

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ADAPTATIVO CON MODELO DE
REFERENCIA OFF-LINE PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE
VIBRACIÓN BASADO EN LA NORMA ISO-16063-21**

ING. CAMILO ANDRES MONCAYO URIBE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARMANGA
2015**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ADAPTATIVO CON MODELO DE
REFERENCIA OFF-LINE PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE
VIBRACIÓN BASADO EN LA NORMA ISO-16063-21**

**Trabajo de grado para optar por el título de magister en Ingeniería
Electrónica**

**DIRECTOR DEL PROYECTO:
ING. OMAR PINZÓN ARDILA, PH.D.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA
2015**

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	JUSTIFICACIÓN:	3
2.1.	Planteamiento del problema:	5
3.	ESTADO DEL ARTE	7
3.1.	Antecedentes	7
3.1.1.	Estación de trabajo para la calibración de sensores de vibración [5]	7
3.1.2.	Diseño e implementación de guías para el análisis de vibraciones en un sistema rotor KIT [6]	8
3.1.3.	Base de datos de vibraciones para análisis de fallas en rodamientos de bolas [7]	9
3.2.	Norma ISO 16063-21 para la calibración de sensores de vibración	9
3.2.1.	Requisitos de los dispositivos y condiciones ambientales	11
3.2.2.	Calibración	12
3.2.3.	Procedimiento de calibración	14
3.2.4.	Expresión de los resultados	15
3.3.	Métodos de identificación de modelos dinámicos de sistemas	16
3.3.1.	Teoría para la identificación de Modelos Black-Box	16
3.3.2.	Modelos no lineales ARX	16
3.3.3.	Modelo Hammerstein-Wiener	19
3.4.	Control adaptativo	20
3.4.1.	Control adaptativo con modelo de referencia	22
3.4.2.	Control adaptativo <i>off-line</i>	23
4.	IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE VIBRACIÓN SHAKER	24
4.1.	Identificación utilizando el software LabView	24
4.2.	Simulación de los modelos	41
4.3.	Identificación del modelo nominal de la planta	44
5.	CONTROLADORES PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES	48
5.1.	Controlador PI	48
5.2.	Control robusto	58
5.3.	Control Gain Scheduling con PI Robusto	61
5.4.	Control adaptativo con modelo de referencia	65

6.	SOFTWARE PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE VIBRACIÓN	74
6.1.	Interfaz gráfica	74
7.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE SENSORES	80
8.	CONCLUSIONES	81

Tabla de Figuras

Figura 1. Diagrama de los componentes de un laboratorio para la calibración de sensores de vibración.....	5
Figura 2. Amplificador, perilla analoga.	6
Figura 3. Estructura general de modelos no lineales.....	19
Figura 4. Estructura del modelo Hammerstein-Weiner.....	19
Figura 5. Diagrama de bloques de un control adaptativo	21
Figura 6 Diagrama de bloques de un sistema MRAC.....	23
Figura 7. Conexiones para la identificación del sistema	25
Figura 8. Posiciones perilla de ganancia del amplificador	25
Figura 9. Barrido en frecuencia y en amplitud para la identificación del <i>Shaker</i>	27
Figura 10. Diagrama de bode en magnitud y fase y modelos identificados en LabView	28
Figura 11. Correlación de la señal identificada a 10 Hz, 0.25 V y 0 g, respecto a la señal de entrada	29
Figura 12. Correlación de la señal identificada a 100 Hz , 0.5 V y 0 g, respecto a la señal entregada	29
Figura 13. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 10 Hz a 0,25 V.....	34
Figura 14. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 100 Hz a 0,5 V y 1 V.....	34
Figura 15. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 1000 Hz a 0,5 V y 1 V.....	35
Figura 16. Promedios ganancias modelos TF a 0.5 V y 100 Hz	36
Figura 17. Promedios ganancias modelos TF a 1 V y 100 Hz	36
Figura 18. Promedios ganancias modelos ARX a 0.5 V y 100 Hz	37
Figura 19. Promedios ganancias modelos ARX a 1 V y 100 Hz.....	37
Figura 20. Promedios ganancias experimentales a 0.5 V y 100 Hz.....	38
Figura 21. Promedios ganancias experimentales a 1 V y 100 Hz.....	39
Figura 22 Promedio de las ganancias de los modelos identificados a 100Hz.....	40
Figura 23. Simulación de los modelos identificados a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada sinusoidal	42
Figura 24. Respuesta de los diferentes modelos identificados para el <i>Shaker</i> a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada sinusoidal	42
Figura 25. Simulación de los modelos identificados a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada escalón	43
Figura 26. Respuesta de los diferentes modelos identificados para el <i>Shaker</i> a 100Hz y 1V de amplitud para una entrada escalón	43
Figura 27. Diagrama de Bode para los diferentes modelos identificados para el <i>Shaker</i> a 100Hz y 1v de amplitud.	44
Figura 28. Diagrama de Bode en magnitud y amplitud de los 10 casos simulados (azules) y del peor caso (rojo)	47
Figura 29. Diagrama en Simulink para la simulación del controlador PI	49

Figura 30 diagrama en Simulink para la simulación de los controladores PI hallados para cada modelo	51
Figura 31. Respuesta del modelo de 0 g con controlador PI.	52
Figura 32. Respuesta del modelo de 58 g con controlador PI.	52
Figura 33. Respuesta del modelo de 256 g con controlador PI.	53
Figura 34. Respuesta del modelo de 455 g con controlador PI.	53
Figura 35. Respuesta de los modelos identificados con controladores PI independientes	54
Figura 36. Error de los modelos identificados con controladores PI independientes	54
Figura 37. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI sintonizado para el modelo de 0g	55
Figura 38. Error en todos los modelos del controlador PI sintonizado para el modelo de 0 g	56
Figura 39. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI sintonizado para el modelo de 455 g.....	57
Figura 40. Error en todos los modelos del controlador PI sintonizado para el modelo de 455 g	57
Figura 41. Diagrama de simulación en Simulink del controlador Robusto sintonizado para todos los modelos de la planta.....	59
Figura 42. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI Robusto sintonizado para el modelo nominal	59
Figura 43. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI Robusto sintonizado para el modelo nominal (2).....	60
Figura 44. Error en todos los modelos del controlador Robusto sintonizado para el modelo nominal	60
Figura 45. Error en todos los modelos del controlador Robusto sintonizado para el modelo nominal (2)	61
Figura 46. Diagrama de Simulink para la simulación del control Gain Scheduling	62
Figura 47. Diagrama en Simulink subsistema controlador Gain Scheduling	62
Figura 48. Respuesta control Gain Scheduling con PI Robusto	63
Figura 49. Respuesta control Gain Scheduling con PI Robusto (2)	63
Figura 50. Error de los modelos con el controlador Gain Scheduling con PI Robusto.....	64
Figura 51. Error de los modelos con el controlador Gain Scheduling con PI Robusto.....	64
Figura 52. Diagrama de bode en magnitud y amplitud para el análisis de robustez del modelo identificado con 0g para una incertidumbre en cada parámetro del 20%	67
Figura 53. Relación de la constante proporcional con la variación en gramos del controlador rápido	70
Figura 54. Relación de la constante proporcional con la variación en gramos controlador lento ...	70
Figura 55. Controlador Adaptativo implementado en Labview	72
Figura 56. Resultados calibración con controlador adaptativo	73
Figura 57. Interfaz gráfica del software para la calibración de sensores.....	74
Figura 58. Menú para la selección de procedimiento	75

Figura 59. Menú para la selección del número de repetición en el procedimiento de control de calidad.....	75
Figura 60. Menú de elección de frecuencias	76
Figura 61. Menú selección de gravedades para cada frecuencia	77
Figura 62. Identificación del modelo dinámico de la planta	78
Figura 63. Ajuste del modelo identificado con los datos adquiridos de la planta	78
Figura 64. Finalización del procedimiento de calibración.....	79
Figura 65. Resumen del ensayo de calibración para la evaluación del laboratorio.....	80

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de los equipos para la generación de vibraciones.....	12
Tabla 2. Especificaciones de los Instrumentos de medición de voltaje	12
Tabla 3. Relación puntos para los ensayos de identificación de la planta.....	29
Tabla 4. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 10Hz	30
Tabla 5. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 100Hz	31
Tabla 6. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 1000 Hz	32
Tabla 7. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 100Hz	40
Tabla 8. Resumen de los parámetros de los diferentes modelos identificados para el <i>Shaker</i> a 100 Hz y 1 V de amplitud.	45
Tabla 9. Parámetros del controlador rápido.....	69
Tabla 10. Parámetros del controlador lento.....	69

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Implementación de un control adaptativo con modelo de referencia off-line para la calibración de sensores de vibración basado en la norma iso16063-21

AUTOR(ES): Camilo Andrés Moncayo Uribe

FACULTAD: Maestría en Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Omar Pinzón Ardila

RESUMEN

La calibración de sensores de vibración se realiza con base en la comparación de la dinámica de un sensor patrón y la del sensor que se desea calibrar. Para una correcta calibración se debe evaluar la respuesta de los sensores ante un movimiento oscilatorio sinusoidal para diferentes amplitudes y frecuencias, requiriendo de un hardware especializado. Con el objetivo de hacer un sistema de calibración eficiente se ha diseñado, implementado y validado un control adaptativo con modelo de referencia que modifica los parámetros del controlador, permitiendo autoajustarse ante los cambios que cada sensor bajo calibración imprime sobre la dinámica de la planta.

PALABRAS CLAVES:

Identificación, vibraciones, calibración, control robusto y control adaptativo.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Implementation of an offline model reference adaptive Control for calibrating vibration sensors based on standard iso16063-21

AUTHOR(S): Camilo Andrés Moncayo Uribe

FACULTY: Maestría en Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Omar Pinzón Ardila

ABSTRACT

The project begins with the need of the Vibration laboratory from Pontificia Bolivariana University from Bucaramanga to control the vibration sensor calibration process. The laboratory has specialized equipment and the objective is to achieve an integration through an application in LabView. The goal of a calibration process is to compare the voltage value from two vibration sensors: one sensor who will be calibrated and the second that works as a pattern. One of the biggest difficulties in the calibration of vibration sensors, is the dynamic variation from the system, each sensor implies a change in the plant due its differents weights. Therefore it was implemented a robust control, capable to control the system despite the dynamic variations from the plant. Initially different dynamic models were identified for the plant, the most critical uncertainties were discussed and finally a robust control was designed in Matlab and implemented and tuned in LabView for the desired results.

KEYWORDS:

Calibration, robust control, identification, vibration sensor, adaptive control.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. Introducción

Esta tesis presenta la implementación de un control adaptativo con modelo de referencia (MRAC), para la calibración de sensores de vibración basado en la norma ISO 16063-21. El proceso de calibración consiste en la comparación de las señales de dos sensores, el sensor patrón, el cual se considera como el valor verdadero en una medición y el sensor a calibrar, el cual forma parte de un equipo o de un sistema de trabajo y que requiere la verificación de su funcionalidad. Los resultados de una calibración son: la sensibilidad, el error y la incertidumbre de la medición del sensor calibrado.

Debido a que un laboratorio de vibraciones (para la calibración de sensores) se compone de diferentes equipos, su gestión e integración debe realizarse a través de un Software especializado. Una de las dificultades presentes en la calibración de sensores de vibración se encuentra en que la dinámica del Shaker varía con cada sensor que se desea calibrar. Para este propósito se plantea un controlador adaptativo que permite ajustar automáticamente los parámetros del controlador con cada calibración, procurando una mayor efectividad en el proceso y siguiendo los estándares demarcados por la norma ISO-16063-21.

Es así como nace la necesidad de asegurar el proceso de verificación metrológico de sensores de vibración del Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, con el apoyo financiero proporcionado por la Convocatoria de Colciencias número 508-2010, para conformar el banco de proyectos de estandarización y acreditación de laboratorios dentro del Programa Nacional de Desarrollo tecnológico Industrial y Calidad.

La tesis aborda inicialmente la identificación paramétrica de los diferentes modelos de la planta y la simulación de la respuesta dinámica del sistema frente a diferentes controladores, iniciando con los controladores PI, seguidamente con los

controladores PI Robustos, controlador *Gain Scheduling* con PI Robusto y finalmente un control adaptativo con modelo de referencia.

La identificación de los modelos se realiza utilizando el software de LabView, la simulación y sintonización de los controladores PI, PI robusto y *Gain Scheduling* se realiza con el software Matlab y la implementación final del controlador adaptativo con modelo de referencia se realiza con el software LabView.

El documento se ha organizado en los siguientes capítulos: en el capítulo 1 y 2 se realiza la introducción y justificación respectivamente, en el capítulo 3 se estudia y analiza el estado del arte de la tesis, en el capítulo 4 se analiza el proceso de identificación del sistema de vibración Shaker, en el capítulo 5 se diseñan, simulan y comparan los diferentes controladores para el sistema, en el capítulo 6 y 7 se muestra el diseño, implementación y validación del software desarrollado y finalmente en el capítulo 8 se muestran las conclusiones.

2. Justificación:

La calibración de sensores de vibración se realiza principalmente para el cumplimiento de las regulaciones legales y técnicas en la implementación de sistemas de gestión de riesgo como los descritos por la norma ISO 31000, que requieren de los resultados del proceso de calibración, donde se evalúan cuantitativamente los índices que especifican el nivel integrado de seguridad (SIL) de un Sistema Integrado de Seguridad (SIS) [1].

Los SIS hacen referencia a los dispositivos usados para implementar una o más funciones instrumentadas de seguridad (SIF) y se compone de una o más combinaciones de sensores, lógica de programación y elementos finales.

La medición de vibraciones puede ser aún más crítico que la medición de cualquier otra variable (presión, temperatura, etc.) porque a diferencia de estas, los rangos, precisión e incertidumbre de la medida son considerablemente inferiores en magnitud, y es por esto que los instrumentos de medición de vibraciones deben estar en la capacidad de detectar irregularidades difícilmente perceptibles por otros instrumentos [2], [3] y [4].

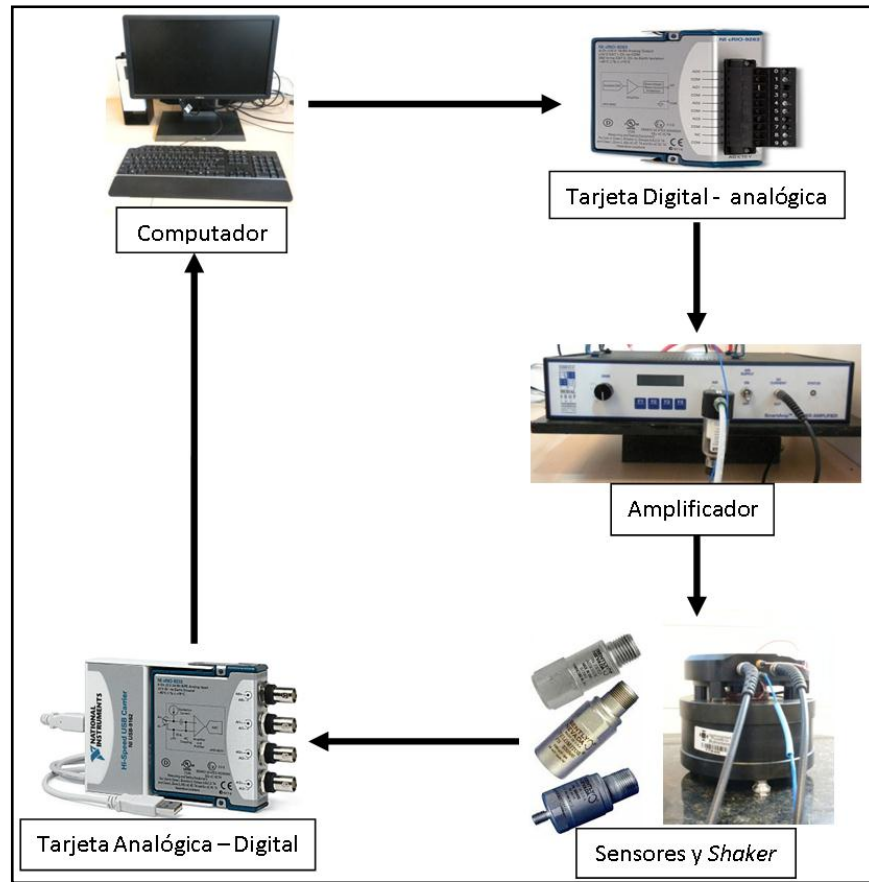
Lo anterior hace evidente la necesidad de un procedimiento de calibración, para ello la Organización Internacional para la Estandarización (de sus siglas en ingles ISO) ha desarrollado un conjunto de normas para la calibración de sensores de vibración y de choque enmarcados dentro de las recomendaciones de la norma ISO 16063-21[5].

Estas normas o estándares cubren varios aspectos tales como la calibración primaria o secundaria de transductores de vibración o de choque, donde se definen métodos de calibración, referencias de medidas de aceleraciones y frecuencias para los procedimientos de prueba, cálculo de la incertidumbre, requerimientos de aparatos, condiciones ambientales, al igual que informa sobre la

implementación y aplicación de estas normas en un laboratorio acreditado como el que se describe en la norma ISO 17025 [6].

Es así como se hace necesaria la implementación de un software que garantice la medición precisa, repetible y confiable del procedimiento de calibración de sensores de vibración. En la Figura 1 se muestran los equipos que integran el laboratorio: un computador, una tarjeta de conversión digital-analógica, un amplificador, un dispositivo para generar vibraciones (*Shaker*) y una tarjeta de conversión analógica-digital. El funcionamiento consiste en generar una señal sinusoidal con una amplitud y una frecuencia establecida por la norma ISO-16063-21, esta señal se genera a través de una tarjeta de conversión digital-analógica, la cual se envía a un amplificador que acondiciona la señal que alimenta al *Shaker*. El movimiento del *Shaker* se transfiere por contacto, tanto al sensor patrón como al sensor que se desea calibrar (ubicado exactamente en la parte superior del sensor patrón), el objetivo del software consiste fundamentalmente en registrar la medición de tensión generada por el sensor patrón y por el sensor a calibrar, en un mismo instante de tiempo.

Figura 1. Diagrama de los componentes de un laboratorio para la calibración de sensores de vibración.



Fuente: Autor e imágenes en «<http://colombia.ni.com/>» consultado en junio de 2013

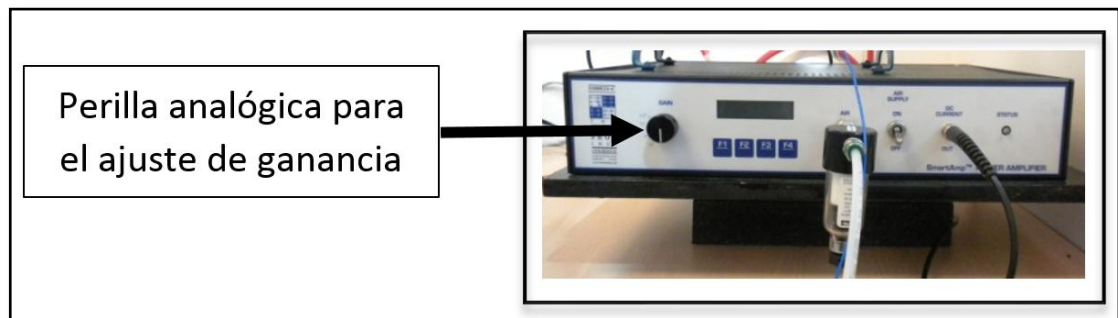
2.1. Planteamiento del problema:

La iniciativa para el desarrollo de un laboratorio de vibraciones en Colombia es nueva y debido a que este servicio es lucrativo para muchas entidades, un software de estas características es muy especializado y no se encuentra un consenso de cómo desarrollarse o se encuentran las características para su implementación, de hecho, tan sólo se conoce el resultado de los ensayos de la calibración.

La repetibilidad en el proceso de calibración es crucial y dado a que no se puede asegurar de manera manual o mecánica, requiere de un sistema de control para

asegurar, principalmente, el control en las variaciones en la dinámica del *Shaker*. Además el amplificador del sistema, ajusta la ganancia de la señal con una perilla analógica, como se puede observar en la Figura 2, lo cual no garantiza la repetitividad en cada ensayo de calibración. Nótese que estos elementos exigidos por la Norma ISO-16063-21 son de altas prestaciones.

Figura 2. Amplificador, perilla analoga.



Fuente: Autor

También es importante resaltar que el *Shaker* se compone de un vástago de desplazamiento, el cual proporciona un movimiento de vibración a los sensores y que no cuenta con finales de carrera o sensores de posición, creando la posibilidad de colisiones entre el vástago y los soportes del *Shaker*, lo que puede ocasionar un desgaste o un daño del mismo, si no se cuenta con un control adecuado.

En resumen, en esta tesis se plantea la problemática de controlar un sistema que varía su dinámica debido a la ubicación de una perilla analógica, debido al peso de los sensores que se desean calibrar y debido al rango de frecuencias y amplitudes a los cuales se solicita realizar el ensayo. Es por esto que se propone como solución implementar un control adaptativo para optimizar los tiempos de medición y asegurar unos resultados precisos.

3. Estado del arte

3.1. Antecedentes

En la literatura y en el mercado industrial se encuentran aplicaciones para la medición y la calibración de sensores de vibración, en el marco de cumplimiento de los estándares y regulaciones legales e incluso técnicas en áreas de trabajo específicas. A continuación se presentan diferentes trabajos de investigación y sistemas automatizados de calibración de sensores de vibración ofertados en el mercado.

3.1.1. Estación de trabajo para la calibración de sensores de vibración [7]

La empresa PCB-Piezotronics es el líder mundial de acelerómetros piezoeléctricos de tipo MEMS (micro electro-mechanical systems). Cuenta con usuarios alrededor del mundo como compañías aeroespaciales y fabricantes de automóviles quienes los implementan en laboratorios de investigación y diferentes proyectos para los consumidores. La empresa TMS (Temperature Measurement & Calibration) ofrece también el servicio de calibración de acelerómetro de forma automática, precisa y eficiente, proporcionando un control de metrología.

La estación de calibración de sensores de vibración modelo 9155 (Accelerometer Calibration Workstation) ofrece precisión en la calibraciones de sensores ICP® (IEPE) en configuración back to back (sensor a calibrar sobrepuesto linealmente al sensor patron) y el modo de carga de los acelerómetros piezoeléctricos de acuerdo con la norma ISO 16063-21. El sistema 9155 también calibra sensores piezorresistivos (MEMS), capacitivos y sensores de velocidad a través de las opciones disponibles. Los beneficios del modelo 9155 se ven en dos áreas: la conformidad con las normas y automatización existentes de la tarea de calibración.

Las ventajas de este equipo se describen a continuación:

- Probado: Reconocimiento mundial como líder en el mercado.
- Preciso: Asegura calibraciones trazables a NIST y PTB.
- Simple: Sistema de llave en mano incluye todos los componentes necesarios.
- Rápido: Calibración realiza típicamente en menos de un minuto por cada eje.
- Familiar: Windows PC proporciona la interfaz de usuario intuitiva.
- Versátil: Definir múltiples pasadas, criterios de falla para cada prueba y recuperación automática de la base de datos interna.
- Personalizado: Impresiones personalizables de certificados que cumplen con la norma ISO 17025 .
- Automáticas: pruebas de fácil configuración, adquisición de datos, guardar resultados e imprimir informes con facilidad, precisión y automatización.

3.1.2. Diseño e implementación de guías para el análisis de vibraciones en un sistema rotor KIT [8]

En esta tesis se presenta el desarrollo de las guías para el laboratorio de análisis de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, fundamentadas en el comportamiento dinámico de un *Rotor Kit* bajo falta de equilibrio y de alineación e inestabilidad mecánica. Con este propósito se estudiaron las fallas que pueden generarse en operación normal, a partir de tres técnicas de diagnóstico como lo son: el análisis de forma de onda, el análisis de espectros y el análisis de orbita (representan el movimiento físico del eje respecto al apoyo).

Las guías se basan en el estudio de análisis de vibraciones del *Rotor Kit*, con el propósito de identificar las posibles fallas e igualmente las posibles correcciones con las diferentes técnicas de diagnóstico.

3.1.3. Base de datos de vibraciones para análisis de fallas en rodamientos de bolas [9]

El propósito de esta tesis se centra en la medición, análisis y monitoreo de las vibraciones en tres máquinas de servicio y una de laboratorio, con el objetivo de implementar dos técnicas de detección temprana de fallas en rodamientos de bolas. Para el cumplimiento de los objetivos se llevan a cabo mediciones periódicas de vibraciones en las bases de datos.

Los resultados muestran que aun cuando se utilicen *Wavelets* es posible identificar fallas en rodamientos más tempranamente con la ayuda de la técnica *Enveloping* y se presentan dificultades relacionadas con el procesamiento de la señal para un eventual uso masivo de *Wavelets*.

3.2. Norma ISO 16063-21 para la calibración de sensores de vibración [5]

La serie de las normas ISO 16063-21 desarrolla los métodos para la calibración de sensores de vibración y de choque, tanto en condiciones de laboratorio como el campo.

Como tal, el grupo de usuarios de la norma ISO 16063 es amplio, van desde metrologos en vibración mecánica hasta técnicos que evalúan las características de vibración de una máquina o estructura, o la exposición humana a la vibración. La clave para la aplicación de esta parte de la norma es una especificación detallada y la evaluación de la incertidumbre de medición, es decir, el error y el cálculo, asociada con la medición de la vibración.

La norma ISO 16063-21 está destinada sobre todo para los que participan en las mediciones de vibración que requieren trazabilidad a patrones principales

nacionales o internacionales a través de una referencia secundaria, de trabajo o del *Check* estándar (calibrador portátil para uso de campo), tal y como se define en el Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM). Las especificaciones para la instrumentación y los procedimientos establecidos se utilizan para la calibración de sensores de vibración rectilíneos (con o sin acondicionamiento de señal), obteniendo la magnitud y (opcionalmente) el desplazamiento de la fase del complejo de la sensibilidad a frecuencias en el rango de 0,4 Hz a 10 kHz.

La norma ISO 16063-21 está conformada por los capítulos como se muestra a continuación:

- I. Alcance
- II. Referencias normativas
- III. Incertidumbre de la medida
- IV. Requisitos de los dispositivos y condiciones ambientales
 - a. Generalidades
 - b. Condiciones ambientales
 - c. Transductor de referencia
 - d. Equipo de generación de vibraciones
 - e. Instrumentación de medida de tensión
 - f. Distorsión de la instrumentación para la medición
 - g. Osciloscopio
 - h. Instrumentación para la medición de cambio de fase

V. Calibración

- a. Amplitudes y frecuencias preferidas
- b. Requisitos de medición
- c. Procedimiento de calibración

VI. Expresión de los resultados

VII. Presentación de informes de los resultados de la calibración

A continuación se realizara una explicación de los capítulos concernientes al proceso de calibración y que afectan directamente el desarrollo de esta tesis.

3.2.1. Requisitos de los dispositivos y condiciones ambientales

Los equipos que conforman el sistema para la calibración de sensores de vibración deben contener como mínimo, las características que se muestran en la Tabla 1. El ejemplo 1 hace referencia a los parámetros de los equipos si el sensor de referencia está calibrado con un patrón primario y el ejemplo 2 hace referencia a los parámetros de los equipos si el sensor de referencia no está calibrado con un patrón primario.

Tabla 1. Características de los equipos para la generación de vibraciones

Parámetro	Unidades	Ejemplo 1	Ejemplo 2
Frecuencia de incertidumbre	%	≤ 0,1	≤ 0,2
Frecuencia de estabilidad	% de lectura durante el periodo de la medición	0.1	0.2
Aceleración de estabilidad	% de lectura durante el periodo de la medición	0.1	0.3
Distorsión armónica total a frecuencias > 20 Hz	%	≤ 5	≤ 10
Distorsión armónica total durante todo el rango de frecuencia	%	≤ 10	≤ 20
Aceleración transversal, de flexión y de balanceo	%	≤ 10 Hz f ≤ 10 KHz ≤ 30 Hz f ≤ 1 KHz	
Zumbido y ruido (f ≥ 10 Hz)	dB por debajo de la salida total	≥ 50	≥ 40
Zumbido y ruido (f < 10 Hz)	dB por debajo de la salida total	≥ 20	≥ 10

Fuente: Norma ISO16063-21

Los dispositivos para la medición de tensión tendrán las características especificadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de los Instrumentos de medición de voltaje

Parámetro	Unidades	Ejemplo 1	Ejemplo 2
Rango de Frecuencia	Hz	1 a 10.000	1 a 10.000
Incertidumbre Máxima	%	0,2	0,5

Fuente: Norma ISO16063-21

3.2.2. Calibración

El proceso de calibración se lleva a cabo a partir de la comparación de dos señales. Una señal proveniente del sensor patrón y la otra del sensor que se desea calibrar. La comparación de estas señales proporciona la incertidumbre que puede tener el sensor que se desea calibrar respecto al sensor patrón comparado. Debido a que las señales que se pueden implementar tienen una gran variación

tanto en amplitud como en frecuencia, se debe seguir la norma para cumplir con el proceso de la forma adecuada.

3.2.2.1. Amplitudes y frecuencias

Se eligen seis frecuencias de evaluación, cada una con una aceleración asociada (amplitud o valor eficaz) que cubran el rango del sensor, los valores de frecuencia y aceleración se deben elegir de la siguiente manera:

a) *La aceleración (m/s^2):* se debe seleccionar de 1, 2, 5, 10 o múltiplos de diez. Si se utilizan señales de banda ancha, estos valores son en valor eficaz.

b) *Frecuencia:* se debe seleccionar la serie de frecuencias normalizada de un tercio de octava de ancho de banda (especificado en la norma ISO 266). Si se utilizan señales de banda ancha, el rango debe ser cubierto en uno o más ensayos.

