



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: IDENTIFICACIÓN POR SUBESPACIOS DE UN
SISTEMA BALASTRO LÁMPARA HID - MH DE 250W**

**AUTORES: IRVIN ALBERTO CEDEÑO GARCÍA
EDISON RAMIRO NIETO RIOS**

**DIRECTOR: ING. PAÚL AYALA
CODIRECTOR: ING. EDWIN AGUILAR**

SANGOLQUÍ, FEBRERO 2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICADO

Ing. Paúl Ayala

Ing. Edwin Aguilar

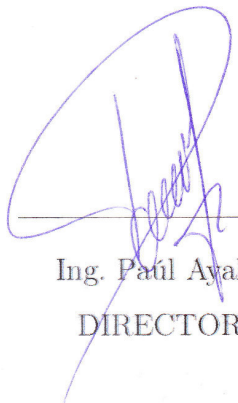
CERTIFICAN

Que el trabajo titulado "Identificación por Subespacios de un Sistema Balastro Lámpara HID - MH de 250W", realizado por los señores Irvin Alberto Cedeño García y Edison Ramiro Nieto Rios, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

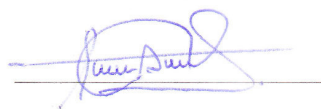
Debido a que se trata de un trabajo de investigación se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato porátíl de Acrobat (pdf.). Autorizan a los señores Irvin Alberto Cedeño García y Edison Ramiro Nieto Rios que entreguen al Ingeniero Luis Orozco en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Febrero del 2015



Ing. Paúl Ayala
DIRECTOR



Ing. Edwin Aguilar
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

IRVIN ALBERTO CEDEÑO GARCÍA

EDISON RAMIRO NIETO RIOS

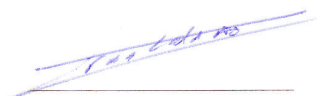
DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado "*Identificación por Subespacios de un Sistema Balastro Lámpara HID - MH de 250W*", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.


Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Febrero del 2015



Sr. Irvin Cedeño



Sr. Edison Nieto

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

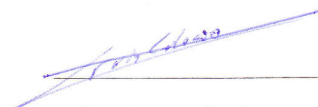
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

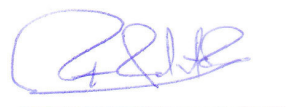
Nosotros Irvin Alberto Cedeño García y Edison Ramiro Nieto Rios

Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "*Identificación por Subespacios de un Sistema Balastro Lámpara HID - MH de 250W*", cuyo contenido ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Febrero del 2015



Sr. Irvin Cedeño



Sr. Edison Nieto

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las tres mujeres más importantes de mi vida: mi abuelita Nelly, mi mamá Patty y mi tía Tamara.

Irvin Cedeño

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres quienes con su apoyo y consejos han sido el pilar fundamental para superar los problemas y dificultades que se presentan, quienes con su ejemplo me inculcaron valores y principios determinantes durante este proceso formativo.

Le dedico de manera especial a mi hermano, quien hace pocos meses empezó el camino que ahora doy por terminado, esperando que este trabajo sea un símbolo de los resultados que dejan el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia.

Edison Nieto

AGRADECIMIENTO

A mi familia por todo su esfuerzo y apoyo durante esta etapa de mi vida; y a todos mis amigos(as) con quienes compartí muchos momentos a lo largo de los años.

Irvin Cedeño

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme finalizar esta importante etapa de mi vida llena de bendiciones y lecciones, donde no sólo existió crecimiento a nivel de conocimientos sino también a nivel personal.

A mis amigos Roberto, Natasha, Diana y Nathalie quienes con su apoyo, compañía y paciencia contribuyeron al avance del proyecto de fin de carrera. A mi amigo y compañero de tesis Irvin, con quien compartí este proyecto y también muchos años de amistad en las aulas, superando obstáculos y dificultades a lo largo de nuestra vida universitaria compartiendo conocimientos, tristezas y alegrías.

A mi director de tesis el ingeniero Paúl Ayala, mi codirector el ingeniero Edwin Aguilar y de manera especial ingeniero Alexander Ibarra, cuyos conocimientos y enseñanzas nos han guiado a lo largo del desarrollo del proyecto hasta su culminación.

Edison Nieto

Índice general

CERTIFICADO	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Alcance del Proyecto	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específicos	3
CAPÍTULO 2	4

ESTADO DEL ARTE	4
2.1 Lámpara de Alta Intensidad de Descarga (HID)	4
2.1.1 Componentes Físicos y Principio de Funcionamiento de las Lámparas HID	5
2.1.2 Clasificación de Lámparas HID	6
2.1.3 Lámpara de Halogenuros Metálicos	7
2.1.4. Proceso de Encendido	8
2.2 Modelamiento e Identificación de Sistemas Dinámicos .	10
2.2.1 Introducción	10
2.2.2 Métodos de Identificación	10
2.2.3 Identificación Mediante el Uso de Señales Aleatorias . . .	11
2.3 Algoritmos Basados en Subespacios	14
2.3.1 Algoritmo General	16
 CAPÍTULO 3	 22
 ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN	 22
3.1 Método MOESP	22
3.1.1 Algoritmo de Katayama	22
3.1.2 Algoritmo de Clavijo	24
3.2 Método N4SID	25
3.2.1 Algoritmo de Katayama	25
3.2.2 Algoritmo de Clavijo	27
 CAPÍTULO 4	 32
 VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS	 32
4.1 Validación de Algoritmos	32
4.1.1 Identificación de Sistemas de Segundo Orden Sobreamor- tigados	33
4.1.2 Identificación de Sistemas de Segundo Orden Subamorti- guados	36

4.1.3	Identificación de Sistemas de Orden Superior	41
4.1.4	Identificación de Sistemas Inestables	43
4.2	Simulación de Algoritmos	45
CAPÍTULO 5		52
IMPLEMENTACIÓN		52
5.1	Introducción	52
5.2	Balastro Electrónico	52
5.2.1	Convertidor AC/DC	52
5.2.2	Convertidor DC/DC	53
5.2.3	Convertidor DC/AC	57
5.2.4	Sensamiento	59
5.2.5	Circuitos y Placas Adicionales	60
5.3	Identificación Sistema Balastro Lámpara	63
5.3.1	Resultados Obtenidos	65
5.4	Controlador	66
5.4.1	Selección del Microcontrolador	67
5.4.2	Parámetros de Diseño	71
5.4.3	Diseño del Controlador	72
5.4.4	Implentación del Filtro	76
5.4.5	Resultados del Control	77
CAPÍTULO 6		81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		81
6.1	Conclusiones	81
6.2	Recomendaciones	82
BIBLIOGRAFÍA		83
ANEXO A		A

	XI
ALGORITMOS	A
ANEXO B	B
SRCIBS DE VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN	B
ANEXO C	C
CIRCUITOS IMPRESOS	C
ANEXO D	D
HOJAS TÉCNICAS	D
ANEXO E	E
CÁLCULOS	E
ANEXO F	F
VINCULO STM y MATLAB	F
ANEXO G	G
PROGRAMA CONTROLADOR	G
ACTA DE ENTREGA	H

Índice de Figuras

1.	Componentes físicos de las lámparas HID	5
2.	Principio de funcionamiento de lámpara HID	6
3.	Flujo luminoso en función del tiempo	7
4.	Relación potencia vs lúmenes	7
5.	Lámpara de halogenuros metálicos	8
6.	Forma de la Función de Autocorrelación de una SBPA	13
7.	Sistema lineal invariante en el tiempo, caso determinístico	15
8.	Algoritmo MOESP de Katayama	28
9.	Algoritmo MOESP de Clavijo	29
10.	Algoritmo Katayama N4SID	30
11.	Algoritmo Clavijo N4SID	31
12.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID primer sistema	34
13.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP primer sistema	35
14.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M primer sistema	36
15.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID segundo sistema	37
16.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP segundo sistema	38
17.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M segundo sistema	39
18.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID tercer sistema	40
19.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP tercer sistema	41
20.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M tercer sistema	42
21.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID cuarto sistema	43
22.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP cuarto sistema	44
23.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M cuarto sistema	45

24.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID quinto sistema	46
25.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP quinto sistema	47
26.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M quinto sistema	48
27.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID sexto sistema	49
28.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP sexto sistema	49
29.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M sexto sistema	50
30.	Respuesta al escalón algoritmo N4SID sistema simulado	50
31.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP sistema simulado	51
32.	Respuesta al escalón algoritmo MOESP M sistema simulado	51
33.	Sistema Balastro-Lámpara	53
34.	Diagrama del convertidor AC/DC	53
35.	Diagrama del convertidor buck boost	54
36.	Señal activacion MOSFET	55
37.	Diagrama placa de activación de MOSFETS	55
38.	Señal salida TLP250	56
39.	Diagrama placa controlador buck boost	56
40.	Señal salida controlador	57
41.	Señales placa driver puente H	58
42.	Diagrama placa driver puente H	59
43.	Señal de salida puente H	60
44.	Diagrama puente H	61
45.	Diagrama punta diferencial	61
46.	Diagrama acoplamiento de señal	62
47.	Señal obtenida sensor diferencial	62
48.	Diagrama placa fuentes	63
49.	Circuito de arranque	63
50.	Interfaz implementación algoritmo	65
51.	Respuesta al escalón unitario del sistema identificado	66
52.	Lugar geométrico de las raíces sistema identificado	67
53.	Datos medidos vs datos calculados	68

54.	Respuesta al escalón con y sin coeficiente	69
55.	Ángulos de compensación	74
56.	Lugar geométrico de las raíces con controlador	75
57.	Respuesta al escalón unitario sistema controlado	76
58.	Diagrama de flujo del controlador	78
59.	Sistema controlado y sin controlar	79
60.	Elementos lazo cerrado de control	80

Índice de Cuadros

1.	Coeficientes de secuencia	13
2.	Funciones de transferencia primer sistema	33
3.	Resultados algoritmos primer sistema	34
4.	Funciones de transferencia segundo sistema	35
5.	Resultados algoritmos segundo sistema	37
6.	Funciones de transferencia tercer sistema	38
7.	Resultados algoritmos tercer sistema	39
8.	Funciones de transferencia cuarto sistema	40
9.	Resultados algoritmos cuarto sistema	41
10.	Funciones de transferencia quinto sistema	42
11.	Resultados algoritmos quinto sistema	43
12.	Funciones de transferencia sexto sistema	44
13.	Resultados algoritmos sexto sistema	45
14.	Funciones de transferencia sistema simulado	46
15.	Resultados algoritmos sistema simulado	48
16.	Resolución registros convertidor análogo – digital	68
17.	Variación del registro del convertidor análogo – digital	70
18.	Validación de resultados	77

RESUMEN

Los métodos de identificación basados en subespacios nacen en la época de los sesenta como alternativa para encontrar un modelo matemático de sistemas físicos en representación de espacio de estados, los métodos consisten en una serie de operaciones matriciales como factorizaciones, descomposiciones y proyecciones de matrices de Hankel, las cuales se forman por los datos de entrada y salida tomados del sistema, estos métodos consideran que los datos de salida son una combinación lineal de los datos de entrada, por ello el objetivo de estos métodos es encontrar dicha combinación. Los diferentes algoritmos de identificación basados en subespacios comparten entre si una secuencia de tres pasos, inician con una proyección ortogonal u oblicua de las matrices de datos, se obtienen los estados, de manera explícita o implícita, a partir del subespacio generado por la proyección anterior para finalmente obtener las matrices de estados a partir de los resultados obtenidos en los pasos anteriores. Los algoritmos se diferencian uno de otro en las herramientas computacionales empleadas para el cumplimiento de la secuencia de los tres pasos fundamentales. El presente trabajo es una aplicación de los métodos de identificación basados en subespacios sobre un prototipo de balastro electrónico para una lámpara HID – MH de 250 vatios, el modelo matemático encontrado será el punto de partida para el diseño e implementación de un control sobre la tensión de alimentación de la lámpara. Considerando que el balastro cuenta con un control de corriente sobre un convertidor DC/DC, el resultado final será un control sobre la potencia suministrada a la carga.

Palabras Claves: BALASTRO ELECTRÓNICO, MÉTODOS DE SUBESPACIOS, IDENTIFICACIÓN, HID-MH, ESPACIO DE ESTADOS.

ABSTRACT

Identification methods based on subspaces were born in the sixties as an alternative to find a mathematical model of physical systems in state space representation, the methods comprise a series of matrix operations such as factoring, decompositions and matrices projections of Hankel matrices, which are formed by input and output data taken from the system, these methods consider the output data is a linear combination of the input data, so the objective of these methods is to find such a combination. Different identification algorithms based on subspace shared between whether a sequence of three steps, starting with an orthogonal or oblique projection data arrays, states are obtained, explicitly or implicitly, from the subspace spanned by the previous projection to finally obtain the matrices of states from the results obtained in the previous steps. The algorithms differ from each other in the computational tools used to comply with the sequence of the three basic steps. This work is an application of identification methods based on subspaces over a prototype electronic ballast for 250 watt HID-MH lamp, the mathematical model found will be the starting point for the design and implementation of a control voltage lamp power. Whereas the ballast has a current control on a DC/DC converter, the end result will be a check on the power delivered to the load.

Keywords: ELECTRONIC BALLAST, SUBSPACE METHODS, IDENTIFICATION, HID-MH, STATE SPACE.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las lámparas de alta intensidad de descarga, HID - MH por sus siglas en inglés, se caracterizan por proveer una fuente de luz compacta. Los tres tipos de lámparas HID - MH disponibles en el mercado ofrecen ventajas que las hacen ideales para numerosas aplicaciones. El uso de las lámparas HID - MH es muy extenso, ya que estas se utilizan en alumbrado público, iluminación exterior de edificios, inmuebles de gran tamaño, centros comerciales, naves industriales, estadios, entre otras [1].

Para el correcto funcionamiento de las lámparas de alta intensidad de descarga se requiere un elemento que regule el flujo de corriente, evitando que la potencia aumente de manera desmesurada, este elemento se denomina balastro. Para la implementación y el correcto funcionamiento del conjunto balastro - lámpara, es necesario conocer la dinámica de la lámpara y la interacción entre balastro y lámpara [1].

Para un diseño óptimo del balastro es necesario tener un modelo que reproduzca de manera precisa el comportamiento estático y dinámico de la lámpara. Al obtener un modelo para la lámpara se reducirá el riesgo de falla al implementar un balastro electrónico [1].

La identificación de sistemas es la teoría y el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos, partiendo de un análisis de los datos experimentales, mediciones y observaciones recabadas del sistema en cuestión [2].

Para la identificación que se realiza en este documento, los datos utilizados fueron obtenidos de un prototipo de balastro-lámpara, este consta de un conver-

tidor AC/DC (Rectificador de onda completa con filtro), un convertidor DC/DC (Buck - Boost) y un convertidor DC/AC (Puente H).

1.2 Justificación e Importancia

En la actualidad las lámparas HID - MH son altamente utilizadas debido a su alta eficacia luminosa, alto índice de reproducción de color, elevada temperatura de color y tiempo de vida. Todas estas características las han convertido en la primera opción para iluminación exterior e interior de grandes espacios.

El balastro electrónico a analizar conjuntamente con un sistema de control adecuado, minimiza las desventajas y problemas de resonancia acústica, consumo excesivo de corriente e impedancia negativa que presentan estas lámparas, pero para poder diseñar e implementar un controlador óptimo es necesario contar con un modelo matemático confiable de la planta Balastro-Lámpara .

Los modelos pueden venir dados por diferentes estructuras y con distintas formulaciones matemáticas. La aplicación del modelo determina el grado de sofisticación requerido, por ejemplo, un sistema moderno complejo posee varias entradas y numerosas salidas que se relacionan entre sí en una forma complicada. Para analizar este tipo de sistema, es esencial reducir la complejidad de las expresiones matemáticas. Siendo el conjunto de estados o vector de estados la información mínima en la que se resume toda la historia de la evolución del sistema y también la mínima con la que es posible calcular su evolución futura [3].

Al ser un proyecto de tipo investigativo presentará un aporte para el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sentando un precedente, para que en futuros proyectos se pueda realizar una identificación on-line utilizando la técnica de Subespacios, con el objetivo de implementar con mayor facilidad controles de naturaleza Predictiva y Adaptativa.

1.3 Alcance del Proyecto

El presente proyecto busca obtener el modelo matemático de la planta Balastro-Lámpara, mediante identificación paramétrica y el comportamiento dinámico de la misma.

Las técnicas que se emplean para la identificación están basadas en subespacios lo que permite obtener un modelo matemático directamente en representación de espacio de estados.

Para la identificación de la planta Balastro-Lámpara se desarrollan los algoritmos MOESP y N4SID, los cuales son sometidos a pruebas de simulación en MATLAB®[®], con el análisis de los algoritmos se determina cual es el más eficiente en cuanto a requerimientos de hardware para su implementación.

Finalmente se comprueba la validez del modelo matemático con el diseño e implementación de un algoritmo de control lo suficientemente robusto para la planta, el cual es implementado en un microcontrolador.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Obtener un modelo matemático del sistema Balastro – Lámpara de 250W en base a la identificación paramétrica.

1.4.2 Específicos

- Establecer los parámetros mínimos para describir el comportamiento del sistema Balastro – Lámpara.
- Programar, dentro del entorno de simulación MATLAB®[®], los algoritmos de identificación, MOESP y N4SID, en base a los parámetros establecidos.
- Comparar los resultados de las simulaciones de los algoritmos programados, para determinar cual se aproxima de mejor manera al comportamiento real de la planta.
- Implementar el algoritmo de identificación seleccionado en un dispositivo electrónico cuyas características sean las suficientes para cumplir con los requerimientos del proyecto.
- Comprobar la validez del modelo matemático obtenido mediante el diseño e implementación de un controlador acorde a la planta.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Lámpara de Alta Intensidad de Descarga (HID)

Las lámparas de alta intensidad de descarga o HID, por sus siglas en inglés, son fuentes de luz electroluminiscentes que presentan muchas ventajas como su alto índice de reproducción de color, tiempo de vida, elevada temperatura de color, entre otras que las hacen atractivas para aplicaciones en iluminación [1].

Este tipo de lámparas requieren pulsos de alta tensión, típicamente mayores a 3kV para su encendido, una vez cumplido el proceso de encendido, la lámpara incrementa el flujo luminoso, en este instante se presenta el fenómeno conocido como impedancia negativa, este fenómeno es la consecuencia del aumento de la concentración de iones y electrones libres debido al incremento de la corriente y la temperatura de la lámpara. La conductividad en el arco de descarga se incrementa lo suficiente como para que la tensión disminuya, mientras que la corriente aumenta.

Con la finalidad de minimizar los efectos del fenómeno de impedancia negativa, la lámpara requiere de un circuito que limite la corriente que circula a través de ella, este circuito conocido como balastro puede ser de tipo electromagnético o electrónico. La función principal del balastro es evitar que la potencia aumente de manera descontrolada, es decir que regulará los niveles de corriente y tensión durante los procesos de encendido, estabilización y funcionamiento a plena potencia [4].

El principio de operación de estas lámparas, presenta un grave problema y es que la potencia instantánea de la lámpara es variable, ocasionando una contorsión del arco de descarga, a este fenómeno se lo conoce como resonancia acústica.

2.1.1 Componentes Físicos y Principio de Funcionamiento de las Lámparas HID

Físicamente estas lámparas están constituidas por los siguientes elementos:

- Una ampolla exterior
- Un tubo de descarga
- Dos electrodos
- Un casquillo

Como se muestra en la figura 1, la ampolla exterior conjuntamente con el casquillo contienen al tubo de descarga en cuyos extremos se localizan los electrodos, en ciertos modelos el casquillo se conecta directamente con los electrodos mientras que en los modelos más modernos se incluye una bobina de choque, la cual permite el encendido de la lámpara sin la necesidad de incluir un circuito de ignición adicional, que garantice ciertas características eléctricas durante la primera etapa de encendido.

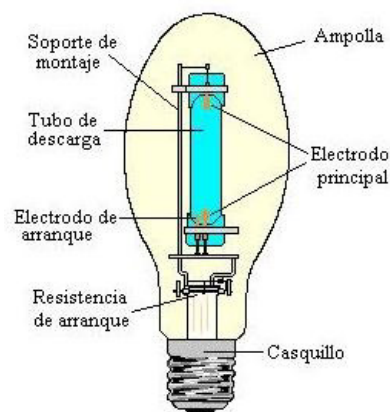


Figura 1: Componentes físicos de las lámparas HID

Fuente: [5]

Las lámparas HID - MH son fuentes electroluminiscentes, es decir, la iluminación se produce por la acción de un campo eléctrico en el seno de un gas o material sólido. Cuando la descarga es a través de un gas, se aplica un potencial

eléctrico que lo ioniza y permite el paso de corriente eléctrica a través de él. Los electrones que forman el “arco de descarga” se aceleran a enormes velocidades y al entrar en colisión con los átomos del gas o vapor, alteran momentáneamente la estructura atómica de este, produciendo la luz por efecto de la energía desprendida cuando los átomos alterados vuelven a su estado normal. La forma en que realiza la excitación determina la distribución espectral emitida [4].

Es decir, la luz generada por estas lámparas es producto de una descarga de arco eléctrico y el flujo continuo de energía eléctrica entre los electrodos hacen que el gas de relleno del tubo de descarga, el cual se encuentra a una presión de 0.98 bar típicamente, brille con alta intensidad. (véase figura 2)

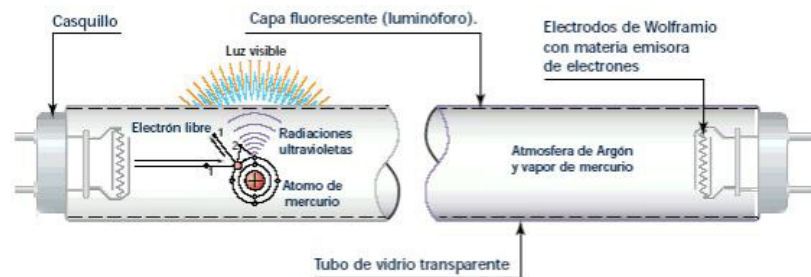


Figura 2: Principio de funcionamiento de lámpara HID
Fuente: [CAD-Projects 6]

2.1.2 Clasificación de Lámparas HID

Las lámparas de alta intensidad de descarga se pueden clasificar en función del gas de relleno del tubo de descarga, obteniendo tres clases [4]:

- Lámparas de vapor de sodio.
- Lámparas de mercurio.
- Lámparas de halogenuros metálicos.

Debido a la diferencia en la composición del gas de relleno, las características de funcionamiento y aplicaciones de las lámparas varían, además de esto también

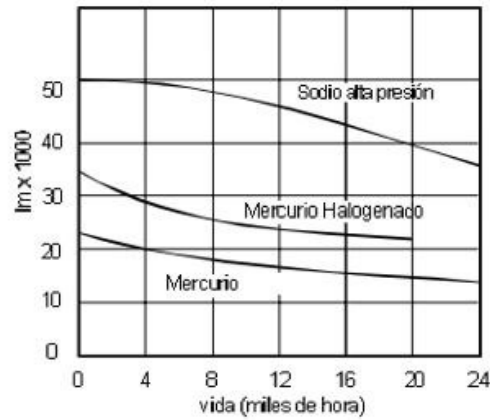


Figura 3: Flujo luminoso en función del tiempo

Fuente: [7]

dependerá la incorporación o no de otros componentes como otros gases nobles o polvos fluorescentes para variar las cualidades cromáticas de la lámpara. La figura 3 muestra una gráfica de la cantidad de lúmenes emitidos por cada clase de lámpara en función del tiempo, mientras que la figura 4 demuestra que la relación entre la potencia y los lúmenes emitidos es lineal y no varía en función del gas de relleno del tubo de descarga.

