

SHAKING TABLE FOR UNIDIRECTIONAL SEISMIC SIMULATION
MESA VIBRATORIA PARA LA SIMULACION DE MOVIMIENTOS SISMICOS
EN UNA DIRECCION

**Ing. Luis Antonio Bautista Hernández*, Ph.D. Ricardo Cruz Hernández*,
Msc. Edgar Barrios Urueña****

*** Universidad Industrial de Santander**

Escuelas de Ingeniería Civil y Física

E-mail: labautista@upbbga.edu.co, racruz@uis.edu.co

**** Universidad Pontificia Bolivariana**

Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática

E-mail: ebarrios@upbbga.edu.co

Abstract: This work has been achieved to identify design and construction requirements of seismic simulator to reproduce earthquake movements in structural building models. The closed loop control technology has been selected with hydraulic and pneumatic cylinders, proportional valves, linear potentiometers, and a data acquisition card with a personal computer as a central element of control. The LabView software has been used in implementation of PID algorithm.

Resumen: En este artículo se presentan los requisitos de diseño y construcción de un simulador sísmico destinado a la reproducción de movimientos telúricos sobre modelos de edificaciones, que permita a ingenieros, investigadores y diseñadores estructurales, predecir el comportamiento de una edificación real en condiciones de laboratorio. Para probar el sistema de control del simulador sísmico se utilizaron cilindros de accionamiento hidráulico y neumático, válvulas proporcionales, potenciómetros lineales, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora como elemento central de control. Se empleó el paquete de programación LabView para la producción del software de control el cual consiste de un algoritmo PID para la compensación de errores.

Keywords: Seismic simulator, Digital Control, Closed loop control, Seismic signals, Hydraulic control, Data acquisition card, PID Algorithm.

1. INTRODUCCION

La predominante actividad sísmica que caracteriza a nuestra región nororiental colombiana, es uno de los principales problemas naturales que enfrenta nuestro país. La ingeniería sísmica ha tratado de resolver este problema mediante diversas alternativas entre las que se contempla el estudio dinámico en modelos de edificaciones a escala mediante laboratorios de simulación sísmica.

Países como Japón y Estados Unidos, han construido sus propios laboratorios de simulación sísmica desde 1950, sin embargo es poco lo que conocemos sobre estos mecanismos.

Este artículo presenta los resultados del proyecto encaminado a enriquecer nuestro estado del conocimiento relacionado con la construcción de los simuladores sísmicos (SS) y se ha centrado específicamente en el desarrollo del sistema de

control de un (SS). Para ello fue necesario utilizar actuadores, sensores, dispositivos electrónicos y software, los cuales se emplearon para conformar un sistema de control digital en lazo cerrado, cuyos componentes se describen enseguida:

- Actuadores: se emplearon electro válvulas proporcionales y cilindros de accionamiento hidráulico y neumático, compresores, bombas hidráulicas y válvulas reguladoras de presión entre otros.
- Sensores: se utilizaron manómetros y potenciómetros lineales FESTO.
- Dispositivos electrónicos: se dispuso de una computadora personal (PC) junto con una tarjeta de adquisición de datos (TAD) National Instruments NI6014 de 16 entradas y dos salidas analógicas, capaz de registrar 200.000 muestras por segundo que dispone de un convertidor analógico digital de aproximaciones sucesivas con 16 bits de resolución.
- Se utilizó LabView 7 Express para elaborar el software de control PID.
- Se emplearon los registros acelerográficos del sismo de Armenia Colombia, proporcionados por INGEOMINAS.
- Los ensayos y puesta a punto del sistema de control se realizaron en los laboratorios del SENA Girón, Regional Santander.

2. COMPONENTES BÁSICOS DEL SS

El SS es un conjunto de dispositivos controlados mediante una PC cuyo único objetivo es hacer que la mesa sobre la cual reposa el modelo (edificación a escala), se mueva en forma idéntica a la señal sísmica de entrada. De este modo el modelo estará sometido a situaciones dinámicas similares en escala a las que estará sometida la edificación real cuando esta sea construida.

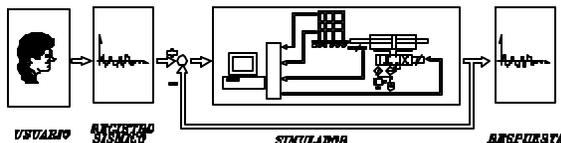


Fig. 1: Componentes principales del SS

Como se ilustra en la Figura 1, en un SS intervienen: un usuario quien imparte órdenes, un registro sísmico y finalmente la planta del simulador compuesta por todos los dispositivos físicos que obedecen las órdenes del sistema de control.