Los valores elegidos de frecuencia y de aceleración deben ser preferiblemente los mismos que los utilizados en la calibración del sensor patrón. Si el sensor se va a calibrar a frecuencias y aceleraciones que no sean aquellas en las que la referencia ha sido calibrada, las características del sensor de referencia deben ser evaluadas en esas frecuencias y aceleraciones. El componente de incertidumbre resultante se tiene en cuenta en el error de la medición.

3.2.2.2. Requisitos de medición

En la calibración de un transductor es imperativo garantizar la repetibilidad de las mediciones, una buena práctica consiste en calibrar más de una vez el sensor deseado. Es importante asegurarse que el movimiento del cable y la tensión de la base no afecten apreciablemente los resultados de la medición, en particular en las frecuencias bajas. La alteración de la unión del cable y/o del montaje del sensor, y tomando nota de los cambios en los resultados de la medición o la distorsión armónica, puede usarse para evaluar los efectos producido por estas

causas. Si la sensibilidad o la distorsión medida no cambian de manera significativa en comparación con la incertidumbre en la calibración, entonces estas influencias pueden ser omitidas. Las condiciones de montaje del sensor también deben ser repetible. Esto se puede verificar montando varias veces el sensor y realizando la medición de la sensibilidad después de cada ensayo.

Si se encuentra cualquier variación significativa en los ensayos, respecto a la incertidumbre deseada, estos deben ser cuantificados haciendo un número suficientemente grande de mediciones repetidas para obtener una buena estimación de la varianza. Esto se incluirá entonces en el cálculo de la incertidumbre final. Esto es importante si la medición no se realiza en las frecuencias y amplitudes en que se calibró el transductor de referencia.

3.2.3. Procedimiento de calibración

Las superficies del transductor de referencia y el transductor a calibrar serán examinadas para comprobar que están libres de rebabas y que cumplan con las especificaciones del fabricante.

Se debe montar el transductor de referencia y el sensor a calibrar sobrepuestos linealmente en el *Shaker* o sobre el sensor de referencia de trabajo integral (indica que el *Shaker* cuenta con un sensor de referencia acoplado). Inferior a 5 KHz se pueden utilizar con las diferentes configuraciones conocidas para la instalación entre los sensores. A frecuencias más altas, se debe implementar la configuración *back to back* o sobre el *Shaker* con un sensor de referencia de trabajo integral.

Es necesaria una medición de la relación de las dos salidas y el cambio de fase relativo. La sensibilidad para los sensores de vibración se determina preferiblemente a una frecuencia de referencia de 160 Hz y una aceleración de referencia de 100 m/s^2 (otras opciones: 10 m/s^2 , 20 m/s^2 o 50 m/s^2), luego se puede determinar la sensibilidad a otras frecuencias y aceleraciones de calibración. Los resultados se dan en términos absolutos y/o como una desviación

relativa (porcentaje o decibelios) junto con los grados de desviación de la sensibilidad en el punto de referencia. En el caso de los sensores montados en el espárrago, una película delgada de aceite ligero, cera o grasa se utiliza entre las superficies de montaje del sensor y el *Shaker*, en particular en el caso de las calibraciones realizadas a altas frecuencias.

3.2.4. Expresión de los resultados

Si el transductor de referencia y el transductor bajo prueba responden a la misma vibración se calcula la magnitud S_2 y el desplazamiento de fase φ_2 de la sensibilidad del transductor a calibrar utilizando las expresiones de magnitud (1) y de fase (2).

$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} S_1 \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{2,1} + \varphi_1 \quad (2)$$

Donde:

S_2 y φ_2 corresponden a la sensibilidad y la fase del sensor a calibrar respectivamente.

X_2 corresponde a la medición del sensor a calibrar

X_1 corresponde a la medición del sensor patrón

S_1 y φ_1 corresponde a la sensibilidad y la fase del sensor a calibrar respectivamente

$\varphi_{2,1}$ es la diferencia de fase entre el sensor a calibrar y el sensor patrón

3.3. Métodos de identificación de modelos dinámicos de sistemas

3.3.1. Teoría para la identificación de Modelos Black-Box

Se considera un sistema No lineal cuando el sistemas no cumplen con las propiedades de homogeneidad (cambios proporcionales entrada y salida) y superposición (permite separar las entradas y las salidas en componentes). Entre las no linealidades se encuentran:

- Saturación: para pequeños cambios a la entrada la salida responde de manera lineal, pero a cambios muy grandes el cambio en la salida es muy pequeño o nulo.
- Zona muerta: no existe una salida (salida igual a cero) para las entradas dentro de la amplitud de la zona muerta
- Conexión/desconexión (on/off): la salida solamente presenta dos estados.
- Histéresis: Elemento on/off con banda de histéresis o que conserva la tendencia del estado en la que permanece.
- Backlash: conocida como holgura, donde los cambios de dirección de la entrada, en su inicio no repercuten a la salida. (ejemplo engranajes desgastados).

El estudio y entendimiento de modelos no lineales es muy importante debido a que el mundo es inherentemente no lineal y a que estos modelos son válidos para todo rango de variaciones, permitiendo una mayor flexibilidad en la resolución de problemas y tienen desempeños más óptimos.

3.3.2. Modelos no lineales ARX

Los modelos no lineales auto-regresivos con entradas exógenas (ARX), corresponde a la misma estructura ARX lineal, pero en modo extendido.

Un modelo general ARX con una entrada y una salida que se describe mediante la ecuación en diferencias lineales.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb-1) + e(t) \quad (3)$$

Donde, $y(t)$ es la salida del modelo ARX para $t=t, t-1, \dots, t-na$; $u(t)$: es la entrada del modelo ARX para $t=t-nk, t-nk-1, \dots, t-nk-nb+1$; na es el número de pasos de tiempo de la salida en el pasado; nb es el número de pasos de tiempo de la entrada en el pasado; nk es el retardo de la entrada $u(t)$ con respecto a la salida $y(t)$; $e(t)$ es ruido blanco asociado con la variable de salida.

Un modelo ARX MIMO, con entradas y salidas se define por la ecuación.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (4)$$

Donde $A(q)$ es una matriz de dimensiones ny^*ny ; sus elementos son polinomios en el operador de retardo $q^{-1}y(t) = y(t-1)$.

Este tipo de estructura para los modelos ARX implica que la salida actual $y(t)$ se estima como una ponderación de sumas de los valores de salida pasados y de los valores de entradas actuales. Se puede reescribir la ecuación del modelo lineal ARX como:

$$y_p(t) = [-a_1, -a_2, \dots, -a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] * [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t-nk), u(t-nk-1), \dots, u(t-nk-nb-1)]^T \quad (5)$$

Donde $y(t-1)$, $y(t-2)$, ..., $y(t-na)$, $u(t-nk)$, $u(t-nk-1)$, ..., $u(t-nk-nb-1)$ son los retardos de las salidas y de las entradas llamados regresores. Un modelo lineal ARX calcula la salida actual a partir de la suma ponderada de los regresores.

A partir de la suma ponderada del modelo ARX lineal se puede representar un modelo ARX no lineal se puede representar como:

$$y_p(t) = f(y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t-nk), u(t-nk-1), u(t-nk-2), \dots) \quad (6)$$

Donde f es una función no lineal. Las entradas de f son modelos regresivos. Donde se debe especificar la estructura ARX del modelo. Se pueden escoger muchas estructuras para hacer la estimación de modelos ARX no lineales.

Los regresores de los modelos ARX no lineales pueden ser retardos en las variables de entradas o de salida o expresiones de retardo no lineales en las variables de entrada y de salida. Ejemplos de este tipo de regresores no lineales se pueden evidenciar en (7), (8), (9) y (10).

$$y(t-1)^2 \quad (7)$$

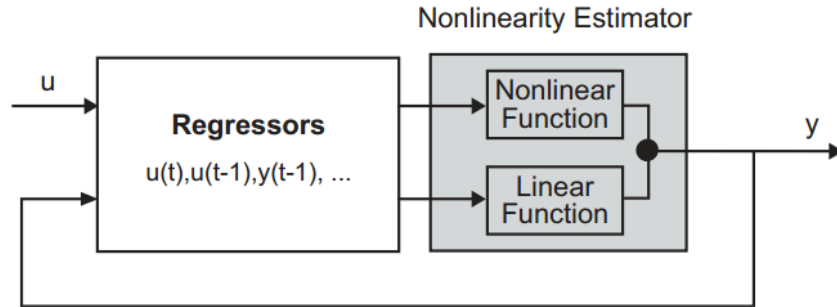
$$u(t-1) * y(t-2) \quad (8)$$

$$\tan(u(t-1)) \quad (9)$$

$$(u(t-1) * y(t-3)) \quad (10)$$

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de un modelo no lineal.

Figura 3. Estructura general de modelos no lineales



Fuente: System Identification Toolbox™ User's Guide Lennart Ljung, Matlab

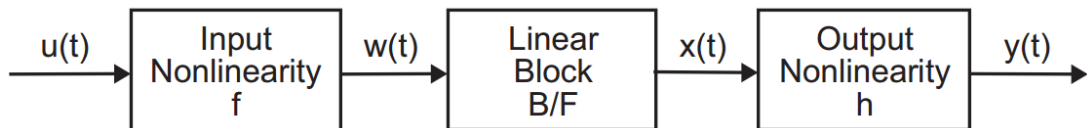
3.3.3. Modelo Hammerstein-Wiener

El modelo Hammerstein-Weiner Permite evaluar modelos donde su relacion de entrada-salida se puede descomponer en dos o mas elementos interconectados en serie.

Recomendable para la identificación de modelos electro-mecánicos, componentes de radio frecuencia, control predictivo, procesos químicos, entre otros.

La identificación del modelo se puede abordar identificando un modelo lineal preliminar que facilite el entendimiento del modelo y seguidamente puede complementar con bloques de funciones no lineales de entrada y/o salida. Es un sistema implementado para la identificación de modelos tipo caja gris. La estructura del modelo se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Estructura del modelo Hammerstein-Weiner



Fuente: System Identification Toolbox™ User's Guide Lennart Ljung, Matlab

3.4. Control adaptativo

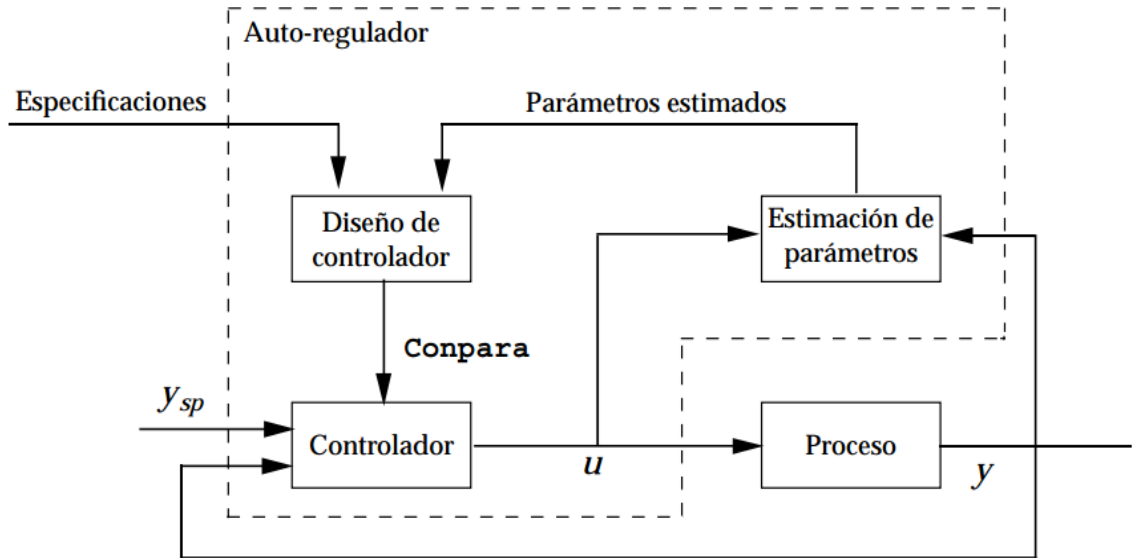
Un controlador adaptativo ajusta los parámetros del controlador continuamente para ajustarse a los cambios en la dinámica del proceso y las perturbaciones. La adaptación se puede aplicar a los parámetros de control realimentado y prealimentado.

Existen dos tipos de controladores adaptativos que se fundamentan en métodos directos e indirectos. En el método directo los parámetros del controlador se ajustan directamente a partir de los datos de operación en lazo cerrado. En los métodos indirectos, los parámetros de controlador se obtienen indirectamente, primero mediante la actualización en línea del modelo del proceso y después calculando los parámetros del controlador mediante algún método de sintonía del control. Un ejemplo del método indirecto se podría considerar el control de un sistema de interfaz háptica, en que se hace una previa identificación del modelo de la planta a controlar (depende de quién manipula la interfaz) este modelo se compara con un modelo nominal y de este modo se sintoniza el controlador más adecuado [10]. El regulador auto sintonizado se puede implementar de ambas maneras, con un control directo e indirecto. Existe un gran número de métodos disponibles para ambas formas directa e indirecta. Tales métodos se pueden describir en términos de los métodos utilizados para modelado y diseño del sistema de control.

En la Figura 5 se muestra un diagrama de bloques de un controlador adaptativo indirecto y un estimador de parámetros que determina los parámetros del modelo basándose en las observaciones de las entradas y salidas del proceso. También existe un bloque de diseño que calcula los parámetros del controlador a partir de los parámetros del modelo. Si el sistema se opera como un sintonizador, el proceso se excita mediante una señal de entrada. Los parámetros se pueden estimar recursivamente o en una modalidad por lotes. Donde, se calculan los parámetros del controlador y luego se pone en marcha. Si el sistema se opera

como un controlador adaptativo que calcula los parámetros recursivamente y los parámetros del controlador se actualizan cuando se obtienen los nuevos valores.

Figura 5. Diagrama de bloques de un control adaptativo



Fuente: Astrom Karl, Hagglund Tore, Control PID Avanzado, Pearson Prentice Hall, Espana 2009

Por sintonía automática (o auto sintonía) se entiende un método donde un controlador se sintoniza automáticamente o bajo demanda por el usuario. Típicamente, el usuario pulsará un botón o enviará un comando al controlador. La experiencia industrial ha mostrado claramente que ésta es una característica altamente útil y deseable. La sintonía automática es algunas veces denominada sintonía bajo demanda o sintonía de una vez. La capacidad de auto-sintonía se puede incorporar en los controladores. Prácticamente, todos los controladores se pueden beneficiar de herramientas para sintonía automática, lo que simplificaría drásticamente su uso. Los controladores de lazo único y los sistemas distribuidos para el control de procesos son importantes áreas de aplicación. La mayoría de estos controladores son del tipo PID. Actualmente, la sintonía automática se utiliza en los controladores PID. La auto-sintonía se puede llevar a cabo con dispositivos externos que se conectan a un proceso. Como estos sistemas tienen que trabajar con controladores de diferentes fabricantes, se les deben proporcionar con

información sobre la estructura del controlador para dar una sugerencia apropiada sobre cada parámetro. Tal información incluye la estructura del controlador (estándar, en serie, o en paralelo), período de muestreo, constantes de tiempo del filtro, y unidades de los distintos parámetros del controlador (ganancia o banda proporcional, minutos o segundos, tiempo o repetición/tiempo) [11].

3.4.1. Control adaptativo con modelo de referencia

El Control Adaptativo con Modelo de Referencia, por sus siglas en inglés *Model Reference Adaptive Control* (MRAC), se implementa para resolver problemas donde las especificaciones se establecen en términos de un modelo de referencia. El modelo de referencia describe la forma cómo la salida del proceso idealmente debería responder ante la señal de entrada [12] y [13]. El algoritmo de adaptación intenta ajustar los parámetros de tal manera que el sistema se ajustable y se correlacione con el modelo de referencia.

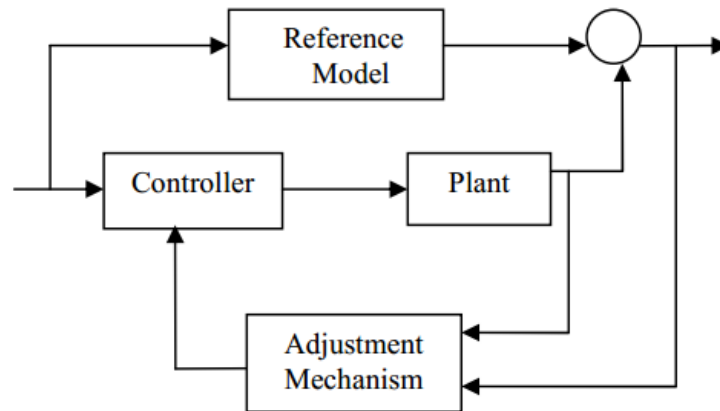
Los sistemas MRAC consisten en un proceso de adaptación donde se ajustan los parámetros del sistema de tal manera que la dirección del error entre la salida del proceso y la salida de la referencia se minimiza. El problema clave es determinar el algoritmo de adaptación para hacer al sistema estable. Esto se consigue gracias a que la tasa de cambio de los parámetros del sistema es proporcional al producto del error y la salida del modelo [14].

Esta técnica de control adaptativo entra en la categoría no-dual del control adaptativo. Un modelo de referencia describe el rendimiento del sistema. El controlador adaptativo se diseña para forzar el sistema a que se comporte como el modelo de referencia. La salida del modelo se compara con la salida real y la diferencia se utiliza para ajustar los parámetros del controlador de realimentación [15].

En la Figura 6 se muestra un sistema MRAS conformado por un lazo interno (o lazo regulador) que es un lazo de control de corriente que consta de la planta y el

regulador, y un lazo exterior (o adaptación) que ajusta los parámetros del regulador de tal manera que el error sea cero entre la salida del modelo y la producción de la planta.

Figura 6 Diagrama de bloques de un sistema MRAC



Fuente: P. Swarnkar, S. Jain, and R. Nema, "Effect of adaptation gain on system performance for model reference adaptive control scheme using MIT rule," World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 70, pp. 621–626, Oct. 2010.

3.4.2. Control adaptativo *off-line*

El control *off-line* se implementa cuando se rompe la rutina de medición o de dosificación regular de un sistema por cambios o variaciones en la planta.

Como un ejemplo del método de control *off-line*, Bouras [16] patentó una técnica, denominada calibración de flujo de masa. La idea subyacente de la técnica es que la velocidad de flujo del fluido dispensado se mide periódicamente en el peso del fluido dispensado durante un cierto intervalo de tiempo para identificar el cambio en la viscosidad del fluido (es decir, la relación entre la tensión y la velocidad de cizallamiento) con el tiempo. La presión de aire se ajusta entonces sobre la base de la tabla de corrección tal como se obtiene experimentalmente, de tal manera que la influencia del cambio en la viscosidad se compensa con la velocidad de flujo.

4. Identificación del sistema de vibración *Shaker*

Para el desarrollo del control de una planta es necesario conocer su comportamiento dinámico. Si el sistema lo permite, el proceso más óptimo para lograr tal conocimiento de la planta es realizando un proceso de identificación. En este caso en particular se cuenta con una señal de entrada (voltaje que se envía desde el computador), y una señal de salida (la señal adquirida por el computador del sensor patrón), que permitirían la identificación del sistema como caja negra.

Dentro del proceso de identificación es importante definir los parámetros que definen la variación en la dinámica de sistema, en este caso se tienen principalmente dos factores: el primero, es la perilla analógica del amplificador, que a pesar de que su variación entre ensayo y ensayo pueda ser pequeña, modifica la dinámica del sistema, y la segunda, es el peso del sensor que se desea calibrar, el cual debe ser entre 0 g y 500 g por especificaciones del *Shaker*.

4.1. Identificación utilizando el software LabView

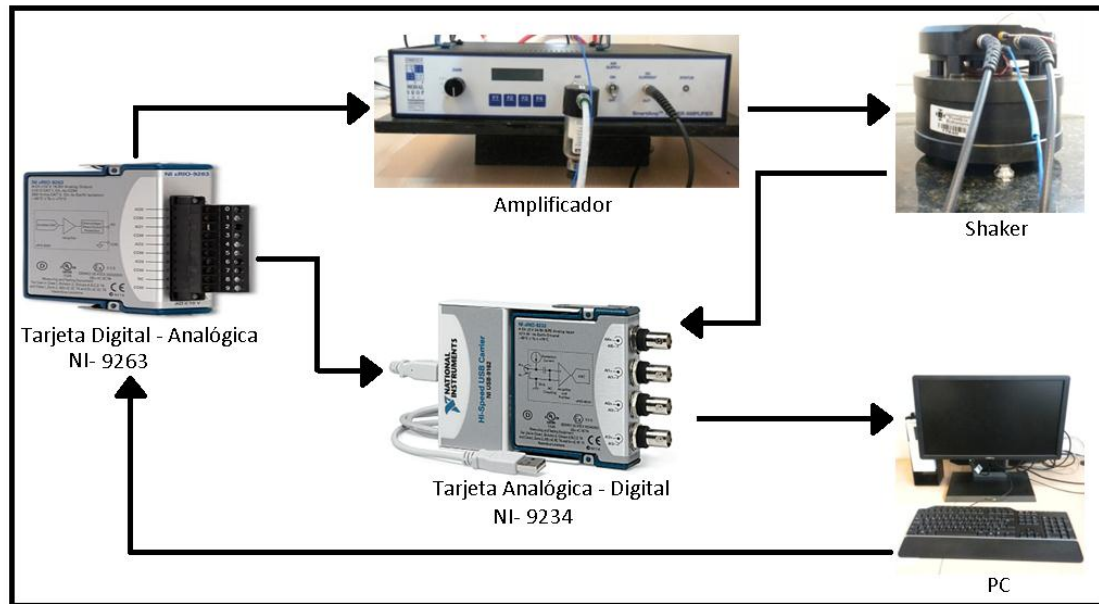
Para la identificación utilizando el software LabView se requiere de un sistema de adquisición como el que se muestra en la Figura 7.

El sistema que se desea identificar, se describe como una caja negra, compuesta por la tarjeta de salida digital-analógica NI-9263, el amplificador, el *Shaker*, el sensor patrón y la tarjeta de adquisición analógica-digital NI-9234. La señal de entrada y de salida de la planta es la que se genera y adquiere respectivamente en el software de LabView.

El primer factor de variación definido anteriormente, fue la perilla analógica del amplificador, en la Figura 8 se muestra el recorrido de la perilla en grados. Se evalúa el comportamiento del *Shaker* para una posición de la perilla del amplificador a 90°, 180° y 270° y se determina que la posición más adecuada para la calibración es con la perilla a 180°, debido a que a una menor ganancia la

tarjeta de salida debe superar los 5 V y a una mayor ganancia la tarjeta de salida trabaja con valores inferiores a los 2 V perdiendo resolución.

Figura 7. Conexiones para la identificación del sistema



Fuente: Autor y figuras en «<http://colombia.ni.com/>» consultado en junio de 2013

Figura 8. Posiciones perilla de ganancia del amplificador



Fuente: Autor

Otro factor importante para realizar la identificación de la planta es la variación de la amplitud o voltaje de la señal de entrada del sistema, que puede variar entre los 10 mV (aproximadamente igual a 1 gravedad para sensores con una sensibilidad de 10 mV/g), hasta los 2.5 V (que al igual al sensor patrón, equivale a las 250

gravidades). De igual forma es importante fijar los valores máximos de voltaje que pueden ser aplicados al *Shaker* sin que el vástago choque y comprometa el dispositivo.

De esta forma se realizan variaciones progresivas en el valor de voltaje de salida hasta un desplazamiento del vástago del 80%, con lo cual se puede definir un voltaje máximo de trabajo de 0.25 V para frecuencias inferiores a los 100 Hz y de 5 V para frecuencias entre 100 Hz y 10000 Hz, que para el sensor patrón corresponde de 1 gravedades hasta 100 gravedades, cubriendo el rango solicitado por la norma.

Definidos los rangos de voltaje se procede a definir los rangos de frecuencia. El sistema realiza la calibración de sensores en un rango que va desde 10 Hz hasta los 10.000 Hz. Debido a que no se cuentan con trabajos previos de identificación de sistemas de vibración, se definen tres puntos de trabajo, con el objetivo de evaluar la respuesta de la planta, así los puntos de frecuencia son 10 Hz, 100 Hz y 1000 Hz.

Las condiciones de trabajo fueron de $23^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$, una humedad relativa no superior a 75% y la perilla de ganancia ubicada aproximadamente en 180° (condiciones similares en todo momento de trabajo).

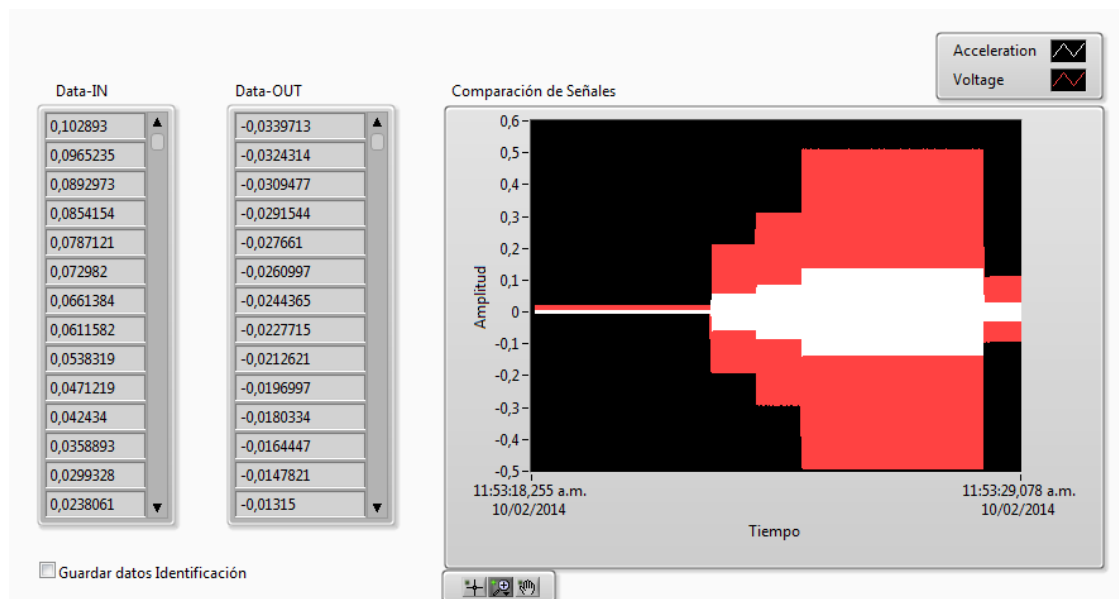
Para realizar la identificación de una planta, es muy complicado definir desde el inicio un único método propicio para su identificación. Así que se procede a realizar los ensayos de identificación con diferentes métodos presentes en la herramienta *System Identification Toolkit* del software de LabView. Los modelos implementados fueron: AR, ARX, ARMAX, output-error, *Box-Jenkins* y modelos lineales generales [17].

Los modelos con un mayor ajuste a la señal de salida (superior al 97%) se encontraron utilizando la técnica de identificación paramétrica de modelos lineales generales y la técnica de modelo ARX. El número de polos y ceros elegidos para

el modelo se evaluaron al ser los que proporcionaban la mayor precisión sin generar complejidad de procesamiento.

Finalmente y como se muestra en la Figura 9 se hacen las pruebas de identificación, para ello se realiza un barrido a diferentes frecuencias y amplitudes. En rojo se observa la señal de entrada al amplificador o la señal generada por el computador y en blanco la señal de salida generada por el sensor patrón.

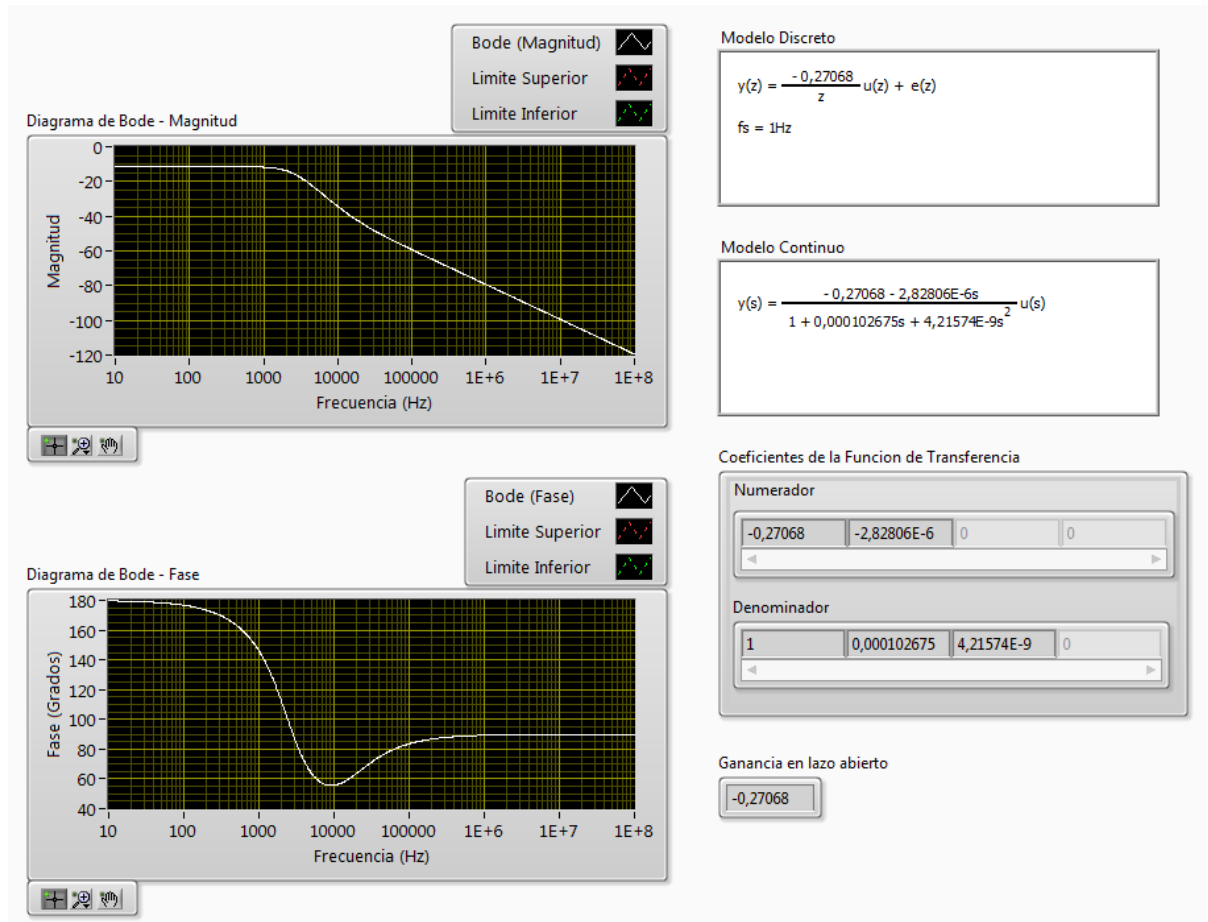
Figura 9. Barrido en frecuencia y en amplitud para la identificación del *Shaker*.