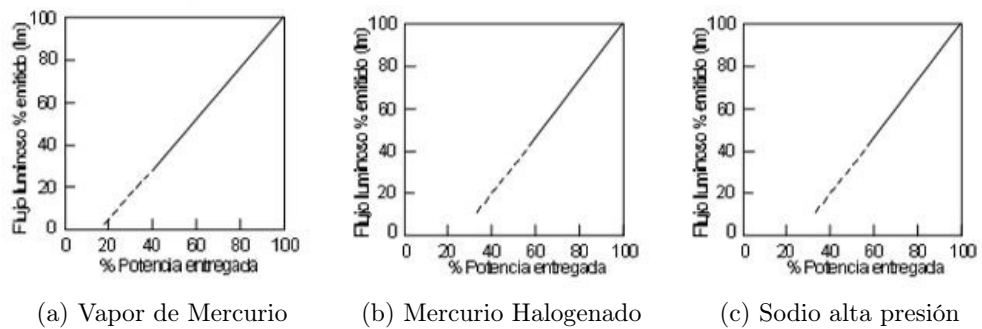


Figura 4: Relación potencia vs lúmenes

Fuente: [7]

2.1.3 Lámpara de Halogenuros Metálicos

Esta clase de lámparas son básicamente, lámparas de gas de mercurio a las cuales se les adjunto halogenuros metálicos dentro del tubo de descarga. Presen-

tan una mejora considerable en cuanto a rendimiento y a su nivel de reproducción de color, sin embargo la tensión de arranque se ve afectada, lo que representa la mayor desventaja de este tipo de lámparas. Los halogenuros que son empleados frecuentemente son indio, talio, disprosio y escandio, en diferentes combinaciones, usualmente en este tipo de lámparas se suele implementar las siguientes combinaciones:

- Talio, ioduros de indio y sodio.
- Ioduros de escandio y sodio.
- Ioduros de talio y disprosio.

La variación de las características de desempeño de las lámparas con combinaciones de haluros diferentes no es significativa [4]. Los haluros ayudarán a mejorar el balance de color de la luz emitida. En la figura 5 se muestran dos lámpara de haluros metálicos con dos formas diferentes de ampolla.



Figura 5: Lámpara de halogenuros metálicos
Fuente: [8]

2.1.4. Proceso de Encendido

El proceso de encendido de la lámpara es muy importante, por lo tanto, se deben conocer las características en las diferentes fases de este proceso, las cuales son:

- Fase de ruptura.
- Fase de transición de luminiscencia a arco.
- Fase de transición a arco termoiónico.
- Fase de arco termoiónico.

En la fase de ruptura se aplica una tensión alta en los electrodos para liberar electrones, los cuales se acelerarán por efecto del campo eléctrico, los electrones acelerados se verán envueltos en colisiones elásticas e inelásticas con las moléculas del gas de relleno del tubo de descarga, estas colisiones transfieren energía cinética la cual provoca que los átomos del gas desplacen un electrón a un nivel energético más alto, llegando incluso a liberar por completo el electrón, dando origen a un ion positivo estableciendo la corriente de descarga como efecto del incremento de la temperatura del gas por el movimiento de electrones. Una vez ionizado el medio se presenta la descarga electroluminiscente dando inicio a la siguiente etapa [4].

En la etapa de transición de arco luminiscente la lámpara mantiene una impedancia alta, como consecuencia de esto la tensión de alimentación será alta, la corriente será baja y emitirá una pequeña cantidad de luz. Pasado un intervalo de tiempo y con el calentamiento de los electrodos se sustituirá la emisión de electrodos secundarios por un bombardeo iónico.

Durante la fase de transición al arco iónico, la impedancia de la lámpara disminuye, la corriente de la lámpara aumenta y la tensión se reduce, además las formas de onda de la tensión y corriente se ven afectadas [4].

Finalmente, durante la etapa de arco termoiónico, la impedancia de la lámpara al igual que la tensión de alimentación de la misma bajan, el cambio más evidente es el aumento en la emisión de luz.

Para el caso particular de las lámparas de halogenuros metálicos no se pueden realizar dos procesos de encendido consecutivos ya que al tener una tensión de ignición alta, entre 1.5 kV y 5 kV, se debe esperar un periodo de tiempo cercano a 15 minutos con la finalidad que la lámpara se enfríe, caso contrario requerirá pulsos de hasta 35 kV para su encendido [4].

2.2 Modelamiento e Identificación de Sistemas Dinámicos

2.2.1 Introducción

La identificación de sistemas dinámicos, consiste en aplicar un conjunto de estudios, teorías y algoritmos que permiten establecer un puente entre el dominio de la realidad y el de los modelos que pretenden representarla, estos modelos reproducen con cierta exactitud un sistema dinámico. Una vez obtenido un modelo se pueden usar los resultados para la realización de un control automático [9].

Los objetivos concretos que se persiguen mediante la identificación de un sistema determinado son:

- Estudio preliminar de un proceso tecnológico. Generalmente se utilizan técnicas de simulación con la finalidad de diseñar el sistema de control para reducir el número de alternativas posibles y eventualmente hacer una estimación inicial aproximada de algunos parámetros del regulador.
- Ajuste sobre la marcha de los parámetros del regulador sobre la base de una identificación recursiva de los parámetros del modelo.
- Uso del modelo como parte del algoritmo de control, generalmente haciendo las veces de predictor de salidas futuras [9].

Existen varios tipos de sistemas dinámicos, en este subcapítulo se explicará las diferentes posibilidades que existen para identificar un sistema u otro.

2.2.2 Métodos de Identificación

Existen varios métodos para la identificación de sistemas, en el presente trabajo se los agrupa en 3 enfoques, los cuales son:

Identificación Analítica

Desarrolla un modelo basado en las relaciones físico-químicas del proceso a identificar. Por lo general este enfoque conduce a modelos complejos y no lineales

que deben someterse a un proceso de simplificación y linealización. El principal inconveniente de este enfoque consiste en que se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, dicha información no siempre está disponible [9].

Identificación Experimental Mediante Señales Especiales

Es mejor conocido como Identificación Clásica, este enfoque resulta ser el más directo y el que permite obtener el modelo de un proceso a corto plazo. Las señales que se utilizan con mayor frecuencia son los escalones y las llamadas secuencias binarias pseudoaleatorias. La limitación más importante de este enfoque es la necesidad de introducir señales de prueba que perturban de manera indeseable al proceso [9].

Identificación Paramétrica

Consiste en encontrar los diferentes parámetros que componen un modelo determinado para un sistema específico, el método más común se basa en los denominados métodos de minimización del error de predicción. Para poder utilizar el método es necesario aceptar como cierto que el proceso puede ser representado por un modelo de estructura fija, generalmente una ecuación lineal en diferencias, lo que implica que dicho modelo tiene naturaleza discreta [9].

2.2.3 Identificación Mediante el Uso de Señales Aleatorias

La utilización de señales de naturaleza aleatoria para la identificación de procesos, se las utilizó para aquellos procesos que poseen características cercanas al llamado ruido blanco, el fundamento teórico puede encontrarse en los trabajos clásicos de Wiener [10], en especial la ecuación de Wiener-Hoff, que establece la relación entre las funciones de autocorrelación y correlación cruzada de las variables de entrada y salida de un sistema lineal.

Las señales aleatorias poseen la característica que su amplitud puede ser muy pequeña, reduciendo por lo tanto el grado de perturbación que se introduce en la planta a identificar. Estas señales aleatorias pueden superponerse a los valores

normales de la variable de entrada, independientemente de las variaciones de esta, sin que se vea afectado [9].

Secuencias Binarias Pseudoaleatorias (SBPA)

Las SBPA son señales periódicas cuyas integrales de autocorrelación se aproximan de una manera satisfactoria a la función delta de Dirac [11, 12].

Las SBPA se codifican mediante secuencias de ceros y unos que cumplan la ecuación en diferencias (1).

$$x(t) = a_m D^m x(t) (+) a_{m-1} D^{m-1} x(t) (+) \dots (+) a_1 D x(t) \quad (1)$$

Donde:

D	Operador de retardo, de manera que $D^m x(t) = x(t - m)$.
$(+)$	Operador de suma módulo 2 (XOR).
$x(t)$	Variable binaria que asume valores 0 ó 1.
a_i	Coefficientes binarios que asumen también valores 0 ó 1
m	Orden de la secuencia

Las SBPA son secuencias periódicas con un periodo igual a:

$$N = 2^m - 1 \quad (2)$$

Donde:

N	Periodo de SBPA
-----	-----------------

Los coeficientes a_i de (1) no pueden escogerse arbitrariamente. Para que la generación de SBPA cumpla el periodo dado por (2) se seleccionan los coeficientes del cuadro 1.

Las SBPA tienen las siguientes propiedades:

Cuadro 1: Coeficientes de secuencia

Fuente: [9]	
m	Coeficientes Iguales a 1
2	a_1, a_2
3	a_1, a_3
4	a_3, a_4
5	a_3, a_5
6	a_2, a_3, a_6
7	a_4, a_7
8	a_2, a_3, a_4, a_8
9	a_5, a_9
10	a_7, a_{10}
11	a_9, a_{11}

- Su promedio es aproximadamente $\frac{N}{2}$
- Se producen $2^m - 1$ cambios (de 0 a 1 o de 1 a 0)
- Incluyen un grupo de m y otro de $m - 1$ unos o ceros consecutivos
- Incluyen 2^i grupos de $m - i - 1$ ceros o unos con $i = 1, 2, \dots, m - 2$

A medida que la longitud de la secuencia es mayor, la función de autocorrelación se aproxima más a la Delta de Dirac, se lo puede apreciar en la figura 6

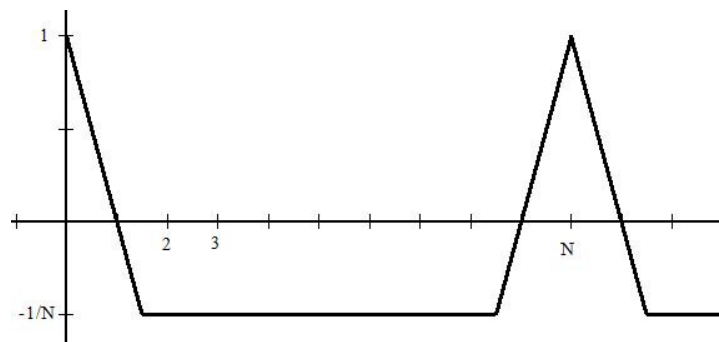


Figura 6: Forma de la Función de Autocorrelación de una SBPA

Es recomendable que la longitud de la secuencia no sea muy grande (en el orden de 8 o 9) y realizar mínimo 2 réplicas de la secuencia, longitudes más grandes implicarían experimentos excesivamente largos y difíciles de poner en práctica [9].

Se entiende que el valor uno es correspondiente a un incremento positivo y el valor cero es correspondiente a un incremento negativo con respecto al valor medio de la variable de control. Estos valores deben ser simétricos con respecto a la posición normal del elemento de control, de manera que el efecto de la perturbación introducida al final del experimento sea cero [9].

2.3 Algoritmos Basados en Subespacios

Las técnicas de Subespacios enfocadas en el análisis de sistemas son una alternativa novedosa, viable y de utilidad para obtener modelos matemáticos en espacio de estados en tiempo discreto, estas técnicas son buenas para sistemas lineales invariantes en el tiempo tipo MIMO, ya que ostentan las siguientes características [2]:

- No es necesario realizar ninguna parametrización canónica, es decir, el sistema no es transformado.
- No se requiere una optimización iterativa no-lineal. Como en el caso de los algoritmos que utilizan variables instrumentales.
- Sólo se requiere de herramientas estadísticas y de algebra lineal numéricamente robusta. Esto simplifica la implementación numérica de los algoritmos.
- Los modelos en espacio de estados, obtenidos por métodos basados en subespacios pueden describir muchos procesos industriales con un aceptable grado de precisión alrededor de una vecindad local del punto de operación [2].

Las técnicas de identificación mediante subespacios en tiempo discreto, hace referencia al uso de algoritmos cuya principal característica es trabajar con un subespacio generado por las matrices de Hankel tanto de entradas como salidas, para obtener un modelo fiable en el espacio de estados [13]. Los modelos de espacio de estados en la forma determinística se describen matemáticamente en (3):

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k + Du_k \end{cases} \quad (3)$$

Donde:

$A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ Matriz del sistema

$B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ Matriz de entrada

$C \in \mathfrak{R}^{l \times m}$ Matriz de salida

$D \in \mathfrak{R}^{l \times m}$ Matriz de relación directa entrada - salida

$u_k \in \mathfrak{R}^m$ Vector de entradas del sistema; señales controlables

$y_k \in \mathfrak{R}^l$ Vector de salidas del sistema; señales observables

$x_k \in \mathfrak{R}^n$ Vector de estados del sistema

m Número de entradas

l Número de salidas

n Número de estados

k Instante de tiempo

En la figura 7 se representa la forma gráfica de un sistema lineal invariante en el tiempo en su caso determinístico.

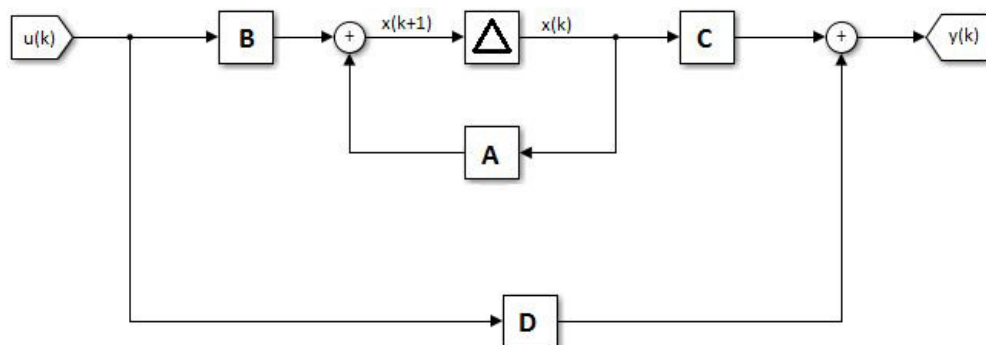


Figura 7: Sistema lineal invariante en el tiempo, caso determinístico

2.3.1 Algoritmo General

Del desarrollo de la ecuación de estados (3) se obtiene (4) representada en forma matricial en el instante $k = 0$ [2].

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} x(i) \\ x(i+1) \\ \vdots \\ x(i+j-2) \\ x(i+j-1) \end{pmatrix}^T = A^i \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(j-2) \\ x(j-1) \end{pmatrix}^T \\ & + \begin{pmatrix} A^{i-1}B \\ A^{i-2}B \\ \vdots \\ AB \\ B \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} u(0) & u(1) & \cdots & u(j-1) \\ u(1) & u(2) & \cdots & u(j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(i-2) & u(i-1) & \cdots & u(j+i-3) \\ u(i-1) & u(i) & \cdots & u(j+i-2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Los valores i y j representan el número de bloques fila y columna respectivamente, en las matrices de Hankel, del desarrollo de la ecuación de salida (3), se obtiene (5) representada en forma matricial en el instante $k = i$ y el bloque de fila es h [2].

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} y(i) & y(i+1) & \cdots & y(i+j-1) \\ y(i+1) & y(i+2) & \cdots & y(i+j) \\ y(i+2) & y(i+3) & \cdots & y(i+j+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(i+h-1) & y(i+h) & \cdots & y(i+h+j-2) \end{pmatrix} = \\
& \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(i) \\ x(i+1) \\ x(i+2) \\ \vdots \\ x(i+j-1) \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} D & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{h-2}B & CA^{h-3}B & \cdots & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(i) & u(i+1) & \cdots & u(i+j-1) \\ u(i+1) & u(i+2) & \cdots & u(i+j) \\ u(i+2) & u(i+3) & \cdots & u(i+j+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(i+h-1) & u(i+h) & \cdots & u(i+h+j-2) \end{pmatrix} \quad (5)
\end{aligned}$$

A continuación, se tienen las siguientes definiciones que ayudarán a desarrollar el algoritmo general de identificación mediante subespacios [14].

Definición. Matriz Hankel con los datos de salida

$$Y_p \triangleq \begin{pmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(j-1) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(i-2) & y(i-1) & \cdots & y(i+j-3) \\ y(i-1) & y(i) & \cdots & y(i+j-2) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{l \times j} \quad (6)$$

$$Y_f \triangleq \begin{pmatrix} y(i) & y(i+1) & \cdots & y(i+j-1) \\ y(i+1) & y(i+2) & \cdots & y(i+j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(i+h-2) & y(i+h-1) & \cdots & y(i+h+j-3) \\ y(i+h-1) & y(i+h) & \cdots & y(i+h+j-2) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{lh \times j} \quad (7)$$

Definición. Matriz Hankel con los datos de entrada

$$U_p \triangleq \begin{pmatrix} u(0) & u(1) & \cdots & u(j-1) \\ u(1) & u(2) & \cdots & u(j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(i-2) & u(i-1) & \cdots & u(i+j-3) \\ u(i-1) & u(i) & \cdots & u(i+j-2) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{mi \times j} \quad (8)$$

$$U_f \triangleq \begin{pmatrix} u(i) & u(i+1) & \cdots & u(i+j-1) \\ u(i+1) & u(i+2) & \cdots & u(i+j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(i+h-2) & u(i+h-1) & \cdots & u(i+h+j-3) \\ u(i+h-1) & u(i+h) & \cdots & u(i+h+j-2) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{mh \times j} \quad (9)$$

Definición. Secuencia de estados

$$X_p = \begin{pmatrix} x(0) & x(1) & \cdots & x(j-2) & x(j-1) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times j} \quad (10)$$

$$X_f = \begin{pmatrix} x(i) & x(i+1) & \cdots & x(i+j-2) & x(i+j-1) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times j} \quad (11)$$

Definición. Matriz de controlabilidad extendida en reversa

$$\Delta_i \triangleq \begin{pmatrix} A^{i-1}B & A^{i-2}B & \cdots & AB & B \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times mi} \quad (12)$$

Definición. Matriz de observabilidad extendida (asumiendo que $h \geq n$)

$$\Gamma_h \triangleq \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times n} \quad (13)$$

Definición. Matriz Toeplitz con los coeficientes de Markov (respuesta impulso)

$$\mathcal{T}_i \triangleq \begin{pmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & CA^{i-4}B & \cdots & D \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times mi} \quad (14)$$

Para obtener el vector de estados futuros X_f , vector de salidas pasadas Y_p y futuras Y_f , se realizan los remplazos correspondientes y se obtienen las siguientes ecuaciones: [2]

$$\begin{aligned} X_f &= A^i X_p + \Delta_i U_p \\ Y_p &= \Gamma_i X_p + H_i U_p \end{aligned} \quad (15)$$

$$Y_f = \Gamma_h X_f + H_h U_f$$

Al realizar la proyección ortogonal Π de Y_f con respecto a $U_{\frac{1}{f}}$ se obtiene: [2]

$$Y_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} = \Gamma_h X_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} \quad (16)$$

Se definen las matrices de ponderación W_a y W_b de la siguiente manera: [14]

$$W_a \triangleq \begin{pmatrix} w_a(1,1) & w_a(1,2) & \cdots & w_a(1,h) \\ w_a(2,1) & w_a(2,2) & \cdots & w_a(2,h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_a(h-1,1) & w_a(h-1,2) & \cdots & w_a(h-1,h) \\ w_a(h,1) & w_a(h,2) & \cdots & w_a(h,h) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{lh \times lh} \quad (17)$$

$$W_b \triangleq \begin{pmatrix} w_b(1,1) & w_b(1,2) & \cdots & w_b(1,j) \\ w_b(2,1) & w_b(2,2) & \cdots & w_b(2,j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_b(j-1,1) & w_b(j-1,2) & \cdots & w_b(j-1,j) \\ w_b(j,1) & w_b(j,2) & \cdots & w_b(j,j) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{j \times j}$$

Se multiplican las matrices de ponderación en (16) con lo cual se obtiene:

$$W_a Y_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} W_b = W_a \Gamma_h X_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} W_b \quad (18)$$

Las matrices de ponderación deben cumplir las siguientes condiciones [14]:

1. $\text{rango}(W_a \Gamma_h) = \text{rango}(\Gamma_h)$
2. $\text{rango}\left(X_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} W_b\right) = \text{rango}(X_f)$

Definiendo lo siguiente:

$$\begin{aligned}
\mathcal{O}_h &\triangleq W_a Y_f \Pi_{U_\perp} W_b \\
\tilde{\Gamma}_h &\triangleq W_a \Gamma_h \\
\tilde{X}_f &\triangleq X_f \Pi_{U_\perp} W_b
\end{aligned} \tag{19}$$

Donde:

- \mathcal{O}_h Proyección oblicua afectada por las matrices W_a y W_b
- $\tilde{\Gamma}_h$ Matriz de observabilidad extendida afectada por W_a
- \tilde{X}_f Secuencia de estados futuros afectados por W_b

Se aplica la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz \mathcal{O}_h :

$$\mathcal{O}_h = U_1 \Sigma_1 V_1^T \tag{20}$$

De la descomposición SVD descrita en (20) se derivan los siguientes resultados [14]:

$$rango(\Sigma_1) = n \tag{21}$$

$$\hat{\Gamma}_h = U_1 \Sigma_1^{1/2}$$

$$\hat{X}_f = \hat{\Gamma}_h^\dagger \mathcal{O}_h \tag{22}$$

(22) contiene los estados estimados y las matrices del sistema, esta es la ecuación que resuelve los algoritmos de identificación por subespacios.

CAPÍTULO 3

ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN

Los métodos de subespacios en esencia constan de tres pasos principales: primero, se realiza la proyección, ortogonal u oblicua, de las matrices de datos, segundo, se obtienen los estados, implícita o explícitamente, del subespacio generado por la proyección anterior y finalmente, se obtienen las matrices del sistema para el modelo de espacio de estados [15, 16].

Cada método de subespacios es completamente diferente a los demás, en concepto y herramientas computacionales, pero en el fondo todos responden a los tres pasos principales de la identificación mediante subespacios [16].

3.1 Método MOESP

Uno de los principales métodos para la identificación de sistemas mediante subespacios es MOESP (Multivariable Output Error State sPace) por sus siglas en inglés, desarrollado por Verhaegen y Dewilde [13, 17, 18, 19].

3.1.1 Algoritmo de Katayama

El algoritmo de Katayama [20] es tomado como referencia para este proyecto, el cual inicia con la realización de la descomposición LQ mostrado en (23).

$$\begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

Se realiza la definición (24).

$$Y_p \Pi_{U_p^\perp} = L_{22} Q_2^T \quad (24)$$

Al desarrollar (24) se llega a la conclusión (25) [13].

$$L_{22} = \Gamma_h X_p Q_2 \quad (25)$$

Ahora, se realiza la descomposición en valores singulares (SVD) de (25) y se obtiene (26).

$$L_{22} = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} = U_1 \Sigma_1 V_1^T \quad (26)$$

Aplicando las definición de (21) se logra obtener las matrices del sistema A y C como se muestra en (27).

$$A = \hat{\Gamma}_{h-1}^\dagger \hat{\Gamma}_h^\dagger \quad (27)$$

$$C = \hat{\Gamma}_h (1:l; 1:n)$$

Para el cálculo de las matrices de sistema B y D es necesario realizar las definiciones de (28) en función de arreglos matriciales de L y M para facilitar su comprensión [13].

$$U_2^T := \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & \cdots & L_h \end{bmatrix}$$

$$U_2^T L_{22} L_{11}^{-1} := \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_h \end{bmatrix} \quad (28)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones (29) se obtienen las matrices B y D del sistema.

$$\begin{bmatrix} L_1 & \bar{L}_2 \hat{\Gamma}_{h-1} \\ L_2 & \bar{L}_3 \hat{\Gamma}_{h-2} \\ \vdots & \vdots \\ L_{h-1} & \bar{L}_h \hat{\Gamma}_1 \\ L_h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{k-1} \\ M_k \end{bmatrix} \quad (29)$$

Donde:

$$L_i \in \mathfrak{R}^{(hl-n) \times l}, i = 1, 2, \dots, h$$

$$M_i \in \mathfrak{R}^{(hl-n) \times m}, i = 1, 2, \dots, h$$

$$\bar{L}_i = \begin{bmatrix} L_i & L_{i+1} & \dots & L_h \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{(kl-n) \times (k+1-i)l}, i = 2, 3, \dots, h$$

En la figura 8 se representa el algoritmo de Katayama en forma gráfica.

