

# SISTEMA ELECTROHIDRÁULICO DE SIMULACIÓN SÍSMICA PARA EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Bach. Gabriel León Sigüeñas; Juan Carlos Gonzáles Lévano, Mg. María Teresa Méndez Landa, Mg. Gustavo Roselló Moreno

[galonsoleon@gmail.com](mailto:galonsoleon@gmail.com), [jkma3005@gmail.com](mailto:jkma3005@gmail.com), [mmendez47@hotmail.com](mailto:mmendez47@hotmail.com), [grosellom@gmail.com](mailto:grosellom@gmail.com),

Universidad Ricardo Palma

**RESUMEN** – En el presente artículo se presenta el desarrollo de 3 años de trabajo donde fue necesario integrar las diversas ramas de ingeniería, electrónica, civil, mecatrónica e hidráulica, con el diseño y construcción del primer sistema electrohidráulico diseñado por ingenieros egresados de la Universidad Ricardo Palma y mandado a fabricar a una empresa peruana.

**PALABRAS CLAVE** – *Simulador, Control Electrohidráulico, Sistema de Control, Sensores.*

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de desarrollar estudios de comportamiento sísmico de nuevas técnicas constructivas, adicionando a la falta de disponibilidad de equipos y el alto costo que las pruebas implican, conlleva a que se busquen tecnologías de baja complejidad que permitan realizar pruebas de validación.

Los equipos con los que se cuenta en el Perú, están basados en modelos de comportamiento y métodos de integración numérica, los cuales a pesar de su complejidad no proporciona la suficiente certeza a los resultados obtenidos. Esto como consecuencia de la falta de modelos calibrados que guarden adecuadamente la información acerca del comportamiento cíclico de los materiales y sometidos a deformaciones inelásticas significativas. Por ello los equipos con los que cuenta nuestro país consideran los efectos mencionado, dado que el Reglamento Nacional de Edificaciones vigente, solicita el análisis de estructuras.

En consecuencia, el proyecto realizado por la Universidad Ricardo Palma financiado por el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad Innóvate Perú, busca cubrir la necesidad de generar equipos de baja complejidad que permitan realizar las pruebas mencionadas a sistemas constructivos en general mediante ensayos de carácter dinámico, los cuales se han venido desarrollando con el diseño y construcción de un sistema electrohidráulico y que se encuentra en etapa de integración al control y adquisición de datos.

Por esto, se ha propuesto mediante el presente proyecto, diseñar e implementar el control de dicho sistema utilizando el Software Matlab en conjunto con la tarjeta de control y adquisición de datos fabricado en el Perú, particularmente el control de fuerzas determinadas para romper el estado inerte de una estructura generando movimientos oscilatorios, o definidos con el fin de encontrar los puntos de fallos de las estructuras a evaluar.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la demanda de investigación va en aumento, buscando nuevas propuestas de desarrollo e innovación tecnológica. Es por esto que considerando la realidad de nuestro país y la gran variedad de materiales naturales que posee, es necesario por consecuencia evaluarlos tanto estructuralmente como mecánicamente. Para ello es necesario poder desarrollar equipos de evaluación que permitan responder a estándares establecidos, a un costo razonable, para poder evaluar las estructuras y continuar ampliando el conocimiento actual sobre su comportamiento.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.567>

ISBN: 978-0-9993443-1-6

ISSN: 2414-6390

### III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para la realización de este proyecto se diseñó y construyó un sistema electrohidráulico que permita realizar vibraciones a diferentes frecuencias a estructuras en general. Así mismo el sistema debe ser capaz de poder recrear un registro sísmico que se manda desde una base de datos introducida en el Matlab y descargada desde la página del IGP en su enlace de Investigación.

El diseño se basó en las especificaciones requeridas para el simulador sísmico las cuales se fueron modificando en el transcurso de la realización de este proyecto, quedando como definitivas las que se detallan en la tabla 1. El sistema se monta sobre unos rodamientos lineales los cuales le permiten desplazarse al simulador lograr así un movimiento uniaxial realizando así simulaciones libres, armónicas y aleatorias en el caso de sismos, registrados en la base de datos.