3. EL USUARIO

El usuario imparte órdenes al sistema de control mediante tres actividades básicas: control de parámetros, programación y diagnóstico así:

1. Mediante el control de parámetros, elige la combinación de ganancias del algoritmo PID: K_p (ganancia proporcional), K_i (ganancia integral) y K_d (ganancia derivativa), de modo que minimicen el error de la máquina durante un ensayo.
2. En la etapa de programación almacena en la PC, los registros sísmicos a reproducir.
3. Durante el diagnóstico, observa el error al final de un ensayo y compara con el error del ensayo inmediatamente anterior. De ser necesario se regresa a la etapa de parametrización para ajustar nuevamente las ganancias del PID que reduzcan el error durante el próximo ensayo

4. REGISTRO SÍSMICO (RS)

Captados mediante estaciones sísmicas (ES), los RS se encuentran en dos formatos básicos: la información sísmica más antigua está dispuesta en tiras de papel (RS analógico) que representan el historial de desplazamientos del terreno, mientras que la información más reciente está dispuesta en archivos digitales (RS digital), correspondientes al historial de la aceleración del sismo.

La mayoría de las ES registran dos componentes horizontales: Este-Oeste (EW) y Norte-Sur (NS), además de una componente vertical (V). Estas tres componentes permiten reproducir la información del evento sísmico en forma tridimensional.

Un aspecto importante a tener en cuenta antes de enviar los RS a la base de datos de la PC del SS, es que deben ser sometidos previamente a un proceso de depurado y adecuación que considere etapas de filtrado, integración y corrección por línea base, las cuales se explican a continuación:

4.1 Filtrado

Los RS directamente obtenidos de las ES, frecuentemente se encuentran contaminados por ruido (señales adicionales que no hacen parte del evento sísmico pero que se suman como una componente adicional) y generalmente deben someterse a un proceso de filtrado para eliminar las frecuencias que no hacen parte de la señal sísmica en su estado natural.

Una primera etapa de filtrado permite eliminar el ruido proveniente de las propias ES, la cual generalmente comprende frecuencias que oscilan entre 0.1 hasta 1 Hz. como lo sugiere JIMENES TINTAYA. En una segunda etapa de filtrado se adecua el RS para que su contenido de frecuencias recaiga en el rango de las frecuencias de operación del SS como lo advierten TAKHIROV et al.

Para el tratamiento en el dominio de las frecuencias de este tipo de señales, existen algoritmos computacionales basados en la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual es una herramienta matemática muy importante en el procesamiento de señales que sirve para transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia o viceversa. JIMENES TINTAYA recomienda los filtros Butterworth para el tratamiento de señales sísmicas.

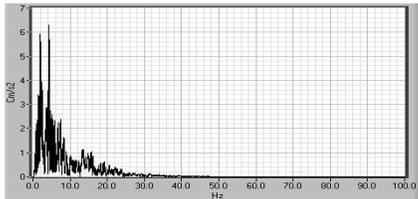


Fig.3: Espectro de frecuencias (EF), del RS de Armenia Colombia Componente EW Amplitud máxima = 6.29 Cm/s²- para 4Hz.

La Fig 3 corresponde al espectro de frecuencias del sismo de Armenia donde se puede apreciar que su contenido de frecuencias oscila entre cero y cien Hz. (Gráfica generada mediante LabView) pero existe predominancia en el rango comprendido entre cero y treinta Hz.

Una vez obtenido el espectro de frecuencias, se aplica propiamente el algoritmo de filtrado que puede ser pasa bajos, pasa altos, pasa bandas o elimina bandas.

La Fig 4 corresponde al filtro de frecuencias pasa banda tipo Butterworth de orden 4 el cual se utilizó como un filtro pasa banda para eliminar frecuencias inferiores a 2 Hz. ó superiores a 30 Hz.

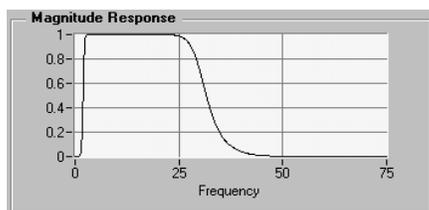


Fig.4: Filtro pasa banda con frecuencias límites de 2Hz a 30 Hz

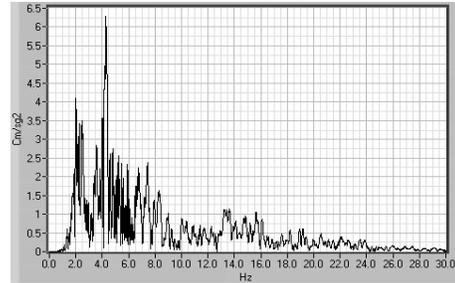


Fig.5: EF con contenido de frecuencias entre 2Hz. y 30 Hz. Amax=6.29 Cm/s² a 4.15 Hz.