3.1.2 Algoritmo de Clavijo

El cálculo de estas matrices se realiza a través de la matriz de Toeplitz [21], definida en (30).

$$\mathcal{T}_h = L_{22} L_{11}^{-1} \quad (30)$$

Se realiza la definición (31) para facilitar su comprensión.

$$\begin{bmatrix} D \\ CB \\ \vdots \\ CA^{h-1}B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \\ \vdots \\ G_h \end{bmatrix} \quad (31)$$

Posteriormente se construye la matriz de Hankel en (32) la cual satisface (33).

$$H_{h,j} := \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & \cdots & G_j \\ G_2 & G_3 & \cdots & G_{j+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_h & G_{h+1} & \cdots & G_{h+j-1} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$Co_j = \hat{\Gamma}_h H_{h,j} \quad (33)$$

Donde:

$Co_j := \left(B \ AB \ A^2B \ \cdots \ A^{j-1}B \right) \in \mathfrak{R}^{n \times hm}$ Matriz de controlabilidad.

Finalmente se encuentran las matrices B y D [13], establecidas en (34).

$$B = Co_j (1 : n, 1 : m) \quad (34)$$

$$D = G_0$$

En la figura 9 se representa el algoritmo de [13] en forma gráfica.

3.2 Método N4SID

Otro método conocido para la identificación de sistemas mediante subespacios es N4SID (Numerical algorithm for Subspace State Space System IDentification) por sus siglas en inglés, ha sido desarrollado por Van Overschee y De Moor [13, 22].

3.2.1 Algoritmo de Katayama

Se toma el algoritmo N4SID de Katayama [20] como referencia, teniendo como primer paso la descomposición LQ mostrado en (35)

$$\begin{bmatrix} U_f \\ U_p \\ Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & 0 \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \\ Q_4^T \end{bmatrix} \quad (35)$$

Por definición $L_{44} = 0$, se puede reescribir (35) como (36). [23, 24]

$$\begin{bmatrix} U_f \\ W_p \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Q}_1^T \\ \bar{Q}_2^T \\ \bar{Q}_3^T \end{bmatrix} \quad (36)$$

Donde:

$$\begin{aligned} R_{11} &= [L_{11}] & R_{21} &= \begin{bmatrix} L_{21} \\ L_{31} \end{bmatrix} & R_{22} &= \begin{bmatrix} L_{22} & 0 \\ L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \\ R_{31} &= [L_{41}] & R_{32} &= [L_{42} \quad L_{43}] \\ \bar{Q}_1^T &= [Q_1] & \bar{Q}_2^T &= \begin{bmatrix} Q_2^T \\ Q_3^T \end{bmatrix} & \bar{Q}_3^T &= [Q_4^T] \end{aligned}$$

Al desarrollar (36), se obtiene la proyección (37).

$$Y_f \Pi_{U_{\frac{1}{f}}} = R_{32} R_{22}^\dagger W_p \quad (37)$$

A la proyección (37), se aplica la descomposición en valores singulares con lo cual se obtiene (21) y (38).

$$X_f = \Sigma_1^{1/2} V_1^T \quad (38)$$

Para el cálculo de las matrices del sistema A, B, C y D, es necesario obtener las siguientes matrices (39).

$$X_h = X_f$$

$$\begin{aligned}\bar{X}_{h+1} &:= \begin{bmatrix} x_{h+1} & x_{h+2} & \cdots & x_{(h+j-1)} \end{bmatrix} \\ \bar{X}_h &:= \begin{bmatrix} x_h & x_{h+1} & \cdots & x_{(h+j-2)} \end{bmatrix} \\ \bar{U}_{h|h} &:= \begin{bmatrix} u_h & u_{h+1} & \cdots & u_{(h+j-2)} \end{bmatrix} \\ \bar{Y}_{h|h} &:= \begin{bmatrix} y_h & y_{h+1} & \cdots & y_{(h+j-2)} \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{39}$$

La solución del sistema de ecuaciones (40), entrega como resultado las matrices del sistema, se resuelve aplicando jacobiano o por mínimos cuadrados [24, 25, 26].

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_{h+1} \\ \bar{Y}_{h|h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_{h+1} \\ \bar{U}_{h|h} \end{bmatrix}\tag{40}$$

En la figura 10 se representa el algoritmo de Katayama en forma gráfica.

3.2.2 Algoritmo de Clavijo

El algoritmo de Clavijo [13] se basa en el algoritmo de Katayama, la diferencia radica en la forma de obtener las matrices del sistema, además de la redefinición de la matriz de Toeplitz en (41), en la figura 11 se representa de una manera gráfica las modificaciones de Clavijo al algoritmo de Katayama.

$$\mathcal{T}_h = \left(R_{31} - R_{32}R_{22}^\dagger R_{21} \right) R_{11}^{-1}\tag{41}$$

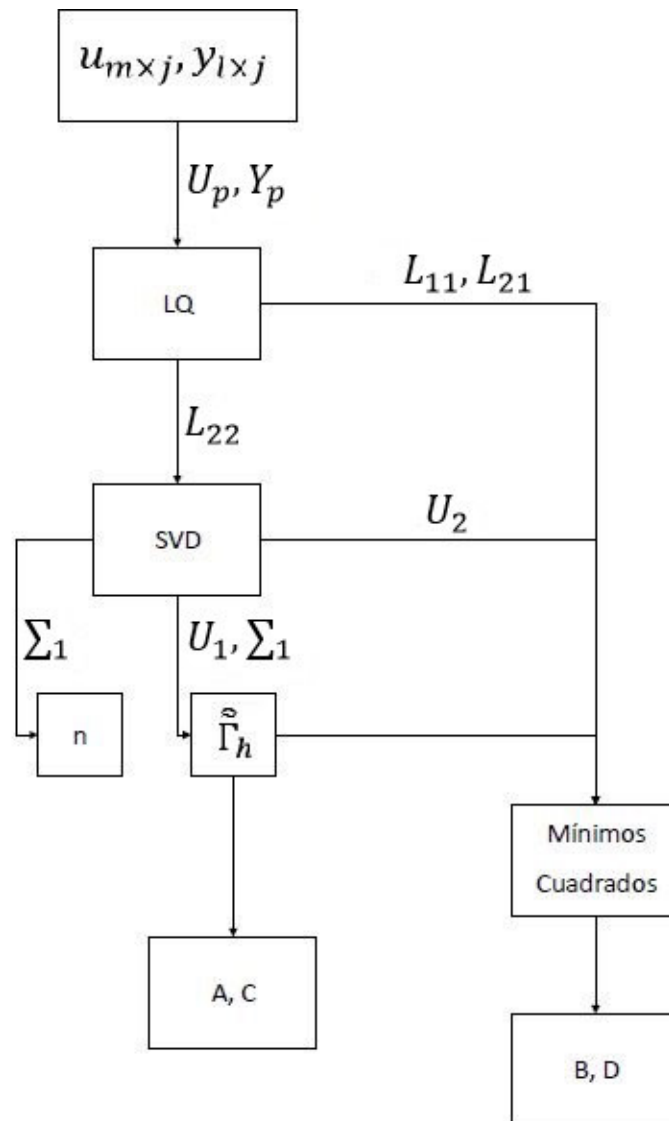


Figura 8: Algoritmo MOESP de Katayama

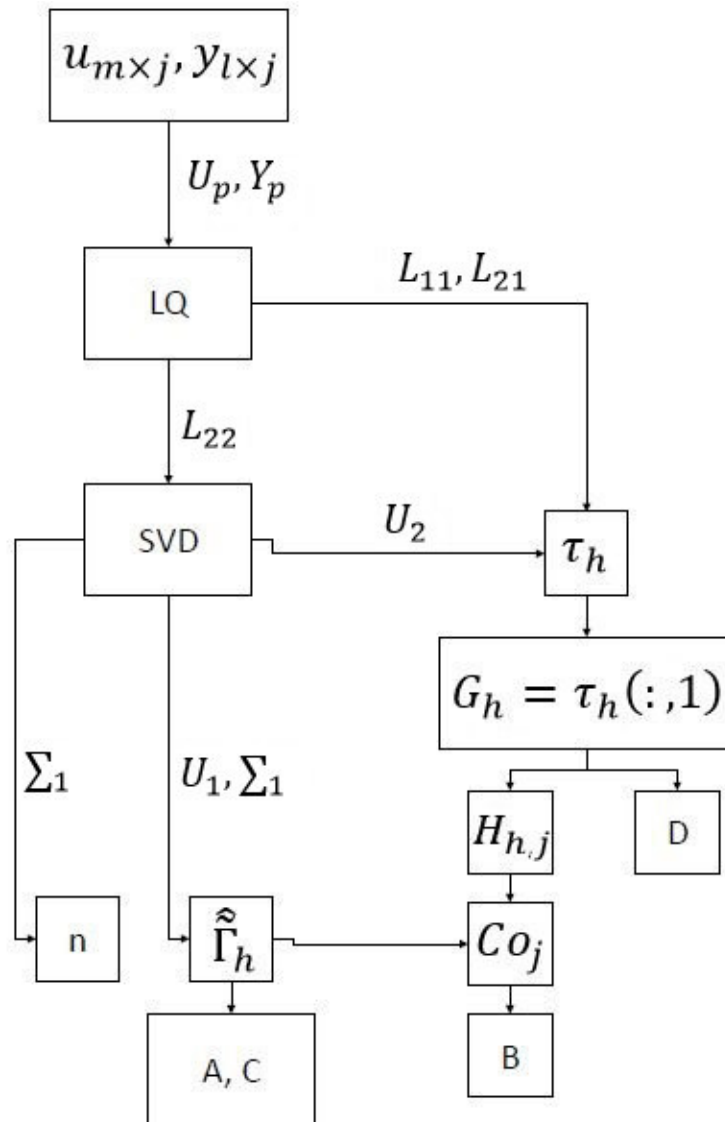


Figura 9: Algoritmo MOESP de Clavijo

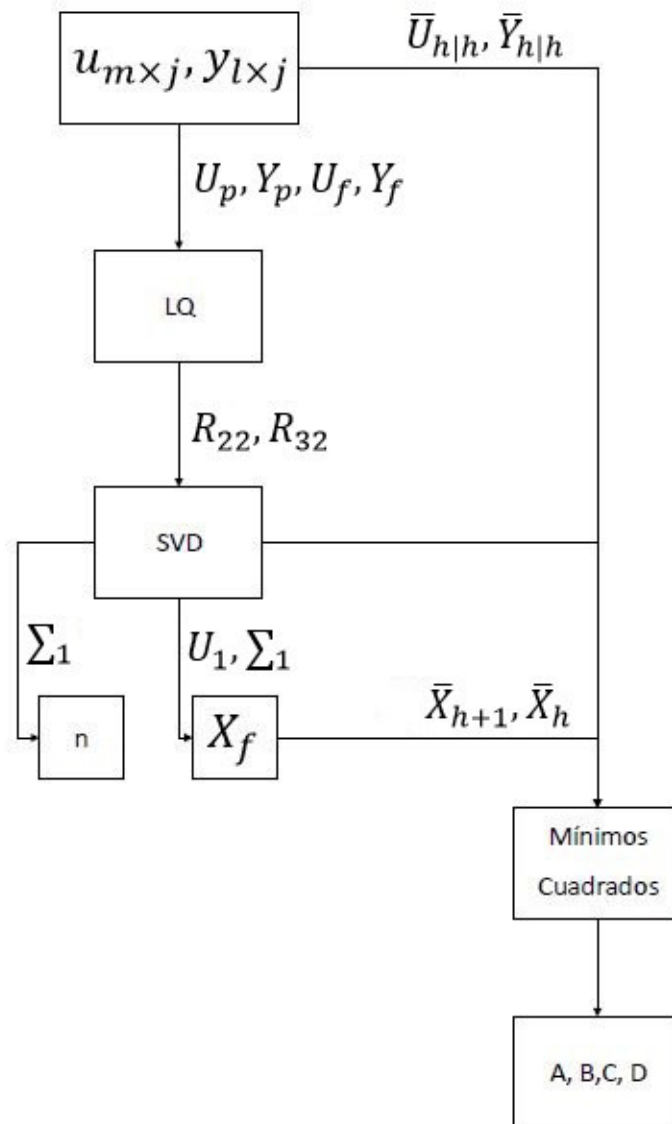


Figura 10: Algoritmo Katayama N4SID

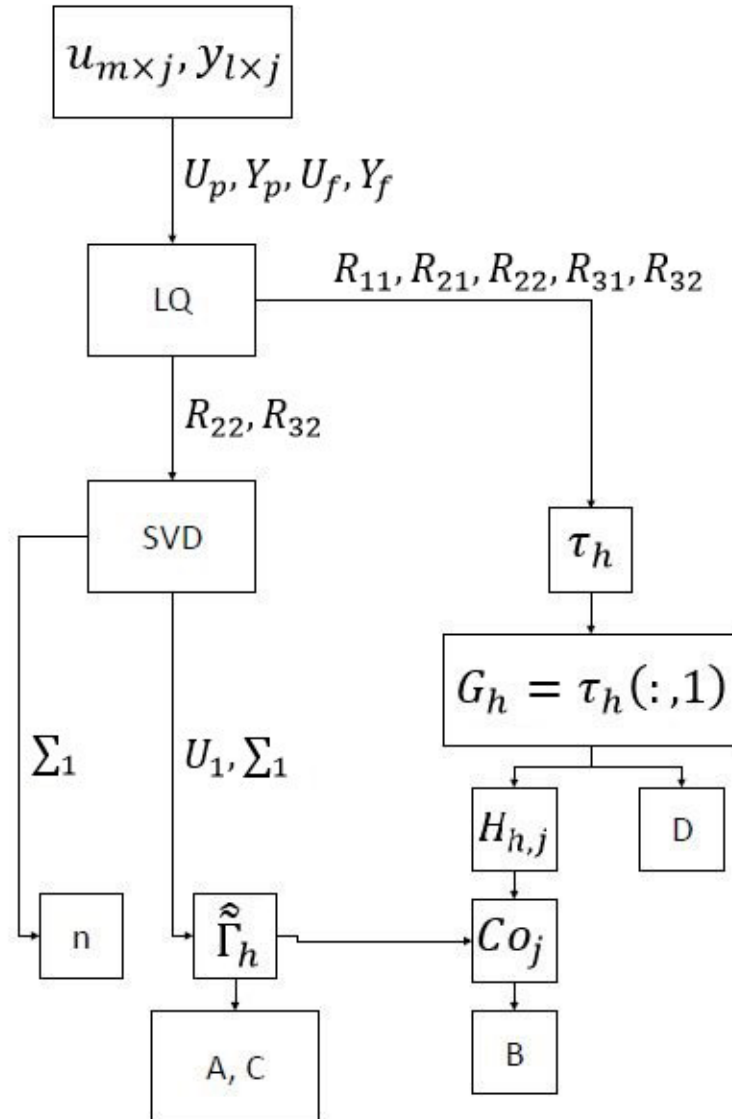


Figura 11: Algoritmo Clavijo N4SID

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS

4.1 Validación de Algoritmos

En este capítulo lo primero que se realiza es la validación de los algoritmos de identificación mediante subespacios implementados en el software MATLAB®[®], para la programación de los mismos se toma como referencia los códigos propuestos por Clavijo [13] con una modificación en el método de obtención del orden del sistema tomando como referencia a los trabajos de Ramirez [2]. Para ver la implementación de los algoritmos ver el anexo A.

Para el proceso de validación de los algoritmos implementados, N4SID (Clavijo), MOESP (Katayama) y MOESP M (Clavijo), se utilizaron 6 sistemas de prueba los cuales fueron excitados mediante la misma señal SBPA que se utilizará para la identificación del sistema real y un tiempo de muestreo de 1 ms. Los sistemas se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- 2 sistemas de segundo orden sobreamortiguados.
- 2 sistemas de segundo orden subamortiguados.
- 1 sistema de tercer orden considerado como orden superior.
- 1 sistema inestable.

Se realizó el cálculo del error cuadrático medio [27], mostrado en (42), con la finalidad de determinar el grado de aproximación del sistema obtenido a través los

métodos de identificación mediante subespacios en relación al sistema a identificarse, todo el proceso de validación se implementó en un script de MATLAB®[®], ver anexo B. Un aspecto a considerarse en el proceso de validación será el tiempo de ejecución de cada algoritmo implementado, para lo cual se hará uso de la opción de ejecución del script “Run and Time” disponible en la versión 2013 de MATLAB®[®].

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) - y_i]^2} \quad (42)$$

4.1.1 Identificación de Sistemas de Segundo Orden Sobreamortiguados

Primer Sistema

El cuadro 2, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del primer sistema de segundo orden del tipo sobreamortiguado de prueba y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

Cuadro 2: Funciones de transferencia primer sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{0,0012z-0,0012}{z^2-2z+1}$
$\frac{0,0012z-0,0012}{z^2-2z+1}$	MOESP	$\frac{0,0012z-0,0012}{z^2-2z+1}$
	MOESP M	$\frac{0,06873z^2-0,06752z-0,012}{z^2-2z+1}$

La figura 12, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 13, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

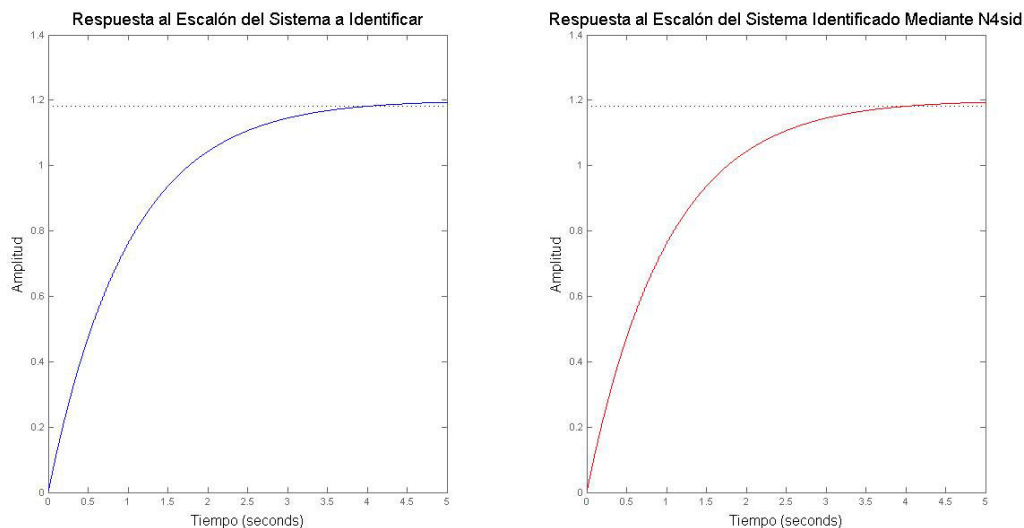


Figura 12: Respuesta al escalón algoritmo N4SID primer sistema

La figura 14, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 3, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el primer sistema de prueba.

Cuadro 3: Resultados algoritmos primer sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$7,1774 e^{-11}$	109
MOESP	$4,3558 e^{-10}$	36
MOESP M	0,8202	47

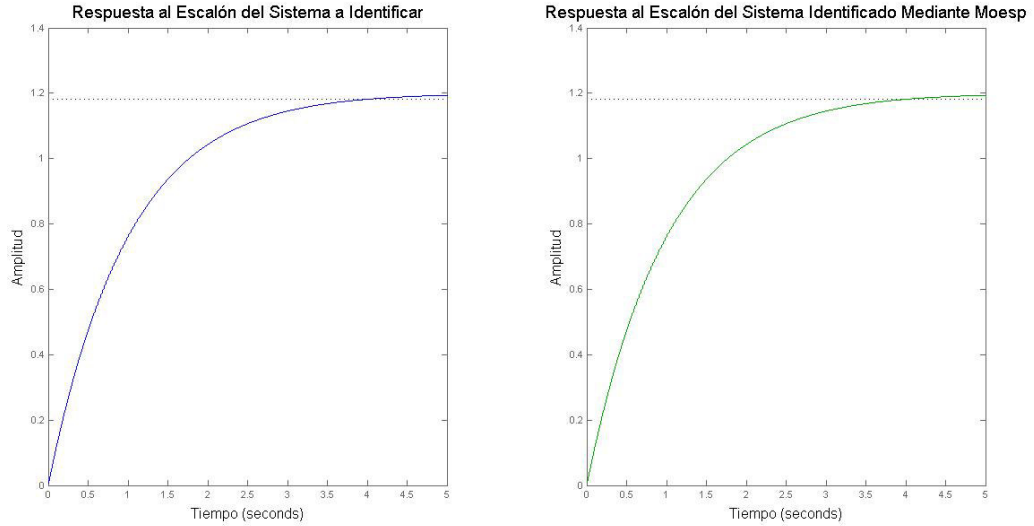


Figura 13: Respuesta al escalón algoritmo MOESP primer sistema

Segundo Sistema

El cuadro 4, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del segundo sistema de segundo orden del tipo sobreamortiguado de prueba y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

Cuadro 4: Funciones de transferencia segundo sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{0,008008 z - 0,008001}{z^2 - 2,001 z + 1,001}$
$\frac{0,008008 z - 0,008001}{z^2 - 2,001 z + 1,001}$	MOESP	$\frac{0,008008 z - 0,008001}{z^2 - 2,001 z + 1,001}$
	MOESP M	$\frac{0,9014 z^2 - 0,8925 z - 0,008001}{z^2 - 2,001 z + 1,001}$

La figura 15, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

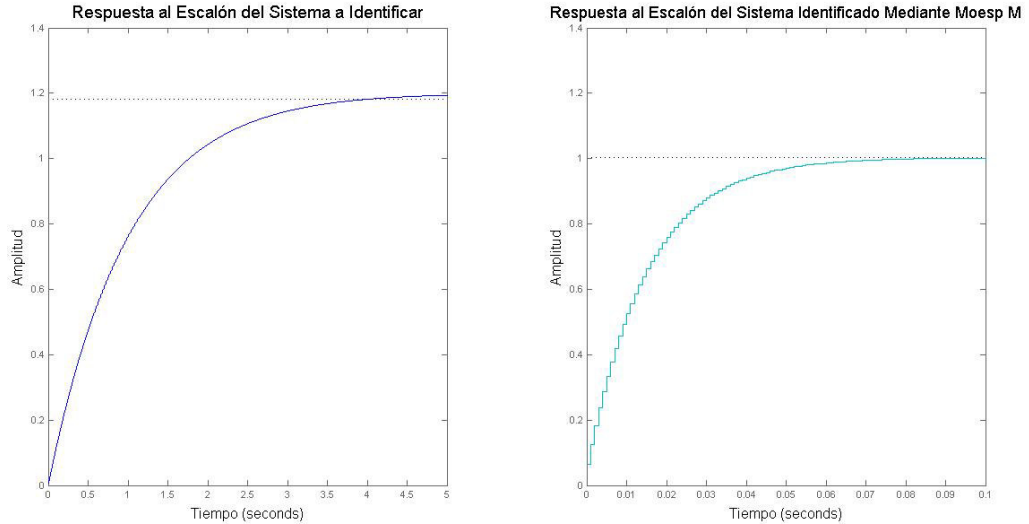


Figura 14: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M primer sistema

La figura 16, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 17, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 5, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el segundo sistema de prueba.

