

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ROBUSTO PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE VIBRACIÓN

Camilo Andrés Moncayo Uribe¹ M.Sc.(c), Omar Pinzón Ardila² Ph.D.

Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga

Recibido abril 6 de 2015 - Aceptado abril 23 de 2015

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v9n1.a01>

Resumen— El trabajo que se presenta a continuación propone la implementación de un control robusto, para la calibración de sensores de vibración, utilizando la norma ISO 16063.

El proyecto nace de la necesidad de controlar el proceso de calibración de sensores de vibración del Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. El laboratorio se compone de diferentes equipos y se desea gestionar su integración a través de una aplicación en LabView. El objetivo de la calibración, es el de comparar los valores de diferentes acelerómetros con un sensor patrón (definición de un proceso de calibración). Una de las dificultades presentes en la calibración de los sensores de vibración, es que la dinámica del sistema varía con la evaluación de cada sensor, debido a los cambios en peso de los mismos. Para este propósito se plantea un control robusto, capaz de controlar el sistema a pesar de las variaciones dinámicas existentes. Inicialmente se identifican diferentes modelos dinámicos del sistema, se analizan las incertidumbres más críticas y finalmente se sintoniza un control en Matlab el cual se implementa en la aplicación de LabView con resultados deseados.

Palabras clave— Calibración, Control robusto, Identificación, sensores de vibración.

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 different 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 sensors

¹ Camilo Andrés. Moncayo Uribe. M.Sc.(C). Universidad Pontificia Bolivariana. Email: camilo.moncayo@upb.edu.co

² Omar Pinzón Ardila. Ph.D. D. Universidad Pontificia Bolivariana. Email: omar.pinzon@upb.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) son «Un Instrumentado usado para implementar una ó más funciones instrumentadas de Seguridad (SIF) y se compone de una ó más combinaciones de sensores, lógica y elementos finales» [1] – [5].

La norma ANSI/ISA S84.01-1996 define el ciclo de vida de un sistema instrumentado de seguridad en su etapa de diseño, construcción, operación y mantenimiento. En el ciclo de vida de operación y mantenimiento, una de las tareas indispensables es confirmar metrológicamente los instrumentos de medición para su uso previsto. [1] Por esta razón dentro del contexto de la seguridad de procesos industriales, el riesgo y la confiabilidad de la medición son dos términos muy relacionados.

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 medida son considerablemente menores, por consiguiente, los instrumentos de medición de vibraciones deben estar en la capacidad de detectar irregularidades muy pequeñas [2].

Lo anterior hace evidente la necesidad de garantizar la confirmación metrológica de los sensores de vibraciones. La organización internacional para la estandarización (ISO) ha desarrollado un conjunto de normas para la calibración de transductores de vibración y de choque enmarcados dentro de las recomendaciones de la ISO 16063 [6].

II. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se lleva a cabo con el estudio de la norma ISO 16063 para establecer los parámetros que rigen la calibración de un sensor de vibración. Seguidamente se realiza la identificación del sistema de calibración, compuesto por un computador, una tarjeta de salida analógica, un amplificador, un *shaker* (dispositivo que genera vibraciones), sensores de vibración y una tarjeta de lectura de señales analógica, tal y como se muestra en la Fig. 1. El

trabajo posterior se hace a partir de la identificación de diferentes modelos de la planta.

Se disponen de 3 diferentes sensores con pesos entre los 0g y los 480g (peso máximo que soporta el Shaker).