Como resultado de la aplicación del filtro sobre el EF preliminar, se obtiene un nuevo EF cuyo contenido frecuencial controlado. A partir de este nuevo EF se aplica la FFT inversa para obtener finalmente un diagrama de aceleraciones en el dominio del tiempo cuyo contenido de frecuencias es controlado. La Figura 6 corresponde a la señal filtrada del sismo de Armenia cuyo contenido de frecuencias varía entre 2Hz. y 30 Hz.

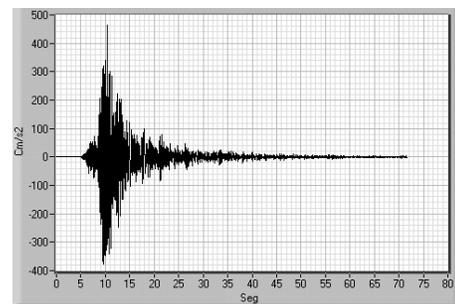


Fig. 6: Señal sísmica filtrada. PGA = 465.56 Cm/s² en t = 10.41 seg.

La señal filtrada generalmente presenta una atenuación en amplitud lo que se sugiere realizar un proceso de amplificación para controlar la amplitud de la señal procesada antes de enviarla al SS según TAKHIROV Shakhzod M. et al.

4.2 Integración

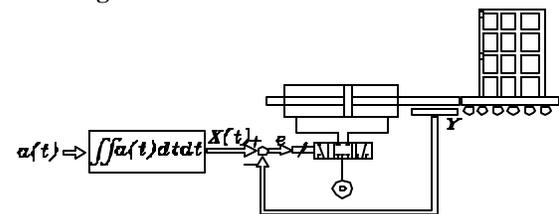


Fig.7: Esquema de control utilizado en el SS.

En la Fig 7 se observa que es necesario someter a un proceso de doble integración a los registros de aceleración para generar un registro de desplazamientos que permita realizar el bucle de control de posición del SS.

Puesto que en los registros digitales, la señal $a(t)$ está compuesta por datos discretos (la aceleración permanece constante durante cada instante dT periodo de muestreo), la integración directa sobre $a(t)$ conduce a un registro de velocidades que presenta un comportamiento lineal. De igual manera la integración directa sobre el registro de velocidades conduce a un registro de desplazamientos $x(t)$ con comportamiento parabólico (Fig 8).

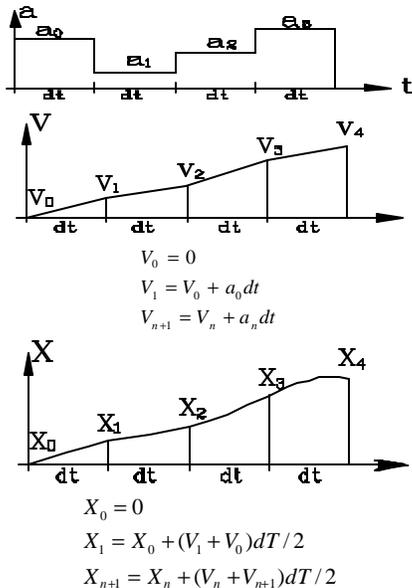


Fig.8: Procedimiento utilizado para estimar el RS de desplazamientos.

4.3 Corrimiento por línea base (CLB).

Este es un fenómeno que se presenta generalmente luego que los registros de aceleración han sido sometidos al proceso de integración, presentando desplazamientos no esperados.

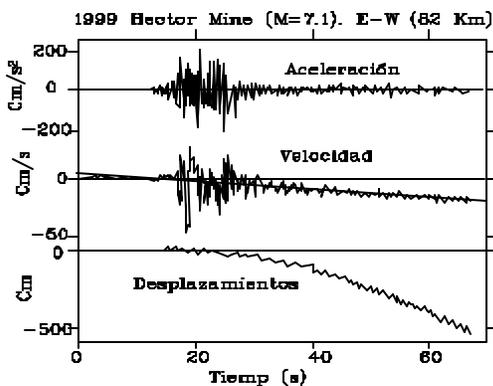


Fig.9: Ejemplo del efecto del CLB sobre un acelerograma digital. Tomado de BOORE, David M, STEPHENS Christopher y JOYNER William B.

La Figura 9 muestra un caso de CLB el cual conduce a un corrimiento lineal sobre el registro de velocidades y un corrimiento parabólico sobre el registro de desplazamientos.

Para dar solución al problema del CLB, se parte de la observación del registro de velocidades y se realiza la sustracción de su tendencia promedio observada, de esta manera se garantiza que el registro de velocidades inicie y finalice en cero que es lo esperado. Paso seguido se genera el registro de desplazamientos a partir de la integración del registro de velocidades como lo proponen BOORE et al. Para determinar la tendencia promedio del registro de velocidades, se han propuesto diversos métodos matemáticos que pueden variar de un autor a otro pero en general todos buscan una tendencia promedio que puede ser generada a partir del ajuste mediante mínimos cuadrados.