4.1.2 Identificación de Sistemas de Segundo Orden Subamortiguados

Tercer Sistema

El cuadro 6, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del tercer sistema de segundo orden del tipo subamortiguado de prueba y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

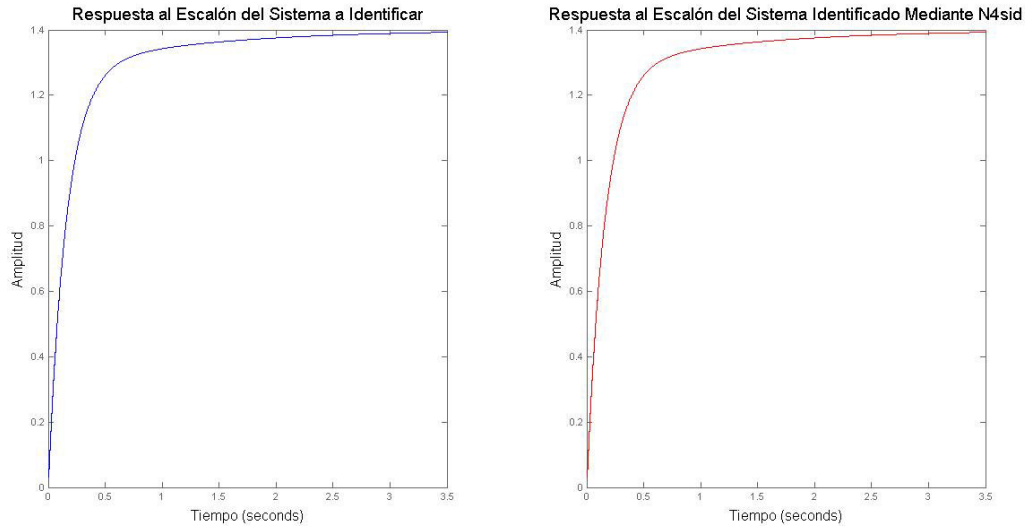


Figura 15: Respuesta al escalón algoritmo N4SID segundo sistema

Cuadro 5: Resultados algoritmos segundo sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$8,298 e^{-11}$	81
MOESP	$1,5752 e^{-10}$	40
MOESP M	0,8784	47

La figura 18, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 19, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 20, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP

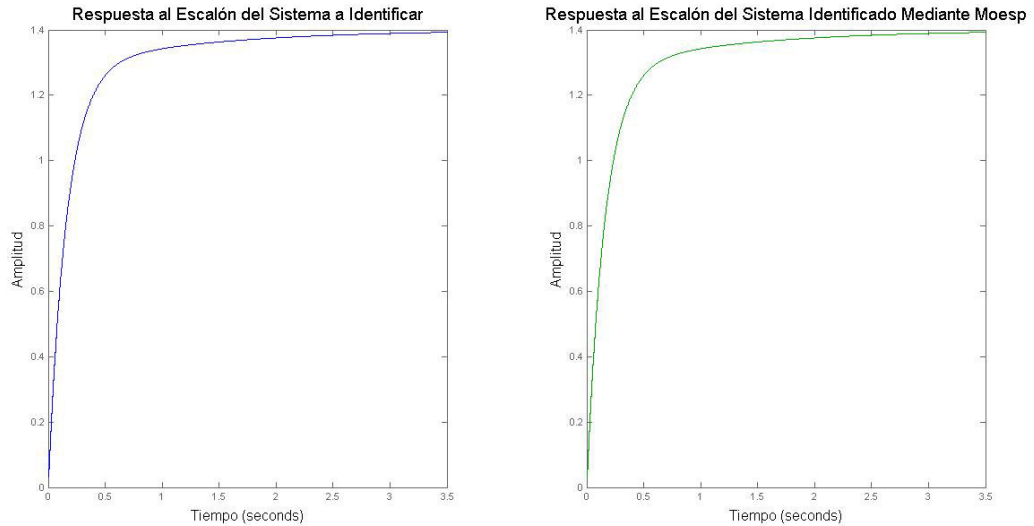


Figura 16: Respuesta al escalón algoritmo MOESP segundo sistema

Cuadro 6: Funciones de transferencia tercer sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{0,001001 z - 0,0009988}{z^2 - 1,999 z + 0,9995}$
$\frac{0,001001 z - 0,0009988}{z^2 - 1,999 z + 0,9995}$	MOESP	$\frac{0,001001 z - 0,0009988}{z^2 - 1,999 z + 0,9995}$
	MOESP M	$\frac{0,07196 z^2 - 0,07088 z - 0,0009988}{z^2 - 1,999 z + 0,9995}$

M.

El cuadro 7, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el tercer sistema de prueba.

Cuarto Sistema

El cuadro 8, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del cuarto sistema de segundo orden del tipo subamortiguado de prueba y las tres funciones

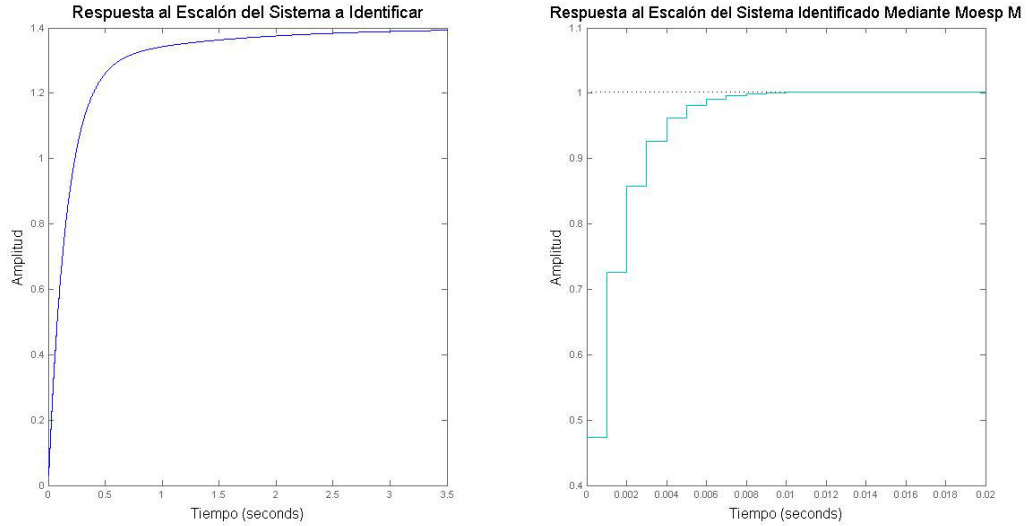


Figura 17: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M segundo sistema

Cuadro 7: Resultados algoritmos tercer sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$2,9956 e^{-11}$	115
MOESP	$1,2814 e^{-10}$	45
MOESP M	0,8374	52

de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

La figura 21, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 22, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 23, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema en

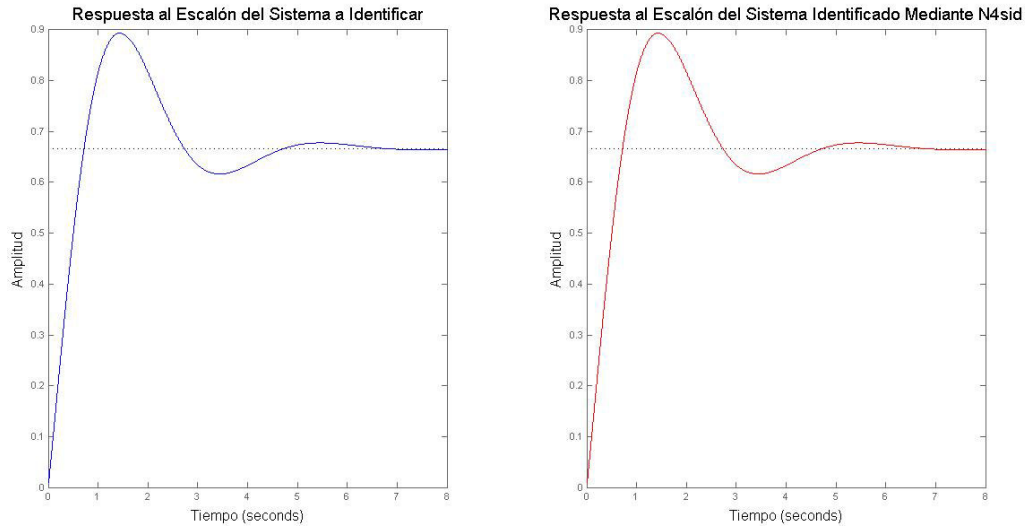


Figura 18: Respuesta al escalón algoritmo N4SID tercer sistema

Cuadro 8: Funciones de transferencia cuarto sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{0,0002002 z^2 - 0,0004 z + 0,0001998}{z^3 - 3 z^2 + 3 z - 1}$
$\frac{0,002002 z - 0,0001998}{z^2 - 2 z + 1}$	MOESP	$\frac{1,423 e^{-9} z^2 + 0,0002002 z - 0,0001998}{z^2 - 2 z + 1}$
	MOESP M	$\frac{0,03597 z^2 - 0,03574 z - 0,0001998}{z^2 - 2 z + 1}$

tiempo discreto a identificarse, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 9, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el cuarto sistema de prueba.

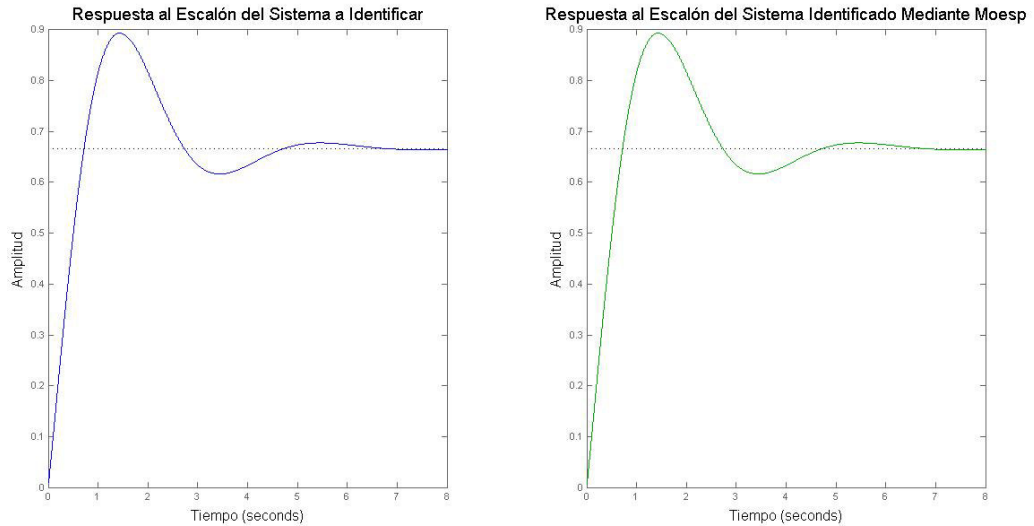


Figura 19: Respuesta al escalón algoritmo MOESP tercer sistema

Cuadro 9: Resultados algoritmos cuarto sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$1,2691 e^{-5}$	102
MOESP	0,0184	47
MOESP M	0,0807	49

4.1.3 Identificación de Sistemas de Orden Superior

Quinto Sistema

El cuadro 10, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del sistema de tercer orden y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

La figura 24, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 25, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a

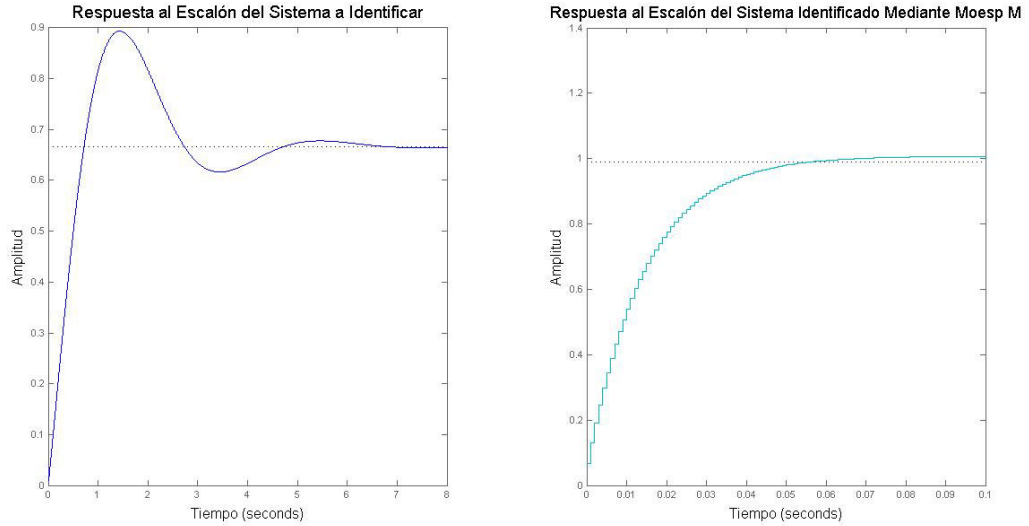


Figura 20: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M tercer sistema

Cuadro 10: Funciones de transferencia quinto sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{2,021 e^{-17} z^3 + 1,66 e^{-10} z^2 + 6,66 e^{-10} z + 1,664 e^{-10}}{z^3 - 2,998 z^2 + 2,996 z - 0,998}$
$\frac{1,666 e^{-10} z^2 + 6,66 e^{-10} z + 1,664 e^{-10}}{z^3 - 2,998 z^2 + 2,996 z - 0,998}$	MOESP	$\frac{1,012 e^{-17} z^3 + 1,66 e^{-10} z^2 + 6,66 e^{-10} z + 1,664 e^{-10}}{z^3 - 2,998 z^2 + 2,996 z - 0,998}$
	MOESP M	$\frac{0,002781 z^3 - 0,005546 z^2 + 0,002766 z + 1,664 e^{-10}}{z^3 - 2,998 z^2 + 2,996 z - 0,998}$

identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 26, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 11, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el quinto sistema de prueba.

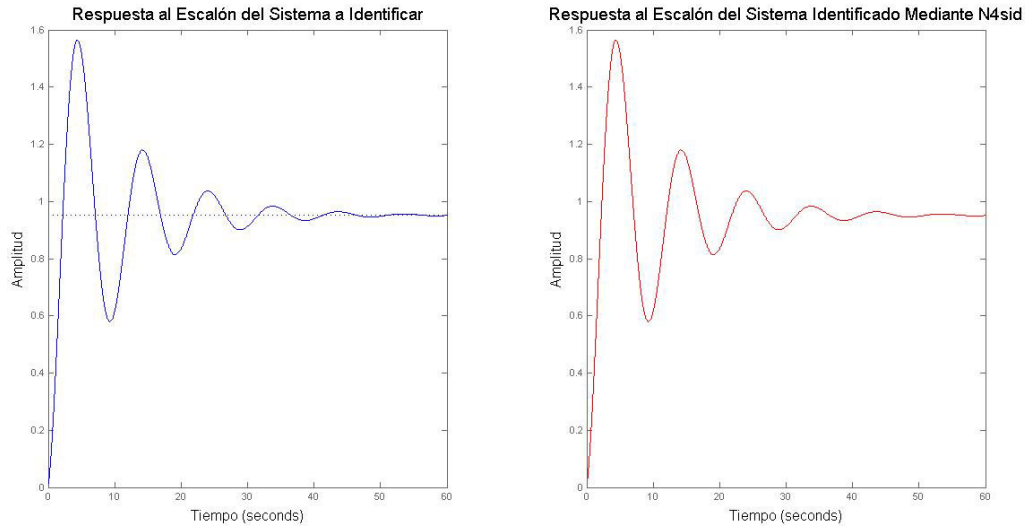


Figura 21: Respuesta al escalón algoritmo N4SID cuarto sistema

Cuadro 11: Resultados algoritmos quinto sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$1,9565 e^{-8}$	150
MOESP	$1,5626 e^{-8}$	88
MOESP M	0,7355	94

4.1.4 Identificación de Sistemas Inestables

Sexto Sistema

El cuadro 12, muestra la función de transferencia en tiempo discreto del sistema inestable de prueba y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M.

La figura 27, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 28, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a

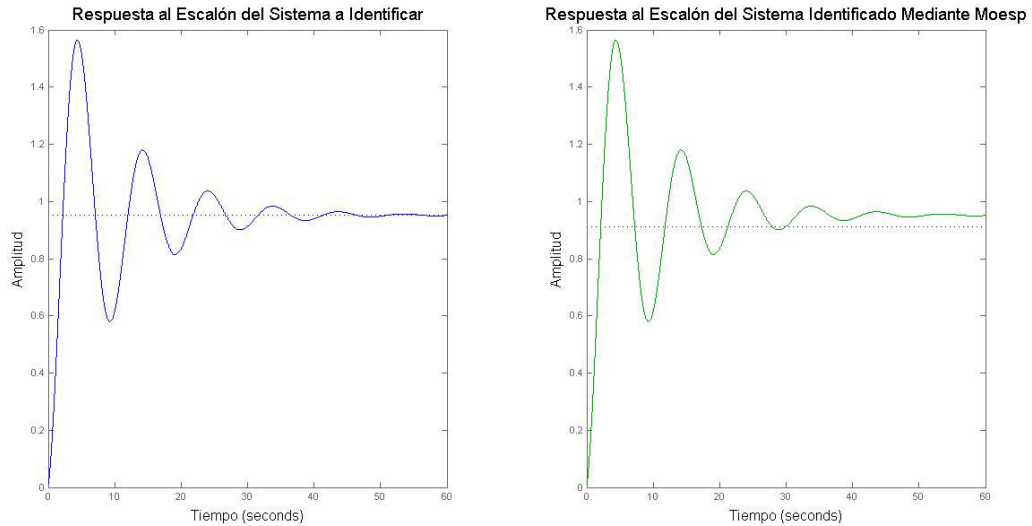


Figura 22: Respuesta al escalón algoritmo MOESP cuarto sistema

Cuadro 12: Funciones de transferencia sexto sistema

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{0,001202 z - 0,001202}{z^2 - 2,003 z + 1,003}$
$\frac{0,001202 z - 0,001202}{z^2 - 2,003 z + 1,003}$	MOESP	$\frac{0,001202 z - 0,001202}{z^2 - 2,003 z + 1,003}$
	MOESP M	$\frac{0,005926 z^2 - 0,004906 z - 0,001202}{z^2 - 2,003 z + 1,003}$

identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 29, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 13, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para el sistema de prueba.

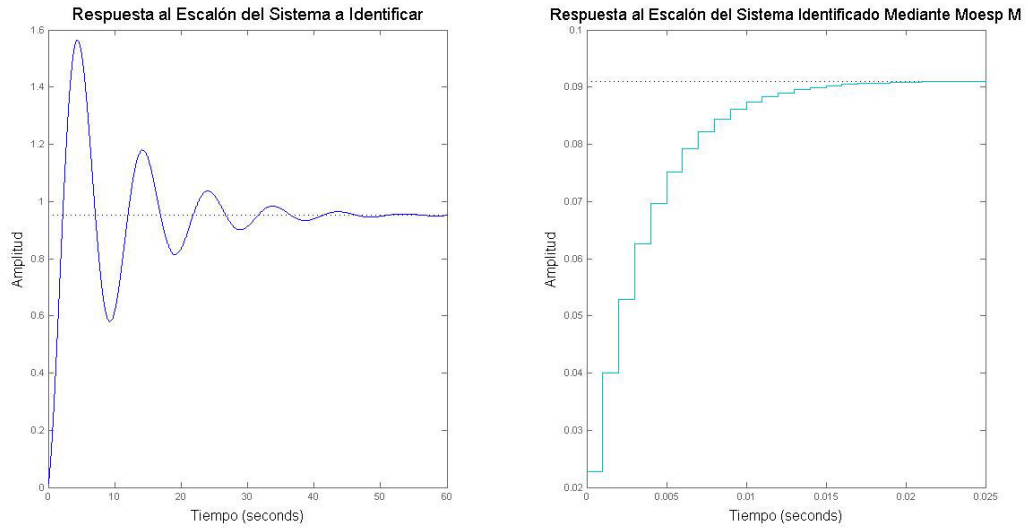


Figura 23: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M cuarto sistema

Cuadro 13: Resultados algoritmos sexto sistema

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$1,5851 e^{-8}$	120
MOESP	$1,6410 e^{-8}$	90
MOESP M	$9,34 e^{23}$	97

4.2 Simulación de Algoritmos

Un punto importante en este capítulo, consiste en la simulación del funcionamiento de los algoritmos con datos obtenidos del conjunto balastro lámpara, los cuales fueron tratados en el toolbox ident de MATLAB® con la finalidad de obtener la respuesta al escalón del sistema, esta respuesta sirve como referencia para la simulación, de igual manera que en el proceso de validación de algoritmos

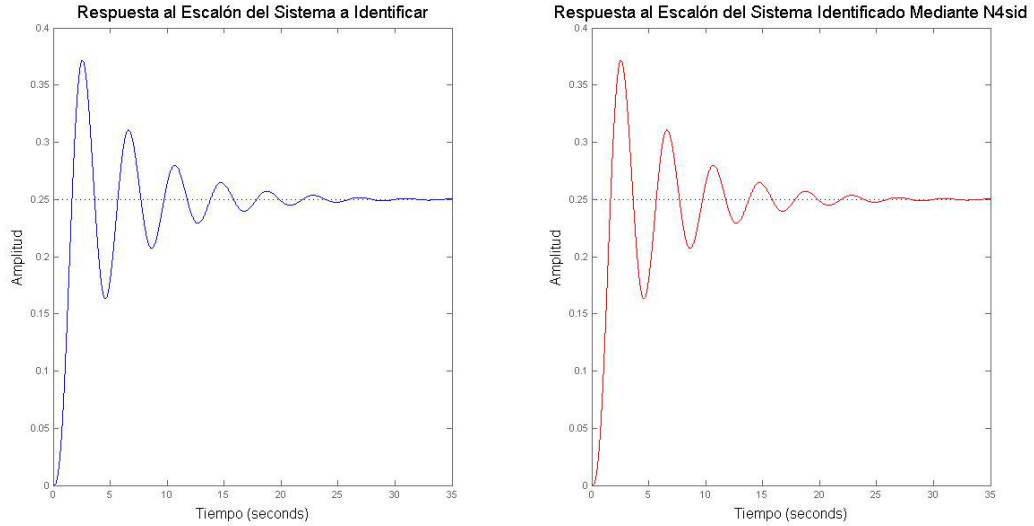


Figura 24: Respuesta al escalón algoritmo N4SID quinto sistema

se obtiene el error cuadrático medio para cada método de identificación basado en subespacios así como también el tiempo de ejecución de cada algoritmo, todo se implementó mediante un script de MATLAB[®], ver anexo B.

El cuadro 14, muestra la función de transferencia en tiempo discreto, obtenida a través de la herramienta `ident` y los datos obtenidos, y las tres funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas mediante los métodos de subespacios N4SID, MOESP y MOESP M modificado.