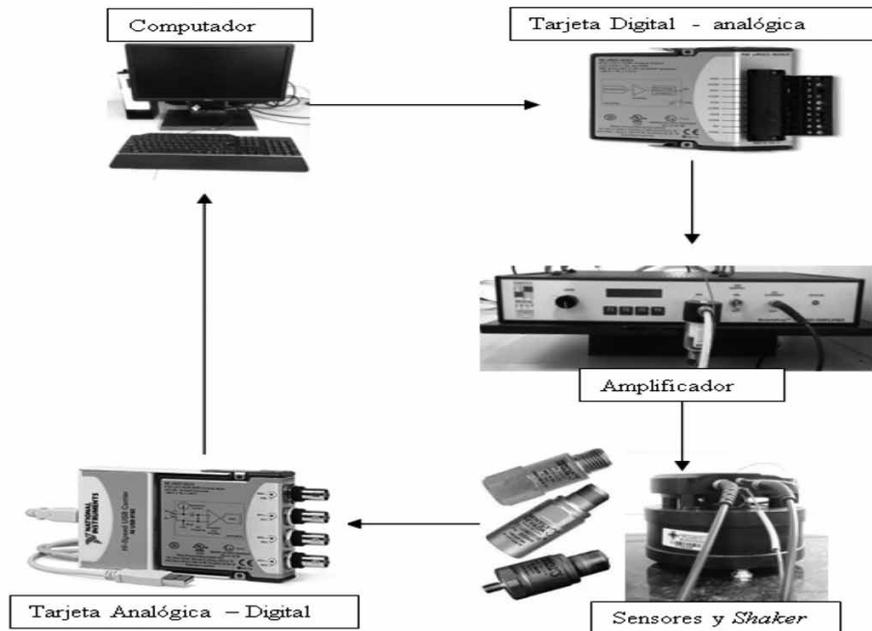


Fig. 1. Sistema de Calibración

Con el proceso realizado se puede modelar las incertidumbres de la planta, determinar cuál es el modelo más crítico para lograr la sintonización de un controlador robusto. La importancia de garantizar estabilidad en todo el proceso es crítica, el proceso de la calibración de los sensores de vibración requiere la evaluación del sensor a diferentes amplitudes en un barrido de frecuencia. Si el proceso no es perfectamente controlado o presenta sobrepaso en la señal de control, el eje móvil que genera las vibraciones puede chocar con los bordes superior e inferior del *shaker* deteniendo el sistema o incluso dañándolo.

La norma ISO 16063 está destinada sobre todo para los que participan en las mediciones de vibración que requieren trazabilidad a patrones nacionales o internacionales a través de una secundaria, de referencia, de trabajo o del *check-list* estándar (calibrador portátil para uso de campo) como se define en el Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM). Las especificaciones para la instrumentación y los procedimientos establecidos están destinados a utilizarse para la calibración de sensores de vibración rectilíneos (con o sin acondicionamiento de señal) para obtener 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 [3] – [4].

Prueba de calibración de sensores de vibración certificadas bajo la norma ISO 16063

Para cada una de las aceleraciones asociadas se deben elegir, como mínimo, seis frecuencias de evaluación, (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/s²): se debe seleccionar de 1, 2, 5, 10 o múltiplos de diez. Si se utilizan señales de banda ancha, estos valores son el valor eficaz.

b) Frecuencia: se debe seleccionar la serie de frecuencias normalizado de un tercio de octava 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.

Control Robusto

Las características del diseño de un sistema de control van a depender en gran medida, de la frecuencia con la que el modelo empleado describa el comportamiento del sistema. La simplificación en un modelado, consiste en lograr la forma más simple

posible del mismo, captando los rangos fundamentales bajo análisis del proceso. [7]

Un modelo matemático difícilmente puede expresar de forma absoluta un proceso real, en cuyo caso se habla de errores de modelado. Por ejemplo, describir un modelo LTI, implica un conjunto de hipótesis simplificadoras que en muchos casos incrementan los errores.

Un modelo matemático que exprese el comportamiento de un proceso real será en mayor o menor grado impreciso, o dicho de otra forma contará con incertidumbres o errores de modelado.

El control robusto se obtendrá a partir de la evaluación de diferentes modelos dinámicos que describan la planta, de sus posibles variaciones por incertidumbres y perturbaciones, para lograr sintonizar el mejor control posible [8].