5. PLANTA FISICA DEL SS

La planta física del SS se compone de los siguientes mecanismos: un cilindro hidráulico, una válvula proporcional, una bomba hidráulica, un sensor de posición, una mesa sísmica, un modelo estructural, una tarjeta de adquisición de datos, una computadora y algunos dispositivos adicionales.

Para describir la dinámica de la planta física del SS fue necesario establecer las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema en dos aspectos principales: en primer lugar la relación entre la mesa sísmica y el modelo estructural (Interacción Mesa Modelo) y en segundo lugar la relación entre esta y los dispositivos hidráulicos servocontrolados.

Para la descripción de la interacción mesa modelo estructural se utilizaron las ecuaciones propuestas por MALDONADO y CHIO CHO relacionadas con la dinámica mesa-modelo. De otra parte, las fórmulas propuestas para describir el comportamiento de los mecanismos hidráulicos servocontrolados han sido tomadas de DE NEGRI et al.

6. INTERACCION MESA MODELO ESTRUCTURAL

Para el modelamiento del sistema mesa modelo se ha hecho una simplificación en la cual la fuerza del pistón (F_c) actúa directamente sobre la masa de la

mesa sísmica (m_a), la cual sostiene la masa del modelo (m_b) mediante un sistema flexible con elasticidad (K). Adicionalmente se ha considerado un coeficiente de atenuación (?).

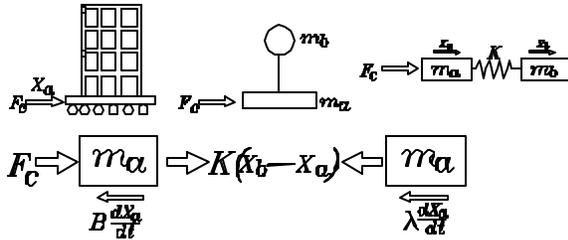


Fig.10: Modelo matemático de la interacción mesa – modelo estructural.

Las ecuaciones que describen la dinámica de interacción mesa – modelo son:

$$F_c = P_c \cdot A_a \tag{1}$$

$$P_c \cdot A_a + K(X_b - X_a) - B \frac{dX_a}{dt} = m_a \frac{d^2 X_a}{dt^2} \tag{2}$$

$$-K(X_b - X_a) - I \frac{dX_b}{dt} = m_b \frac{d^2 X_b}{dt^2} \tag{3}$$

$$X_a = P_c \left[\frac{A_a (m_b D^2 + ID + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a I + m_b B) D^3 + (m_a K + m_b K + BI) D^2 + (BK + IK) D} \right] \tag{4}$$

$$X_b = X_a \cdot \left[\frac{K}{m_b D^2 + ID + K} \right] \tag{5}$$

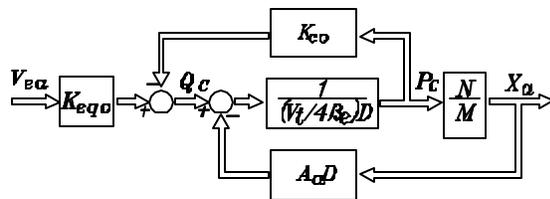


Fig. 11: Diagrama de bloques del SS:

$$X_a = P_c \left[\frac{N}{M} \right]$$

$$N = A_a (m_b D^2 + ID + K)$$

$$M = m_a m_b D^4 + (m_a I + m_b B) D^3 +$$

$$(m_a K + m_b K + BI) D^2 + (BK + IK) D$$

Lista de símbolos empleados:

F_c : Fuerza de pistón.

P_c : Presión efectiva de pistón.

A_a : Área anular de pistón.

X_a : Posición de la mesa.

X_b : Posición del centro de masa del modelo.

K : Elasticidad del modelo estructural.

I : Coeficiente de atenuación del modelo.

m_a : Masa de la mesa.

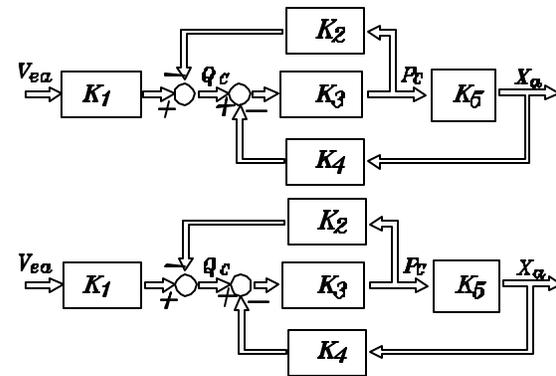
m_b : Masa del modelo.