Cuadro 14: Funciones de transferencia sistema simulado

Sistema a Identificar	Algoritmo	Sistema Identificado
	N4SID	$\frac{1,364 z^2 - 1,225 z + 0,01435}{z^3 - 1,468 z^2 + 0,5314 z - 0,0144}$
$\frac{1,364 z - 0,01619}{z^2 - 0,5811 z + 0,01624}$	MOESP	$\frac{1,364 z - 0,01619}{z^2 - 0,5811 z + 0,01624}$
	MOESP M	$\frac{0,3077 z^2 + 1,357 z + 0,01619}{z^2 - 0,5811 z + 0,01624}$

La figura 30, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta

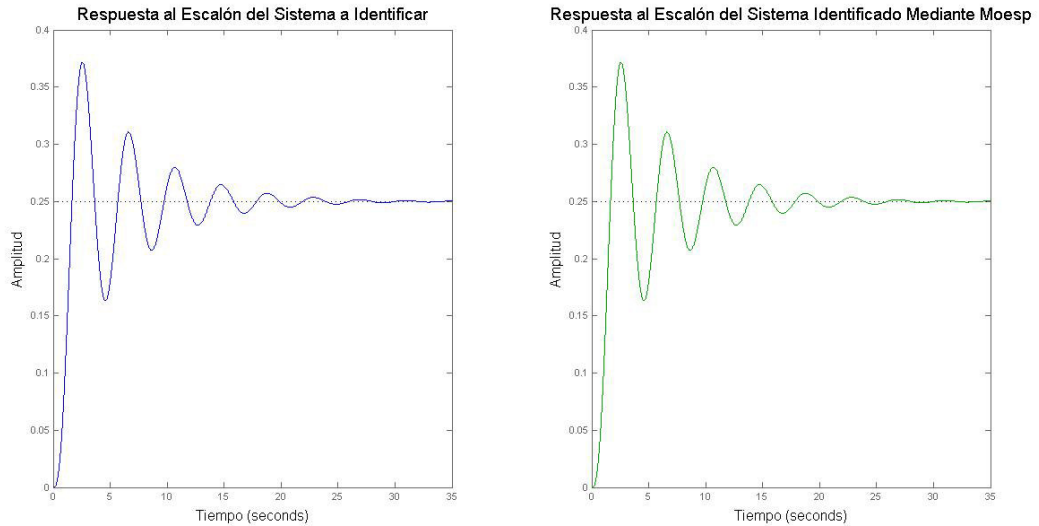


Figura 25: Respuesta al escalón algoritmo MOESP quinto sistema

al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios N4SID.

La figura 31, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema a identificarse en tiempo discreto, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP.

La figura 32, muestra a la izquierda la respuesta al escalón del sistema en tiempo discreto a identificarse, mientras que a la derecha muestra la respuesta al escalón del sistema identificado mediante el método de subespacios MOESP M.

El cuadro 15, muestra los valores de error cuadrático medio del sistema identificado en relación al sistema a identificar y el tiempo de ejecución para cada uno de los métodos de subespacios para la simulación del sistema real.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos tanto en la validación como en la simulación de los tres algoritmos, se selecciona el algoritmo N4SID debido a su bajo margen de error.

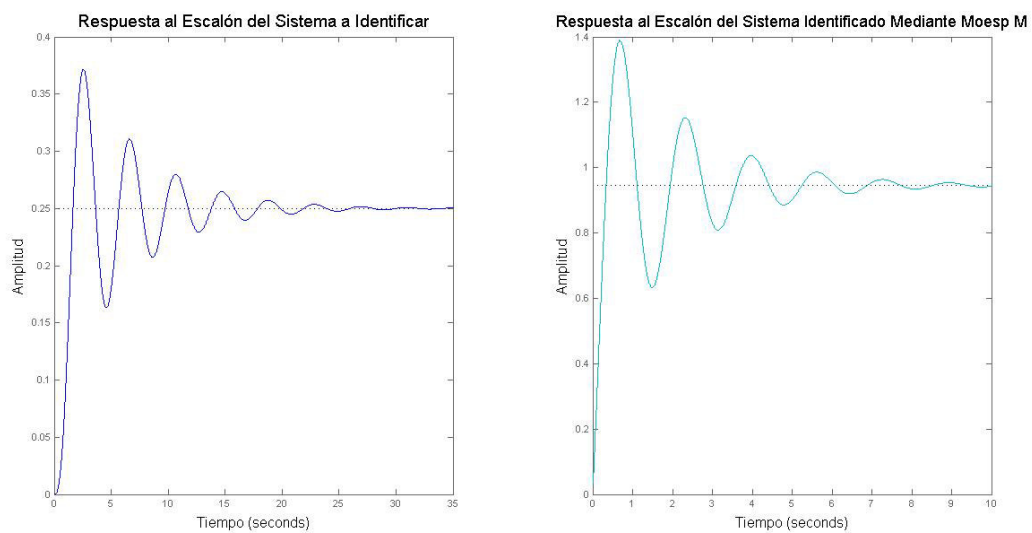


Figura 26: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M quinto sistema

Cuadro 15: Resultados algoritmos sistema simulado

Algoritmo	Error Cuadrático Medio	Tiempo de Ejecución (ms)
N4SID	$4,3932 e^{-14}$	109
MOESP	$9,3672 e^{-15}$	36
MOESP M	0,6577	47

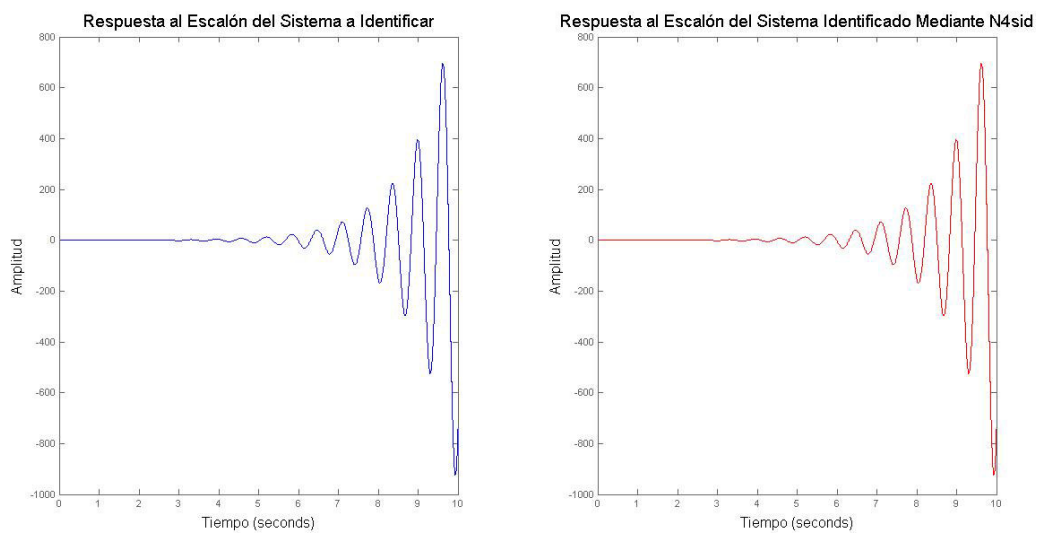


Figura 27: Respuesta al escalón algoritmo N4SID sexto sistema

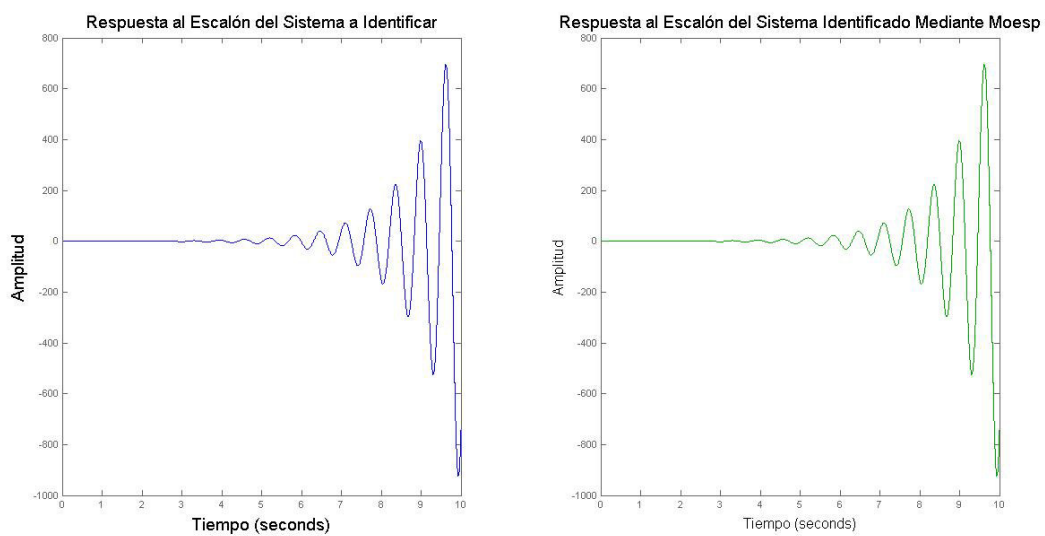


Figura 28: Respuesta al escalón algoritmo MOESP sexto sistema

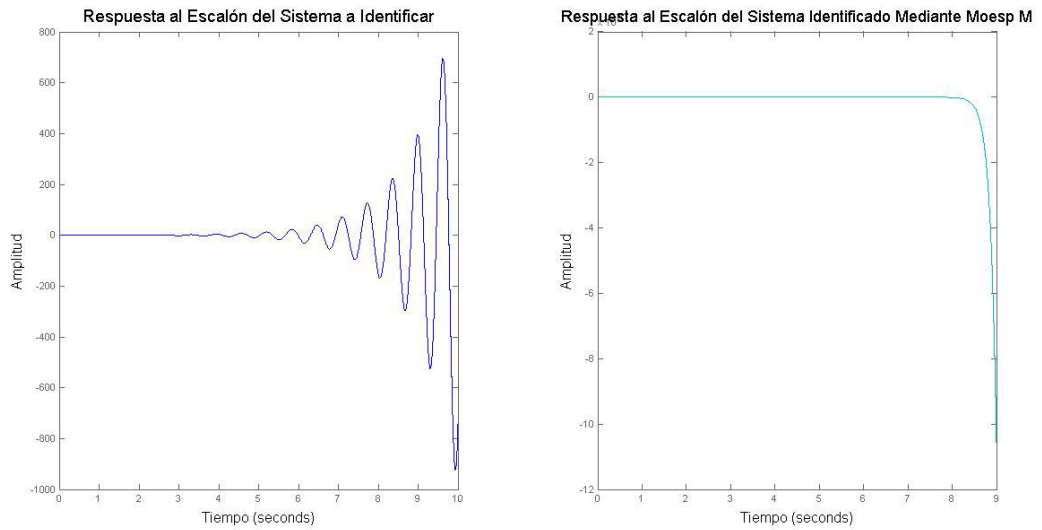


Figura 29: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M sexto sistema

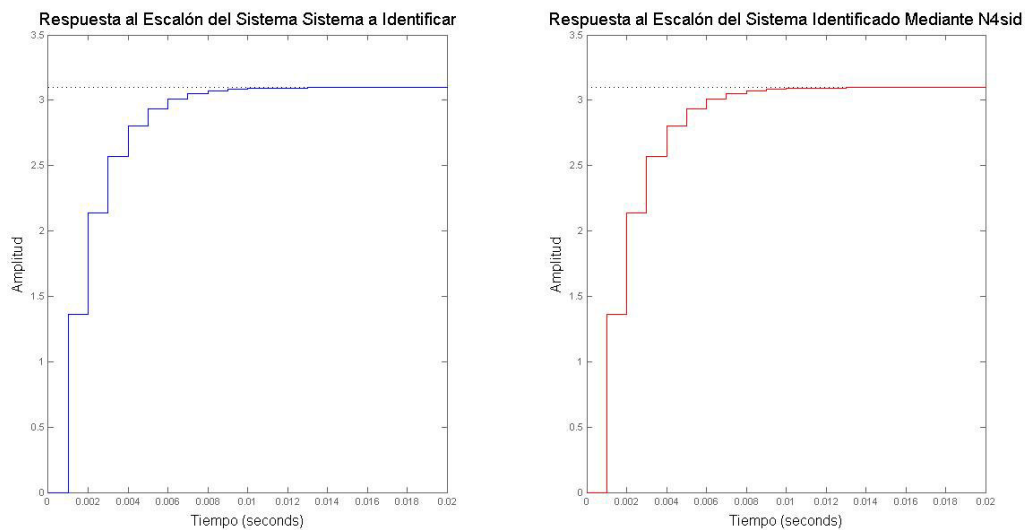


Figura 30: Respuesta al escalón algoritmo N4SID sistema simulado

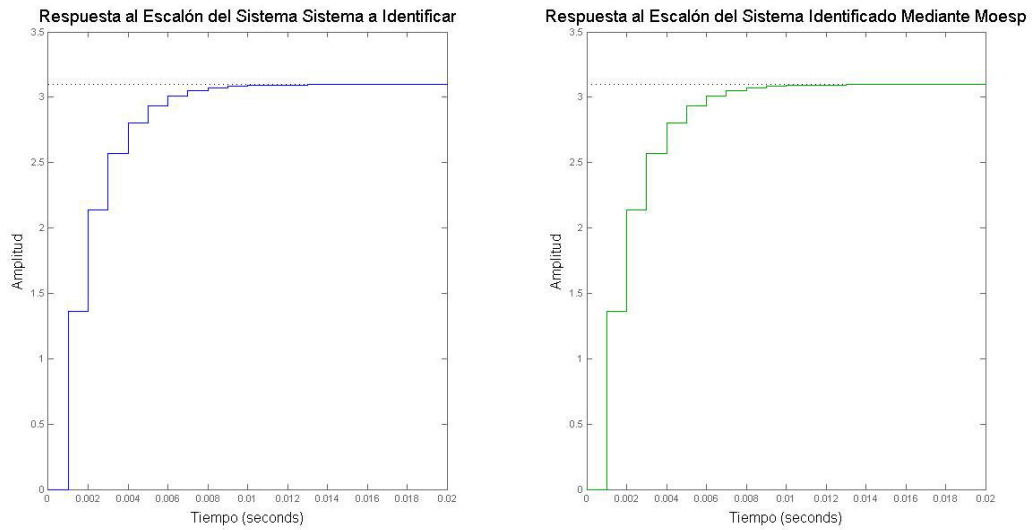


Figura 31: Respuesta al escalón algoritmo MOESP sistema simulado

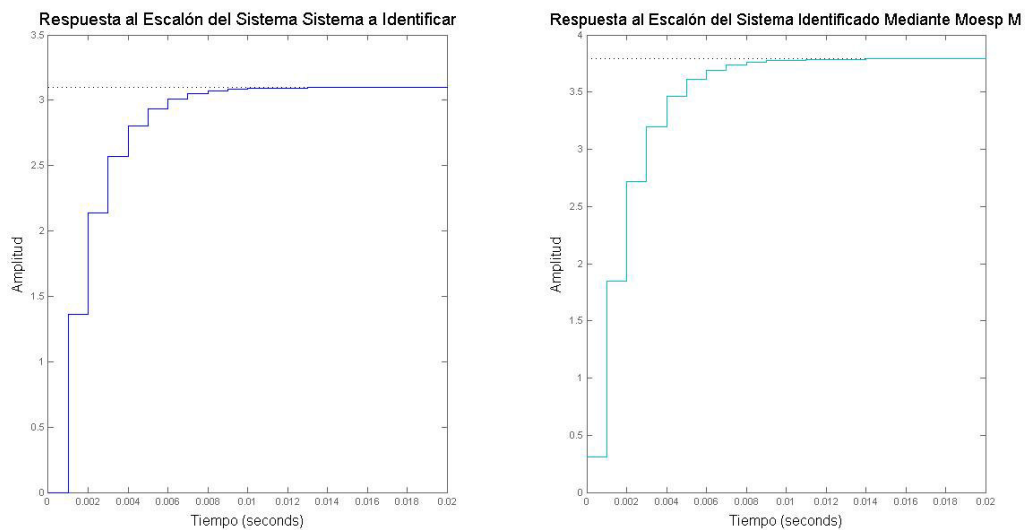


Figura 32: Respuesta al escalón algoritmo MOESP M sistema simulado

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN

5.1 Introducción

Se pueden caracterizar los componentes del sistema balastro lámpara mediante un diagrama de bloques, cada bloque corresponde a uno o varios circuitos electrónicos agrupados según su funcionalidad dentro del conjunto.

El diagrama de la figura 33 muestra todos los bloques funcionales del balastro, es decir que el balastro está constituido por un convertidor AC/DC, formado por un rectificador de onda completa y un filtro capacitivo. Un convertidor DC/DC tipo Buck Boost, el convertidor requiere de un control de corriente.

Dado que la señal de tensión que alimenta a la carga, es decir la lámpara HID - MH, es alterna el balastro requiere de un convertidor DC/AC, correspondiente al puente H, el cual permitirá realizar un control de la tensión de salida. Para realizar esta acción el balastro requiere un controlador de tensión, esta estará sensada a través de una punta diferencial con acondicionamiento de señal. La salida de este controlador será acondicionada por el driver del puente H, el cual garantiza un correcto manejo de tiempos de desfase entre las cuatro diferentes señales para los semiconductores del puente H.

5.2 Balastro Electrónico

5.2.1 Convertidor AC/DC

Este convertidor transforma 118 VAC a 167 VDC, para ello consta de un rectificador de onda completa BR86, BR1, un filtro capacitivo 2 x 1000 μ F, C1 y

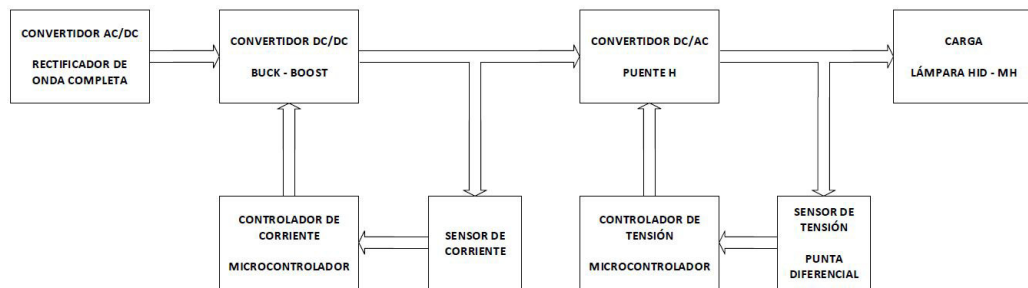


Figura 33: Sistema Balastro-Lámpara

C2, para obtener un valor de DC puro que servirá de entrada para el convertidor DC/DC, además de la protección de un fusible de 3 A, FUSIBLE 1, un relé Omron G2R – 1 – E, RL1, para tener un control en el momento de la conversión, en J1 se conectan las señales para la activación del relé, la bornera B1 es la entrada de 118 VAC 60 Hz 1F, y VOL_FIL es la salida del convertidor 167 VDC, en la figura 34 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso de este convertidor se encuentra en el anexo C y el diseño del convertidor se encuentra en el anexo E.

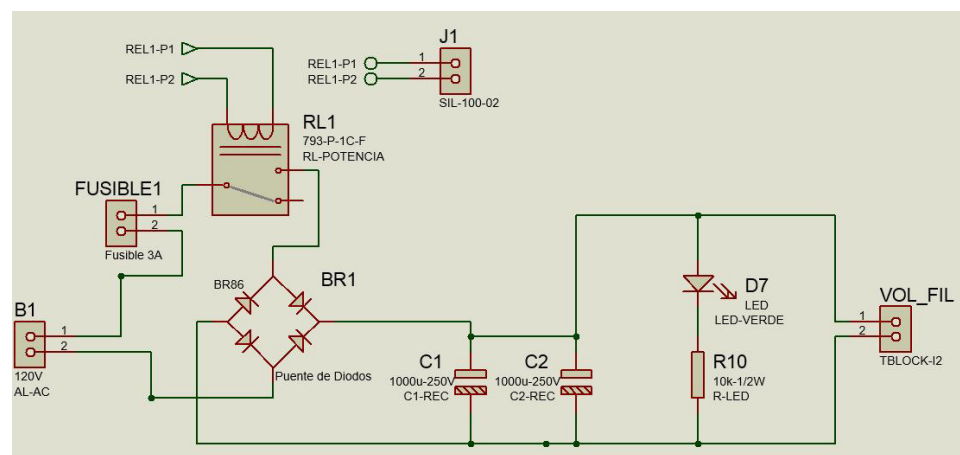


Figura 34: Diagrama del convertidor AC/DC

5.2.2 Convertidor DC/DC

El convertidor DC/DC es el encargado de entregar la potencia suficiente para el correcto funcionamiento de la Lámpara HID – MH y sus diferentes etapas, se

utilizó un convertidor Buck Boost, este convertidor consta de 3 placas.

Placa Buck Boost

Los cálculos para la implementación de esta placa se encuentran en la tesis de Salazar [28], el convertidor está compuesto por: 2 semiconductores de tipo MOSFETS IRFP460, Q1 y Q2, para el control del convertidor, 2 diodos rápidos FR307, D1 y D2, diodos en anti paralelo a los MOSFETS, 2 diodos híper rápidos RHRP1560, D3 y D4, propios del diseño del convertidor, 1 capacitor de 22 μF – 400 V, C1, como resultado del diseño, en la bornera B1 se conecta la bobina de 1.6 mH que es el resultado del diseño del convertidor, en la bornera B2 es la salida para el sensor de corriente, la bornera B3 está destinada a la conexión de una carga inicial de 1 kohm 50 W, en la bornera B4 se encuentra la salida del convertidor, el bus J1 contiene las señales de activación de los MOSFETS, en la figura 35 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C y el diseño del convertidor se encuentra en el anexo E. Una señal típica de activación de un MOSFET se muestra en la figura 36.

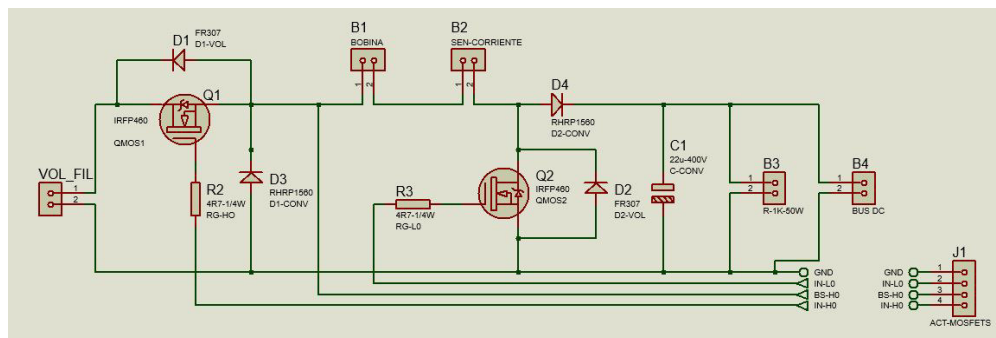


Figura 35: Diagrama del convertidor buck boost

Placa de Activación de MOSFETS

La placa necesita un tensión de alimentación de 24 VDC el cual ingresa en B1, la placa consta de 3 reguladores de tensión, 7815, 7812 y 7805, REG1, REG2

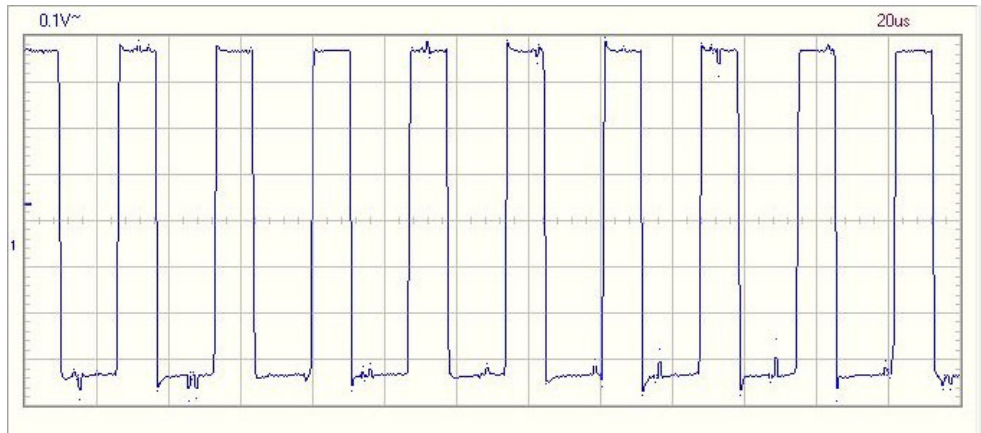


Figura 36: Señal activación MOSFET

y REG3, respectivamente los cuales establecen las tensiones para los circuitos integrados.