Identificación de los modelos dinámicos de la planta.

Para este propósito se decidió implementar la herramienta IDENT de Matlab. Inicialmente y por medio de los dispositivos del laboratorio se adquirieron los datos de excitación. De entrada una onda sinusoidal de 100Hz a una amplitud de 0.5V medida desde la tarjeta y de salida la repuesta del sensor patrón ubicado en el *shaker*. Cabe resaltar que se deben tener datos de evaluación y de validación solicitados por el software para proceder de manera correcta con el proceso de identificación.

En la Fig. 2. se muestra el porcentaje de ajuste del modelo dinámico identificado para el Shaker en IDENT, únicamente con el sensor patrón, lo que define un modelo nominal a 0g y el punto de partida para el desarrollo de un control robusto [9].

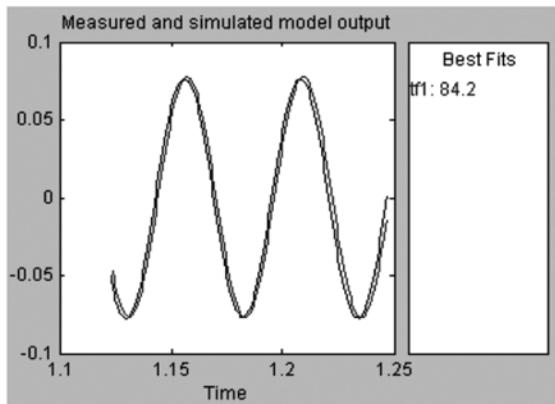


Fig. 2. Ajuste del modelo dinámico nominal, identificado para el Shaker

La función de transferencia se obtiene luego de importar el modelo dinámico, al *workspace* de Matlab, la cual se muestra en (1)

$$H(s) = \frac{4118s + 62100}{s^2 + 26900s + 223700} \quad (1)$$

El proceso de identificación del modelo dinámico del *shaker* se realizó de igual forma para el sistema, con un sensor adicional de 45g, 233g y 435g, las funciones de transferencia se describen respectivamente en (2), (3) y (4).

$$H(s) = \frac{3987s + 53400}{s^2 + 25500s + 202300} \quad (2)$$

$$H(s) = \frac{3499s + 48700}{s^2 + 21300s + 198800} \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{3163s + 41200}{s^2 + 18990s + 175500} \quad (4)$$

Análisis de incertidumbres.

Para el análisis de las incertidumbres se observó el comportamiento de cada una de las funciones de transferencia halladas. En la Fig. 2 se observan las respuestas de (1), color azul; (2), color verde; (3), color rojo y (4), color cian.

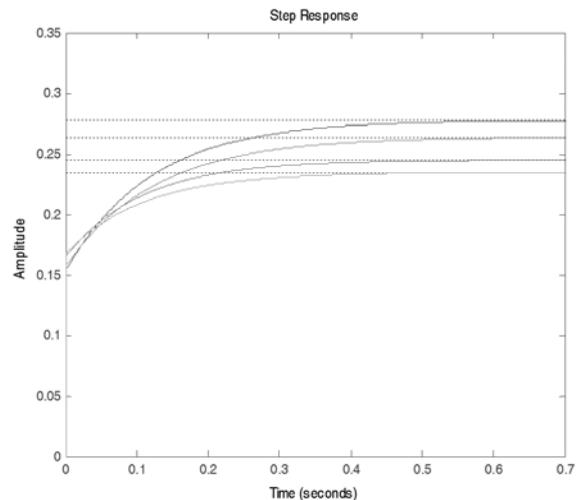


Fig. 3. Respuestas al escalón de los diferentes modelos dinámicos identificados.