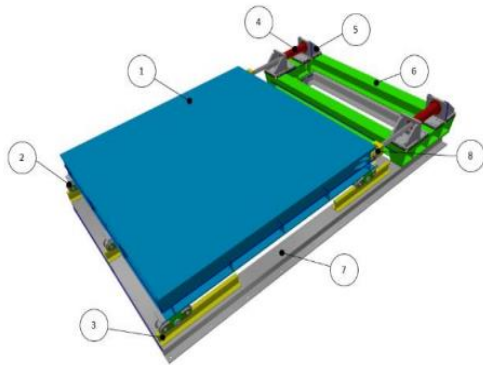


Figura 1 - Los componentes principales del simulador:

1. Tablero Móvil
2. Ruedas
3. Rieles
4. Actuador
5. Base del actuador
6. Soporte de actuadores
7. Bastidor
8. Conexión Actuador – Tablero móvil

Partes del Simulador	Medidas	Unidades
Loza de cimentación	4,50x4,50x1,50	mts
Plataforma Base	3,00x3,00x0.0381	mts
Capacidad de carga máxima	15	tn-f
Recorrido máximo	0,15	mts
Frecuencia de operación máxima	10	Hz

Tabla 1. Especificaciones del simulador

El sistema descansa en una loza diseñada y fabricada para soportar todo el peso del espécimen y la plataforma de simulación, así mismo cumple la función de aislar cualquier tipo de vibración que se genere en el movimiento de la mesa vibratoria, esto gracias al neopreno forrado en todo el contorno de la platea. Tal como se puede observar en la figura 2

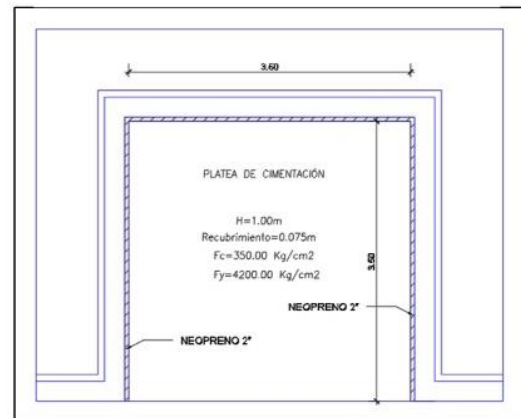


Figura 2 – Vista en planta de platea de cimentación

Fuente – Javier Cerón U. (2017)

Esta platea presentaba una profundidad de hasta 1 metro rodeado por muros de borde de concreto para contenerla. Esta platea se encontraba sobre un Solado de 10 cm de espesor y con una resistencia a la rotura del concreto de 175 Km/cm<sup>2</sup>.

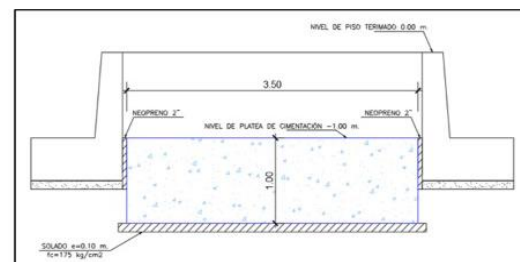


Figura 3 – Vista en elevación de la platea de cimentación

Fuente – Javier Cerón U. (2017)

Para soportar los actuadores, se diseñó y fabricó una loza de reacción el cual constaba de una estructura de concreto armado para soportar el peso de los actuadores y anular las vibraciones que se pudieran generar en el movimiento.

El sistema electrohidráulico cuenta con un motor de 25 HP con brida, Bomba hidráulica

doble de engranajes, Tanque Hidráulico y Filtros de Succión y de Retorno.

El sistema mantenía a presión constante los actuadores y mediante las electroválvulas check la presión de las cámaras era liberado generando así el desplazamiento de los actuadores.

Los actuadores se encuentran fijos a una plataforma metálica fabricado de vigas H de acero y una plancha de 1 pulgada.

Para el funcionamiento de la mesa se utiliza 2 actuadores hidráulicos conocidos como pistones diferenciales, los cuales poseen un solo vástago a lo largo del pistón, los cuales ejercen sobre la plataforma el movimiento uniaxial figura 4.

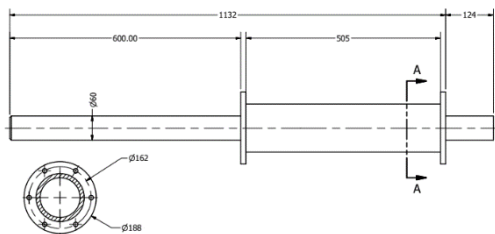


Figura 4 - Pistón hidráulico Diferencial.

