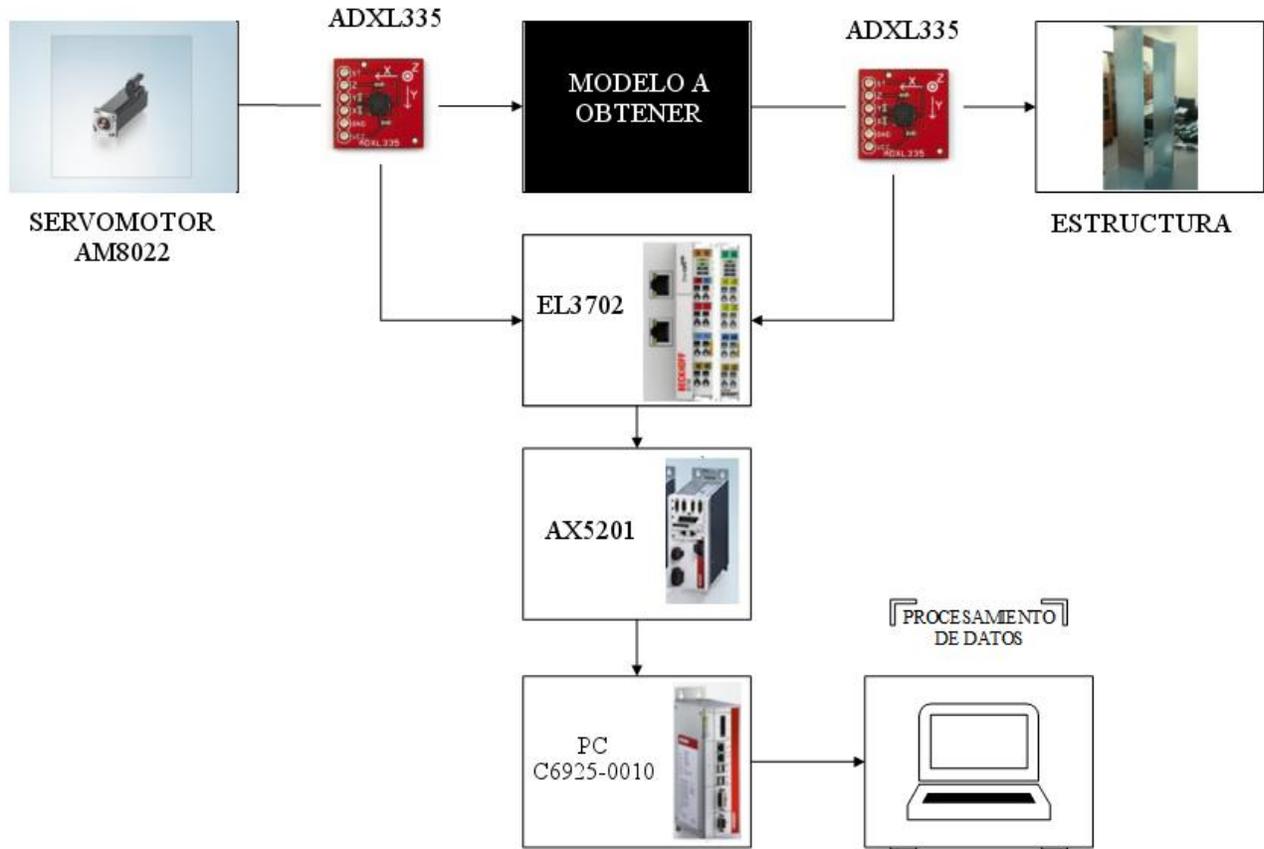


Fig. 4-3. Diseño experimental para obtención de datos.

La Fig. 4-3 muestra el diagrama en bloques del diseño experimental y la relación que tienen los equipos que aportan a la experimentación.

Capítulo 5. Obtención de Datos

5.1. Introducción

La obtención de datos es el primer paso para lograr la identificación del sistema.

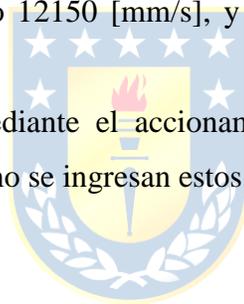
En este capítulo se entregarán las especificaciones de cómo se excita el sistema, así como también la obtención y visualización de los datos de aceleración mediante TwinCAT y su posterior procesamiento tras la exportación a MATLAB.

5.2. Excitación del sistema

Para excitar el sistema, se usó una señal de pulsos aleatoria similar a una P.R.B.S, traducida a movimientos del carril del servomotor AM8022 a velocidades, aceleraciones y frenados arbitrarios programados en L.D.

Se deja una velocidad fija, por defecto 12150 [mm/s], y se van variando las aceleraciones y los frenados de acuerdo a la Tabla 5-1.

Estos parámetros se seleccionaron mediante el accionamiento manual de la función *Reversing Sequence*. En la Fig. 5-1 se muestra cómo se ingresan estos parámetros.



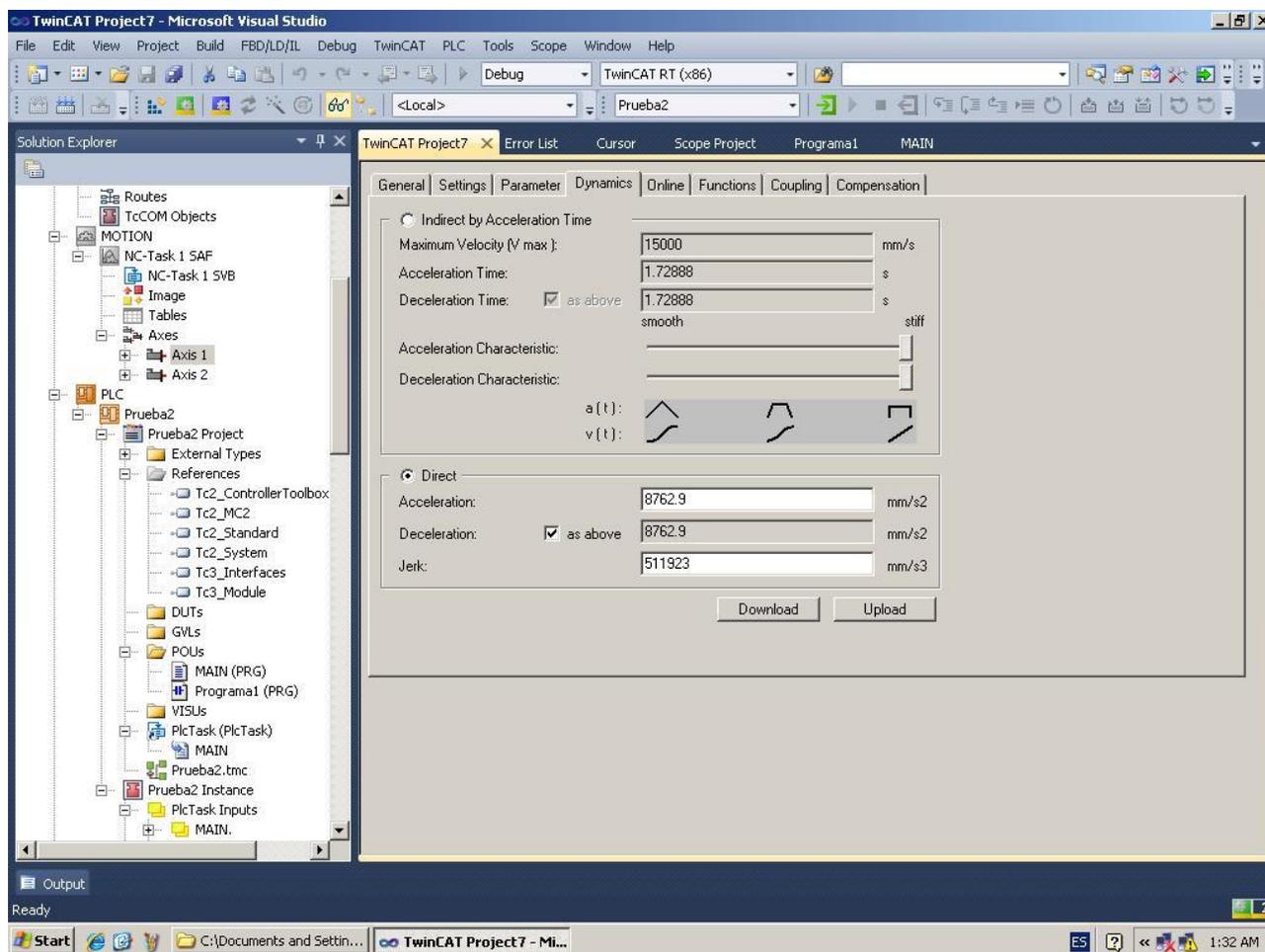


Fig. 5-1. Configuración manual de variables de entrada al motor

Conforme a las amplitudes de movimiento observadas en la E.F, se selecciona el set de valores mostrado en la Tabla 5-1 para ser después ingresados en combinaciones arbitrarias.

Tabla 5-1. Variables de movimiento del motor

	Aceleraciones [mm/s²]		Frenados [mm/s³]
Acel1	13851	Jerk1	112787
Acel2	15150	Jerk2	1.53015e06
Acel3	6060	Jerk3	612060
Acel4	12120	Jerk4	1.22412e06
Acel5	10440	Jerk5	75690
Acel6	8734.15	Jerk6	762854
Acel7	8763.05	Jerk7	511940

Estos parámetros fueron ingresados a bloques como los que se muestran en los incisos c.1.2 y c.1.3 del Anexo C del presente documento.

5.3. Filtrado de señales

Una característica importante para la identificación de todo sistema es que los datos deben poseer la menor cantidad de ruido posible, es por éstos que se adosa entre la salida del eje X del Acelerómetro y la entrada del módulo EL3702 un condensador de 4.7 [μF] recomendado por el fabricante para muestras de 1000 datos por segundo.

Para ilustrar el efecto del filtro, se realizan dos pequeñas pruebas de excitación idénticas, una para obtener datos no filtrados y otra para datos filtrados.

La Fig 5-2 muestra la comparativa entre la señal obtenida antes y después de la conexión del filtro capacitivo.

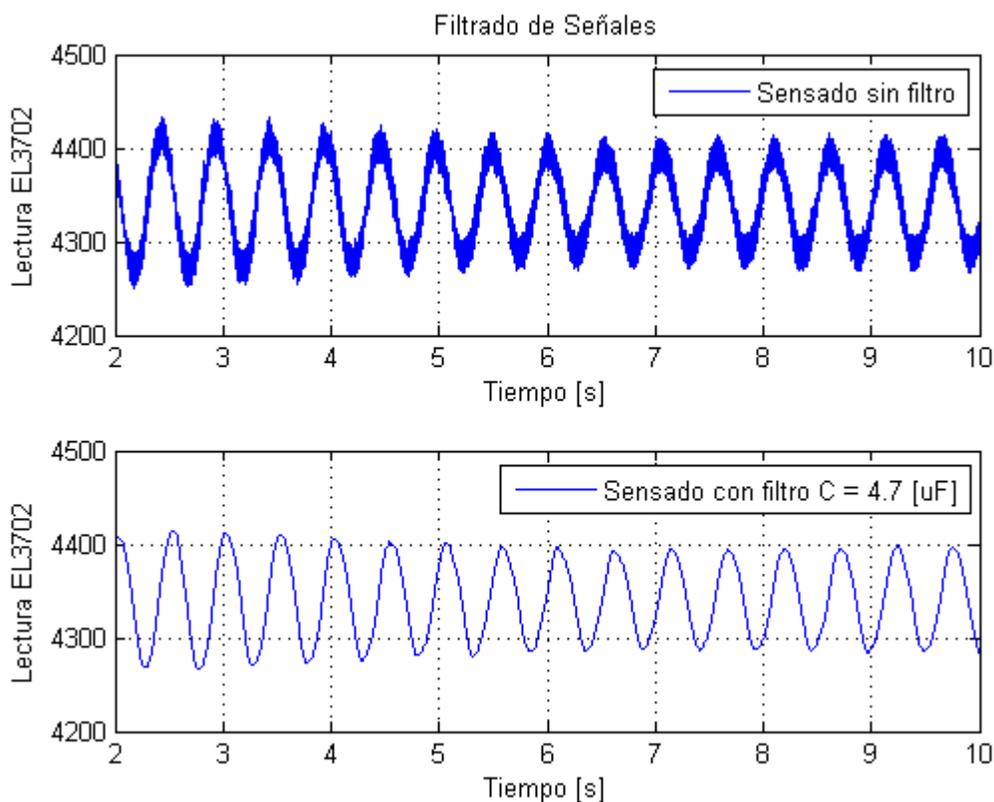


Fig. 5-2. Comparación entre registro de datos sin filtro y con filtro.

Se puede apreciar además la sensibilidad al ruido de la que sufre el sensor de aceleración, por lo que la forma de onda mejora bastante y así se pueden obtener datos más confiables para la identificación del sistema.

5.4. Obtención de Datos Mediante TwinCAT

Con los movimientos definidos en la programación, se extiende la experimentación en 1:48 minutos y cada dato registrado se muestrea cada 10[ms]. Dicho proceso se puede observar en el ambiente TwinCAT Measurement.

Como se puede observar en las Fig. 5-3 y Fig. 5-4, los datos adquiridos se muestran en la ventana izquierda del software TwinCAT Measurement, y a la derecha se observan distintas cualidades del proceso de adquisición como el tipo de datos que está recibiendo (INT16, enteros de 16 bits leídos por EL3702), el tiempo de muestreo y el color de la gráfica.

En el eje ordenada se observa el tiempo en que la adquisición de datos va evolucionando y en el eje abscisa se muestra el valor de 16 bits que entrega el módulo EL3702.