D : Operador diferencial.

B : Coeficiente de rozamiento viscoso.

7. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA FÍSICA

Para el planteamiento de este modelo se partió de las ecuaciones propuestas por DE NEGRI *et al*, relacionadas con el modelo de servomecanismos de accionamiento hidráulico. A partir de este modelo se eliminó la etapa de retroalimentación y se agregó la interacción mesa-modelo propuesta anteriormente. Estas ecuaciones, aunque no han sido sometidas a validez experimental, se plantearon como material de apoyo para investigaciones posteriores relacionadas con el diseño de un SS.



$$V_{ea} \rightarrow \left[\frac{K_1 K_3 K_5}{1 + K_2 K_3 + K_3 K_4 K_5} \right] \rightarrow X_a$$

Fig. 12: Al ensamblar el sistema de ecuaciones se obtiene el diagrama de bloques que describe la dinámica del SS.

Convenciones empleadas:

V_{ea} : Voltaje de alimentación a la válvula proporcional.

K_{eqo} : Constante característica de la válvula proporcional, ver norma ISO 6404

K_{co} : Constante del cilindro hidráulico, ver norma ISO 6404

X_a : Posición de pistón = posición de la mesa.

A_a : Área anular de pistón.

m_a : Masa de la mesa.

m_b : Masa del modelo.

I : Constante de Amortiguación del modelo

K : Rigidez del modelo

b_e : Módulo de elasticidad efectivo del aceite

V_t : Volumen de aceite contenido entre las tuberías

K_1 : K_{eqo}

K_2 : K_{co}

K_3 : $\frac{1}{(V_t/4b_e)D}$

K_4 : $A_a D$

K_5 : Interacción mesa – modelo.

8. SENSORES DEL SS

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron sensores de posición potenciómetros lineales. Como lo indican ADRESSIN y RAICHEL'S, los sensores potenciométricos permiten generar un voltaje de salida proporcional al desplazamiento de la guía del potenciómetro acoplada al vástago del cilindro hidráulico gracias a la propiedad de resistividad eléctrica de algunos materiales conductores.

9. EL SISTEMA DE CONTROL

De acuerdo con HARRIS y SABNIS, el sistema de control para el SS es una combinación de diferentes dispositivos dispuestos en lazo cerrado entre los que se pueden identificar la planta física, la tarjeta de adquisición de datos, el sensor de posición (potenciómetro) y una computadora como elemento central de control.

Dentro de este sistema de control se manipulan señales de diversa naturaleza entre las que se distinguen las señales físicas que se transforman en señales eléctricas y que finalmente se convierten en datos o información digital.

La planta se compone básicamente de elementos sensores y motores; los sensores traducen las señales físicas como posición y aceleración en impulsos eléctricos y los elementos motrices traducen las señales eléctricas en variables físicas como presión y fuerza.

La tarjeta de adquisición de datos (TAD) es el dispositivo de comunicación entre la PC y los dispositivos físicos externos (Servoválvula, Potenciómetro y otros) y se encarga de transformar las señales eléctricas provenientes de los sensores en datos digitales dentro de la PC y estos últimos en señales eléctricas dirigidas hacia los elementos motrices.

10. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Es el elemento capaz de traducir las señales analógicas en digitales y viceversa. Para lograrlo la TAD dispone de una etapa de muestreo y captura de señales además de una etapa de conversión de señales analógica-digital y digital-analógica.

La TAD debe poseer al menos dos canales de salida analógica y dos canales de entrada analógica que permitan el control de posición en dos direcciones con velocidad de muestreo superior a 2000 muestras por segundo como se indica en el Manual de Ejes Neumáticos FESTO, A partir de las anteriores indicaciones, se seleccionó la tarjeta NI6014 con dos salidas analógicas y ocho entradas analógicas en modo diferencial. Esta TAD puede sensar 200000 muestras por segundo y dispone de un convertidor analógico digital de aproximaciones sucesivas con 16 bits de resolución.

11. EL ALGORITMO DE CONTROL

Se implementó un algoritmo PID. Como se ilustra en la Fig 13, en el control PID, la diferencia entre la señal de referencia $X(t)$ (señal proporcionada por el usuario o señal sísmica) y la señal de registro X_a (señal de posición proveniente del potenciómetro) se utiliza para alimentar tres componentes: una componente proporcional P , que se amplifica mediante una ganancia K_p , una componente integral I que integra la señal de error en función del tiempo y se amplifica mediante una ganancia K_I y finalmente una componente diferencial D que deriva el error en función del tiempo y se amplifica mediante una ganancia K_D .

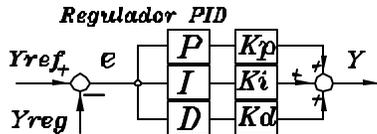


Fig. 13: Estructura básica de un regulador PID.