Fuente: Autor

Cuando el sistema se estabiliza en amplitud y frecuencia especificada se guardan los datos y se procede a realizar la identificación de la planta. En la Figura 10 se muestra el diagrama de *Bode*, el modelo general y en tiempo discreto, los coeficientes de la función de transferencia del método paramétrico y la ganancia en lazo abierto del sistema (calculada como la diferencia aritmética entre la señal de entrada y la señal de salida).

Figura 10. Diagrama de bode en magnitud y fase y modelos identificados en LabView

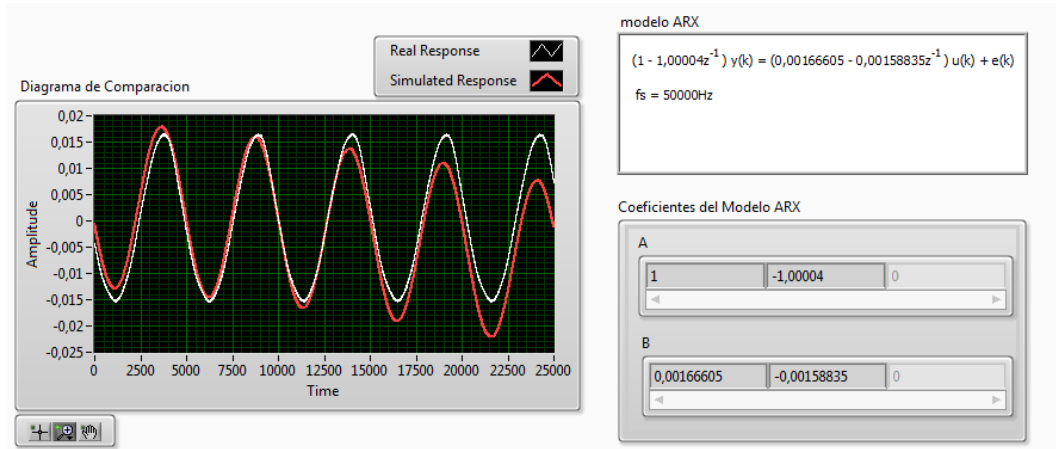


Fuente: Autor

En la Figura 11 y Figura 12 se muestran la correlación de la señal adquirida por el sensor patrón (señal de color rojo) y la señal simulada con el modelo identificado (señal de color gris). Se determina que el método de identificación a bajas frecuencias no es el más adecuado, ya que el ajuste o la correlación entre la señal de salida del sistema y la señal de la función identificada no supera el 50%.

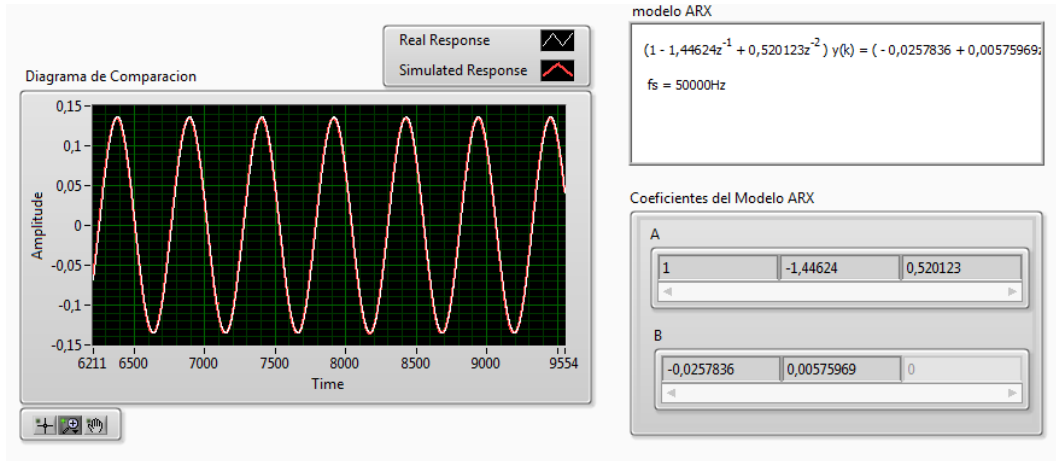
En la Figura 12 se muestra la correlación del modelo identificado a 100 Hz, el cual presenta un ajuste muy superior al modelo identificado a 10 Hz. Los coeficientes de las funciones identificadas con el modelo ARX también se observan en la gráfica.

Figura 11. Correlación de la señal identificada a 10 Hz, 0.25 V y 0 g, respecto a la señal de entrada



Fuente: Autor

Figura 12. Correlación de la señal identificada a 100 Hz , 0.5 V y 0 g, respecto a la señal entregada



Fuente: Autor

Tabla 3. Relación puntos para los ensayos de identificación de la planta.

Peso	Frecuencia				
	10 Hz	100 Hz		1000 Hz	
	Amplitud 1	Amplitud 1	Amplitud 2	Amplitud 1	Amplitud 2
0 g	0,25 V	0,5 V	1 V	0,5 V	1 V
58 g	0,25 V	0,5 V	1 V	0,5 V	1 V
256 g	0,25 V	0,5 V	1 V	0,5 V	1 V
455 g	0,25 V	0,5 V	1 V	0,5 V	1 V

Fuente: Autor

Con el propósito de disminuir el error y garantizar que el proceso de identificación llegue a ser lo más preciso posible, se realizan tres ensayos para cada punto de la prueba, definidos como se muestra en la Tabla 3. Los pesos definidos en la tabla para los ensayos de identificación corresponden a los sensores industriales disponibles en el laboratorio: uno de 58 g, un segundo de 256 g y un tercero de 455 g.

Tabla 4. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 10Hz

Fre. [Hz]	Gramos [g]	Ganancia Perilla amplificador [°]	Amplitud [V]	Ganancia Modelo TF	Ganancia Modelo ARX	Ganancia Experimental	Promedio Ganancia Modelo TF	Promedio Ganancia Modelo ARX	Promedio Ganancia Experimental
10	455	180	0.25	0.1132060	0.1903711	0.0599120	0.1066638 ±0.0066182	0.18886883 ±0.0055538	0.0605318 ±0.0006574
10	455	180	0.25	0.0999721	0.1827184	0.0604621			
10	455	180	0.25	0.1068134	0.1935170	0.0612214			
10	256	180	0.25	0.0290539	0.3098846	0.0608392	0.14620496 ±0.101843	0.2967092 ±0.0129966	0.0608325 ±0.0000364
10	256	180	0.25	0.1959070	0.2838990	0.0608652			
10	256	180	0.25	0.2136540	0.2963440	0.0607933			
10	58	180	0.25	1.1751600	2.0285994	0.0610800	0.750826 ±0.6038852	1.1229124 ±0.7848711	0.0614112 ±0.0003222
10	58	180	0.25	1.0178600	0.6414140	0.0614300			
10	58	180	0.25	0.0594590	0.6987240	0.0617237			
10	0	180	0.25	0.5906280	3.1220702	0.0729884	0.5644571 ±0.4770169	3.1009663 ±1.9185142	0.0672493 ±0.0049929
10	0	180	0.25	0.0748935	1.1719872	0.0639030			
10	0	180	0.25	1.0278500	5.0088417	0.0648567			

Fuente: Autor

Tabla 5. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 100Hz

Fre. [Hz]	Gramos [g]	Ganancia Perilla amplificador [°]	Amplitud [V]	Ganancia Modelo TF	Ganancia Modelo ARX	Ganancia Experimental	Promedio Ganancia Modelo TF	Promedio Ganancia Modelo ARX	Promedio Ganancia Experimental
100	455	180	0.5	0.0775825	0.0803288	0.0756023	0.0781409 ±0.0005221	0.0799718 ±0.0003349	0.0756388 ±0.0002780
100	455	180	0.5	0.0786170	0.0796645	0.0753809			
100	455	180	0.5	0.0782234	0.0799221	0.0759333			
100	455	180	1	0.0812707	0.0796871	0.0753091	0.0804178 ±0.0009357	0.0797722 ±0.0001018	0.07533943 ±0.0000345
100	455	180	1	0.0794169	0.0797445	0.0753771			
100	455	180	1	0.0805660	0.0798850	0.0753321			
100	256	180	1	0.1106650	0.1126205	0.1086700	0.1119113 ±0.0011983	0.1127595 ±0.0002297	0.1086091 ±0.0000532
100	256	180	1	0.1120140	0.1126335	0.1085710			
100	256	180	1	0.1130550	0.1130247	0.1085863			
100	256	180	0.5	0.1124850	0.1135963	0.1090560	0.1128797 ±0.0004016	0.1135048 ±0.0001412	0.109047 ±0.0000928
100	256	180	0.5	0.1132880	0.1135760	0.1089500			
100	256	180	0.5	0.1128663	0.1133421	0.1091350			
100	58	180	1	0.1990310	0.2015199	0.1997270	0.199134 ±0.0000942	0.20145781 ±0.0000630	0.1997288 ±0.0000148
100	58	180	1	0.1992160	0.2013939	0.1997150			
100	58	180	1	0.1991550	0.2014597	0.1997445			
100	58	180	0.5	0.2013590	0.2029124	0.1984270	0.2019460 ±0.0006331	0.2029254 ±0.0000147	0.1984871 ±0.0000595
100	58	180	0.5	0.2026170	0.2029414	0.1985460			
100	58	180	0.5	0.2018622	0.2029225	0.1984885			
100	0	180	0.5	0.2639560	0.2644109	0.2616390	0.2639693 ±0.0000284	0.2643402 ±0.0000793	0.26132386 ±0.0003501
100	0	180	0.5	0.2639500	0.2642543	0.2609470			
100	0	180	0.5	0.2640020	0.2643556	0.2613856			
100	0	180	1	0.2608870	0.2618465	0.2627970	0.2609364 ±0.0000453	0.2617475 ±0.0001035	0.2627195±0.000859
100	0	180	1	0.2609760	0.2616399	0.2626270			
100	0	180	1	0.2609463	0.2617563	0.2627346			

Fuente: Autor

Tabla 6. Identificación de los diferentes modelos del sistema a 1000 Hz

Fre. [Hz]	Gramos [g]	Ganancia Perilla amplificador [°]	Amplitud [V]	Ganancia Modelo TF	Ganancia Modelo ARX	Ganancia Experimental	Promedio Ganancia Modelo TF	Promedio Ganancia Modelo ARX	Promedio Ganancia Experimental
1000	455	180	1	0.02807320	0.03355620	0.02773520	0.02873744 ±0.0007709	0.03777189 ±0.0040216	0.02775295 ±0.0000218
1000	455	180	1	0.02958280	0.03819317	0.02777735			
1000	455	180	1	0.02855634	0.04156632	0.02774630			
1000	455	180	0.5	0.03135950	0.03280800	0.02937700	0.0314288 ±0.0000626	0.0326566 ±0.0001339	0.0294027 ±0.0000440
1000	455	180	0.5	0.03148140	0.03260890	0.02945360			
1000	455	180	0.5	0.03144560	0.03255310	0.02937750			
1000	256	180	0.5	0.04481850	0.05402040	0.04693670	0.0461246 ±0.0011559	0.0535849 ±0.0004892	0.0469684 ±0.0000285
1000	256	180	0.5	0.04653960	0.05367890	0.04699200			
1000	256	180	0.5	0.04701580	0.05305560	0.04697660			
1000	256	180	1	0.04381140	0.06928155	0.04484610	0.0440587 ±0.0002213	0.06938641 ±0.0007006	0.04481054 ±0.0000310
1000	256	180	1	0.04412630	0.06874410	0.04478920			
1000	256	180	1	0.04423840	0.07013360	0.04479632			
1000	58	180	0.5	0.09817670	0.10156300	0.09029520	0.09851353 ±0.0003713	0.10158187 ±0.0000350	0.0901667 ±0.0001129
1000	58	180	0.5	0.09891170	0.10156031	0.09008280			
1000	58	180	0.5	0.09845221	0.10162230	0.09012230			
1000	58	180	1	0.09066930	0.10051054	0.08977210	0.09079303 ±0.0001802	0.10047896 ±0.0000300	0.08978008 ±8.8501883
1000	58	180	1	0.09099980	0.10045068	0.08978960			
1000	58	180	1	0.09071001	0.10047566	0.08977855			
1000	0	180	1	0.14180800	0.13126465	0.11674400	0.1270696 ±0.0140755	0.1312477 ±0.0003272	0.1167073 ±0.0000323
1000	0	180	1	0.11376700	0.13091243	0.11669500			
1000	0	180	1	0.12563400	0.13156630	0.11668300			
1000	0	180	0.5	0.13073600	0.13273830	0.11756300	0.1307457 ±0.0000084	0.1327555 ±0.0000172	0.1176026 ±0.0000400
1000	0	180	0.5	0.13075000	0.13277270	0.11764300			
1000	0	180	0.5	0.13075110	0.13275560	0.11760200			

Fuente: Autor

En la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se muestran los resultados del proceso de identificación para las frecuencias de 10 Hz, 100 Hz y 1000 Hz, respectivamente. En cada tabla se especifica el peso del sensor en gramos, la posición de la perilla de ganancia del amplificador, la amplitud de la señal de entrada al sistema, las ganancias en lazo abierto calculadas para la función de transferencia de la identificación paramétrica (modelo TF), la ganancia en lazo abierto para el modelo ARX y ganancia experimental (calculada como la diferencia algebraica entre la señal de salida y entrada). Con estos datos y con las tres pruebas realizadas en cada caso se calcula el promedio de las ganancias de cada modelo, la ganancia experimental y la desviación estándar de los datos calculados en cada promedio.

El caso de los modelos identificados en 10 Hz se alcanza una máxima desviación estándar de 1.9185 unidades, se estima que la variación de los parámetros alcanza hasta un 61.9%.

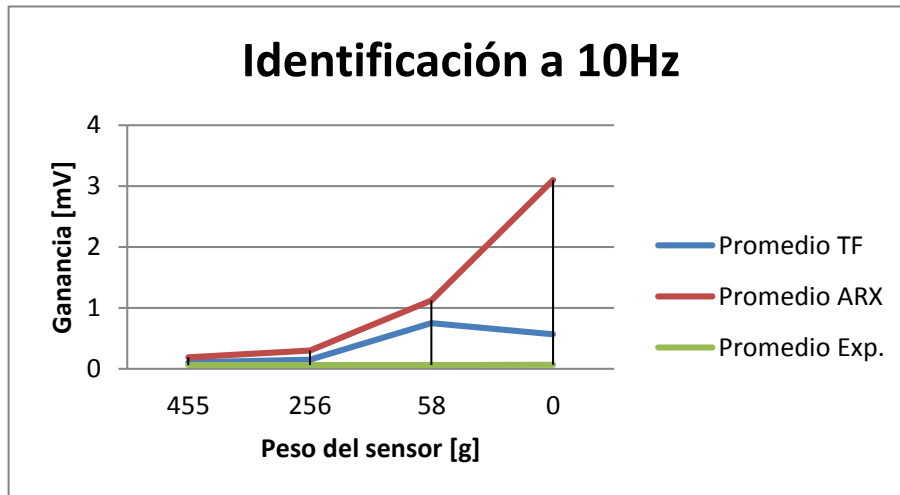
En el caso de los modelos identificados a 100 Hz se presenta un mejor comportamiento, con una máxima desviación estándar de 0.0011983 unidades en los parámetros de las funciones de transferencia, equivalente a una variación máxima de 1.071%.

Finalmente en el tercer caso, de los modelos identificados en 1000 Hz se encuentra una máxima desviación estándar de 0.014076 unidades, correspondientes a una variación de los parámetros de 11.077%.

Con estos valores sólo se pretende analizar el mejor método y los parámetros que proporcionan una mayor estabilidad y precisión en la identificación del sistema.

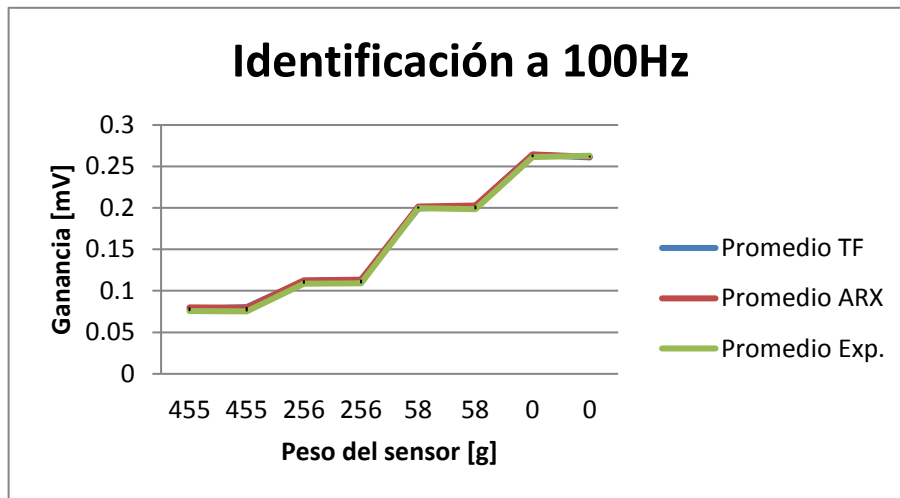
En las Figura 13, Figura 14 y Figura 15 se muestran gráficamente los resultados de las identificaciones de las ganancias en lazo abierto de los modelos implementados. En el caso de la identificación a 100 Hz y 1000 Hz se muestran dos valores de peso, el primero correspondiente a una amplitud de a 0.5 V y el segundo a una amplitud de 1 V.

Figura 13. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 10 Hz a 0,25 V



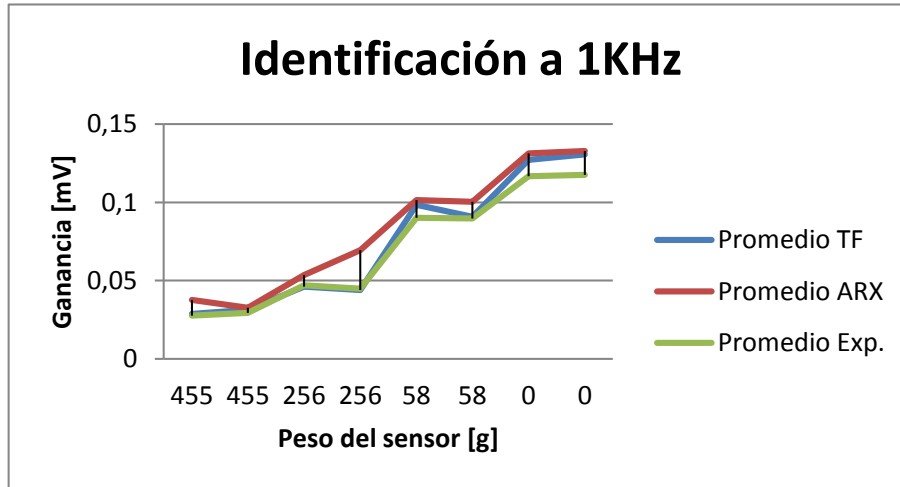
Fuente: Autor

Figura 14. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 100 Hz a 0,5 V y 1 V.



Fuente: Autor

Figura 15. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 1000 Hz a 0,5 V y 1 V.

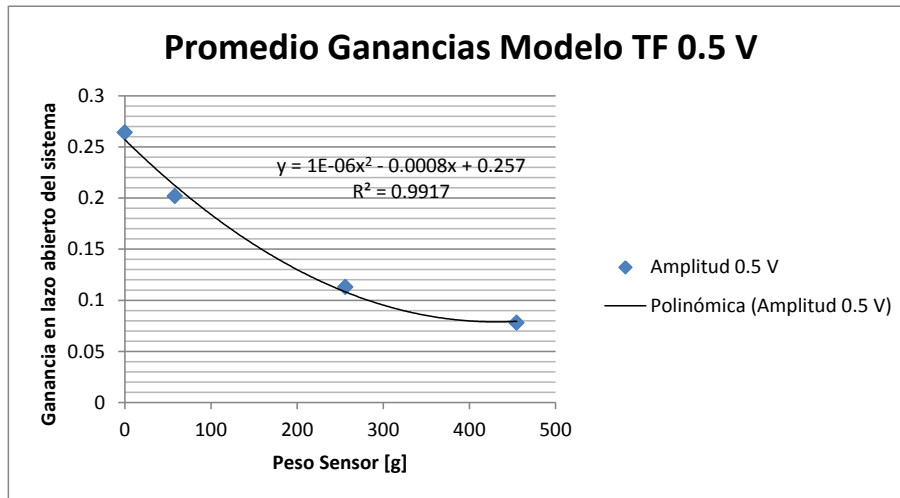


Fuente: Autor

Con el análisis gráfico de los datos obtenidos en la identificación de los modelos del sistema es evidente reconocer cuales parámetros son los más estables y precisos en la medición. De este modo se estiman como parámetros fijos para la identificación del sistema, una frecuencia de 100 Hz, una amplitud de 1 V y la posición de la perilla ubicada en 180°.

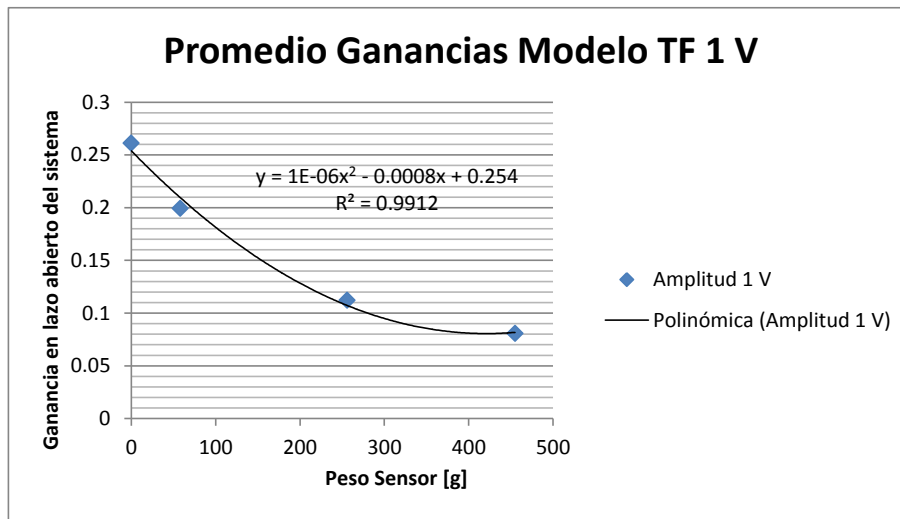
En las Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 se muestra la regresión cuadrática realizada a la relación entre las ganancias del sistema (de cada modelo identificado) y el peso de cada sensor. Cada gráfica contiene la ecuación cuadrática equivalente al comportamiento de las variables y el valor de R^2 que representa la similitud del comportamiento de los puntos con la ecuación cuadrática, que en todos los casos fue superior al 99%.

Figura 16. Promedios ganancias modelos TF a 0.5 V y 100 Hz



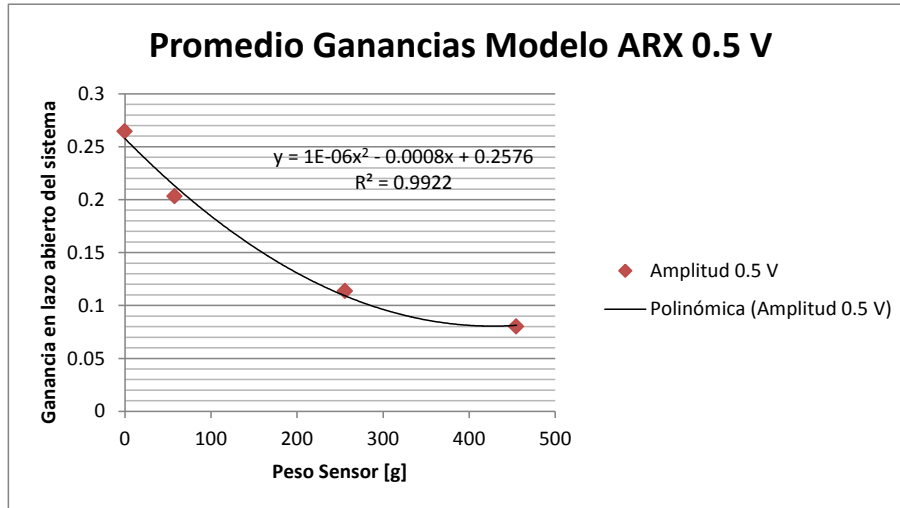
Fuente: Autor

Figura 17. Promedios ganancias modelos TF a 1 V y 100 Hz



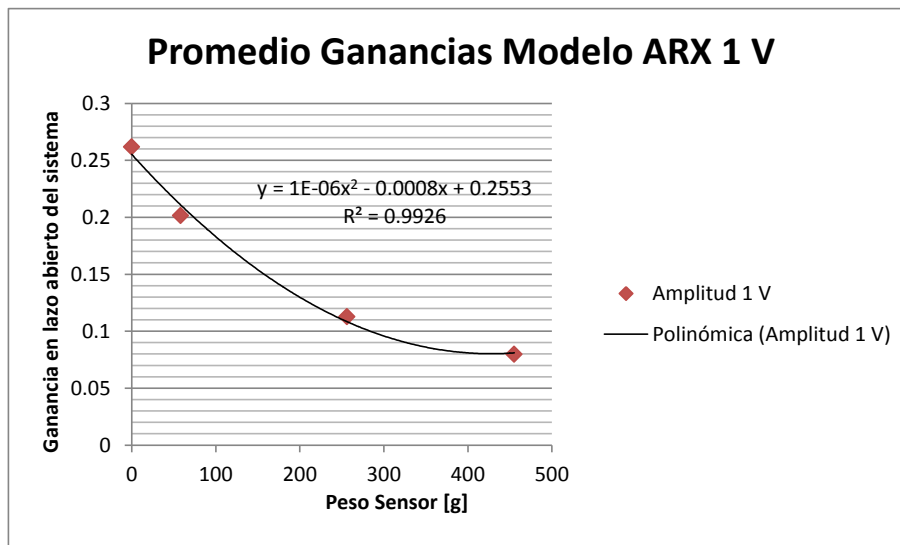
Fuente: Autor

Figura 18. Promedios ganancias modelos ARX a 0.5 V y 100 Hz



Fuente: Autor

Figura 19. Promedios ganancias modelos ARX a 1 V y 100 Hz



Fuente: Autor

Las ecuaciones respectivas de las regresiones cuadráticas son: modelo TF para 0.5 V, (11); modelo TF para 1 V, (12); del modelo ARX para 0.5 V, (13) y del modelo ARX para 1 V, (14).