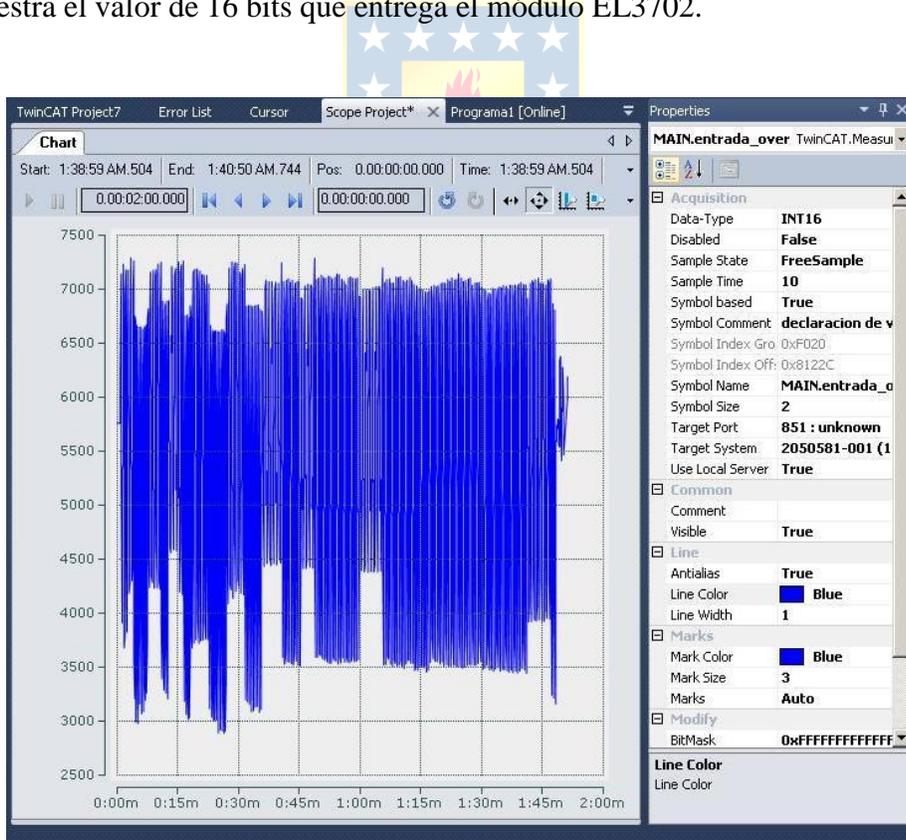


Fig. 5-3. Datos de entrada registrados en TwinCAT Measurement

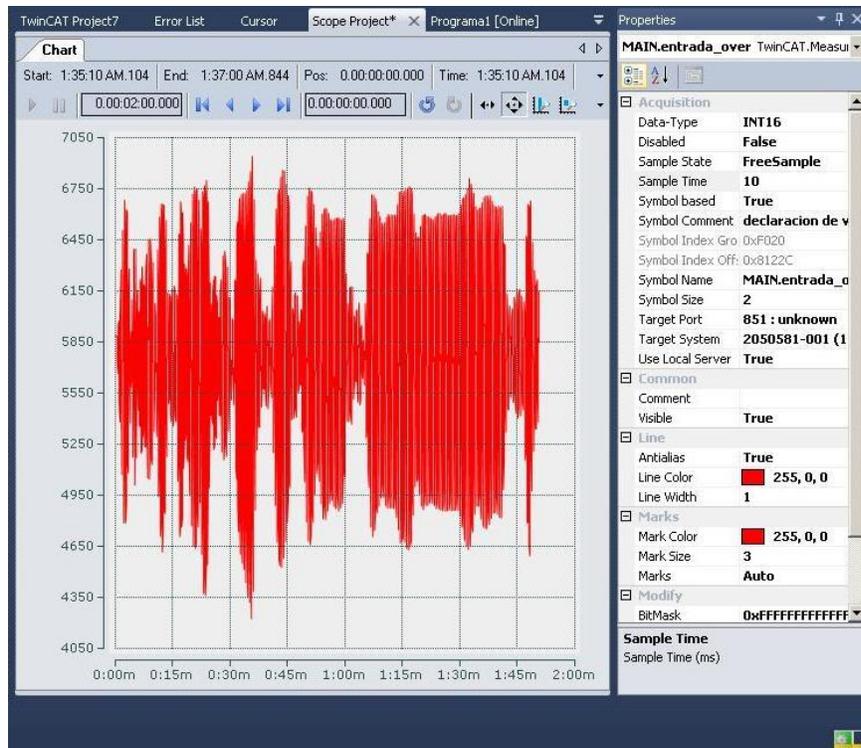


Fig. 5-4. Datos de salida registrados en TwinCAT Measurement

Para la conversión de datos se usa el voltaje medido en la salida del acelerómetro se toma en cuenta el dato de lectura está detallado en la Tabla A-7 del Anexo A del presente documento.

Para ejemplificar, cuando el acelerómetro no está enviando ningún dato al EL3702, se tiene:

$$Res_s = \frac{Res_{EL3702} \cdot V_{ADXL}}{V_{max,EL3702}} \quad (5.1)$$

Usando la Ecuación (5.1) se tiene:

$$A_{mostrada} = \frac{32767 \cdot 1.72}{10} \Rightarrow A_{mostrada} = 5635.924$$

Cabe consignar que TwinCAT Measurement guarda cada dato muestreado en un archivo de texto ASCII, el cual puede ser exportado a MExcel y a su vez, a MATLAB.

5.5. Exportación de datos mediante MATLAB

Una vez guardados los datos, se realiza el procedimiento de exportación a MATLAB, lo primero que se realiza es estandarizar los valores adquiridos de entrada y salida para obtener datos más sensatos. El estudio del *datasheet* del acelerómetro ADXL335 no detalla una conversión concreta de unidades de voltaje a aceleración, por lo que se decide trabajar en unidades porcentuales [p.u], donde cada valor de 16 bits registrado se normalizará por el valor $A_{mostrada}$.

Esto se estandariza de la forma:

$$Res_s = \frac{Res_{EL3702}}{A_{mostrada}} \quad (5.2)$$

De esta forma, las gráficas observadas en las Fig. 5-2 y Fig. 5-3 se pueden observar en MATLAB tal como lo muestra la Fig. 5-5.



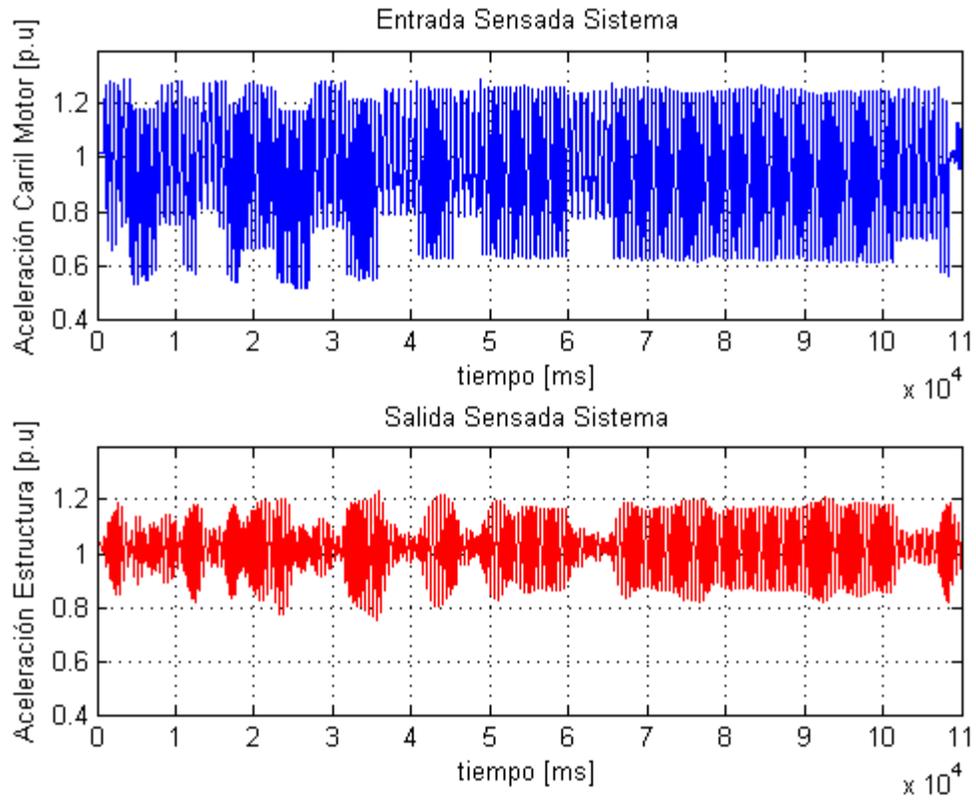


Fig. 5-5. Datos de Entrada y Salida obtenidos en MATLAB.

La Fig. 5-6 muestra también un acercamiento de la gráfica para examinar con mayor detalle la forma de onda contenida en la Fig. 5-5.

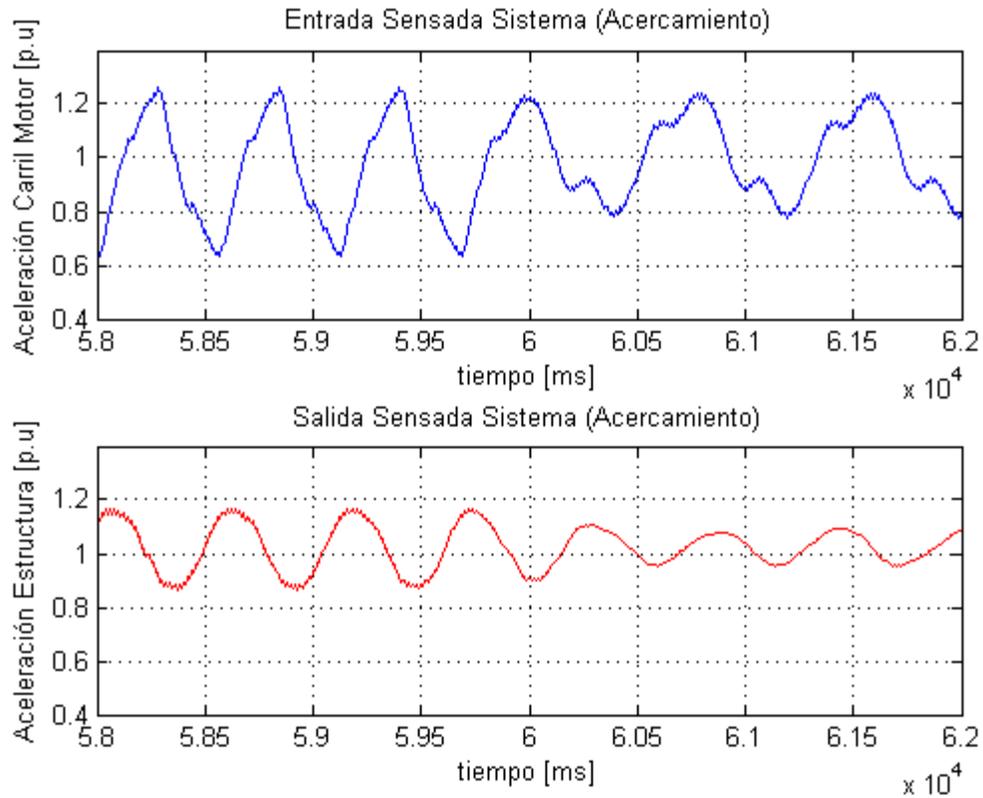


Fig. 5-6. Acercamiento de la gráfica generada por la obtención de datos.

Se puede apreciar que la respuesta de la aceleración de la estructura posee un retardo respecto de la entrada, por lo que entrega información válida a la hora de obtener el modelo requerido.

Esto es explicado debido a que la posición final del carril del servomotor genera una “colisión” con el tope final, lo que hace que la estructura tarde en responder a dicha excitación.

5.6. Procesamiento y selección de datos para identificación y validación.

Una vez obtenidos los datos, se debe discriminar cuáles son los datos que sirven para la identificación y cuáles sirven para la validación.

Según la teoría de I.D.S [1], se dice que del total de datos la primera mitad se usa para el proceso de obtención del modelo, lo cual se debe validar con la segunda mitad.

Para tener una idea del rango de validez del modelo, en la Fig. 5-7 se muestra el espectro de frecuencias de las señales aplicada en la entrada y la respuesta del sistema.

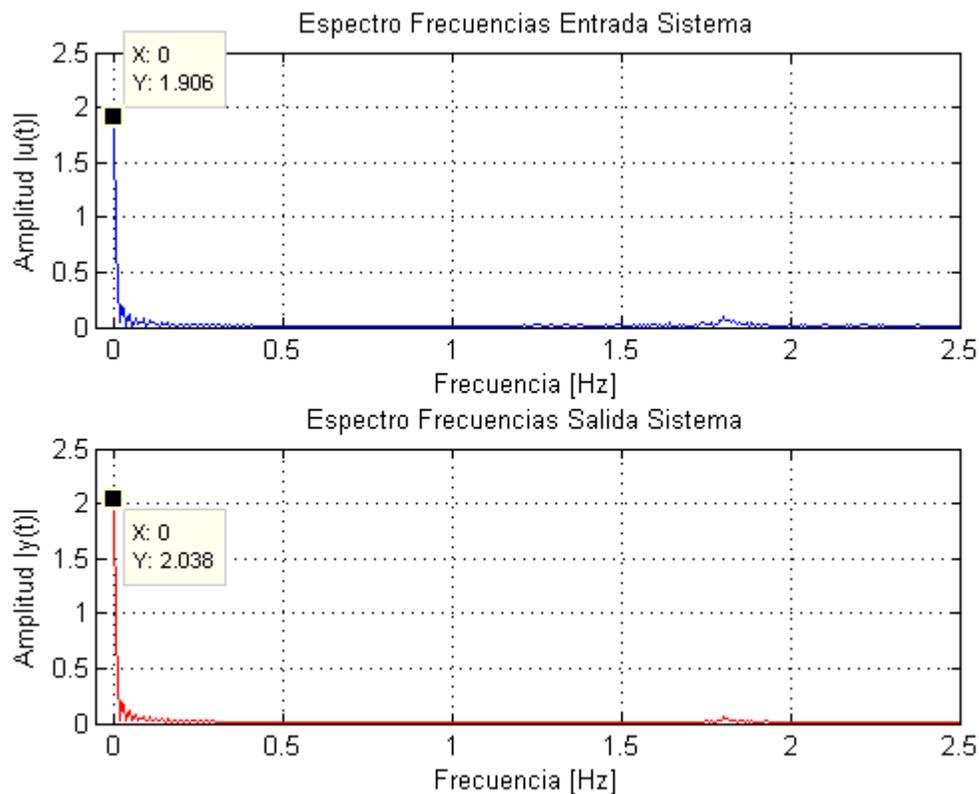


Fig. 5-7. Espectros de Frecuencia entrada y salida del sistema.

Se observa que tanto las señales de entrada como de salida tienen frecuencias cercanas a 1.8 [Hz]. Se puede corroborar también con un acercamiento del mismo espectro.

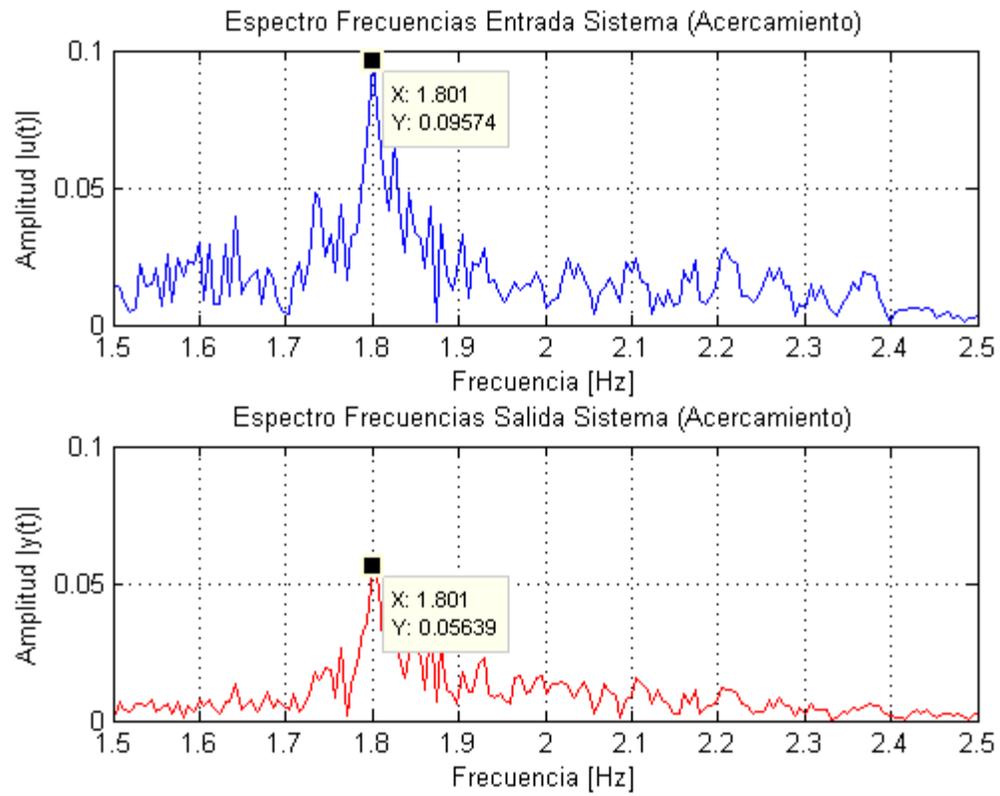


Fig. 5-8. Acercamiento Espectros de Frecuencia.