12. EL SOFTWARE DE CONTROL

Debe estar compuesto de los siguientes módulos: un algoritmo integrador, un algoritmo para generar señales periódicas (cuadradas, triangulares, senoidales, etc), un algoritmo limitador cuya función es controlar el voltaje de salida hacia la servoválvula que proviene de la salida del control PID y un algoritmo de control PID. De otra parte debe disponer de una serie de interfaces que permitan captar el estado de las señales tanto de los sensores de aceleración como de los sensores de posición (señales de control) y debe disponer de una interface que permita la manipulación de los parámetros de control. Para desarrollar la totalidad del programa fue necesario descomponerlo en diversos módulos de programación que cumplen tareas específicas. Cada uno de ellos se programó como SubVis en LabView 7.0 y su funcionamiento se explica a continuación.

12.1 Carga de los Registros Acelerométricos

La lectura y almacenado de los registros acelerométricos correspondientes a registros sísmicos reales requirió la elaboración de la subrutina "LOADFILE.vi" compuesta por un dato de entrada y dos datos de salida. El dato de entrada "Tipo", hace referencia a la extensión del formato en que ha sido almacenado el registro acelerométrico que para este proyecto se trata de archivos de texto "txt". El parámetro de salida: "RUTA" hace referencia a la cadena de caracteres correspondientes a la ruta en la cual se encuentra almacenado el registro acelerométrico. Finalmente el dato de salida "A", corresponde a la matriz de salida que almacenará los datos de aceleración.

12.2 Integración de Registros Acelerométricos

Para integrar los datos de aceleración captados en la primer etapa, se elaboró una subrutina denominada "AVX.vi" de integración compuesta por dos variables de entrada: "A" que corresponden a la matriz de aceleración y "mps" que corresponde a la velocidad en muestras por segundo a la cual fueron tomadas las muestras acelerométricas. La variable de salida "V" es la matriz de velocidad y "X" es la matriz de posición.

La integración se efectúa en dos etapas; una primera etapa realiza la integración inicial dando lugar a una matriz de velocidad y la segunda, realiza la integración de la velocidad para generar la matriz de posición.

12.3 Generador de Señales

Este bloque permite reproducir señales en tres formas distintas; una primera alternativa considera señales aleatorias mediante el parámetro "VALOR MANUAL", la segunda alternativa genera señales periódicas mediante los parámetros: "AMPLITUD", "FRECUENCIA" y "TIPO DE ONDA" y una tercera alternativa permite reproducir señales sísmicas mediante el parámetro "ARCHIVO".

Para sincronizar la generación de señales con el reloj del sistema, se adicionó el parámetro de entrada "T", el cual toma directamente el valor de tiempo a partir de una señal de reloj. De esta manera se resolvió el inconveniente de la sincronización de las señales en el tiempo para los diversos tipos de onda.

12.4 Compensador PID

El bloque PID se tomó de los ejemplos disponibles en LabView para control en tiempo real que contiene siete parámetros de entrada y uno de salida. La "Variable Proceso" corresponde a la señal de potenciómetro. "Set point" es el valor de consigna deseado, "P" es la ganancia proporcional, "I" es la ganancia integral, "D" es la ganancia derivativa, "Upper limit" es el valor máximo que puede tomar "Output Value", "Lower limit" es el valor mínimo que puede tomar "Output value" y finalmente "Output value" es la señal de control que se envía a la válvula proporcional.

13. SOFTWARE PARA EL CONTROL DE POSICIÓN EN DOS DIRECCIONES

El programa cuenta con dos módulos para almacenar las señales sísmicas mediante dos matrices independientes. Una señal de reloj sincroniza la ejecución de las acciones de control mediante algoritmos PID. La interfaz gráfica permitió visualizar la señal sísmica deseada y la señal de posición proveniente del potenciómetro de manera simultánea. Adicionalmente se agregó un algoritmo para evaluar el error absoluto promedio con el objeto de estimar la calidad del sistema de control en cada una de las direcciones.

14. ENSAYOS DE LABORATORIO

Como elementos de laboratorio se utilizaron una PC con procesador AMD Athlon de 1200 Mhz y memoria RAM de 120MB, el sistema operativo Windows Millenium y el software LabVIEW 7 Express. Los registros sísmicos correspondientes al sismo de Armenia Colombia, una TAD NI6014 con ocho entradas analógicas en modo diferencial y dos salidas analógicas que opera a una velocidad de 200000 muestras por segundo mediante un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 16 bits de resolución y mecanismos de accionamiento hidráulico y neumático FESTO.