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.257 \quad (11)$$

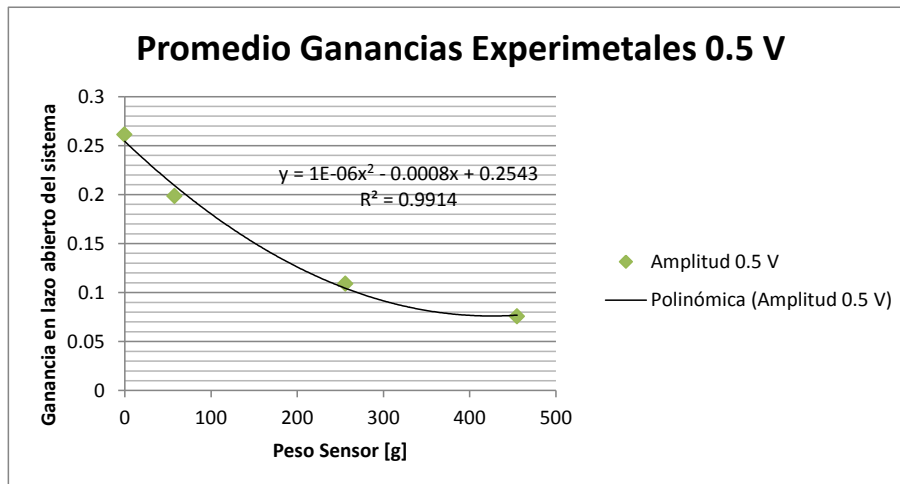
$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.254 \quad (12)$$

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.2576 \quad (13)$$

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.2553 \quad (14)$$

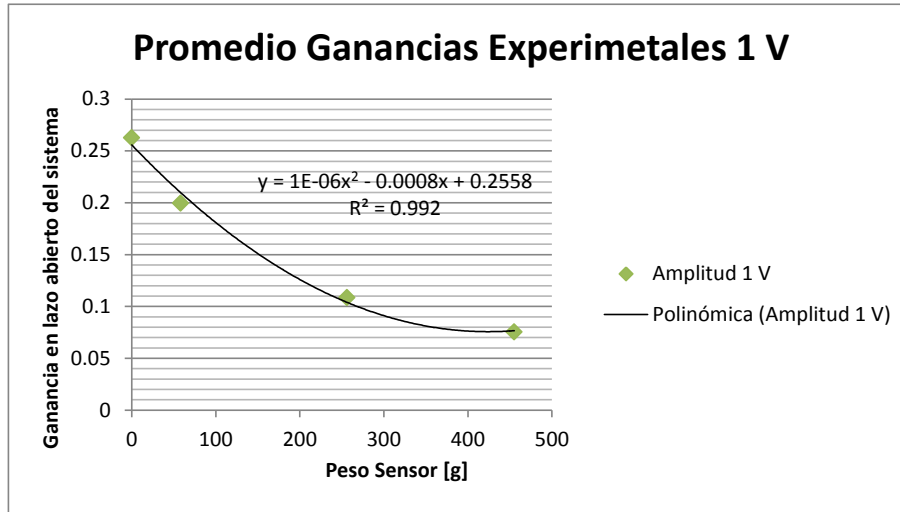
Igualmente se compara la regresión de los dos métodos con el método experimental es 0.5 V y 1 V, Figura 20 y Figura 21.

Figura 20. Promedios ganancias experimentales a 0.5 V y 100 Hz



Fuente: Autor

Figura 21. Promedios ganancias experimentales a 1 V y 100 Hz



Fuente: Autor

De esta manera se muestra una similitud superior al 99% entre los parámetros de las funciones identificadas para calcular la variación de los pesos del sistema. Al determinar la relación de la regresión cuadrática del modelo experimental para 0.5 V con (15) y del modelo experimental para 1 V con (16).

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.2543 \quad (15)$$

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.2558 \quad (16)$$

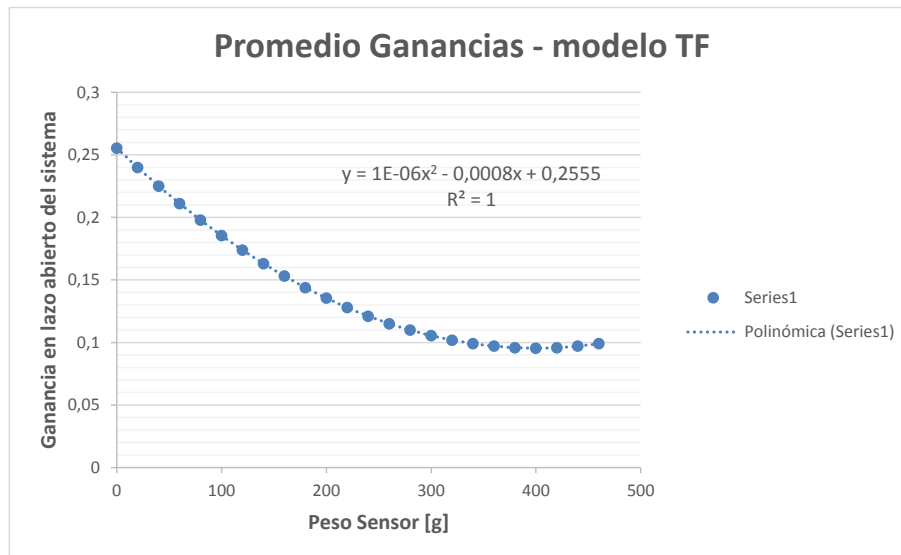
De las regresiones cuadráticas anteriores se construye la Tabla 7, donde se promedian los parámetros obtenidos en cada identificación. Estos promedios permiten calcular la ecuación cuadrática (17) que se muestra graficada en la Figura 22 y que permite normalizar la relación entre el peso de los sensores y la ganancia del sistema.

Tabla 7. Promedios de las ganancias de los modelos identificados a 100Hz

	Ganancias experimentales		
	ax ²	bx	c
	0.000001	-0.0008	0.2558
0.000001	-0.0008	0.2543	
promedio	0.000001	-0.0008	0.25505
	Ganancias Modelo ARX		
	ax ²	bx	c
	0.000001	-0.0008	0.2553
0.000001	-0.0008	0.2576	
promedio	0.000001	-0.0008	0.25645
	Ganancias modelo TF		
	ax ²	bx	c
	0.000001	-0.0008	0.254
0.000001	-0.0008	0.257	
promedio	0.000001	-0.0008	0.2555

Fuente: Autor

Figura 22 Promedio de las ganancias de los modelos identificados a 100Hz



Fuente: Autor

$$y = 1 \times 10^{-6} x^2 - 0.0008x + 0.2555 \quad (17)$$

4.2. Simulación de los modelos

Con los parámetros definidos en la identificación del sistema y definiendo el método de identificación paramétrica como el más preciso, se inicia el trabajo de simulación de la planta y sintonización de los controladores con los modelos que corresponden: (18) al modelo del sistema identificado a 0 g – 100 Hz – 1 v, (19) al modelo del sistema identificado a 58 g – 100 Hz - 1 V, (20) al modelo del sistema identificado a 256 g – 100 Hz – 1 V y (21) al modelo del sistema identificado a 0 g – 100 Hz – 1 V.

$$F_{0g}(s) = \frac{-6,52314e^{-6}s - 0,260976}{3,45317e^{-9}s^2 + 0,00012351s + 1} \quad (18)$$

$$F_{58g}(s) = \frac{-1,49881e^{-6}s - 0,199031}{2,69764e^{-8}s^2 + 0,000244568s + 1} \quad (19)$$

$$F_{256g}(s) = \frac{-2,71121e^{-5}s - 0,110665}{1,5513e^{-7}s^2 + 0,00070951s + 1} \quad (20)$$

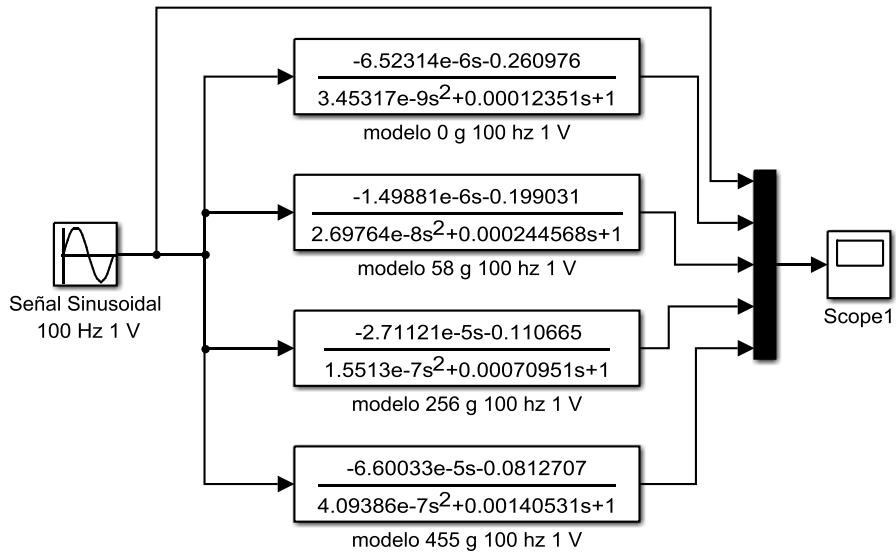
$$F_{455g}(s) = \frac{-6,60033e^{-5}s - 0,0812707}{4,09386e^{-7}s^2 + 0,00140531s + 1} \quad (21)$$

En la Figura 23 se muestra la primera simulación de los modelos identificados ante una entrada de tipo sinusoidal y en la Figura 24 se muestra la respuesta de la simulación.

En la

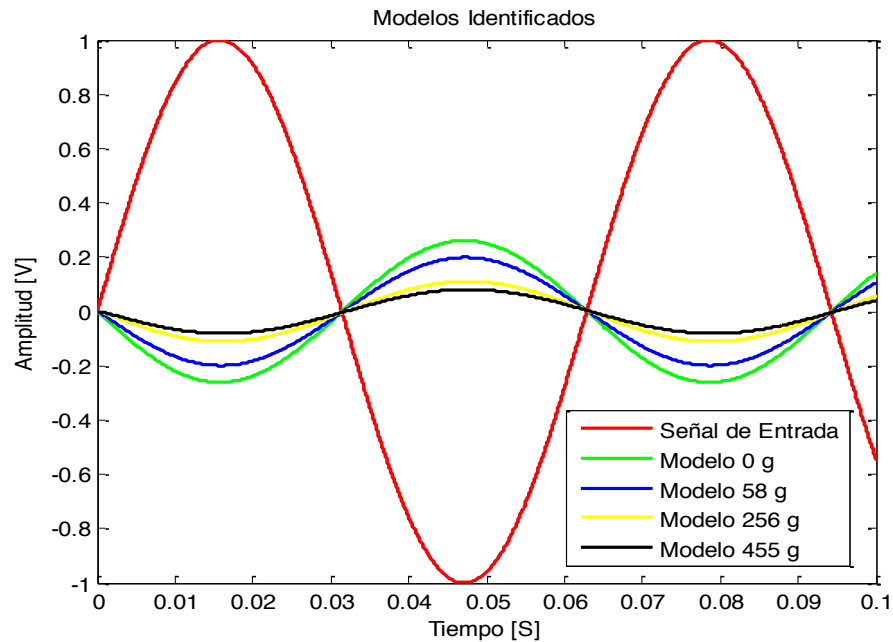
Figura 25 se muestra la simulación de los modelos identificados ante una entrada de tipo escalón y en la Figura 26 se muestra la respuesta de la simulación. Nótese que en ambas respuestas se observa una disminución de la ganancia de la planta conforme aumenta el peso de del sensor.

Figura 23. Simulación de los modelos identificados a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada sinusoidal



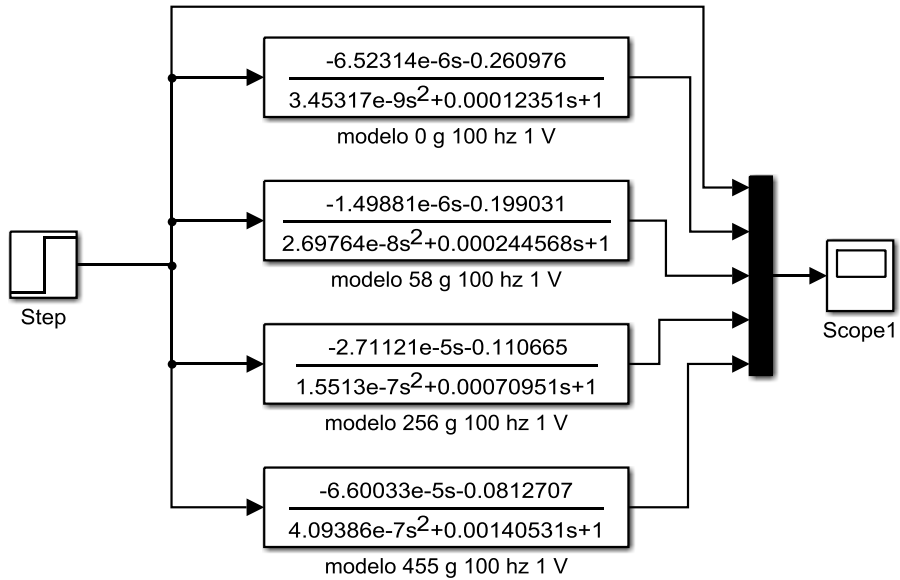
Fuente: Autor

Figura 24. Respuesta de los diferentes modelos identificados para el Shaker a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada sinusoidal



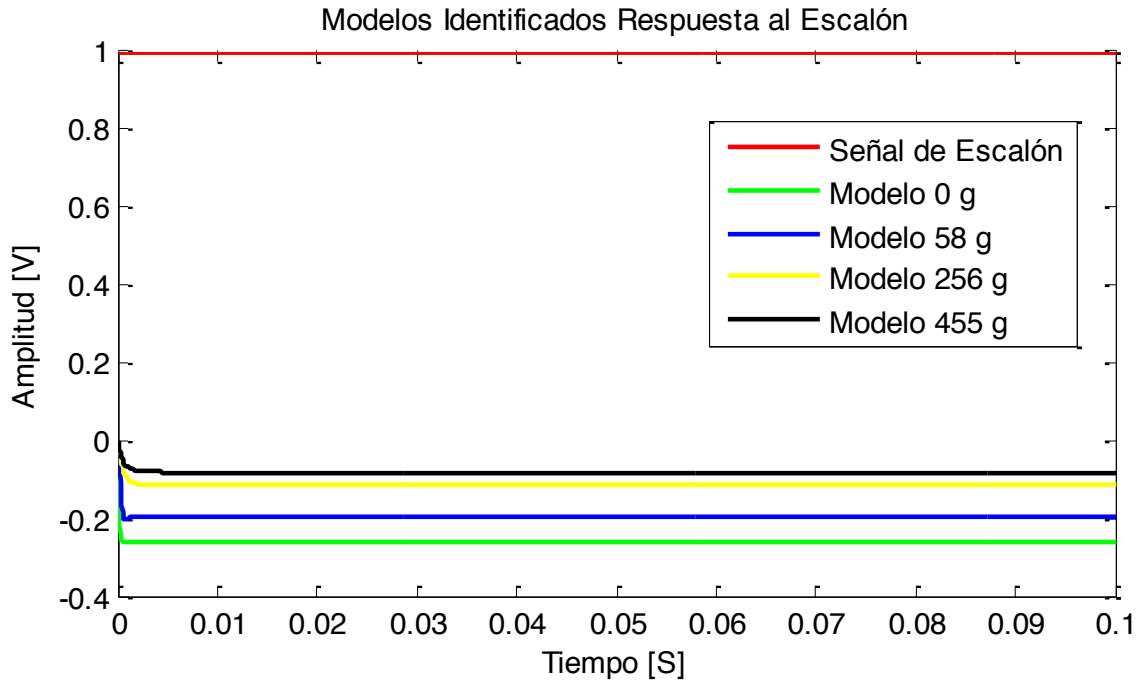
Fuente: Autor

Figura 25. Simulación de los modelos identificados a 100 Hz y 1 V de amplitud para una entrada escalón



Fuente: Autor

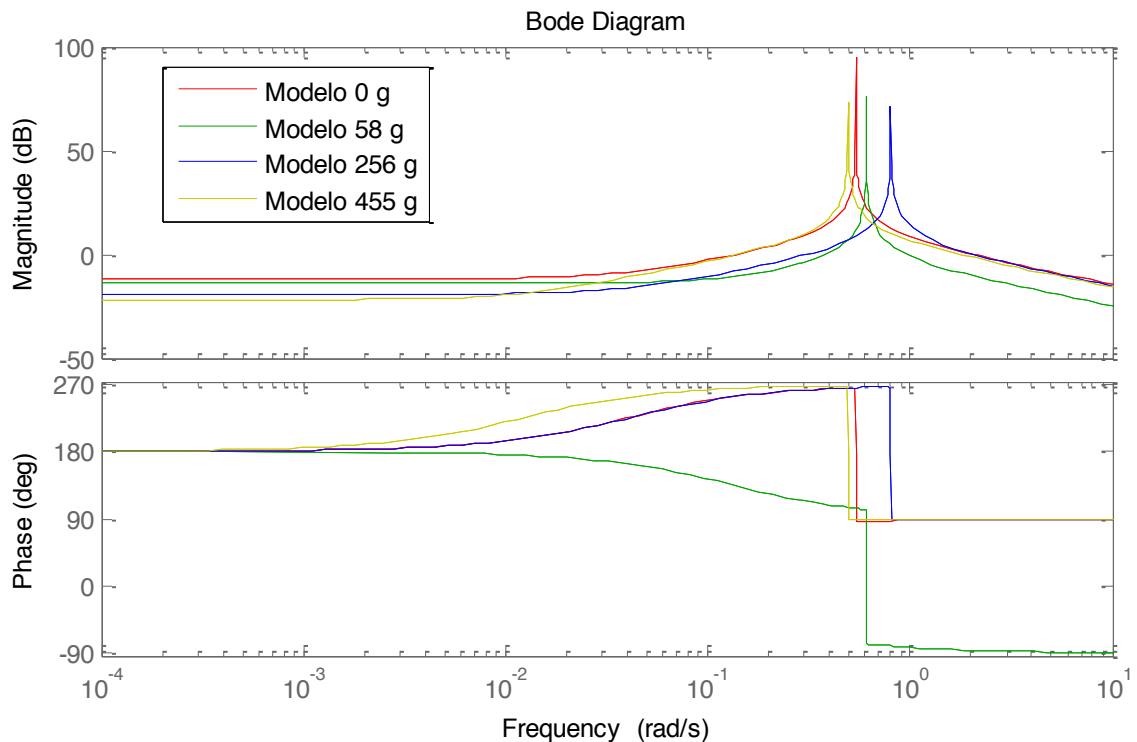
Figura 26. Respuesta de los diferentes modelos identificados para el Shaker a 100Hz y 1V de amplitud para una entrada escalón



Fuente: Autor

También se muestra el diagrama de *Bode* para cada uno de los modelos obtenidos, donde se puede observar un cambio de fase a la frecuencia de resonancia, que no corresponde con las frecuencias que se desean calibrar y donde sólo existe una disminución en la ganancia de la planta.

Figura 27. Diagrama de Bode para los diferentes modelos identificados para el *Shaker* a 100Hz y 1v de amplitud.



Fuente: Autor

4.3. Identificación del modelo nominal de la planta

Debido a que existe un número infinito de modelos que definen el sistema dinámico, los cuales, dependen del peso del sensor bajo prueba, es necesario identificar un modelo que generalice el peor comportamiento de la planta y donde las variaciones de los parámetros fuera de esos límites especificados pueda ocasionar una inestabilidad.

De esta manera se plantea en la Tabla 8 el resumen de los parámetros identificados para cada modelo. La ubicación de cada parámetro se define en (22). Cada parámetro muestra una posible variación de la planta. Nótese que se calcula el valor promedio, el valor máximo, el valor mínimo y sus diferencias aritméticas y porcentuales.

Debido a que los modelos obtenidos no corresponden exactamente a una relación lineal de los pesos, se observa que las variaciones pueden alcanzar hasta un 361%.

Tabla 8. Resumen de los parámetros de los diferentes modelos identificados para el *Shaker* a 100 Hz y 1 V de amplitud.

Parametro	P1	P2	P3	P4	P5
Modelo 0 g	-6.52314E-06	-0.260976	3.45317E-09	0.00012351	1
Modelo 58 g	-1.50E-06	-0.199031	2.69764E-08	0.000244568	1
Modelo 256 g	-2.71121E-05	-0.110665	1.5513E-07	0.00070951	1
Modelo 455 g	-6.60033E-05	-0.0812707	4.09386E-07	0.00140531	1
Promedio	2.52843E-05	0.162985675	1.48736E-07	0.000620725	1
Valor Máximo	-1.49881E-06	-0.0812707	4.09386E-07	0.00140531	1
Valor Mínimo	-6.60033E-05	-0.260976	3.45317E-09	0.00012351	1
Diferencia entre el promedio y el valor Máximo	2.67831E-05	0.244256375	2.6065E-07	0.000784586	0
Diferencia entre el promedio y el valor Mínimo	9.12876E-05	0.423961675	1.45283E-07	0.000497215	0
% de diferencia entre el promedio y el valor Máximo	105.9278199	149.8637073	175.2426579	126.3983458	0
% de diferencia entre el promedio y el valor Mínimo	361.0442136	260.1220475	97.67832879	80.1022837	0

Fuente: autor

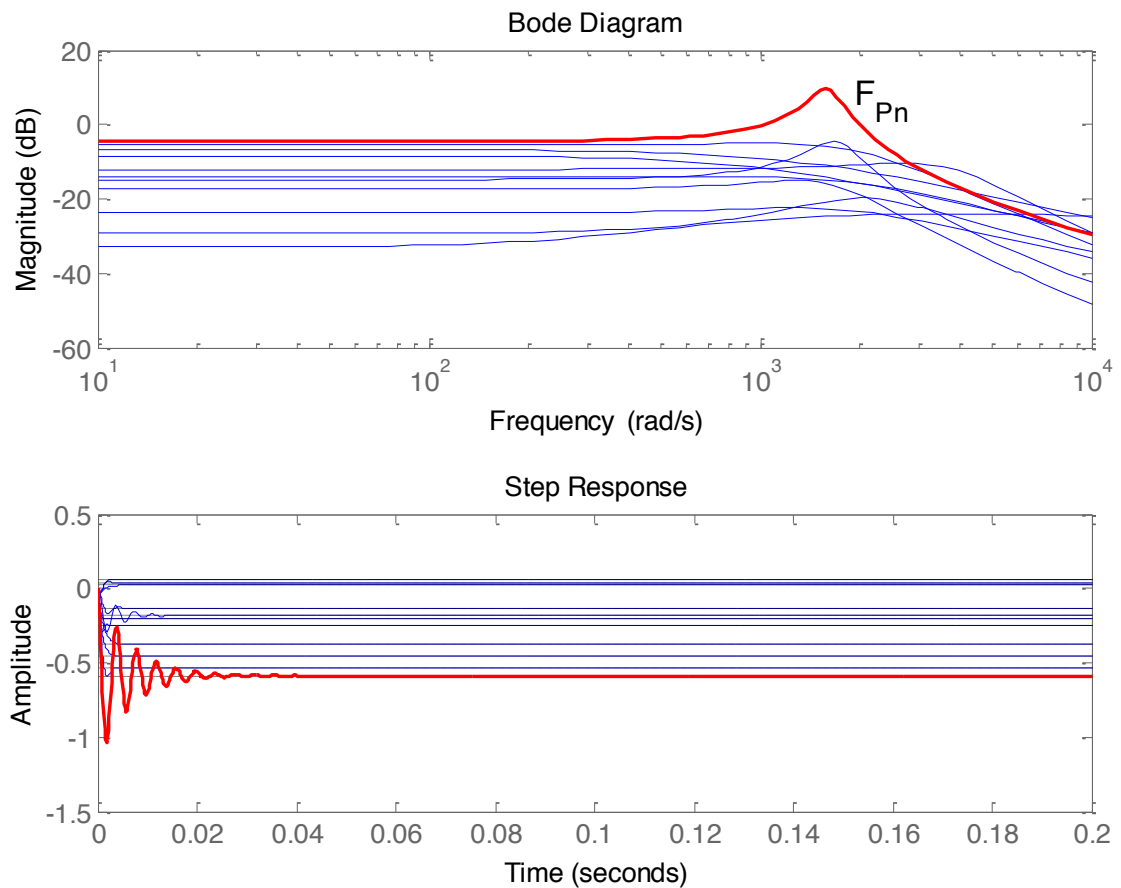
$$F_p(s) = \frac{P_1s + P_2}{P_3s^2 + P_4s + P_5} \quad (22)$$

En el Anexo 1 se muestra el código utilizado en Matlab para determinar el modelo nominal de la planta. La función utilizada en este caso es “*robuststab*” y el modelo nominal corresponde a (23).

$$F_{Pn} = \frac{0.163s^2 + 0.326s + 0.4293}{s^3 + s^2 - 1.268s - 0.7317} \quad (23)$$

El código implementado genera un informe de resultados, dentro de los resultados más relevantes se encuentran el diagrama de *Bode* (ver Figura 28). Las curvas en color azul corresponden a la variación de los 10 diferentes modelos dentro de los parámetros delimitados anteriormente. Estos parámetros se conocen como incertidumbres de las funciones. En este caso en particular es una variación conocida que se pretende caracterizar. La curva en color rojo corresponde a (23) y evidencia el comportamiento del peor caso ante las posibles variaciones de la planta que se está trabajando.

Figura 28. Diagrama de Bode en magnitud y amplitud de los 10 casos simulados (azules) y del peor caso (rojo)



Fuente: Autor

El código también genera un resumen de los parámetros de la función y su correspondiente porcentaje de variabilidad:

```
Uncertain continuous-time state-space model with 1 outputs,
1 inputs, 8 states.
The model uncertainty consists of the following blocks:
  p1: Uncertain real, nominal = -2.53e-05, variability = [-
361,106]%, 1 occurrences
  p2: Uncertain real, nominal = -0.163, variability = [-
260,150]%, 1 occurrences
  p3: Uncertain real, nominal = 1.49e-07, variability = [-
98,175]%, 1 occurrences
  p4: Uncertain real, nominal = 0.000621, variability = [-
80,126]%, 1 occurrences
```

5. Controladores para la calibración de sensores de vibración

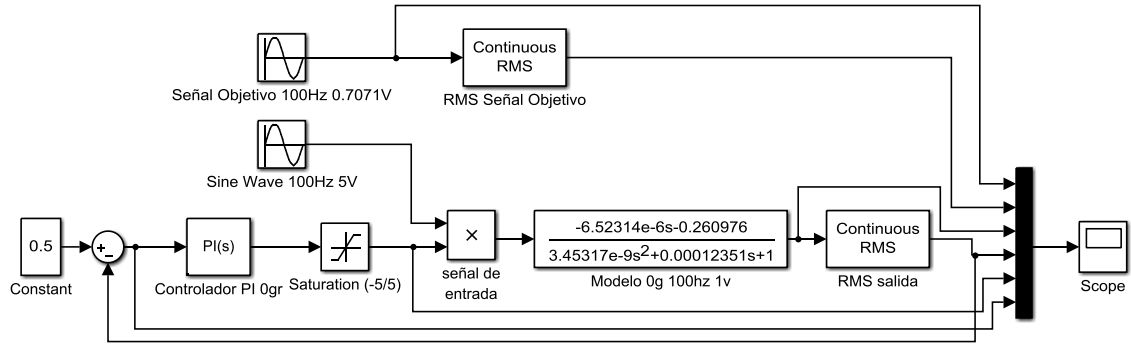
A continuación se describen los controladores implementados en el sistema de calibración de sensores. Adicionalmente se describe el procedimiento para su sintonización e implementación, junto con algunas comparaciones entre los mismos.

5.1. Controlador PI

Antes de sintonizar el controlador PI se realiza la simulación de la planta. Es importante recordar que la planta real tiene una señal de entrada provista por una tarjeta de generación analógica, que produce una señal sinusoidal con amplitud y frecuencia establecida por software. Esta señal puede ser fija o variable, y cambian la amplitud y la frecuencia según la calibración lo requiera.

En la Figura 29 se observa la mejor aproximación lograda para simular el comportamiento del sistema. Consta de una señal sinusoidal teórica, denominada señal objetivo y su equivalente en *RMS* (*Root Mean Square*), para compararla visualmente con la señal de la planta simulada. El sistema, denominado “*modelo 0 g 100 Hz 1 V*” (uno de los cuatro modelos identificados), recibe la salida de la multiplicación de una señal sinusoidal y el valor de ganancia del controlador. El objetivo del controlador consiste en variar la amplitud de la señal sinusoidal hasta un valor deseado como se realiza en la planta real.