Al contar con un pistón diferencial la fuerza y velocidad que realiza en ambas direcciones es la misma, evitando que se genere acompañado del sistema eléctrico.

Para la interacción con el sistema electrohidráulico se utilizó un PLC Siemens 1200 para el control de las electroválvulas que comandan el direccionamiento de la mesa, así como también utilizando las entradas análogas del PLC se utilizó para agregar el sensor de desplazamiento LVDT y el acelerómetro de la mesa

#### IV. CÁLCULOS EN EL TABLERO MÓVIL

Para el cálculo se consideran 4 vigas y no se considera la plancha base. La carga vertical del prototipo genera flexión y desplazamiento vaivén genera un momento adicional por el cambio de dirección en el desplazamiento del tablero móvil.

La hipótesis del diseño indicaba que la mayor parte de los esfuerzos generados eran por flexión, debido a esto se consideró solo 4 vigas para el cálculo, sin contar la plancha cobertura.

La carga vertical del prototipo genera flexión y el desplazamiento en vaivén genera un momento adicional por el cambio de dirección en el desplazamiento del tablero móvil. Tal como se muestra en el esquema de la figura 5.

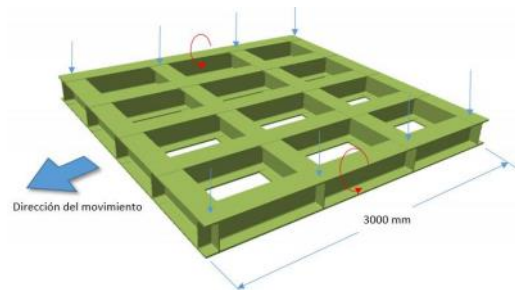


Figura 5 – Esquema de la plataforma

Por este motivo tal como se muestra en el diagrama de cargas y DCL de la figura 6.

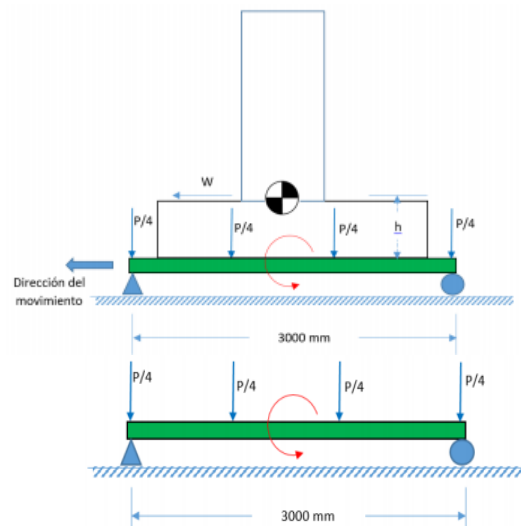


Figura 6 – Diagrama de Cargas y DCL

Los cálculos por flexión utilizando las fórmulas conocidas nos permite comprender mejor el comportamiento de la plataforma en consecuencia del espécimen que se fuera a evaluar, esto a su vez permite completar los datos de la tabla II.

$$Cp = P/4 \quad (1)$$

$$Mcv = Cp(n - 1) \quad (2)$$

$$Min = W * h \quad (3)$$

$$Mmax = Mcv + Min \quad (4)$$

$$Fyadm = Fy/Nd \quad (5)$$

$$S_{req} = (M_{max} * 1000) / F_{yadm} \quad (6)$$

Carga Total	10000 [Kg]
Número de Perfiles extremos (n)	2
Carga Por Perfil (P)	5000 [Kg]
Número de Puntos	4
Carga puntual (Cp)	1250 [Kg]
Altura del CG (arbitrario) (h)	0.3 [mts]
Momento Flector por carga vertical (Mcv)	1250 [Kg-m]
Momento Flector por Inercia (Min)	1500 [Kg-m]
Momento Flector Máximo (Mmax)	2750 [kg-m]
Esfuerzo Admisible según AISC (Fyadm)	8.433 [Kg/mm <sup>2</sup> ]
Módulo de sección requerido (Sreq)	326099.8 [mm <sup>3</sup> ]

Tabla 2. Cálculos a flexión

Como se sabe que el módulo de sección del perfil W10 x 45 lb/pie es de 804604.8 [mm<sup>3</sup>], es por esto que al obtener un requerido de 326099.8, podemos aceptar el perfil propuesto.