Se utilizó como único criterio para medir el comportamiento del control PID durante los ensayos, el cálculo del error absoluto promedio entre la señal generada (SG, señal correspondiente al registro sísmico para un instante dado) y la señal de respuesta del (SR, señal proveniente del potenciómetro para un instante dado), mediante la siguiente ecuación:

$$\text{error}_{\text{medio}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |SR_i - SG_i|, \quad (9)$$

Donde:

N : Número de muestras.

SR_i : Señal de respuesta proveniente de potenciómetro para una muestra.

SG_i : Señal generada correspondiente a una muestra del registro sísmico.

$SR_i - SG_i$: Valor absoluto de la diferencia.

Se observaron cambios en el error promedio en función de las diferentes combinaciones de las ganancias K_p , K_i y K_d del PID. Las variaciones realizadas sobre los parámetros del PID, se aplicaron siguiendo el criterio de Ziegler - Nichols y se utilizó como elemento de ayuda visual la gráfica de pantalla que muestra en forma simultánea las señales SG y SR.

15. INTEGRACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

Para los ensayos en dos direcciones se utilizaron las dos componentes horizontales (Este-Oeste y Norte-Sur). Cada registro sísmico se somete a un proceso de doble integración mediante una rutina elaborada en LabView. Antes de realizar el proceso de integración, a cada archivo se le elimina la información de encabezado para facilitar su proceso de lectura y almacenado en una matriz.

16. REPRODUCCION DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

Al inicio de cada ensayo, con el fin de sintonizar adecuadamente las constantes del PID, se establecen las ganancias $K_p=0$, $K_i=0$ y $K_d=0$, paso seguido mediante la técnica de Ziegler - Nichols se aumenta paulatinamente la ganancia proporcional K_p , hasta hacer que el sistema oscile (oscilaciones no controladas), luego se incrementa la ganancia integral hasta observar un mejor comportamiento de seguimiento en la gráfica que muestra las señales SG y SR. El siguiente paso consiste en aumentar la ganancia derivativa procurando evitar que el sistema oscile de una manera no controlada.

17. OBSERVACIONES

Durante los ensayos de laboratorio se empleó el mecanismo de ejes neumáticos FESTO mediante el cual se reprodujo señales sísmicas en dos direcciones controladas mediante dos algoritmos de control en lazo cerrado PID. Los ensayos de sintonización de las constantes del PID siguiendo el algoritmo Ziegler - Nichols, permitieron observar lo siguiente:

- Una valor de $K_p > 2$, ocasiona oscilaciones exageradas de la señal de respuesta del sistema SR por lo que se recomienda mantener el valor $K_p = 1$.
- Con el valor $K_p = 1$, se incrementa la ganancia integral hasta el valor $K_i = 5$.
- Al incrementar la ganancia derivativa se observa que causa oscilaciones apreciables sobre la válvula proporcional incluso para valores bajos $K_d = 0.01$. En este caso se recomienda mantener $K_d = 0.001$.
- Establecidas las ganancias $K_p = 1$, $K_i = 5$ y $K_d = 0.001$ se realiza el ensayo nuevamente y se observa que el sistema funciona relativamente bien salvo algunos inconvenientes como se indica enseguida.
- Si la señal generada SG presenta oscilaciones con amplitudes relativamente pequeñas, la señal de respuesta SG se mantiene estática ocasionando un aumento en el error promedio. Este comportamiento se supone es causado por la presencia de fuerzas de rozamiento apreciables sobre el sistema.
- Al aumentar la cantidad de masa sobre el SS, su respuesta cambia de estable a inestable (SR con oscilaciones no controladas). En estas condiciones se recomienda disminuir las

ganancias K_p , K_i y K_d hasta observar un comportamiento controlado del SS.

- Se aconseja elaborar un algoritmo PID para cada eje del SS de modo que las ganancias se puedan controlar en forma independiente.

18. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En primer lugar se puede concluir que la construcción de un SS requiere el conocimiento del comportamiento de las señales sísmicas, el tratamiento de señales en tiempo discreto, la teoría de control en bucle cerrado, la hidráulica, la neumática y la sensórica sin las cuales sería imposible comprender los principios que permiten diseñar y construir un SS.

Además del fondo conceptual requerido, la experiencia ganada con este trabajo ha permitido formular algunas recomendaciones y conclusiones que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar y construir un SS.