Capítulo 6. Propuesta de Modelo

6.1. Introducción

Los modelos paramétricos se definen mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de entrada, salida y si resulta necesaria, la señal de perturbación del sistema.

En muchas ocasiones es necesario realizar identificación de un sistema del cual no se tiene un conocimiento previo apropiado, por lo que una alternativa válida es recurrir a modelos estándar, sin embargo, su principal dificultad radica en la elección de la estructura, su orden y su cantidad de parámetros.

6.2. Estructuras de Modelo

Dado que los datos se obtienen mediante muestreo, los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto.

Por lo último, se detalla a continuación las estructuras más usadas para la obtención del modelo apropiado según características de la entrada, la salida y el ruido representadas en el Anexo D.1.

En los variados casos, los polinomios descritos en el Anexo D.1 se pueden simplificar a la unidad, dando paso a las distintas estructuras propuestas en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Estructuras de Modelos Paramétricos

Tipo de Modelo	Condición	Estructura Resultante
A.R.X	$F = D = C = 1$	$Ay(t) = Bu(t) + e(t)$
O.E	$C = D = A = 1$	$y(t) = \frac{B}{F}u(t) + e(t)$
A.R.M.A.X	$F = D = C = 1$	$Ay(t) = Bu(t) + Ce(t)$
BOX-JENKINS (B.J)	$A = 1$	$y(t) = \frac{B}{F}u(t) + \frac{C}{D}e(t)$

A su vez, las distintas estructuras se pueden representar en diagramas en bloques como lo muestra la Fig. 6-1.

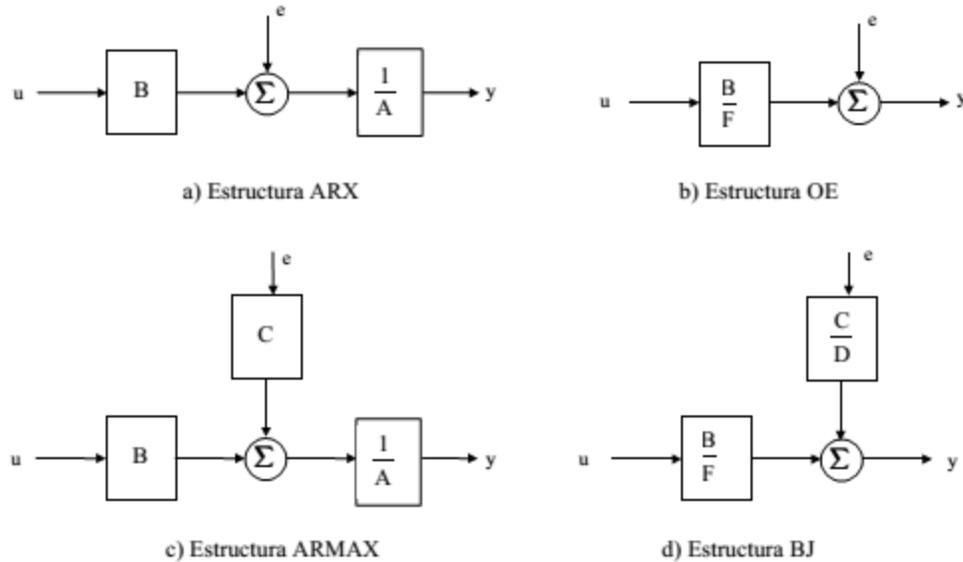


Fig. 6-1. Diagramas de Bloques equivalentes de las estructuras.

La obtención de un modelo como los descritos anteriormente, suelen ser llamados *Modelos de Caja Negra*, por el desconocimiento del sistema y su dinámica.

6.3. Características de los Modelos

El modelo A.R.X descrito en la Fig. 6-1(a) es el modelo más simple y logra efectividad debido a que es el resultado de la resolución de ecuaciones de regresión lineal en forma analítica. Además la solución es única y satisface el mínimo global de la función de pérdida. En casos cuando el modelo del orden es alto, se prefiere esta estructura. La desventaja del modelo A.R.X es que considera las perturbaciones como parte del sistema. La parte determinista G y la parte estocástica H contienen el mismo conjunto de polos, por lo que puede ser poco realista, dando paso a un sistema de alto orden de forma innecesaria debido a la intención de minimizar el error de pérdidas.

El modelo O.E que se muestra en la Fig. 6-1(b) describe la dinámica del sistema por separado y no posee parámetros para modelar características de perturbación.

El modelo A.R.M.A.X mostrado en la Fig. 6-1(c) incluye dinámicas de perturbación. Estos modelos son útiles cuando se tienen perturbaciones que entran al comienzo del proceso como la entrada. Tiene más flexibilidad en el modelado de la perturbación, en desmedro de la estructura A.R.X.

El modelo B.J de la Fig. 6-1(d) es el más completo con propiedades de alteración modelados por separado de la dinámica de sistemas.

Capítulo 7. Obtención y Validación de la Estrategia

7.1. Introducción

En este capítulo se entregarán los resultados obtenidos tras la formulación del problema, la obtención de datos y las propuestas de modelos que se deben tener.

Se usará la herramienta de MATLAB *System Identification Toolbox*, el cual se puede llamar desde el Workspace mediante el comando `ident`.

7.2. Consideraciones

A continuación se presentan algunos aspectos que se deben tomar en cuenta para la identificación del sistema, como criterios para la elección de modelos y el uso idóneo de la herramienta de I.D.S de MATLAB.

7.2.1 De los Modelos

Para determinar modelos desconocidos, el proceso más usado es la realización de pruebas de ensayo y error. No obstante, estas prácticas son basadas en la intuición de quién está realizando el experimento, y pueden llevar a soluciones erróneas. Es por eso que existen algunas consideraciones para poder llegar a un modelo adecuado. [12]

Se recomienda tener información útil sobre el orden del modelo mediante la observación del número de peaks en la función de respuesta de frecuencia no paramétrica. Normalmente, el número de peaks en la respuesta es la mitad de la orden de los polinomios A y F .

Luego, para estimar razonablemente el retardo, se puede probar valores razonables de un modelo A.R.X de tamaño medio. Elegir el retardo que ofrece el mejor ajuste del modelo basado en los errores de predicción.

Probar distintos órdenes de modelos A.R.X con el retardo elegido que proporcionen un mejor ajuste. Dado que el modelo A.R.X describe tanto la dinámica del sistema y las propiedades de ruido usando el mismo conjunto de polos, el modelo resultante puede resultar innecesariamente de orden alto. Al graficar los polos y ceros se puede reducir el modelo del sistema. El orden resultante de los polos y ceros son un buen comienzo para probar con modelos A.R.M.A.X, O.E o B.J con modelación de ruido de primer o segundo orden.

Si el modelo no es el adecuado, intentar determinar si hay señales que se están añadiendo en la salida. Las mediciones de estas señales se pueden incorporar como señales de entrada adicionales.

Si el modelo aún sigue siendo insatisfactorio, es necesaria una visión física del sistema. Es recomendable mirar modelos ya hechos.

Desde el punto de vista del error de predicción, mientras mayor es el orden del modelo, mejor es el ajuste de los datos ya que un orden alto presenta un mayor grado de libertad. Sin embargo, se necesita más tiempo y memoria para los cálculos necesarios. Es por eso que si se encuentran modelos de menor orden y con un porcentaje de ajuste menor que uno de alto orden, pero aceptable igual, puede considerarse válido.

7.2.2 De la Herramienta de Identificación de Sistemas

La S.I.T de MATLAB ofrece un completo abanico de alternativas para lograr una identificación de sistemas a partir de los datos de entrada y salida obtenidos.

Debido a que la programación del servomotor fue directa e instantánea mediante L.D ya que no podía cargarse una señal predefinida, como datos de entrada al sistema fueron usados los registrados por el acelerómetro, por lo que la S.I.T recomienda en estos casos predecir el modelo y no simularlo. [14]

7.3. Obtención de Modelos Propuestos

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 7.2.1, se decide comenzar estimando un modelo A.R.X.

En concordancia con la Tabla 6-1, la estructura A.R.X es descrita en términos de números de polos y ceros como na y nb respectivamente (Ver Anexo D.1).

La Fig. 7-1 presenta las mejores alternativas que arroja el S.I.T para una estructura A.R.X.

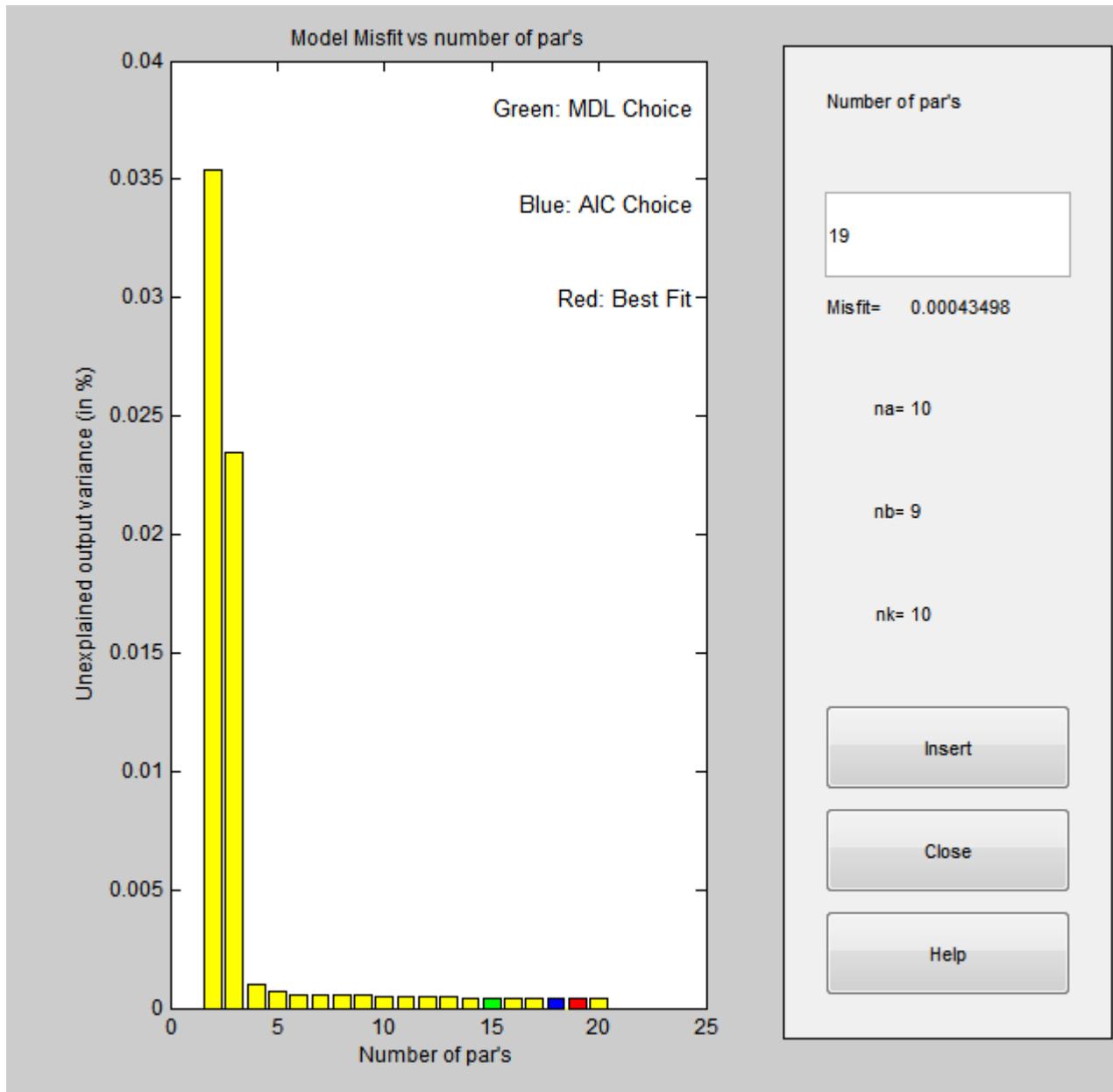


Fig. 7-1. Selección de mejores estructuras A.R.X

El gráfico de la Fig. 7-1 muestra la comparación entre el número de parámetros $na + nb$ del potencial modelo y la relación porcentual de la varianza no especificada de la salida del sistema.

Además, se puede apreciar que existen tres barras que resaltan dentro de las alternativas ofrecidas, las que representan la mejor estimación en tres distintos criterios. El color verde representa el mejor ajuste bajo el criterio de *Minimum Description Length* (Rissanen, 1978), el color azul representa el mejor ajuste bajo el criterio de *Akaike's Information Criterion* (Akaike, 1974) y el color rojo representa el

mejor ajuste bajo el criterio de la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre el valor de la validación y la salida del sistema. Este último criterio representa el mejor ajuste global. Según el gráfico, el modelo que mejor se ajusta a la forma de onda de la salida es el cuyo número de parámetros es $na = 10$ y $nb = 9$, como se puede verificar en la Fig. 7-2.

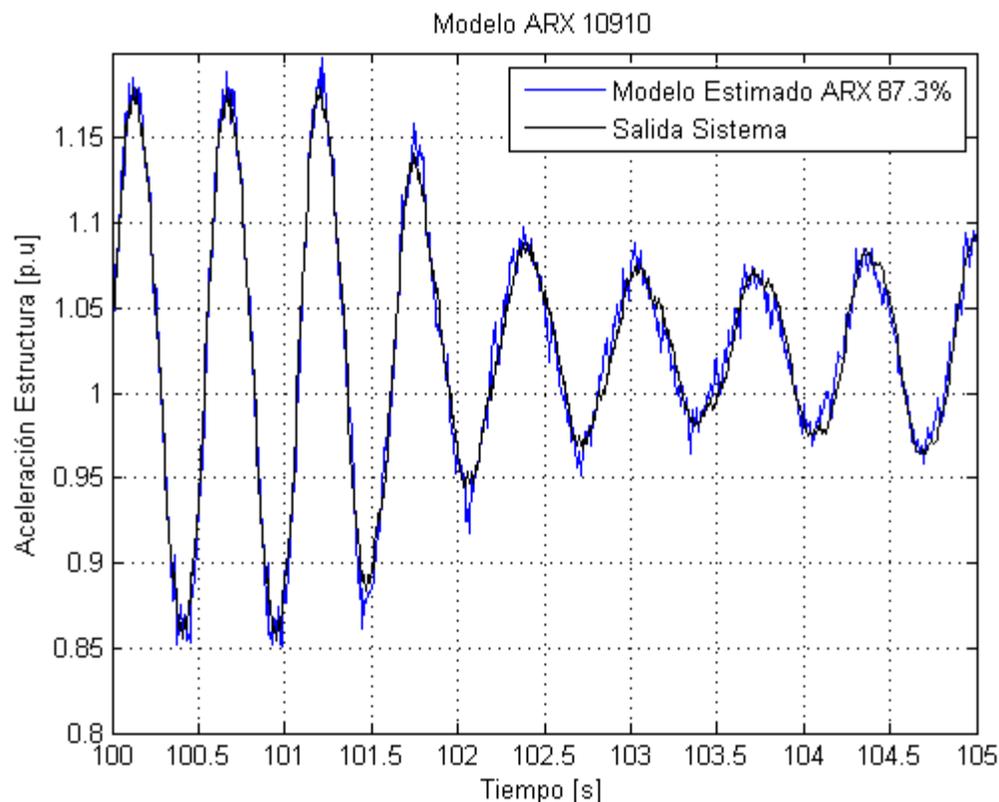


Fig. 7-2. Ajuste modelo A.R.X con $na=10$ y $nb=9$.