Figura 29. Diagrama en Simulink para la simulación del controlador PI



Fuente: Autor

Con el modelo de simulación implementado en Matlab, Figura 29, se sintonizan cuatro controladores PI, uno para cada modelo identificado. Los controladores se sintonizaron utilizando la herramienta PIDtools del software Matlab, donde se muestran los controladores obtenidos para cada uno de los modelos identificados con 0 g, 58 g, 256 g y 455 g en (24), (25), (26) y (27), respectivamente.

$$C_{0g} = \frac{2.4525s + 72,2280}{s} \quad (24)$$

$$C_{58g} = \frac{4.523s + 142,2845}{s} \quad (25)$$

$$C_{256g} = \frac{6.9452s + 246,0059}{s6.9452} \quad (26)$$

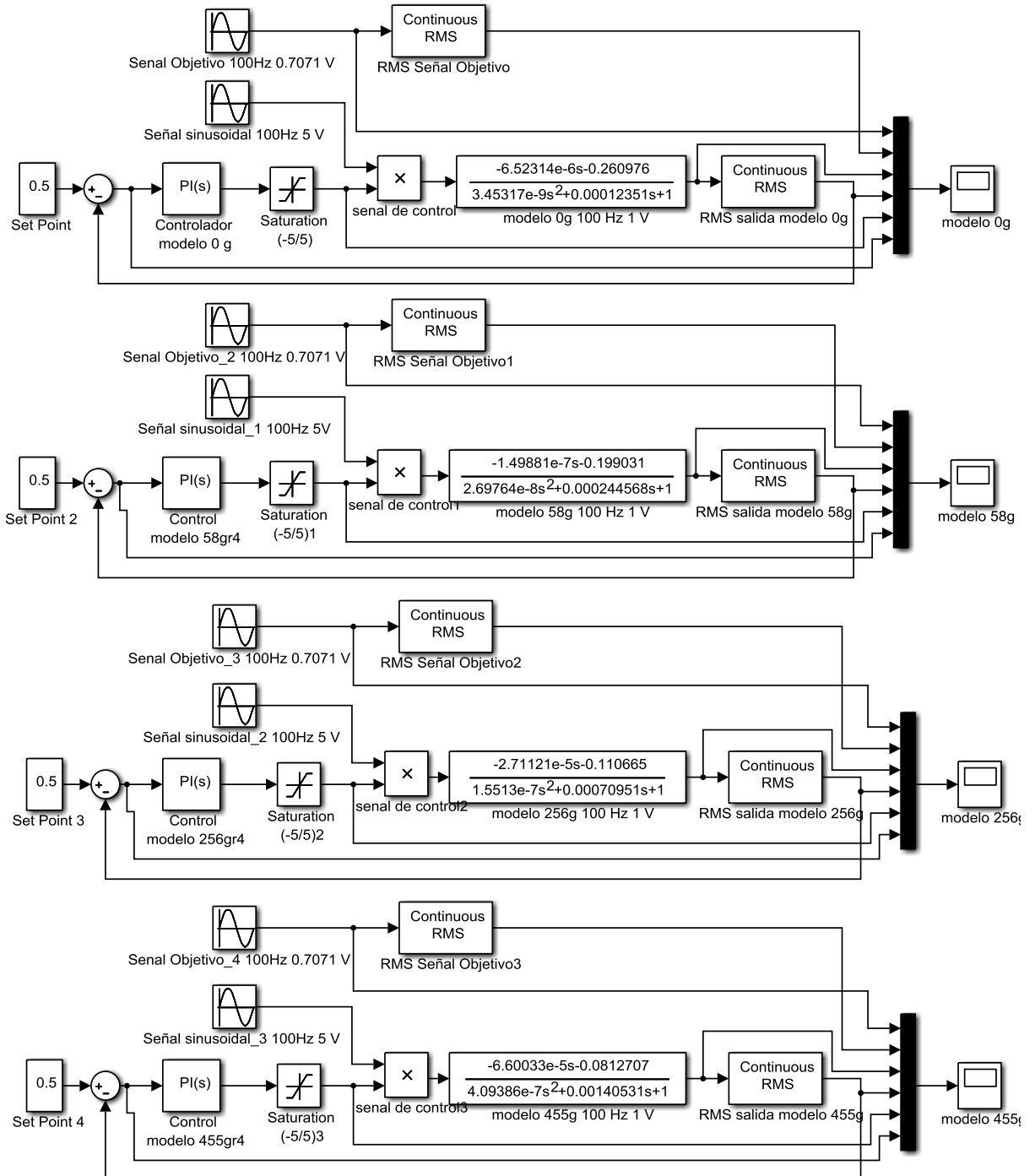
$$C_{455g} = \frac{7.865s + 309,9989}{s} \quad (27)$$

En la Figura 30 se puede observar el modelo de simulación aplicado para los cuatro modelos identificados. Cada modelo cuenta con un controlador PI sintonizado de forma independiente. En las Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se muestran las respuestas de los controladores para los modelos de 0 g, 58 g, 256 g y 455 g respectivamente. La información presente en cada figura

corresponde a la señal objetivo, señal objetivo en RMS, señal de respuesta del modelo, señal de respuesta del modelo en RMS, señal de salida del controlador y señal de error.

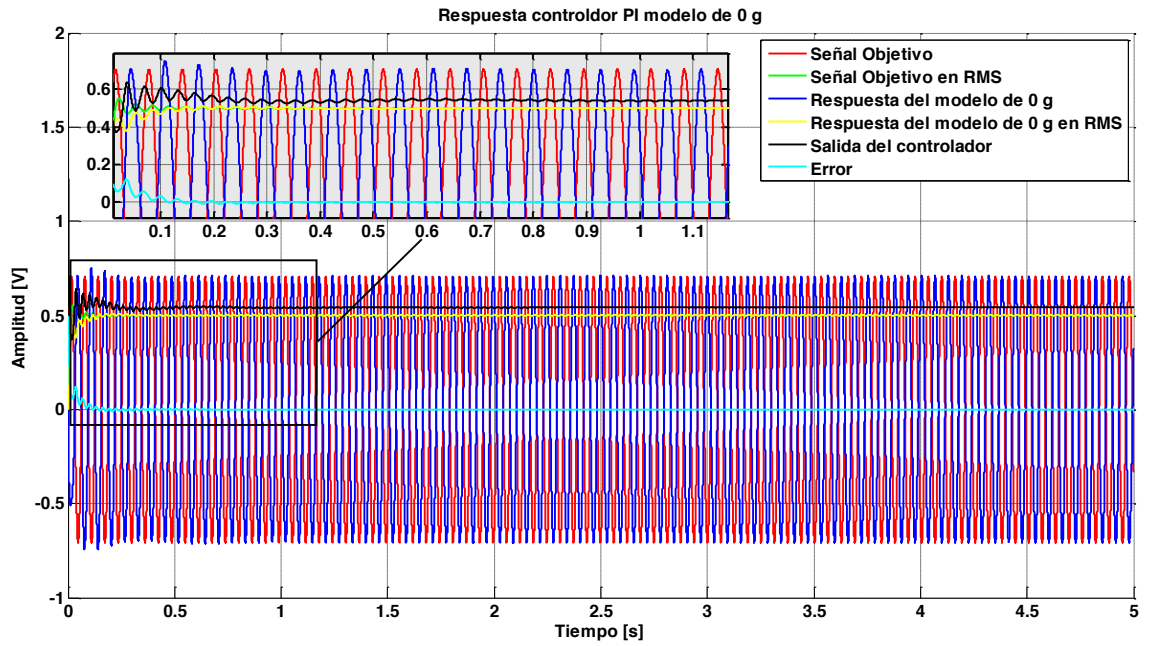
El comportamiento de todos los controladores es aceptable, consiguiendo un sobrepaso inferior al 5%, un tiempo de establecimiento promedio de 1,23 s y un error en régimen permanente de 250 mV (medido en 5 s).

Figura 30 diagrama en Simulink para la simulación de los controladores PI hallados para cada modelo



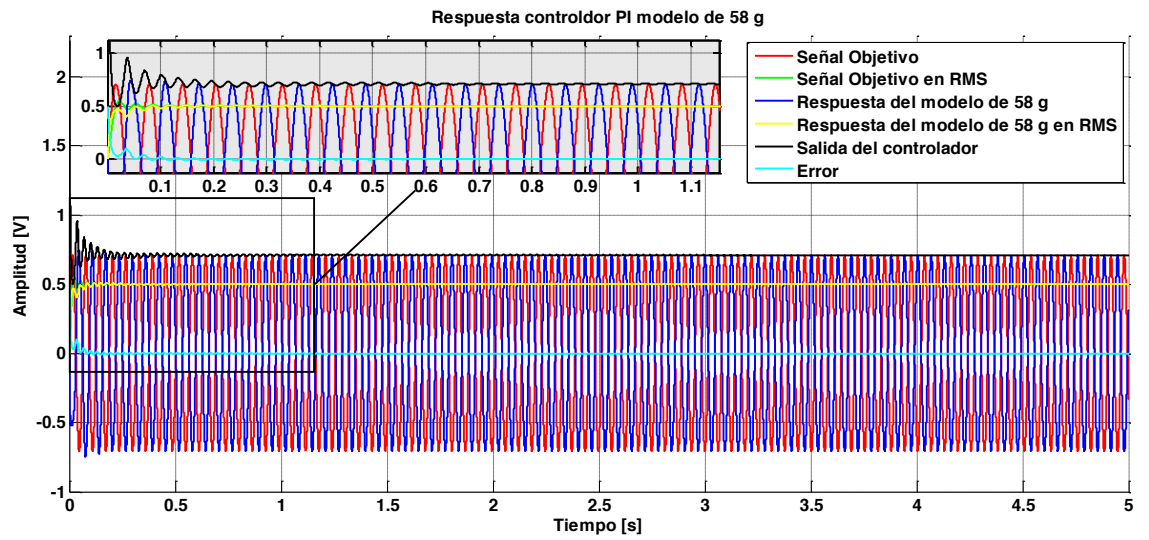
Fuente: Autor

Figura 31. Respuesta del modelo de 0 g con controlador PI.



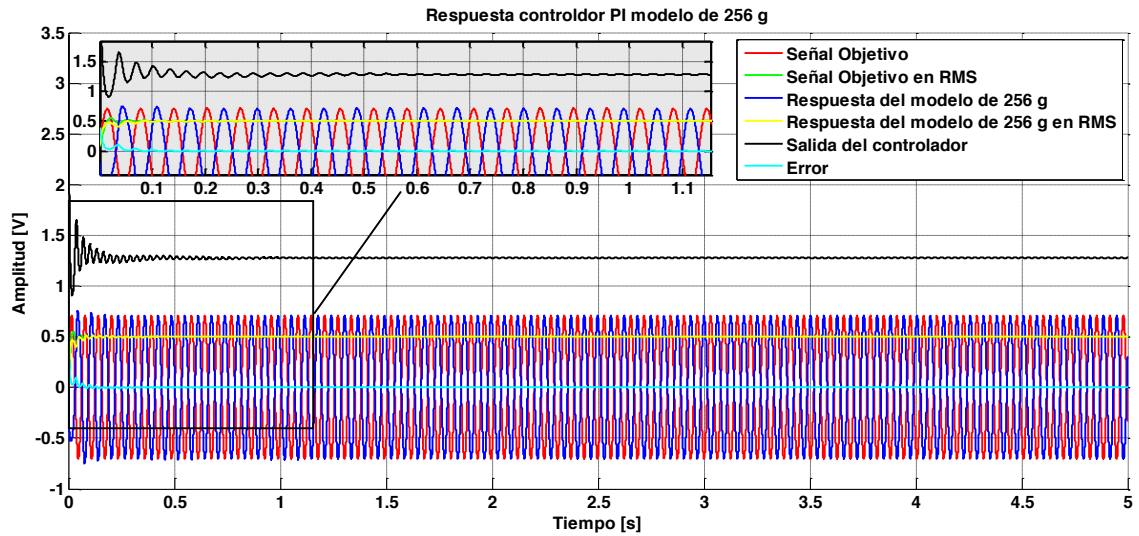
Fuente: Autor

Figura 32. Respuesta del modelo de 58 g con controlador PI.



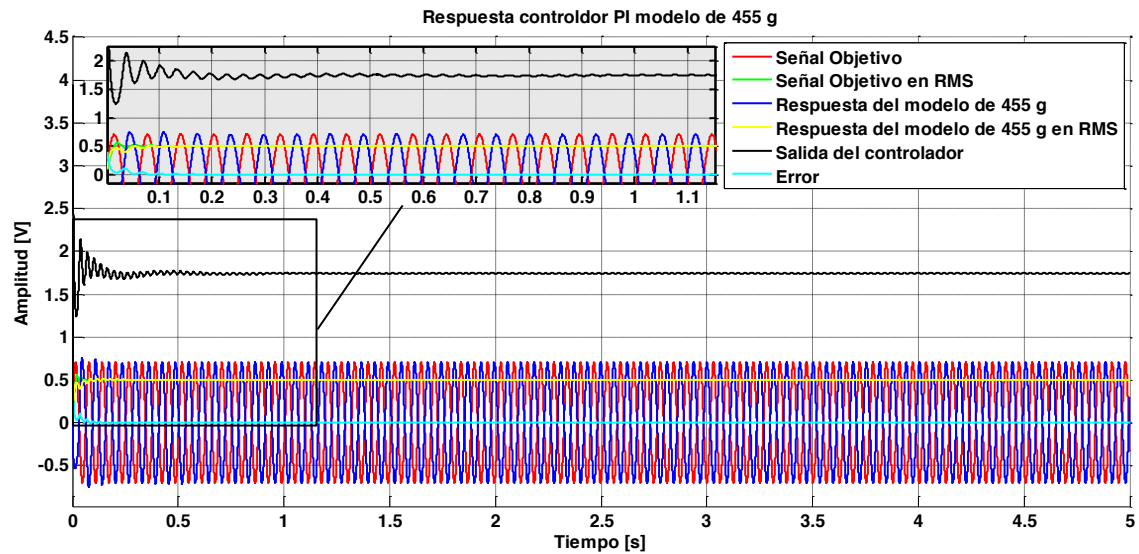
Fuente: Autor

Figura 33. Respuesta del modelo de 256 g con controlador PI.



Fuente: Autor

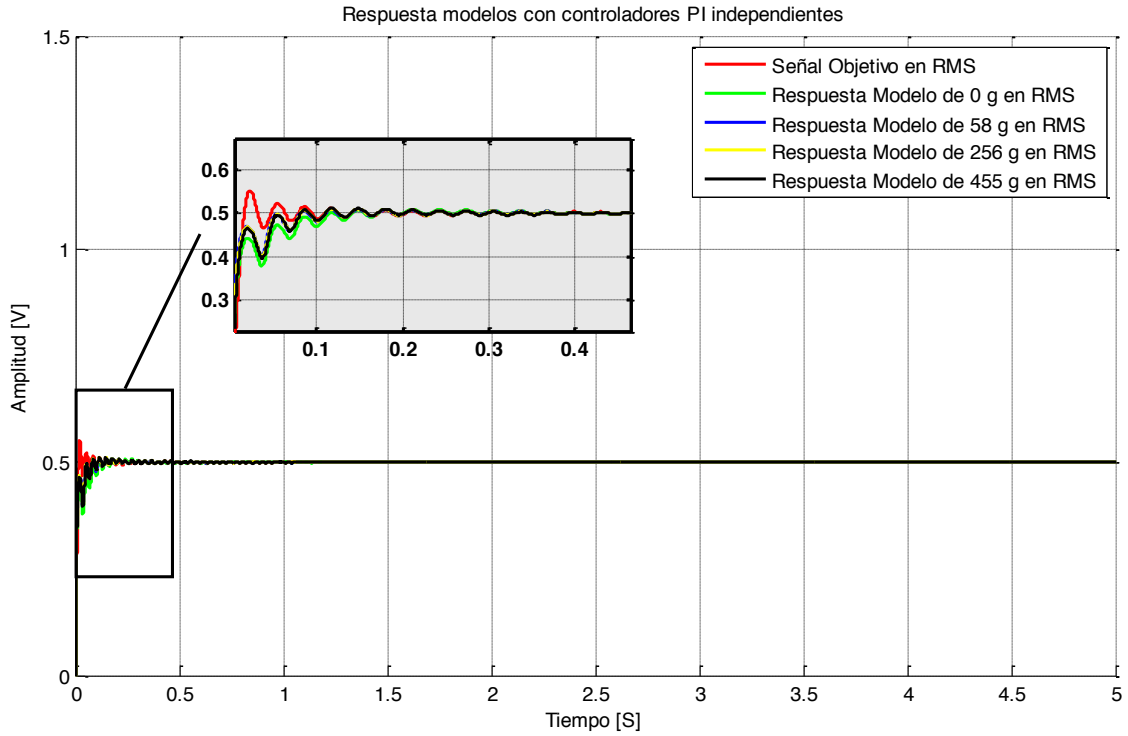
Figura 34. Respuesta del modelo de 455 g con controlador PI.



Fuente: Autor

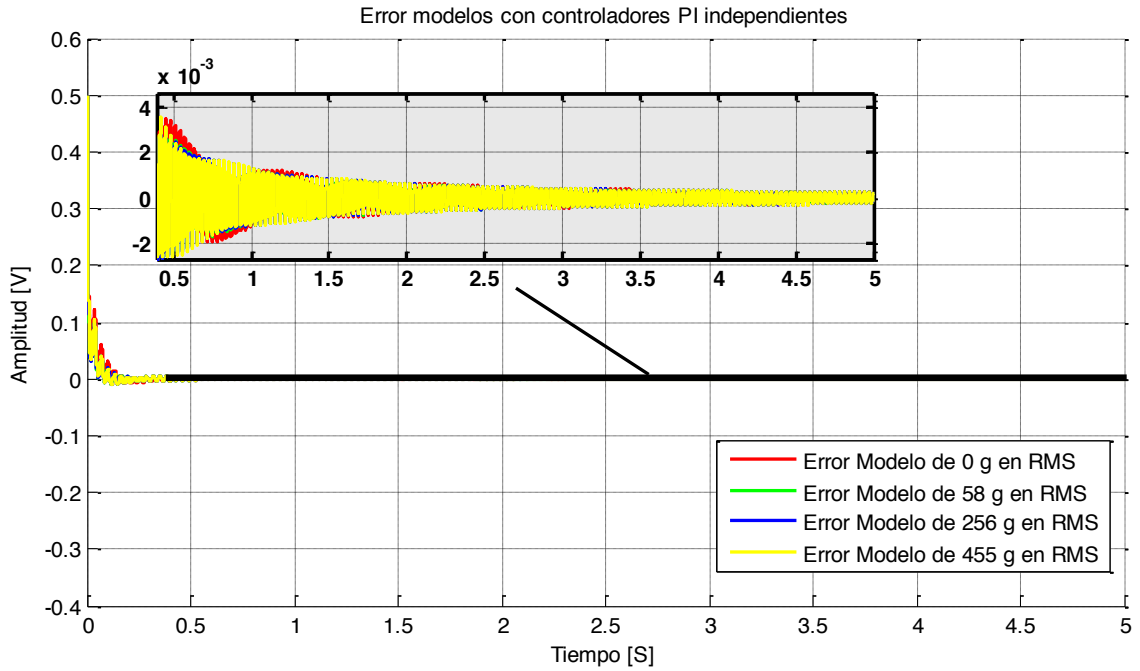
En la Figura 35 se muestran las respuestas en conjunto de todos los modelos identificados y en la Figura 36 se muestran los errores de los mismos. En 5 s de simulación se alcanza un error aproximado de 250 mV. En este punto es importante resaltar que la tarjeta de adquisición NI-9263 tiene una resolución de 24 bits para un span de 10 V, consiguiendo una resolución mínima de 5.96×10^{-7} V.

Figura 35. Respuesta de los modelos identificados con controladores PI independientes



Fuente: Autor

Figura 36. Error de los modelos identificados con controladores PI independientes

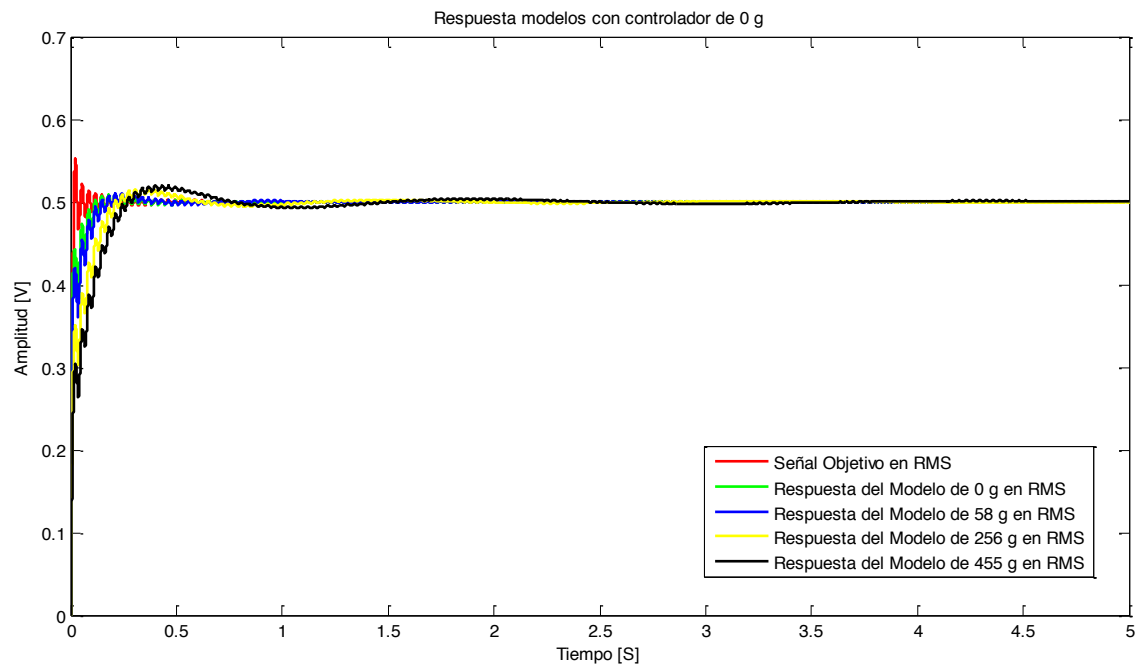


Fuente: Autor

El Sistema de calibración de sensores debe funcionar de manera automática y él mismo debe proporcionar el modo más apropiado para realizar el control. El objetivo de este trabajo es encontrar un controlador capaz de eliminar el error del sistema sin importar el sensor que se esté trabajando.

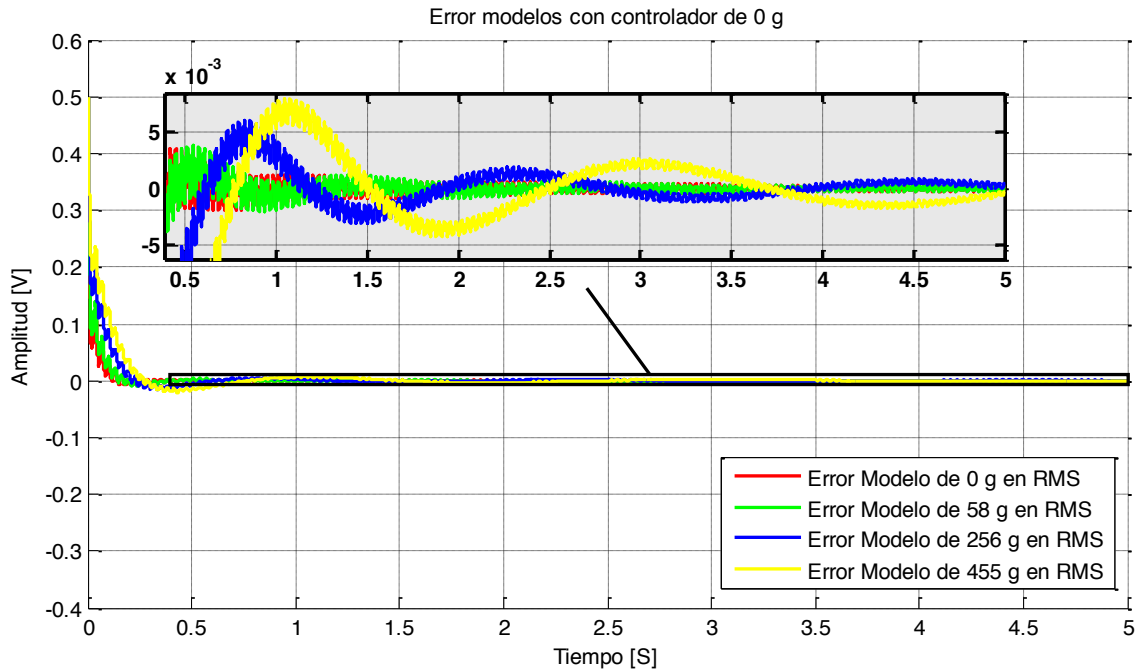
En la primera aproximación al problema se implementa uno de los controladores PI para los cuatro modelos. El controlador del modelo de 0 g consigue el peor desempeño, la simulación que se muestra en la Figura 37 y sus errores correspondientes en la Figura 38. Con la gráfica de errores es evidente la oscilación del sistema, la inestabilidad y el tiempo requerido para regularse al utilizar los modelos de 256 g y 455 g.

Figura 37. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI sintonizado para el modelo de 0g



Fuente: Autor

Figura 38. Error en todos los modelos del controlador PI sintonizado para el modelo de 0 g



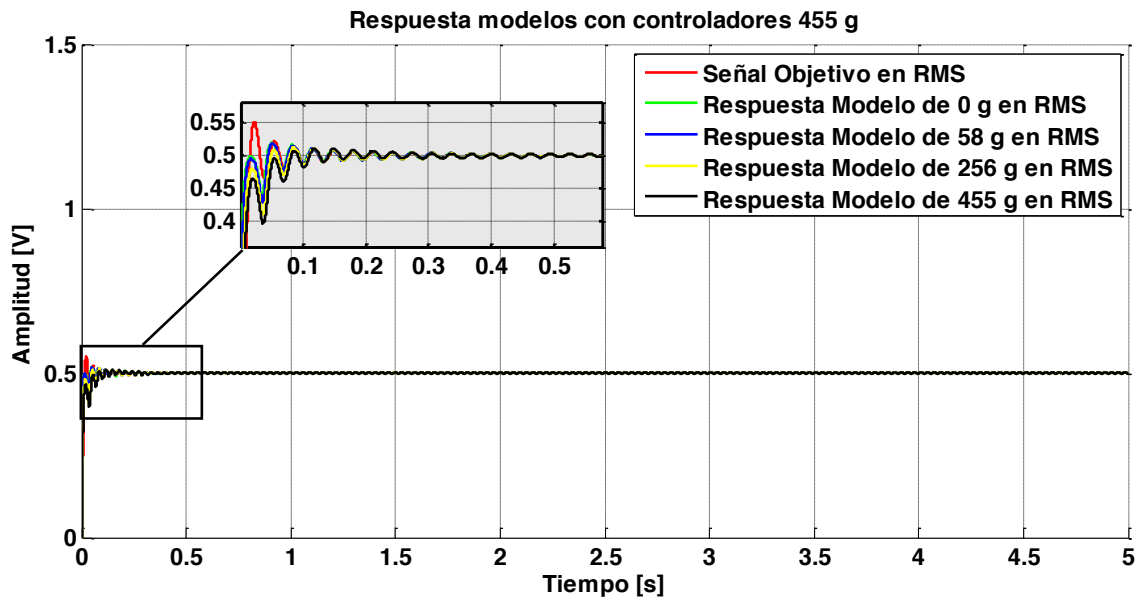
Fuente: Autor

Como era de esperarse, el controlador para el modelo de 455 g consigue un rendimiento mejor que el controlador para el modelo de 0 g y a pesar que el tiempo de establecimiento es mayor, ningún sistema entra en inestabilidad o sobrepaso superior al 5%

En la Figura 39 se observa la respuesta los diferentes sistemas con el controlador sintonizado para el modelo de 455g. En la Figura 40 se muestra el error obtenido después de transcurrido 5 s de simulación. El error descende en el peor de los casos hasta los 450mV, un valor superior a los controladores independientes (250mV) pero en condición estable.

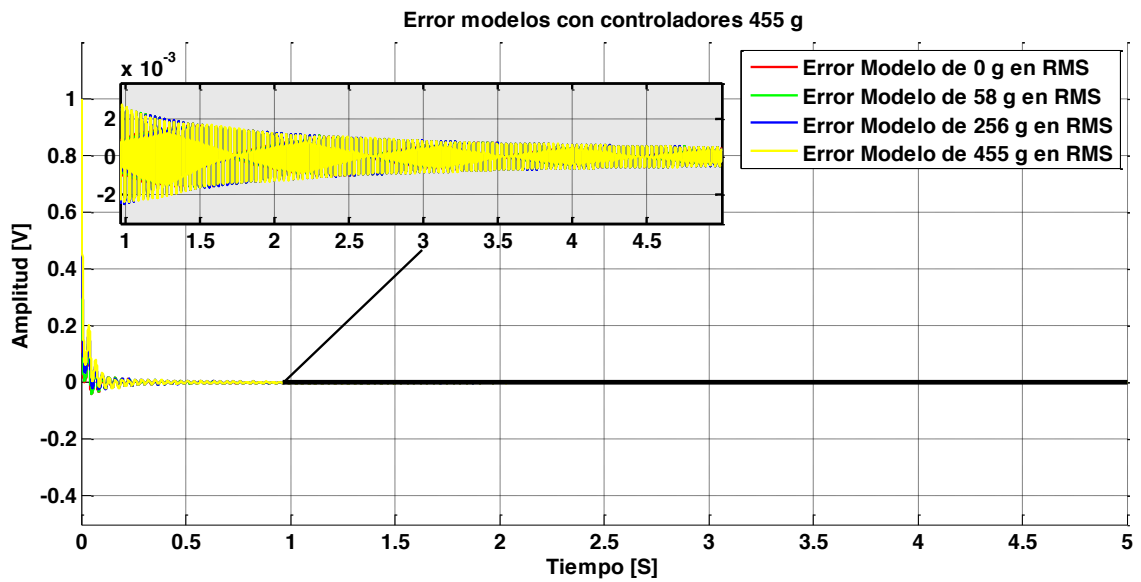
Con estos controladores se realizaron las primeras pruebas con la planta real, el sistema efectivamente se estabiliza, pero requiere entre 30 s a 60 s para estabilizarse con un valor de 2 cifras significativas. Es importante resaltar que la sensibilidad del sensor patrón es de 10 mV/m/s² y una mínima variación de voltaje representa una notablemente desviación la salida del sensor.

Figura 39. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI sintonizado para el modelo de 455 g



Fuente: Autor

Figura 40. Error en todos los modelos del controlador PI sintonizado para el modelo de 455 g



Fuente: Autor

5.2. Control robusto

Los controladores PI se sintonizan sobre sistemas sin incertidumbre, de ahí que una pequeña variación en la planta puede alterar significativamente el desempeño de este tipo de controladores. Un controlador robusto se centra básicamente en satisfacer la peor condición de la planta, teniendo en cuenta todas las posibles incertidumbres presentes .