Para este comportamiento en particular se observa una constante en la atenuación de los sistemas y que brinda un análisis preliminar para el control. Las

incertidumbres se calcularon restando el modelo dinámico nominal (1). Se analizaron de forma individual cada una de las incertidumbres con el modelo aditivo y multiplicativo y a pesar que ninguno de ellos dio inestable se decidió trabajar con el sistema con incertidumbre que proporcionaba una menor atenuación, esto debido a que si el control es sintonizado para la menor atenuación, la ganancia en lazo abierto del sistema puede llegar a ser tan grande que puede comprometer críticamente el sistema a saturaciones cuando se estén calibrando sensores de pesos reducidos [10].

De esta forma, en la Fig. 4 se muestra el modelo implementado para estimar el sistema más crítico a controlar, junto con la incertidumbre hallada de la resta del modelo dinámico del *shaker* con el sensor de 45g (2), menos el modelo nominal (1), que se muestra en (5).

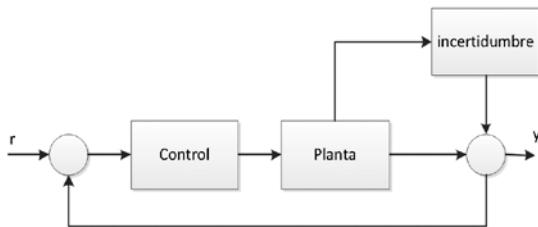


Fig. 4 Modelo de incertidumbre multiplicativa a la salida

$$E(s) = \frac{-131s^3 + 2233000s^2 - 88270000s - 617300000}{s^4 + 52400s^3 + 686400000s^2 + 11150000000s + 45250000000} \quad (5)$$

III. SINTONIZACIÓN Y VALIDACIÓN DEL CONTROL ROBUSTO

Finalmente se sintoniza el controlador utilizando la herramienta de *Sisotool* de Matlab y con la cual se encontró como mejor alternativa un control PI para regular el sistema con una constante proporcional de 22.35 [VRMS/Vp] y una constante integral de 465.85 [VRMS/Vp]. En la Fig. 5. se muestra el diagrama implementado para la simulación del controlador para cada uno de los modelos identificados. El diagrama está compuesto básicamente por un generador de señal sinusoidal que se inyecta al modelo de la planta, esta señal es modificada en amplitud por medio del controlador y la señal de error es la resta de la amplitud deseada menos el valor RMS de la señal de salida del modelo. Al mismo tiempo se compara con una señal objetivo que para este caso es la señal teórica real que se debe obtener a la salida. Se obtienen así, 4 controladores de excelente desempeño para cada planta, pero el resultado deseado es un solo controlar con el cual se logre la calibración de cualquier sensor.

En la Fig. 6. se puede observar la respuesta del sistema, inicialmente la señal objetivo junto con su valor RMS (señal amarilla y magenta) los cuales se ven seguidos tanto por la señal de salida de la planta como por su equivalente RMS respectivamente (Señal cian y roja). También se puede observar la salida del controlador (señal verde) pues la salida de la tarjeta al ser de -5V a 5V no se puede superar estos valores. Por último se muestra la señal de error que se ve descender hasta cero (señal azul).