Para el cálculo de las frecuencias naturales del tablero móvil, incluyendo la plancha de 1" que esta unida a los perfiles, es que, mediante el software Inventor, se halló las frecuencias naturales, siendo estas de 11.5Hz y 125 Hz

## V. RODAMIENTOS DE LA PLATAFORMA

En la base de los perfiles metálicos se colocó 6 rodamientos de acero que permiten realizar el desplazamiento de la mesa en ambas direcciones. El diseño y sus partes de los rodamientos se muestra en la figura 7.

La carga de los prototipos a ser evaluados es distribuida por la plancha de 1 pulgada, soldada en la superficie del tablero móvil. Figura 8.

A su vez por efecto de la aceleración negativa (contrario a la dirección F) el peso aplicado en las ruedas puede incrementarse hasta en 20 %

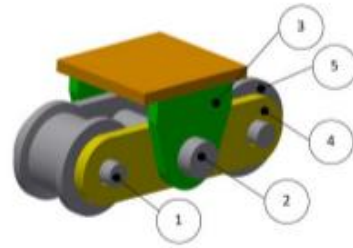


Figura 7 – Partes de los rodamientos de la plataforma

1.Eje Rodillo 2. Eje pivot 3. Cáncamo de las ruedas 4. Placas 5. Rodillo (+ Rodamiento)

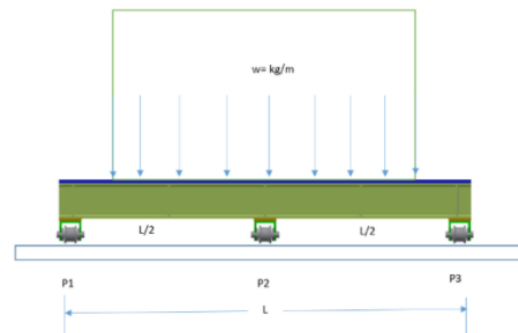


Figura 8 – Distribución de carga de los prototipos a ser evaluados

## VI. DISEÑO DEL CONTROLADOR Y REALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

Toda la implementación se encuentra desarrollada en el entorno del Simulink del Matlab el cual cumple la función de un servomotor, el cual realimenta el lazo de control por posición, leyendo a su vez la aceleración mediante sensores para cada caso conectados a la tarjeta de adquisición del Arduino y enviados por el puerto serial mediante un puerto determinado 'COM' definido por el ordenador. Estos son leídos a través del Simulink mediante el bloque SerialReceive el cual se configura para obtener los datos de la tarjeta, esta información se encuentra en código ASCII por lo que es necesario utilizar el bloque de ASCII decode el cual decodifica la información de ASCII a decimal.

Para la lectura de desplazamiento se utilizó un sensor HC-SR04 ultrasónico el cual puede determinar la variación en desplazamiento que realiza la plataforma, esta data es usada para la realimentación del

sistema y seguimiento de la señal de control, a su vez recibe la aceleración realizada mediante un acelerómetro ADXL335 el cual es un dispositivo de baja potencia que mide aceleraciones lineales perfecto para evaluar el comportamiento dinámico de la mesa. En la figura 9 se muestra el diagrama de bloques del acelerómetro, el cual proporciona 3 voltajes; Xout, Yout, Zout los cuales son proporcionales a la aceleración de cada eje X, Y Z.

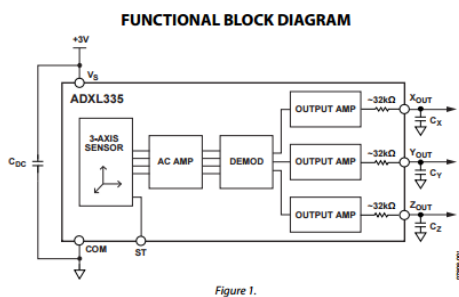


Figura 9 – Diagrama de bloques funcionales del ADX335

Para la lectura del acelerómetro se utiliza de preferencia un filtro discreto digital para mejorar la lectura, para esto utilizamos el bloque FDATool del Simulink para filtrar las frecuencias que estén por encima de 20hz, tal como se muestra en la figura 10.