Se observa que el porcentaje de ajuste respecto a la salida del sistema es de un 87.3% y con un retardo de 10 muestras de salida respecto a la entrada.

Como era de suponerse, el modelo A.R.X propuesto es de un orden alto, esto es debido a que se considera el ruido como parte de la entrada y por tratar de minimizar el error de pérdidas, el algoritmo compensa la estimación agregando polos al sistema.

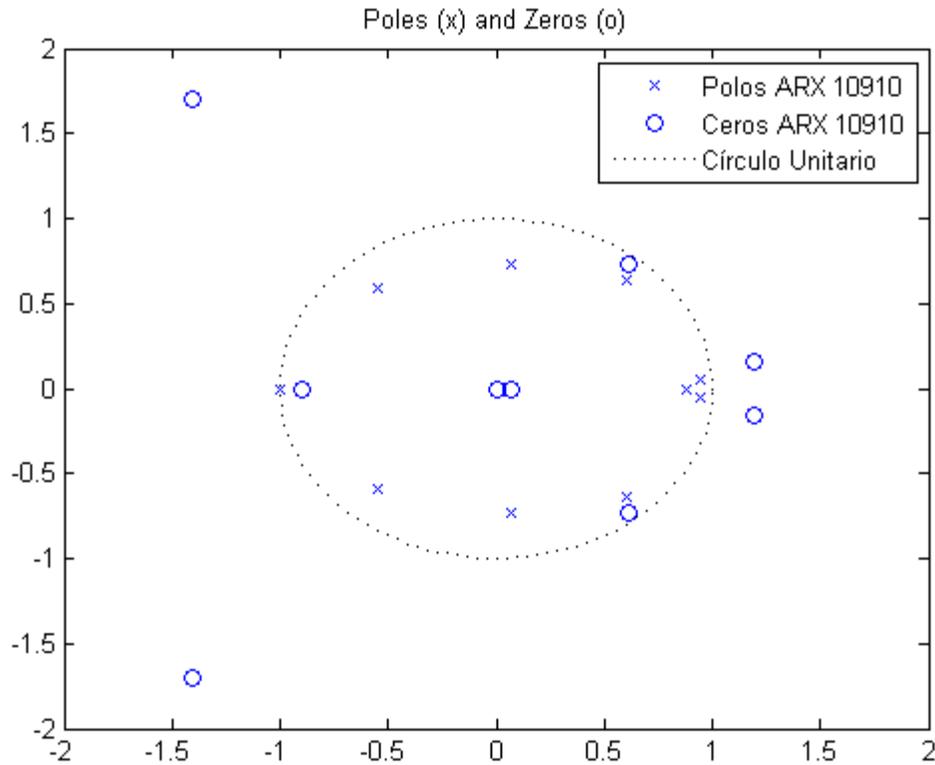


Fig. 7-3. Mapa de polos y ceros del modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$

De la Fig. 7-3 se observa que el sistema tiene una respuesta transitoria lenta, ya que no hay polos cercanos al origen, y que da luces de que puede ser un sistema inestable, ya que posee un polo ubicado en la circunferencia unitaria. La Tabla 7-1 muestra los polos del modelo obtenido.

Tabla 7-1. Polos modelo A.R.X con $n_a=10$ y $n_b=9$

Polo	Valor	Polo	Valor
p_{z1}	$-1.0000 + j0.0000$	p_{z6}	$0.6022 + j0.6388$
p_{z2}	$-0.5520 + j0.5898$	p_{z7}	$0.6022 - j0.6388$
p_{z3}	$-0.5520 - j0.5898$	p_{z8}	$0.9414 + j0.0579$
p_{z4}	$0.0700 + j0.7329$	p_{z9}	$0.9414 - j0.0579$
p_{z5}	$0.0700 - j0.7329$	p_{z10}	$0.8837 + j0.0000$

Se observa que los polos p_{z1} , p_{z8} y p_{z9} otorgan inestabilidad al sistema.

Una opción de mejorar el modelo A.R.X sería considerar el ruido usando la estructura A.R.M.A.X. Como se observa en la Fig. 7-3, hay un par de polos y ceros que prácticamente se cancelan, por lo que es posible pensar en reducir el orden en 2. Se buscará una estructura A.R.M.A.X correspondiente que pueda buscar una mejor representación del sistema.

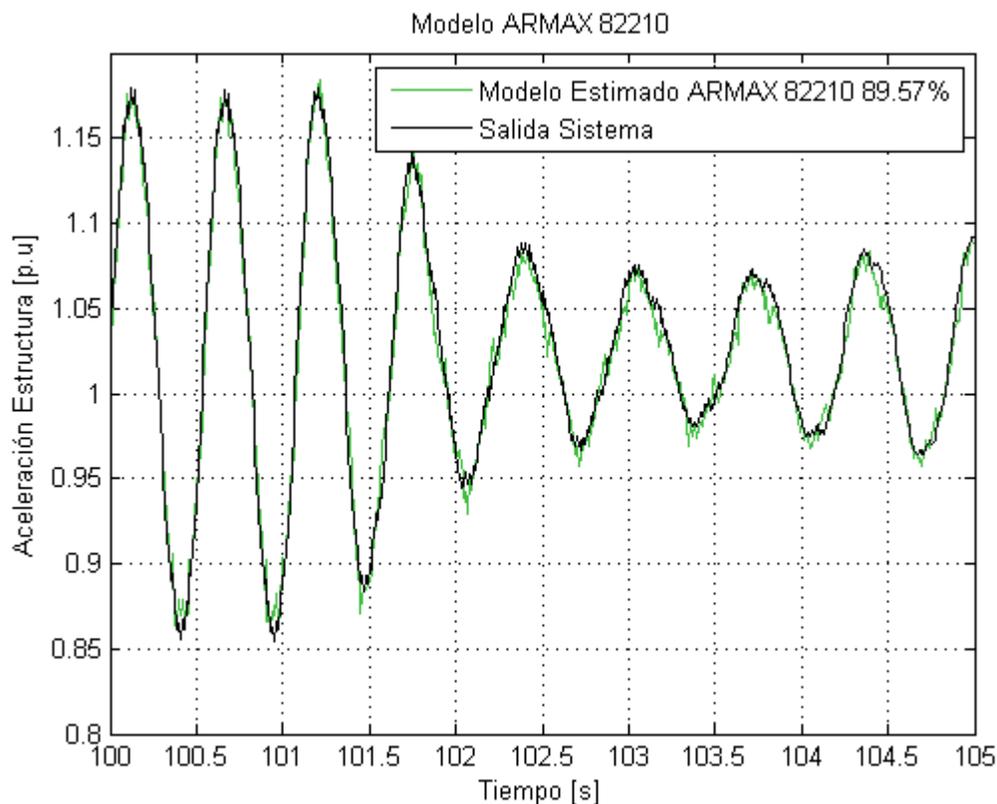


Fig. 7-4. Ajuste modelo A.R.M.A.X con $n_a=8$, $n_b=2$, $n_c=2$ y $n_k=10$

Ya que es recomendable mantener el retardo entregado por el mejor ajuste A.R.X, se decide buscar los otros parámetros del modelo A.R.M.A.X con un orden reducido en dos y agregándole dos polos de ruido.

Si bien el modelo A.R.M.A.X logró mejorar el porcentaje de ajuste reduciendo dos veces el orden, su comportamiento sigue mostrando incertidumbre acerca del ruido ingresado al sistema, ya que los polos siguen siendo compartidos entre el ruido y la salida.

Una forma de reducir aún más el orden es obtener un modelo B.J. Como se observa en la Fig. 6-1(d), la estructura B.J permite modelar el ruido mediante una función de transferencia, pudiendo quitar el número de polos del sistema y lograr así un modelo físicamente más acucioso.

Por lo que se mostró en el apartado 2.3.1 el sistema es modelado usando el principio del sistema masa-resorte, que depende de la posición, la velocidad y la aceleración, por lo que describe un comportamiento de un modelo de orden 2.

Asimismo, se buscará un modelo B.J que cumpla con esos requisitos. Pensando en el modelo A.R.M.A.X que se obtuvo en la Fig. 7-4, de los 8 polos considerados se podrán asumir 6 de ellos pertenecientes al ruido.

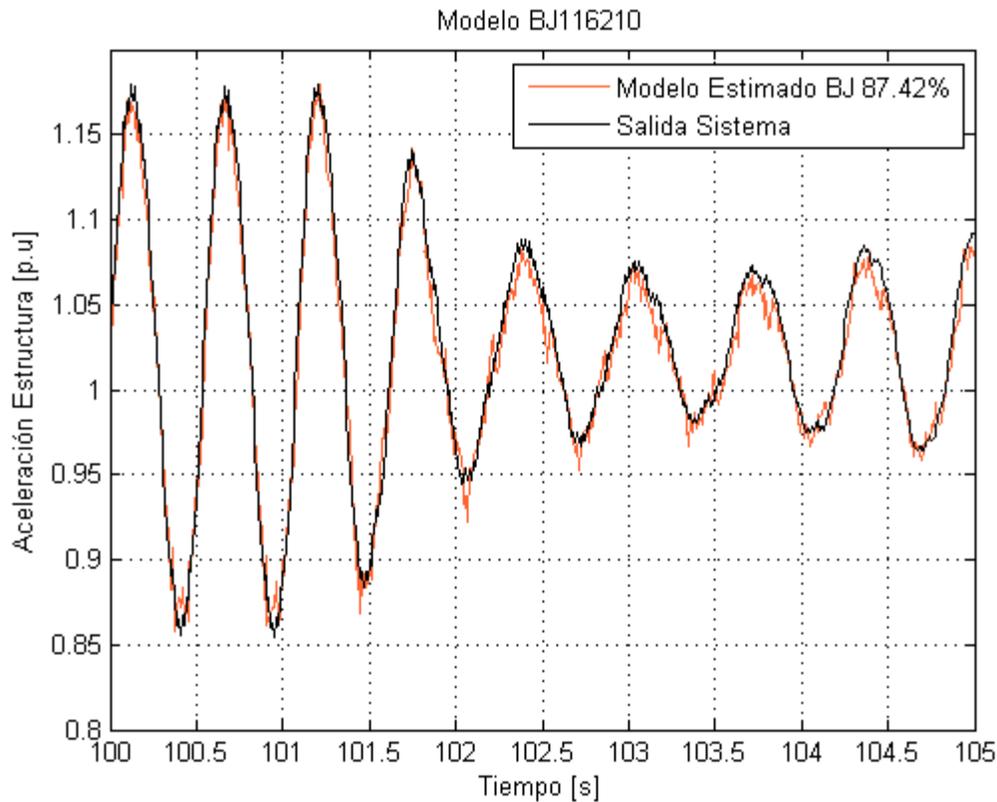


Fig. 7-5. Ajuste modelo B.J con $nb=1$, $nc=1$, $nd=6$, $nf=2$ y $nk=10$

La Fig. 7-6 muestra un ajuste porcentual ligeramente menor al modelo A.R.M.A.X mostrado en la Fig. 7-5, pero puede representar un modelo más adecuado en relación con la realidad. Si bien la estructura B.J involucra un cálculo de más parámetros, se puede hacer la diferencia entre lo que puede afectar la entrada, la salida y la perturbación como un tercer agente del sistema.

7.4. Modelos Obtenidos

La Tabla 7-2 muestra la representación polinomial de los modelos obtenidos.

Tabla 7-2. Modelos Obtenidos

Estructura	Representación Polinómica
<p>A.R.X</p> <p>$na = 10, nb = 9, nk = 10$</p>	$A(z) = 1 - 2.007z^{-1} + 0.861z^{-2}$ $+ 0.6683z^{-3} - 0.8003z^{-4}$ $+ 0.3406z^{-5} - 0.2967z^{-6}$ $+ 0.4905z^{-7} \pm 0.5484z^{-8}$ $+ 0.5094z^{-9} - 0.2143z^{-10}$ $B(z) = 0.005665z^{-10} + 0.0001537z^{-11}$ $- 0.004131z^{-12}$ $- 0.03746z^{-13} + 0.05875z^{-14}$ $- 0.01085z^{-15} - 0.04183z^{-16}$ $+ 0.03557z^{-17} - 0.00223z^{-18}$
<p>A.R.M.A.X</p> <p>$na = 8, nb = 2, nc = 2, nk = 10$</p>	$A(z) = 1 - 2.214z^{-1} + 0.724z^{-2} + 1.616z^{-3}$ $- 1.348z^{-4} + 0.04702z^{-5}$ $- 0.02681z^{-6} + 0.5504z^{-7}$ $- 0.3273z^{-8}$ $B(z) = -0.001992z^{-10} + 0.001999z^{-11}$ $C(z) = 1 - 0.3477z^{-1} - 0.6509z^{-2}$
<p>B.J</p> <p>$nb = 1, nc = 1, nd = 6, nf = 2, nk = 10$</p>	$B(z) = 0.001017z^{-10}$ $C(z) = 1 + 0.822z^{-1}$ $D(z) = 1 - 1.144z^{-1} - 0.7646z^{-2}$ $+ 1.400z^{-3} - 0.5017z^{-4}$ $- 0.239z^{-5} + 0.2845z^{-6}$ $F(z) = 1 - 0.001451z^{-1} - 0.9976z^{-2}$

7.5. Validación de Modelos

7.5.1 Validación Visual

La forma más sencilla, sin usar ningún algoritmo ni representación matemática para verificar si los modelos son realmente representativos del sistema, es la validación visual.

Como se puede observar en las Fig. 7-2, 7-4 y 7-6, los porcentajes son aceptables dentro del rango de identificación óptima, una buena identificación es aquella que representa un 80% de ajuste.

7.5.2 Análisis Residual

El análisis matemático de dicho criterio está realizado en el Anexo D.3. Se tienen las siguientes consideraciones:

- Si existe correlación para valores de $\tau < 0$, quiere decir que existe realimentación de la salida a la entrada, no habla de la deficiencia del modelo.
- Si la estimación del modelo y la expresión $R_{\varepsilon u}$ se han determinado usando los mismos datos de entrada, entonces $R_{\varepsilon u}(\tau) = 0$ para los valores $\tau = nk, \dots, nk + nb - 1$.
- Si $R_{\varepsilon u}$ se considera no nulo para un determinado τ_0 , significa que el término $u(t - \tau_0)$ debe ser incluido en el modelo. Se asegura como un buen método para ajustar el orden más apropiado para la estructura del modelo.