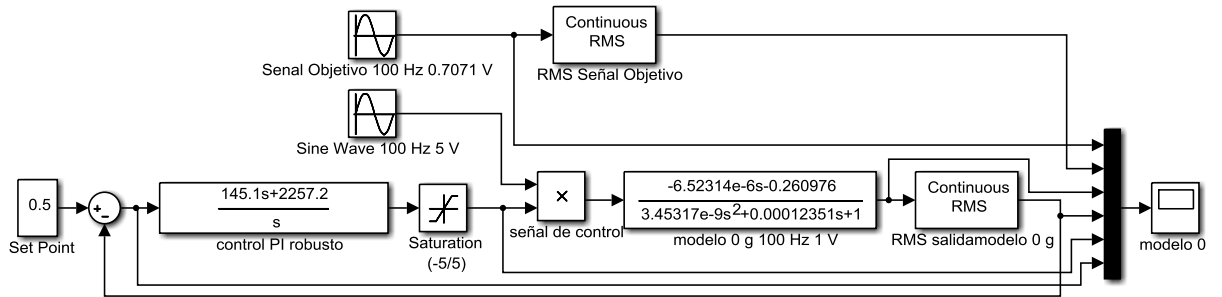
De este modo se decide implementar el modelo nominal de la planta con todo todos los rangos de incertidumbre puestos en ella, sintonizando un control robusto, capaz de controlar de una manera más eficiente los diferentes modelos de la planta.

El controlador sintonizado, utilizando la herramienta de Matlab, *PIDtools*, se muestra en (28). El diagrama utilizado para la simulación del controlador se muestra en la Figura 42. Los resultados del controlador se muestran en la Figura 42 y los errores de cada modelo se muestran en la Figura 44.

$$C_{rbt} = \frac{145.1s + 2257.2}{s} \quad (28)$$

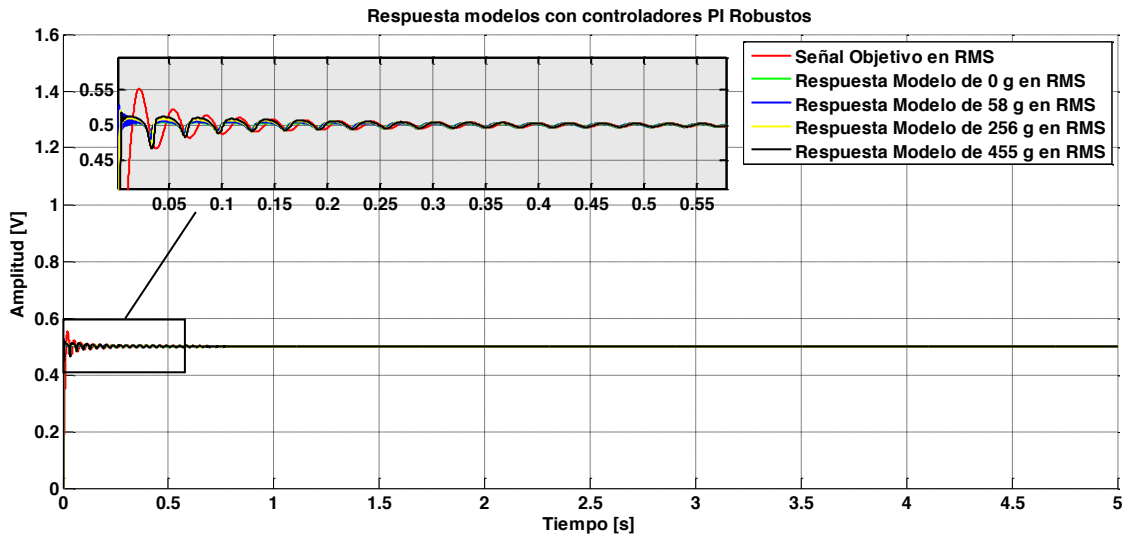
Con el controlador robusto se disminuye el error a 250 mV transcurridos 5 s, que es muy aceptable si se considera que un solo controlador brinde este desempeño, sin embargo no cumple con las necesidades de la planta, con un tiempo de establecimiento de 60 s y un ajuste para dos cifras decimales que sigue proporcionando un gran error para la incertidumbre final de la calibración.

Figura 41. Diagrama de simulación en Simulink del controlador Robusto sintonizado para todos los modelos de la planta.



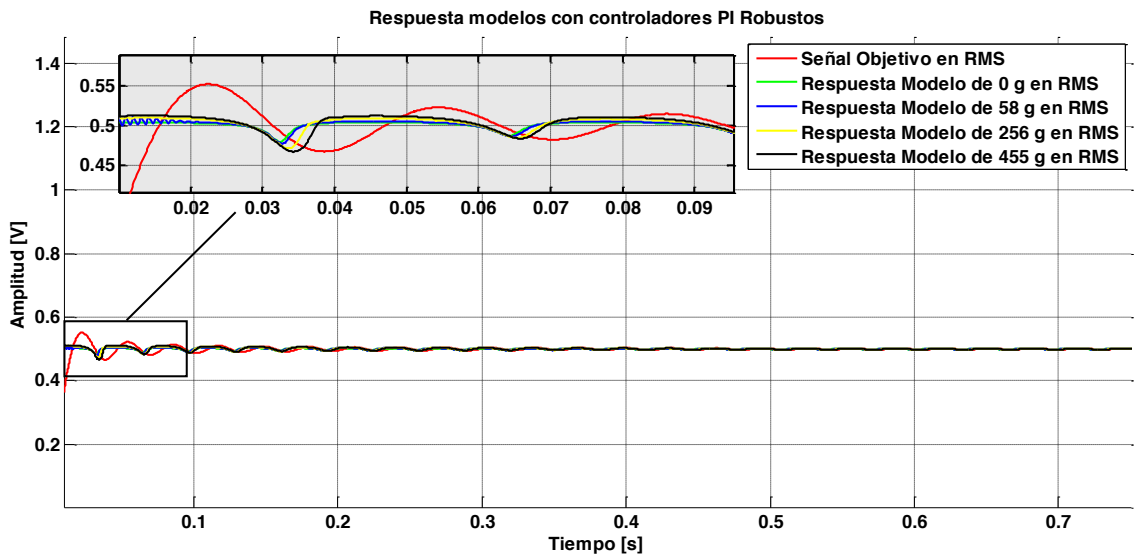
Fuente: Autor

Figura 42. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI Robusto sintonizado para el modelo nominal



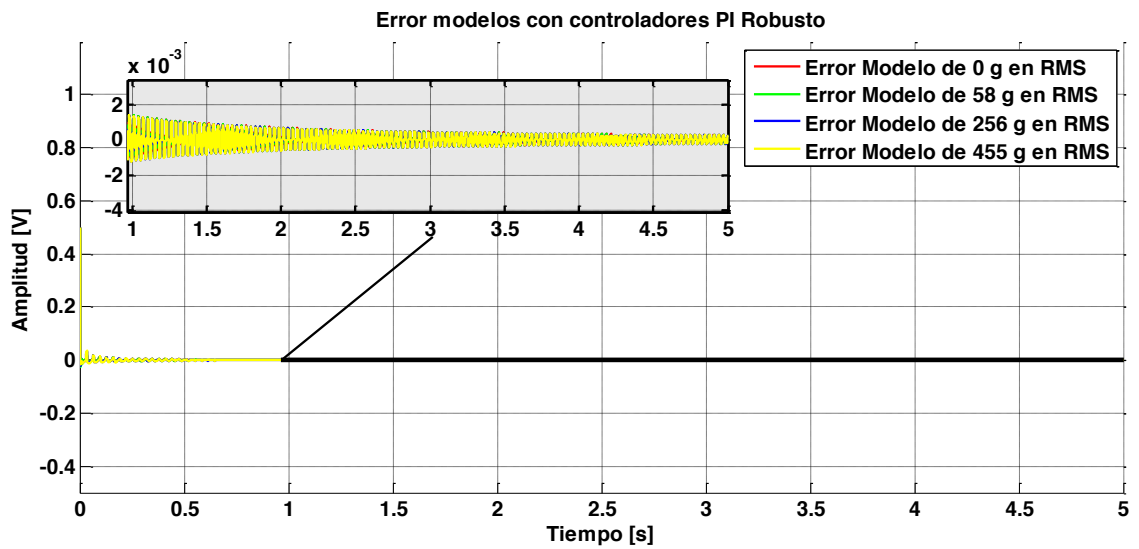
Fuente: Autor

Figura 43. Respuesta de todos los modelos con el controlador PI Robusto sintonizado para el modelo nominal (2)



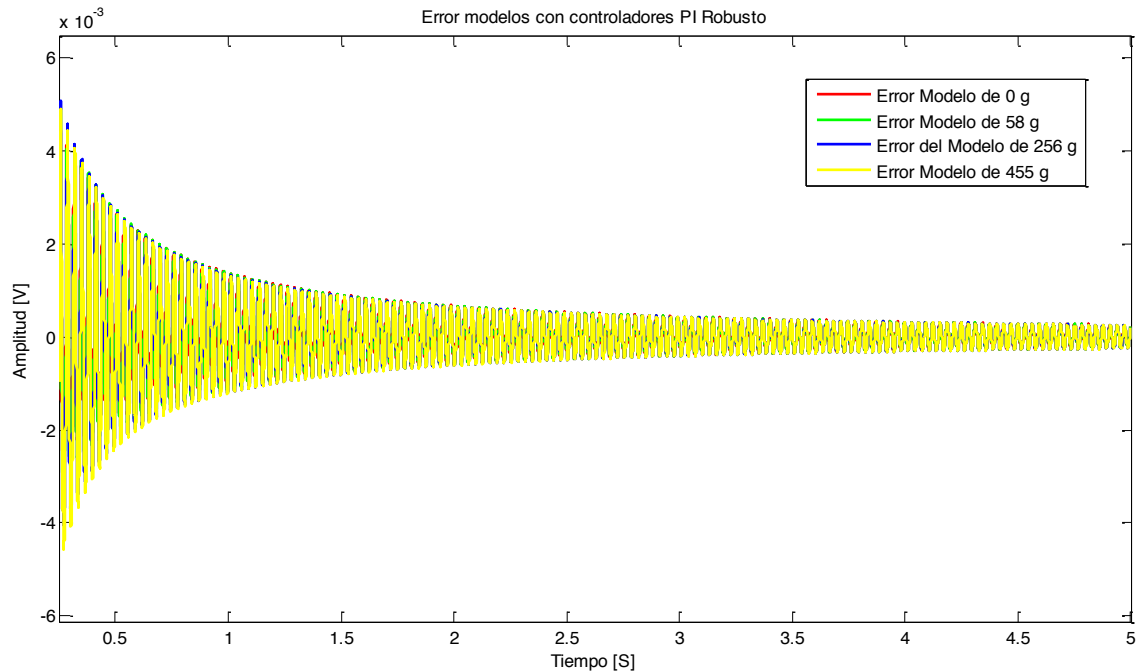
Fuente Autor

Figura 44. Error en todos los modelos del controlador Robusto sintonizado para el modelo nominal



Fuente: Autor

Figura 45. Error en todos los modelos del controlador Robusto sintonizado para el modelo nominal (2)



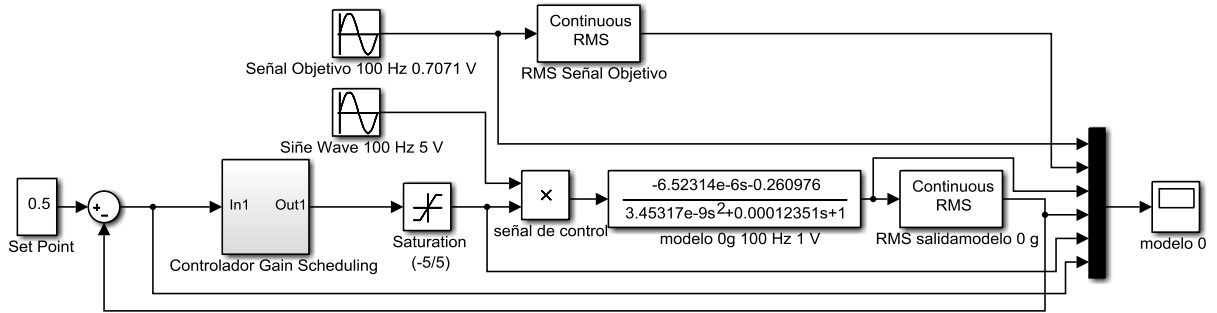
Fuente: Autor

5.3. Control Gain Scheduling con PI Robusto

Un controlador *Gain Schedule* o por planificación de ganancias se implementa en dos casos particularmente: el primero para controlar los sistemas no lineales, conformados por segmentos lineales, así que es posible asignar un controlador independiente para cada etapa del sistema. El segundo consiste en mejorar la resolución objetivo [18]

Para este caso en particular se requiere mejorar la resolución del sistema considerablemente, para ello se implementa un control *Gain Scheduling* aplicando a un diagrama como el que se muestra en la Figura 46 [19] y [20].

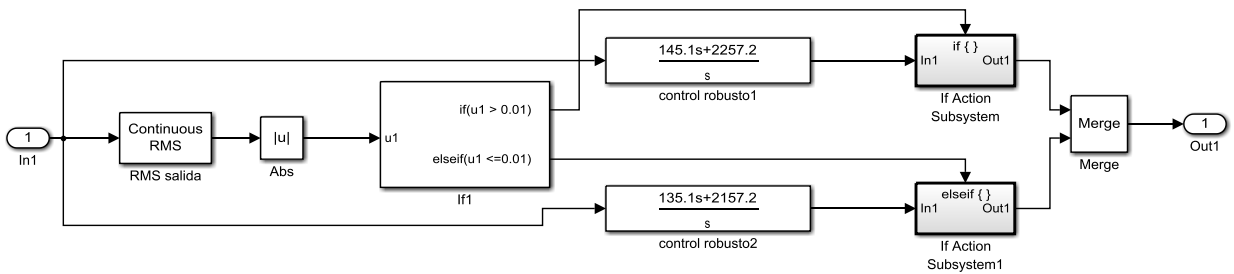
Figura 46. Diagrama de Simulink para la simulación del control Gain Scheduling



Fuente: Autor

La estructura del controlador *Gain Scheduling* implementado se muestra en la Figura 47. La señal de error se aplica al controlador y corresponde a la resta del *Set Point* (en RMS) y al valor RMS de la salida del sistema. Cuando la señal de error es mayor a 0.01 V, se utiliza un primer controlador PI Robusto, el cual recibe la señal de error y calcula la señal de control más apropiada. Si la señal de error es inferior a 0.01 V, se hace un cambio de controlador, que consiste en un segundo controlador PI Robusto de mayor resolución, permitiendo disminuir el error en un tiempo significativamente menor que el primer controlador. Haciendo que la combinación de controladores *Gain Scheduling* con PI robusto sea una estrategia de control eficiente.

Figura 47. Diagrama en Simulink subsistema controlador Gain Scheduling

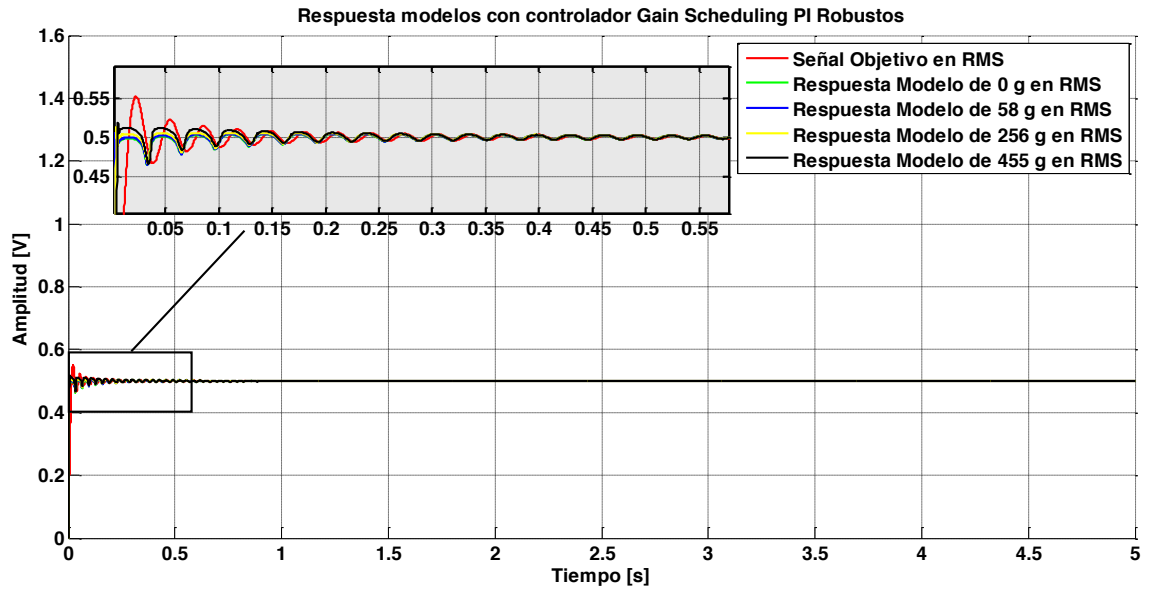


Fuente: Autor

$$C_{rbt} = \frac{145.1s + 2257.2}{s} \quad (29)$$

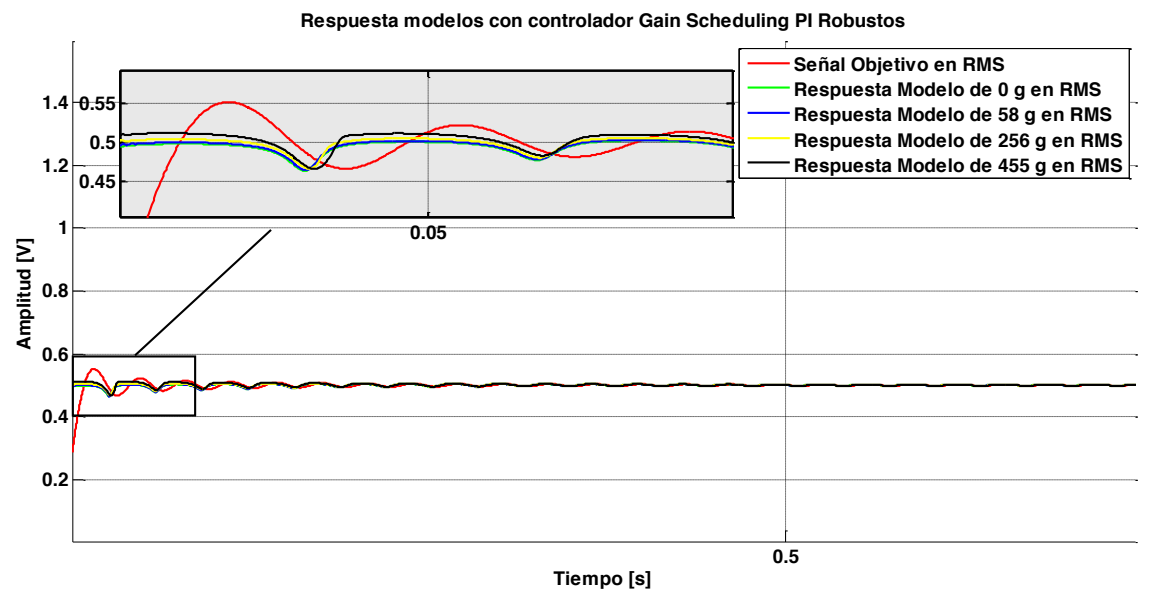
$$C_{rbi_f} = \frac{135.1s + 2157.2}{s} \quad (30)$$

Figura 48. Respuesta control Gain Scheduling con PI Robusto



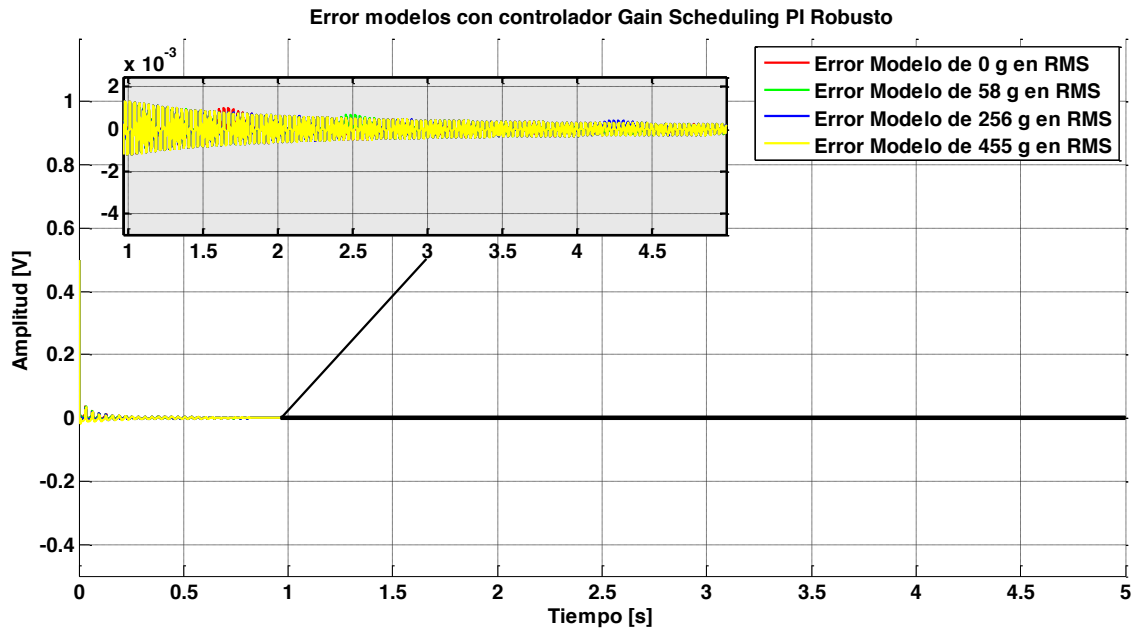
Fuente: Autor

Figura 49. Respuesta control Gain Scheduling con PI Robusto (2)



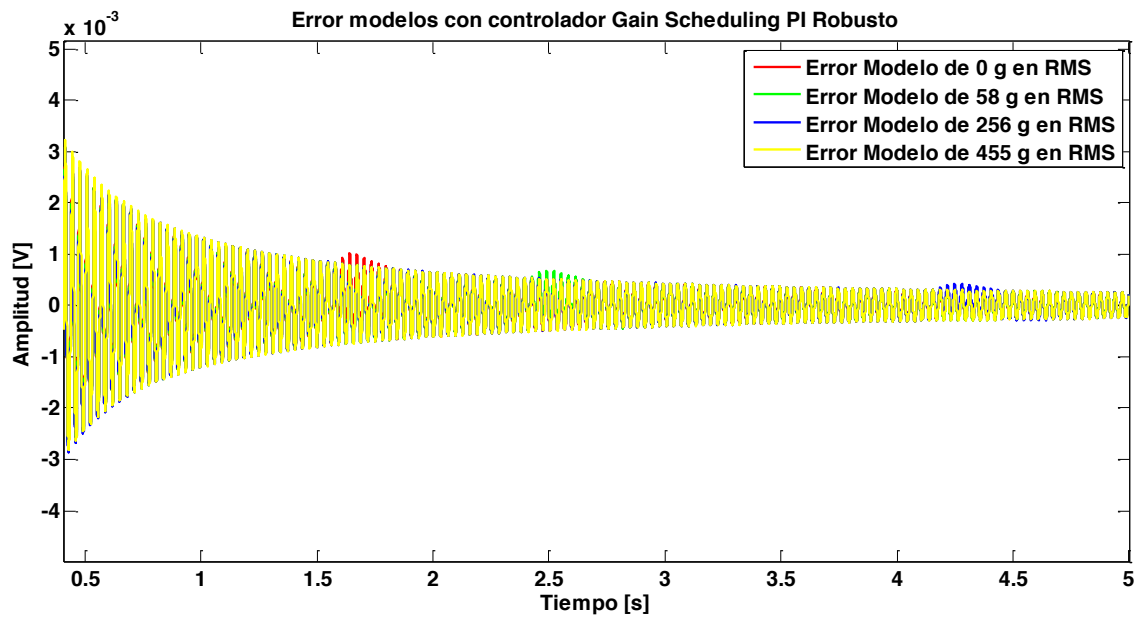
Fuente: Autor

Figura 50. Error de los modelos con el controlador Gain Scheduling con PI Robusto



Fuente: Autor

Figura 51. Error de los modelos con el controlador Gain Scheduling con PI Robusto



Fuente: Autor

5.4. Control adaptativo con modelo de referencia

Un controlador que sea capaz de variar sus parámetros es imprescindible al controlar un sistema con un modelo dinámico variable para conseguir un máximo rendimiento y una mayor eficiencia. El controlador adaptativo que se analiza, diseña e implementa, para este proyecto es un control adaptativo indirecto [21].

Un control adaptativo indirecto calcula la variación del modelo de la planta a partir de la comparación de los parámetros conocidos o nominales y los parámetros del modelo identificado [22]. El sistema realiza la identificación del modelo de la planta y lo compara con el modelo nominal de la misma. Con las variaciones calculadas al comparar los parámetros se determina la variación en los parámetros del controlador y posteriormente con ese ajuste del controlador se realiza la prueba de calibración [23]. La técnica usada es *off-line*, ya que el ajuste de los parámetros del controlador no se hace durante el proceso de control sino previamente a cada calibración.

Con la identificación actual del modelo dinámico de la planta y la comparación con el modelo nominal de la planta es posible calcular la variación en los parámetros de los dos controladores PI robustos que conforman el controlador *Gain Scheduling* [24].

La implementación de un controlador PI Robusto, garantiza la estabilidad y la incertidumbre en la planta, permitiendo que el sistema se mantenga dentro de los rangos de trabajo definidos. El controlador adaptativo final consta de dos controladores, uno rápido con el objetivo de llegar rápidamente al valor deseado y un segundo controlador lento con el objetivo de reducir el error y la incertidumbre en la calibración [25].

Los rangos de variación del controlador adaptativo, estarán basados en las ecuaciones lineales y cuadráticas obtenidas de la relación de comportamiento de

los diferentes controladores PI Robustos sintonizados para cada modelo identificado de la planta.

El análisis que se realiza con cada modelo que se describe a continuación:

1. Se estima una incertidumbre en cada modelo del 20% para cada parámetro, para ello se utilizó el programa del anexo 1.

Uncertain continuous-time state-space model with 1 outputs, 1 inputs, 8 states. The model uncertainty consists of the following blocks:

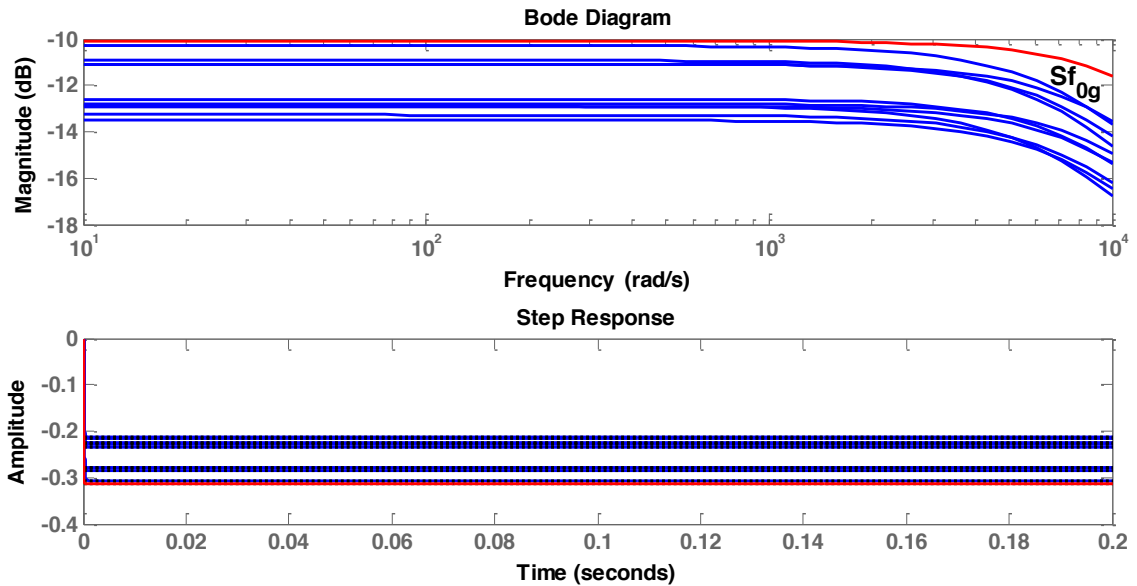
p1: Uncertain real, nominal = -6.52e-06, variability = [-20,20]%, 1 occurrences
p2: Uncertain real, nominal = -0.261, variability = [-20,20]%, 1 occurrences
p3: Uncertain real, nominal = 3.45e-09, variability = [-20,20]%, 1 occurrences

2. Se calcula y simplifica la función equivalente al peor caso de cada modelo identificado. La función equivalente al modelo identificado a 0 g con una incertidumbre del 20% como en (31):

$$Sf_{0g} = \frac{0.3132}{s-1}. \quad (31)$$

En la Figura 52 se analiza gráficamente con el diagrama de Bode la robustez del modelo que se identifica para 0 g. La curva roja describe el comportamiento del peor de los casos y las curvas azules, muestran los casos particulares que no son críticos, para un mismo modelo en un rango del 20% de incertidumbre.