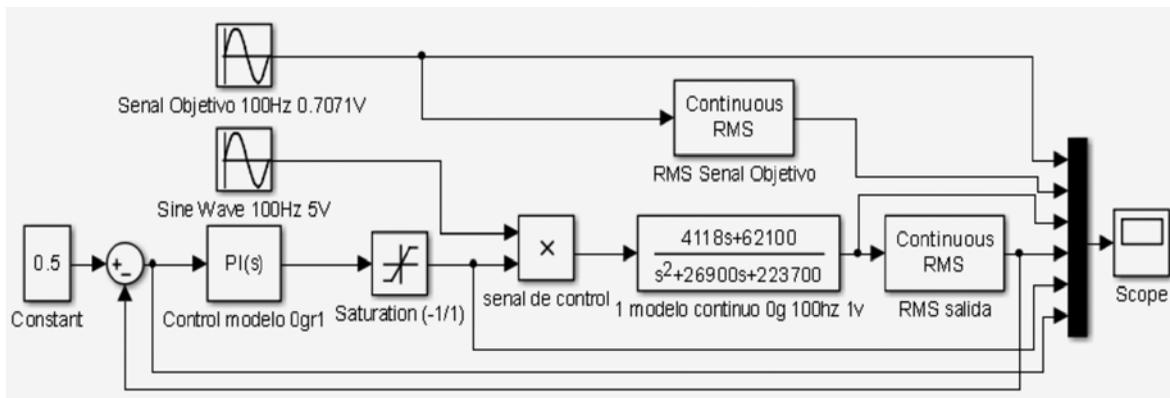


Fig. 5. Simulación de controlador

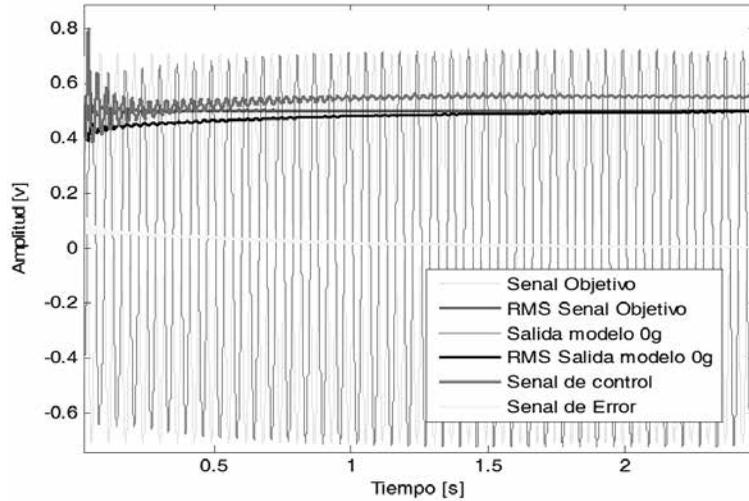


Fig. 6. Simulación planta controlada de 0g

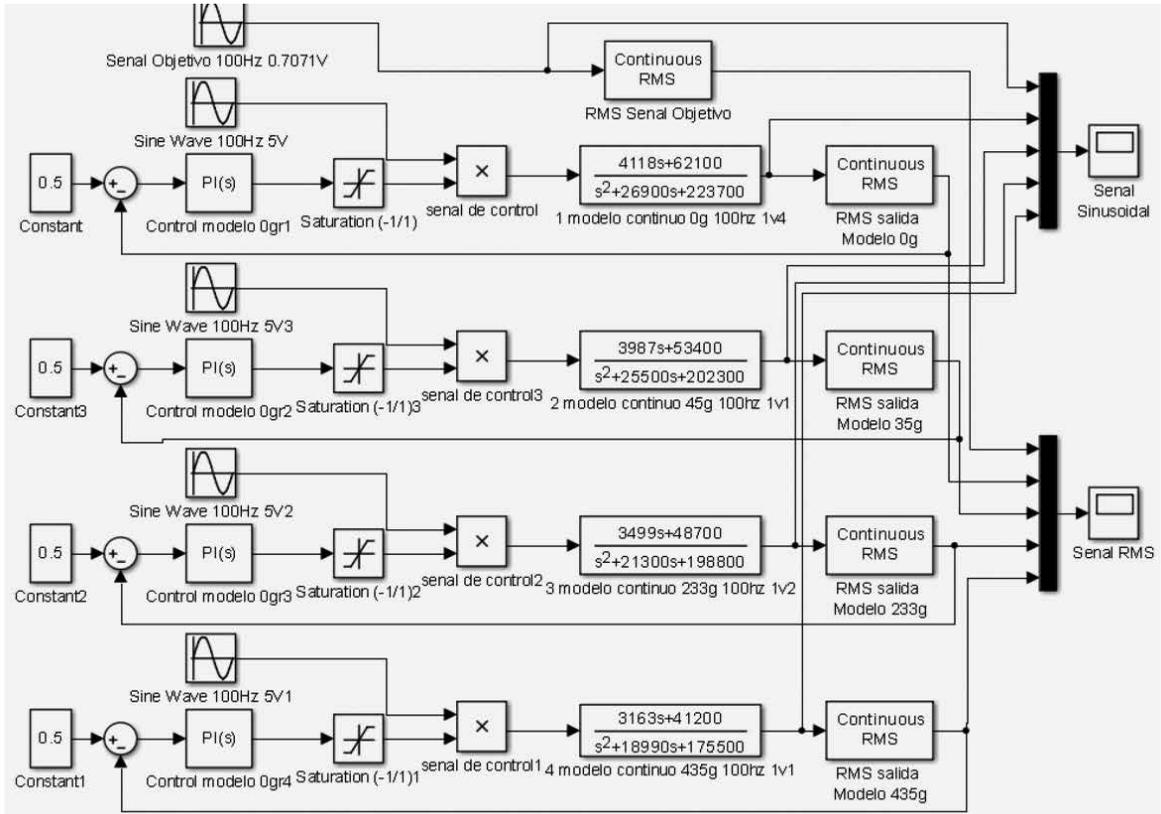


Fig. 7. Diagrama de simulación de las diferentes plantas con igual controlado

En la Fig. 7. se muestra el diagrama implementado para comparar los diferentes controladores y modelos identificados, se utiliza una estructura similar pero en este caso replicada para los diferentes casos. En la Fig. 8. se muestra

el desempeño del controlador robusto hallado del sistema identificado de 0g y en la Fig. 8 se muestra el desempeño del controlador robusto hallado del sistema identificado de 435g para todas las plantas.

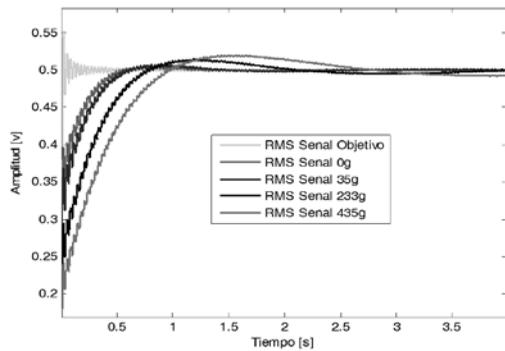


Fig. 8 Simulación controlador hallado para la planta de 0g e implementado en todos los sistemas.