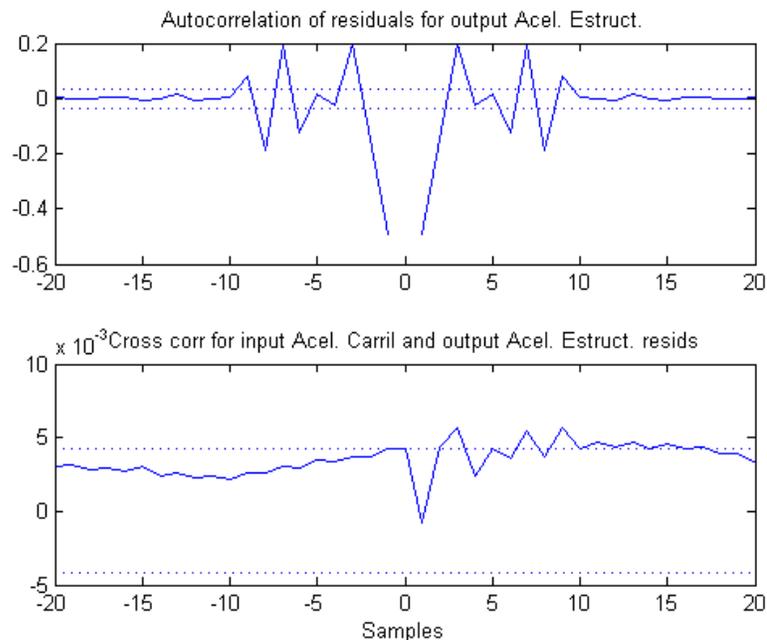


Fig. 7-6. Análisis residual Modelo A.R.X con $na=10$ y $nb=9$

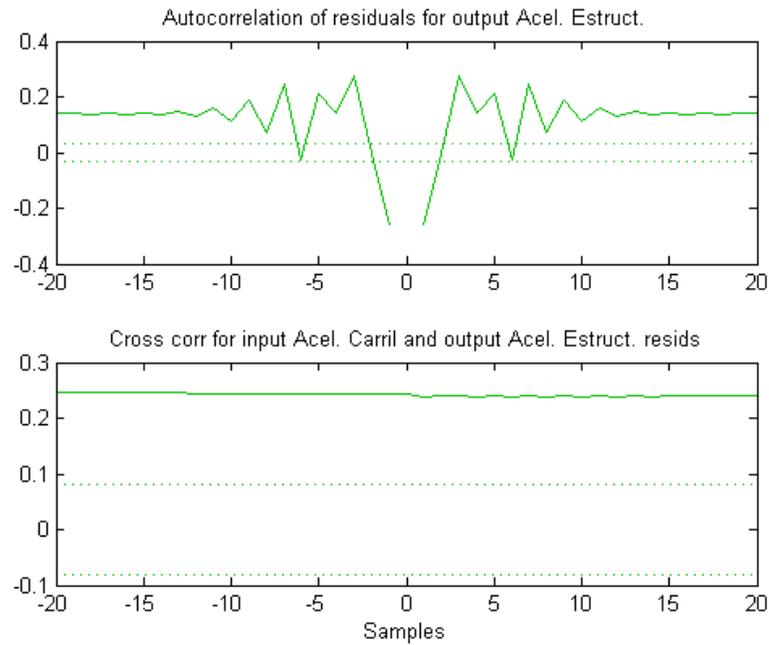


Fig. 7-7. Análisis residual A.R.M.A.X con $na=8$, $nb=2$, $nc=2$ y $nk=10$

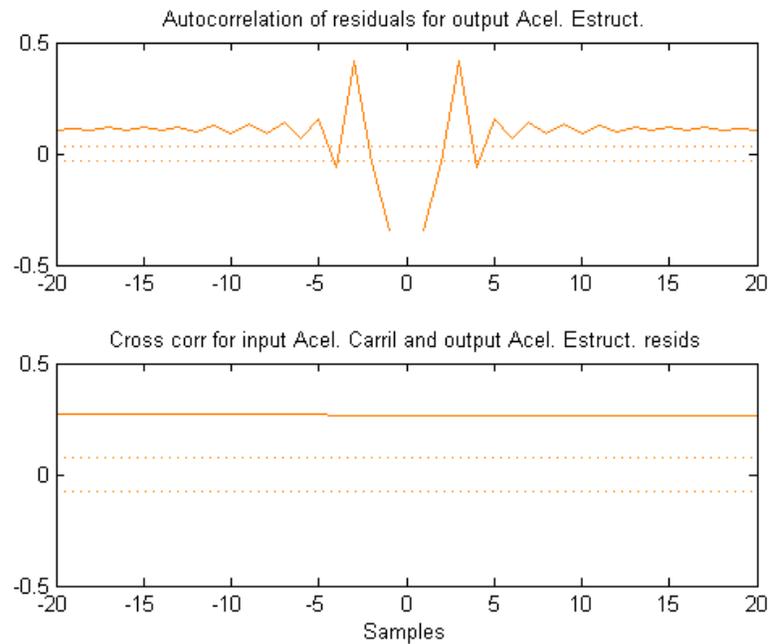


Fig. 7-8. Análisis residual modelo B.J con $nb=1$, $nc=1$, $nd=6$, $nf=2$ y $nk=10$

De las Fig. 7-6 a la 7-8 se puede rescatar lo siguiente:

- Desde las 10 muestras (retardo de mejor ajuste) se observa en la Fig. 7-6 que los valores de autocorrelación del modelo A.R.X muestran independencia de ε respecto de u para todo τ . No así el modelo A.R.M.A.X ni el B.J. Estos modelos son de más bajo orden, por lo que con su reducción pierde información y necesitan ser de un orden más alto.
- Las primeras muestras constatan altos valores de autocorrelación debido al desfase entre la entrada y la salida.

7.5.3 Respuesta en Frecuencia

Se efectúa el análisis frecuencial para los tres modelos seleccionados. La Fig. 7-9 muestra el Diagrama de Bode en amplitud para cada uno de ellos:

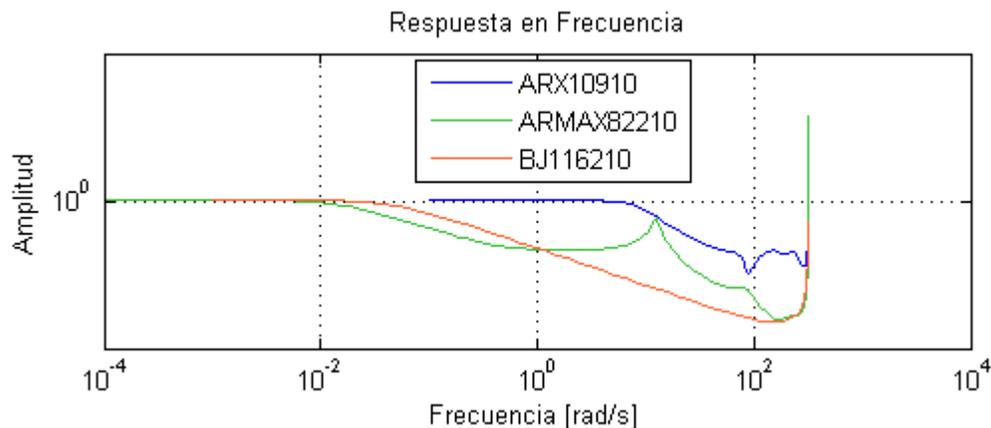


Fig. 7-9. Respuesta en Frecuencia modelos obtenidos

Se piensa de inmediato que el sistema presenta resonancia, por lo que se pueden esperar peaks altos en su respuesta en frecuencia. En ese caso el modelo A.R.M.A.X se asemeja mejor a lo que una respuesta de un modelo resonante quiere.

Capítulo 8. Conclusiones

8.1. Sumario

En este documento se muestra el proceso de identificación de un sistema que represente una estructura flexible de aluminio implementada en la asignatura Proyecto Electrónico [10].

Se revisa bibliografía para entender conceptos de I.D.S, de modelos de sistemas similares y del uso del software y hardware disponibles para el proceso.

En base al algoritmo de identificación se diseña un experimento para obtener datos de entrada y salida del sistema y así lograr obtener un modelo.

Se proponen diferentes estructuras de modelos discretos, se ajustan los datos para obtener los parámetros para el sistema, luego se discriminó cuál es la mejor opción para representar el sistema mediante la validación de cada uno de ellos.

8.2. Conclusiones

Según lo expuesto a lo largo del documento, se puede apreciar que, si bien las estimaciones representan en porcentajes cercanos al 90%, en términos físicos, queda la incertidumbre de que si responde a la dinámica del sistema.

Las causas de una identificación no óptima pueden darse en el diagrama mostrado en la Fig. 2-1, donde existen varias causales de un modelo no satisfactorio (datos muy filtrados, entrada elegida no adecuada, entre otros hechos).

Una de las razones por la cual se mostró un modelo poco real a la fenomenología del sistema, fue que el filtrado de las señales fue en exceso, provocando un desfase entre la entrada natural y filtrada.

También puede darse, de que como se realizó un procedimiento utilizando un Modelo de Caja Negra, quedan muchas aristas importantes a la deriva, no así un modelado paramétrico en base a un modelo fenomenológico.

Además, como los datos de entrada fueron sensados, existe la alta probabilidad de que hayan sido obtenidos con ruido, no siendo suficientemente procesada.

En consecuencia, se puede decir que los modelos no fueron validados desde el punto de vista de la dinámica física del sistema, por tanto una de las hipótesis planteadas al principio del trabajo no fue cumplida.

No obstante, se pueden sentar las bases para continuar complementando el sistema, incorporando más sensores de aceleración para determinar aceleraciones en los distintos pisos del sistema y lograr la obtención de modelos de aceleración por pisos.

Este sistema se emplea para implementar plantas a baja escala, con la finalidad de determinar la respuesta de edificaciones a fuerzas aplicadas a movimientos fenomenológicos naturales, por lo que una adecuada caracterización del sistema da pie a que se implementen estrategias de control para compensar las fuerzas aplicadas a la estructura.

8.3. Trabajos Futuros

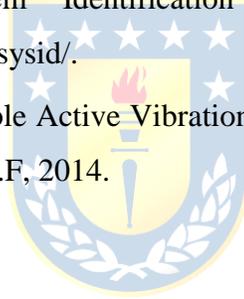
Debido a que este trabajo queda como base para futuros proyectos a realizar en el sistema de la E.F, se pueden extraer las siguientes propuestas para seguir y mejorar el tema:

- Incorporación de dos o más sensores de aceleración en la estructura y proponer modelos multinivel de la estructura.
- Implementación de métodos que estimen las constantes de elasticidad en cada piso de la estructura para ajustar un modelo con base física como el Sistema Masa-Resorte.
- Implementación de métodos de identificación *online*.
- Incorporación de un segundo motor para efectuar la excitación, y revisar la compensación que pueda realizar el motor ya presente en el sistema.
- Modelación del sistema motriz de la estructura.

Bibliografía

- [1] J. Norton, An Introduction to Identification, University of Birmingham, Inglaterra: Academic Press, 1986.
- [2] M. López Guillén, «Identificación de Sistemas. Aplicación al Modelado de un Motor de CC.,» Alcalá, España, 1999.
- [3] C. Kunusch, «Identificación de Sistemas Dinámicos,» Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [4] L. S. Garrido Bullón, «Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-Lineales mediante RGO,» Madrid, España, 2000.
- [5] GMSint. Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes, «Active Vibration Control in Flexible Structures Using LMIs - UNESP - Ilha Solteira, SP, Brasil,» GMSint. Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes, 2012. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=-VxDpuAJhDk>.
- [6] A. Forrai, S. Hashimoto, H. Funato y K. Kamiyama, «Structural Identification and Control of Flexible Structures,» Stevenage, UK, 2001.
- [7] The MathWorks, Inc., «Active Vibration Control in Three-Story Building,» [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/robust/gs/active-vibration-control-in-three-story-building.html>.
- [8] BECKHOFF Automation, «BECKHOFF Automation,» [En línea]. Available: www.beckhoff.com.
- [9] F. J. Inostroza Lagos, «Diseño de Controladores con Sobre-Muestreo Aplicado al Control Activo de Ruido,» Concepción, Chile, 2014.
- [10] R. I. Arrau Aldana y J. A. Fuentes Stuardo, «Implementación de Estructura para Estudio de Vibraciones, Identificación y Control,» Concepción, Chile, 2013.
- [11] BECKHOFF Automation, «BECKHOFF Information System,» [En línea]. Available: infosys.beckhoff.com.
- [12] National Instruments, "Selecting a Model Structure in the System Identification Process," 17 Junio 2010. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4028/en/>.
- [13] L. Ljung, System Identification Toolbox For Use in MATLAB, Cuarta ed., The Matworks, Inc, 2000.

- [14] The MathWorks, Inc, «Simulating and Predicting Model Output,» [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/help/ident/ug/simulating-and-predicting-model-output.html>.
- [15] The MathWorks, Inc, «Identifying Input-Output Polynomial Models,» [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/help/ident/ug/identifying-input-output-polynomial-models.html#bq51n2b>.
- [16] Analog Devices, «Small, Low Power, 3-Axis 3g Accelerometer ADXL335,» 2009.
- [17] Quanser, «Active Mass Damper - One Floor (AMD-1), Student Handout».
- [18] R. Borges Santos, D. Domingues Bueno, C. Rodrigo Marqui y V. Lopes Jr., «Active Vibration Control of a Two Floors Building Model Bases on H2 and Hinf, Methodologies using L.M.I's,» Sao Paulo, Brasil.
- [19] H. Coral Enríquez, «Control Robusto Activo para la Minimización de Vibraciones en una Estructura Flexible de Tres Pisos bajo Excitaciones Sísmicas,» Cali, Colombia, 2010.
- [20] The MathWorks, Inc, «System Identification Toolbox,» [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/sysid/>.
- [21] W. Yu, S. Thenozhi y X. Li, «Stable Active Vibration Control System for Building Structures using PD/PID Control,» México D.F, 2014.



Anexo A. Hardware utilizado

A.1. PC C6925-0010.

Es un computador con sistema operativo Microsoft Windows XP, cuya imagen se muestra en la Figura A-1. Posee salidas DVI y puertos USB, todo apto para conectar monitor, teclado y mouse. En la Tabla A-1 se adjuntan las características del dispositivo:



Fig. A- 1. Unidad PC C6925-0010 (Imagen Referencial)

Tabla A- 1. Características Técnicas PC C6925-0010

Sistema Operativo	Microsoft Windows XP
RAM	2 GB
Procesador	1.20 GHz
Disco Duro	80 GB

Este dispositivo es capaz de conectarse a la interfaz usual de un computador normal, además de tener conexión al software TwinCAT, del mismo fabricante. Puede ser programado como un PLC mediante lenguajes de programación como S.T, L.D, F.B.D, I.L y S.F.C.

A.2. Servo-Driver AX5201.

Dispositivo que permite el accionamiento y conexión de 2 servomotores. En la Tabla A-2 se muestran algunas de las características principales del Servo-Driver.



Fig. A- 2. Unidad Servo-Driver AX5201 (Imagen Referencial)

Tabla A- 2. Características Técnicas Servo-Driver AX5201

Modelo	AX5201-0000-02000
Tensión nominal entrada	1 fase 100-240 VAC o 3 fases 100-480 VAC
Corriente Nominal de Entrada	1 fase 5.7 A o 3 fases 3.3 A
Frecuencia de entrada	50/60 Hz
Voltaje Nominal de salida	3 fases 0VAC tensión de red
Corriente nominal salida	2x1.5 [A]
Frecuencia de Salida	0-100[Hz]

A.3. Servomotor AM8022.