Figura 52. Diagrama de bode en magnitud y amplitud para el análisis de robustez del modelo identificado con 0g para una incertidumbre en cada parámetro del 20%



Fuente: Autor

Una vez se ha definido el modelo con la variación de parámetro establecida, se procede a sintonizar el controlador, para esto se utiliza la herramienta *PIDtool* de Matlab. Se obtiene un primer controlador descrito en (32) con los parámetros de control y que actuara como sintonizador principal, realizando una variación rápida en la señal de control. El segundo controlador sintonizado (33) se realiza para cambios mucho más lentos en la señal de control, con el propósito de hacer pequeñas variaciones, minimizando el error y la incertidumbre de manera eficiente.

$$Cf_{0g1} = \frac{57.376s + 590.9728}{s} \quad (32)$$

$$Cf_{0g2} = \frac{8.9497s + 3.937868}{s} \quad (33)$$

El mismo proceso se realiza para los modelos de 58 g, 256 g y 455 g y se obtienen los siguientes modelos y controladores:

- Función del modelo de 58 g (34), controlador PI robusto sintonizado para una respuesta rápida o de paso grueso (35) y un controlador PI robusto sintonizado para una respuesta lenta o de paso fino (36).

$$Sf_{58g} = \frac{0.2388}{s-1} \quad (34)$$

$$Cf_{58g1} = \frac{75.233s + 774.8999}{s} \quad (35)$$

$$Cf_{58g2} = \frac{11.725s + 5.13555}{s} \quad (36)$$

- Función del modelo de 256 g (37), controlador PI robusto sintonizado para una respuesta de paso grueso (38) y un controlador PI robusto sintonizado de paso fino (39).

$$Sf_{256g} = \frac{0.1328}{s-1} \quad (37)$$

$$Cf_{256g12} = \frac{135.31s + 1393.693}{s} \quad (38)$$

$$Cf_{256g} = \frac{21.093s + 9.259827}{s} \quad (39)$$

- Función del modelo de 455 g (37), controlador PI robusto sintonizado para una respuesta de paso grueso (38) y un controlador PI robusto sintonizado de paso fino (39).

$$Sf_{455g} = \frac{0.09752}{s-1} \quad (40)$$

$$Cf_{455g1} = \frac{184.24s + 1897.672}{s} \quad (41)$$

$$Cf_{455g2} = \frac{28.772s + 12.630908}{s} \quad (42)$$

Con las funciones de los diferentes controladores sintonizados, se realiza una tabla para comparar los parámetros. En la Tabla 9 se ordenaron los parámetros de los controladores de sintonización rápida y en la Tabla 10 los parámetros de los controladores de sintonización lenta.

Se realiza una regresión lineal y con esto la caracterización de los parámetros de los controladores, lo que permite definir las ecuaciones de ajuste para los controladores PI Robustos que conforman el controlador *Gain Scheduling*.

Tabla 9. Parámetros del controlador rápido

Gramos	Control de sintonizacion rapida			
	Parametro 1	Parametro 2	P. Proporcional	P. Integral
0	57.376	590.9728	57.376	10.3
58	75.233	774.8999	75.233	10.3
256	135.31	1393.693	135.31	10.3
455	184.24	1897.672	184.24	10.3

Fuente: Autor

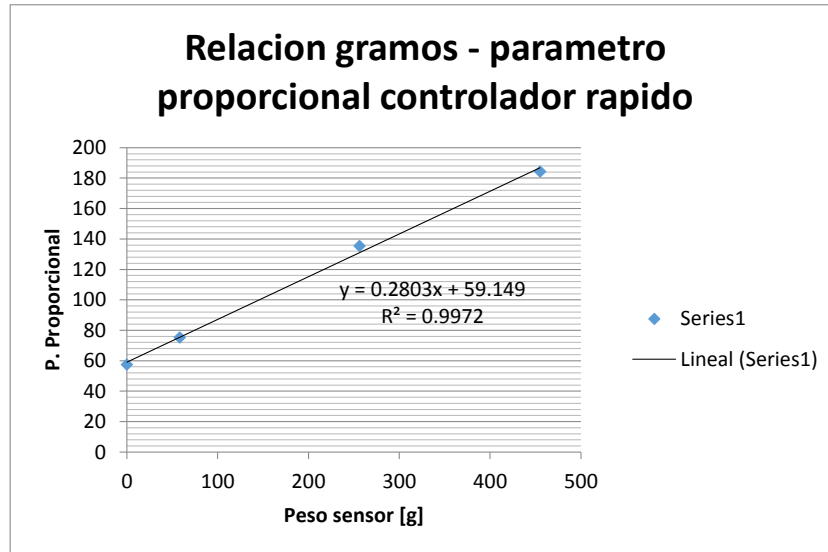
Tabla 10. Parámetros del controlador lento

Gramos	Control de sintonizacion lenta			
	Parametro 1	Parametro 2	P. Proporcional	P. Integral
0	8.9497	3.92788	8.9497	0.439
58	11.725	5.14155	11.725	0.439
256	21.093	9.259827	21.093	0.439
455	28.772	12.630908	28.772	0.439

Fuente: Autor

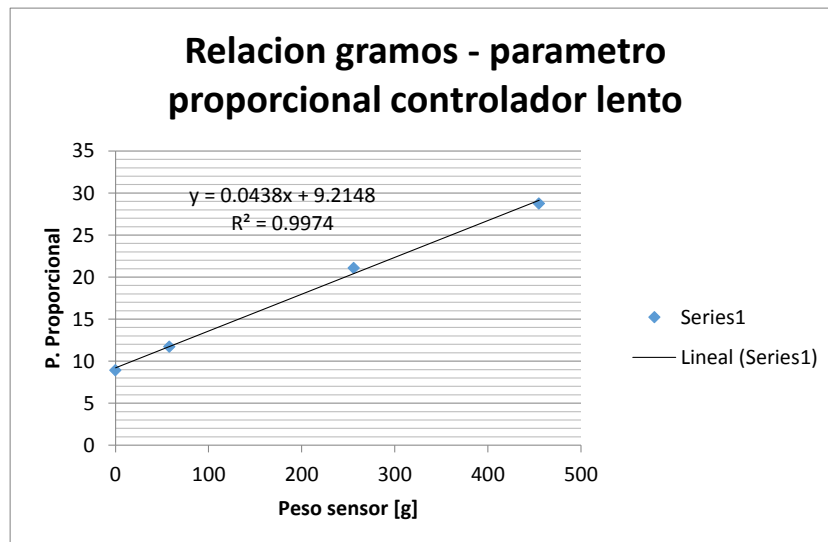
En la Figura 53 se muestra el comportamiento del parámetro variable en el controlador de sintonización rápida y su respectiva ecuación característica en (43). En la Figura 54 se realiza el mismo proveimiento, pero en este caso en el controlador de sintonización lenta y su respectiva ecuación en (44).

Figura 53. Relación de la constante proporcional con la variación en gramos del controlador rápido



Fuente: Autor

Figura 54. Relación de la constante proporcional con la variación en gramos controlador lento

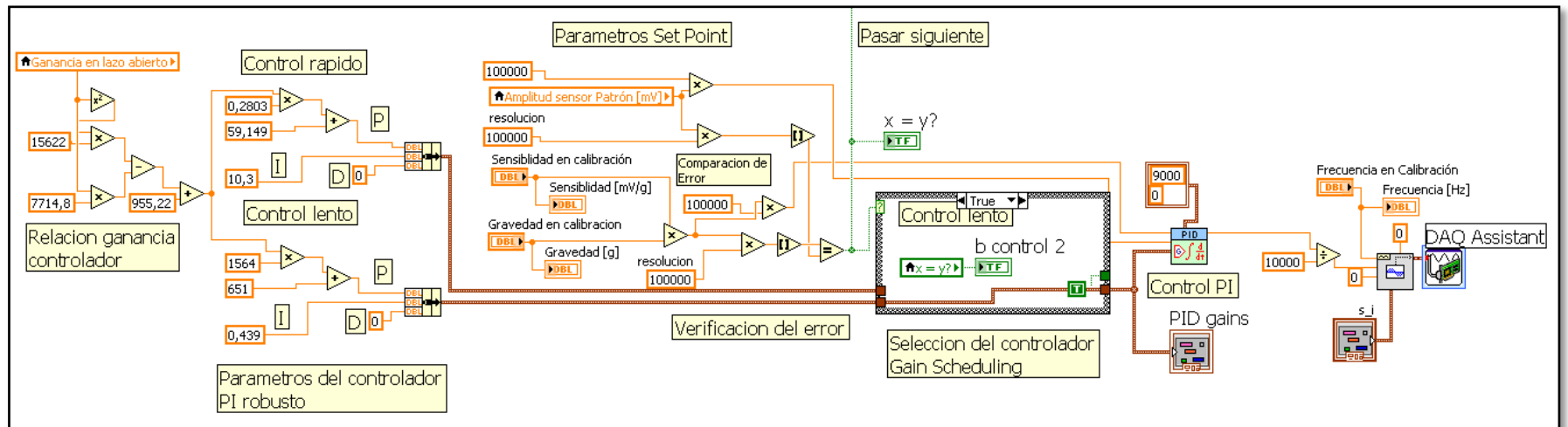


Fuente: Autor

Una vez caracterizada la ecuación de variación de los parámetros del controlador adaptativo se procede a la implementación en LabView. En la

Figura 55 se muestra el controlador final implementado para la calibración de sensores. Posterior al proceso de identificación se calcula la ganancia en lazo abierto del sistema. Con la ganancia y las ecuaciones (44) y (45) se calculan los dos controladores PI Robustos. Cuando inicia el proceso de calibración se realiza una verificación del error en línea. El controlador *Gain Scheduling* se encarga de seleccionar uno de los dos controladores sintonizados: si el error supera un valor de 100 mV, el controlador seleccionado es de sintonización rápida, una vez el error alcanza un valor sea inferior de 100 mV, se alterna al controlador de sintonización fina, el cual se encarga de disminuir el error con una precisión que puede alcanzar 100 μ V.

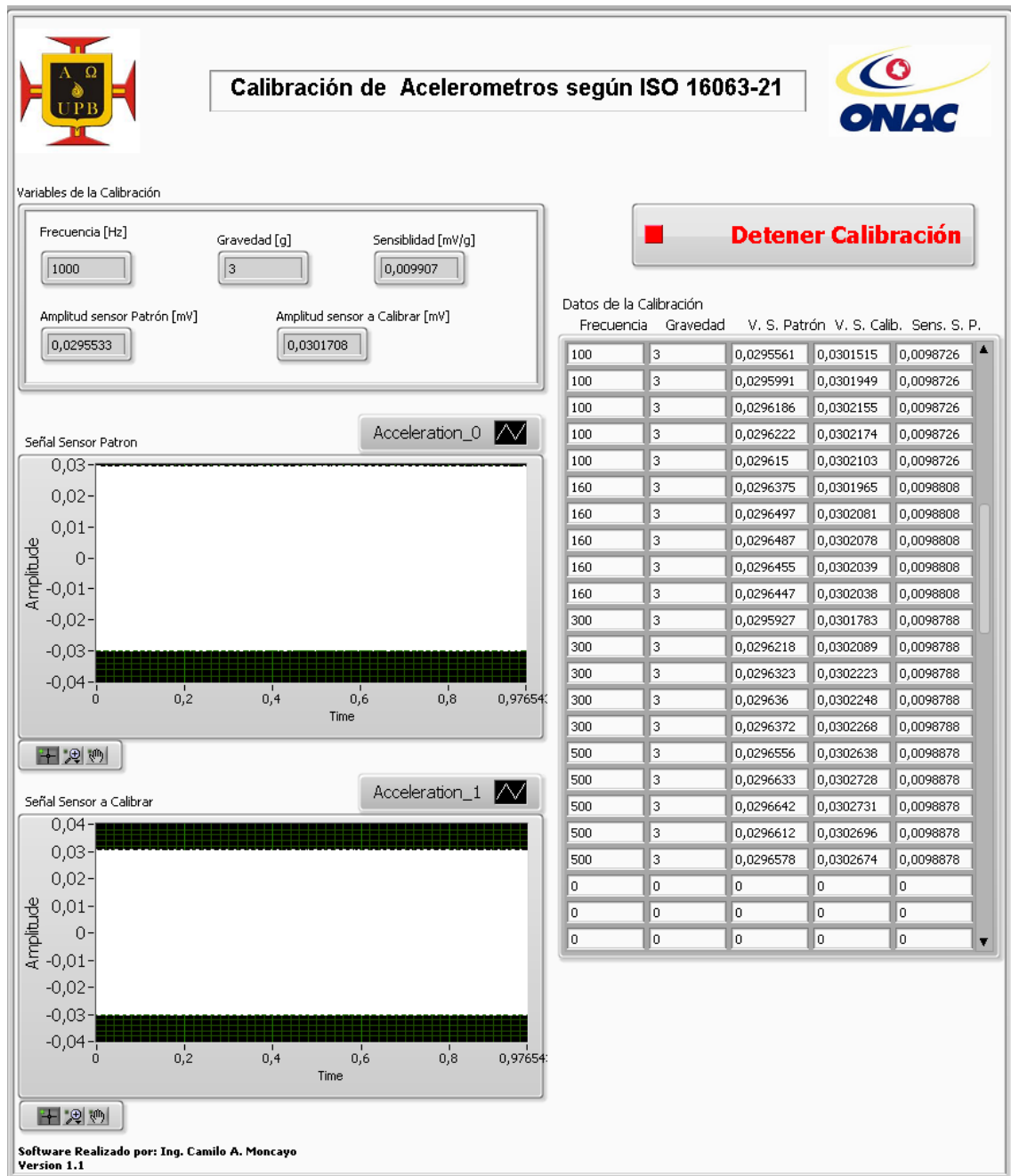
Figura 55. Controlador Adaptativo implementado en Labview



Fuente: Autor

En la Figura 56 se muestran los resultados de una calibración, implementado el controlador adaptativo, y con una repetibilidad en los datos de cinco cifras decimales.

Figura 56. Resultados calibración con controlador adaptativo



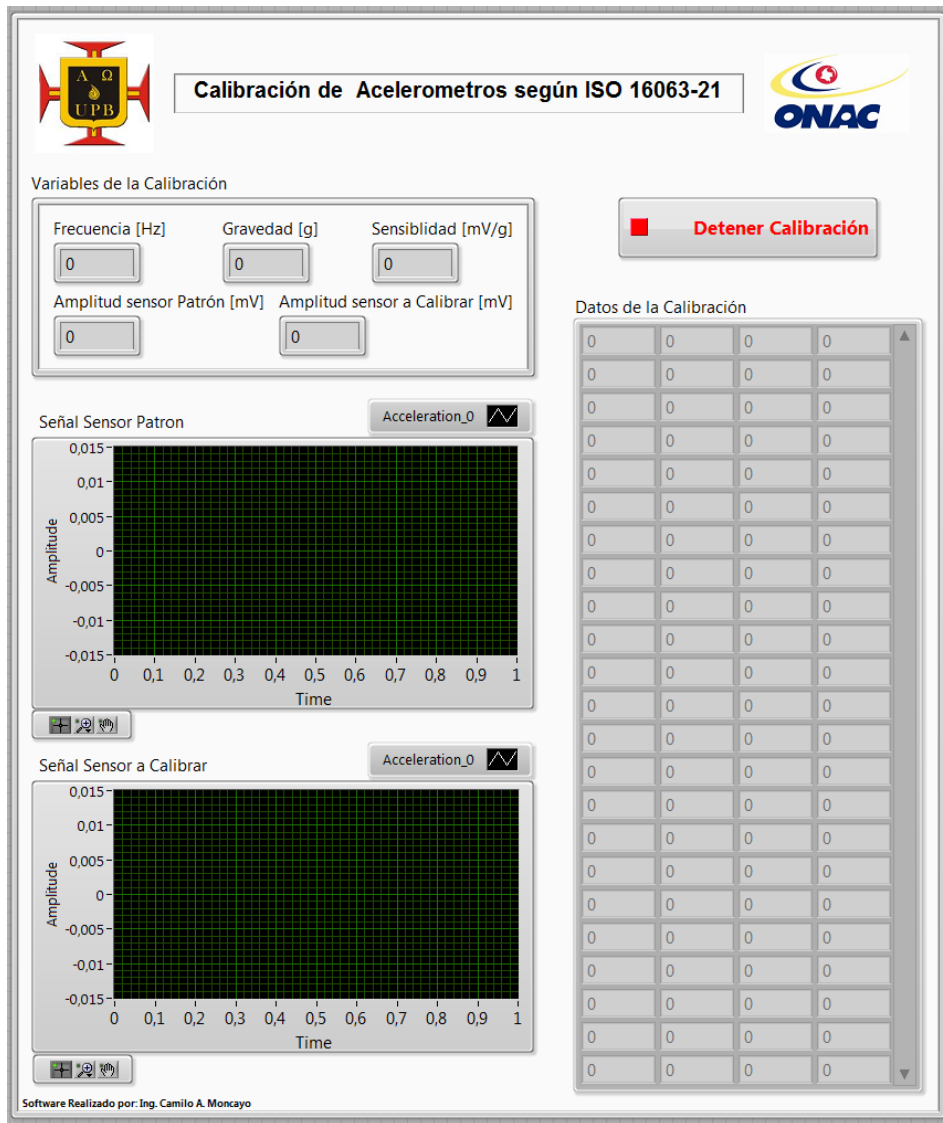
Fuente: Autor

6. Software para la calibración de sensores de vibración

6.1. Interfaz gráfica

El software diseñado se desarrolla en el lenguaje gráfico de LabView tal y como se muestra en la Figura 57. El software funciona de manera intuitiva para el usuario y lo guía a través del proceso de calibración.

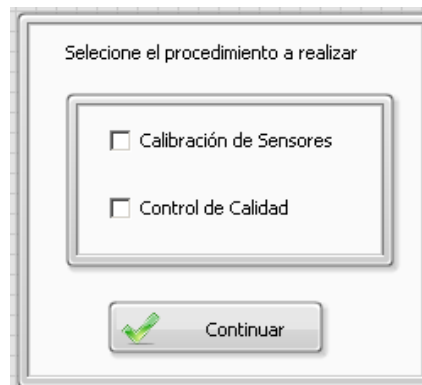
Figura 57. Interfaz gráfica del software para la calibración de sensores



Fuente: Autor

Una vez se ejecuta el programa, un cuadro de dialogo le solicita al usuario que elija: si desea calibrar un sensor o si desea hacer un control de calidad del sistema, ver la Figura 58. El control de calidad del software consiste en una calibración que se repite cuatro veces, el objetivo de este procedimiento, según la norma, es verificar periódicamente la precisión (repetibilidad) del sistema de calibración.

Figura 58. Menú para la selección de procedimiento



Fuente: Autor

El procedimiento de control de calidad cuenta con un paso más que consiste en la selección de la repetición en la que se encuentra el proceso, así como se muestra en la Figura 59.

Figura 59. Menú para la selección del número de repetición en el procedimiento de control de calidad.



Fuente: Autor

En el siguiente paso se seleccionan las frecuencias para las cuales se desea hacer la calibración o el control de calidad, tal y como se muestra en la Figura 60.

Figura 60. Menú de elección de frecuencias

Seleccione las frecuencias a Calibrar

Marcar Todos
OK

Desmarcar Todos
OK

- 5 Hz
- 10 Hz
- 15 Hz
- 30 Hz
- 50 Hz
- 100 Hz
- 160 Hz
- 300 Hz
- 500 Hz
- 1000 Hz
- 1500 Hz
- 2000 Hz
- 3000 Hz
- 4000 Hz
- 5000 Hz
- 6000 Hz
- 7000 Hz
- 8000 Hz
- 9000 Hz
- 10000 Hz

Continuar

Fuente: Autor

El software impide al usuario la opción de continuar, si no ha seleccionado por lo menos una frecuencia y permite seleccionar o deseleccionar todas las casillas para facilitar la operación.

Una vez seleccionadas las frecuencias a calibrar se procede a seleccionar las gravedades para cada frecuencia de trabajo, esto se muestra en la Figura 61.

Según la norma es posible realizar un proceso de calibración para la misma gravedad, pero dependiendo de la aplicación en la que se esté utilizando el sensor se debe calibrar para diferentes gravedades.

Figura 61. Menú selección de gravedades para cada frecuencia

Seleccione las amplitudes a evaluar

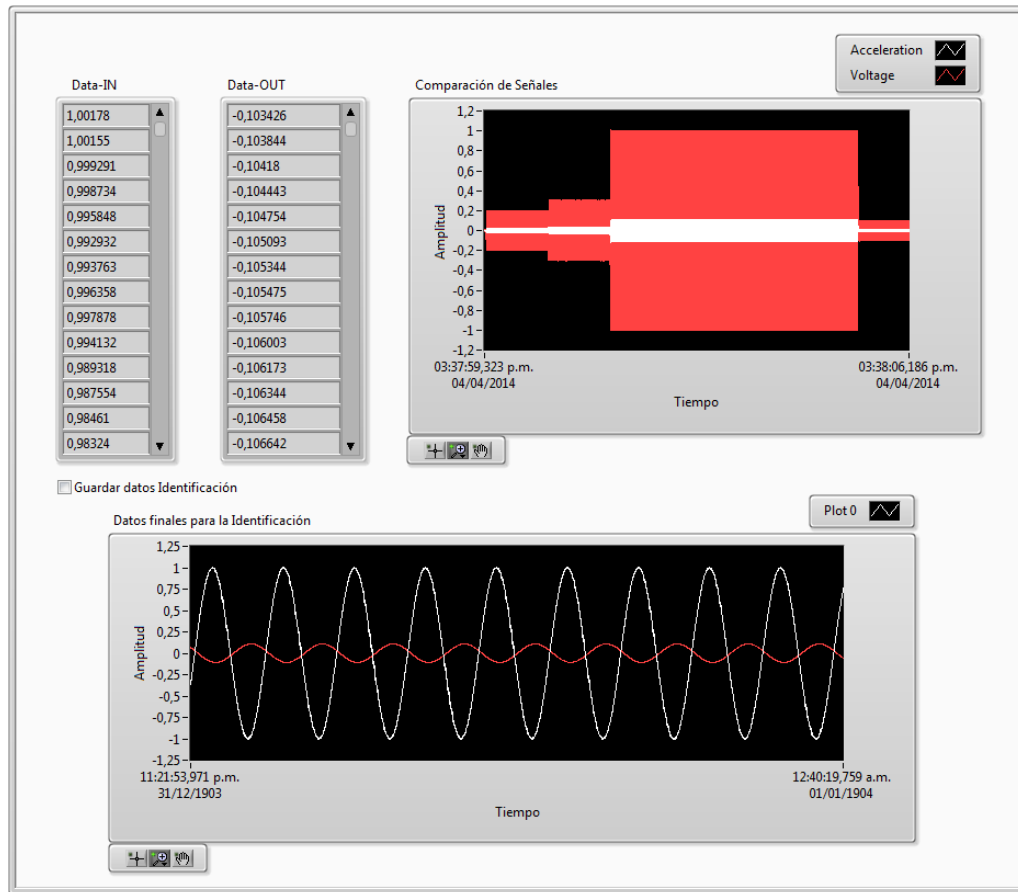
	Gravedad 1	Gravedad 2	Gravedad 3	Gravedad 4	Gravedad 5
<input checked="" type="checkbox"/> 5 Hz	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<input checked="" type="checkbox"/> 10 Hz	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<input checked="" type="checkbox"/> 15 Hz	0,7	0,7	0,5 1 1,5 2 2,5	0,7	0,7
<input checked="" type="checkbox"/> 30 Hz	0,7	0,7	3	0,7	0,7
<input checked="" type="checkbox"/> 50 Hz	3	3	3,5 4 4,5 5	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 100 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 160 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 300 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 500 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 1000 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 1500 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 2000 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 3000 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 4000 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 5000 Hz	3	3	3	3	3
<input checked="" type="checkbox"/> 6000 Hz	3	3	3	3	3

Fuente: Autor

Realizada la selección de frecuencias y de amplitudes se procede a realizar el procedimiento de calibración seleccionado por el usuario de manera automática.

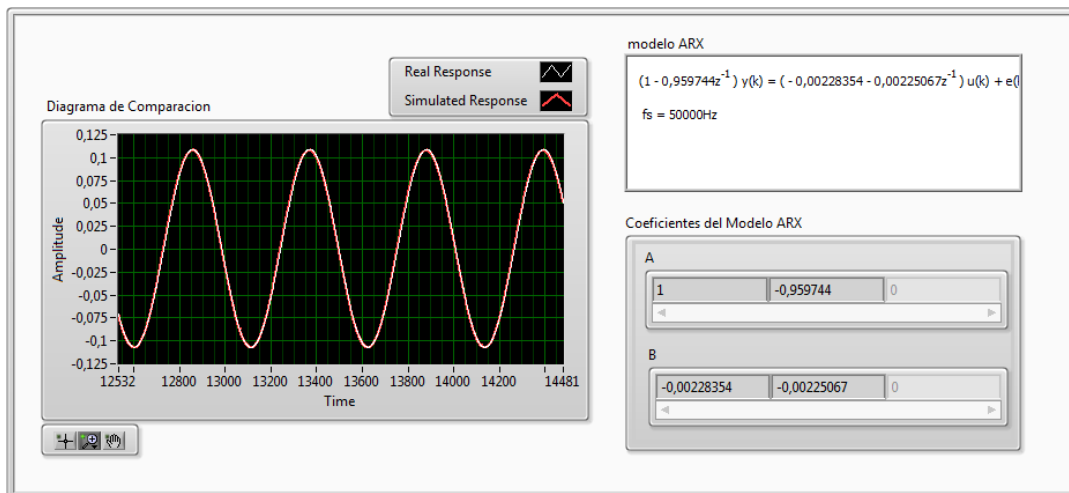
Inicialmente el programa corre la identificación de la planta, como se muestra en la Figura 62. En este paso se calcula la ganancia en lazo abierto de la planta. A continuación el software muestra el ajuste de la planta identificada con los datos adquiridos por el sistema como se muestra en Figura 63. El usuario, si registra una anomalía en este paso, puede detener el programa y hacer la revisión de errores en el montaje.

Figura 62. Identificación del modelo dinámico de la planta



Fuente: Autor

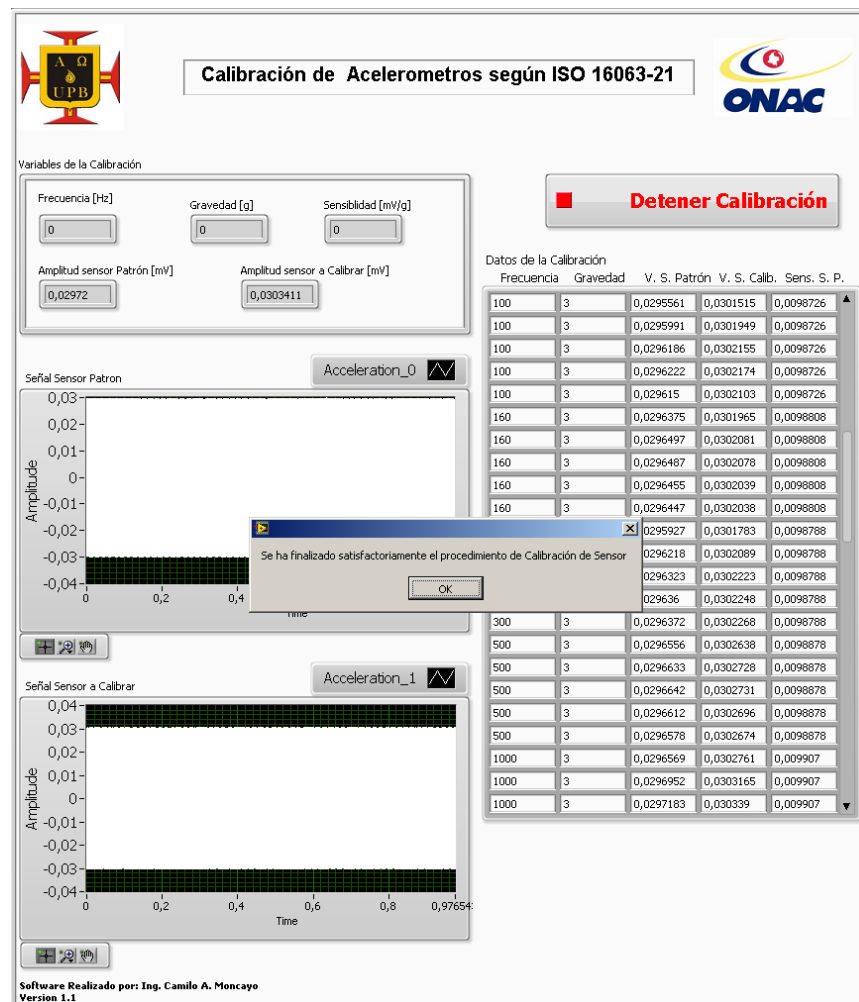
Figura 63. Ajuste del modelo identificado con los datos adquiridos de la planta



Fuente: Autor

Identificado el sistema y calculada la ganancia en lazo abierto se ajustan los parámetros de los controladores PI Robustos, inmersos en el controlador Gain Scheduling. Con todos los parámetros configurados, se inicia el proceso de calibración, como se muestra en la Figura 64, el software calcula cinco puntos de amplitud (el usuario define si iguales o diferentes) por cada frecuencia, registra la frecuencia, la gravedad, el voltaje del sensor patrón, el voltaje del sensor a calibrar y la sensibilidad del sensor patrón en cada punto, hasta completar el barrido solicitado por el usuario. Posteriormente los datos son importados para su análisis e impresión del certificado.

Figura 64. Finalización del procedimiento de calibración.