Debido a que el sistema está en constante oscilación y tiene límites estrictos de trabajo, debido a que la parte móvil o de vibración del dispositivo no puede chocar con la pared superior e inferior del dispositivo. De este modo y como se observa en la Fig. 9 el controlador sintonizado para el modelo identificado de 435g es el que representa un mejor desempeño para todos los posibles modelos del dispositivo.

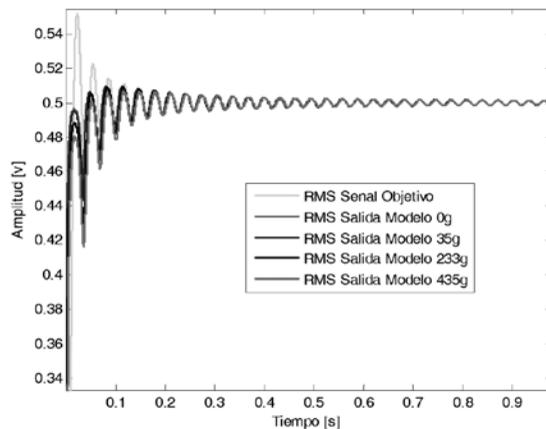


Fig. 9. Simulación controlador hallado para la planta de 435g e implementado en todos los sistemas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación de las teorías de control en diferentes dispositivos y sistemas conlleva a mejorar los parámetros deseados requeridos en dichas plantas. Una vez se permite la integración de nuevas teorías de control se puede mejorar las condiciones de trabajo y la exactitud de las herramientas con las que se trabajan.