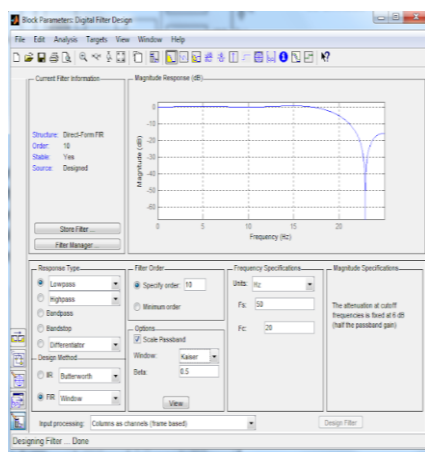


Figura 10 – Diseño del filtro digital discreto

Configurado como filtro pasabajo con un método de diseño FIR-Window del tipo kaiser, con un orden específico de 10, con una frecuencia de muestreo de 50hz y una frecuencia de corte de 20hz. De esta manera obtenemos solo las aceleraciones percibidas dentro de este rango de frecuencias.

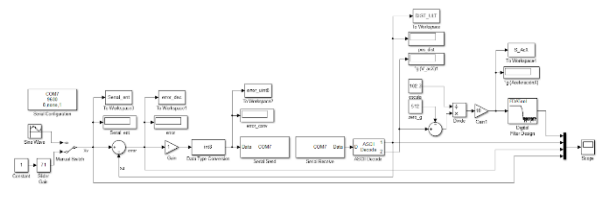


Figura 11 – Sistema de control del Simulador

Dicha realimentación del sistema se compara con la señal de comando definida por los bloques Sine wave, Slider Gain y From Workspace del Simulink, obteniendo así el error del sistema el cual ingresa al compensador y es enviado mediante el bloque Serial Send al Arduino, el cual una vez recibido en el IDE de Arduino se lee y se definen las activaciones de los Relay's para el desplazamiento del pistón hidráulico, las variaciones del error determinarán el desplazamiento que debe realizar la plataforma para que siga la señal de comando.

## VII. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica fue realizada en el Guide del Matlab en donde se tomaron en cuenta las consideraciones para el funcionamiento del simulador, parámetros de operación y la carga de los registros sísmicos obtenidos y almacenados en una base de datos. Tal como se muestran en las figuras 12 y 13.

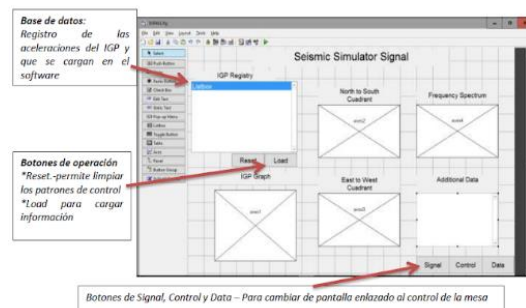
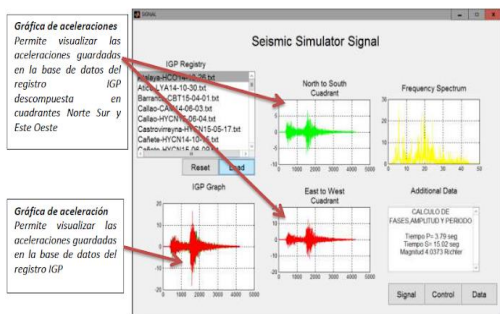


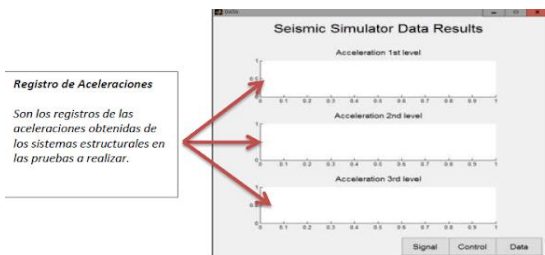
Figura 12 – Entorno gráfico "Signal" – Carga de base de datos

Una vez cargado el directorio donde se encuentra la base de datos, se visualizarán todos los registros almacenados, los cuales una vez que se carguen serán visualizados en las ventanas de IGP Graph; aceleración de los 3 ejes; North to South Cuadrant, East to West Cuadrant, y en la ventana de Frequency Spectrum se visualizarán todas las frecuencias comprendidas en dicho registro sísmico, como un agregado el programa calcula automáticamente el instante en el que se generan las ondas primarias y secundarias, así como la magnitud del sismo.