- Un SS debe contar con un accionamiento hidráulico ya que garantiza la generación de movimientos con la precisión del orden de la micras y la aplicación de fuerzas considerables, las cuales juegan un papel importante para garantizar que el SS sea capaz de reproducir los movimientos sísmicos.
- Los mecanismos hidráulicos operan a bajas velocidades, siendo esta su principal desventaja, por lo que deben seleccionarse adecuadamente sus elementos de potencia (Motor eléctrico y bombas hidráulicas). Además hay que tener especial cuidado para no exceder las presiones de operación admisibles a las que han sido diseñados los elementos hidráulicos.
- El cálculo de la potencia de los mecanismos hidráulicos requiere tener en cuenta los parámetros más representativos de las señales sísmicas como son PGA, PGV y PGD.
- No se recomienda el accionamiento neumático para un SS porque no garantiza el control del movimiento con precisión debido a la alta compresibilidad del aire.
- Se encontró que los SS operan bajo ciertos rangos de frecuencia. Al respecto se observó que la fricción hace imposible la reproducción de señales de baja amplitud y frecuencia y que las frecuencias más altas están limitadas por el efecto compresivo de las columnas de aceite en

los cilindros hidráulicos, justo cuando se presenta el efecto de resonancia.

- Debido a que los SS operan bajo ciertos rangos de frecuencia, es necesario filtrarlas antes de enviarlas al sistema de control del SS, para ello se recomienda el uso de la FFT mediante un filtro Butterworth de orden cuatro.
- El algoritmo de control PID responde relativamente bien como elemento de control para el SS mediante accionamiento neumático, sin embargo se recomienda utilizar otras técnicas de control predictivo para proyectos futuros.

REFERENCIAS

- FESTO. Neumática en bucle cerrado. Manual didáctico.TP-111.
- FESTO. Hidráulica en bucle cerrado. Libro de Trabajo. 094368.
- HARRIS Harry G.y SABNIS Gajanan M. Structural Modeling and Experimental Techniques. 2ed. :Boca Ratón CRC Press, c1999. ISBN: 0849324696.
- FAISANDIER J. Los Mecanismos Hidráulicos. 2 ed. DONUS Paris. : Compañía Editorial Continental, S.A, México 1965. 380 p.
- SALCEDO LUNA José. Introducción al fenómeno sísmico. Bucaramanga Colombia: Universidad Industrial de Santander 1984.
- MALDONADO RONDON Esperanza y CHIO CHO Gustavo. Dinámica Estructural. Bucaramanga Colombia: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil. s.f. 202p.
- National Instruments, Manual de usuario NI 6013/6014. Julio de 2002.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. 4v. 1998.
- LEWIS Paul H y YANG, Chang. Sistemas de control en ingeniería. Madrid 1999: Prentice Hall. 480p. ISBN: 84-8322-124-1.
- ADRESSIN Ron y RAICHEL'S Daniel. Transducers and their Applications. [en línea]. [citado en marzo de 2004]. University of Hartford Biomedical Engineering. Disponible en internet: <<http://uhavax.hartford.edu/biomed/gateway/TransducersandtheirApplications.html>>.

- DYKE S.J. , NEPOTE y CAICEDO J.M. Earthquake Simulator Control by the Transfer Function Iteration Method. [en línea]. [citado en marzo de 2004]. Disponible en internet en: <<http://128.252.240.153/users/jumaca/papers/TFI1.pdf>>.
- TAKHIROV Shakhzod M et al. Ground Motions for Earthquake Simulator Qualification of Electrical Substation Equipment. [en línea]. California. : Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley. [citado en 10 02 2006]. Disponible en internet en: <<http://peer.berkeley.edu/productos/PEERDigests/digests02/rd2005-1.pdf>>.
- DYKE Shirley J y JANSEN Laura M. Implications of Control-Structure Interaction in Scaled Structural Control System Testing. [en línea]. Washington University ST. Louis Missouri. [citado en 10 02 2006]. Disponible en internet en: <<http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/pdfs/cca99.pdf>>.
- DE NEGRI Victor Juliano. SARQUIS Sérgio y BASTOS DE TOLEDO Leonardo. Controle de Posicao Utilizando Servoválvulas e Válvulas Proporcionais Electro-hidráulicas. Revista: ABHP, Sao Paulo. 1997. 106p.
- BOORE. David M , STEPHENS Christopher D y JOYNER William B. Comments on Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of América, Vol. 92, No 4. p 1543-1560, May 2002. [en línea]. [citado en feb de 2006]. Disponible en: <http://wr.usgs.gov/~boore/pubs.online/ssa00926_hector_mine.pdf>.
- BOORE. David M. Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 5, p. 1199-1211, october 2001. [en línea] [citado en feb 24 de 2006]. Disponible en internet en: <http://quake.wr.usgs.gov/~boore/pubs_online/ssa00703_Chi_Chi_baseline.pdf>.
- JIMENES TINTAYA. César Omar. Procesamiento digital de señales sísmicas en entorno Matlab. Instituto Geofísico del Perú. [en línea] [citado en mayo de 2006]. Disponible en internet en: <[http://jro.jpg.gob.pe/subwebs/teps1/presentaciones/Cjimenez_ProcSenals\(explic\).pdf](http://jro.jpg.gob.pe/subwebs/teps1/presentaciones/Cjimenez_ProcSenals(explic).pdf)>.