El alcance mencionado es uno de los pasos para lograr un mejor control del sistema para la calibración de sensores de vibración. Inicialmente se

utilizaba un control PI sintonizado por el método del tanteo, seguidamente y con el propósito de optimizar el recurso del tiempo y de la precisión en las mediciones se decidió incursionar en la teoría de control robusto [11]. Como trabajo posterior se plantea la implementación de un control adaptativo con modelo de referencia off-line, un control adaptativo ofrece la gran ventaja de variar los parámetros del controlador a medida que varía la dinámica de la planta, con esto se esperaría mejorar aún más la respuesta del sistema, optimizar los tiempos de ejecución e incrementar la precisión.

V. CONCLUSIONES

Se logró identificar diferentes modelos dinámicos del Shaker para el rango de peso de sensores permitidos por el dispositivo. A partir de los cuales se estableció un modelo nominal y que dio como punto de partida para analizar las diferentes incertidumbres del sistema.

Se sintonizó un control robusto capaz de regular el sistema optimizando los tiempos de ejecución y sin riesgos de saturar el sistema. Se implementó satisfactoriamente el controlador para generar certificados de calibración de sensores de vibración bajo la norma ISO 16063.

VI. AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este proyecto fue indispensable la disponibilidad brindada por el docente Gilberto Fontecha Dulcey y por el equipo de trabajo del Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana quienes confiaron en el trabajo desarrollado.

REFERENCIAS

- [1] FONTECHA Gilberto, CARREÑO René, RÍOS Fabio, CARREÑO Martín, Sistemas instrumentados de seguridad: estudio de caso en monitoreo de vibraciones
- [2] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (ICONTEC), "Ntc-Iso10012," p. 22, 2003.
- [3] I. Standard, "International Standard ISO 16063-21. Methods for the calibration of vibration and shock transducers," vol. 2003, 2010.
- [4] Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 17025: Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración. Icontec, Bogotá 2002.
- [5] A. E. Summers, "Techniques for assigning a target safety integrity level," ISA Trans., vol. 37, no. 2, pp. 95-104, 1998.
- [6] P. N. Saavedra, "La Medición Y Análisis De Las Vibraciones Como Técnica De Inspección De Equipos Y Componentes, Aplicaciones
- [7] K. J. Åström and B. Wittenmark, "Adaptive control," 2013.
- [8] F. Lin, Robust Control Design: An Optimal Control Approach, 2007 John Wiley & Sons, Ltd

- [9] N. I. Corporation, LabVIEW, System Identification Toolkit User Manual, no. 371001. 2004, pp. 1–87.
- [10] Gu, Da-Wei, Petkov, Petko, Konstantinov, Mihail M, Robust Control Design with MATLAB®, 2013, ISBN 978-1-4471-4681-0
- [11] Sename, Olivier, Gaspar, Peter, Bokor, Robust Control and Linear Parameter Varying Approaches, 2013, ISBN 978-3-642-36109-8

BIOGRAFÍA



Omar Pinzón Ardila. Doctor Ingeniero Industrial (con distinción) en el área de Automática e Informática Industrial por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid, España. Magíster en Ingeniería Eléctrica (con distinción) por la Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia. Ingeniero Electricista (con distinción) por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Actualmente es Profesor Asociado e investigador del Grupo de Control Industrial en la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.



Camilo Andrés Moncayo Uribe. Ingeniero Electrónico (con distinción) de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga. Actualmente Docente de Cátedra y candidato a Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga. Participó en el proceso de acreditación del Laboratorio de Vibración de la Universidad Pontificia Bolivariana de

Bucaramanga como desarrollador del software para la calibración de sensores de vibración. Ha participado en diferentes proyectos que involucran el desarrollo de software en LabVIEW para el análisis modal de piezas.