**Figura 13** – Entorno Gráfico Signal – Visualización de la base de datos en aceleraciones y espectro de frecuencias

A su vez, en la interfaz se pueden visualizar datos en tiempo real, como las aceleraciones obtenidas de los acelerómetros, como se observa en la figura 14, esto como medio interactivo para el caso de clases dictadas a alumnos demostrando diversas aceleraciones que ocurren en los diferentes niveles de lo que se evalúen.

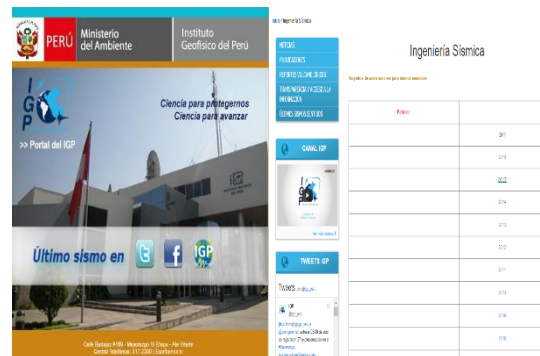


**Figura 14** – Entorno Gráfico DATA – Visualización en tiempo real de las aceleraciones en los 3 niveles de la estructura que se fueran a evaluar.

### VIII. OBTENCIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

Para la adquisición de la base de datos se ingresó a la página web del Instituto Geofísico del Perú, en donde tienen una

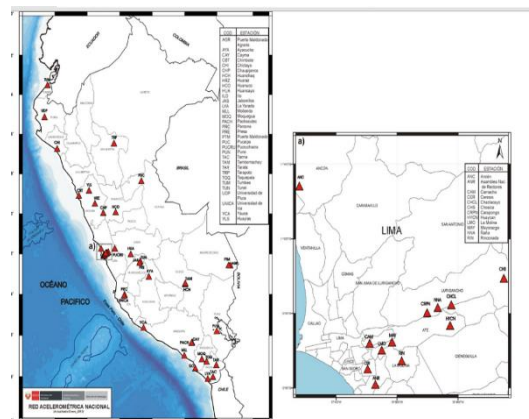
sección de investigación en Ingeniería Sísmica, con una antigüedad de 10 años y dividido en sismos adquiridos por diversos sensores alrededor del País.



**Figura 15** – Página oficial el IGP donde se obtuvo la base de datos

El registro de las aceleraciones obtenidas de la página del IGP se encuentra almacenado en una hoja de Excel, el cual posteriormente es exportado al programa Matlab donde se realizará el procesamiento para generar las condiciones de control del sistema.

La distribución de las estaciones acelerométricas tal como se muestra en la figura 10 es la distribución de acelerógrafos instalados alrededor del país.



**Figura 16** – Distribución de los acelerógrafos instalados en el País

### IX. RESULTADOS DEL SIMULADOR

Una vez fabricado el simulador se procedió a realizar los ensayos correspondientes para la calibración del sistema, para la cual se utilizó como referencias una señal senoidal controlado desde el Simulink a una amplitud de 8 cm y una frecuencia de 1hz tal como se muestra en la figura 11, posteriormente se fue graduando las frecuencias para ver la

respuesta del simulador ante estas variaciones.

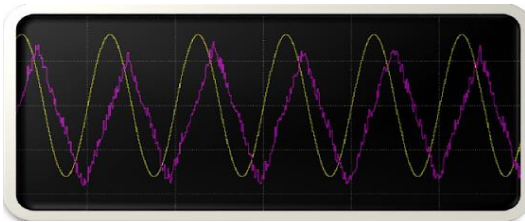


Figura 17 – Diagrama del Scope del Simulink

Al analizar la señal se visualiza un cierto desfase de la señal obtenida; señal magenta; con respecto a la señal de control; señal amarilla; y al aumentar la frecuencia hasta los 20Hz se observó que el desplazamiento de la mesa disminuye al aumentar la frecuencia.

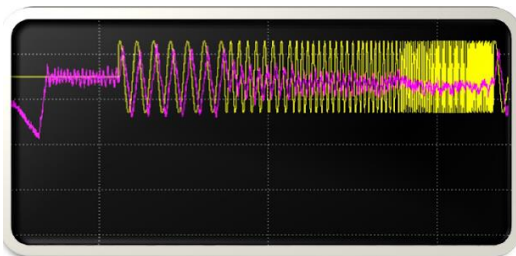


Figura 18 – Diagrama del Scope del Simulink de la prueba realizada

Para poder obtener una mejor respuesta del simulador se modificó el caudal de la bomba, para aumentar la velocidad del sistema, también se agregó el control de las electroválvulas que ejercen presión sobre los actuadores al ver que el sistema cambiaba de velocidad cuando se activan o desactivan.