Fuente: Autor

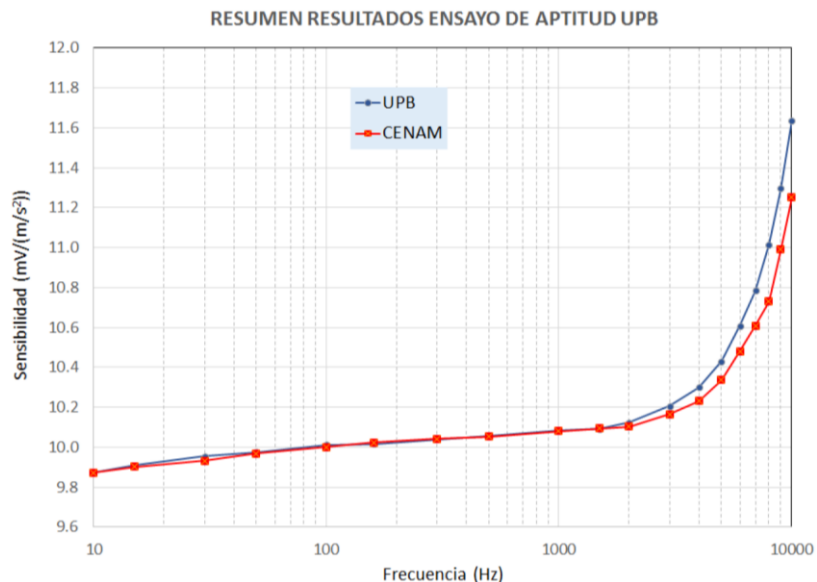
7. Validación del sistema de calibración de sensores

En el proceso de validación del Software y como parte del desarrollo de un laboratorio certificado de calibración para sensores de vibración basada en la norma ISO-16063-21, es requisito del Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) la evaluación por parte de un laboratorio acreditado.

Para cumplir con esta exigencia el Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana contrato al Centro Nacional de Metrología de México (CENAM), quienes dictaminaron por medio del Informe de “Ensayo de Aptitud en la Calibración de un Acelerómetro por comparación conforme a la norma ISO IEC 16063-21” (CNM-EA-510-008/2014), Anexo 2, que el Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga es **APTO** para realizar la calibración de un acelerómetro por comparación conforme a la norma ISO 16063-21.

En la Figura 65 se muestra la comparación entre la calibración realizada por el software desarrollado en esta tesis y la calibración realizada por el CENAM.

Figura 65. Resumen del ensayo de calibración para la evaluación del laboratorio.



Fuente: Centro Nacional de Metrología de México

8. Conclusiones

- Se realizó la identificación de un modelo de referencia para el dispositivo de vibración *Shaker*. El proceso de identificación no sólo fue utilizado para hallar el modelo nominal de la planta, sino que hace parte del controlador adaptativo que permite inferir las variaciones en la dinámica de la planta a partir de la comparación del modelo nominal con el modelo identificado en cada calibración.
- Se diseñó e implemento un controlador adaptativo con modelo referencia off-line, basado en un sistema *Gain Scheduling* con el propósito de reducir el error, mejorar la resolución y aumentar la precisión del sistema. Igualmente es importante resaltar que los controladores sintonizados para el sistema *Gain Scheduling* son PI robustos.
- Se diseñó e implemento una aplicación sobre la plataforma software LabView capaz de hacer de manera automática la calibración de sensores de vibración basado en la norma ISO 16063-21, la plataforma cuenta con una interfaz de usuario muy intuitiva que facilita al usuario el procedimiento de calibración.
- Se logró validar la aplicación desarrollada para la calibración de sensores de vibración con el CENAM. En el punto de la validación referente a la consistencia de los datos obtenidos, punto en el que fue principalmente evaluado los datos que entregaba el software realizado en esta tesis, se obtuvo una calificación de 50/50, con lo que se favoreció al Laboratorio de Vibraciones para ser evaluado como APTO para la calibración de sensores de vibración basado en la norma ISO-16063-21 (anexo 2).

- Finalmente y con la evaluación favorable del CENAM se obtuvo la acreditación por parte de la ONAC para la calibración de sensores de vibración (anexo 3).

Bibliografía

- [1] A. E. Summers and S. Solutions, “ANSI / ISA 84 . 00 . 01-2004 and Existing Safety Instrumented Systems,” no. August, pp. 1–6, 2005.
- [2] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (ICONTEC), “Ntc-Iso10012,” p. 22, 2003.
- [3] P. N. Saavedra, “La Medicion Y Analisis De Las Vibraciones Como Tecnica De Inspeccion De Equipos Y Componentes , Aplicaciones ,,”
- [4] A. E. Summers, “Techniques for assigning a target safety integrity level,” *ISA Trans.*, vol. 37, no. 2, pp. 95–104, 1998.
- [5] I. Standard, “International Standard ISO 16063-21. Methods for the calibration of vibration and shock transducers,” vol. 2003, 2010.
- [6] Icontec, “Norma Técnica Colombiana Ntc-Iso / IEC 17025. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibracion.,” p. 49, 2005.
- [7] “Accelerometer Calibration Workstation | Calibration | The Modal Shop, Inc.” [Online]. Available: <http://www.modalshop.com/calibration/Turnkey-Accelerometer-Calibration-Workstation?ID=77>. [Accessed: 03-May-2015].
- [8] “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE GUIAS DE PRÁCTICAS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN UN SISTEMA ROTOR KIT,” 2011.
- [9] “Base de datos de vibraciones para analisis de fallas en rodamientos de bolas,” 2009.
- [10] P. B. Shull and R. V. Gonzalez, “Real-time haptic-teleoperated robotic system for motor control analysis,” *J. Neurosci. Methods*, vol. 151, no. 2, pp. 194–199, 2006.
- [11] K. J. Åström and B. Wittenmark, “Adaptive control,” 2013.
- [12] L.-L. Fan and Y.-D. Song, “Neuro-adaptive model-reference fault-tolerant control with application to wind turbines.,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 6, no. 4, pp. 475–486, 2012.
- [13] M. H. a Jalil, M. N. Taib, M. H. F. Rahiman, N. N. Nordin, and N. Kasuan, “Model reference adaptive control (MRAC) without integral for glycerin

bleaching process,” *Proc. - 2014 IEEE 10th Int. Colloq. Signal Process. Its Appl. CSPA 2014*, pp. 111–116, 2014.

- [14] Q. Wei and D. Liu, “Adaptive Dynamic Programming for Optimal Tracking Control of Unknown Nonlinear Systems With Application to Coal Gasification,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–15, 2013.
- [15] P. Swarnkar, S. Jain, and R. K. Nema, “Effect of Adaptation Gain in Model Reference Adaptive Controlled Second Order System.,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 70–75, 2011.
- [16] H. Li, Z. Sun, B. Chen, and H. Liu, “Intelligent Scheduling Controller Design for Networked Control Systems Based on Estimation of Distribution Algorithm,” *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 71–77, 2008.
- [17] N. I. Corporation, *LabVIEW, System Identification Toolkit User Manual*, no. 371001. 2004, pp. 1–87.
- [18] B. Niu and H. Zhang, “Model based control of industrial robot and implementation of its gain scheduling robust control,” *IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, Phuket, Tail.*, pp. 2156–2162, 2011.
- [19] S. Cui, Y. Takagi, H. Ukai, H. Kando, K. Nakamura, and H. Fujita, “Design of power system stabilizer based on robust gain scheduling control theory,” *PowerCon 2000. 2000 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc. (Cat. No.00EX409)*, vol. 3, pp. 1191–1196, 2000.
- [20] R. Z. R. Zhang, a. G. Alleyne, and D. E. Carter, “Robust gain scheduling control of an earthmoving vehicle powertrain,” *Proc. 2003 Am. Control Conf. 2003.*, vol. 6, pp. 4969–4974, 2003.
- [21] F. Blanchini and S. Miani, “Gain scheduling versus robust control of LPV systems: The output feedback case,” *Am. Control Conf. (ACC), 2010*, pp. 3871–3876, 2010.
- [22] D. L. Mattern and R. Shoureshi, “Model reference adaptive control - a perspective,” vol. WA6–10:3, pp. 201–206.
- [23] Z. Qu, S. Member, J. F. Dorsey, S. Member, and D. M. Dawson, “of a Class of SISO Systems,” vol. 39, no. 11, 1994.
- [24] R. a. Bergamaschi, S. Raje, I. Nair, and L. Trevillyan, “Control-flow versus data-flow-based scheduling: Combining both approaches in an adaptive

scheduling system,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 82–100, 1997.

- [25] M. Ahmed and F. Svaricek, “Adaptive robust gain scheduled control of vehicle semi-active suspension for improved ride comfort and road handling,” *2013 IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM 2013*, pp. 376–381, 2013.

Anexo 1

Código para obtener el modelo nominal de la planta

```
s=zpk('s');
p1=ureal('p1',-2.52843e-5,'percent',[-361 106] )
parámetros
p2=ureal('p2',-0.162985675,'percent',[-260 150])
p3=ureal('p3',1.48736e-7,'percent',[-98 175])
p4=ureal('p4',0.000620725,'percent',[-80 126])
F=(p1*s+p2)/(p3*s^2+p4*s+1);

Tnom=zpk(F.nominal);
maxrealpole=max(real(pole(Tnom)));
[StabilityMargin,Udestab,REPORT]=robuststab(F);
REPORT;
Udestab;
[PeakGain,Uwc]=wcgain(F);
PeakGain;
Twc=usubs(F,Uwc);
Trand=usample(F,10);
clf;
subplot(211),bodemag(Trand,'b',Twc,'r',{10 10000});
subplot(212),step(Trand,'b',Twc,'r',0.2);
[a,b]=ss2tf(Twc.a,Twc.b,Twc.c,Twc.d);
sys=tf(a,b);
sys_final=minreal(sys);

%Definir variable s
%Definir los
%con incertidumbre y
%los porcentajes de
%cada una
%Se define la Función
%con los parámetros
%Función nominal
%Polo Máximo
%Reporte estabilidad

%Ganancia

%Peor Caso
%Numero de Casos

%Diagrama de Bode

%Sistema hallado
%Simplificación
```

Resultado del programa

```
> Codigo_Modelo_Nominal
parametro 1
```

```
p1 =
```

```
Uncertain real parameter "p1" with nominal value -2.53e-05
and variability [-361,106]%.

```

```
parametro 2
```

```
p2 =
```

```
Uncertain real parameter "p2" with nominal value -0.163 and
variability [-260,150]%.

```

```
parametro 3
```

```
p3 =
```

Uncertain real parameter "p3" with nominal value 1.49e-07 and variability [-98,175]%.
parametro 4

p4 =

Uncertain real parameter "p4" with nominal value 0.000621 and variability [-80,126]%.
Funcion con las incertidumbre

F =

Uncertain continuous-time state-space model with 1 outputs, 1 inputs, 8 states.

The model uncertainty consists of the following blocks:

p1: Uncertain real, nominal = -2.53e-05, variability = [-361,106]%, 1 occurrences
p2: Uncertain real, nominal = -0.163, variability = [-260,150]%, 1 occurrences
p3: Uncertain real, nominal = 1.49e-07, variability = [-98,175]%, 1 occurrences
p4: Uncertain real, nominal = 0.000621, variability = [-80,126]%, 1 occurrences

Type "F.NominalValue" to see the nominal value, "get(F)" to see all properties, and "F.Uncertainty" to interact with the uncertain elements.

Funcion Nominal

Tnom =

$$\frac{-169.99 (s+6446)}{(s^2 + 4173s + 6.723e06)}$$

Continuous-time zero/pole/gain model.

Maximo polo

maxrealpole =

$$-2.0867e+03$$

Reporte de la funcion con incertudumbres
valor de los parametros que causan inestabilidad
maxima ganancia del sistema

PeakGain =

LowerBound: 3.1276
 UpperBound: 3.1329
 CriticalFrequency: 1.5842e+03

Uwc =

p1: -1.1656e-04
 p2: -0.5867
 p3: 3.9844e-07
 p4: 1.2414e-04

PeakGain =

LowerBound: 3.1276
 UpperBound: 3.1329
 CriticalFrequency: 1.5842e+03

Peor caso

Twc =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0
	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0

x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-1	0
x14	0	0	0	0	-1
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.9705	0	0	0	-1
x16	0	-1	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0

```

x4      0
x5      0
x6      0
x7      0
x8     -1
x9      0
x10     0
x11     0
x12     0
x13     0
x14     0
x15     0
x16     0

```

```

c =
      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05      0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1  0.006437  0.5568      0      0

```

```

d =
      u1
y1      0

```

```

e =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6      x7      x8      x9      x10
x1      0      1      0      0      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      1      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      1      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0      1      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

      x11      x12      x13      x14      x15      x16

```

```

x1      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0

```

Continuous-time state-space model.

numero de casos a evaluar

Trand(:, :, 1, 1) =

```

a =
      x1      x2      x3      x4      x5
x1      1      0      0      0      0
x2      0      1      0      0      0
x3      0      0      1      0      0
x4      0      0      0      1      0
x5      0      0      0      0      1
x6      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0
x8      0      0      1.487e-07  0      0
x9      0.006437  0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0
x11     0      0      0.0004323  0      0
x12     0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0

      x6      x7      x8      x9      x10
x1      0      0      0      0      0
x2      0      0      -1     0      0
x3      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0
x5      0      0      -1     0      0
x6      1      0      0      0      0
x7      0      1      -1     0      0
x8      0.0006207  0      1      0      0

```

x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.3441	0
x14	0	0	0	0	0.7682
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.3833	0	0	0	-1
x16	0	-0.3075	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0

```

x5    0
x6    0
x7    0
x8   -1
x9    0
x10   0
x11   0
x12   0
x13   0
x14   0
x15   0
x16   0

```

```

c =
      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05  0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1  0.006437  0.5568  0      0

```

```

d =
      u1
y1  0

```

```

e =
      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1    0  1  0  0  0  0  0  0  0  0
x2    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x3    0  0  0  1  0  0  0  0  0  0
x4    0  0  0  0  1  0  0  0  0  0
x5    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x6    0  0  0  0  0  0  1  0  0  0
x7    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x8    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x9    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x10   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x11   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x12   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x13   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x14   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x15   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x16   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0

      x11  x12  x13  x14  x15  x16
x1    0   0   0   0   0   0

```

```

x2      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0

```

Trand(:, :, 2, 1) =

```

a =
      x1      x2      x3      x4      x5
x1      1      0      0      0      0
x2      0      1      0      0      0
x3      0      0      1      0      0
x4      0      0      0      1      0
x5      0      0      0      0      1
x6      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0
x8      0      0      1.487e-07  0      0
x9      0.006437  0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0
x11     0      0      0.0004323  0      0
x12     0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0

      x6      x7      x8      x9      x10
x1      0      0      0      0      0
x2      0      0      -1     0      0
x3      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0
x5      0      0      -1     0      0
x6      1      0      0      0      0
x7      0      1      -1     0      0
x8      0.0006207  0      1      0      0
x9      0      0      0      -1     0
x10     0      0      0.5568  0      -1
x11     0      0      0      0      0
x12     0.02465  0      0      0      0

```

x13	0	0	0	0.6059	0
x14	0	0	0	0	0.09627
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.958	0	0	0	-1
x16	0	-0.1627	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1

```

x9      0
x10     0
x11     0
x12     0
x13     0
x14     0
x15     0
x16     0

```

```

c =
      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05      0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1  0.006437  0.5568      0      0

```

```

d =
      u1
y1      0

```

```

e =
      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1      0  1  0  0  0  0  0  0  0  0
x2      0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x3      0  0  0  1  0  0  0  0  0  0
x4      0  0  0  0  1  0  0  0  0  0
x5      0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x6      0  0  0  0  0  0  1  0  0  0
x7      0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x8      0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x9      0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x10     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x11     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x12     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x13     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x14     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x15     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x16     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0

      x11  x12  x13  x14  x15  x16
x1      0  0  0  0  0  0
x2      0  0  0  0  0  0
x3      0  0  0  0  0  0
x4      0  0  0  0  0  0
x5      0  0  0  0  0  0

```

x6	0	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0

Trand(:, :, 3, 1) =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	0.999	0
x14	0	0	0	0	-0.262
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	-0.4335	0	0	0	-1
x16	0	-0.6886	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0

```

x13  0
x14  0
x15  0
x16  0

```

```

c =
      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05      0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1  0.006437  0.5568      0      0

```

```

d =
      u1
y1  0

```

```

e =
      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1      0   1   0   0   0   0   0   0   0
x2      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x3      0   0   0   1   0   0   0   0   0   0
x4      0   0   0   0   1   0   0   0   0   0
x5      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x6      0   0   0   0   0   0   1   0   0   0
x7      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x8      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x9      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x10     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x11     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x12     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x13     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x14     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x15     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x16     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0

      x11  x12  x13  x14  x15  x16
x1      0   0   0   0   0   0
x2      0   0   0   0   0   0
x3      0   0   0   0   0   0
x4      0   0   0   0   0   0
x5      0   0   0   0   0   0
x6      0   0   0   0   0   0
x7      0   0   0   0   0   0
x8      0   0   0   0   0   0
x9      0   0   0   0   0   0

```

```

x10    0    0    0    0    0    0
x11    0    0    0    0    0    0
x12    0    0    0    0    0    0
x13    0    0    0    0    0    0
x14    0    0    0    0    0    0
x15    0    0    0    0    0    0
x16    0    0    0    0    0    0

```

Trand(:, :, 4, 1) =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	0.962	0
x14	0	0	0	0	-0.5833
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0

x3	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0	0
x11	-1	0	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0	0
x14	0	0	0	-1	0	0
x15	-0.7324	0	0	0	0	-1
x16	0	0.638	0	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0
x13	0
x14	0
x15	0
x16	0

```

c =
      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05      0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1  0.006437  0.5568      0      0

```

```

d =
      u1
y1      0

```

```

e =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6      x7      x8      x9      x10
x1      0      1      0      0      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      1      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      1      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0      1      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

      x11     x12     x13     x14     x15     x16
x1      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0

```

```

x14    0    0    0    0    0    0
x15    0    0    0    0    0    0
x16    0    0    0    0    0    0

```

Trand(:, :, 5, 1) =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.7459	0
x14	0	0	0	0	-0.1181
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0

x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.3706	0	0	0	-1
x16	0	0.2498	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0
x13	0
x14	0
x15	0
x16	0

c =

	x1	x2	x3	x4
y1	-2.528e-05	0	0	0

	x5	x6	x7	x8
y1	0	0	0	-0.163

	x9	x10	x11	x12
y1	0	0	0	0

	x13	x14	x15	x16
y1	0.006437	0.5568	0	0

d =

	u1
y1	0

e =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15	x16
x1	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0

Trand(:, :, 6, 1) =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.5355	0
x14	0	0	0	0	0.9124
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0

x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.8189	0	0	0	-1
x16	0	0.4771	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0
x13	0
x14	0
x15	0
x16	0

c =

	x1	x2	x3	x4
y1	-2.528e-05	0	0	0
	x5	x6	x7	x8
y1	0	0	0	-0.163

```

          x9          x10          x11          x12
y1         0         0         0         0

          x13          x14          x15          x16
y1  0.006437  0.5568         0         0

d =
  u1
y1  0

e =
      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1     0   1   0   0   0   0   0   0   0   0
x2     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x3     0   0   0   1   0   0   0   0   0   0
x4     0   0   0   0   1   0   0   0   0   0
x5     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x6     0   0   0   0   0   0   1   0   0   0
x7     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x8     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x9     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x10    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x11    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x12    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x13    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x14    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x15    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x16    0   0   0   0   0   0   0   0   0   0

      x11  x12  x13  x14  x15  x16
x1     0   0   0   0   0   0
x2     0   0   0   0   0   0
x3     0   0   0   0   0   0
x4     0   0   0   0   0   0
x5     0   0   0   0   0   0
x6     0   0   0   0   0   0
x7     0   0   0   0   0   0
x8     0   0   0   0   0   0
x9     0   0   0   0   0   0
x10    0   0   0   0   0   0
x11    0   0   0   0   0   0
x12    0   0   0   0   0   0
x13    0   0   0   0   0   0
x14    0   0   0   0   0   0
x15    0   0   0   0   0   0
x16    0   0   0   0   0   0

```

Trand(:, :, 7, 1) =

a =

	x1	x2	x3	x4	x5
x1	1	0	0	0	0
x2	0	1	0	0	0
x3	0	0	1	0	0
x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.9527	0
x14	0	0	0	0	-0.7519
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0

x15	0.2217	0	0	0	-1
x16	0	0.6102	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0.2233
x13	0
x14	0
x15	0
x16	-1

b =

	u1
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	-1
x9	0
x10	0
x11	0
x12	0
x13	0
x14	0
x15	0
x16	0

c =

	x1	x2	x3	x4
y1	-2.528e-05	0	0	0
	x5	x6	x7	x8
y1	0	0	0	-0.163
	x9	x10	x11	x12
y1	0	0	0	0
	x13	x14	x15	x16

```

y1      0.006437      0.5568      0      0
d =
  u1
y1      0
e =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6      x7      x8      x9      x10
x1      0      1      0      0      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      1      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      1      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0      1      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

      x11     x12     x13     x14     x15     x16
x1      0      0      0      0      0      0
x2      0      0      0      0      0      0
x3      0      0      0      0      0      0
x4      0      0      0      0      0      0
x5      0      0      0      0      0      0
x6      0      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0      0
x8      0      0      0      0      0      0
x9      0      0      0      0      0      0
x10     0      0      0      0      0      0
x11     0      0      0      0      0      0
x12     0      0      0      0      0      0
x13     0      0      0      0      0      0
x14     0      0      0      0      0      0
x15     0      0      0      0      0      0
x16     0      0      0      0      0      0

```

Trand(:, :, 8, 1) =

```

a =
      x1      x2      x3      x4      x5
x1      1      0      0      0      0
x2      0      1      0      0      0
x3      0      0      1      0      0

```

x4	0	0	0	1	0
x5	0	0	0	0	1
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	0.2149	0
x14	0	0	0	0	-0.05847
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.8	0	0	0	-1
x16	0	-0.8656	0	0	0

x16

```

x1      0
x2      0
x3      0
x4      0
x5      0
x6      0
x7      0
x8      0.02465
x9      0
x10     0
x11     0
x12     0.2233
x13     0
x14     0
x15     0
x16     -1

```

b =

```

      u1
x1    0
x2    0
x3    0
x4    0
x5    0
x6    0
x7    0
x8   -1
x9    0
x10   0
x11   0
x12   0
x13   0
x14   0
x15   0
x16   0

```

c =

```

      x1      x2      x3      x4
y1 -2.528e-05  0      0      0

      x5      x6      x7      x8
y1      0      0      0     -0.163

      x9      x10     x11     x12
y1      0      0      0      0

      x13     x14     x15     x16
y1      0.006437  0.5568  0      0

```

d =

```

      u1

```

```

y1      0
e =
      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1      0   1   0   0   0   0   0   0   0   0
x2      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x3      0   0   0   1   0   0   0   0   0   0
x4      0   0   0   0   1   0   0   0   0   0
x5      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x6      0   0   0   0   0   0   1   0   0   0
x7      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x8      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x9      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x10     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x11     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x12     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x13     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x14     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x15     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
x16     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0

      x11  x12  x13  x14  x15  x16
x1      0   0   0   0   0   0
x2      0   0   0   0   0   0
x3      0   0   0   0   0   0
x4      0   0   0   0   0   0
x5      0   0   0   0   0   0
x6      0   0   0   0   0   0
x7      0   0   0   0   0   0
x8      0   0   0   0   0   0
x9      0   0   0   0   0   0
x10     0   0   0   0   0   0
x11     0   0   0   0   0   0
x12     0   0   0   0   0   0
x13     0   0   0   0   0   0
x14     0   0   0   0   0   0
x15     0   0   0   0   0   0
x16     0   0   0   0   0   0

```

```
Trand(:, :, 9, 1) =
```

```

a =
      x1      x2      x3      x4      x5
x1      1      0      0      0      0
x2      0      1      0      0      0
x3      0      0      1      0      0
x4      0      0      0      1      0
x5      0      0      0      0      1
x6      0      0      0      0      0
x7      0      0      0      0      0

```

x8	0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0
x11	0	0	0.0004323	0	0
x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.7784	0
x14	0	0	0	0	0.7138
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	-0.6131	0	0	0	-1
x16	0	0.9016	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0

```

x5          0
x6          0
x7          0
x8      0.02465
x9          0
x10         0
x11         0
x12      0.2233
x13         0
x14         0
x15         0
x16        -1

```

b =

```

      u1
x1     0
x2     0
x3     0
x4     0
x5     0
x6     0
x7     0
x8    -1
x9     0
x10    0
x11    0
x12    0
x13    0
x14    0
x15    0
x16    0

```

c =

```

      x1          x2          x3          x4
y1 -2.528e-05          0          0          0

      x5          x6          x7          x8
y1          0          0          0      -0.163

      x9          x10         x11         x12
y1          0          0          0          0

      x13         x14         x15         x16
y1  0.006437    0.5568          0          0

```

d =

```

      u1
y1     0

```

e =

```

      x1      x2      x3      x4      x5      x6      x7      x8      x9      x10

```

x1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15	x16
x1	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0

Trand(:, :, 10, 1) =

a =		x1	x2	x3	x4	x5
x1		1	0	0	0	0
x2		0	1	0	0	0
x3		0	0	1	0	0
x4		0	0	0	1	0
x5		0	0	0	0	1
x6		0	0	0	0	0
x7		0	0	0	0	0
x8		0	0	1.487e-07	0	0
x9	0.006437	0	0	0	0	0
x10		0	0	0	0	0
x11		0	0	0.0004323	0	0

x12	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x6	x7	x8	x9	x10
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	-1	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	-1	0	0
x6	1	0	0	0	0
x7	0	1	-1	0	0
x8	0.0006207	0	1	0	0
x9	0	0	0	-1	0
x10	0	0	0.5568	0	-1
x11	0	0	0	0	0
x12	0.02465	0	0	0	0
x13	0	0	0	-0.1851	0
x14	0	0	0	0	-0.9132
x15	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15
x1	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0.0004323
x9	0	0	-0.546	0	0
x10	0	0	0	-0.2683	0
x11	-1	0	0	0	0.2821
x12	0	-1	0	0	0
x13	0	0	-1	0	0
x14	0	0	0	-1	0
x15	0.5088	0	0	0	-1
x16	0	-0.004846	0	0	0

	x16
x1	0
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0
x7	0
x8	0.02465

```

x9          0
x10         0
x11         0
x12        0.2233
x13         0
x14         0
x15         0
x16        -1

```

b =

```

      u1
x1    0
x2    0
x3    0
x4    0
x5    0
x6    0
x7    0
x8   -1
x9    0
x10   0
x11   0
x12   0
x13   0
x14   0
x15   0
x16   0

```

c =

```

      x1          x2          x3          x4
y1 -2.528e-05    0          0          0

      x5          x6          x7          x8
y1    0          0          0        -0.163

      x9          x10         x11         x12
y1    0          0          0          0

      x13         x14         x15         x16
y1  0.006437    0.5568      0          0

```

d =

```

      u1
y1    0

```

e =

```

      x1  x2  x3  x4  x5  x6  x7  x8  x9  x10
x1    0  1  0  0  0  0  0  0  0  0
x2    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
x3    0  0  0  1  0  0  0  0  0  0
x4    0  0  0  0  1  0  0  0  0  0

```

x5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	x11	x12	x13	x14	x15	x16
x1	0	0	0	0	0	0
x2	0	0	0	0	0	0
x3	0	0	0	0	0	0
x4	0	0	0	0	0	0
x5	0	0	0	0	0	0
x6	0	0	0	0	0	0
x7	0	0	0	0	0	0
x8	0	0	0	0	0	0
x9	0	0	0	0	0	0
x10	0	0	0	0	0	0
x11	0	0	0	0	0	0
x12	0	0	0	0	0	0
x13	0	0	0	0	0	0
x14	0	0	0	0	0	0
x15	0	0	0	0	0	0
x16	0	0	0	0	0	0

10x1 array of continuous-time state-space models.

a =

Columns 1 through 6

0	0.1630	0.1630	-0.9718	-1.3100	2.2436
---	--------	--------	---------	---------	--------

Columns 7 through 12

4.9305	-3.0067	-10.0316	3.2888	11.3256	-2.9507
--------	---------	----------	--------	---------	---------

Columns 13 through 17

-7.3059	2.2450	1.8327	-0.4422	-0.1732
---------	--------	--------	---------	---------

b =

```

Columns 1 through 6
    1.0000    0.0000   -8.8648    1.7295    32.4502   -10.8828
Columns 7 through 12
   -63.4875    27.2054    72.7164   -35.8690   -48.9802    26.6193
Columns 13 through 17
    16.8476   -8.6975   -3.1231    1.0411    0.2951
sistema nominal
sys =

    0.163 s^15 + 0.163 s^14 - 0.9718 s^13 - 1.31 s^12
          + 2.244 s^11 + 4.93 s^10 - 3.007 s^9 - 10.03 s^8
          + 3.289 s^7 + 11.33 s^6 - 2.951 s^5 - 7.306 s^4
          + 2.245 s^3 + 1.833 s^2 - 0.4422 s - 0.1732
-----
-
s^16 + 1.776e-15 s^15 - 8.865 s^14 + 1.73 s^13 + 32.45 s^12
      - 10.88 s^11 - 63.49 s^10 + 27.21 s^9 + 72.72 s^8
      - 35.87 s^7 - 48.98 s^6 + 26.62 s^5 + 16.85 s^4
      - 8.697 s^3 - 3.123 s^2 + 1.041 s + 0.2951

Continuous-time transfer function.
sistema nominal final
sys_final =

    0.163 s^2 + 0.326 s + 0.4293
-----
    s^3 + s^2 - 1.268 s - 0.7317

Continuous-time transfer function.

```

Anexo 2

Ensayo de Aptitud en la Calibración de un Acelerómetro por comparación
conforme a la norma ISO IEC 16063-21

Anexo 3

Certificado de Acreditación emitido por la ONAC