Para la activación de los MOSFETS se utilizan los circuitos integrados TLP250, DR-1 y DR-2, se utiliza un diodo ultra rápido HFA15TB60, D10, en la activación del relé se utiliza el circuito integrado 6N137, DR-3, el bus J1 contiene las diferentes tensiones generadas en la placa, en J2 entran las señales de control provenientes del microcontrolador, el bus J3 tiene las señales de activación de los MOSFETS, y en el bus J4 se encuentran las señales de activación del relé, en la figura 37 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C. La señal de control entregada por los TLP250 se muestra en la figura 38.

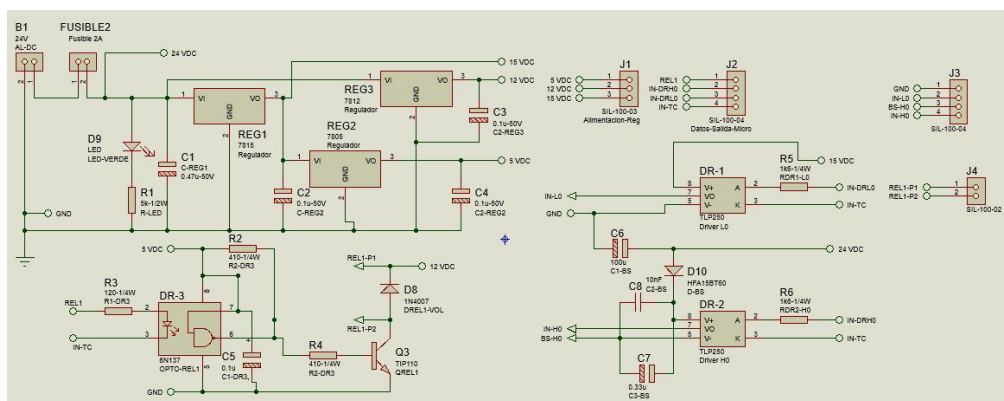


Figura 37: Diagrama placa de activación de MOSFETS

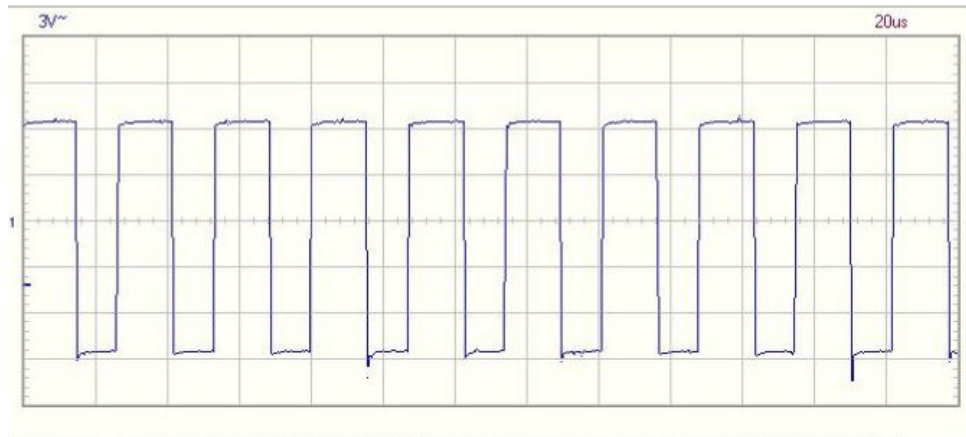


Figura 38: Señal salida TLP250

Placa Controlador Buck Boost

Para el control del convertidor se utilizó un microcontrolador PIC18F2550, U1, se implementó un control mediante modos deslizantes tomando como referencia la tesis de Salazar [28], el sensor de efecto hall ACS712 se utilizó para la lectura de la corriente que circula a través del inductor del convertidor, para el aislamiento del microcontrolador se empleó el circuito integrado IR2110, U2, en la figura 39 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C. La señal de control entregada por esta placa se muestra en la figura 40.

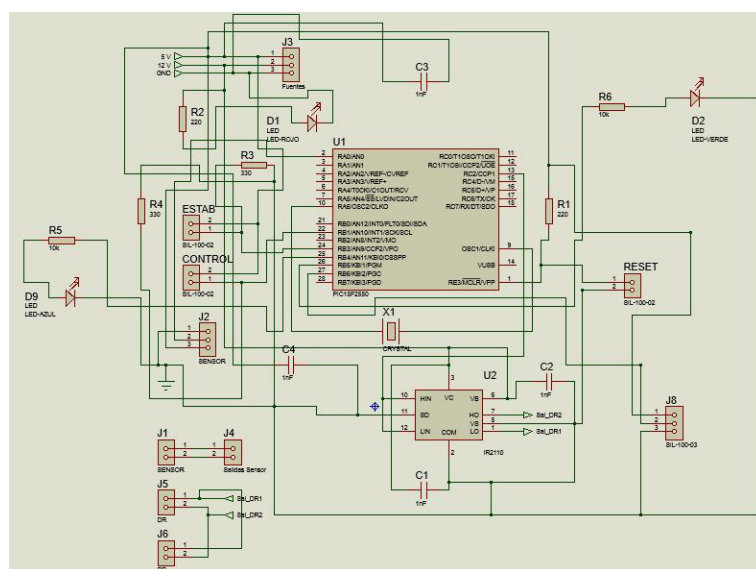


Figura 39: Diagrama placa controlador buck boost

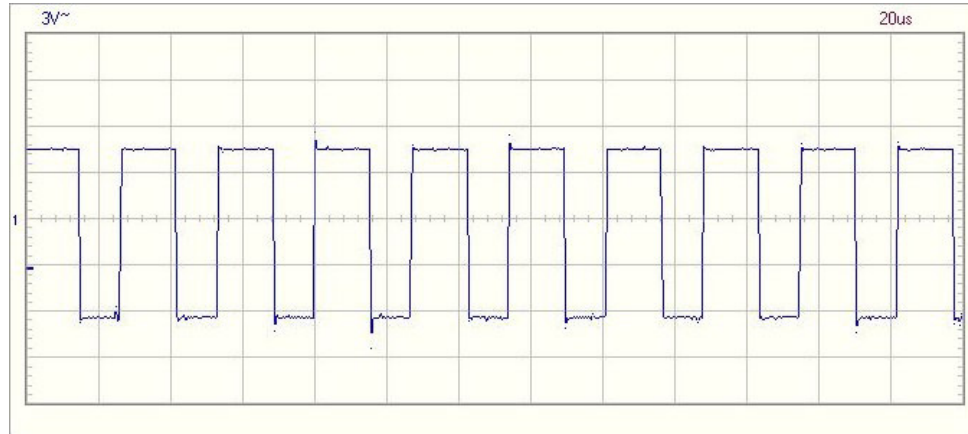


Figura 40: Señal salida controlador

5.2.3 Convertidor DC/AC

La funcionalidad de este convertidor es transformar la señal DC, entregada por el convertidor DC/DC, en una señal alterna de tipo cuadrada y de frecuencia alta para cumplir los requerimientos de la carga, dicho convertidor está constituido por 2 placas [4].

Placa del Driver Puente H

Esta placa requiere de una alimentación de 24 VDC, y una señal cuadrada de alta frecuencia que ingresa por J1, esta señal primero será invertida en el circuito integrado 74LS04, U3, correspondiente a una compuerta lógica NOT. Esta placa contiene un potenciómetro de acople de tierras, que se conectara en J8.

La señal de salida de la compuerta lógica será alterada en fase y amplitud por el circuito integrado IR2130, IR1, obteniendo las cuatro señales de salida de esta placa, las cuales son:

- Alto 1
- Bajo 1

- Alto 2
- Bajo 2

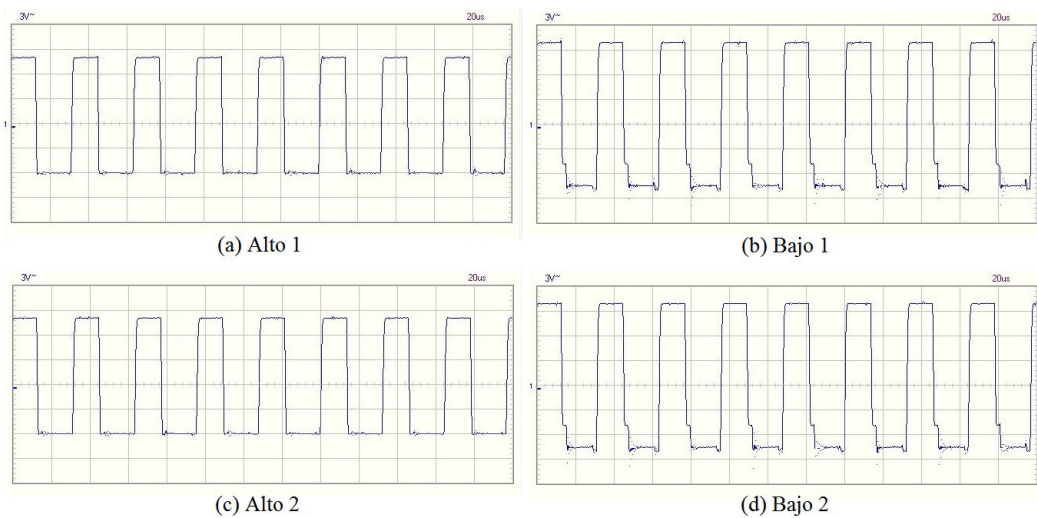


Figura 41: Señales placa driver puente H

Las formas de onda características de estas cuatro señales se muestran en figura 41. Estas señales pueden ser medidas en las borneras J4 y J5, en la figura 42 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C.

Placa del Puente H

La placa correspondiente al puente H, tiene como entradas en la bornera J4 las señales Alto 1 y Bajo 1, en la bornera J2 las señales Alto 2 y Bajo 2, representadas en la figura 41, además en la bornera J1 ingresa la señal de tensión del convertidor DC/DC.

Los cuatro semiconductores tipo MOSFETS IRFP460, correspondientes a los elementos Q1, Q2, Q3 y Q4, reciben las señales de los altos y los bajos según su posición en el puente H. La placa tiene como salidas dos borneras de medición, J6 y J7. En la bornera J3 se encuentra la señal de alimentación de la lámpara HID

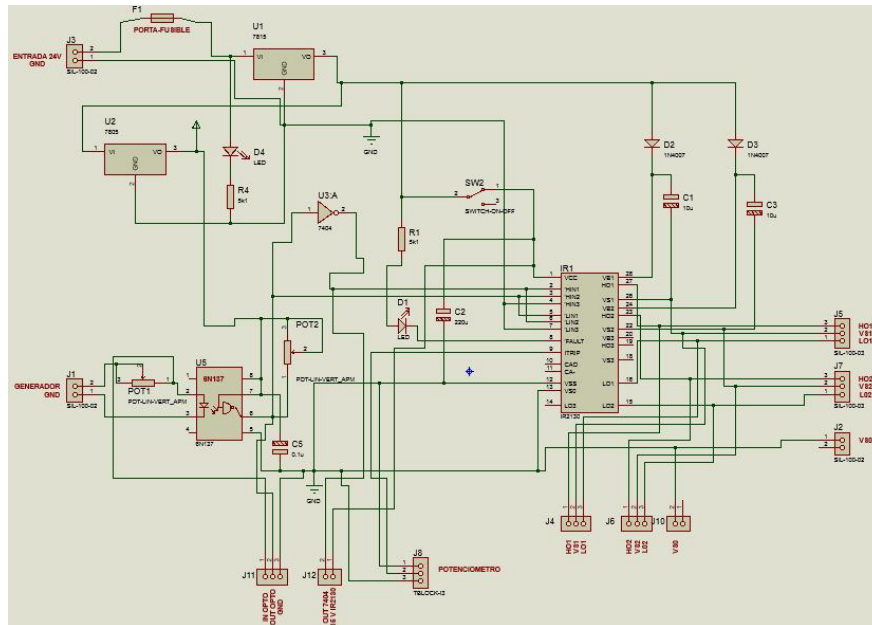


Figura 42: Diagrama placa driver puente H

- MH, en la figura 44 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C. La figura 43 muestra una señal típica de salida en condiciones normales.

5.2.4 Sensamiento

Por la complejidad de sensar una señal cuadrada fue necesario implementar un sensor del tipo diferencial, esta etapa contiene 2 placas.

Punta Diferencial

La tensión de salida es medida a través de una punta diferencial con acoplamiento de señal, el circuito requiere de una alimentación de 12 VDC, utiliza dos circuitos integrados TL082, U1:A y U2:B, que requieren de fuentes simétricas de ± 12 VDC, la fuente negativa se obtiene mediante un circuito integrado ICL 7660 correspondiente a U3. La punta tiene una atenuación de 100 a 1. En la figura 45 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C.

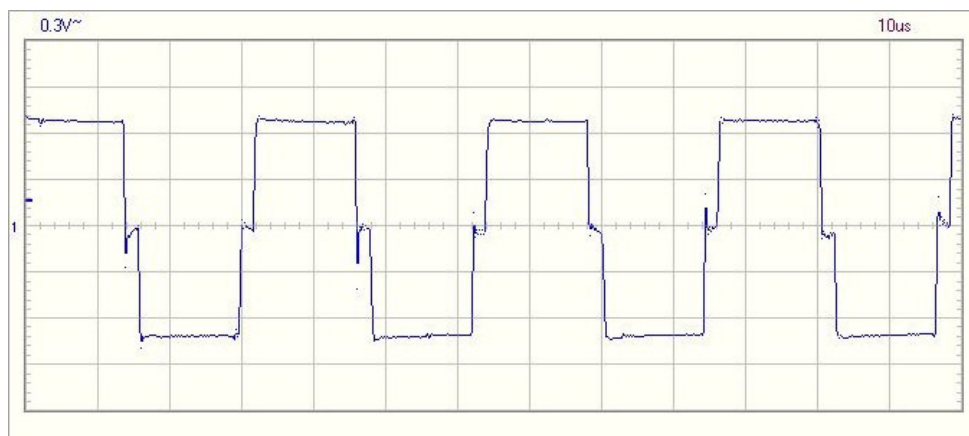


Figura 43: Señal de salida puente H

Acoplamiento de Señal

El acoplamiento de la señal de salida de este circuito de medición se hace mediante un sumador no inversor con un circuito integrado TL082, U1, este circuito incrementa un voltio a la señal de salida de la punta diferencial, con este desplazamiento la señal es netamente positiva y menor a los 3.3 voltios que es la tensión máxima que la tarjeta de control soporta. En la figura 46 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C.

La figura 47 muestra una referencia de la señal de salida de la punta diferencial con acoplamiento.

5.2.5 Circuitos y Placas Adicionales

Dentro del balastro electrónico se incorporaron una placa y circuito adicionales, los cuales se detallan a continuación.

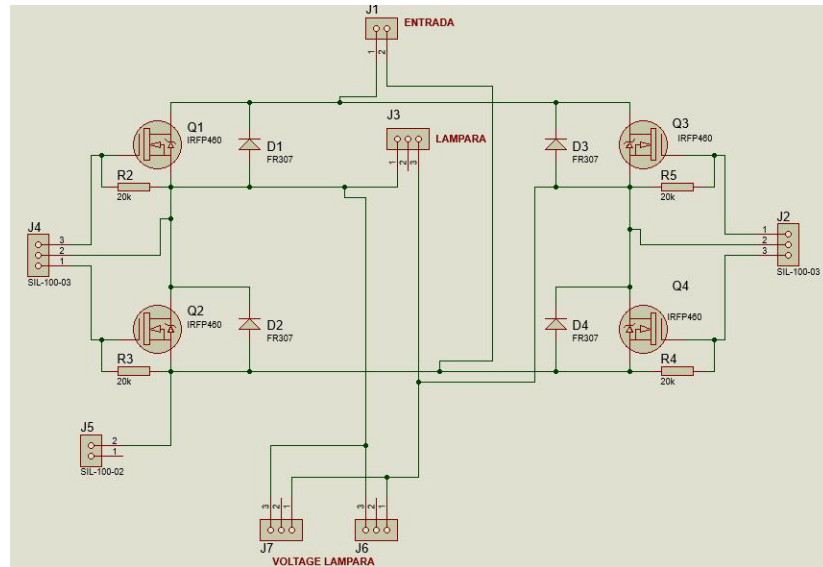


Figura 44: Diagrama puente H

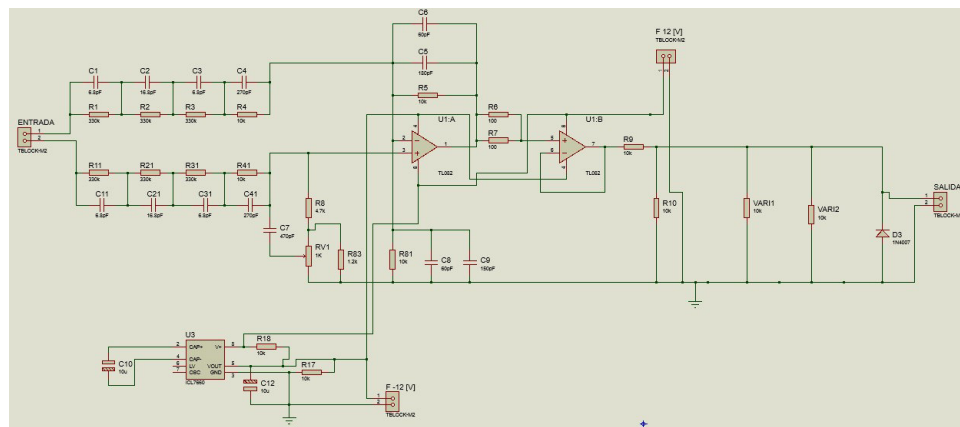


Figura 45: Diagrama punta diferencial

Placa de Fuentes

La placa necesita una tensión de alimentación de 18 VAC, el mismo que es suministrado por un transformador 127 / 18 VAC - 500 mA, se transforma la tensión mediante un rectificador de onda completa BR1 2W02G, y cuenta con un filtro capacitivo C1, 470 uF, los reguladores 7815, 7805 y 7812, REG1, REG2 y REG3 respectivamente, son los encargados de entregar los tensiones respectivos para su distribución en el balastro electrónico, la placa contiene 8 borneras para salida de tensiones, en la figura 48 se encuentra el circuito con la distribución de los elementos descritos, el circuito impreso se encuentra en el anexo C.

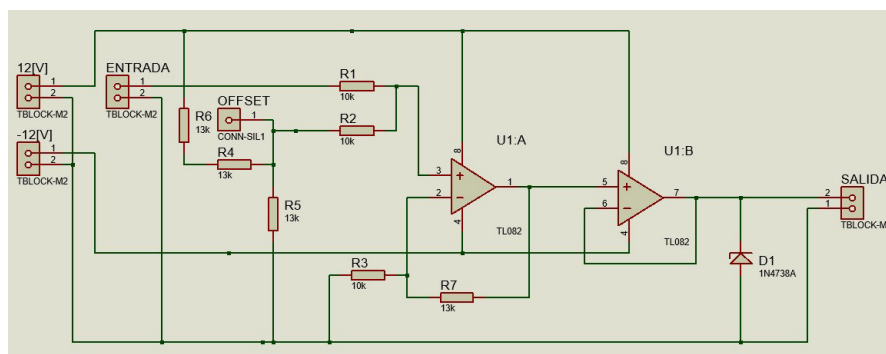


Figura 46: Diagrama acoplamiento de señal

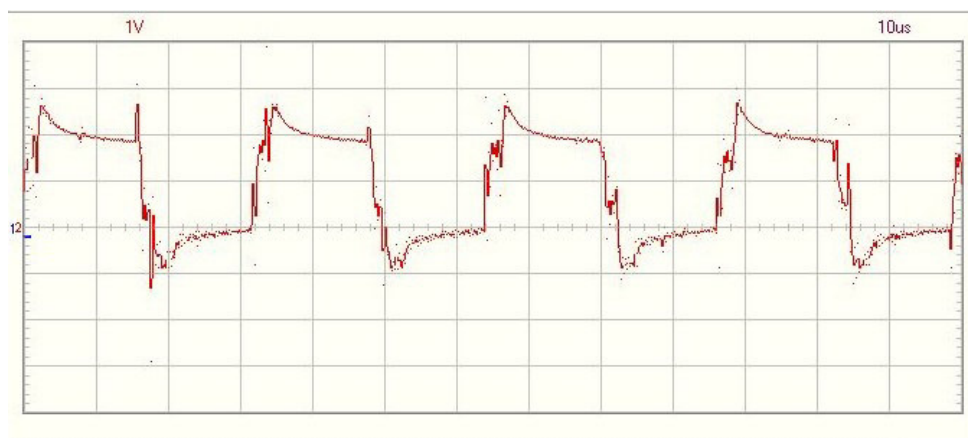


Figura 47: Señal obtenida sensor diferencial

Circuito de Arranque

Durante el proceso de encendido, la lámpara HID – MH requiere de la conexión de una resistencia, R de 20 ohm 50W en serie, una vez encendido el LED verde mostrado en la figura 39, se cambia de posición el interruptor SW1, desconectando R.

El interruptor SW1 debe contener un contacto normalmente cerrado y un contacto normalmente abierto. El diagrama de conexión de este circuito se muestra en la figura 49.

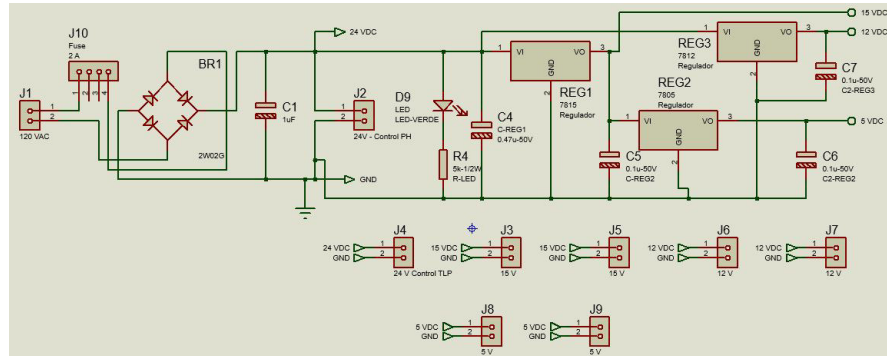


Figura 48: Diagrama placa fuentes

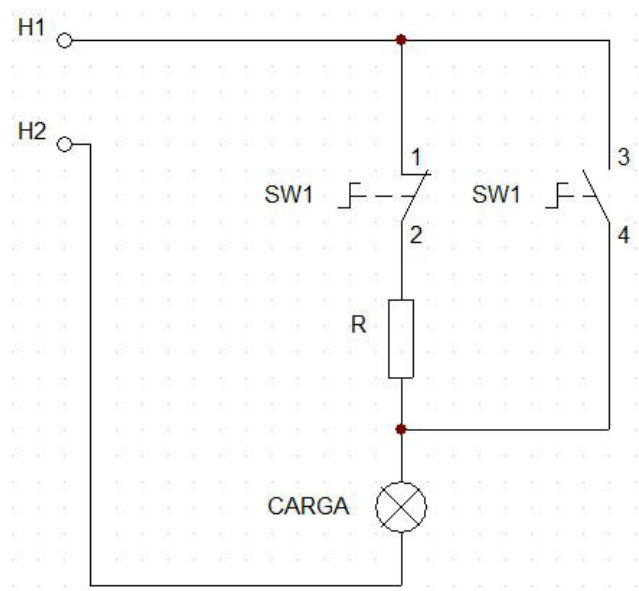


Figura 49: Circuito de arranque

5.3 Identificación Sistema Balastro Lámpara

En la etapa de validación y simulación de algoritmos se selecciona el algoritmo N4SID modificado de Clavijo. Para la implementación del algoritmo de identificación mediante subespacios se utiliza el hardware embebido NI myRIO conjuntamente con el software de Nacional Instruments LabView®. El dispositivo myRIO tiene tres funciones principales: la primera, consiste en la generación de la señal de PWM que controla la salida del puente H. La segunda, función captura de datos, es decir la medición de las señales de salida de la punta diferencial y la realimentación de la señal de PWM, finalmente la tercera función del dispositivo es la transmisión de los datos obtenidos vía WIFI.