Al realizar se logró mejorar la respuesta al disminuir el error de seguimiento tal como se muestra en la figura 13

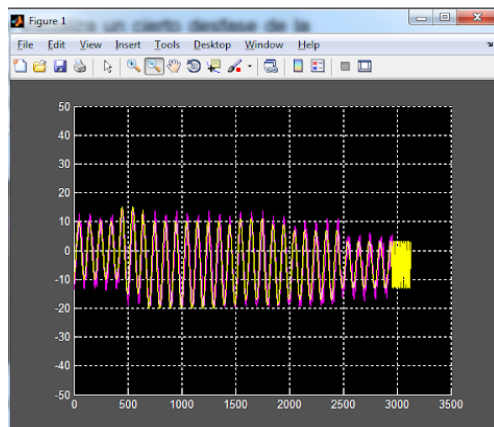


Figura 19 – Diagrama de seguimiento del pistón

Una vez realizado esto se tiene listo el simulador para ser probado ante registros sísmicos los cuales se encuentran almacenados en una base de datos con los nombres de los diferentes acelerógrafos y cargados en el software.

El error del sistema se observa en la figura 14 donde al filtrar datos se encuentran varios con un error final de menos de 0.6cm

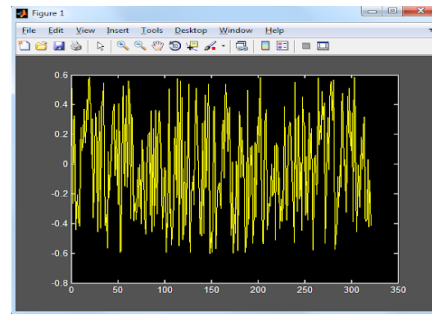


Figura 20 – Error de seguimiento del sistema

## X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó, construyó y evaluó un simulador sísmico uniaxial para estructuras de carga de hasta 10 Toneladas, el cual puede ser operado por computadora para el laboratorio de Sismos de la Universidad Ricardo Palma.

El sistema permite evaluar el comportamiento de sismo resistencia de construcciones con materiales nobles y naturales, para satisfacer la necesidad de estudiar nuevas propuestas estructurales en el área de sismos. El sistema está diseñado para ser en futuros trabajos actualizados, tanto en diseño como en construcción, y de esta manera se pueda replicar sismos en más de dos direcciones, logrando así aumentar la veracidad en los ensayos a ser realizados.

## XI. BIBLIOGRAFÍA:

- I. H. Coral et al. "Simulador Sísmico Uniaxial Tele-Operable para Modelos Estructurales de Pequeña Escala," Ingeniería y Competitividad vol. 12, pp. 95-115, 2010
- II. N. Bernal, P. Porras, y J. Carrillo, "Automatización de un simulador uniaxial para estudios experimentales en ingeniería sísmo-resistente," en Proc. First Int. Conf.

Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology, 2012.

- III. H. Coral, “Control Robusto Activo para la Minimización de Vibraciones en una Estructura Flexible de Tres Pisos bajo Excitaciones Sísmicas,”. Tesis de Maestría, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2010.
- IV. A. Román, “Design and Construction of a Module for the Dynamic Excitation and Vibrational Analysis of Structures,” en Proc. IEEE R8 Int. Conf. Computational technologies Electrical and Electronics Engineering, Irkutsk Listvyanka, Rusia, Ene. 2010, pp. 91-96.
- V. M. Blondet, y C. Esparza, “Analysis of shaking table-structure interaction effects during seismic simulation tests,” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 16, pp. 473–490, 1988.
- VI. J. Roldán, Neumática, Hidráulica y electricidad aplicada. España: Paraninfo, 1991.
- VII. K. Ogata, Modern Control Engineering. EE.UU: Prentice Hall, 2002.
- VIII. W. Ardila, “Simulación De Un Sistema Masa Resorte Amortiguador Con Circuitos Electrónicos,” Scientia et Technica, 2004.