El servomotor utilizado para el Set-Up es el AM8022 de la empresa alemana BECKHOFF, será el encargado de realizar las vibraciones. La unidad con la que se está trabajando se muestra en la Figura A-3. Se conecta con un cable del tipo *One Cable Technology*, OCT, mostrado en la Figura A-4 donde la unidad AX5201 envía los datos.



Fig. A- 3. Servomotor AM8022 (Imagen Referencial)

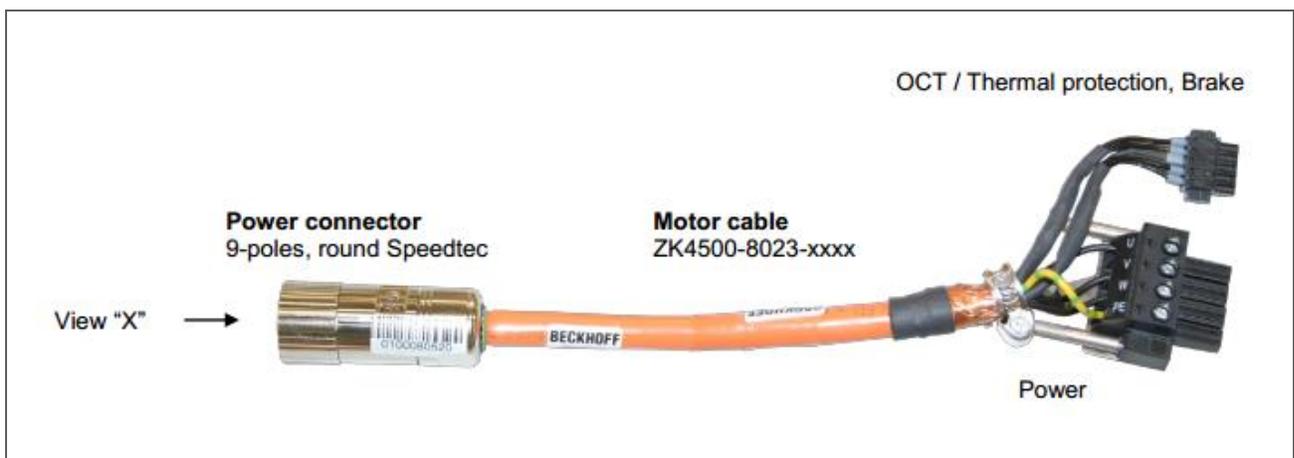


Fig. A- 4. Cable de Conexión Servomotor AM8022 (Imagen Referencial)

La Tabla A-3 muestra algunas especificaciones técnicas del servomotor.

Tabla A- 3. Características Técnicas Servomotor AM8022

400 V AC	AM8022-1D20-0000
Torque de Parada	0.80 Nm
Torque Nominal	0.70 Nm
Velocidad Nominal	8000 rpm
Potencia Nominal	0.59 KW
Torque Máximo	4 Nm
Corriente de Parada	1.50 A
Corriente Pick	7.50 A
Numero de Polos	6
Peso	1.60 Kg

A.4. Acelerómetro SPARKFUN ADXL335

Como ya se mencionó, el sensor de aceleración a utilizar será el Triple Axis Accelerometer-Breakout, ADXL335, fabricado por la empresa SPARKFUN. La Fig. A-5 muestra la presentación del dispositivo que cuenta con una placa donde el chip viene incorporado junto a tres capacitores de $0.1 [\mu F]$, conectados a cada una de las salidas para configurar el ancho de banda del sensor (recomendado por el fabricante $50 [Hz]$) y otro idéntico de filtro paralelo a la alimentación.

La Tabla A-4 muestra las características más importantes del dispositivo, tales como su alimentación, sus dimensiones y sus condiciones de operación [16].

Tabla A- 4. Características ADXL335

Medición:	3 ejes (X,Y, Z)
Dimensiones:	4mmx4mmx1.45mm
Voltaje Alimentación (dc):	1.8-3.6[V]
Corriente Alimentación:	150 [μA]
Respuesta en frecuencia:	Ejes X,Y : 0.5[Hz] -1600 [Hz] sin filtro externo Eje Z : 0.5[Hz]- 550 [Hz] sin filtro externo
Temperatura de Operación:	-40°C a 85°C

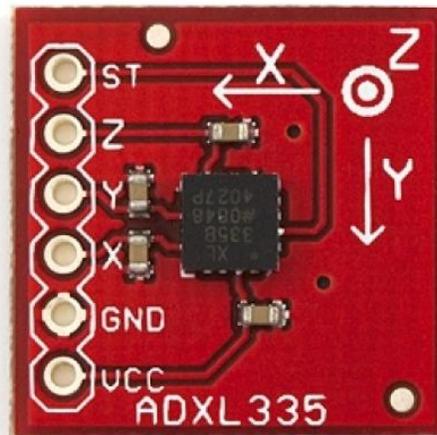


Fig. A- 5. Triple Axis Accelerometer Breakout, ADXL335 (Imagen Referencial)

La Tabla A-5 muestra la configuración de pines del dispositivo.

Tabla A- 5. Configuración de Pines ADXL335

NC:	Sin conexión
X _{out} :	Salida del canal X
Z _{out} :	Salida del canal Z
Y _{out} :	Salida del canal Y
COM:	Común
V _s :	Voltaje de alimentación
ST :	Self-Test

A.5. Módulo Acoplador EK1100.

El acoplador EK1100 es un dispositivo que conecta con los terminales EtherCAT del tipo ELxxxx formando un módulo entre el acoplador, un conjunto de terminales EtherCAT y un terminal bus. El acoplador convierte los datos que pasan de Ethernet 100BASE-TX a representación de la señal E-bus.

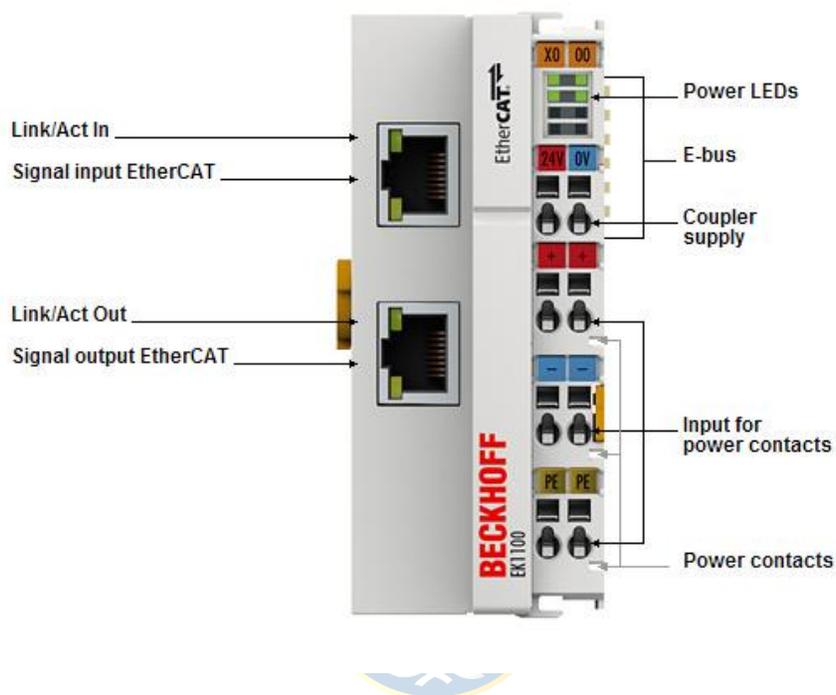


Fig. A- 6. Unidad EK1100. (Imagen Referencial)

Como se aprecia en la Fig. A-6, la unidad posee dos terminales RJ45. El terminal superior es conectado a la red y el terminal inferior puede ser utilizado para conectar otros dispositivos EtherCAT. Las especificaciones técnicas más importantes del EK1100 están mostradas en la Tabla A-6.

Tabla A- 6. Especificaciones Técnicas EK1100

Conexión EtherCAT	Acoplamiento de terminales EtherCAT ELxxxx a la red EtherCAT 100BASE-TX
Transferencia de Datos	Ethernet/cable EtherCAT (CAT 5min) blindado
Distancia máxima entre estaciones	100 m (100BASE-TX)
Retardo	Aprox. 1ms
Velocidad de Transferencia de datos	100 Mbps
Corriente de Entrada	70 mA + (corriente total E-Bus)/4
Corriente Suministro de E-Bus	2000mA
Contactos de Alimentación	20 VCC máx / 10 A máx
Aislamiento Eléctrico	500 V

A.6. Módulo de Entrada EL3702.

El EL3702 (Fig. A-7) es una tarjeta que posee dos entradas análogas que pueden ir entre -10 a +10 [V]. Se alimenta desde la conexión al bus EtherCAT y digitaliza la señal de voltaje recibida con una resolución de 16 bits.

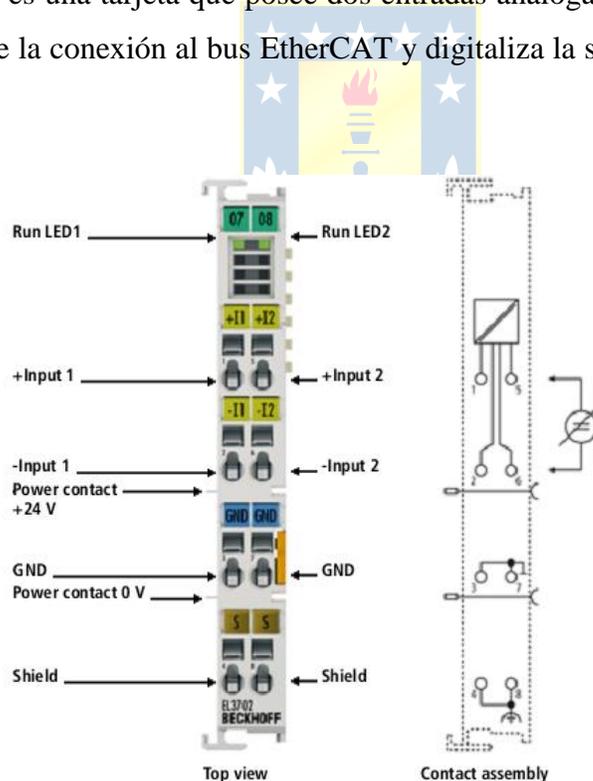


Fig. A- 7. Unidad EL3702. (Imagen Referencial)

La Tabla A-7 muestra las especificaciones técnicas del módulo EL3702.

Tabla A- 7. Especificaciones Técnicas EL3702

Voltaje de Alimentación	Vía bus EtherCAT
Sobremuestreo	1 a 100
Señal de Voltaje	-10 V a 10 V
Ancho de Banda de Entrada	30 kHz
Peso	60 g
Temperatura de Operación	0°C a 55°C
Valor analógico -10 V	-32769 (0x8001)
Valor analógico +10 V	32767 (0x7FFF)



Anexo B. Software utilizado

B.1. TwinCAT XAE

El software TwinCAT 3, técnicamente conocido como TwinCAT XAE (eXtended Automation Engineering) posee integrada la programación con Visual Studio, por lo que se puede programar en distintos lenguajes de programación como C/C++ y tener en un solo entorno la configuración, parametrización y programación del objeto de automatización.

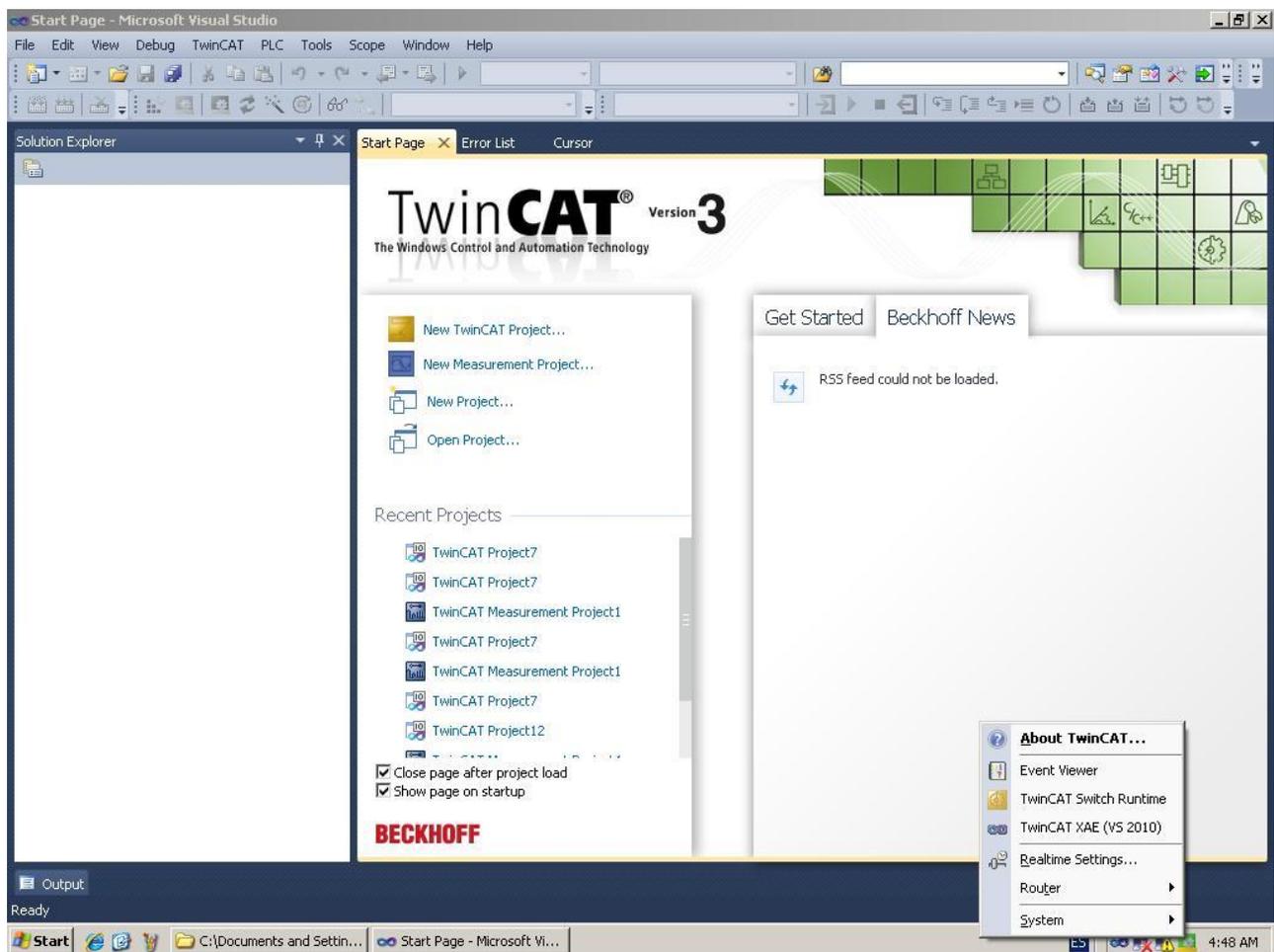


Fig. B- 1. Ventana de Inicio TwinCAT XAE

Otra de las virtudes que tiene el software es su enlace a MATLAB/Simulink, por lo que se puede establecer comunicación entre códigos y simulaciones realizadas en el software matemático hacia TwinCAT XAE.

B.1.1 Ambiente Programación ST

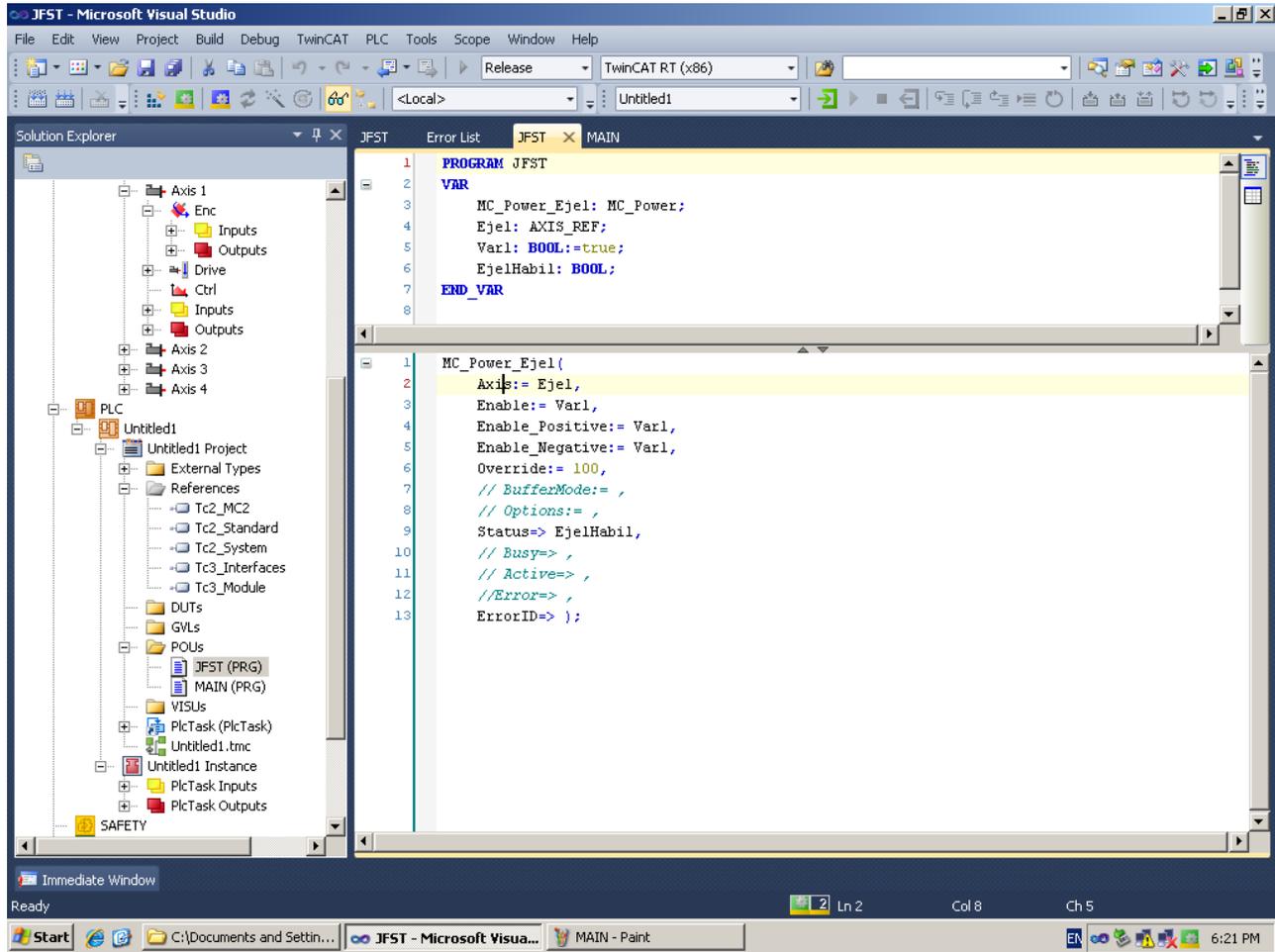


Fig. B- 2. Ambiente Programación ST.

El ambiente de programación en ST, como se muestra en la Fig. B-2, tiene dos partes: mientras el entorno principal de programación está en la parte inferior de la ventana, en la parte superior se observan las variables que se van creando, junto con el tipo y el valor asignado si hubiere.

B.1.2 Ambiente Programación LD

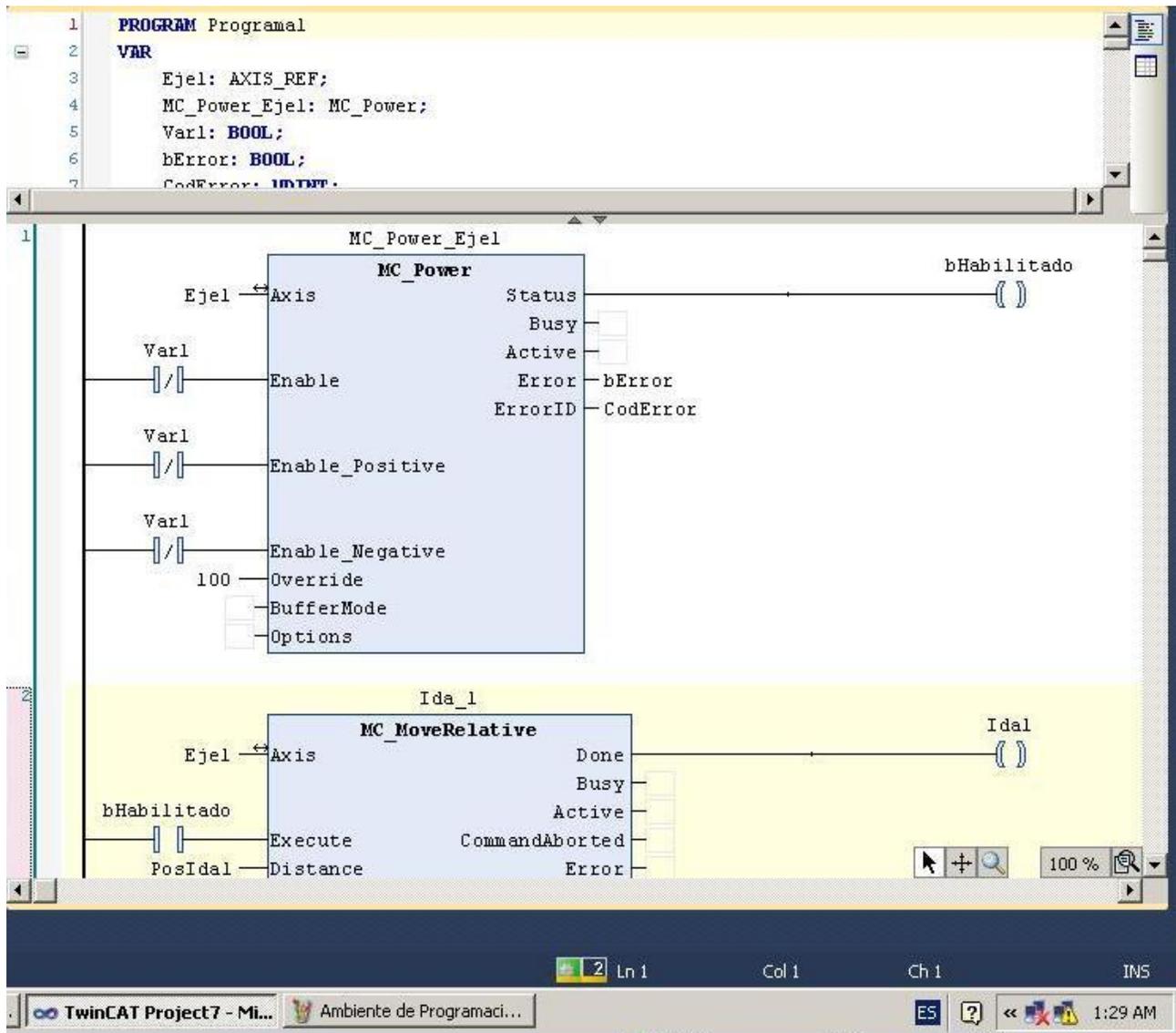


Fig. B- 3. Ambiente Programación LD

Al igual que la programación en ST, la pantalla también se divide en dos partes. La primera, tal cual como en el caso anterior, muestra las variables que se van generando, mientras que la parte inferior muestra los bloques que se van insertando en la programación. Una muestra de programación L.D en TwinCAT XAE se presenta en la Fig. B-3.

Anexo C. Programación en TwinCAT XAE

C.1. Bloques de Movimiento en LD.

Para la programación del Motor AM8022 se usó un programa en el lenguaje L.D que contempló bloques de tres tipos extraídos de la librería de programación *Motion Function Blocks*. Estos bloques se describirán en los siguientes apartados.

C.1.1 Bloque Principal. *MC_Power*

El bloque *MC_Power* es el encargado de habilitar el movimiento de un eje programado.

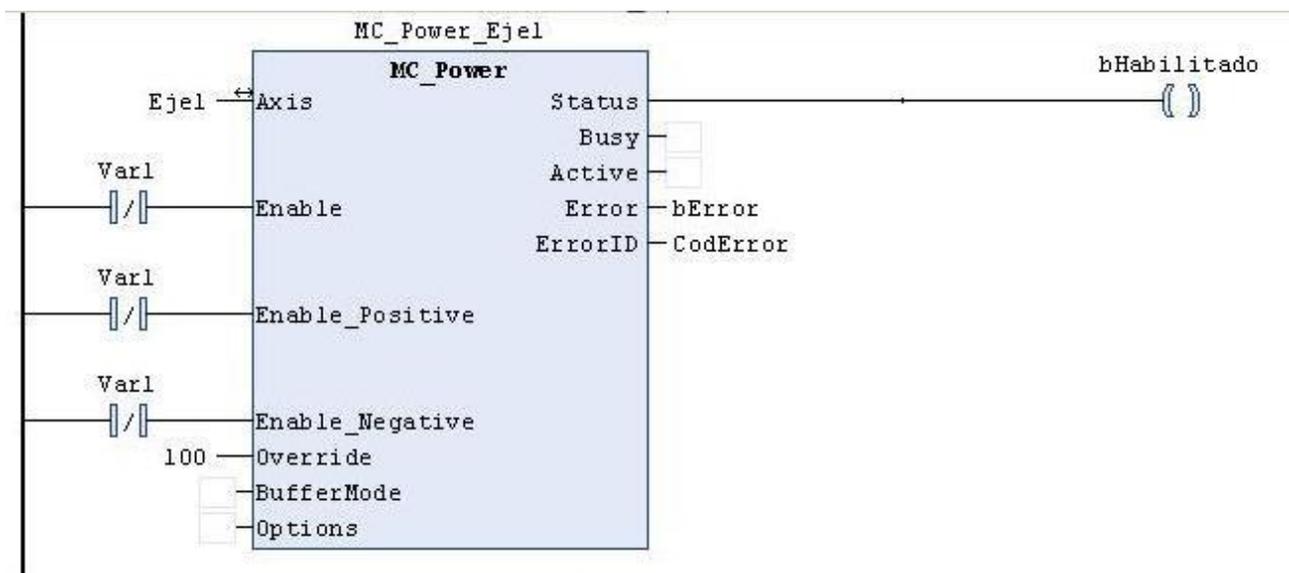


Fig. C- 1. Bloque *MC_Power*

La Fig. C-1 muestra el bloque que habilita el movimiento del eje del motor para este programa en particular. *MC_Power* puede activarse para una o ambas direcciones de movimiento mediante señales de entrada, y entrega una señal de habilitación o si hay errores en la salida.

La Tabla C-1 muestra la función que cumple cada uno de los comandos del bloque.

Tabla C- 1. Entradas y salidas del bloque *MC_Power*

Variables de Entrada	
Axis	Representa el eje referenciado.
Enable/Enable_Positive/Enable_Negative	Variable booleana que representa la habilitación del movimiento del eje, ya sea en una o ambas direcciones. El estado TRUE significa que está habilitado.
Override	Variable que representa la corrección porcentual de velocidad para el movimiento. Es permitido un valor real entre 0 y 100.
BufferMode	Variable que evalúa el reestablecimiento del movimiento.
Variables de Salida	
Status	Variable booleana que indica si el movimiento está habilitado. Lo hace con el valor TRUE.
Busy	Variable booleana que indica si el bloque está ocupado. Lo hace con el valor TRUE.
Active	Variable booleana que indica si el bloque está activo. Lo hace con el valor TRUE.
Error	Indica que hay un error en la salida y el movimiento no se permite. Lo hace con el valor TRUE.
ErrorID	Cuando Error está en estado TRUE, muestra la codificación del error estandarizada por BECKHOFF para identificar lo que está sucediendo.

C.1.2 Bloque de Movimiento de Ida. *MC_MoveRelative*

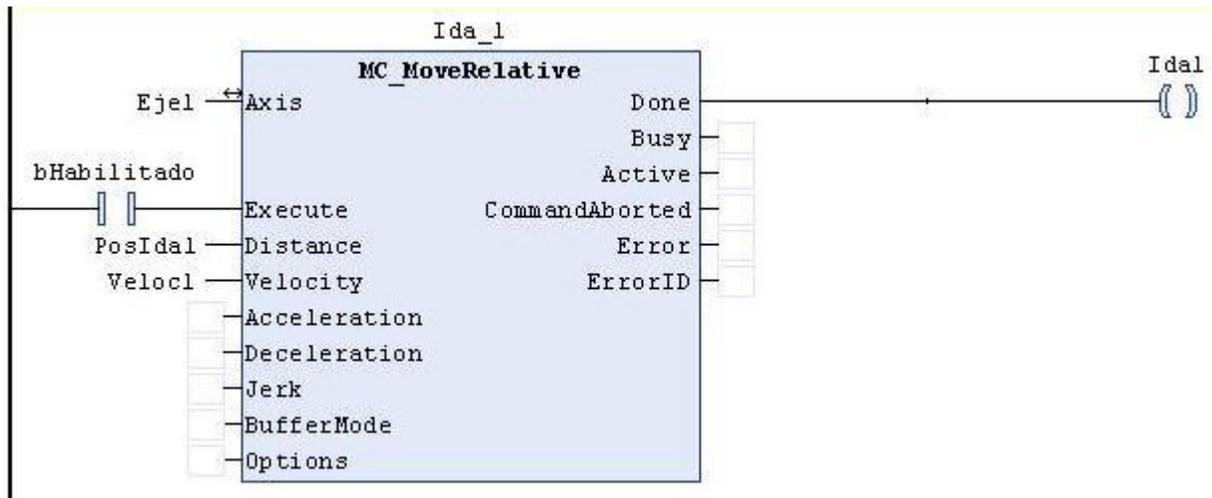


Fig. C- 2. Bloque *MC_MoveRelative*

Para el movimiento de ida del eje se usa el bloque *MC_MoveRelative*, como se exhibe en la Fig. C-2, que funciona en base a posicionamiento relativo basado en la posición en la que se encuentra y monitorea el movimiento durante el recorrido.

El funcionamiento de los comandos de entrada y salida se muestran en la Tabla C-2.

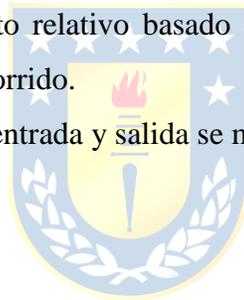


Tabla C- 2. Entradas y salidas del bloque *MC_MoveRelative*

Variables de Entrada	
Execute	Variable booleana que le indica al bloque cuándo debe activarse.
Distance	Variable que le indica al bloque la posición de destino que debe recorrer la correa del eje para el posicionamiento. Se permite cualquier valor real.
Velocity	Variable que le indica al bloque la velocidad a la que debe ir el eje. Se permite cualquier valor real mayor a 0.
Acceleration	Variable que le indica al bloque la aceleración que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que la aceleración indicada es la estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.
Deceleration	Variable que le indica al bloque la desaceleración que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que la desaceleración indicada es la estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.
Jerk	Variable que le indica al bloque el frenado brusco que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que el frenado indicado es el estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.
BufferMode	Variable que evalúa el reestablecimiento del movimiento.
Variables de Salida	
Done	Variable booleana que indica que la correa ya alcanzó la posición de destino indicada en Distance. Lo hace con el valor TRUE
Busy	Variable booleana que indica si el bloque está ocupado. Lo hace con el valor TRUE.
Active	Variable booleana que indica si el bloque está activo. Lo hace con el valor TRUE.
CommandAborted	Variable booleana que indica que el bloque no pudo ser ejecutado. Lo hace con el valor TRUE.

Error	Indica que hay un error en la salida y el movimiento no se permite. Lo hace con el valor TRUE.
ErrorID	Cuando Error está en estado TRUE, muestra la codificación del error estandarizada por BECKHOFF para identificar lo que está sucediendo.



C.1.3 Bloque de Movimiento de Regreso. *MC_MoveAdditive*

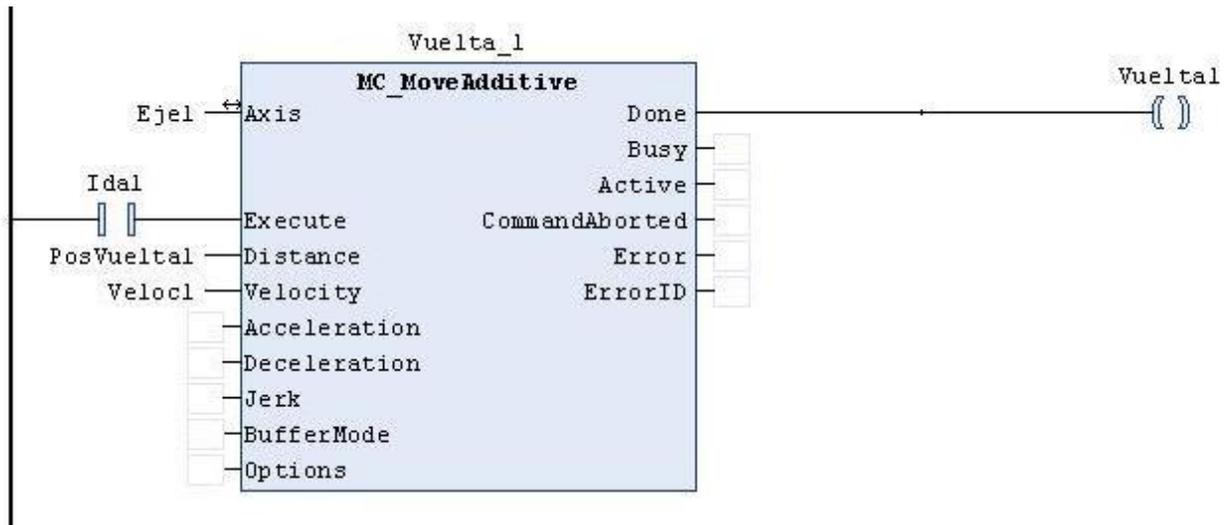


Fig. C- 3. Bloque *MC_MoveAdditive*

Para el movimiento de regreso se utiliza el bloque *MC_MoveAdditive* mostrado en la Fig. C-3. Este bloque trabaja en base a los movimientos relativos a la última instrucción de posición, independiente si se logró. Si no hay una última posición o es desconocida, el movimiento se ejecuta mediante la base de la posición actual del eje.

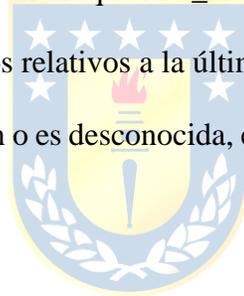


Tabla C- 3. Entradas y salidas del bloque *MC_MoveAdditive*

Variables de Entrada	
Execute	Variable booleana que le indica al bloque cuándo debe activarse.
Distance	Variable que le indica al bloque la posición de destino que debe recorrer la correa del eje para el posicionamiento. Se permite cualquier valor real.
Velocity	Variable que le indica al bloque la velocidad a la que debe ir el eje. Se permite cualquier valor real mayor a 0.
Acceleration	Variable que le indica al bloque la aceleración que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que la aceleración indicada es la estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.

Deceleration	Variable que le indica al bloque la desaceleración que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que la desaceleración indicada es la estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.
Jerk	Variable que le indica al bloque el frenado brusco que debe tener el eje. Si el valor es 0, se asume que el frenado indicado es el estándar de la configuración de ejes. Se permite cualquier valor real mayor o igual a 0.
BufferMode	Variable que evalúa el reestablecimiento del movimiento.
Variables de Salida	
Done	Variable booleana que indica que la correa ya alcanzó la posición de destino indicada en Distance. Lo hace con el valor TRUE
Busy	Variable booleana que indica si el bloque está ocupado. Lo hace con el valor TRUE.
Active	Variable booleana que indica si el bloque está activo. Lo hace con el valor TRUE.
CommandAborted	Variable booleana que indica que el bloque no pudo ser ejecutado. Lo hace con el valor TRUE.
Error	Indica que hay un error en la salida y el movimiento no se permite. Lo hace con el valor TRUE.
ErrorID	Cuando Error está en estado TRUE, muestra la codificación del error estandarizada por BECKHOFF para identificar lo que está sucediendo.

C.2. Programa para la obtención de datos.

Para el registro de los datos se realizó un pequeño programa en S.T, donde bastó con direccionar la tarjeta EL3702 para leer sus datos, graficarlos y guardarlos.

```
PROGRAM MAIN
VAR
entrada_over      AT%IW124:      INT;
medicion_asiso:  INT;
END_VAR

medicion_asiso:=entrada_over;
```



Anexo D. Desarrollos Matemáticos

D.1. Estructuras de Modelos Discretos

Como ya se mencionó en el Capítulo 6, los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, ya que los datos obtenidos se obtienen por muestreo.

La expresión más general de un modelo discreto es del tipo:

$$\mathbf{s}(t) = \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (\text{D.1})$$

donde,

$\mathbf{s}(t)$: salida medible del sistema

$\boldsymbol{\eta}(t)$: término que relaciona la salida respecto a la entrada

$\mathbf{w}(t)$: término que relaciona la salida respecto a las perturbaciones

Cada uno de los términos puede desarrollarse como:

$$\boldsymbol{\eta}(t) = G(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) \cdot u(t) \quad (\text{D.2})$$

$$\mathbf{w}(t) = H(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) \cdot e(t) \quad (\text{D.3})$$

$$\mathbf{s}(t) = A(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) \cdot y(t) \quad (\text{D.4})$$

donde,

q^{-1} : operador retardo

$\boldsymbol{\theta}$: vector de parámetros

$u(t)$: señal de entrada al sistema

$e(t)$: señal de ruido al sistema

$y(t)$: señal de salida al sistema

A su vez, las funciones de transferencia G , H y A son descritas de la forma:

$$G(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} = \frac{b_1 \cdot q^{-nk} + b_2 \cdot q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nk-nb-1}}{1 + f_1 \cdot q^{-1} + f_2 \cdot q^{-2} + \dots + f_{nf} \cdot q^{-nf}} \quad (\text{D.5})$$

$$H(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} = \frac{1 + c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots + c_{nc} \cdot q^{-nc}}{1 + d_1 \cdot q^{-1} + d_2 \cdot q^{-2} + \dots + d_{nd} \cdot q^{-nd}} \quad (\text{D.6})$$

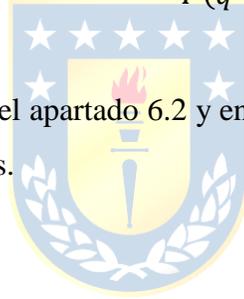
$$A(q^{-1}, \boldsymbol{\theta}) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na} \quad (\text{D.7})$$

Los coeficientes a_i , b_i , c_i , d_i y f_i de los polinomios anteriormente descritos están contenidos en el vector de parámetros $\boldsymbol{\theta}$.

Combinando las ecuaciones (D.1) a la (D.7), se obtiene que la estructura genérica de estos modelos es del tipo:

$$A(q^{-1}) \cdot y(t) = G(q^{-1}) \cdot u(t) + H(q^{-1}) \cdot e(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t) \quad (\text{D.8})$$

Las diferentes estructuras mostradas en el apartado 6.2 y en la Tabla 6-1 se obtienen simplificando a la unidad cualquiera de estos polinomios.



D.2. Mínimos Cuadrados

Se considera una identificación con la forma del modelo notado en la ecuación (D.9)

$$\mathbf{y}(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k) \quad (\text{D.9})$$

El problema es encontrar el estimador $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ del vector de parámetros $\boldsymbol{\theta}$. La ecuación (D.10) se puede escribir matricialmente de la forma

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\theta} \quad (\text{D.10})$$

Sea el error

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k) \quad (\text{D.11})$$

La estimación de θ por M.C significa que $\hat{\theta}$ minimiza la función de pérdida:

$$V(\hat{\theta}) = \|\varepsilon\|^2 \quad (\text{D.12})$$

Donde $\|\varepsilon\|$ es la norma del error de la ecuación D.12.

El único punto mínimo de la ecuación D.13 está dado cuando la derivada respecto del vector de estimados es igual al vector nulo. Vale decir:

$$\frac{d}{d\theta} V(\hat{\theta}) = \mathbf{0} \quad (\text{D.13})$$

Cuya solución es conocida como:

$$\hat{\theta} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T Y \quad (\text{D.14})$$

D.3. Análisis Residual

La ecuación (D.15) representa el residuo de un sistema, definido como los errores de predicción entre la salida real y la salida estimada.



$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - y_e(t, \theta) \quad (\text{D.15})$$

donde,

- $\varepsilon(t, \theta)$: residuo del sistema
- θ : vector de parámetros
- $y(t)$: respuesta real del sistema
- $y_e(t, \theta)$: respuesta estimada por el modelo para la misma entrada

Idealmente estos residuos deben ser independientes de la entrada. De no ser así, significa que hay componentes en ε que proceden de la entrada, por lo que se interpreta que el modelo no describe la dinámica del sistema.

El análisis residual nace comprobándose entre la correlación entre el error de predicción y la entrada al sistema, según la ecuación (D.16):

$$R_{\varepsilon u} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t + \tau)u(t) \quad (\text{D.16})$$

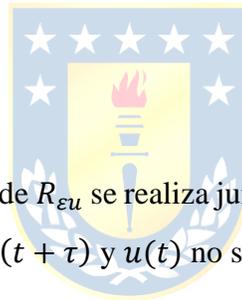
Mientras más cercanos a cero estén los términos de la correlación, más ajustado será el modelo. Se puede demostrar que $\varepsilon(t)$ y $u(t)$ son totalmente independientes, la expresión de (D.16), para N grandes es una distribución normal, con media cero y varianza expresada por la ecuación (D.17):

$$P_r = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N R_{\varepsilon}(k)R_u(k) \quad (\text{D.17})$$

donde,

$R_{\varepsilon}(k)$: covarianza de $\varepsilon(t)$

$R_u(k)$: covarianza de $u(t)$



Generalmente, la representación gráfica de $R_{\varepsilon u}$ se realiza junto con las líneas de límite $\pm 3\sqrt{P_r}$. Si $R_{\varepsilon u}$ sobrepasa esos límites, probablemente $\varepsilon(t + \tau)$ y $u(t)$ no son independientes para ese valor de τ .

Anexo E. Programación en MATLAB

E.1. Exportación de datos desde TwinCAT.

Para el tratamiento de los datos obtenidos es necesario usar el software MATLAB. Se realiza un programa que pueda leer los datos y poder así graficarlos de forma más familiar.

E.1.1 Graficado.m

```
clear all, close all, clc;

%% LECTURA DE ARCHIVO CONTENEDOR DE DATOS
archivo = 'Datos2.xlsx';

Entrada = 1; % Datos de entrada
Salida = 2; % Datos de salida
DI = xlsread(archivo,Entrada);
DO = xlsread(archivo,Salida);
Norm = 5635.924; % Valor 16 bits tarjeta EL3702 cuando el sistema está en
reposito

%% GRÁFICAS DE DATOS

ti = DI(:,1);
U1 = DI(:,2)/Norm;
to = DO(:,1);
Y1 = DO(:,2)/Norm;

% Obtención completa
figure('name', 'Entrada y Salida Sensada')

subplot 211
plot(ti,U1)
grid on
title('Entrada Sensada Sistema');
xlabel('tiempo [ms]'), ylabel('Aceleración Carril Motor [p.u]');
axis ([0 1.1e5 0.4 1.4])

subplot 212
plot(to,Y1,'r')
grid on
title('Salida Sensada Sistema');
xlabel('tiempo [ms]'), ylabel('Aceleración Estructura [p.u]');
axis ([0 1.1e5 0.4 1.4])
```



```

% Acercamiento
figure('name', 'Entrada y Salida Sensada (Acercamiento)')

subplot 211
plot(ti,U1)
grid on
title('Entrada Sensada Sistema (Acercamiento)');
xlabel('tiempo [ms]'), ylabel('Aceleración Carril Motor [p.u]');
axis ([5.8e4 6.2e4 0.4 1.4])

subplot 212
plot(to,Y1,'r')
grid on
title('Salida Sensada Sistema (Acercamiento)');
xlabel('tiempo [ms]'), ylabel('Aceleración Estructura [p.u]');
axis ([5.8e4 6.2e4 0.4 1.4])

%% ANÁLISIS EN FRECUENCIA

Ts = 10e-3;
Fs = 1/Ts;
t = 0:Ts:length(ti);
L = length(U1);

% Algoritmo para calcular Transformada Rápida de Fourier
NFFT = 2^nextpow2(L);
UF = fft(U1,NFFT)/L;
YF = fft(Y1,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Graficado Espectro de Frecuencias

figure('name', 'Espectro de Frecuencias')
subplot 211
plot(f,2*abs(UF(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro Frecuencias Entrada Sistema')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud |u(t)|')
grid on
axis([-0.05 2.5 0 2.5])

subplot 212
plot(f,2*abs(YF(1:NFFT/2+1)),'r')
title('Espectro Frecuencias Salida Sistema')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud |y(t)|')
grid on
axis([-0.05 2.5 0 2.5])

figure('name', 'Espectro de Frecuencias (Acercamiento)')

subplot 211
plot(f,2*abs(UF(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro Frecuencias Entrada Sistema (Acercamiento)')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud |u(t)|')

```



```
grid on
axis([1.5 2.5 0 0.1])

subplot 212
plot(f,2*abs(YF(1:NFFT/2+1)), 'r')
title('Espectro Frecuencias Salida Sistema (Acercamiento)')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud |y(t)|')
grid on
axis([1.5 2.5 0 0.1])
```