Al estar constituido por una FPGA y un microcontrolador, el hardware embebido myRIO requiere de un mínimo de dos archivos de extensión vi para cumplir con todas estas etapas. La FPGA estará encargada de realizar la generación de la señal de PWM y de la captura de datos, mientras que el microcontrolador se encarga de la transmisión, vía WIFI, de los datos obtenidos por la FPGA. Durante el tiempo que el hardware se encuentra encendido, genera una señal PWM de frecuencia 30 kHz y un ciclo de trabajo del 50 %, este ciclo de trabajo cambiara solo durante la captura de datos para la generación de la SBPA. Se conecta un circuito con un buffer para elevar la amplitud de la señal de PWM de 3,3 voltios a 5 voltios.

Al presionar el botón de uso libre el hardware myRIO, se inicia la captura datos, al tratarse de medición de una señal alterna se aplicó el algoritmo de toma de datos explicados en el trabajo de Ayala [29]. Se genera una SBPA de semilla 9, cada valor de la SBPA corresponde a un determinado ancho de pulso, en este caso un 0 corresponde a un 40 % mientras que un 1 corresponde a un 60 %. Se capturan tres datos cada 0.00033 segundos, es decir tres datos por cada valor de la SBPA. Al terminar este proceso se transmiten los datos al computador, donde es posible visualizarlos y almacenarlos para su procesamiento.

Para el procesamiento de los datos se incorpora un archivo de extensión vi adicional al proyecto de captura y generación de la SBPA, la interfaz se muestra en la figura 50, el archivo vi lee el archivo de los datos almacenados, los procesa, y los envía al método de identificación basado en subespacios N4ISD, realizando una invocación al software MATLAB® mediante el MathScrip Node, para finalmente obtener las matrices del sistema.

El modelo matemático se somete a un proceso de validación en el cual se excita la planta obtenida como resultado de la identificación con los mismos datos de entrada de la planta real con la finalidad de obtener un nuevo conjunto de salidas. Se realiza una comparación entre el conjunto de datos de salida obtenidos del sistema identificado con el conjunto de datos de salida capturados del sistema real para evaluar la validez del modelo matemático obtenido en función del porcentaje de ajuste de los conjuntos de salida, según (43).

$$\%Fit = 100 \times \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y1_i - y2_i)^2}{N}} \right) \quad (43)$$

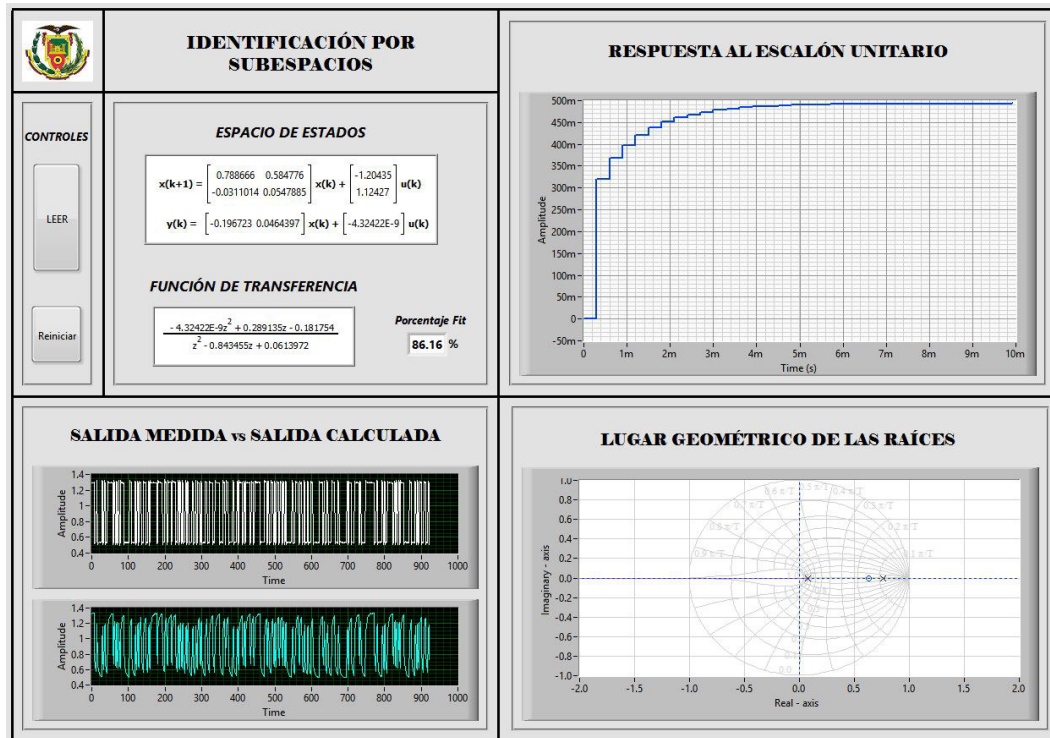


Figura 50: Interfaz implementación algoritmo

A continuación se muestran los resultados obtenidos del proceso de identificación.

5.3.1 Resultados Obtenidos

Las matrices de estado del sistema se muestran en (44).

$$A = \begin{bmatrix} 0,7887 & 0,5848 \\ -0,0311 & 0,0548 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -1,2044 \\ 1,1243 \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$C = \begin{bmatrix} -0,1967 & 0,0464 \end{bmatrix} \quad D = [-4,3242e^{-9}]$$

La función de transferencia obtenida se encuentra en (45).

$$G(z) = \frac{-4,3242e^{-9} z^2 + 0,2891 z - 0,1818}{z^2 - 0,8435 z + 0,0614} \quad (45)$$

La respuesta al escalón unitario se muestra en la figura 51.

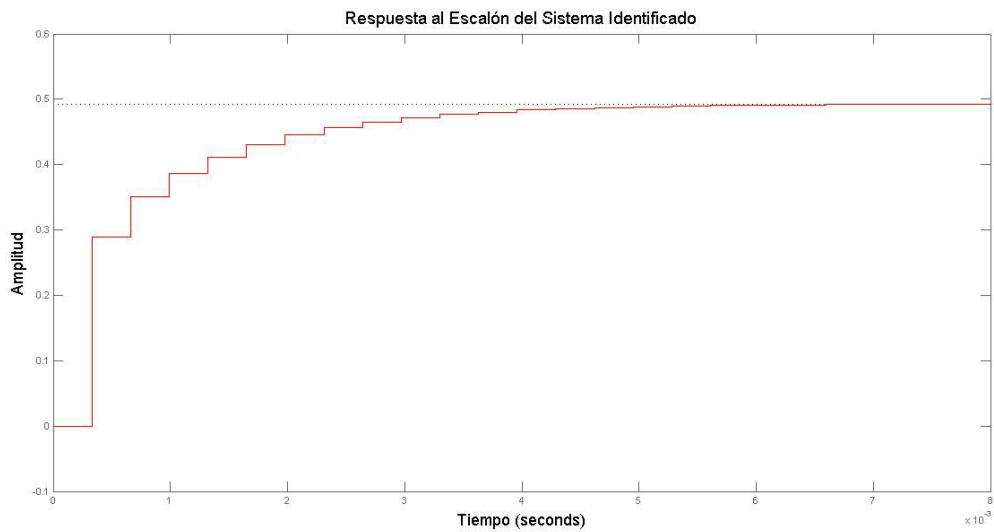


Figura 51: Respuesta al escalón unitario del sistema identificado

El lugar geométrico de las raíces se encuentra en la figura 52.

En la figura 53 se muestra el contraste de los datos de salida medidos con los datos de salida calculados.

El porcentaje de ajuste del conjunto de datos de salida calculados en relación al conjunto de datos de salida medidos es del 86.16 %. Considerando que el porcentaje de ajuste es mayor al 80 %, se toma como válido el modelo matemático obtenido.

Dado que el coeficiente del numerador, $-4,3242e^{-9}z^2$, es considerablemente pequeño y su influencia sobre la respuesta de la planta es insignificante (véase la figura 54), por estos motivos dicho término fue descartado.

5.4 Controlador

Las características del dispositivo electrónico a seleccionar deben satisfacer las necesidades del controlador del sistema identificado. Una vez seleccionado se es-

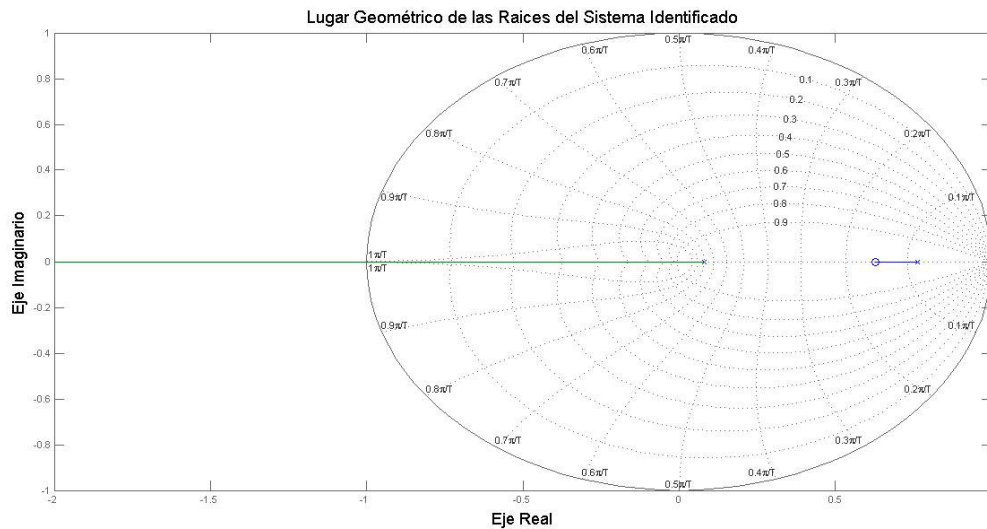


Figura 52: Lugar geométrico de las raíces sistema identificado

tablecen los parámetros de diseño del controlador en función de las características del sistema, para finalmente implementar el controlador.

5.4.1 Selección del Microcontrolador

El diseño e implementación del controlador requiere establecer las características mínimas del dispositivo electrónico sobre el cual se programa el controlador digital. Las características que se evalúan son:

Tiempo de Procesamiento

El tiempo de procesamiento debe ser por lo menos 10 veces menor al tiempo de muestreo que para el sistema es de 0.33 ms.

Convertidor Análogo – Digital

El sistema tiene una variación entre 0 V y 170 V después de la etapa de sensado y acoplamiento de señal el valor entregado para la lectura del convertidor análogo digital es de 1 V a 2,7 V, es decir, que 10 mV después del acoplamiento

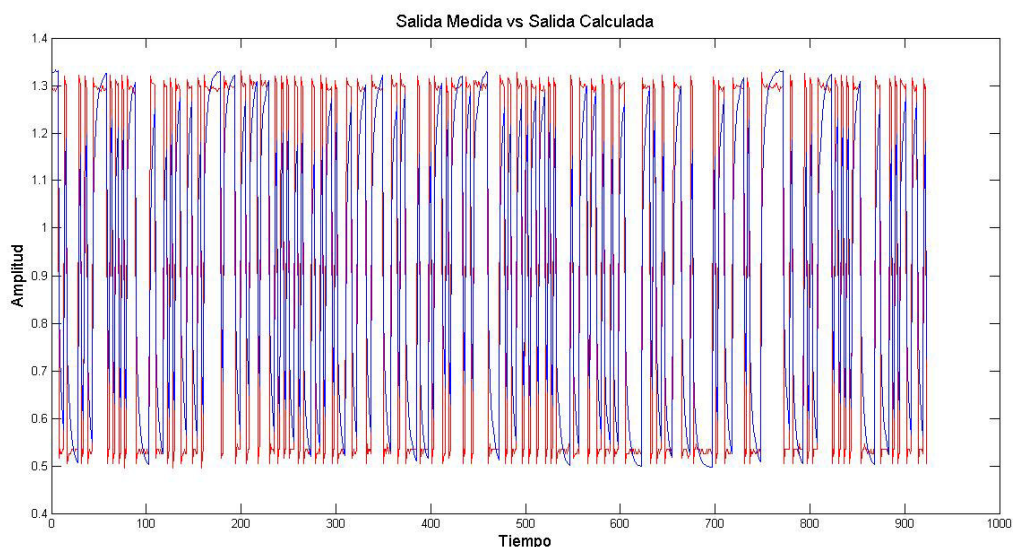


Figura 53: Datos medidos vs datos calculados

de señal representan 1 V en la lámpara. El control de voltaje que se implementa tiene una resolución 0.1 V sobre la lámpara, lo cual significa 1 mV en la lectura del convertidor análogo – digital.

El error por cuantización está presente al momento de realizar el muestreo de una señal mediante un convertidor análogo – digital, una forma de minimizar este error es aumentando el número de bits del registro, en el cuadro 16 se presenta las diferentes resoluciones de los registros a una tensión de 3.3 V, el cálculo de la resolución corresponde a (46).

$$\frac{\text{Valor máximo}}{\text{Rango del convertidor A/D}} \quad (46)$$

Cuadro 16: Resolución registros convertidor análogo – digital

Bits	Resolución
8	12.9 mV
10	3.22 mV
12	0.805 mV

El cuadro 17 muestra los diferentes valores que toma el registro del converti-

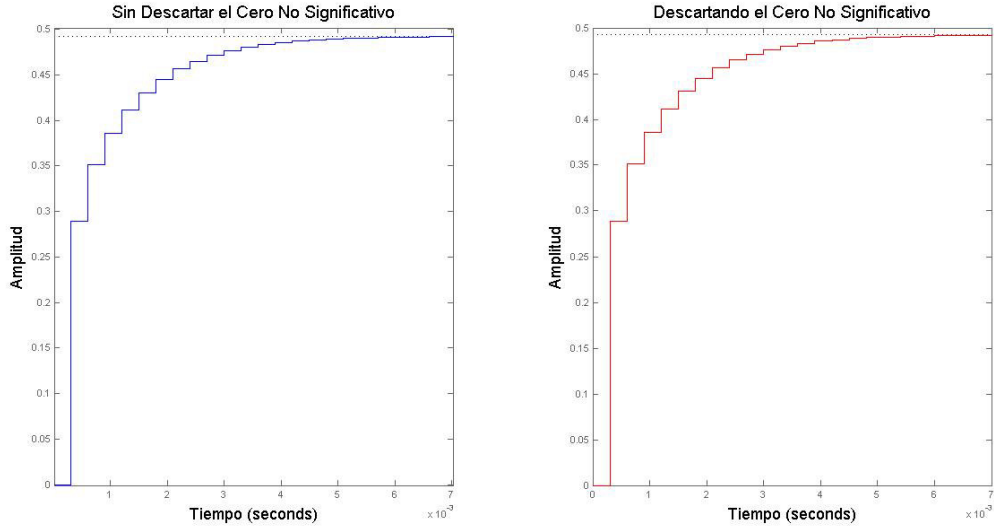


Figura 54: Respuesta al escalón con y sin coeficiente

dor análogo – digital en función de una entrada determinada, considerando las 3 posibles longitudes del registro. El valor mínimo para una correcta implementación, debe ser de 12 bits o superior, ya que con un registro de 8 bits se necesitaría 12.9 mV para recién cambiar un bit en el registro, lo que significaría un valor 12.9 veces mayor al que se quiere muestrear, algo similar sucede con el registro de 10 bits, debido que el valor mínimo detectado es 3.22 veces mayor al valor deseado.

El error de cuantización se calcula según (47), considerando los valores del cuadro 17 se obtuvo un error de cuantización promedio de 0.0106, lo que no representa un pérdida importante de información [30].

$$e[n] = x[n] - x_q[n] \quad (47)$$

Donde:

$x[n]$ Valor Real.

$x_q[n]$ Valor Cuantizado.

n Número de la Muestra.

Cuadro 17: Variación del registro del convertidor análogo – digital

Tensión	Registros								
	8 bits			10 bits			12 bits		
	x	x_q	e_8	x	x_q	e_{10}	x	x_q	e_{12}
1	77.52	78	0.48	310.56	311	0.44	1242.14	1242	-0.14
1.001	77.60	78	0.40	310.87	311	0.13	1243.05	1243	0.05
1.002	77.67	78	0.33	311.18	311	-0.18	1244.9	1245	-0.10
1.003	77.75	78	0.25	311.49	311	0.49	1245.96	1246	-0.04
1.004	77.83	78	0.17	311.80	312	0.20	1247.02	1247	0.02
1.005	77.91	78	0.09	312.11	312	-0.11	1248.05	1248	0.05
1.006	77.98	78	0.02	312.42	312	-0.42	1249.69	1250	-0.31
1.007	78.06	78	-0.06	312.73	313	0.27	1250.93	1251	-0.07
1.008	78.14	78	-0.14	313.04	313	-0.04	1252.17	1252	0.17
1.009	78.22	78	-0.22	313.35	313	-0.35	1253.42	1253	0.42
1.010	78.29	78	-0.29	313.66	314	0.34	1254.66	1255	-0.34
1.011	78.37	78	-0.37	313.98	314	0.02	1255.90	1256	-0.10
1.012	78.45	78	-0.45	314.29	314	-0.29	1257.14	1257	0.14
1.013	78.53	79	0.47	314.60	315	0.40	1258.39	1258	0.39
1.014	78.60	79	0.40	314.91	315	0.09	1259.63	1260	-0.37
1.015	78.68	79	0.32	315.22	315	-0.22	1260.87	1261	-0.13
1.016	78.76	79	0.24	315.53	316	0.47	1262.11	1262	0.11
1.017	78.84	79	0.16	315.84	316	0.16	1263.35	1263	0.35
Error		0.10			0.02			0.01	

Convertidor Digital – Análogo

El convertidor digital – análogo debe ser capaz de generar una señal de PWM de alta frecuencia, 32 kHz, esta frecuencia es necesaria para el control de voltaje en el sistema, además trabajando a esta frecuencia se soluciona el problema de resonancia acústica que presenta la lámpara HID – MH.

El rango del ancho de pulso de la señal de PWM tendrá un máximo de 70 % y un mínimo del 30 %, la amplitud de esta señal es de 3.3 voltios, el microcontrolador general la señal a partir de un registro de 10 bits.

La señal de PWM es usada como señal de control ya que los actuadores, al trabajar en la región de corte y saturación, responden a una señal con este tipo de características.

Espacio de Memoria

La memoria requerida por el microcontrolador debe almacenar al menos 4 variables tipo double, lo que representa 32 bytes de memoria; adicionalmente debe tener un espacio de memoria para programa de al menos 8 kb.

A consecuencia de lo descrito en párrafos anteriores se selecciona la tarjeta STM32 F4 Discovery, la cual satisface los requerimientos mínimos para la implementación del controlador digital.

5.4.2 Parámetros de Diseño

El conocimiento previo del comportamiento del sistema es importante para el diseño del controlador, ya que de este depende la correcta selección de los parámetros de diseño; y son:

Máximo Pico

El sistema balastro – lámpara no soporta sobre impulsos muy altos, esto se debe a su complejidad y respuesta de los elementos que constituyen el sistema, por este motivo es recomendable diseñar el controlador para un máximo pico menor al 10 %.

Tiempo de Establecimiento

El tiempo de establecimiento del sistema controlado debe ser menor a 0.010 s, ya que los tiempos de respuesta de los elementos que conforman el sistema son excesivamente altos, ver anexo D.

Error en Estado Estacionario

El control de voltaje implementado va de la mano con el control de corriente del convertidor DC/DC, de esta manera se realiza un control de potencia en la lámpara HID – MH. El control de corriente tiene un error en estado estacionario menor al 1 %, lo que permite tener un error en estado estacionario máximo del 5 %

en el control de tensión. Uno de los objetivos de diseño es mantener un error en estado estacionario menor al 2 %, cumpliendo así la condición de funcionamiento antes mencionada.

Los parámetros de diseño seleccionados considerando lo expuesto en los párrafos anteriores, son:

- $M_p < 10\%$
- $ts < 10ms$
- $ess < 2\%$

5.4.3 Diseño del Controlador

El diseño del controlador requiere como punto de partida el conocimiento de los elementos y señales del lazo de control mostrado en la figura 60 , al igual que la función de transferencia del sistema identificado en representación del producto de la ganancia, ceros y polos, como se muestra en (48).

$$G(z) = 0,2891 \times \frac{(z-0,6288)}{(z-0,7630) \times (z-0,08046)} \quad (48)$$

El diagrama del lugar geométrico de las raíces mostrado en la sección anterior revela que no existe una ganancia que permita obtener la salida deseada, en consecuencia se selecciona un controlador tipo PI cuya estructura se muestra en (49). Los coeficientes del controlador PI se los obtienen mediante la teoría de compensación de ángulos del lugar geométrico de las raíces [31].

$$G_{PI} = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} \right) \quad (49)$$

La raíz que cumple los parámetros de diseño se obtiene aplicando las ecuaciones (50) [31].

$$\epsilon = \frac{-\ln(M_p \div 100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p \div 100)}}$$

$$\omega_n = \frac{4}{\epsilon \times t_s}$$

$$x_{(s)} = -\frac{4}{t_s} \pm j\omega_n \times \sqrt{1 - \epsilon^2}$$

$$x_{(z)} = e^{sT} \tag{50}$$

$$rx_{(z)} = e^{-\frac{4 \times T}{t_s}} (\cos(\omega_n \times T \times \sqrt{1 - \epsilon^2}))$$

$$tx_{(z)} = e^{-\frac{4 \times T}{t_s}} (\sin(\omega_n \times T \times \sqrt{1 - \epsilon^2}))$$

$$x_{(z)} = rx_{(z)} \pm jtx_{(z)}$$

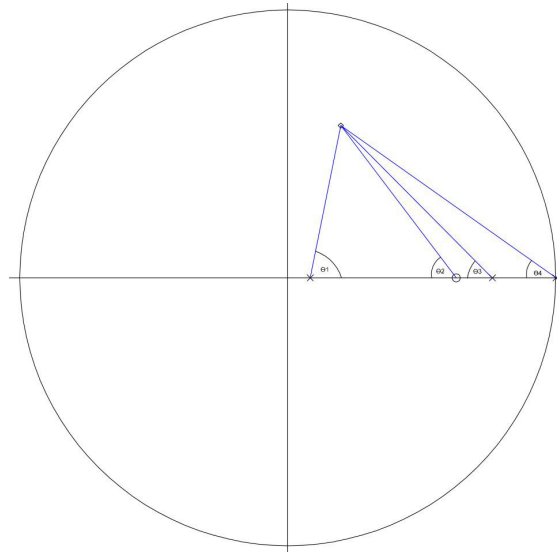
El punto obtenido es: $x_{(z)} = 0,1979 + j0,5684$. La figura 55 presenta gráficamente los ángulos que existen entre el punto deseado y cada uno de los polos y ceros del sistema y el polo del controlador.

El ángulo a compensar es: $\theta_c = 125$. Para encontrar el cero que compensa el ángulo obtenido se aplica la ecuación (51).

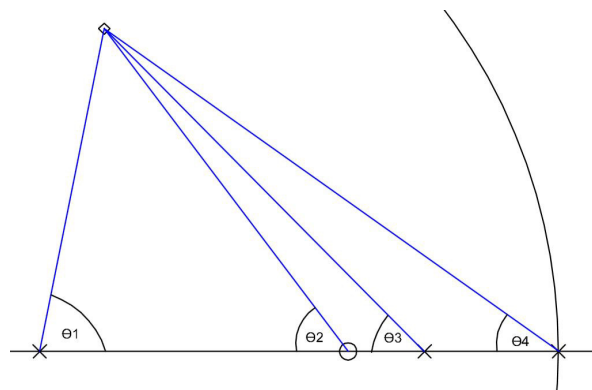
$$z_c = \frac{tx_{(z)}}{\tan(\theta_c)} + rx_{(z)} \tag{51}$$

$$z_c = -0,2002$$

El cálculo de la constante K_p que representa la ganancia del controlador digital, se muestra en (52).



(a) Ubicación de ceros y polos



(b) Acercamiento de ceros y polos

Figura 55: Ángulos de compensación

$$K_p = - \frac{(z-0,08046) \times (z-0,7630) \times (z-1)}{0,2891 \times (z-0,6288) \times (z-0,2002)} \Big|_{z=0,1979+j0,5684}$$

(52)

$$K_p = 0,5240$$

El controlador diseñado está dado por (53).

$$G_{PI} = \frac{0,5240 \times (z+0,2002)}{z-1} \quad (53)$$

El lugar geométrico de las raíces generado por la acción del controlador, se presenta en la figura 56.

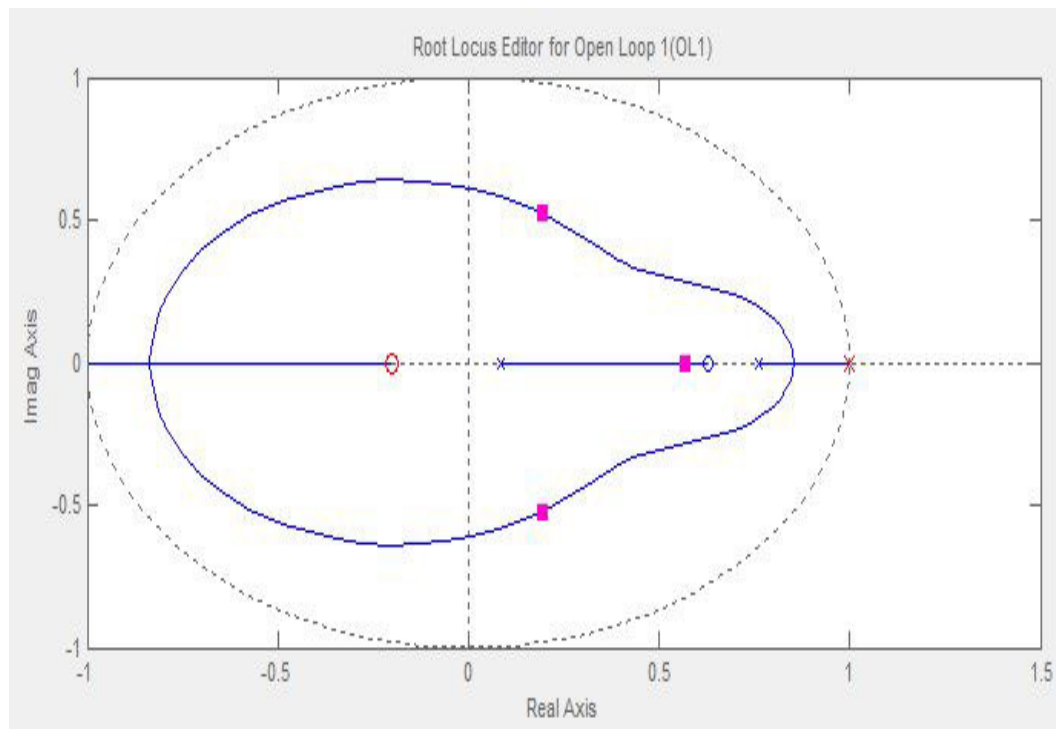


Figura 56: Lugar geométrico de las raíces con controlador

La respuesta al escalón unitario del sistema controlado, se muestra en la figura 57.

En la figura 57, se observa que se cumple con los parámetros impuestos para el diseño del controlador digital, a continuación se detallan los resultados:

- $M_p = 6,22$, es menor al 10%.
- $t_s = 5,2ms$, es menor a 10 ms.
- $ess = 0$, es menor al 2%.

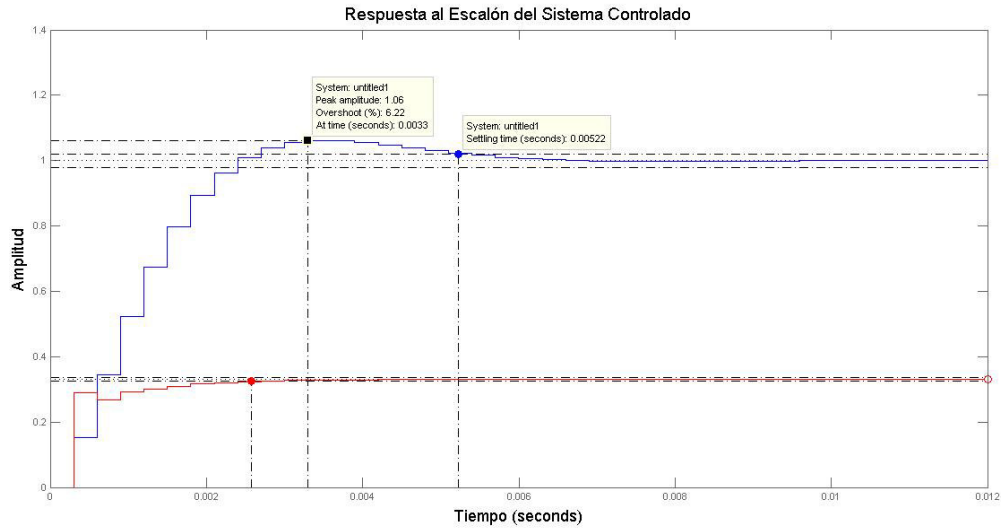


Figura 57: Respuesta al escalón unitario sistema controlado

Los resultados demuestran que el diseño del controlador es correcto, por lo que se procede a la implementación en el sistema.

5.4.4 Implementación del Filtro

La función de transferencia discreta del controlador es el punto de partida para la implementación del mismo. Al numerador y denominador de (53) se le multiplica por z^{-1} obteniendo (54).

$$G_c(z) = \frac{0,5240 \times (1 + 0,2002 z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (54)$$

Utilizando la definición de la función de transferencia se obtiene (55).

$$\frac{Y}{X} = \frac{0,5240 \times (1 + 0,2002 z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (55)$$

$$Y \times (1 - z^{-1}) = X \times (0,5240 \times (1 + 0,2002 z^{-1}))$$

El factor z^{-1} representa un retardo unitario en tiempo discreto, reemplazando los retardos y despejando $Y[k]$ se obtiene la ecuación a diferencias presentada en (56).

$$Y[k] - Y[k - 1] = 0,5240 X[k] + 0,1049 X[k - 1] \quad (56)$$

$$Y[k] = 0,5240 X[k] + 0,1049 X[k - 1] + Y[k - 1]$$

En la figura 58 se muestra el diagrama de flujo del controlador implementado. El convertidor DC/DC entrega un corriente controlada de 1.9 A, se requiere un voltaje de 131.58 V para alcanza la potencia nominal de lámpara (250 W). El registro del convertidor análogo – digital almacena del valor de 1400 al muestrear la señal de tensión deseada, por lo tanto este valor corresponderá al setpoint del sistema. El tamaño del registro que se usa es de 12 bits.

5.4.5 Resultados del Control

En la figura 59 se presenta el comportamiento del sistema frente a perturbación con la acción del controlador y sin la acción de control. La perturbación ocurre a diferentes tiempos ya que se acciona la misma de manera manual.

El cuadro 18 contrasta los resultados obtenidos en la implementación con los obtenidos en la simulación.

Cuadro 18: Validación de resultados

Parámetro	Impuesto	Simulado	Real
M_p	< 10 %	6,22 %	1,05 %
t_s	< 10 ms	5,2 ms	7,86 ms
e_{ss}	< 2 %	0 %	0,87 %

El funcionamiento del controlador implementado satisface los parámetros esperados en simulación, no se corrige el error en estado estacionario al 100 % por el margen de la precisión del sensor, lo cual es aceptable dado que la corriente se mantiene constante y es menor al parámetro de diseño planteado.

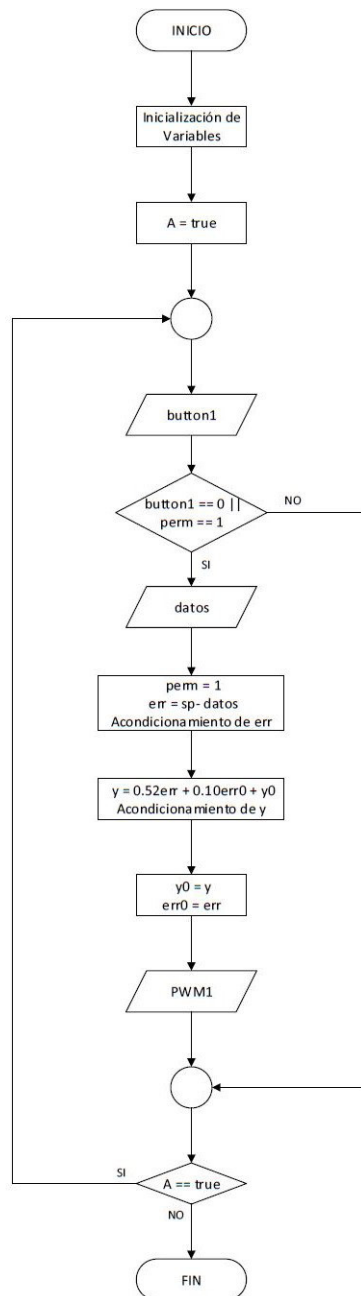


Figura 58: Diagrama de flujo del controlador

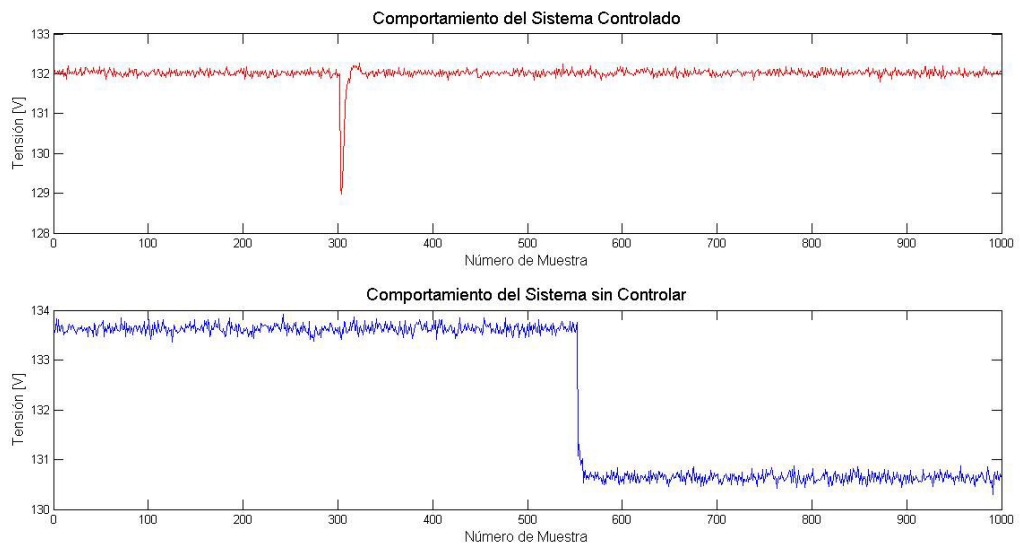


Figura 59: Sistema controlado y sin controlar

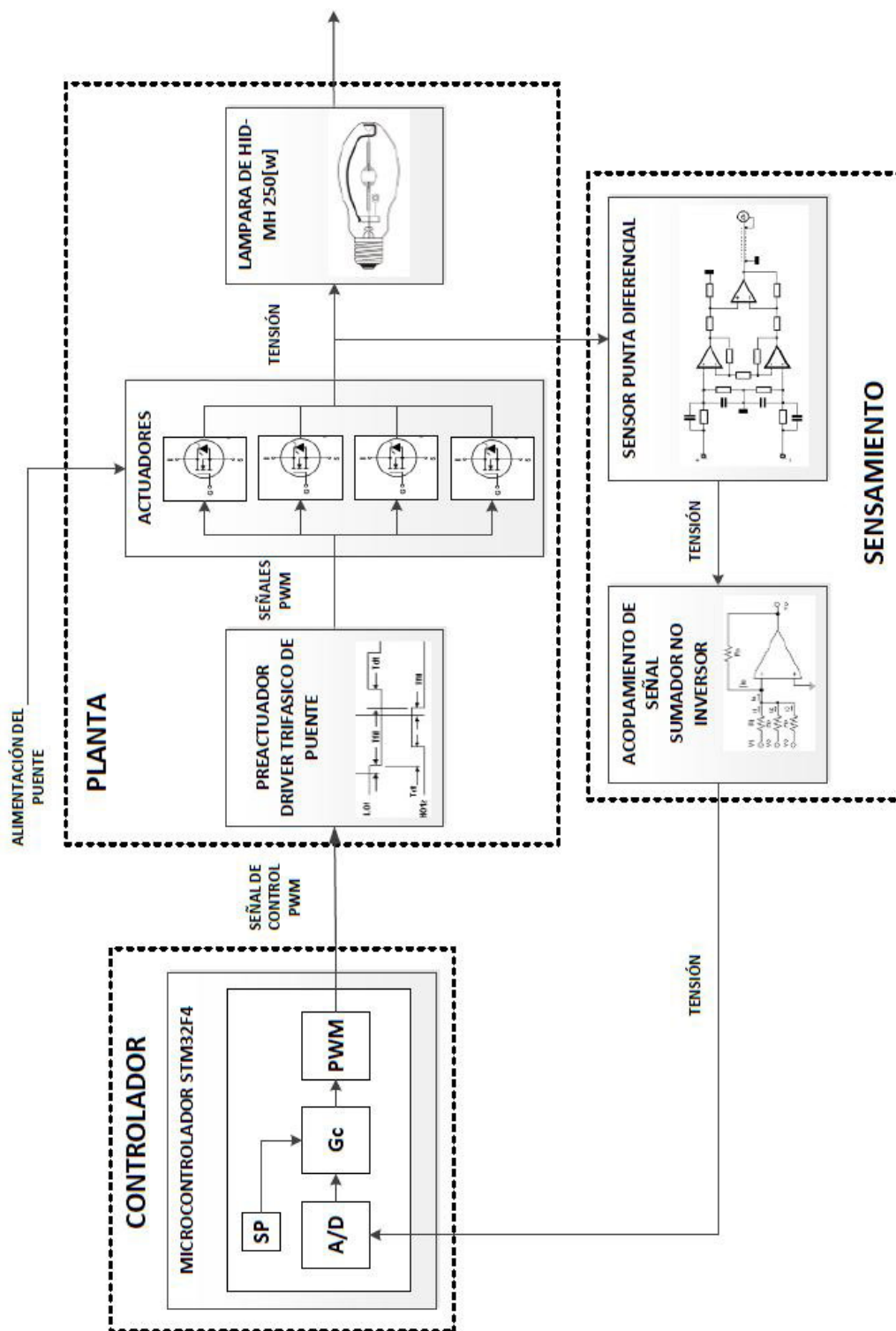


Figura 60: Elementos lazo cerrado de control

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Los algoritmos de identificación basados en subespacios MOESP y N4SID para su ejecución requieren de: datos de entrada del sistema, datos de salida del sistema y el número de filas de las matrices de Hankel. Las variables de estado resultantes de la identificación son transparentes para el usuario, ya que no se puede afirmar que una variable de estado corresponde a una contraparte física en particular.
- El algoritmo N4SID de Clavijo tiene mejor desempeño, ya que en el proceso de validación y simulación de algoritmos presento el menor error cuadrático medio y al no obtener las matrices de sistema mediante un método de aproximación como los mínimos cuadrados facilita comprensión e implementación.
- En base a los resultados de las pruebas experimentales, se llegó a la conclusión, que el algoritmo tiene una susceptibilidad al ruido considerable, es decir, que para su correcto funcionamiento requiere un pre-procesamiento de datos o en su defecto una instrumentación más robusta.
- Al identificar sistemas conocidos para las pruebas y validación de los algoritmos, se pudo observar que estos no buscan optimizar el orden del sistema sino ajustarse lo más posible a la salida. Con la finalidad de priorizar la optimización del orden del sistema es necesario establecer un rango de tolerancia al momento de procesar la matriz Σ^{-1} , puesto que la influencia de los coeficientes de órdenes superiores es nula el sistema identificado.

- Los errores producidos durante la captura de datos son consecuencia de una desincronización durante el cálculo del valor medio de la señal medida en alta frecuencia y el ruido generado por algunos componentes del sistema balastro – lámpara.

6.2 Recomendaciones

- La etapa de sensamiento debe ser exacta y precisa, por lo que se recomienda utilizar circuitos integrados con un ancho de banda mínimo de 150 kHz y offset nulo. Al cumplir estas características se reduce la probabilidad de distorsiones en la señal de tensión medida.
- El número de filas de la matriz de Hankel es un parámetro influyente dentro de los algoritmos de identificación basados en métodos de subespacios, por lo cual se recomienda seleccionar el mismo en función de la complejidad del sistema y de calidad de los datos capturados, considerando una relación directa entre estos parámetros.
- La sincronización dentro del proceso de captura de datos es un punto crítico, se recomienda que el dispositivo electrónico encargado de esta tarea sea capaz de muestrear y procesar la señal entregada por la punta diferencial, en un tiempo mucho menor al periodo de la señal muestreada en este caso 33.5 us.
- Al momento de procesar los datos dentro del microcontrolador, se recomienda considerar el cero vivo consecuencia de la etapa de acoplamiento de señal ubicada entre la punta diferencial y el microcontrolador, esto permitirá mejorar el posterior manejo de los datos dentro del dispositivo electrónico.
- Los microcontroladores encargados del control de corriente y del control de tensión son susceptibles a daños producidos por sobretensiones y sobre corrientes en cualquiera de sus pines, razón por la cual se recomienda aislar los dispositivos electrónicos sin alterar los parámetros de las señales de entrada y salida.

Bibliografía

- [1] R. Flores. Modelado dinámico de lámparas de alta intensidad de descarga. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Mayo 2007.
- [2] J. Ramírez. Identificación de sistemas en representación de espacio de estados. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Agosto 2007.
- [3] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 1997.
- [4] W. Chicaiza and C. Barrionuevo. *Control Adaptativo de una Lámpara HID-MH de 250W*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2013.
- [5] CODENSA. Et819 bombillas de vapor de mercurio alta intensidad de carga, Noviembre 2014. URL http://likinormas.micodensa.com/Especificacion/materiales_ap/et819_bombillas_vapor_mercurio_alta_intensidad_carga.
- [6] CAD Projects España. Clasificación de las lámparas, Noviembre 2014. URL http://www.cad-projects.org/4.3.3-manual_luminotecnia/index.php?art=4.
- [7] B. O'ZDonell, J. Sandoval, and F Paukste. Fuentes luminosas, Noviembre 2014. URL <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>.

- [8] SOLMAD. Lámparas de descarga, Noviembre 2014. URL http://solmad.es/?page_id=875<http://fulham.com/espanol/product-systems/hid-systems/hid-lamps/>.
- [9] M. Aguado and A. Martínez. *Identificación y Control Adaptativo*. Prentice Hall, 2003.
- [10] N. Wiener. *The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*. Taylor & Francis, Ltd., 1949.
- [11] D. Graupe. *Identification of Systems*. Robert E. Krieger, 1976.
- [12] P. Briggs, P. Hammonds, M. Hughes, and G. Plumb. Correlation analysis of process dynamics using pseudo-random binary test perturbation. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*, 179:37–51, 1965.
- [13] D. Clavijo. Metodos de subespaços para identificação de sistemas. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [14] P. Overschee and B. Moor. *Subspace Identification for Linear Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] W. Favoreel, S. Van Huffel, B. De Moor, V. Sima, and M. Verhaegen. Comparative study between three subspace identification algorithms. In *Proceedings of European Control Conference*, 1999.
- [16] P. Van Overschee and B. De Moor. A unifying theorem for three subspace system identification algorithms. *Automatica*, 31:1853 – 1864, 1995.
- [17] M. Verhaegen. Identification of the deterministic part of mimo state space models given in innovations form from input-output data. *Automatica*, 30(1):61–74, 1994.
- [18] M. Verhaegen and P. Dewilde. Subspace model identification part 2. analysis of the elementary output-error state-space model identification algorithm. *International journal of control*, 56(5):1211–1241, 1992.

- [19] M. Verhaegen and P. Dewilde. Subspace model identification part 1. the output-error statespace model identification class of algorithms. *International journal of control*, 56(5):1187–1210, 1992.
- [20] T. Katayama. *Subspace Methods for System Identification*. Springer, 2005.
- [21] G. Barreto. *Modelagem Computacional Distribuída e Paralela de Sistemas e de Séries Temporais Multivariáveis no Espaço de Estado*. PhD thesis, UNICAMP, 2002.
- [22] P. Van Overschee and B. De Moor. N4sid: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems. *Automatica*, 30(1):75–93, 1994.
- [23] M Nitta. Design of compensation input based on lq decomposition in n4sid method. In *SICE Annual Conference.*, pages 2530–2534, 2007.
- [24] T. Katayama. A system theoretic interpretation of lq decomposition in subspace identification methods. In *Proceedings of the 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, pages 1089–1095, 2006.
- [25] T. Flint and R. Vaccaro. Performance analysis of n4sid state-space system identification. In *Proceedings of the American Control Conference*, 1998.
- [26] B. Haverkamp. Efficient implementation of subspace method identification algorithms. Technical report, NICONET, 1999.
- [27] Universidad Complutense. Mínimos cuadrados, Enero 2006. URL <http://www.mat.ucm.es/~jarrieta/asignaturas/calculocomputacional/practica7.pdf>.
- [28] P. Salazar. *Diseño e Implementación de un Control por Modo Deslizante para un Convertidor Buck Boost DC/DC*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2012.

- [29] P. Ayala, C. Bernal, and S. Guerra. Identificación de sistemas basado en re-muestreo de señales periódicas implementado en fpga. *Revista Energética Universidad Nacional de Colombia*, 43:23–29, 2014.
- [30] J. Mariño, F. Vallverdú, J. Rodríguez, and A. Moreno. *Tratamiento Digital de la Señal*. Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.
- [31] N. Nise. *Sistemas de Control para Ingeniería*. California State Polytechnic University, quinta edición, 2008.

ANEXO A

ALGORITMOS

ANEXO B

SCRIPTS DE VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN

ANEXO C

CIRCUITOS IMPRESOS

ANEXO D

HOJAS TÉCNICAS

ANEXO E

CÁLCULOS

ANEXO F

VINCULO STM Y MATLAB

ANEXO G

PROGRAMA CONTROLADOR

ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado denominado "*Identificación por Subespacios de un Sistema Balastro Lámpara HID - MH de 250W*", fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, desde:

Sangolquí, ²³ de Febrero de 2015.

ELABORADO POR:



Irvin Alberto Cedeño García

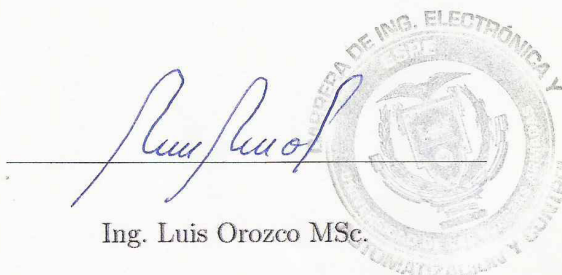
131161945-4



Edison Ramiro Nieto Rios

171770231-8

AUTORIDAD:



Ing. Luis Orozco MSc.

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL