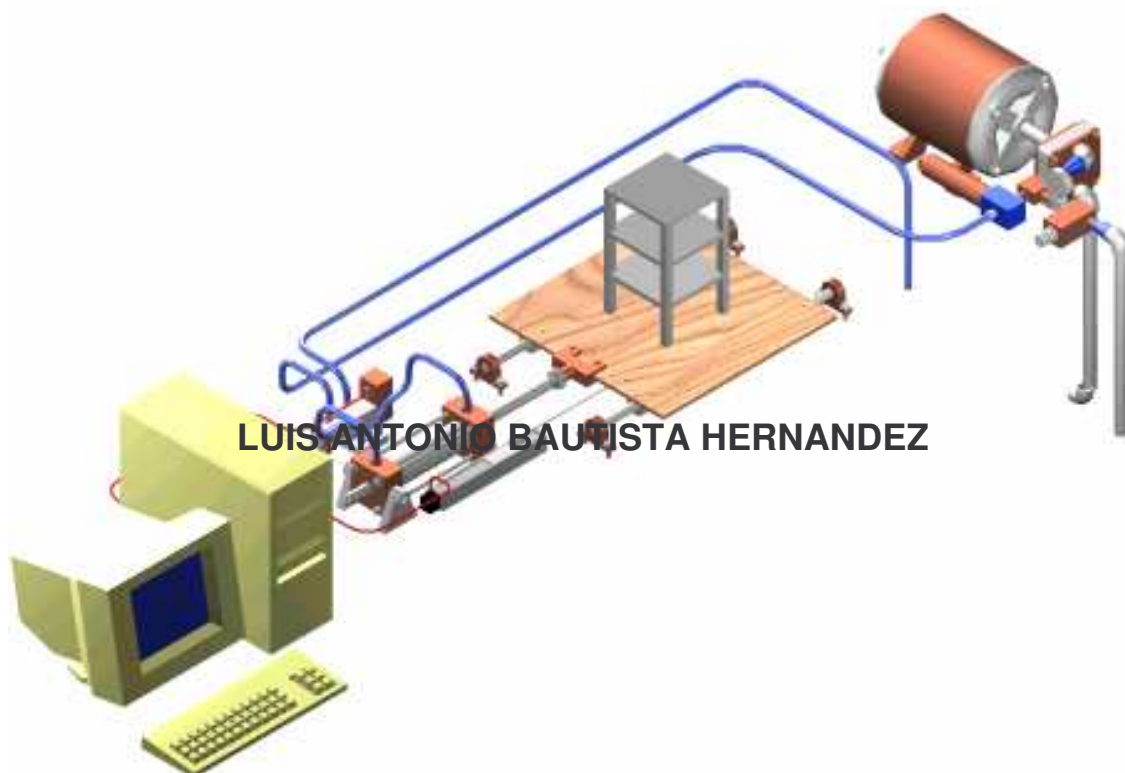


MESA VIBRATORIA PARA LA SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS TELÚRICOS EN UNA DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECAÓNICAS
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA
Bucaramanga 2005**

**MESA VIBRATORIA PARA LA SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS
TELÚRICOS EN UNA DIRECCIÓN**

LUIS ANTONIO BAUTISTA HERNÁNDEZ

**Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en
Informática**

Director:

RICARDO CRUZ HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil, PhD.

Codirector:

EDGAR BARRIOS URUEÑA
Ingeniero Eléctrico, MsC

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECAÓNICAS
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA
Bucaramanga 2005

RESUMEN

TÍTULO* MESA VIBRATORIA PARA LA SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS TELÚRICOS EN UNA DIRECCIÓN

AUTOR: LUIS ANTONIO BAUTISTA HERNANDEZ**

PALABRAS CLAVES: Simulador sísmico, Control digital, Control en lazo cerrado, Señales sísmicas, Accionamiento hidráulico, Tarjeta de adquisición de datos, Algoritmos PID.

En este proyecto se identificó y esquematizó los componentes y las tecnologías mas recomendables para desarrollar un simulador sísmico, se planteó un modelo matemático de la planta del simulador en la que se contempló adicionalmente el efecto de interacción mesa modelo; aunque este modelo en esencia es no lineal, sin embargo se consideró una linealización. Posteriormente se diseñó e implementó el software del sistema de control mediante LabView y finalmente se estudió el comportamiento del sistema mediante diferentes combinaciones de compensación. Para el estudio del comportamiento del sistema de control en lazo cerrado, se consideró el algoritmo PID específicamente y sus posibles variantes: P, PI, PD y PID mediante tres tipos principales de señales de prueba.

Se elaboró una subrutina LabView encargada de generar señales de control en tres formas distintas: una primer alternativa consideró la posibilidad de realizar el control en forma manual, la segunda alternativa contempló la generación de señales periódicas cuadrada, triangular y senoidal con amplitudes y frecuencias controladas y finalmente la generación de señales discretas de aceleración para lo cual se utilizaron los registros del sismo de Armenia proporcionados por INGEOMINAS.

En una etapa final se realizó ensayos en el equipo de ejes neumáticos FESTO con dos grados de libertad para lo cual se implementó un software con capacidad de reproducir dos señales independientes y de esta manera se logró el control en dos direcciones. Como señales de prueba se utilizaron los registros sísmicos correspondientes a las dos componentes horizontales del sismo de Armenia proporcionados por INGEOMINAS.

* Trabajo de investigación

** RICARDO CRUZ HERNANDEZ, Profesor Escuela de Ingeniería Civil, *Universidad Industrial de Santander* racruz@uis.edu.co.
EDGAR BARRIOS URUEÑA, Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática Universidad Pontificia Bolivariana
ebarrrios@upbbga.edu.co

ABSTRACT

TITLE: UNIDIRECTIONAL SEISMIC SIMULATOR SHAKE TABLE

AUTHOR: LUIS ANTONIO BAUTISTA HERNANDEZ**

KEY WORDS: Seismic simulator, digital control, closed loop control, seismic signals, hydraulic motion, data acquisition card, PID algorithms.

The most recommended components and technologies have been identified and schematized in this project for the development of a seismic simulator. A mathematic model of the simulator plant has been pointed out in which was considered the additional effect of the model table interaction; though this model is not essentially lineal, a linear differential equation was considered. Afterwards was designed and implemented the software of the control system through LabView and finally the behavior of the system was studied through different combinations of compensation. For the study of the system behavior and control in closed loop, the PID algorithm and its possible variants were specifically considered: P, PI, PD, and PID, through three main kinds of test signals.

A subroutine LabView was created, in charge of generating control signals in three different ways: a first alternative considered the possibility to take control in a manual way; the second alternative considered the generation of periodical signals with square, triangular, sinus form signals, with controlled width and frequencies. Finally the discrete acceleration signals generation for which the seismic data of the Armenia, Colombia, earthquake given by INGEOMINAS, Colombia, were used

In a final stage, some essays were done in the FESTO pneumatic axes equipment with two degrees of freedom for which a software was applied with the availability to reproduce two independent signals and, in this way, the bidirectional control was achieved.

** RICARDO CRUZ HERNANDEZ, Profesor Escuela de Ingeniería Civil, *Universidad Industrial de Santander* rcruz@uis.edu.co.
EDGAR BARRIOS URUEÑA, Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática Universidad Pontificia Bolivariana
ebarrrios@upbbga.edu.co

A Dios el creador por darme la vida.
A mis padres porque han depositado en mi toda su confianza y amor
verdaderos.
A Johana porque me ha acompañado y animado a seguir adelante
con este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Ingeniero, Msc, EDGAR BARRIOS URUEÑA, Codirector del proyecto, decano de la facultad de Ingeniería Informática de la UPB Florida, por su apoyo técnico.

Profesor, ORLANDO BELTRÁN, jefe de personal SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por su aporte en el área de la hidráulica.

Profesor, OVIDIO TELLO, instructor SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por su contribución en el área de la neumática.

Ingeniero, MANUEL VARGAS, instructor SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por su participación en el área del PLC.

Ingeniero, RODRIGO ACEVEDO, instructor SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por su valiosa contribución en el área del control en bucle cerrado.

Ingeniero, CARLOS HORACIO ROBLES, instructor SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por su contribución con los laboratorios de hidráulica en bucle cerrado.

Ingeniero, JORGE SANTAMARIA, docente UPB Florida, por su importante contribución en el área del control mediante PC, LabView y Tarjetas de adquisición de datos.

Ingeniera MARIA LUISA BERMUDEZ, representante de INGEOMINAS BOGOTÁ, por aportar los registros acelerográficos con los cuales se realizaron los ensayos de laboratorio.

SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, por todo su apoyo técnico, humano y sus valiosos laboratorios sin los cuales hubiese sido imposible palpar experimentalmente los resultados de este trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1. Causas del fenómeno sísmico	19
1.2. Efectos del fenómeno sísmico	20
1.3. Soluciones	21
1.3.1. Mapas de sismicidad.....	21
1.3.2. Construcción de edificaciones mas resistentes.....	21
1.3.3. Códigos sísmicos	21
1.3.4. Prevención.....	21
1.3.5. Predicción.....	21
1.3.6. Simulación	22
2. JUSTIFICACIÓN	24
3. USUARIOS	25
4. OBJETIVOS.....	26
4.1. OBJETIVO GENERAL	26
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
5. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....	27
5.1. EL USUARIO	29
5.2. LOS REGISTROS SÍSMICOS	29
5.2.1. FORMATO DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.....	30
5.2.2. INTEGRACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.....	31
5.2.3. FILTRADO DE LA SEÑAL	32
5.2.4. PARÁMETROS BÁSICOS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.....	34
6. PLANTA FÍSICA	35
6.1. GRUPO DE ACCIONAMIENTO (CILINDRO-VÁLVULA-MESA)	36
6.1.1. EL CILINDRO HIDRÁULICO	37
6.1.2. VÁLVULA PROPORCIONAL	39
6.1.3. LA MESA DE SIMULACIÓN	42
7. INTERACCIÓN MESA MODELO.....	43

7.1.	ECUACIONES DE DISEÑO.....	44
8.	GRUPO DE ACCIONAMIENTO HIDRÁULICO.....	45
8.1.	RECOMENDACIONES	46
8.2.	MOTOR ELÉCTRICO.....	46
8.2.1.	FUNCIONAMIENTO.....	46
8.2.2.	CONVENCIONES.	46
8.2.3.	ECUACIONES DE DISEÑO.....	47
8.3.	BOMBA HIDRÁULICA.....	47
8.3.1.	FUNCIONAMIENTO.....	47
8.4.	FILTRO HIDRÁULICO	48
8.4.1.	FUNCIONAMIENTO.....	48
8.4.2.	ECUACIONES DE DISEÑO.....	48
8.5.	MANÓMETROS	48
8.6.	VÁLVULA LIMITADORA DE PRESIÓN.....	49
9.	SENSORES.....	50
9.1.	SENSORES DE POSICIÓN (POTENCIÓMETROS)	50
9.1.1.	FUNCIONAMIENTO.....	51
9.1.2.	ECUACIONES DE DISEÑO.....	51
9.2.	SENSORES DE ACELERACIÓN	51
9.2.1.	FUNCIONAMIENTO.....	52
10.	MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA FÍSICA	53
11.	EL SISTEMA DE CONTROL	55
11.1.	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (TAD).....	57
11.1.1.	ETAPA DE MUESTREO Y RETENCIÓN.....	57
11.1.2.	FILTROS.....	58
11.1.3.	ETAPA DE CONVERSIÓN.	59
11.1.4.	PROBLEMAS ADICIONALES DE LAS TAD.	61
11.2.	CONTROLADORES PID.....	62
11.2.1.	AJUSTE DEL CONTROL PID.....	62
12.	EL SOFTWARE DE CONTROL.....	64
12.1.	SOFTWARE PARA EL CONTROL DE POSICIÓN EN UNA DIRECCIÓN	65
12.1.1.	CARGA DE REGISTROS ACELEROMÉTRICOS.....	66
12.1.2.	INTEGRACIÓN DE REGISTROS ACELEROMÉTRICOS	67
12.1.3.	VALORES MÁXIMO DE DESPLAZAMIENTO.	68
12.1.4.	COMPONENTE DE CONTROL.....	69

12.1.5.	GENERADOR DE SEÑALES	70
12.1.6.	COMPENSADOR PID	71
12.1.7.	OSCILOSCOPIO	72
12.2.	SOFTWARE PARA EL CONTROL DE POSICIÓN EN DOS DIRECCIONES. 73	
13.	ENSAYOS DE LABORATORIO	75
13.1.	INTEGRACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.....	76
13.2.	REPRODUCCIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.....	79
13.2.1.	OBSERVACIONES	80
14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFIA	87

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 El Magma en el interior de la corteza terrestre, forma corrientes de convección que ocasionan derivas continentales, fenómenos de subducción, formación de dorsales y efectos sísmicos diversos.</i>	19
<i>Ilustración 2. Colombia presenta una gran influencia sísmica, causada por el fenómeno de subducción de la placa de nazca bajo la placa del caribe.</i>	20
<i>Ilustración 3 Componentes principales del simulador.</i>	27
<i>Ilustración 4 Isométrica del simulador.</i>	28
<i>Ilustración 5 Esquema modelo del simulador.</i>	28
<i>Ilustración 6 Interacción entre el usuario y el sistema de control.</i>	29
<i>Ilustración 7 Procedimiento utilizado para captar los registros sísmicos.</i>	30
<i>Ilustración 8 Acelerograma correspondiente a la estación Fields Fire Sta correspondiente a un sismo de Coalinga en 1983, tomado de INGEOMINAS.</i>	30
<i>Ilustración 9 Ejemplo de registro digital del sismo de Armenia. Fuente Ingeominas.</i>	31
<i>Ilustración 10 La señal del acelerograma debe ser integrada antes de ser introducida al simulador.</i>	31
<i>Ilustración 11 Procedimiento para realizar la doble integración de los registros de aceleración.</i>	32
<i>Ilustración 12 Proceso de filtrado tomado de PEER Report 2004/xx [107].</i>	33
<i>Ilustración 13 Dispositivos físicos que componen al simulador.</i>	35
<i>Ilustración 14 Diagrama esquemático del simulador.</i>	36
<i>Ilustración 15 Detalle isométrico del grupo de accionamiento cilindro-válvula-mesa.</i>	36
<i>Ilustración 16 Detalle vistas superior y perfil de los componentes del grupo hidráulico de accionamiento.</i>	36
<i>Ilustración 17 Detalle isométrico y esquema del cilindro hidráulico.</i>	37
<i>Ilustración 18 Componentes del cilindro hidráulico.</i>	37
<i>Ilustración 19 Detalle isométrico y componentes de la válvula proporcional.</i>	39
<i>Ilustración 20 Diagrama de bloques servo-válvula.</i>	40
<i>Ilustración 21 El caudal en la servo-válvula es función de la tensión de entrada.</i>	40
<i>Ilustración 22 La servo-válvula MPYE 5 1/8 Festo presenta buen comportamiento en amplitud con frecuencias de entrada hasta de 70 Hz. Sin retraso de fase.</i>	41
<i>Ilustración 23 Comportamiento de la servo-válvula con diferentes valores de solapamiento.</i>	41
<i>Ilustración 24 Detalle isométrico de la mesa del simulador sísmico.</i>	42
<i>Ilustración 25 Detalle de componentes del sistema mesa sísmica.</i>	42
<i>Ilustración 26 Detalle conjunto mesa – modelo.</i>	43
<i>Ilustración 27 Esquema e idealización sistema mesa – modelo.</i>	43
<i>Ilustración 28 Fuerzas actuantes sobre el sistema mesa modelo.</i>	43
<i>Ilustración 29 Diagrama de bloques de la interacción mesa – modelo.</i>	44
<i>Ilustración 30 Detalle del grupo de generación de potencia del sistema hidráulico.</i>	45
<i>Ilustración 31 Isométrica del motor eléctrico.</i>	46
<i>Ilustración 32 Vistas isométricas, lateral y frontal de la bomba de engranes.</i>	47
<i>Ilustración 33 Manómetro típico.</i>	48
<i>Ilustración 34 válvula limitadora de presión.</i>	49
<i>Ilustración 35 Esquema de acoplamiento pistón potenciómetro.</i>	50

<i>Ilustración 36 En los potenciómetros la posición es proporcional a la resistencia.</i>	51
<i>Ilustración 37 Función de transferencia del sistema cilindro, válvula, mesa, modelo.</i>	54
<i>Ilustración 38 Alternativa de control con el PC como elemento dentro del bucle de control en lazo cerrado.</i>	55
<i>Ilustración 39 Alternativa de control que contempla al PC como generador de señales, excluido del bucle de control en lazo cerrado.</i>	55
<i>Ilustración 40 Esquema básico de la tarjeta de adquisición de datos (TAD).</i>	57
<i>Ilustración 41 Detalle de una tarjeta de adquisición de datos. Tomado de la WEB.</i>	57
<i>Ilustración 42 Esquema de funcionamiento de la etapa de muestreo y retención</i>	58
<i>Ilustración 43 Esquema convertidor D/A básico.</i>	60
<i>Ilustración 44 Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.</i>	60
<i>Ilustración 45 Algoritmo de regulación PID.</i>	62
<i>Ilustración 46 Tabla de ajuste del control PID mediante el método Ziegler-Nichols.</i>	63
<i>Ilustración 47 Ajuste Ziegler Nichols mediante la respuesta a un escalón.</i>	63
<i>Ilustración 48 Estructura del Software del simulador.</i>	64
<i>Ilustración 49 Panel frontal o interfaz de usuario elaborado en LabView 7Express.</i>	65
<i>Ilustración 50 Diagrama de bloques del SubVi "LOADFILE.vi".</i>	66
<i>Ilustración 51 Panel frontal para el control de posición con dos grados de libertad.</i>	73
<i>Ilustración 52 Diagrama de bloques para el control de posición con dos grados de libertad.</i>	74
<i>Ilustración 53 Archivo correspondiente al sismo de Armenia de 1999, componente N-S.</i>	76
<i>Ilustración 54 Archivo correspondiente al sismo de Armenia de 1999, componente E-W.</i>	76
<i>Ilustración 55 Diagrama de bloques de la Rutina en LabView utilizada para integrar los registros sísmicos.</i>	77
<i>Ilustración 56 Resultado de la integración del registro sísmico del sismo de Armenia Colombia, componente N-S. PGD = 2.95 cm, PGV = 25.6 cm/seg, PGA = 580.102 cm/sg²</i>	78
<i>Ilustración 57 Resultado de la integración del registro sísmico del sismo de Armenia Colombia, componente E-W. PGD = 4.29 cm, PGV = 27.01 cm/seg, PGA = 518.37 cm/sg².</i>	79
<i>Ilustración 58 Dispositivo de ejes neumáticos FESTO utilizado para realizar los ensayos de control por posición. La masa central es accionada mediante un cilindro neumático el cual es controlado mediante un sistema de control en lazo cerrado y un regulador PID.</i>	82
<i>Ilustración 59 Servoválvula MPYE de 5 vías 1/8 FESTO de accionamiento electro neumático</i>	83
<i>Ilustración 60 Manifold FESTO.</i>	83
<i>Ilustración 61 Unidad de compresión de aire FESTO.</i>	83
<i>Ilustración 62 Banco de trabajo de hidráulica básica.</i>	84
<i>Ilustración 63 Válvula proporcional.</i>	84
<i>Ilustración 64 Unidad de potencia hidráulica.</i>	84
<i>Ilustración 65 Unidad lineal de accionamiento hidráulico.</i>	84
<i>Ilustración 66 Tarjeta PID FESTO.</i>	85
<i>Ilustración 67 Generados de ondas de amplitud y frecuencia controlada con diferentes tipos de señales periódicas: cuadrada, senoidal y triangular.</i>	85
<i>Ilustración 68 Unidad potenciométrica FESTO como Sensor de posición.</i>	85
<i>Ilustración 69 Computadora personal Pentium.</i>	86
<i>Ilustración 70 Tarjeta de adquisición de datos NI6014.</i>	86

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Registro de algunos sismos importantes [2]</i>	18
<i>Tabla 2 Algunos sismos históricos</i>	20
<i>Tabla 3 Clasificación de los tipos de mesas sísmicas según su tamaño. Tomado de Harris G Harris [50]</i>	23
<i>Tabla 4 Variables y señales</i>	56

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 Principio de funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos.....</i>	<i>52</i>
<i>Ecuación 2 Igualdades matemáticas para el principio de conversión A/D, D/A.....</i>	<i>59</i>

INTRODUCCIÓN

Este proyecto dirigido preliminarmente al diseño y elaboración de una mesa para la simulación de movimientos telúricos sobre prototipos estructurales a escala, se propuso por primer vez durante el primer semestre del año 2002 ante el grupo de Investigación en estructuras y materiales de construcción INME, a cargo del Doctor RICARDO CRUZ HERNANDEZ, en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

La necesidad de desarrollar este proyecto se justifica si consideramos la gran actividad sísmica que caracteriza a nuestra región, hecho que amerita la dedicación de todos nuestros esfuerzos académicos y científicos en busca de un bienestar social en el futuro de nuestro país.

Dos factores primordiales se convirtieron en limitantes para el desarrollo de la totalidad del proyecto como se pretendía en un principio. Por un lado la gran diversidad de áreas del conocimiento involucradas como la hidráulica, la neumática, la electrónica, el tratamiento de señales en tiempo discreto, la sísmica, la dinámica, las leyes de similitud sobre modelos estructurales a escala y el control digital en lazo cerrado mediante PC, hicieron que el proyecto se limitara al diseño del sistema de control PID mediante una implementación software.

Aunque en un principio se pretendía construir la totalidad del simulador, Las limitaciones económicas del proyecto indujeron a la compra de una tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments NI6014 de entradas y salidas analógicas con velocidades de hasta 200000 muestras por segundo. En cuanto a los componentes mecánicos como la unidad de potencia hidráulica, las válvulas proporcionales y elementos adicionales, se decidió posponer su adquisición para un proyecto posterior debido a que se pudo disponer de los laboratorios del SENA GIRÓN REGIONAL SANTANDER, donde se realizaron la totalidad de los ensayos experimentales.

Debe aclararse que el producto de este trabajo de investigación lo constituyen dos componentes que pueden ser enunciados por orden de importancia de menor a mayor de la siguiente manera: en menor importancia la identificación de las tecnologías necesarias para desarrollar el proyecto, una breve descripción de cada uno de los componentes que intervienen en la conformación física del simulador, la especificación de algunas pautas de diseño además de la selección de componentes y de mayor importancia, el diseño, elaboración e implementación del sistema de control mediante software LabView a través de la tarjeta de adquisición de datos NI6014.

La metodología para desarrollar este proyecto se llevó acabo de la siguiente manera: En primer lugar, se identificó y esquematizó cada componente involucrado. Paso seguido se seleccionó las tecnologías mas recomendables para desarrollar el proyecto. Se planteó adicionalmente un modelo matemático de la planta del simulador en la que se contempló adicionalmente el efecto de interacción mesa modelo; aunque este modelo en

esencia es no lineal, sin embargo se consideró una linealización según la propuesta de la referencia [119]. Posteriormente se diseñó e implementó el software del sistema de control mediante LabView y finalmente se estudió el comportamiento del sistema mediante diferentes combinaciones de compensación. Para el estudio del comportamiento del sistema de control en lazo cerrado, se consideró el algoritmo PID específicamente y sus posibles variantes: P, PI, PD y PID mediante tres tipos principales de señales de prueba.

Se elaboró una subrutina LabView encargada de generar señales de control en tres formas distintas: una primer alternativa consideró la posibilidad de realizar el control en forma manual, la segunda alternativa contempló la generación de señales periódicas cuadrada, triangular y senoidal con amplitudes y frecuencias controladas y finalmente la generación de señales discretas de aceleración para lo cual se utilizaron los registros del sismo de Armenia proporcionados por INGEOMINAS.

Debido a la disponibilidad de laboratorios tanto de hidráulica como de neumática en las instalaciones del SENA GIRON REGIONAL SANTANDER, hubiese sido recomendable realizar ensayos en ambos laboratorios, sin embargo las dificultades técnicas se hicieron presentes pudiendo enunciarse de la siguiente manera:

En cuanto a los mecanismos de accionamiento hidráulico, se pudo observar que permitían realizar el control con buena precisión debido a las bajos índices de compresibilidad y además permitieron generar fuerzas muy superiores a los equipos neumáticos pero los caudales y potencias bajos de las bombas hidráulicas hicieron imposible realizar ensayos puesto que las señales sísmicas se caracterizan por velocidades superiores a las logradas por los mecanismos hidráulicos los cuales respondían en forma lenta.

Con respecto a los mecanismos de accionamiento neumático, se observó que los altos índices de compresibilidad generaban notable imprecisión en el control de la posición, adicionalmente estos equipos operaban a presiones del orden de los 6 Bar haciendo imposible generar fuerzas comparables a las de los equipos hidráulicos, sin embargo las velocidades de respuesta de estos equipos les permitió seguir a las señales sísmicas con velocidades incluso superiores y el problema de la imprecisión se vio compensado gracias a las cualidades del sistema de control en lazo cerrado.

En una etapa final se pudo superar uno de los objetivos del proyecto que pretendía controlar el simulador en un único grado de libertad. Para lograrlo se realizó ensayos en el equipo de ejes neumáticos FESTO con dos grados de libertad para lo cual se implementó un software con capacidad de reproducir dos señales independientes y de esta manera se logró el control en dos direcciones. Como señales de prueba se utilizaron los registros sísmicos correspondientes a las dos componentes horizontales del sismo de Armenia proporcionados por INGEOMINAS.

GLOSARIO

A/D:	Análogo digital.
D/A:	Digital análogo.
DOF:	Grados de libertad (Degree of freedom).
FFT:	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).
Gal:	Cm/s^2
LSB:	Bit menos significativo en un número binario (Less Significant Bit).
Mps:	Muestras por segundo.
MSB:	Bit mas significativo en un número binario (More significant Bit).
Ondas P:	Ondas primarias.
Ondas S:	Ondas secundarias.
PC:	Computadora personal (Personal Computer).
PGA:	Aceleración pico de sitio (Peak Ground Acceleration).
PGD:	Desplazamiento pico de sitio (Peak Ground Displacement).
PGV:	Velocidad pico de sitio (Peak Ground Velocity).
PID:	Algoritmo de control proporcional, diferencial e integral.
SS:	Simulador sísmico.
TAD:	Tarjeta de adquisición de datos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

[2] Los terremotos constituyen una de las catástrofes naturales mas devastadoras y aterradoras que existen. La tierra fuente y símbolo de lo constante firme e imperecedero es súbitamente sacudida y rota, atemorizando al hombre que encara el fenómeno con su condición de mortal ante las fuerzas enormes de la naturaleza. En unos cuantos momentos, miles de personas pueden perder bienes, salud, seres queridos y tal vez la vida.

Algunos terremotos han llegado a causar cientos de miles de muertes y graves daños en áreas de miles de kilómetros cuadrados y se recuerdan como fechas dolorosas de la historia de la humanidad.

Tabla 1 Registro de algunos sismos importantes [2]

<i>Sismo</i>	<i>Fecha</i>	<i>Muertes</i>
<i>Turkmenia (ex URSS)</i>	<i>2000 a.c.</i>	<i>Algunas</i>
<i>Daipul (India)</i>	<i>893</i>	<i>180.000</i>
<i>Ardabil (Iran)</i>	<i>Mayo 23 de 893</i>	<i>150.000</i>
<i>Mar Egeo</i>	<i>1201</i>	<i>100.000</i>
<i>Egipto, Siria</i>	<i>Julio 5 de 1201</i>	<i>1'100.000</i>
<i>Sicilia (Italia)</i>	<i>Enero 9 de 1693</i>	<i>93.000</i>
<i>Hokkaido (Japón)</i>	<i>Diciembre 30 de 1730</i>	<i>137.000</i>
<i>Pekín (China)</i>	<i>Noviembre 30 de 1731</i>	<i>100.000</i>
<i>Calcuta (India)</i>	<i>Octubre 11 de 1737</i>	<i>300.000</i>
<i>San Francisco (EUA)</i>	<i>Abril 18 de 1906</i>	<i>700</i>
<i>Guatemala</i>	<i>Febrero 4 de 1976</i>	<i>23000</i>

[84] En Colombia, el primer evento sísmico del cual se tiene registro histórico, ocurrió en 1566 causando graves daños en Popayán y Cali. El 31 de enero de 1906 frente a Tumaco, se presentó uno de los eventos sísmicos mas importantes ocurridos. A partir de 1995, se inició una gran actividad sísmica; el 19 de enero con el sismo en Tauramena, Casanare, produciendo víctimas y daños en Bogotá, Casanare e incluso en Santa Fe de Bogotá. El ocho de febrero del mismo año, se presentó otro sismo entre el Valle del Cauca y Chocó, produciendo víctimas y daños. En Pereira hubo colapso de edificios y gran cantidad de daños estructurales. Posteriormente se presentaron sismos en San Andrés isla y pasto.

Uno de los sismos mas recientes y devastadores de Colombia, ocurrió en Armenia en Enero de 1999, el cual nos recordó que nuestro país se encuentra en una de las zonas mas sísmicas del planeta.

[49] De acuerdo con la revista Noticreto #51 de 1999; del último estudio de amenaza sísmica del país se sabe que el 86% de los colombianos vive en zona de considerable riesgo sísmico, a saber doce millones (equivalentes al 35% de la población) en 475

municipios se asientan en zonas de amenaza sísmica alta; 17 millones (51% del total) se encuentran en 435 municipios localizados en zona de amenaza sísmica intermedia, y cinco millones (14%) pertenecientes a 151 municipios, viven en zonas de amenaza sísmica baja.

1.1. Causas del fenómeno sísmico

[64] Actualmente se acepta que mediante la teoría de las placas tectónicas, hace doscientos millones de años existía un solo continente (La Pangea) en cuyo interior reside el magma el cual aún se encuentra a altas temperaturas que inducen altas presiones y consecuentemente fuerzas formidables capaces de desplazar y fracturar placas tectónicas dando lugar a la formación de los actuales continentes y cordilleras. La dinámica de las placas tectónicas genera zonas de contacto, fallas y erupciones volcánicas cuya acción se traduce en ondas sísmicas capaces de destruir las edificaciones que el hombre ha construido.

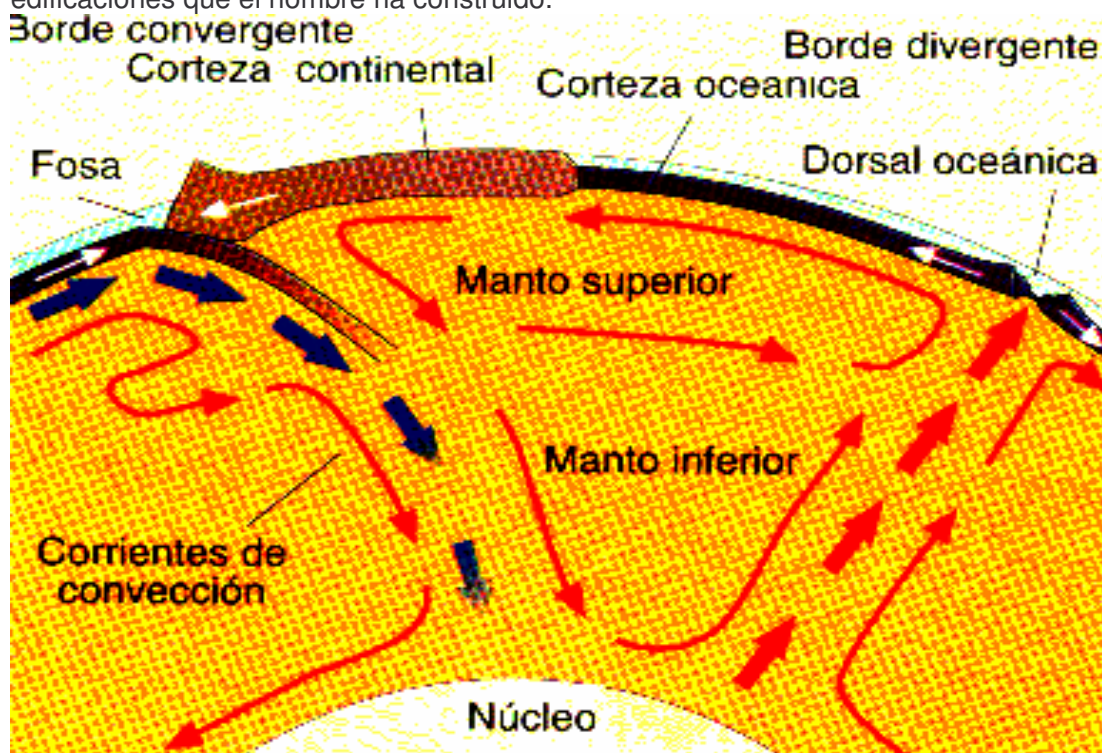


Ilustración 1 El Magma en el interior de la corteza terrestre, forma corrientes de convección que ocasionan derivas continentales, fenómenos de subducción, formación de dorsales y efectos sísmicos diversos.

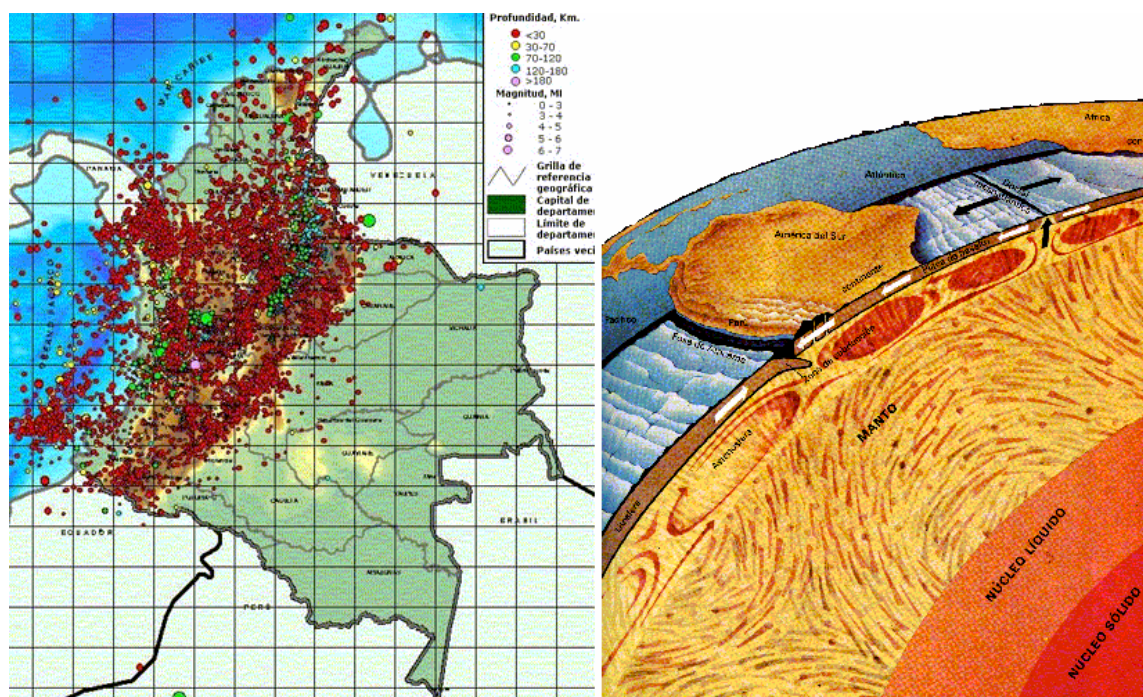


Ilustración 2. Colombia presenta una gran influencia sísmica, causada por el fenómeno de subducción de la placa de nazca bajo la placa del caribe.

Colombia está localizada dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la tierra, denominada anillo circunpacifico donde convergen la placa de Nazca, la placa Sudamericana y la placa del Caribe, mediante una dinámica tectónica que obliga a que la plaza de Nazca se superponga bajo la placa sudamericana mediante el fenómeno de subducción.

1.2. Efectos del fenómeno sísmico

[2] Desde tiempos históricos se guarda la memoria de un gran número de terremotos destructivos los cuales han causado gran cantidad de muertes humanas y daños sobre ciudades enteras.

Tabla 2 Algunos sismos históricos

Fecha	Ubicación	Muertes
2000 a.C	Ex URSS	Algunas
225 a.C	Rodas Grecia	-
893	Daipul India	180000
Mayo de 893	Ardabil Iran	150000
Septiembre de 1138	Ganzah Aleppo Siria	230000
1202	Mar Egeo	100000
1556	Shansi China	830000

[64] Los efectos sísmicos sobre las edificaciones son diversos entre los que se pueden mencionar: fractura de represas, desplazamiento y caída de puentes, rotura de muros,

columnas, placas de entre pisos, uniones entre elementos estructurales, aplastamiento de columnas, rotura de voladizos, desplazamiento de techos y cubiertas, colapso total de edificaciones, asentamiento de terrenos, rotura de escaleras, interacción entre estructuras, etc.

1.3. Soluciones

Aunque el fenómeno sísmico es ineludible debido a que debemos convivir con el, sin embargo la ingeniería tanto sísmica como estructural, han planteado diversidad de soluciones tendientes a mitigar en parte el efecto nocivo de estas. Entre la diversidad de soluciones podemos enumerar las siguientes:

1.3.1. Mapas de sismicidad

La elaboración de mapas de sismicidad ha sido posible gracias a la gran red de instrumentos sismográficos distribuidos a nivel mundial. Mediante estos mapas, se ha llegado a la conclusión de que el fenómeno sísmico está asociado con las presencia de “fallas tectónicas” las cuales se encuentran distribuidas por toda la superficie del planeta. Las investigaciones actuales al respecto están encaminadas al estudio de micro zonificación sísmica de modo que cada país pueda conocer la estructura interna de su subsuelo y plantee políticas adecuadas de urbanización.

1.3.2. Construcción de edificaciones mas resistentes.

La ingeniería estructural, ha planteado metodologías constructivas contemplando el diseño sismo-resistente como una alternativa inteligente de construcción de viviendas.

1.3.3. Códigos sísmicos

[64] Cada país sometido al flagelo de los sismos intensos, se ha visto obligado a desarrollar sus propias normas de diseño antisísmico. Así a sucedido en California U.S, México, Japón, etc. Algunos países como México y Colombia, hemos desarrollado nuestras propias normas basados en las experiencias de Norte América, adaptándolas a nuestras propias necesidades.

1.3.4. Prevención

[55] La preocupación por el impacto de los “desastres” en América Latina y, específicamente en Colombia, han evolucionado en pocos años, partiendo desde la sensibilidad del sector salud y los grupos de socorro y rescate, hasta la necesidad de ampliar los perfiles de estudio, análisis y respuesta orientada a la prevención la cual se plantea como una estrategia cultural que parte de la identificación de los diferentes tipos de desastres y la elaboración de planes de respuesta ciudadana ante fenómenos catastróficos.

1.3.5. Predicción.

[64] La predicción de los fenómenos sísmicos ha tenido poco éxito hasta la fecha, sin embargo aunque se ha investigado mucho al respecto, aún queda mucho por hacer.

En general existen cuatro clases de predicción que son:

- Predicción a largo plazo.

como ejemplo, podemos enunciar la emisión de gas radón que hacen posible predecir con lapsos considerables, la posible ocurrencia de un sismo aún con meses de anticipación.

- Predicción a mediano plazo.
- Predicción a corto plazo.
- Predicción inmediata

Se ha detectado que instantes antes de la ocurrencia de un sismo se presentan cambios en el campo geomagnético, resistividad de las rocas, nivel de pozos, inclinación del suelo, comportamiento animal y especialmente la ocurrencia de sismos premonitores.

1.3.6. Simulación

La tecnología de la simulación parte del hecho que para predecir el comportamiento de una edificación ante un sismo no es necesario esperar a que este ocurra. Para lograrlo, la ingeniería estructural ha tratado el problema de la simulación desde diversas perspectivas.

1.3.6.1. Modelos Matemáticos

El desarrollo de modelos matemáticos resulta ser una alternativa excelente cuando el problema a resolver es relativamente sencillo. Para ello se parte de una ecuación diferencial que trata de simular el comportamiento de la mecánica de los materiales, sin embargo cuando la complejidad de la estructura a modelar se incrementa, los modelos matemáticos dejan de ser útiles debido a la gran cantidad de operaciones requeridas para lograr la solución del problema.

Otro aspecto asociado y mas limitante aun, lo constituye la esencia misma del modelo el cual siempre está regido por una ecuación diferencial o modelo matemático que describe la naturaleza de los materiales que componen a la estructura; al respecto la mecánica de los materiales nos explica que el comportamiento de los materiales es tan complejo que las ecuaciones matemáticas que se utilizan para describir su comportamiento no pasan de ser simples aproximaciones las cuales solo son válidas incluso bajo ciertos rangos de cargas; además en condiciones próximas al punto de ruptura del material, las moléculas de este se comportan en forma caótica siendo medibles solo en forma experimental; este es el punto donde el modelo matemático deja de tener validez.

1.3.6.2. Simulación digital

Con el desarrollo de la ciencia de la computación fue posible lograr que las computadoras simularan gran cantidad de ecuaciones con gran cantidad de variables; de esa manera es posible simular el comportamiento futuro de una edificación ante un fenómeno sísmico incluso sin necesidad de construir un modelo a escala y consecuentemente a precios realmente muy bajos. El problema asociado con este tipo de simulación radica específicamente en que los modelos computacionales se mueven entre dos limitantes antagonistas por un lado un modelo digital puede ser sencillo y fácil de implementar mediante software por la facilidad de cálculo pero sus resultados no pasan de ser imprecisos en el sentido de que son solo una pequeña aproximación de la realidad la cual se caracteriza por fenómenos extremadamente complejos, de otra parte si queremos aumentar la fidelidad de un modelo digital, la teoría del modelamiento dice que podemos discretizar el modelo; es decir ver a una gran estructura como la suma de varios elementos muy pequeños; consecuentemente al ver el problema de modelamiento desde este punto de vista se obtiene un modelo mas próximo al modelo real pero que exige una mayor complejidad que se traduce en mayor capacidad de cómputo y consecuentemente los resultados numéricos están limitados por la calidad de cálculo de la máquina.

Otro aspecto limitante al problema del modelamiento digital es que estos se rigen mediante algoritmos matemáticos los cuales ya contienen en principio las deficiencias enumeradas anteriormente.

1.3.6.3. Mesas vibratorias.

[94] Con el desarrollo de la ingeniería sísmica, gran cantidad de mesas para ensayos sísmicos sobre estructuras a escala real y escala reducida, han sido desarrolladas por diversos países como: Japón, Estados Unidos, Australia, España, México y Perú entre otros, quienes han implementado sus propios simuladores sísmicos.

El instituto Japonés para la investigación de las edificaciones, desarrolló un simulador en 1959 para ensayos de los núcleos de reactores atómicos a escalas de hasta 1/3 del tamaño real, compuesta por actuadores hidráulicos que permiten aplicar sobre los prototipos, aceleraciones de hasta 2g, periodos de vibración 0.14 y 0.96 segundos y amplitudes de 18 centímetros para prototipos con masas de hasta 17 toneladas.

Tabla 3 Clasificación de los tipos de mesas sísmicas según su tamaño. Tomado de Harris G Harris [50].

Ubicación	Tamaño (m)	Carga límite (KN)	Aceleración Horizontal (g)	Amplitud horizontal (±mm)	Frecuencia máxima (Hz)	Tipo de apoyo.
<i>Menores de 3 metros.</i>						
<i>Standford University</i>	<i>1.6 x 1.6</i>	<i>22.2</i>	<i>5</i>	<i>63.5</i>	<i>50</i>	<i>Rodillos</i>
<i>University of Calgary</i>	<i>1.3 x 1.3</i>	<i>9</i>	<i>20</i>	<i>76.2</i>		
<i>ISMES, Italy</i>	<i>3 x 2</i>	<i>1.3</i>	<i>100</i>		<i>800</i>	<i>Película de aceite</i>
<i>Drexel University</i>	<i>1.2 x 1.8</i>	<i>8.9</i>	<i>3.6</i>	<i>6.4</i>	<i>2000</i>	<i>Rodillos</i>
<i>3 a 9 metros</i>						
<i>University of California Berkeley</i>	<i>6 x 6</i>	<i>444.8</i>	<i>1.5</i>	<i>127</i>	<i>15</i>	<i>Aire a presión</i>
<i>Corpos of Engineers (triaxial)</i>	<i>3.7 x 3.7</i>	<i>587</i>	<i>2</i>	<i>76.2</i>	<i>60</i>	
<i>SUNY Buffalo</i>	<i>3.7 x 3.7</i>	<i>444.8</i>	<i>1</i>	<i>152.4</i>	<i>60</i>	<i>Actuadores</i>
<i>Cornell University</i>	<i>1.5 x 1.9</i>	<i>89</i>	<i>5</i>	<i>76.2</i>	<i>100</i>	<i>Mesa deslizante</i>
<i>University of Illinois</i>	<i>3.6 x 3.6</i>	<i>44.5</i>	<i>7</i>	<i>101.6</i>	<i>100</i>	<i>Apoyos flexibles</i>
<i>Corps of Engineers</i>	<i>3.6 x 3.6</i>	<i>53.4</i>	<i>34</i>	<i>55.9</i>	<i>200</i>	
<i>Wyle Lab, HUntsville</i>	<i>5.5 x 3.5</i>	<i>42.3</i>	<i>8</i>	<i>76.2</i>	<i>500</i>	
<i>Mas de 9 metros</i>						
<i>National Research Center, Japan</i>	<i>15 x 15</i>	<i>4448</i>	<i>0.6</i>	<i>30.5</i>	<i>16</i>	
<i>Berkeley (propuesta)</i>	<i>30 x 30</i>	<i>17792</i>	<i>0.6</i>	<i>152.4</i>		

2. JUSTIFICACIÓN

Dada la gran influencia sísmica a la cual se encuentra expuesto nuestro país, es importante dedicar parte de nuestros recursos a la investigación del fenómeno sísmico.

Los simuladores sísmicos son herramientas útiles en el estudio del comportamiento estructural ante terremotos puesto que permiten realizar ensayos controlados en condiciones de laboratorio.

[50] Considerando la importancia de la investigación en ingeniería sísmica, y la utilidad para la demostración de conceptos básicos de vibración sísmica sobre estructuras, tanto a estudiantes como a investigadores. En el área de la investigación estructural los modelos a pequeña escala para ensayos dinámicos, han demostrado ser poderosas herramientas en la ampliación del conocimiento y la comprensión del comportamiento estructural ante situaciones dinámicas muy complejas donde las técnicas analíticas son insuficientes.

Adicionalmente debe considerarse que los modelos analíticos requieren ser calibrados mediante la comparación con los resultados que arrojan los ensayos de laboratorio.

Otro aspecto de importancia es que el modelamiento a nivel de laboratorio permite identificar posibles puntos de falla en una estructura y dar paso a un adecuado diseño mucho antes de que la estructura a escala real sea construida.

3. USUARIOS

- Escuela de ingeniería Civil, Universidad industrial de Santander, Colombia.
- Ingenieros de la región.
- Investigadores en ingeniería sísmica.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

DISEÑAR E IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE CONTROL CON COMPUTADORA DE UNA MESA VIBRATORIA, ACCIONADA HIDRÁULICAMENTE, PARA LA SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS TELÚRICOS EN UNA DIRECCIÓN.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las tecnologías mas apropiadas para la construcción del simulador sísmico.
- Proponer, evaluar e implementar un algoritmo de control adecuado para el simulador sísmico.
- Diseñar y elaborar el software para el control del simulador sísmico.
- Seleccionar la alternativa PID que proporcione el mejor comportamiento de la mesa vibratoria con respecto a calidad.

5. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

En este capítulo se hace una descripción de los componentes físicos del simulador sísmico (SS), inspirada en la referencias [50] y [94], donde se expresa que un SS es un mecanismo que permite realizar ensayos dinámicos controlados en condiciones de laboratorio para la predicción del comportamiento sísmico de edificaciones mediante modelos estructurales a escala. Además debería permitir la reproducción exacta de cualquier movimiento telúrico sobre cualquier modelo de edificación para estimar el comportamiento exacto de la estructura de modo que fuese posible medir con precisión los puntos en los cuales puedan presentarse fallas sobre esta o estimar los esfuerzos y las aceleraciones que puedan presentarse durante los ensayos en cualquier sitio del modelo.

El modelo aquí planteado considera la alternativa de accionamiento mediante cilindros hidráulicos por ser una de las alternativas mas recomendables debido a que permite generar fuerzas considerables y controlar los movimientos del simulador con adecuada precisión debido a la baja compresibilidad de los aceites minerales. También plantea el uso de válvulas proporcionales de accionamiento electromagnético como elementos directos de control del fluido hidráulico y una unidad de potencia hidráulica para la generación de los caudales y presiones requeridas. Adicionalmente considera el uso de una PC como elemento central de control

La Ilustración 3 muestra los tres componentes principales del simulador sísmico de accionamiento hidráulico.

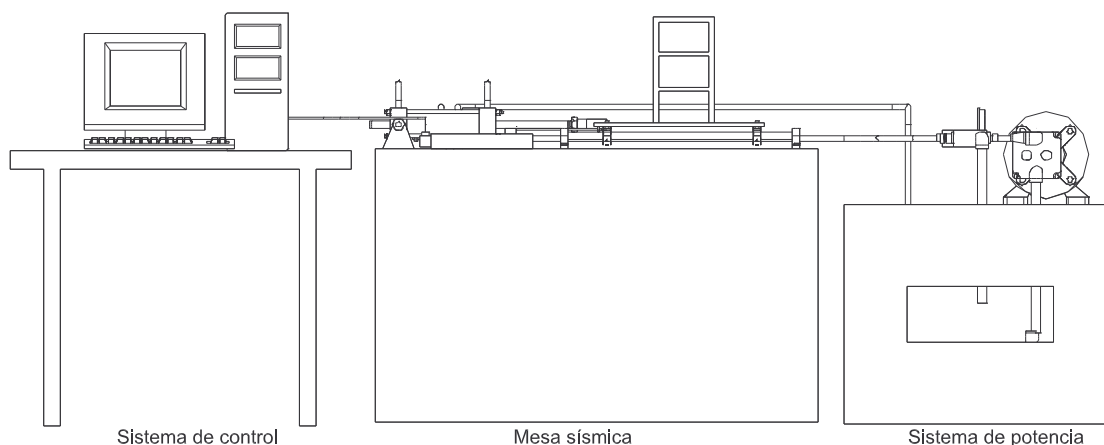


Ilustración 3 Componentes principales del simulador.

Mediante la Ilustración 4 se pretende mostrar la conformación física de los diversos componentes del simulador.

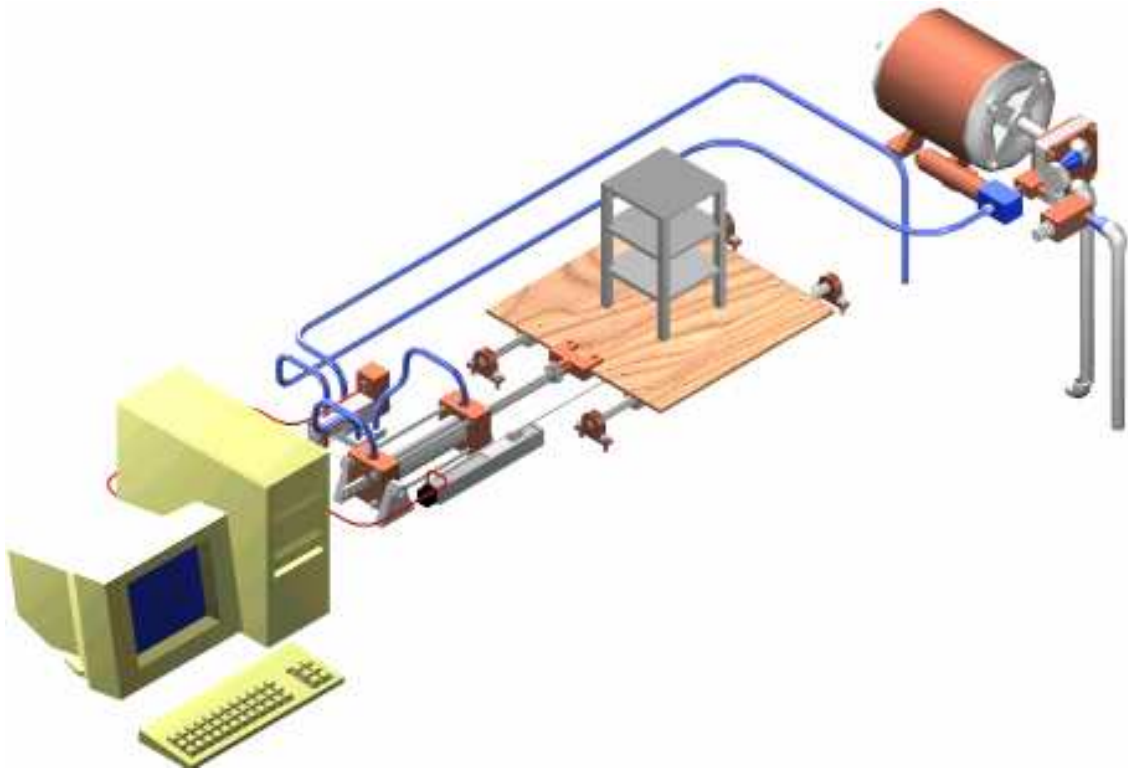


Ilustración 4 Isométrica del simulador.

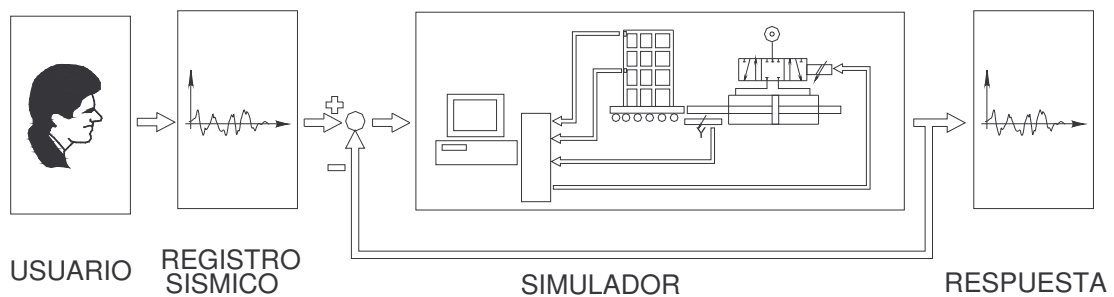


Ilustración 5 Esquema modelo del simulador.

La Ilustración 5 muestra que un SS es un sistema de control digital donde el PC hace parte del bucle de control en lazo cerrado donde intervienen una señal de entrada proporcionada por el usuario y una señal de respuesta del simulador y lo que se pretende es que la señal de respuesta del simulador sea igual a la señal de entrada, de modo que la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida permite estimar la calidad de un ensayo. En estos términos un SS de excelente calidad debería producir un error nulo.

5.1. EL USUARIO

Es el encargado de impartir ordenes al sistema de control mediante tres actividades que son: Control de parámetros, Programación del simulador y diagnóstico.

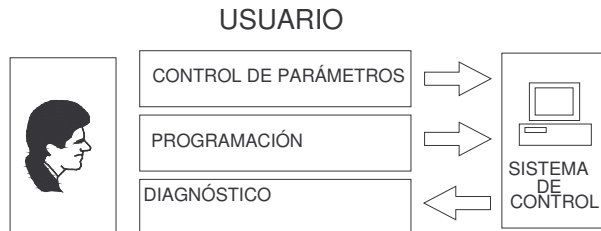


Ilustración 6 Interacción entre el usuario y el sistema de control

- Control de parámetros:

En esta actividad el usuario se encarga de realizar el ajuste del control mediante la sintonización de ganancias [87] y puesta a punto del programa para la ejecución de un ensayo.

- Programación:

Mediante la programación el usuario introduce el patrón sísmico mediante un archivo de caracteres ASCII bajo un formato determinado. También puede generar una señal periódica de amplitud y frecuencia controlada.

- Diagnóstico:

El usuario verifica el funcionamiento adecuado del simulador y decide si el ensayo realizado ha sido adecuado o si debe realizarse un nuevo ensayo.

5.2. LOS REGISTROS SÍSMICOS

[64] La mecánica interna de la tierra es bastante compleja. Los sismos están asociados con la presencia de ondas sísmicas durante las ruptura de placas tectónicas. Cuando estas ondas viajan a través de la corteza terrestre pueden sufrir atenuaciones o amplificaciones por efectos de resonancia las cuales dependen del tipo de suelo, según se trate de una arcilla, un estrato arenoso, roca firme o la combinación de diferentes estratos, además de zonas de fallas internas. El movimiento en un punto dado de la superficie terrestre puede ser expresado como la suma de tres componentes ortogonales de translación y tres de rotación; adicionalmente cada una de estas componentes varían en el tiempo de una manera aleatoria. Durante un sismo se presentan diferentes tipos de ondas entre las que podemos mencionar: ondas primarias (P) y secundarias (S). Las ondas P viajan a velocidades superiores que las S y son ondas de tipo longitudinal; estas ondas son las primeras en ser detectadas antes que las ondas S, las cuales aunque mas lentas son mas destructivas que las primeras.

Mediante la Ilustración 7 se muestra la metodología utilizada a nivel mundial para captar la mayoría de los registros o patrones sísmicos los cuales se captan mediante

acelerógrafos y se almacenan en bases de datos que consisten en registros acelerográficos muestreados en el dominio del tiempo.



Ilustración 7 Procedimiento utilizado para captar los registros sísmicos.

Mediante la Ilustración 8 se muestra un registro acelerográfico en formato digital y su equivalente gráfico en el dominio del tiempo. Se puede observar fácilmente una zona inicial de baja amplitud correspondiente a la llegada de las ondas P, continua una zona de amplificación en la amplitud correspondiente a la llegada de las ondas S y finalmente una zona de atenuación. También se observa la variación aleatoria de las señales.

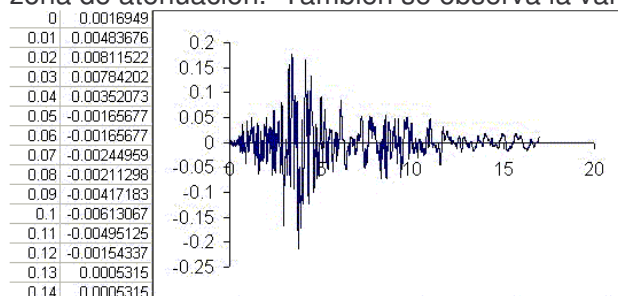


Ilustración 8 Acelerograma correspondiente a la estación Fields Fire Sta correspondiente a un sismo de Coalinga en 1983, tomado de INGEOMINAS.

5.2.1. FORMATO DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

La mayoría de los registros sísmicos se encuentran en formato digital como señales discretas en el tiempo. Actualmente las velocidades de muestreo oscilan cerca de las 200 muestras por segundo dependiendo de la calidad del acelerógrafo.

Cada registro contiene la información de las condiciones de sitio sobre el cual se encuentra ubicado el instrumento de medición como son: latitud, longitud y profundidad, también contienen información sobre magnitud del sismo, nombre de la estación, distancia hasta la fuente, componente E-W (registro en dirección Este – Oeste), componente N-S (Norte – Sur) y V (Vertical). Adicionalmente poseen información sobre la cantidad de muestras, velocidad de muestreo de cada registro y las unidades en las cuales se registran los datos las cuales generalmente se dan en gales ($gal = cm / s^2$).

Dependiendo del formato; algunos contienen las tres componentes en un solo archivo o viene cada componente separada en un archivo independiente.

La Ilustración 9 muestra el encabezado del registro digital correspondiente al sismo de Armenia Colombia, proporcionado por INGEOMINAS. Se trata de la componente Norte-Sur la cual ha sido muestreada a una velocidad de 200 muestras por segundo dispuestos en una única columna de datos en forma de un archivo secuencial en formato de texto (txt).

```

INGEOMINAS
RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
Sismo del Quindio  FECHA: 25-01-99
Epicentro: LATITUD=  4.410º Norte  LONGITUD: -75.720º Oeste  PROFUNDIDAD:
MAGNITUD:  6.2
Estación de Armenia (CÁRME)
Estación:  LATITUD=  4.500º Norte  LONGITUD: -75.800º Oeste  GEOLOGÍA:
DISTANCIA HIPOCENTRAL: 13 Kms

Componente  3 Orientación N - S
Son 14337 muestras igualmente espaciadas por  .005 segundos
Aceleración (cm/seg2)
  0.28369
 -0.16186
 -0.30125
 -0.22420
 -0.16288

```

Ilustración 9 Ejemplo de registro digital del sismo de Armenia. Fuente Ingeominas.

5.2.2. INTEGRACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

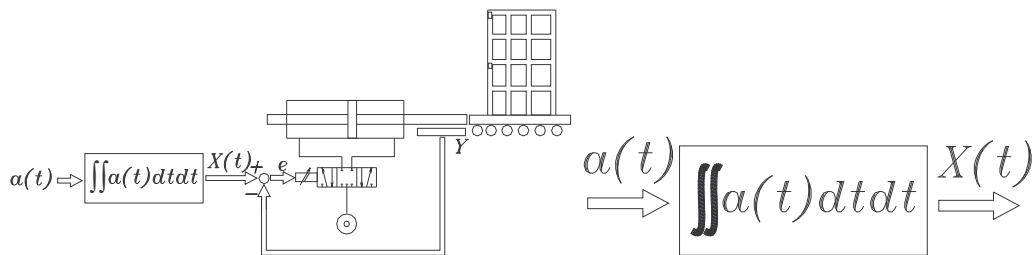


Ilustración 10 La señal del acelerograma debe ser integrada antes de ser introducida al simulador.

Mediante la Ilustración 10 se muestra que los registros sísmicos acelerográficos, deben ser integrados dos veces en el tiempo y de esta manera generar un registro de posición en función del tiempo de modo que este registro sea utilizado para alimentar al sistema de control del simulador, de lo contrario sería necesario utilizar un sensor de posición cuando la señal de entrada corresponde con un sismograma y un sensor de aceleración para el caso de un acelerograma. Para evitar el uso de dos tipos de sensores, es mas fácil utilizar una estrategia algorítmica de integración que resulta mucho mas económica.

Los registros acelerográficos generalmente son archivos de muestras discretas en el dominio del tiempo y como tal deben ser integrados mediante técnicas discretas.

Las frecuencias de muestreo se expresan en muestras por segundo (*mps*) y son inversamente proporcionales a los tiempos de muestreo (*dT*) en segundos.

La Ilustración 11 muestra el procedimiento matemático que se utilizó para realizar la integración de los datos y que se implementó mediante LabView.

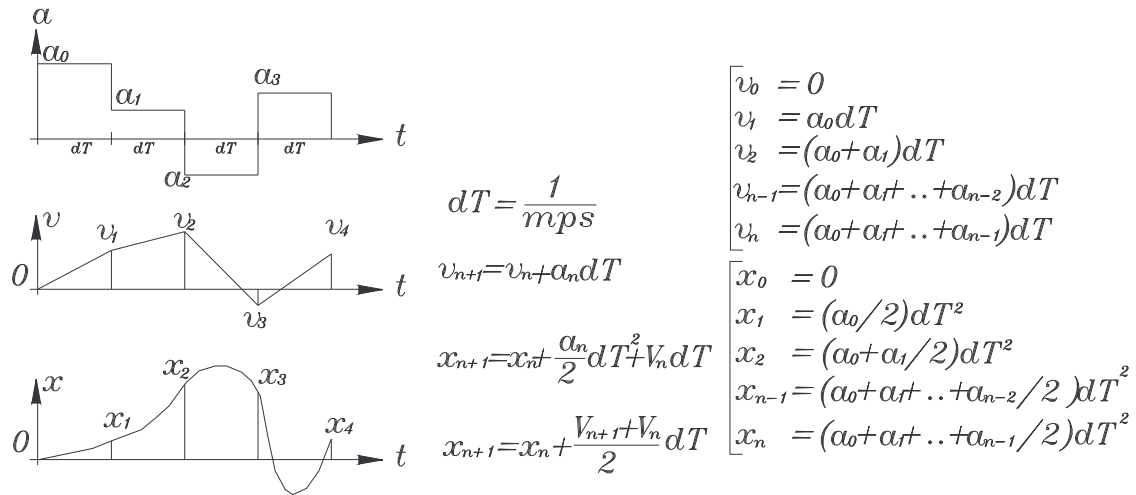


Ilustración 11 Procedimiento para realizar la doble integración de los registros de aceleración.

5.2.3. FILTRADO DE LA SEÑAL

Según la referencia [50], los simuladores sísmicos operan bajo ciertos rangos de frecuencia. Esta característica hace necesario someter a los registros sísmicos a procesos de filtrado en frecuencia mediante filtros pasa banda para remover las frecuencias indeseables, antes que sean enviados al SS. Aunque la etapa de filtrado no se realizó en el proyecto, se consideró pertinente incluir este aspecto por su importancia de modo que sea considerada en proyectos futuros.

De acuerdo a Ilustración 12 de la referencia [107], el proceso de filtrado en frecuencia se inicia aplicando la transformada rápida de Fourier FFT (*fast fourier transform*) a los registros sísmicos expresados en el dominio del tiempo; como resultado se obtiene una gráfica en el dominio de la frecuencia. El siguiente paso consiste en aplicar propiamente el algoritmo de filtrado mediante un filtro pasa banda. Paso seguido se aplica nuevamente la FFT inversa y finalmente la FFT inversa corresponde a una gráfica en el dominio del tiempo que se caracteriza por un contenido frecuencial controlado.

Un aspecto importante de anotar es que la señal filtrada presenta como consecuencia una atenuación en amplitud por lo que se sugiere realizar un proceso de escalado para controlar la amplitud de la señal de respuesta.

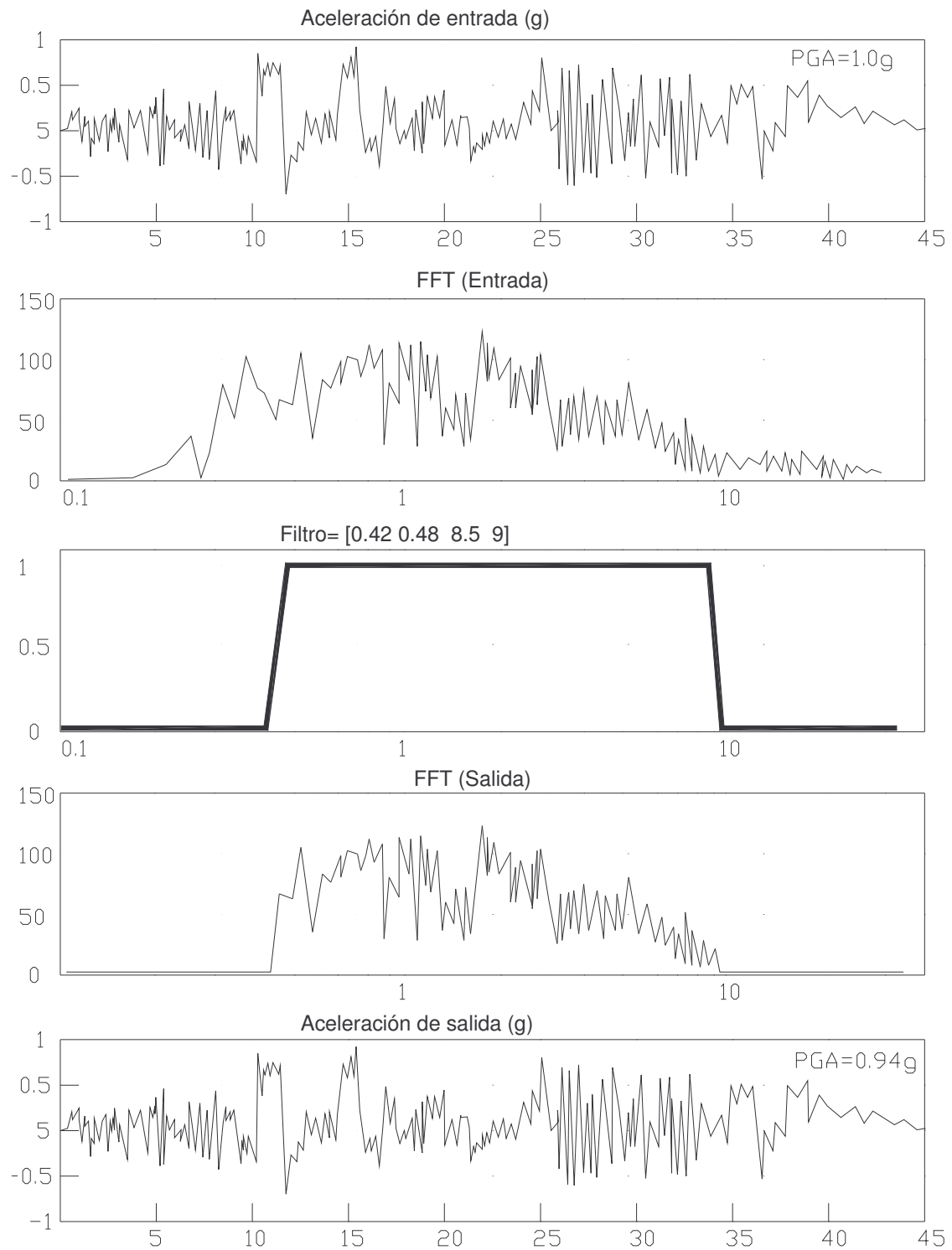


Ilustración 12 Proceso de filtrado tomado de PEER Report 2004/xx [107].

5.2.4. PARÁMETROS BÁSICOS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.

La referencia [107] titulada: “Ground Motions for Earthquake Simulator Qualification of Electrical Substation Equipment”, sugiere considerar los siguientes parámetros característicos de las señales sísmicas: PGA(Peak Ground Acceleration), PGV(Peak Ground Velocity), EM (Earthquake magnitude), DF(Distance from source), PGD(Peak Ground Displacement) y SP(Site soil properties).

De acuerdo a esta referencia, se recomienda mantener los siguientes rangos:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	RANGOS RECOMENDADOS
<i>PGA</i>	<i>Aceleración pico del terreno.</i>	<i>0.1g a 1.1g para la dirección horizontal</i>
<i>PGV</i>	<i>Velocidad pico del terreno</i>	<i>1.8in / s = 0.04m / s a 47.8in / s = 1.21m / s .</i>
<i>EM</i>	<i>Magnitud sísmica.</i>	<i>5.7 a 7.6</i>
<i>DF</i>	<i>Distancia focal.</i>	<i>2.6Km a 62.7Km</i>

Adicionalmente recomienda realizar ensayos con tiempos de duración cerca de los 20segundos .

6. PLANTA FÍSICA

Los planos que se exponen en este capítulo han sido planteados considerando un SS de accionamiento hidráulico y el objetivo principal es ilustrar que componentes se requieren para construirlo. Debe aclararse que durante el proyecto, este modelo no fue construido debido a limitaciones económicas pero se deja como pauta de diseño para apoyar su construcción en el futuro. Se ha considerado la alternativa de accionamiento hidráulico por ser una de las mas adecuadas debido a que garantiza la generación de fuerzas considerables y el control de la posición en lazo cerrado con precisión del orden de las micras, donde el PC permite realizar la etapa de control.

Mientras la Ilustración 13 muestra una panorámica de los componentes físicos, la Ilustración 14 hace referencia a la misma situación mediante la simbología estándar a nivel mundial relacionada con la tecnología hidráulica.

El funcionamiento del SS se puede expresar en los siguientes términos: El computador 1 como elemento central de control, recibe la señal de retroalimentación 6, proveniente del sensor de posición 8. La señal de retroalimentación es comparada con la señal deseada correspondiente al registro sísmico y mediante un algoritmo de control PID, el PC 3 genera la señal de control 5 que es enviada a la válvula proporcional 10, generando un estado de conmutación que controla el flujo de aceite a presión hacia la cámara del cilindro hidráulico 7. La variación de la presión en el cilindro 7, produce el desplazamiento del vástago que a su vez se encuentra acoplado a la mesa 13 sobre la cual reposa el modelo 14. La presión que llega a la válvula proporcional 10, es generada por los elementos hidráulicos de potencia (16 a 20), los cuales generan un caudal de aceite a presión que se dirige hacia la válvula 10 a través de la tubería de presión 11, y regresa hacia el tanque de almacenamiento 20 a través de la tubería de retorno 12.

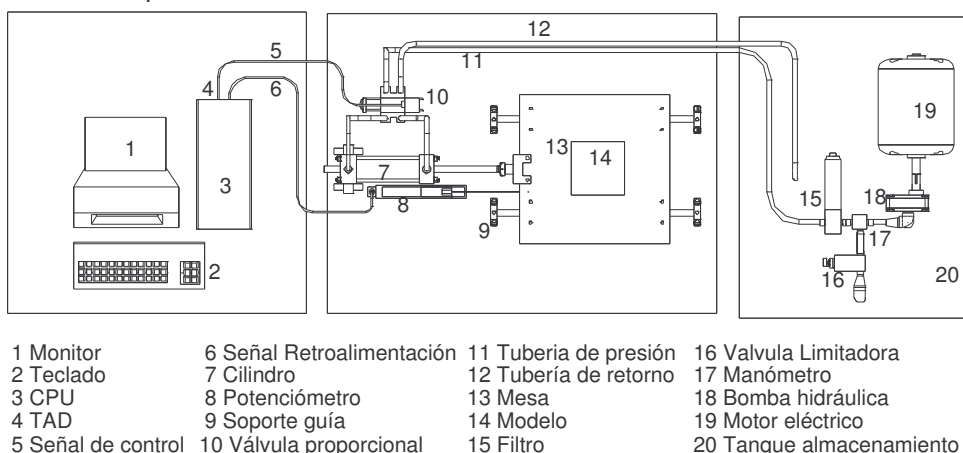


Ilustración 13 Dispositivos físicos que componen al simulador.

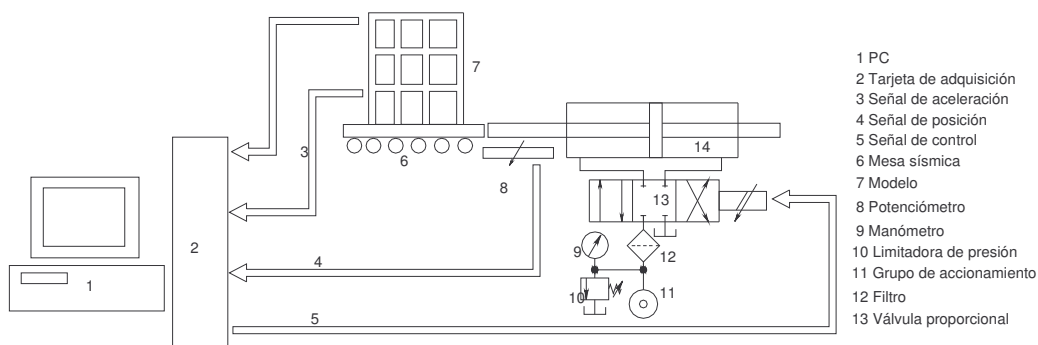


Ilustración 14 Diagrama esquemático del simulador.

6.1. GRUPO DE ACCIONAMIENTO (CILINDRO-VÁLVULA-MESA)

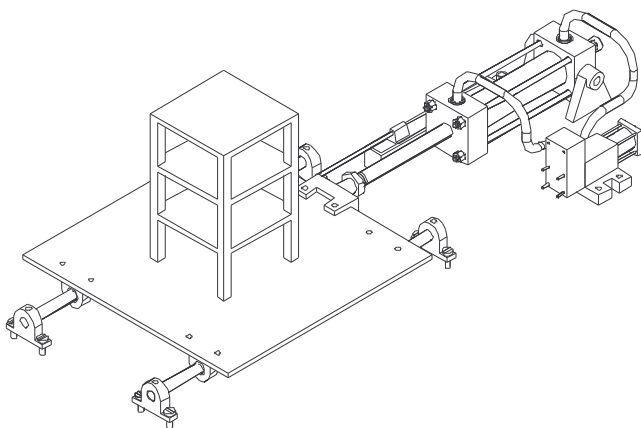


Ilustración 15 Detalle isométrico del grupo de accionamiento cilindro-válvula-mesa.

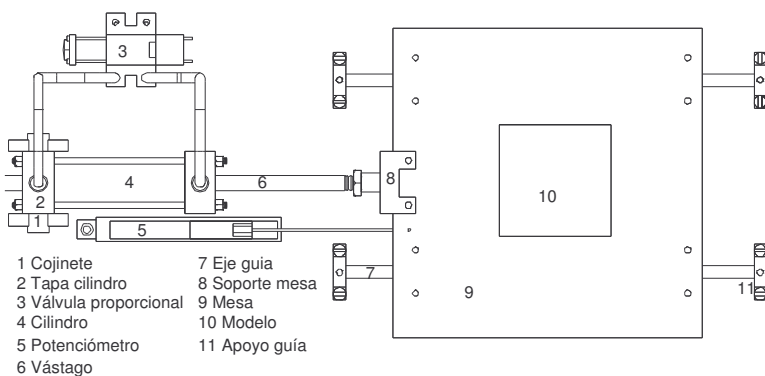


Ilustración 16 Detalle vistas superior y perfil de los componentes del grupo hidráulico de accionamiento.

Cada elemento del grupo hidráulico de accionamiento hidráulico requiere un criterio de selección y cálculo que deben ser tenidos en cuenta para un adecuado diseño los cuales se describen en forma breve.

6.1.1. EL CILINDRO HIDRÁULICO

El cilindro hidráulico es el elemento motor encargado de transformar la presión en movimiento de modo que la conmutación de la válvula proporcional, genera diferencias de presión que actúan sobre las caras del pistón generando fuerzas que producen movimiento. Para el proyecto del SS, se recomienda utilizar un cilindro hidráulico de doble vástago, con el fin de garantizar las mismas condiciones dinámicas tanto en avance como en retroceso.

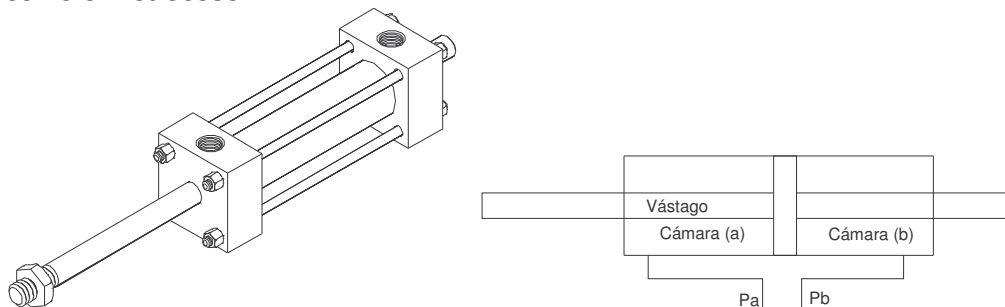


Ilustración 17 Detalle isométrico y esquema del cilindro hidráulico.

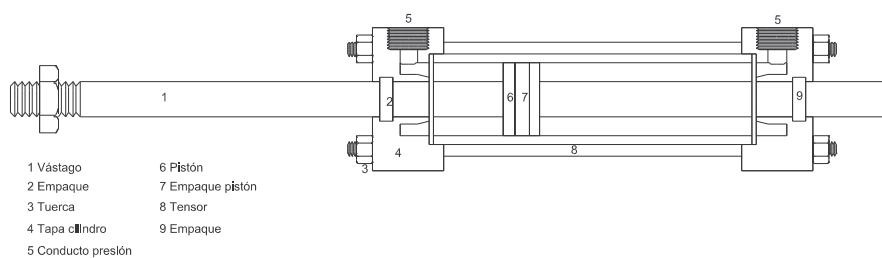


Ilustración 18 Componentes del cilindro hidráulico.

6.1.1.1. CONVENCIONES

Estas convenciones han sido planteadas para establecer un acuerdo en la simbología matemática.

- Diámetro de pistón: d_p
- Diámetro de vástago: d_v
- Área de pistón: $A_p = \pi/4 d_p^2$
- Área de vástago: $A_v = \pi/4 d_v^2$

• Inercia de vástago:	$I = \frac{\pi}{64} d_v^4$
• Longitud de vástago:	l
• Área anular:	$A_a = A_p - A_v$
• Desplazamiento de pistón:	X_a .
• Velocidad de pistón:	dX_a/dt
• Carrera del cilindro:	L
• Presiones de cámaras:	P_a, P_b
• Presión efectiva:	$P_C = P_a - P_b$
• Masa acoplada (mesa + modelo):	M_a
• Caudales de cámaras:	Q_a, Q_b .
• Caudal efectivo:	Q_c .
• Coeficiente de rozamiento viscoso:	B .
• Módulo de elasticidad efectivo:	β_e .
• Velocidad máxima de sitio:	PGV .
• Aceleración máxima de sitio:	PGA .
• Módulo elástico del acero:	E .
• Volumen de aceite entre pistón y válvula:	V_t .
• Módulo elasticidad del aceite:	E_{aceite}

6.1.1.2. FÓRMULAS PARA DISEÑO

Las fórmulas aquí planteadas han sido tomadas de la referencia [119] relacionadas con el modelamiento de la planta física de un sistema hidráulico servo controlado. Se ha agregado adicionalmente los parámetros sísmicos de la referencia [107]. Se recomienda tener en cuenta la combinación de las dos referencias bibliográficas para garantizar un adecuado diseño del SS que tenga la potencia necesaria para reproducir los patrones sísmicos. Aunque la validez de estas fórmulas no han sido comprobada experimentalmente, se dejan como propuesta para que sea considerada y confrontada en estudios posteriores de este proyecto.

• Fuerza máxima de operación:	$F_{\max} = M_a \cdot PGA + B \cdot PGV = A_a \cdot P_c$
• Caudal efectivo:	$Q_c = A_a \left(\frac{dX_a}{dt} \right) + \frac{V_t}{4\beta_e} \left(\frac{dP_c}{dt} \right)$

- Compresión de vástago máxima: $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$ (diseño como columna)
- Frecuencia límite del SS: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{M_a}}$, $C = 2A_a^2 \frac{E_{aceite}}{V_t}$.

6.1.2. VÁLVULA PROPORCIONAL

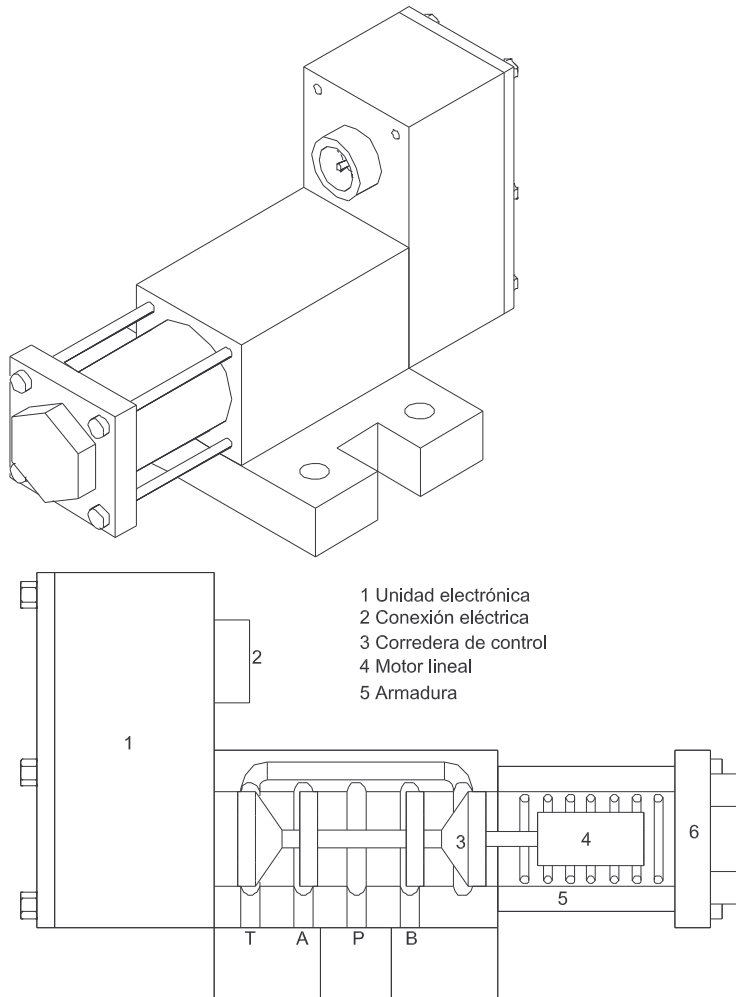


Ilustración 19 Detalle isométrico y componentes de la válvula proporcional.

De entre varias opciones, se seleccionó para este proyecto una válvula proporcional de cuatro vías a tres posiciones. De acuerdo a la referencia [38], es el elemento electromecánico encargado de dirigir el fluido ya sea hidráulico o neumático; su principio de funcionamiento es relativamente sencillo. La función principal de una servo-válvula es la de controlar en forma gradual el fluido a presión mediante el aumento o reducción gradual del área del conducto que transmite el fluido. Comercialmente existen diversos tipos de servo-válvulas, generalmente son válvulas de corredera en la cuales el desplazamiento de esta puede ser realizado mediante motores paso a paso, solenoides de inducción ferro-magnética y otros. Para el caso del simulador sísmico son mas

recomendables las servo-válvulas de corredera accionadas mediante solenoides de inducción por su rapidez de respuesta.

Durante este proyecto se observó que estas válvulas proporcionales de corredera, operan con muy bajos consumos energéticos, haciéndolas recomendables cuando se trata de manipularlas mediante tarjetas de adquisición de datos haciendo innecesaria una etapa de potencia.

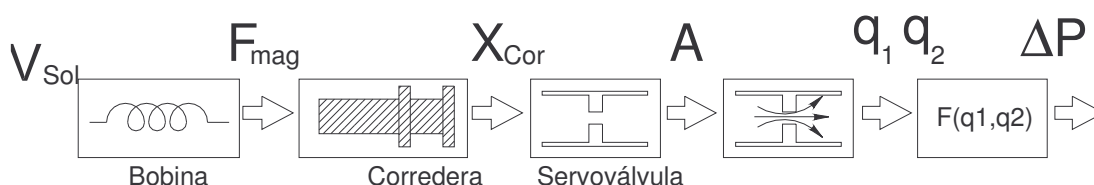


Ilustración 20 Diagrama de bloques servo-válvula.

La Ilustración 20 muestra como una servo-válvula es controlada por una tensión de entrada la cual induce un campo magnético sobre la corredera que a su vez se traduce en un área variable que controla el paso de la cantidad de flujo que se dirige hacia el cilindro.

6.1.2.1. VOLTAJES DE OPERACIÓN

Parámetro importante para seleccionar una válvula proporcional. Una válvula mal seleccionada hace necesario el uso de una circuitería adicional de adecuación de la señal lo cual se traduce en generación de señales y ruido indeseable dentro del sistema de control. Las servo-válvulas están diseñadas de tal manera que el desplazamiento de la corredera es proporcional a la tensión de entrada bajo ciertos rangos de operación. Para el caso de la servo-válvula MPYE 5 ¼ Festo, utilizada durante los ensayos de laboratorio, una tensión de entrada de cinco voltios ubica a la corredera en la posición intermedia y para el caso de tensiones de 10 o cero voltios la ubica en posiciones extremas lo que corresponde a flujos máximos de caudal.

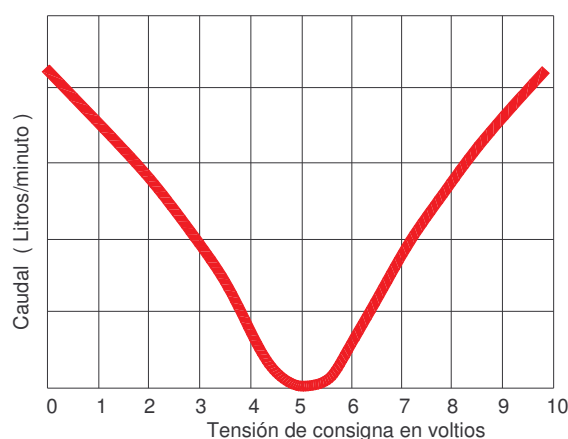


Ilustración 21 El caudal en la servo-válvula es función de la tensión de entrada.

6.1.2.2. RESPUESTA DINÁMICA

[38] Otro de los parámetros a tener en cuenta en las características de una servo-válvula es su respuesta dinámica la cual es importante para su adecuada selección.

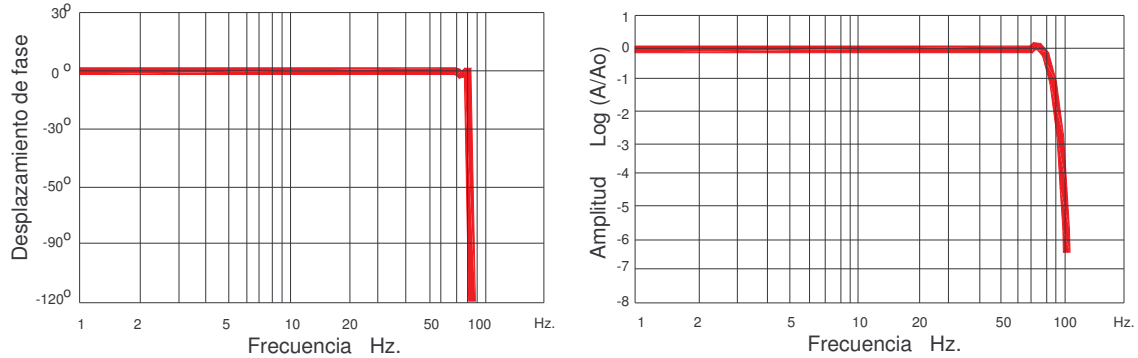


Ilustración 22 La servo-válvula MPYE 5 1/8 Festo presenta buen comportamiento en amplitud con frecuencias de entrada hasta de 70 Hz. Sin retraso de fase.

Es deseable que la válvula opere a altas frecuencias lo que la hace mas eficiente.

6.1.2.3. SOLAPAMIENTO

[38] El solapamiento en una servo-válvula determina el comportamiento de esta para la posición centrada de la corredera.

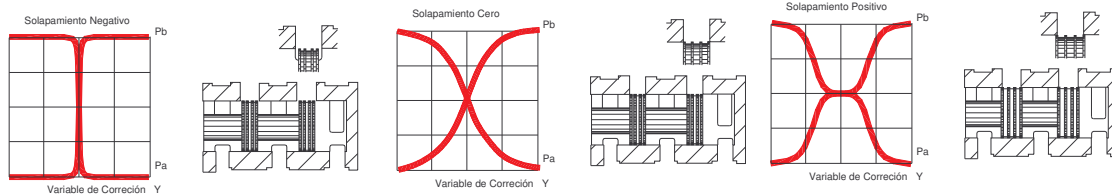


Ilustración 23 Comportamiento de la servo-válvula con diferentes valores de solapamiento.

Se recomienda para el caso del simulador verificar que el solapamiento nunca sea negativo de modo que se garantice que la válvula permanezca cerrada en posición intermedia.

6.1.2.4. CONVENCIONES

- Voltaje de alimentación: V_{ea}
- Desplazamiento de corredera: X_v
- Constantes del sistema: K_{co} , K_{qo} , K_{eqo}

6.1.2.5. ECUACIONES PARA DISEÑO

Las fórmulas planteadas han sido tomadas de la referencia [119].

- Caudal efectivo: $Q_c = K_{qo} X_v - K_{co} P_c = K_{ego} V_{ea} - K_{co} P_c$
- Desplazamiento de corredera: $X_v = K_s V_{ea}$

6.1.3. LA MESA DE SIMULACIÓN

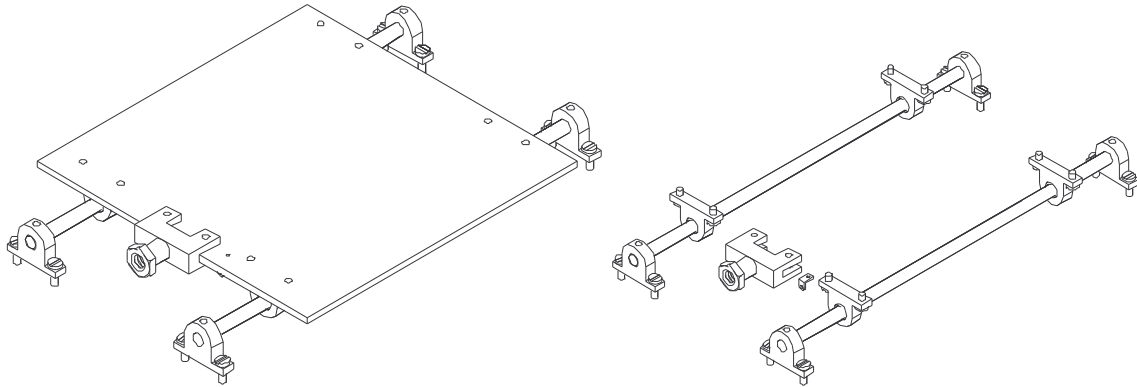


Ilustración 24 Detalle isométrico de la mesa del simulador sísmico.

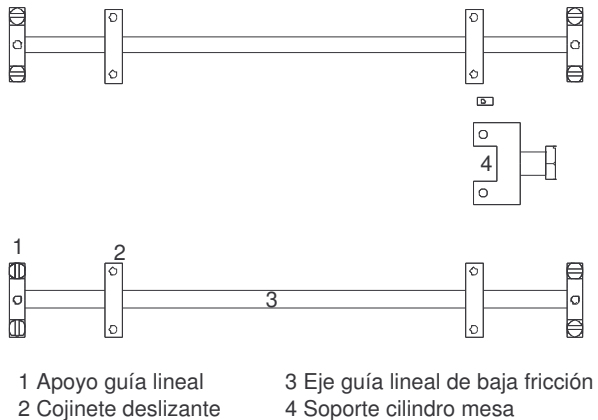


Ilustración 25 Detalle de componentes del sistema mesa sísmica.

6.1.3.1. RECOMENDACIONES

- Garantizar al máximo el paralelismo entre los ejes guía.
- Reducir en lo posible el efecto de fricción.
- Reducir al máximo el peso de la mesa.
- Considerar el efecto de fatiga dinámica en la etapa de diseño.

7. INTERACCIÓN MESA MODELO

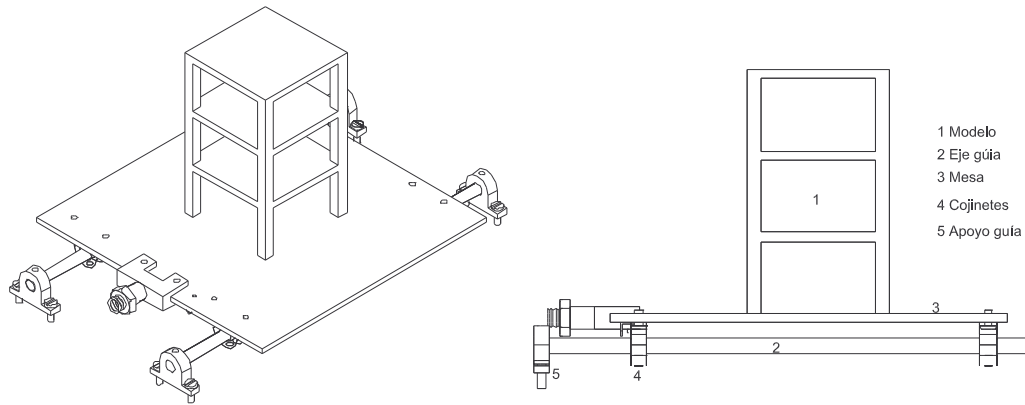


Ilustración 26 Detalle conjunto mesa – modelo.

A partir de la referencia [72], se ha planteado este modelo matemático que es importante considerar. La interacción entre la mesa y el modelo puede llegar a afectar la estabilidad del sistema de control si no se tiene en cuenta en la etapa de diseño.

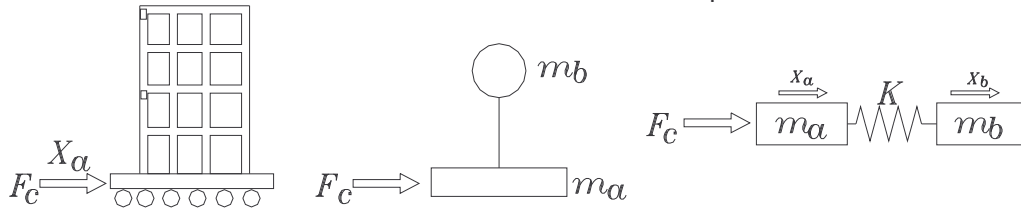


Ilustración 27 Esquema e idealización sistema mesa – modelo.

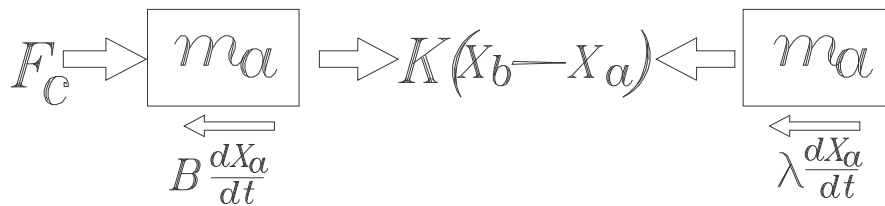


Ilustración 28 Fuerzas actuantes sobre el sistema mesa modelo.

De acuerdo a la ilustración, se puede idealizar el sistema mesa modelo como un sistema de dos masas acopladas donde se consideran los siguientes parámetros:

- Fuerza transmitida del cilindro: F_c .
- Masa de la mesa: m_a .

- Masa del modelo: m_b .
- Coeficiente de rozamiento: B .
- Amortiguamiento del modelo: λ .
- Elasticidad del modelo: K .
- Variable de posición de la mesa: X_a .
- Variable de posición del modelo: X_b .
- Operador diferencial: D .

7.1. ECUACIONES DE DISEÑO

Las fórmulas propuestas han sido tomadas de la referencia [119] sobre el comportamiento de mecanismos servo controlados y se han combinado con las ecuaciones de la referencia [72] relacionadas con la dinámica de interacción mesa-modelo. Debe agregarse que aunque no se ha comprobado su validez de manera experimental, sin embargo se dejan planteadas para investigaciones futuras.

- Fuerza efectiva del pistón: $F_c = P_c \cdot A_a$
- Fuerza actuante sobre la mesa: $P_c \cdot A_a + K(X_b - X_a) - B \frac{dX_a}{dt} = m_a \frac{d^2 X_a}{dt^2}$.
- Fuerza actuante sobre el modelo: $-K(X_b - X_a) - \lambda \frac{dX_b}{dt} = m_b \frac{d^2 X_b}{dt^2}$.
- Posición de la mesa:
$$X_a = P_c \cdot \left[\frac{A_a \cdot (m_b D^2 + \lambda D + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a \lambda + m_b B) D^3 + (m_a K + m_b K + B \lambda) D^2 + (B K + \lambda K) D} \right]$$
- Posición del modelo:
$$X_b = X_a \cdot \left[\frac{K}{m_b D^2 + \lambda D + K} \right]$$

$$\bullet \quad \begin{array}{ccc} P_c & \Rightarrow & \boxed{\frac{A_a (m_b D^2 + \lambda D + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a \lambda + m_b B) D^3 + (m_a K + m_b K + B \lambda) D^2 + (B K + \lambda K) D}} \Rightarrow X_a \end{array}$$

Ilustración 29 Diagrama de bloques de la interacción mesa – modelo.

8. GRUPO DE ACCIONAMIENTO HIDRÁULICO.

El grupo de accionamiento hidráulico es el componente encargado de generar el caudal y la presión necesarias para accionar el cilindro hidráulico.

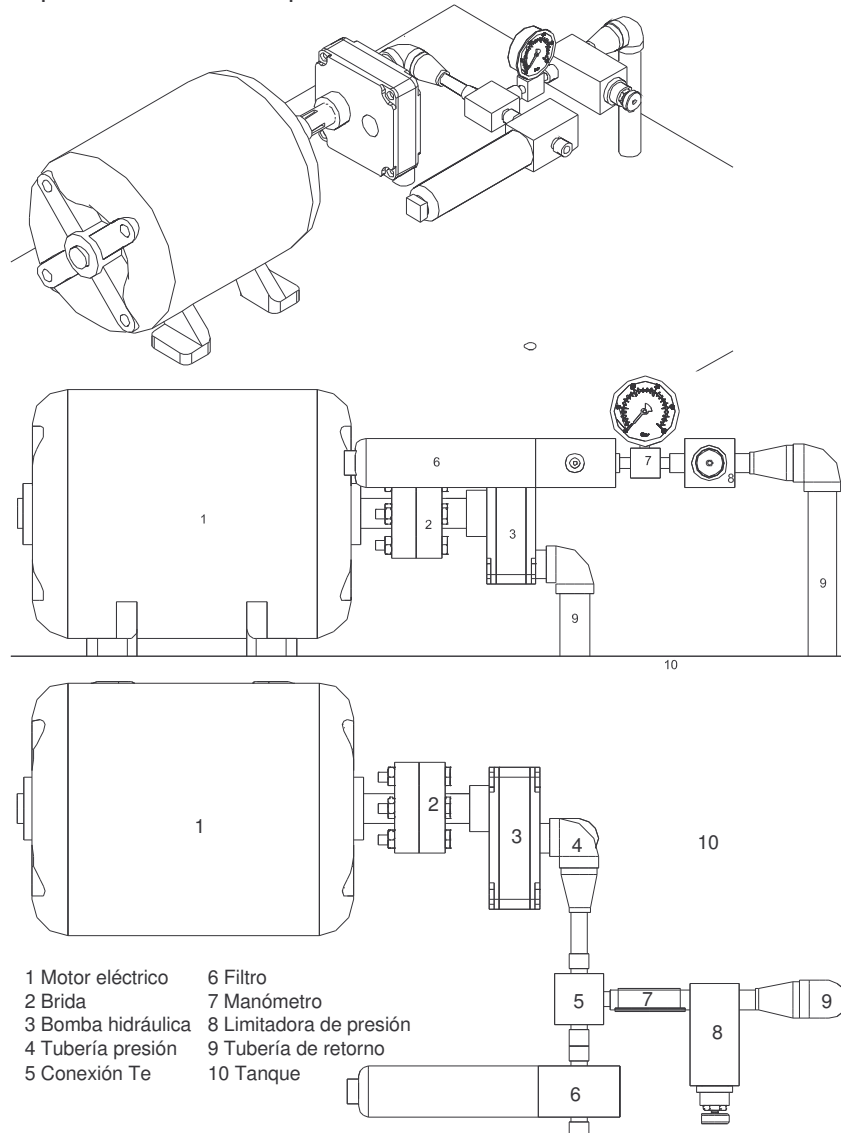


Ilustración 30 Detalle del grupo de generación de potencia del sistema hidráulico.

[39] El motor eléctrico 1, conectado a la red transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, generando un torque que transmite a la bomba de engranes 3.

El aceite en el interior del tanque de almacenamiento 10, es impulsado mediante los engranes de la bomba desde la tubería de succión o aspiración hacia la tubería de presión 4, ganando energía que se traduce en un aumento de presión.

El fluido a presión acciona el manómetro 7 el cual indica la presión actuante del sistema. La presión se ajusta mediante la válvula limitadora de presión 8 a los rangos deseados por el usuario para garantizar el adecuado funcionamiento del simulador.

El caudal de retorno a tanque se dirige mediante la tubería de retorno 9.

El caudal a la salida de la tubería de presión debe pasar a través de un filtro hidráulico 6 que se encarga de eliminar la partículas en suspensión que contaminan al fluido hidráulico y producen obstrucción de conductos y desgaste de componentes.

8.1. RECOMENDACIONES

El grupo de accionamiento por ser el encargado de proporcionar las presiones y los caudales necesarios para garantizar el buen desempeño del simulador según los requerimientos de las señales sísmicas como: velocidades y aceleraciones máximas PGA y PGV indicadas en la referencia [107], junto con la masa del simulador M_a , debe ser muy bien analizado. Un análisis subestimado podría recaer en un sistema incapaz de generar el movimiento deseado y como consecuencia se obtiene un sistema lento con bajas velocidades de respuesta.

8.2. MOTOR ELÉCTRICO

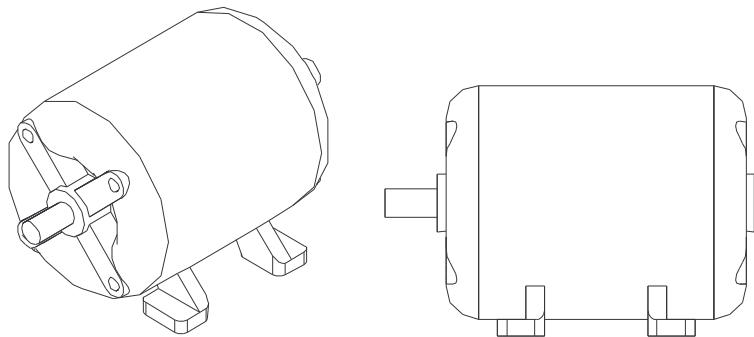


Ilustración 31 Isométrica del motor eléctrico.

8.2.1. FUNCIONAMIENTO

Mediante la inducción magnética transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación que es transmitida a la bomba hidráulica mediante una brida de acople.

8.2.2. CONVENCIONES.

- Potencia transmitida: PT
- Eficiencia mecánica: η .
- Potencia de alimentación: PA .
- Aceleración máxima de sitio: PGA .

- Velocidad máxima de sitio: PGV .
- Masa (simulador + modelo): M_a .

8.2.3. ECUACIONES DE DISEÑO

- Potencia transmitida máxima: $PT = (M_a \cdot PGA + B \cdot PGV) \cdot PGV$.
- Potencia de alimentación: $PA = \frac{PT}{\eta}$

8.3. BOMBA HIDRÁULICA

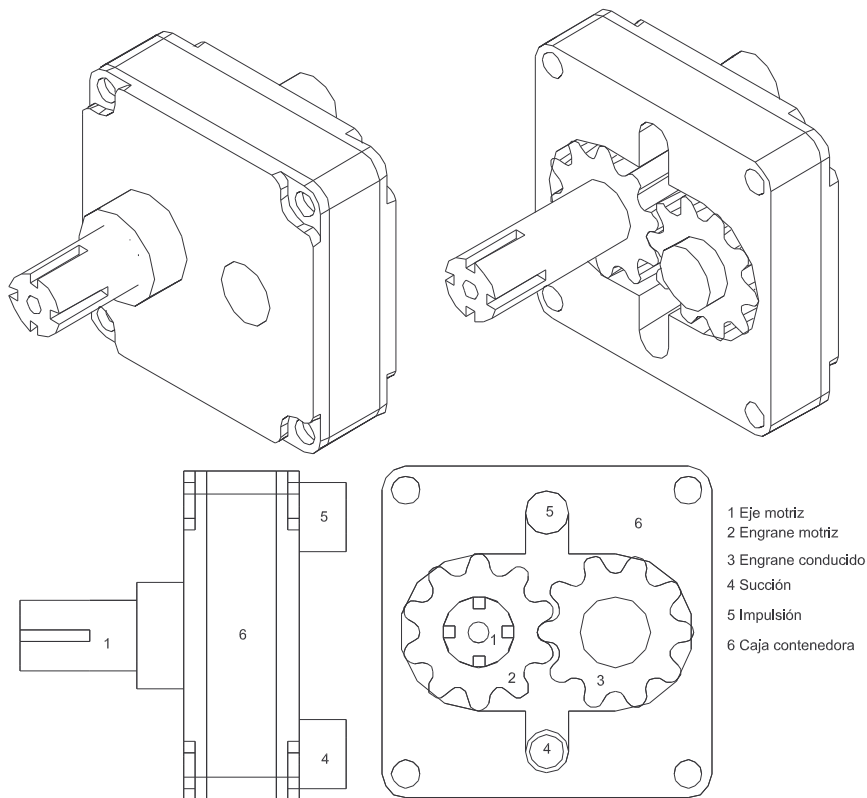
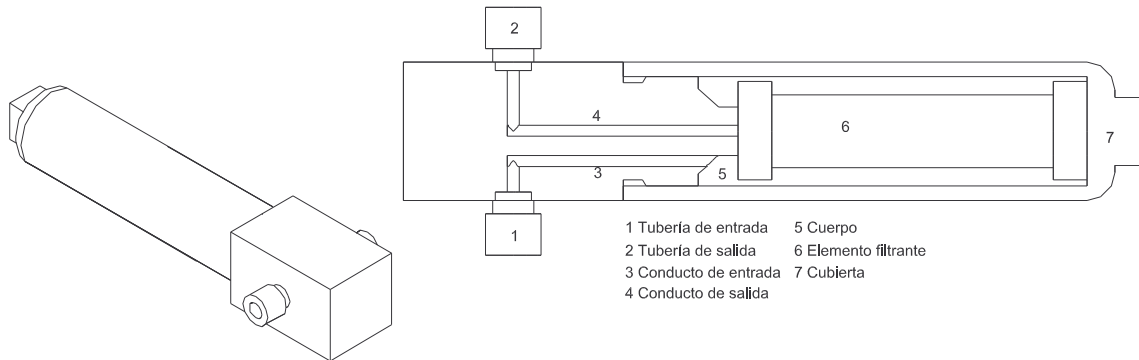


Ilustración 32 Vistas isométricas, lateral y frontal de la bomba de engranes.

8.3.1. FUNCIONAMIENTO

El torque transmitido por el motor eléctrico acciona los engranes. El movimiento rotativo de los engranes, impulsa el aceite creando un vacío en la tubería de tubería de succión y una sobre presión en la tubería de presión.

8.4. FILTRO HIDRÁULICO



8.4.1. FUNCIONAMIENTO

[39] El aceite atraviesa el elemento filtrante desde el exterior hacia el interior. El filtro por su parte, retiene las partículas mediante una malla.

8.4.2. ECUACIONES DE DISEÑO

- Número de partículas antes en (μm): N_{aX} .
- Número de partículas después en (μm): N_{dX} .
- Eficiencia: $\beta_X = \frac{N_{aX}}{N_{dX}}$.

El valor β_X es función de la presión diferencial actuante sobre el filtro y debe ser proporcionado por el fabricante.

8.5. MANÓMETROS

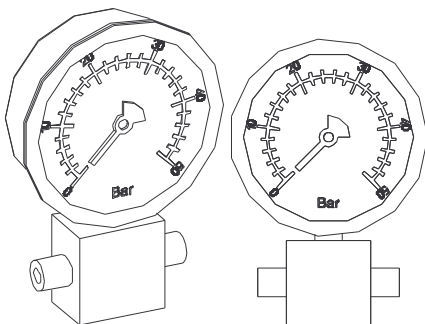


Ilustración 33 Manómetro típico.

[39] La función de un manómetro es solo indicar el valor de la presión actuante en un momento dado mediante un indicador de aguja. Su función es por tanto de control para que el usuario puede enterarse del estado de presiones del sistema.

8.6. VÁLVULA LIMITADORA DE PRESIÓN

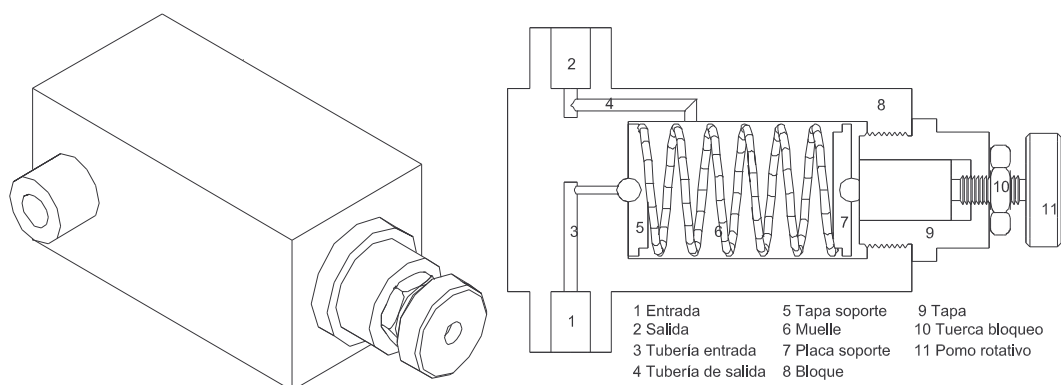


Ilustración 34 válvula limitadora de presión.

[39] En forma normal la válvula permanece en estado cerrado y deja pasar el fluido solo cuando la presión del aceite supere cierto valor ajustado a voluntad mediante un tornillo de calibración o pomo rotativo. Su función principal dentro del sistema hidráulico es de protección evitando de esta manera sobre presiones que puedan poner en peligro al equipo. Cuando la válvula conmuta por exceso de presión, el caudal que produce la sobre presión es conducido al tanque de almacenamiento.

9. SENSORES

La importancia de construir una mesa para la simulación sísmica radica en el hecho de que podamos almacenar o captar de alguna manera el comportamiento de la estructura modelo durante un ensayo, para ello sería necesario disponer de un mecanismo capaz de captar todas las variables deseables a lo largo de toda la estructura como son: posición, aceleración y esfuerzos de cada uno de los componentes del modelo. La mayoría de los simuladores que existen en la actualidad miden generalmente las aceleraciones. Adicionalmente para medir la totalidad del comportamiento de la estructura sería necesario disponer de una buena cantidad de sensores de posición, aceleración, y esfuerzo, además de otras variables adicionales. Esto significa que debería utilizarse una gran cantidad de sensores. Afortunadamente el comportamiento de las estructuras aunque complejo, puede ser simplificado teóricamente lo cual implica que basta con disponer de unos cuantos sensores y ubicarlos estratégicamente sobre el modelo para obtener resultados representativos.

Los elementos sensores dentro de un sistema de control en lazo cerrado, se pueden clasificar en dos tipos principales: sensores destinados a captar variables de control y sensores destinados exclusivamente a monitoreo.

El simulador sísmico debe estar provisto de estos dos tipos de sensores. Por un lado debe utilizar sensores para medir la posición o desplazamiento del cilindro que corresponde a la variable a controlar y de otra parte poseer sensores destinados a determinar el estado del modelo durante un ensayo y generalmente corresponden a sensores de aceleración.

Debe aclararse que para el desarrollo de este proyecto solo se utilizaron sensores de posición potenciométricos para captar la posición de control pero se omitió el uso de sensores de aceleración.

9.1. SENSORES DE POSICIÓN (POTENCIÓMETROS)

Según la referencia [91] aunque existe gran variedad de tecnologías que permiten estimar posición, se ha optó por la alternativa de los potenciómetros por su disponibilidad en los laboratorios del SENA. Su función principal es generar un voltaje de salida, proporcional a la posición del cilindro hidráulico, generalmente al vástago que es la parte móvil y externa del cilindro donde se puede realizar un acople mecánico, constituyéndose de esta manera en un sensor de posición.

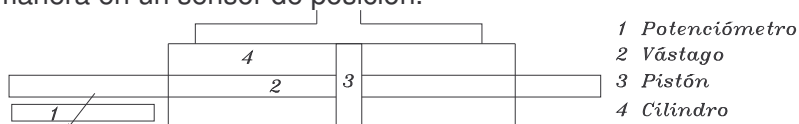


Ilustración 35 Esquema de acoplamiento pistón potenciómetro.

9.1.1. FUNCIONAMIENTO

[91] Los potenciómetros son divisores de voltaje de resistencia variable que disponen de cuatro terminales: dos terminales de entrada se conectan a una fuente generadora de voltaje continuo generalmente de ± 10 voltios, ± 20 Voltios ó ± 24 voltios en forma comercial.

Permiten medir variaciones de voltaje de hasta 20 mV. Son elementos relativamente económicos y fáciles de utilizar pero presentan la desventaja de permitir mediciones del orden de las décimas de (mm) lo cual los convierte en elementos poco precisos.

9.1.2. ECUACIONES DE DISEÑO

- Posición de pistón: X_a .
- Longitud del potenciómetro: L .
- Voltaje entrada de potenciómetro: V_0 .
- Voltaje salida de potenciómetro: V_x .

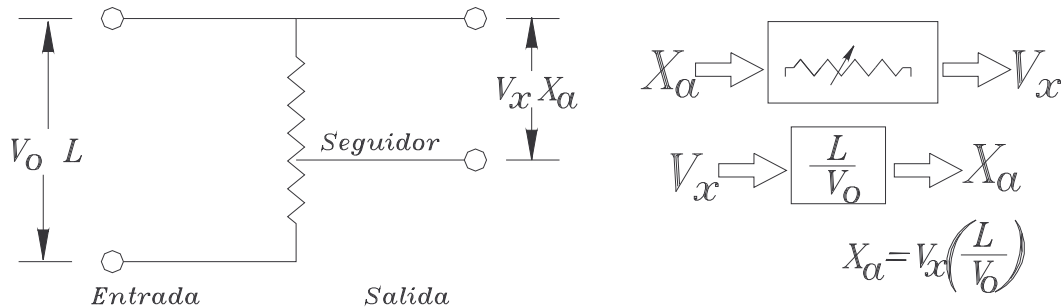


Ilustración 36 En los potenciómetros la posición es proporcional a la resistencia.

9.2. SENSORES DE ACELERACIÓN

La principal función de los acelerómetros dentro del proyecto, es determinar el estado de aceleraciones del modelo durante un ensayo y deben disponerse adecuadamente a lo largo del modelo. Su uso es exclusivamente de monitoreo y no hacen parte del sistema de control por lo que no fueron implementados como parte de este proyecto y se dejaron para una etapa de investigación posterior.

Se ha decidió agregar alguna información al respecto como material de ayuda para etapas posteriores del proyecto.

Aunque hay diversos tipos de acelerómetros, se han considerado los acelerómetros piezoeléctricos por ser los mas recomendables para este tipo de proyecto. De acuerdo con la referencia [97], el efecto piezométrico fue descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1880, cuando observaron que ciertos materiales generaban un voltaje al ser sometidos a esfuerzos mecánicos y presentaban cambios en las dimensiones físicas cuando se les aplica un voltaje. Entre este tipo de materiales se encuentran: el cuarzo, los zirconatos, los titanatos, el sodio, el potasio, los tartaratos o sal de roca y el azúcar ordinaria.

Los materiales piezoeléctricos que son utilizables como transductores deben presentar las siguientes propiedades: estabilidad, altos voltaje de salida, in sensibilidad a la temperatura y la humedad y la capacidad de trabajar en las formas deseadas.

9.2.1. FUNCIONAMIENTO

En respuesta a esfuerzos mecánicos, los piezo-elementos generan cargas las cuales son almacenadas. Esta propiedad convierte a los piezo-elementos ideales para la medición de variables dinámicas tales como la aceleración mediante la relación entre la fuerza aplicada y la carga superficial generada sobre el piezo-elemento.

$$\begin{array}{ll}
 \alpha = \text{Aceleración} & Q \Rightarrow \boxed{k} \Rightarrow \alpha \\
 Q = \text{Carga eléctrica} & \\
 D = \text{Const piezoeléctrica} & \alpha = k Q \\
 m = \text{Masa.} & \\
 Va = \text{Aceleración} & \alpha = Q \left(\frac{1}{Dm} \right)
 \end{array}$$

Ecuación 1 Principio de funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos.

10. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA FÍSICA

El planteamiento de este modelo matemático se ha tomado a partir de la referencia [119] relacionada con el modelo de servomecanismos de accionamiento hidráulico. Se ha eliminado la etapa de retroalimentación y se le ha agregado la interacción mesa-modelo tomado de la referencia [72]. Estas ecuaciones aunque no han sido sometidas a validez experimental, se han dejado planteadas para que sirvan de apoyo en la etapa de diseño de un SS para investigaciones posteriores.

Se utilizó la siguiente metodología: partiendo de las ecuaciones diferenciales, se expresaron en nomenclatura operacional, paso seguido se transformaron la ecuaciones en forma de diagramas de bloques y se ensamblaron en un solo diagrama de bloques dando lugar a la función de transferencia definitiva.

- Comportamiento cilindro – masa acoplada :

$$Q_c = A_a \left(\frac{dX_a}{dt} \right) + \frac{V_t}{4\beta_e} \left(\frac{dP_c}{dt} \right) \quad 6.1.1.2$$

- Comportamiento válvula proporcional:

$$Q_c = K_{qo} X_v - K_{co} P_c = K_{eqo} V_{ea} - K_{co} P_c \quad 6.1.2.5$$

- Interacción mesa modelo:

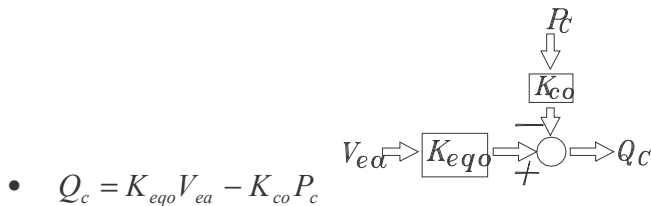
$$X_a = P_c \cdot \left[\frac{A_a \cdot (m_b D^2 + \lambda D + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a \lambda + m_b \lambda) D^3 + (m_a K + m_b K + B \lambda) D^2 + (BK + \lambda K) D} \right] \quad 7$$

Estas ecuaciones se expresaron en términos del operador diferencial D , de la siguiente forma:

$$Q_c = A_a \left(\frac{dX_a}{dt} \right) + \frac{V_t}{4\beta_e} \left(\frac{dP_c}{dt} \right), \text{ conduce a: } P_c = \frac{Q_c - X_a \cdot A_a D}{\left(\frac{V_t}{4\beta_e} \right) D}$$

$$Q_c = K_{qo} X_v - K_{co} P_c = K_{eqo} V_{ea} - K_{co} P_c: \quad Q_c = K_{eqo} V_{ea} - K_{co} P_c$$

Se expresó cada función en forma de diagramas de bloques:



$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad P_c = \frac{Q_c - X_a \cdot A_a D}{\left(\frac{V_t}{4\beta_e} \right) D} \\
 & \bullet \quad \begin{aligned} & \xrightarrow{P_c} \left[\frac{A_a(m_b D^2 + \lambda D + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a \lambda + m_b B) D^3 + (m_a K + m_b K + B \lambda) D^2 + (BK + \lambda K) D} \right] \xrightarrow{X_a} \\ & X_a = P_c \cdot \left[\frac{A_a \cdot (m_b D^2 + \lambda D + K)}{m_a m_b D^4 + (m_a \lambda + m_b B) D^3 + (m_a K + m_b K + B \lambda) D^2 + (BK + \lambda K) D} \right] \end{aligned}
 \end{aligned}$$

Se ensambló el conjunto de ecuaciones en un solo diagrama de bloques:

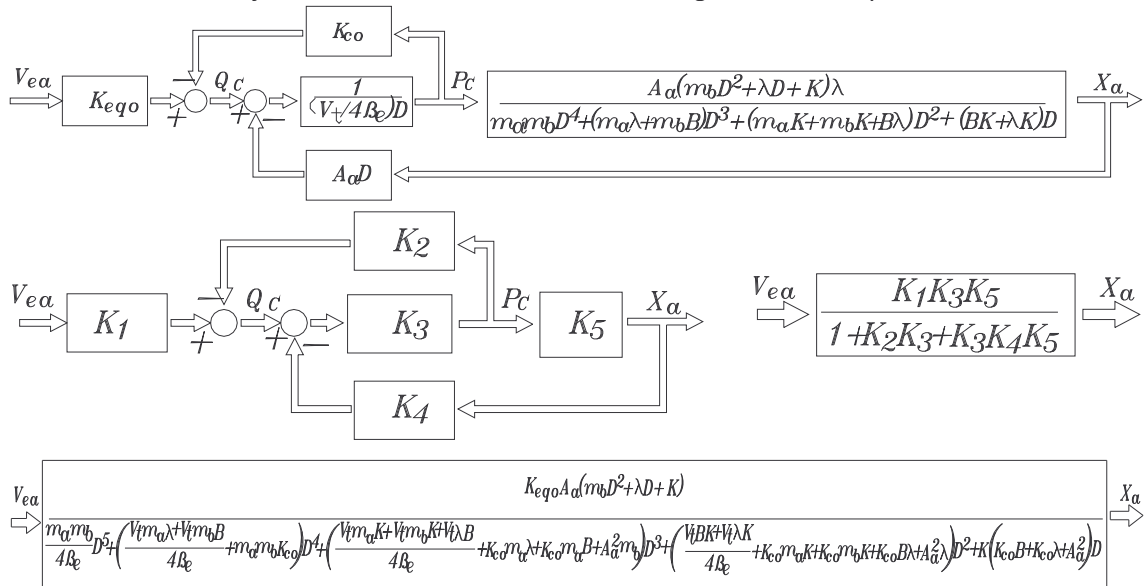


Ilustración 37 Función de transferencia del sistema cilindro, válvula, mesa, modelo.

11. EL SISTEMA DE CONTROL

De acuerdo con la referencia [46] hay dos formas básicas en las que se puede disponer el PC dentro de un sistema de control. En una primera alternativa, el PC se incluye como elemento de control dentro del bucle en lazo cerrado y como segunda alternativa, el PC se emplea como generador de señales, excluyéndose del sistema de control.

La Ilustración 38 hace referencia a la alternativa en la que el PC se incluye dentro del bucle de control a diferencia de la Ilustración 39 en la que el PC solo actúa como un generador de señales.

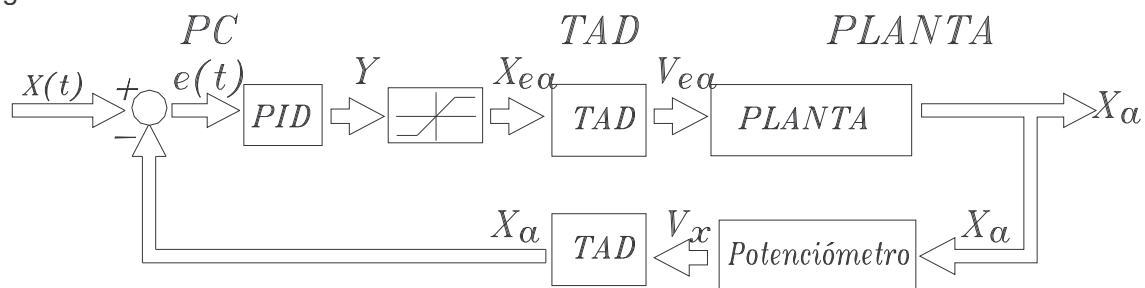


Ilustración 38 Alternativa de control con el PC como elemento dentro del bucle de control en lazo cerrado.

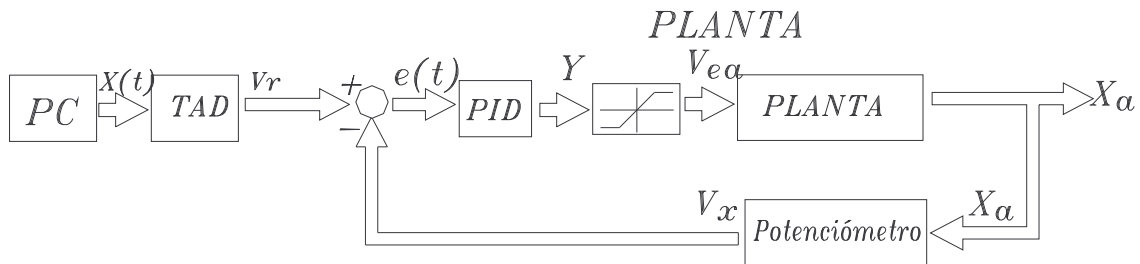


Ilustración 39 Alternativa de control que contempla al PC como generador de señales, excluido del bucle de control en lazo cerrado.

El sistema de control para el SS es una combinación de diferentes dispositivos dispuestos en lazo cerrado entre los que podemos identificar: planta física, tarjeta de adquisición de datos, 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: señales físicas, señales eléctricas y datos.

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

La tarjeta de adquisición de datos (TAD), 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.

La computadora por su naturaleza, procesa la información como datos numéricos binarios a números decimales y genera expresiones gráficas de pantalla entendibles por el usuario quien es el verdadero controlador del simulador sísmico.

Tabla 4 Variables y señales

<i>ELEMENTO</i>	<i>SEÑAL</i>	<i>DATO</i>
<i>POTENCIÓMETRO</i>	V_x (voltios)	X_a (metros)
<i>ACELERÓMETRO</i>	V_i (voltios)	A_i (m/s^2)
<i>SERVOVÁLVULA</i>	V_{ea} (voltios)	X_{ea} (voltios)

La implementación de control para el SS requirió el uso de los siguientes elementos:

- Como señal de control, los registros sísmicos del sismo de Armenia Colombia, proporcionados por INGEOMINAS BOGOTÁ, cada uno con mas de 14000 muestras y cada registro con sus tres componentes (Este-Oeste), (Norte-Sur) y (Vertical), dispuestas en archivos independientes.
- Una PC con procesador Athlon de 120MB en RAM y velocidad de cálculo de 1200 MHz.
- El software LabView versión 7 Express para la elaboración del sistema de control.
- Una tarjeta de adquisición de datos (TAD), NI6014 con 16 bits de resolución y velocidad de operación hasta 200000 muestras por segundo con convertidor analógico digital (A/D) de aproximaciones sucesivas.
- El mecanismo cartesiano de ejes neumáticos FESTO, como elemento de accionamiento, con dos grados de libertad.

Debe aclararse que aunque se disponía de actuadores hidráulicos en los laboratorios del SENA, estos no fueron tenidos en cuenta en los ensayos de control mediante señales sísmicas debido a los bajos caudales de operación los cuales no permitieron obtener las velocidades requeridas para reproducir las señales sísmicas.

11.1. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (TAD)

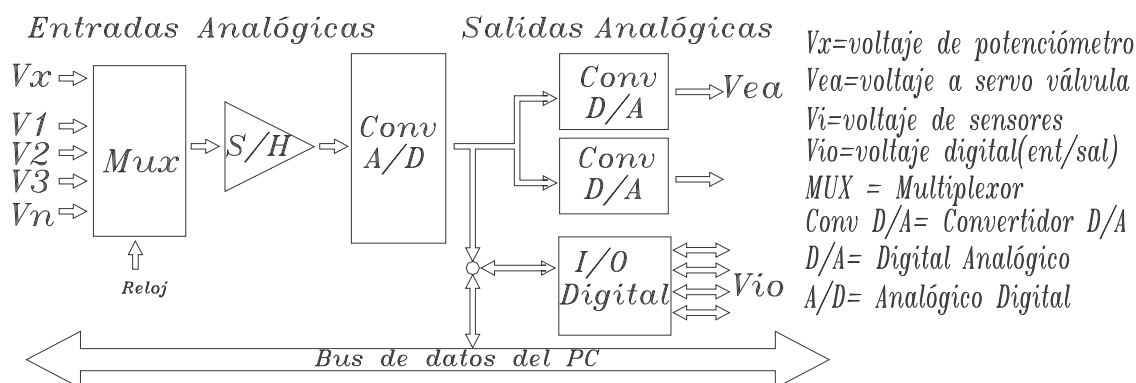


Ilustración 40 Esquema básico de la tarjeta de adquisición de datos (TAD).

[20] Elemento físico encargado de comunicar los mecanismos motrices y sensoriales de la planta con la PC. Debido a que los motores y sensores responden a señales continuas en el tiempo (señales analógicas) y la computadora opera en forma discreta (señales digitales), la TAD debe ser capaz de traducir las señales analógicas en digitales y viceversa. Para lograrlo la TAD dispone de varias etapas entre las que podemos enunciar: etapa de muestreo y captura de señales, etapa de conversión de señales analógica-digital, y digital-analógica como se muestra en la Ilustración 40.



Ilustración 41 Detalle de una tarjeta de adquisición de datos. Tomado de la WEB.

11.1.1. ETAPA DE MUESTREO Y RETENCIÓN.

Es importante considerar este parámetro a la hora de seleccionar una TAD. Aunque las señales provenientes de los sensores son continuas, las TAD por su naturaleza poseen un reloj que impone la velocidad de muestreo o captura de las señales analógicas. Como resultado las señales continuas se transforman en una serie de pulsos discretos cuya frecuencia depende del reloj interno de la TAD. A esta dificultad debe agregarse que una sola TAD debe muestrear una cantidad determinada de señales para lo cual hay que

dividir la frecuencia de operación de la TAD por el número de señales a muestrear. Como resultado la velocidad de muestreo para una señal particular se reduce considerablemente. Afortunadamente la tecnología de los procesadores ha incrementado notablemente las velocidades de muestreo siendo del orden hasta de millones de muestras por segundo pero con el problema asociado del incremento en su precio de adquisición.

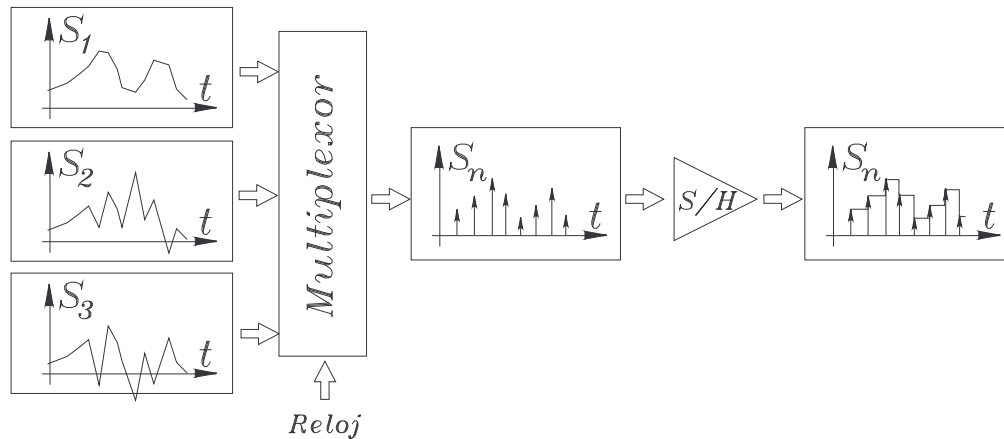


Ilustración 42 Esquema de funcionamiento de la etapa de muestreo y retención

[20] El multiplexor selecciona una señal de entre varias por cada instante de muestreo y el retenedor compuestos generalmente por un condensador, almacena la señal de entrada durante el intervalo en que ocurre el próximo muestreo.

Entre los diversos tipos de retenedores, el retenedor de orden cero mantiene la señal de entrada en forma constante generando una salida escalonada de la señal.

Uno de los aspectos mas críticos en la selección de una TAD, es el error por pseudo frecuencia de una señal. Si la frecuencia de muestreo es igual o inferior a la frecuencia de la señal, como resultado se obtiene una señal de salida completamente distorsionada no representativa de la señal de entrada. La teoría de Nyquist [20] sugiere que la velocidad de muestreo debe ser por lo menos de dos veces la frecuencia de la señal de entrada, esta frecuencia se conoce como frecuencia de Nyquist. [20] Las señales de entrada con frecuencias inferiores a la mitad de la frecuencia de Nyquist, deben ser eliminadas mediante filtros.

11.1.2. FILTROS

[20] Entre los diferentes tipos de filtros para el tratamiento de señales, los mas utilizados son: filtros Cauer (filtros elípticos), filtros Bessel y los filtros Butterworth. La función principal de los filtros es como su nombre lo indica, impedir el paso de señales con frecuencias por fuera del rango deseado por el usuario. En términos generales se habla de filtros pasa-bajo, pasa-alta y pasa-banda.

Los filtros pasa bajo son muy útiles en las TAD para la eliminación de señales ruidosas que se introducen generalmente como frecuencias altas. Una ventaja de la utilización de este tipo de filtros es que permite reducir los costos de las TAD significativamente.

11.1.3. ETAPA DE CONVERSIÓN.

[46] Cada señal que ingresa al computador (señal analógica), una vez que han sido capturada por la TAD, debe ser sometida a una etapa de digitalización (expresada como una combinación de unos y ceros) de modo que pueda enviarse al bus de datos del computador para ser procesada. Esto requiere una etapa de conversión analógica-digital A/D y una etapa digital-analógica (D/A) para las señales ya procesadas que residen en el interior del computador como datos binarios (combinación de unos y ceros).

Antes de describir la mecánica de los convertidores A/D y D/A, es importante entender que se basan en un principio matemático muy elemental. Para ello se parte de la serie

con límite conocido: $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \dots + \frac{1}{2^n} + \dots = 1$.

La estrategia de conversión A/D, D/A, sugiere que partiendo de este resultado matemático, es posible obtener el mismo resultado sin necesidad de realizar una suma infinita, para ello basta con realizar una suma finita de potencias de $\frac{1}{2}$ y la suma resultante multiplicarla por un factor de modo se haga igual a la unidad.

En general: $k \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^n} \right) = 1$

Ecuación 2 Igualdades matemáticas para el principio de conversión A/D, D/A.

$k \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^n} \right) = 1$ donde: n : Es el número de bits, $\frac{1}{2^n}$: Es la resolución mas pequeña que se puede lograr para n bits.

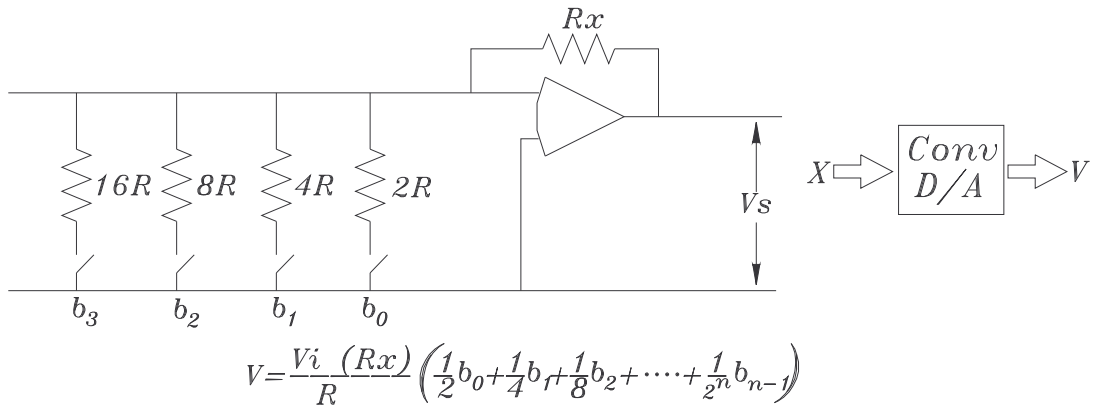
El anterior principio de conversión se puede generalizar para valores diferentes a la unidad de la siguiente forma:

Si se desea obtener un valor V con una combinación de n bits; basta con realizar la siguiente igualdad matemática:

$k \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^n} \right) = V$; aquí el valor mas pequeño que se puede registrar corresponde

al valor: $k \cdot \left(\frac{1}{2^n} \right)$ que correspondería al valor de un bit de resolución.

11.1.3.1. CONVERTIDORES D/A.



$X = \text{Número binario} \quad X = b_0b_1b_2 \dots b_{n-1} \quad b_i = (0 \text{ ó } 1)$

$b_0 = \text{Bit mas significativo MSB}$

$b_{n-1} = \text{Bit menos significativo LSB}$

Ilustración 43 Esquema convertidor D/A básico.

[47] Su función principal es transformar un dato binario en un voltaje equivalente, mediante la combinación de resistencias cada una con valor de resistencia equivalente a una potencias de (2) como se muestra en la Ilustración 43. Cada resistencia puede ser conmutada mediante un transistor o relé de modo que la combinación de varias resistencias produce un voltaje de salida equivalente a su combinación lineal.

11.1.3.2. CONVERTIDORES A/D.

[46] La mayoría de estos convertidores se basan en los convertidores D/A mediante estrategias algorítmicas de aproximación. La TAD NI6014 utilizada en este proyecto utiliza un convertidor de aproximaciones sucesivas como se muestra en la Ilustración 44.

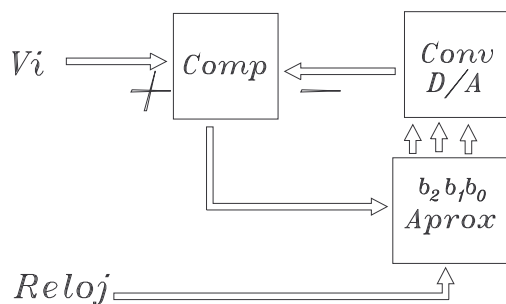


Ilustración 44 Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.

Este tipo de convertidor A/D, utiliza un convertidor D/A y un comparador. Su funcionamiento se puede expresar en los siguientes términos: El voltaje de entrada V_i que va a ser digitalizado, se compara con el voltaje de salida del convertidor D/A y

dependiendo de la diferencia se realiza la conmutación de bits mediante una estrategia algorítmica que consiste iniciar a partir de un número binario que puede ser el mas alto y conmutar cada bit en forma independiente partiendo desde el bit mas significativo el cual se decrementa, el proceso continua al próximo bit menos significativo y el objeto final es lograr que la señal de diferencia sea la mas pequeña posible. Este proceso sugiere un total de dos operaciones por bit con un máximo de $2n$ conmutaciones, siendo n el número de bits de resolución.

11.1.4. PROBLEMAS ADICIONALES DE LAS TAD.

Entre los problemas relacionados con las TAD podemos enunciar: susceptibilidad al ruido para señales muestreadas en modo independiente, el tiempo de asentamiento de la señal a la salida del convertidor D/A y la velocidad de operación.

- **Entrada de señales únicas.**

Debido a que los dispositivos eléctricos funcionan con voltajes que pueden referenciarse con respecto a su señal de tierra y presentan señales ruidosas que caracterizan al dispositivo, estas señales indeseables son captadas por la TAD cuando se captan en modo independiente. Para resolver este inconveniente se aconseja conectar a la TAD la señal a ser censada junto con su correspondiente señal de tierra. Esta conexión se conoce como conexión en modo diferencial y elimina significativamente las señales ruidosas.

- **Tiempo de asentamiento**

Las señales generadas a la salida del convertidor D/A, inicialmente presentan comportamientos inestables, siendo necesario un pequeño lapso de asentamiento o estabilización de la señal. Generalmente el tiempo de asentamiento es del orden de los microsegundos siendo aconsejable no realizar muestreos durante este pequeño lapso. Por consiguiente cada TAD debe especificar los tiempos de asentamiento que deben ser proporcionados por el fabricante.

- **Velocidad de operación de las TAD**

[20] Está limitada por tres elementos que son: Tiempo de conversión: es el tiempo empleado por el convertidor. Tiempo de adquisición: es el tiempo requerido por el multiplexor, el amplificador y el retenedor. Tiempo de transferencia: es el tiempo requerido para transferir los datos desde la TAD hasta la memoria del PC.

11.2. CONTROLADORES PID

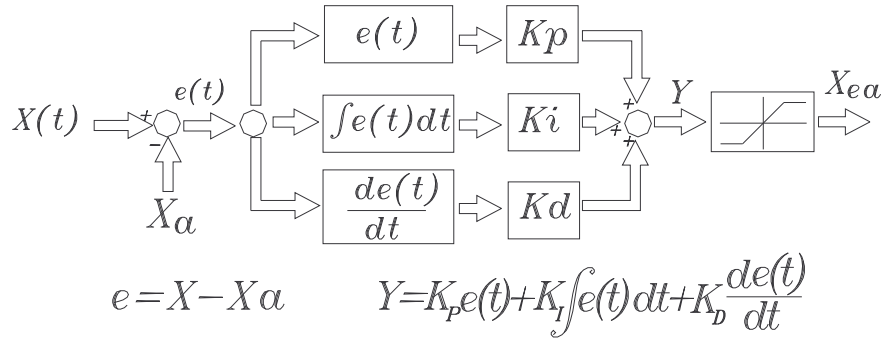


Ilustración 45 Algoritmo de regulación PID.

Entre diversas alternativas de control, para este proyecto se utilizó la alternativa de los reguladores PID cuyo fundamento se explica enseguida.

La teoría de control establece que el control en lazo cerrado de un sistema en condiciones ideales (en ausencia de fuerzas perturbadoras que alteren la respuesta del sistema) sería suficiente para garantizar el comportamiento adecuado del sistema. Sin embargo la naturaleza se caracteriza por la presencia de abundantes fuerzas perturbadoras como la fricción que causa comportamientos inadecuados siendo por consiguiente necesario la utilización de sistemas compensadores.

Según la referencia [91] los reguladores PID son los más recomendables para el caso de los mecanismos de accionamiento hidráulico por la sencillez y efectividad que proporcionan.

De acuerdo a la Ilustración 45, 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 .

11.2.1. AJUSTE DEL CONTROL PID.

En la referencia [38] se encuentra que el compensador PID por sí solo no funciona y requiere que sus ganancias K_p , K_i y K_d sean sintonizadas de modo que el sistema de control funcione de una manera óptima (en forma rápida y exacta).

El ajuste de las ganancias puede realizarse mediante diferentes alternativas entre las que podemos enunciar el método Ziegler-Nichols que s

Hay dos formas de ajustar un regulador PID mediante la técnica Ziegler-Nichols:

- **Verificar la oscilación la oscilación utilizando un regulador P.**

La ganancia del regulador P se incrementa hasta que el bucle cerrado de regulación oscila; este ajuste es lo que se conoce como KP_{CRIT} y se mide la duración periódica de la oscilación T_{CRIT} . Las variables KP_{CRIT} Y T_{CRIT} , pueden utilizarse posteriormente para calcular los ajustes de ganancia del regulador de la siguiente manera:

Regulador	Datos Característicos		
	Kr	Tn	Tv
P	$0.5 KR_{crit}$		
PI	$0.45 KR_{crit}$	$0.85 T_{crit}$	
PID	$0.6 KR_{crit}$	$0.5 T_{crit}$	$0.12 T_{crit}$

T_n = tiempo de acción integral. $K_I = \frac{K_P}{T_n}$

T_v = tiempo de acción derivativo. $K_D = K_P T_v$

Ilustración 46 Tabla de ajuste del control PID mediante el método Ziegler-Nichols.

- **Regulación analizando la respuesta a un escalón.**

Esta opción se considera cuando el bucle de regulación no puede hacerse oscilar. El procedimiento es trazar la respuesta del sistema a un escalón y mediante la gráfica obtenida medir: el tiempo muerto T_t , la constante de tiempo T_s y la ganancia del sistema regulado K_s . Los parámetros de regulación se determinan de la siguiente manera:

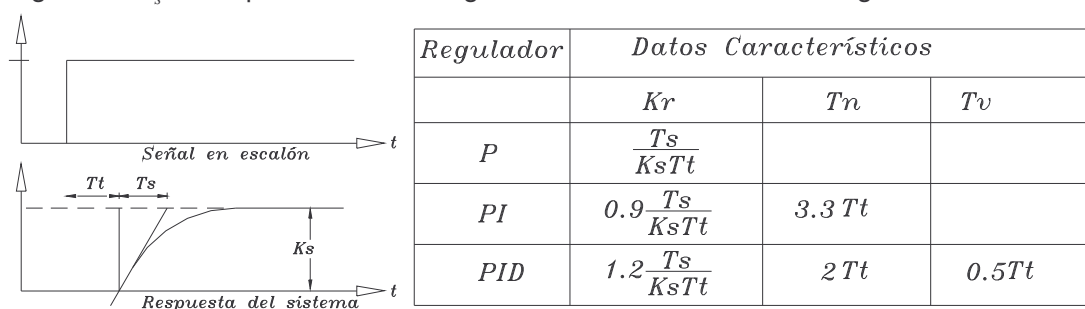


Ilustración 47 Ajuste Ziegler Nichols mediante la respuesta a un escalón.

12. EL SOFTWARE DE CONTROL

Es la parte intangible del SS que permite manipular el sistema de control. Entre sus funciones podemos enumerar las siguientes: transforma las señales de entrada provenientes de los sensores (acelerómetros y potenciómetros) en información binaria, ejecuta las operaciones matemáticas necesarias a partir de la información de entrada y genera señales de salida que son enviadas a la TAD. Además es el componente encargado de comunicarse con el usuario para informarle sobre el estado del sistema y permitirle la manipulación de sus parámetros de control.

La totalidad del software se elaboró en lenguaje gráfico (lenguaje G) mediante subrutinas que en lenguaje G se denominan SubVis. Se utilizó el paquete comercial LabView 7.0 Express, el cual es completamente compatible con la TAD NI6014.

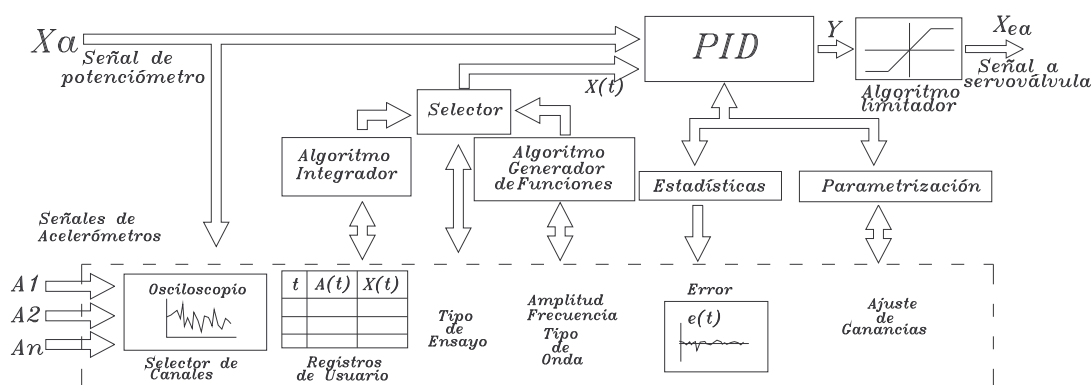


Ilustración 48 Estructura del Software del simulador.

Todo el programa para el control del SS se diseñó en base al modelo planteado en la Ilustración 48 y se elaboró en tres etapas de la siguiente manera:

En una primer etapa de prueba encaminada al control de posición en una dirección, se elaboró un programa solo para generar señales de modo que la PC se conectó como generador de ondas al sistema de control en bucle cerrado ya existente en los laboratorios del SENA mediante una tarjeta electrónica de control PID FESTO. Esta etapa de control en lazo abierto permitió estudiar varios aspectos: en primer lugar se observó que la TAD era capaz de accionar la válvula proporcional por lo que no fue necesario adicionar una etapa de potencia, en segundo lugar se calibraron los rangos de voltaje de entrada y salida por los puertos de la TAD y finalmente se sincronizó la generación de la señal en tres modos distintos (generación de señales en modo manual, señales armónicas con amplitud y frecuencia controladas y registros sísmicos).

En una segunda etapa para el control de posición en una dirección, se elaboró un programa con capacidad de simular el control PID y generar señales en tres formas

distintas (manual, senoidal y sísmica). En esta etapa se logró: comprobar la efectividad del algoritmo PID elaborado en LabView y por consiguiente eliminar la tarjeta PID FESTO e introducir a la PC dentro del sistema de control en lazo cerrado.

En una tercera y última etapa de control en dos direcciones, el programa permitió manipular dos variables sísmicas independientes, mediante el accionamiento del mecanismo de ejes neumáticos FESTO, logrando el control de posición simultaneo en dos ejes. De este modo se pudo generar en forma simultanea, dos señales sísmicas(Este-Oeste y Norte-Sur) correspondientes al sismo de Armenia Colombia.

A continuación se describirá en forma breve el software generado para las etapa de control en una y dos direcciones. El objetivo de esta descripción es ilustrar la manera como se logró el control del simulador.

12.1. SOFTWARE PARA EL CONTROL DE POSICIÓN EN UNA DIRECCIÓN

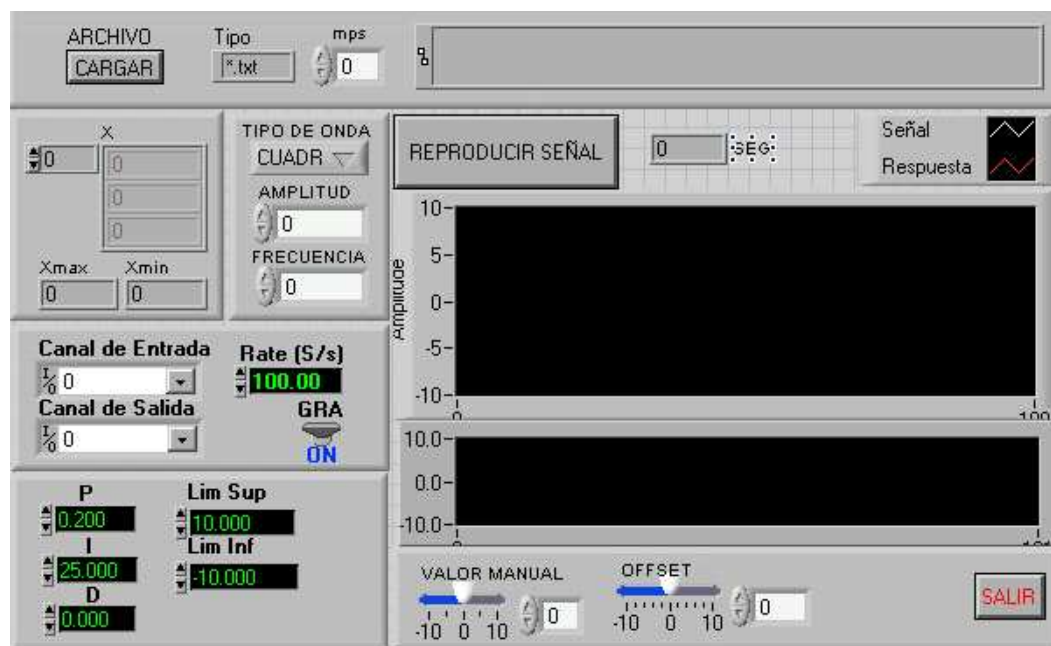
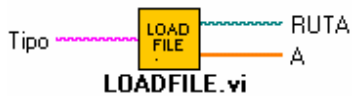


Ilustración 49 Panel frontal o interfaz de usuario elaborado en LabView 7Express.

A partir de la Ilustración 49 correspondiente a la interfaz de usuario. Se puede identificar los diversos componentes del software entre los que podemos enumerar: selector de archivos, selector del tipo de reproducción (manual, senoidal ó señal sísmica), selector de canales de entrada salida, ajuste de ganancias del PID, control de ejecución y osciloscopio.

Para desarrollar la totalidad del programa fue necesario descomponerlo en diversas tareas las cuales se programaron en módulos independientes conocidos como SubVis en el lenguaje de programación de LabView y que se explicará en seguida.

12.1.1. CARGA DE REGISTROS ACELEROMÉTRICOS



La lectura y almacenamiento de los registros acelerométricos correspondientes a registros sísmicos reales proporcionados por INGEOMINAS, 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.

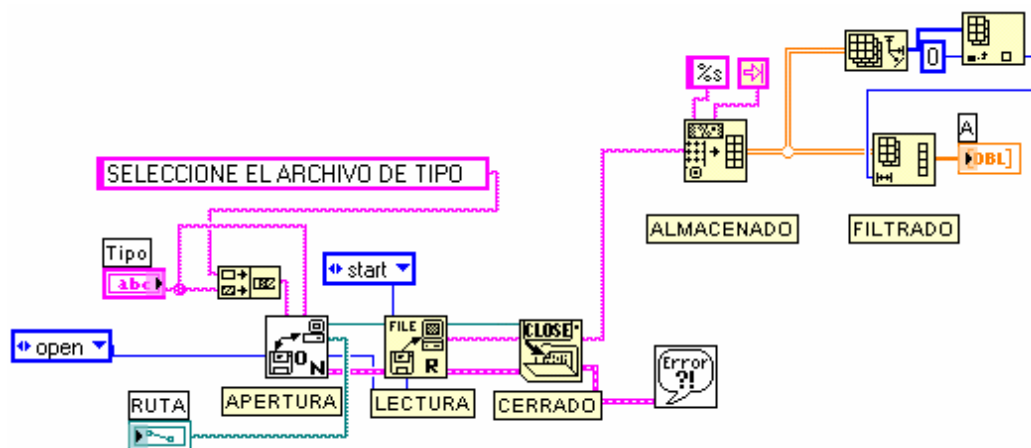


Ilustración 50 Diagrama de bloques del SubVi “LOADFILE.vi”.

En forma general esta rutina se puede dividir en cinco etapas:

- Apertura



Ejecutada por el bloque “Open/Create/Replace File.vi”, se encarga de abrir el archivo indicado en la ruta.

- Lectura



Mediante el bloque “ReadFile.vi”, se conecta con la etapa de apertura.

- Cerrado



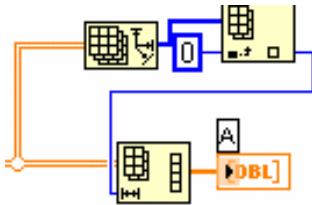
Con este bloque “CloseFile.vi”, se cierra el archivo una vez que ha sido leído para protegerlo de posibles alteraciones involuntarias ocasionadas por el usuario.

- Almacenado



Mediante el bloque “Spreadsheet String to Array” el archivo leído en forma secuencialmente, es almacenado en una matriz.

- Tamizado de la matriz.



Esta etapa adicional fue necesaria porque se observó que se generada una matriz de dos dimensiones en la que los datos acelerométricos se disponían solo en la primer columna de la matriz y fue necesario eliminar una columna adicional que está compuesta por datos vacíos.

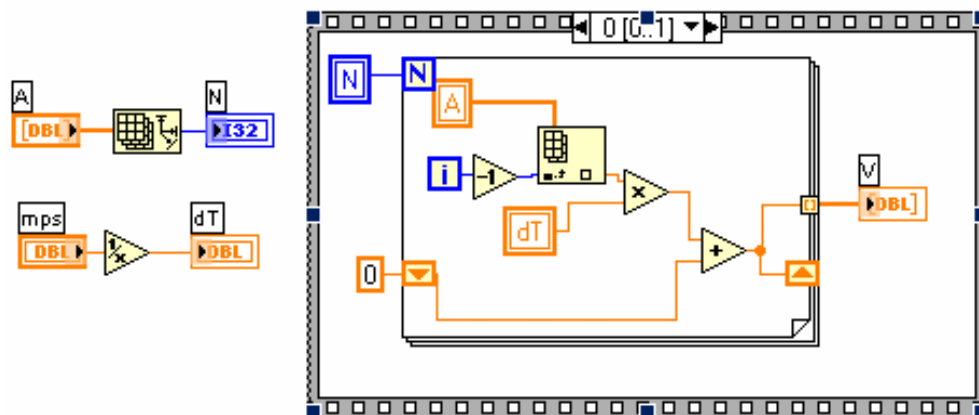
12.1.2. INTEGRACIÓN DE REGISTROS ACELEROMÉTRICOS

Debido a que el control del simulador corresponde a un control de posición, fue necesario realizar una doble integración a los registros de aceleración en el tiempo.

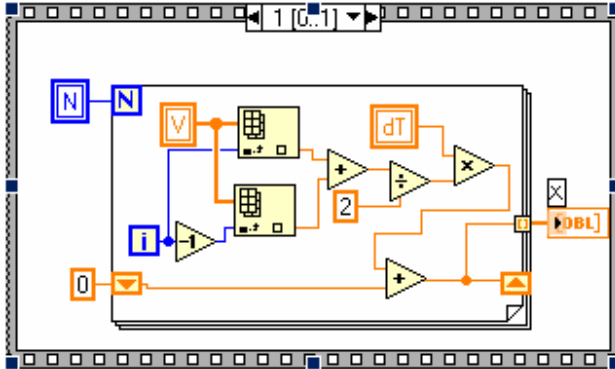


Como resultado se elaboró una subrutina denominada “AVX.vi” compuesta por dos variables de entrada: “A” que corresponden a la matriz de aceleración y “mps” que corresponde a la velocidad en muestras por segundo a la cual fueron tomadas las muestras acelerométricas. La variable de salida “V” es la matriz de velocidad y “X” es la matriz de posición.

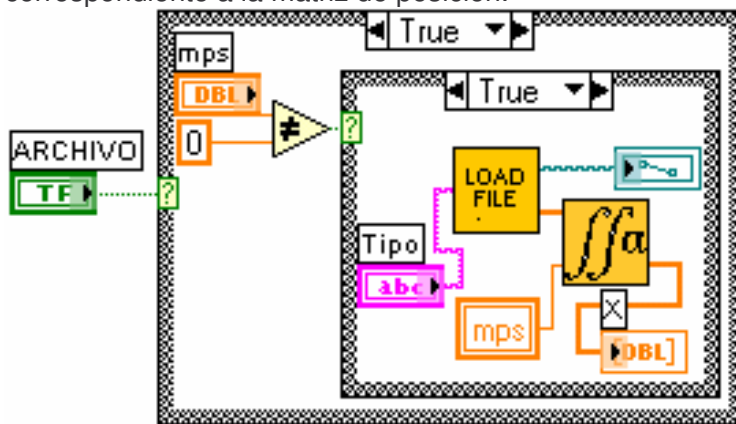
La integración se efectúa en dos etapas: una primer etapa realiza la primer integración dando lugar a una matriz de velocidad y la segunda etapa realiza la integración de la velocidad para generar la matriz de posición.



En la primer etapa se lee el tamaño de la matriz de aceleración y lo asigna a la variable “N”, luego lee la variable “mps” y mediante el inverso multiplicativo estima el intervalo de muestreo “dT”. Posteriormente mediante un ciclo repetitivo “FOR” se procede a realizar la primer integración.

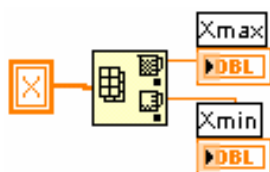


En la segunda etapa se realiza la segunda integración para generar la matriz "X" correspondiente a la matriz de posición.



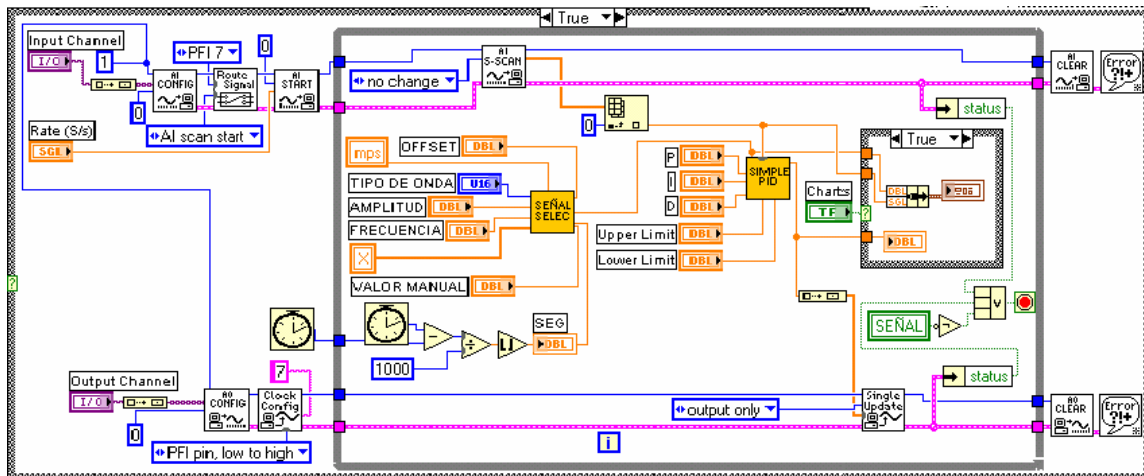
Los dos bloques: cargado de archivo e integración, se incrustan dentro de una sentencia condicional de modo que la ejecución de este programa es controlada mediante el accionamiento de un botón de orden "ARCHIVO", sin embargo debe realizarse una verificación que el parámetro "mps" no esté en vacío a la hora de evaluar la integración lo cual se logra con una estructura condicional anidada dentro de la primera.

12.1.3. VALORES MÁXIMO DE DESPLAZAMIENTO.

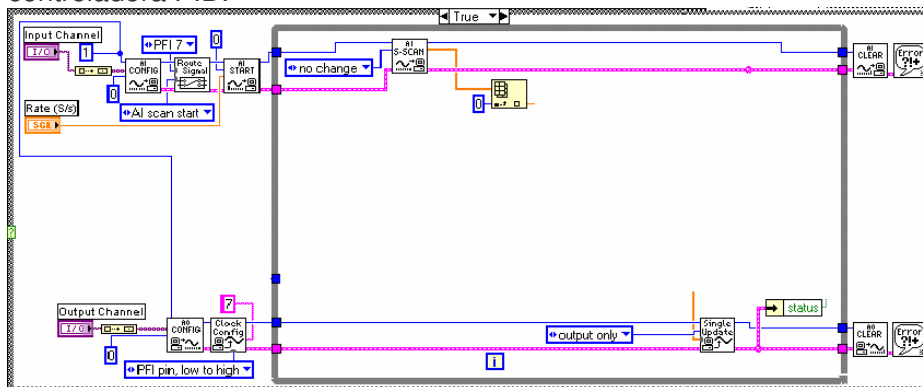


Una vez obtenida la matriz de desplazamiento en el tiempo, mediante este bloque es posible estimar los valores de desplazamiento máximos y mínimos los cuales son importantes a la hora de realizar los ensayos de simulación de modo que es posible determinar la amplitud máxima de las oscilaciones.

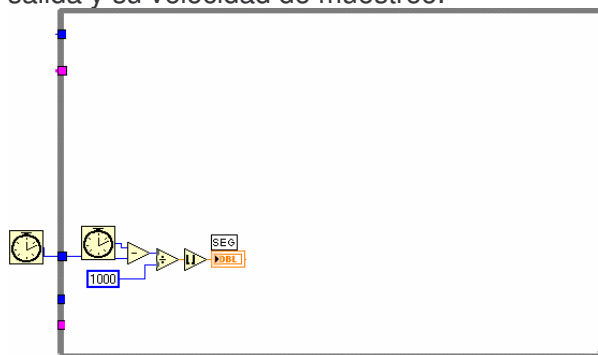
12.1.4. COMPONENTE DE CONTROL



El software de control está integrado por tres componentes principales: etapa de asignación de canales de entrada y salida, etapa de generación de señales y etapa controladora PID.

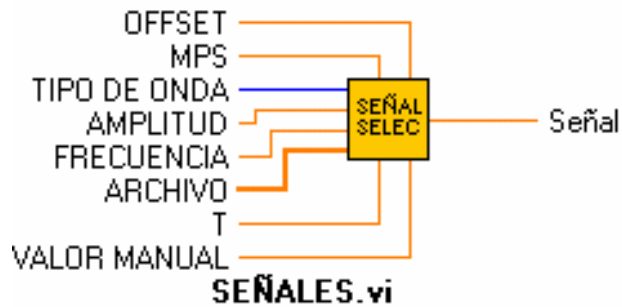


En la etapa de asignación de canales de entrada y salida se selecciona una señal de reloj en este caso "PFI" la cual se encarga de sincronizar las señales tanto de entrada como de salida y su velocidad de muestreo.



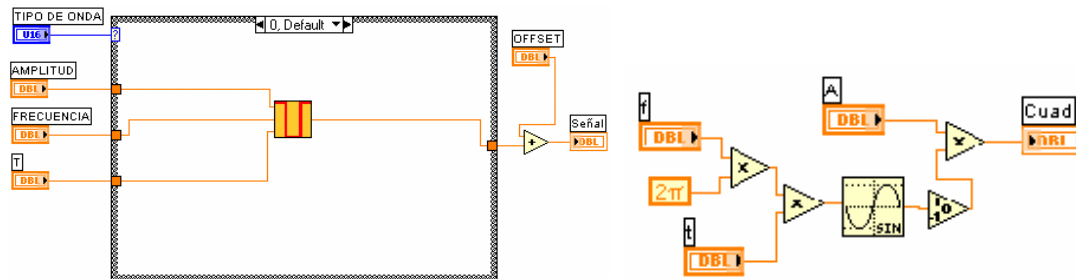
El reloj para el conteo del tiempo en segundos transcurridos es otro elemento importante ya que permite sincronizar las señales.

12.1.5. GENERADOR DE SEÑALES

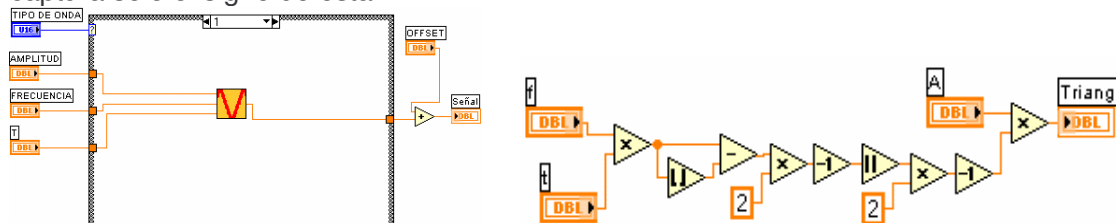


Este bloque es de gran importancia debido a que se deseaba que el programa tuviese la capacidad de realizar control en tres modos distintos: En una primera forma el sistema de control debería responder a una señal introducida en forma manual controlada mediante el parámetro “VALOR MANUAL”. En la segunda forma debe ser posible generar una señal periódica controlada mediante los parámetros: “AMPLITUD”, “FRECUENCIA” y “TIPO DE ONDA” que puede ser de diferentes tipos de onda (cuadrada, triangular y senoidal). En la última forma el programa debe leer el archivo que ha sido cargado e integrado y proceder a reproducirlo cuando el parámetro “TIPO DE ONDA” = “ARCHIVO”.

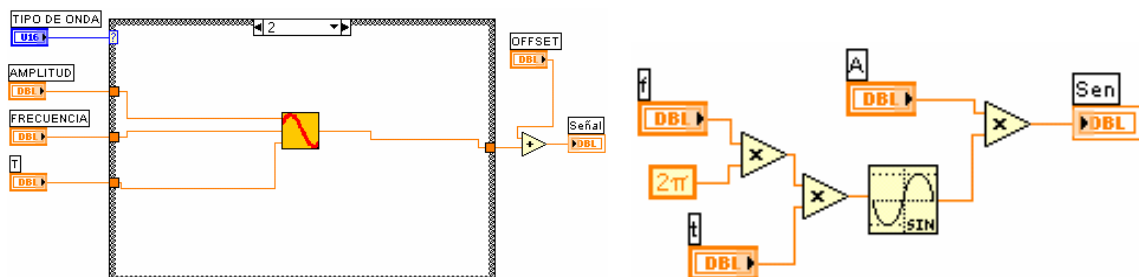
El parámetro de entrada “T”, es de gran importancia ya que permitió resolver el inconveniente de la sincronización de las señales en el tiempo para los diversos tipos de onda.



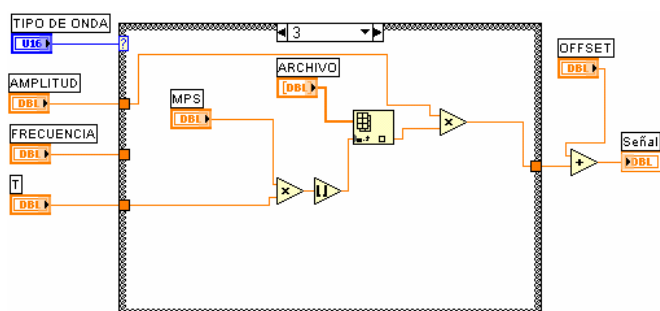
La primera opción es una señal cuadrada con amplitud, frecuencia y tiempo como parámetros de entrada. La forma de generar la señal es utilizar una onda senoidal y se captura solo el signo de esta.



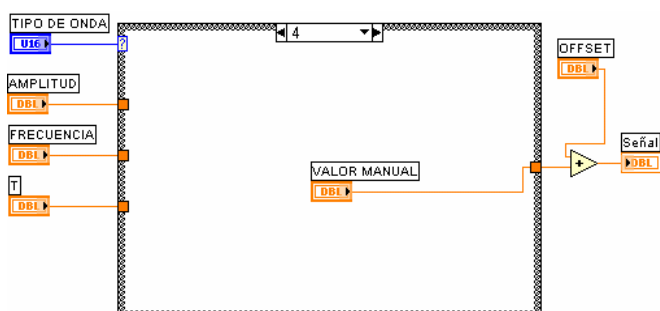
En la segunda opción se genera una señal triangular la cual se implementa mediante la combinación de los operadores parte entera y valor absoluto.



La opción senoidal se implementa fácilmente mediante el bloque de onda senoidal.

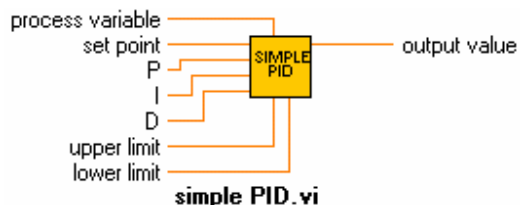


La opción de archivo recurre a la lectura de los datos de la matriz uno a uno pero tiene en cuenta que el término a leer debe estar sincronizado con la señal de tiempo de modo que la ejecución concuerde con el avance en el tiempo.



La opción manual es la mas sencilla de todas y solo exige la lectura del parámetro "VALOR MANUAL".

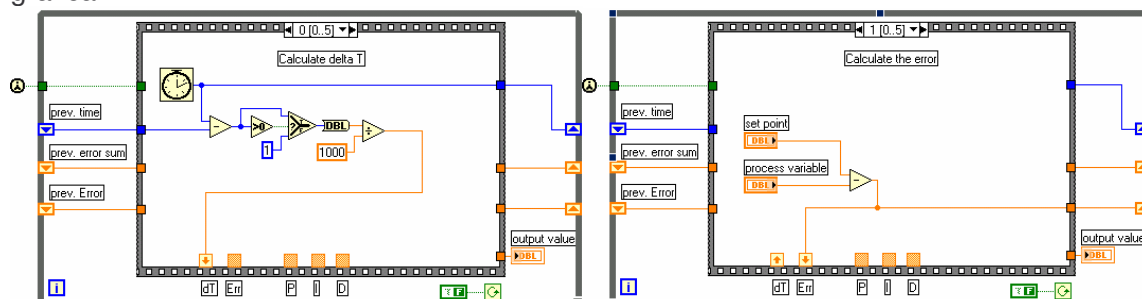
12.1.6. COMPENSADOR PID



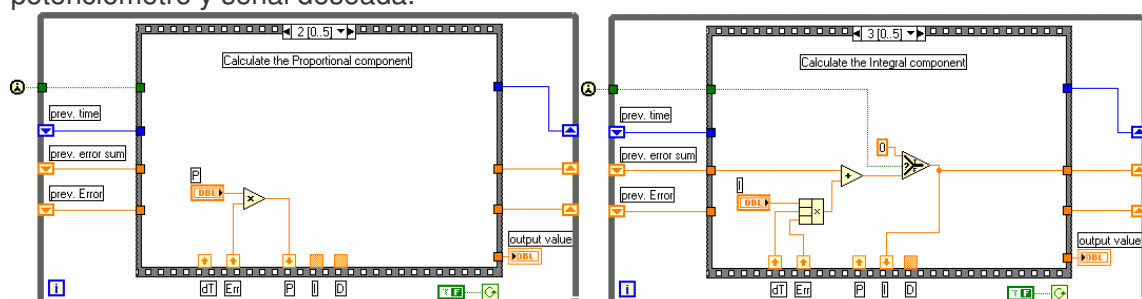
El bloque PID ha sido tomado de los ejemplos disponibles de LabView para control en tiempo real. Contiene un total de siete parámetros de entrada y un parámetro de salida. La "Variable Proceso" corresponde a la señal de potenciómetro. "Set point" es el valor de consigna deseado, "P" es la ganancia proporcional, "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 salida de control que para nuestro caso corresponde a la señal de entrada a la válvula proporcional.

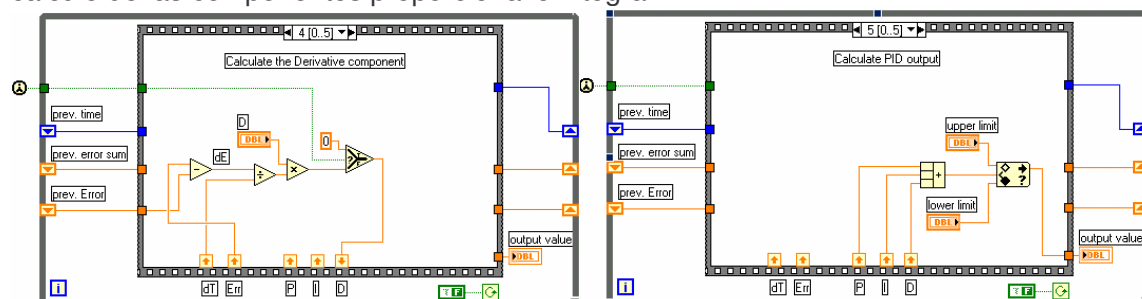
La salida PID se ha dividido en un total de seis etapas las cuales se muestran en forma gráfica:



Cálculo del lapso entre muestras y estimación de la diferencia entre la señal de potenciómetro y señal deseada.

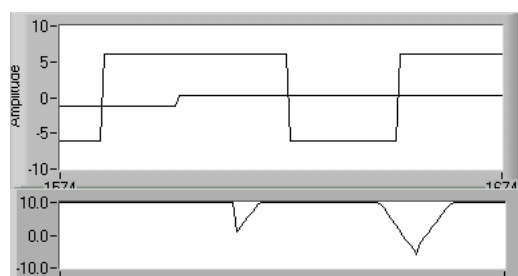


cálculo de las componentes proporcional e integral.



Evaluación de las componentes derivativa y salida del PID.

12.1.7. OSCILOSCOPIO



Hace parte de la interfaz de usuario y su función principal es mostrar la evolución en el tiempo de las señales censadas. Permite la visualización simultanea de las señales en el tiempo.

12.2. SOFTWARE PARA EL CONTROL DE POSICIÓN EN DOS DIRECCIONES.

Aunque los objetivos de este proyecto no contemplaban el control de posición en dos direcciones, esta etapa se ha planteado como una alternativa adicional que ha permitido ganar experiencia y permitir la posibilidad de construir en el futuro un SS con dos grados de libertad. Debe agregarse que esta etapa del proyecto fue posible por dos razones de importancia: por un lado se disponía de la tarjeta NI6014 con capacidad para generar dos señales analógicas de salida y de otra parte se disponía del mecanismo de dos ejes de accionamiento neumático FESTO con dos grados de libertad y desplazamientos de hasta 20 centímetros en cada eje.

El intento por controlar dos ejes en forma simultánea e independiente permitió concluir que era importante sincronizar las señales de entrada y salida junto con la señal de control. Adicionalmente fue necesario elaborar un algoritmo PID para cada eje de modo que las constantes del PID pudieran sintonizarse de manera independiente debido a que las características dinámicas de cada eje generaban comportamientos diferentes por dos razones: por un lado la sensibilidad a la fricción y de otra parte la sensibilidad del sistema de control a las masas en movimiento. Este último aspecto se puso en evidencia debido a que la cantidad de masa a mover en cada dirección era diferente por la configuración física del mecanismo de ejes neumático FESTO.

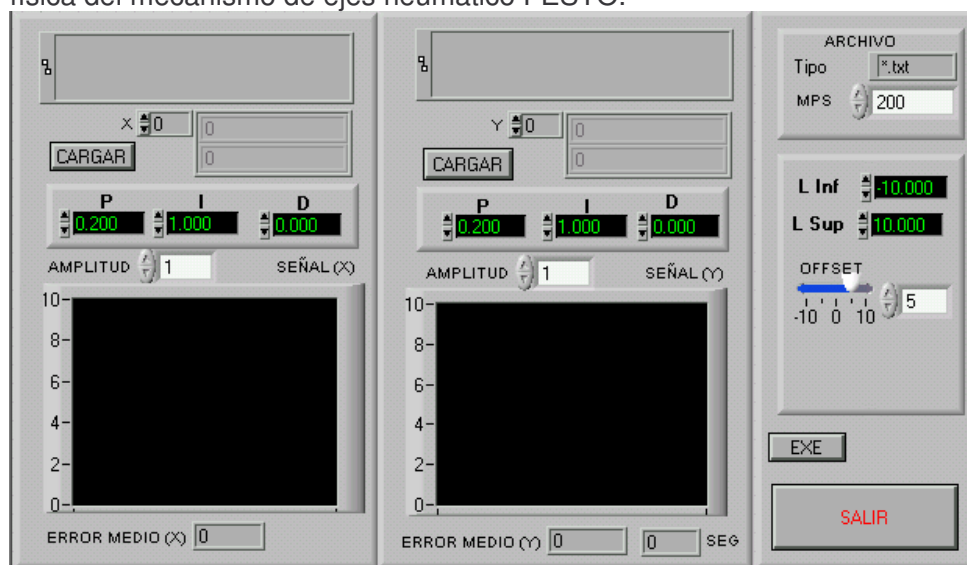


Ilustración 51 Panel frontal para el control de posición con dos grados de libertad.

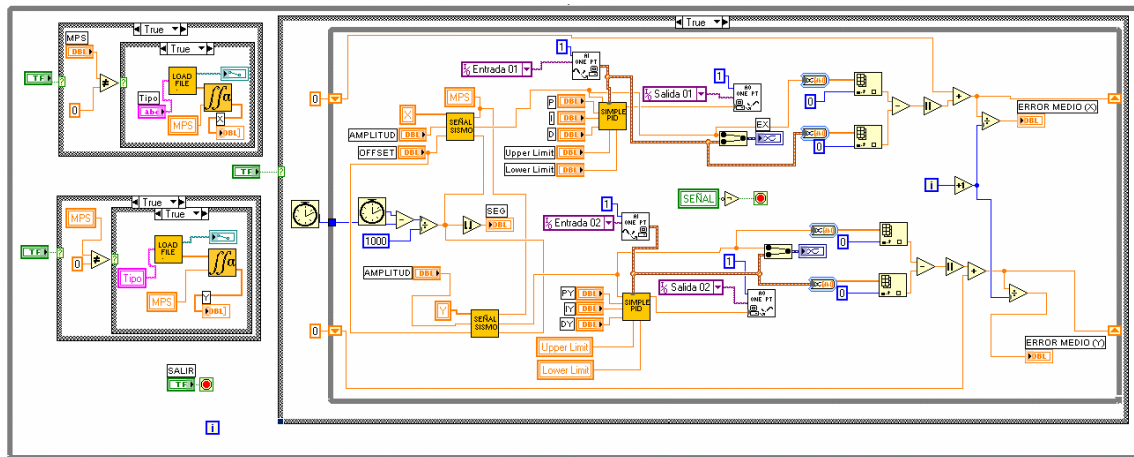


Ilustración 52 Diagrama de bloques para el control de posición con dos grados de libertad.

De acuerdo con la Ilustración 52, 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. Se agregó adicionalmente un algoritmo para evaluar el error absoluto promedio para estimar la calidad del sistema de control en cada una de las direcciones.

13. ENSAYOS DE LABORATORIO

En este capítulo se pretende describir: los instrumentos, la metodología y el criterio de medida utilizado en cada uno de los ensayos efectuados en los laboratorios de automatización y control del SENA Girón. Las mediciones efectuados no se ejecutaron con el rigor científico que debe caracterizar a un experimento debido a la ausencia de instrumentos de precisión y de diversos criterios comparativos, sin embargo se ha adicionado una sección de recomendaciones que permita resolver estos inconvenientes en proyectos futuros.

Se utilizó como elementos de laboratorio: Una PC con procesador AMD Athlon de 1200 Mhz y memoria RAM de 120MB, sistema operativo WINDOWS MILENIUM y el software LABVIEW 7 EXPRESS. Los registros sísmicos correspondientes al sismo de Armenia Colombia proporcionados por INGEOMINAS. 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. Mecanismos de accionamiento hidráulico y neumático FESTO. Para mayor claridad, ver capítulo 0ELEMENTOS DE LABORATORIO.

Los ensayos de laboratorio se realizaron para cumplir con dos objetivos: por un lado determinar las características de las señales sísmicas (PGA, PGV y PGD) y de otra parte estimar el comportamiento del control PID en la reproducción de señales sísmicas mediante accionamiento neumático e hidráulico.

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:

$$error.medio = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |SR_i - SG_i|, \text{ donde:}$$

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 de las señales.

Se observó los 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 realizaron siguiendo el criterio de Siegler Nichols y se utilizó como elemento de ayuda visual la gráfica de pantalla que mostraba en forma simultánea las señales SG y SR. Estas actividades se realizaron en base al software elaborado para el control de posición en una y dos direcciones en tiempo real, elaborado en LabView 7 Express.

13.1. INTEGRACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

Todos los ensayos de laboratorio se realizaron mediante los archivos correspondientes al sismo de Armenia Colombia del 25 de enero de 1999, proporcionados por INGEOMINAS.

Para los ensayos en dos direcciones se utilizaron las dos componentes horizontales (Este-Oeste y Norte-Sur). Cada registro se encuentra disponible como un archivo independiente en formato de texto (.txt) como se muestra enseguida:

```
INGEOMINAS
RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
Sismo del Quindio  FECHA: 25-01-99
Epicentro: LATITUD= 4.410s Norte  LONGITUD: -75.720s Oeste  PROFUNDIDAD:
MAGNITUD: 6.2
Estación de Armenia (CARME)
Estación: LATITUD= 4.500s Norte  LONGITUD: -75.800s Oeste  GEOLOGIA: Su
DISTANCIA HIPOCENTRAL: 13 Kms

Componente 3 Orientación N - S
Son 14337 muestras igualmente espaciadas por .005 segundos
Aceleración (cm/seg2)
0.28369
-0.16186
-0.30125
-0.22420
-0.16288
-0.21990
-0.25597
-0.20265
-0.18087
0.00000
```

Ilustración 53 Archivo correspondiente al sismo de Armenia de 1999, componente N-S.

```
INGEOMINAS
RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS
Sismo del Quindio  FECHA: 25-01-99
Epicentro: LATITUD= 4.410s Norte  LONGITUD: -75.720s Oeste  PROFUNDIDAD:
MAGNITUD: 6.2
Estación de Armenia (CARME)
Estación: LATITUD= 4.500s Norte  LONGITUD: -75.800s Oeste  GEOLOGIA: Su
DISTANCIA HIPOCENTRAL: 13 Kms

Componente 1 Orientación E - W
Son 14337 muestras igualmente espaciadas por .005 segundos
Aceleración (cm/seg2)
-0.32711
-0.32260
-0.32286
-0.32562
-0.32571
-0.32225
-0.32095
-0.32397
-0.32560
-0.00000
```

Ilustración 54 Archivo correspondiente al sismo de Armenia de 1999, componente E-W.

Debe destacarse la siguiente información:

- | | |
|---|------------------|
| • Cantidad de muestras por registro | N= 14337. |
| • Lapso entre muestras = 0.005 segundos. | dT=0.005 Seg. |
| • Velocidad de muestreo = 200 muestras por segundo. | mps=1/dT=200mps. |
| • Duración del sismo = 71.7 segundos. | T=71.7seg |

- Unidad de medida = cm/sg^2 (gales).
- Tipo de registro = aceleración en el dominio del tiempo.
- Fecha del sismo = 25 de enero de 1999.

Cada registro sísmico se sometió a un proceso de doble integración mediante una rutina elaborada en LabView. Debe agregarse que antes de realizar el proceso de integración, a cada archivo se le eliminó la información de encabezado para facilitar su proceso de lectura y almacenado en una matriz.

Los resultados de integración en el tiempo para cada componente (E-W y N-S), se muestran en la siguiente ilustración:

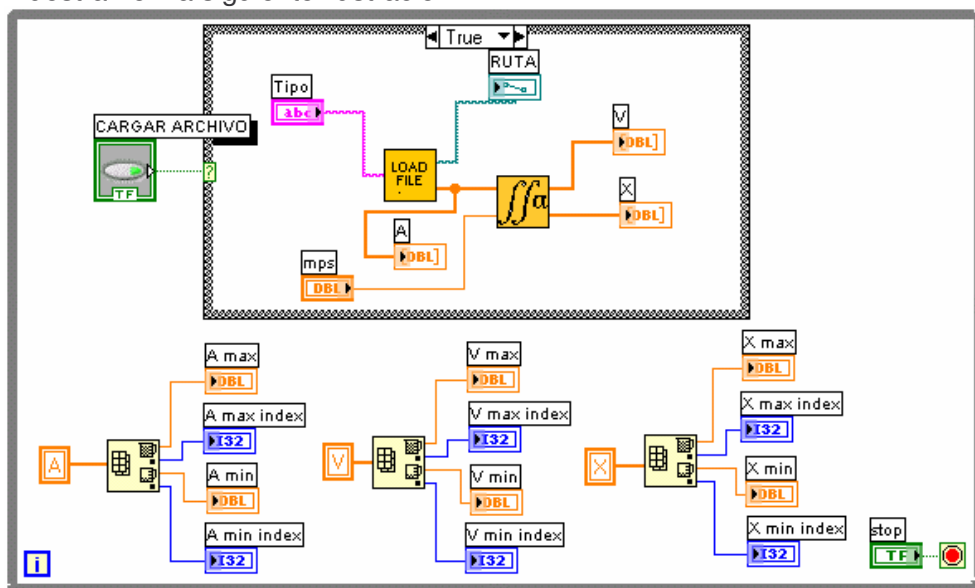


Ilustración 55 Diagrama de bloques de la Rutina en LabView utilizada para integrar los registros sísmicos.

Adicionalmente se extrajo la información correspondiente a los valores máximos de aceleración, velocidad y posición de las señales sísmicas que corresponden a los parámetros PGA, PGV y PGD. Esta información se obtuvo porque permite estimar las características más representativas de las señales sísmicas útiles en la etapa de diseño de un SS. Los resultados se muestran en las dos ilustraciones siguientes:

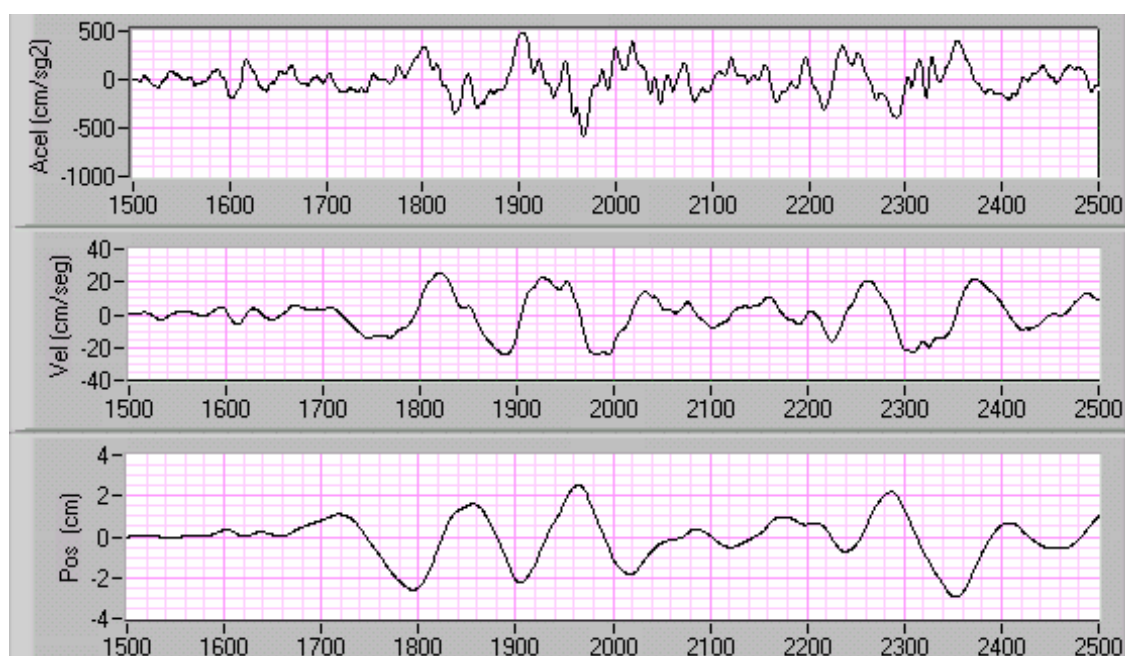


Ilustración 56 Resultado de la integración del registro sísmico del sismo de Armenia Colombia, componente N-S. PGD = 2.95 cm, PGV = 25.6 cm/seg, PGA = 580.102 cm/sg².

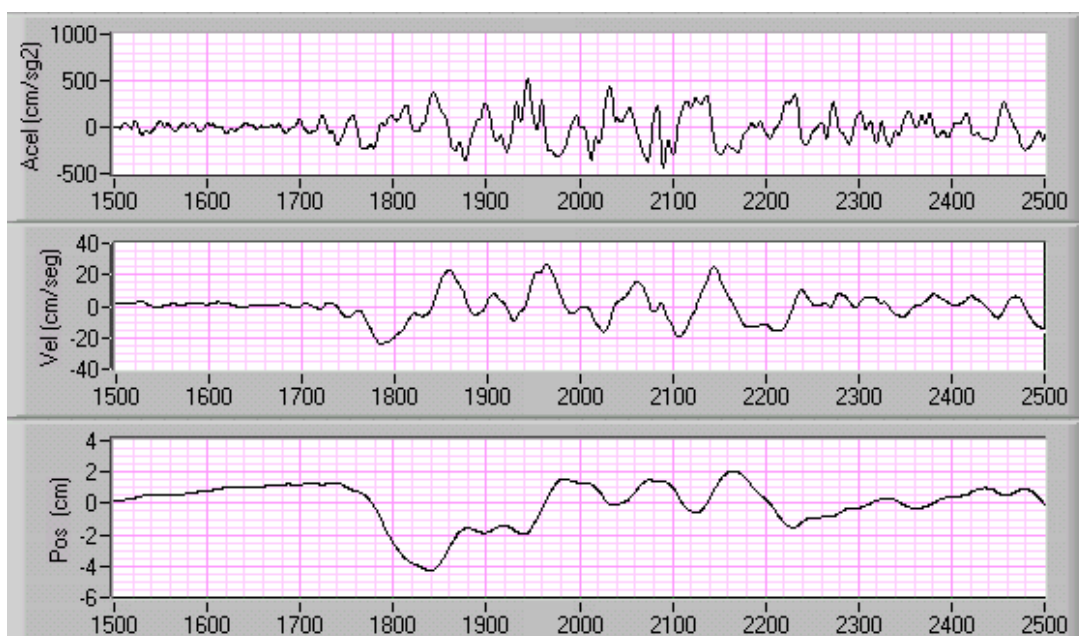


Ilustración 57 Resultado de la integración del registro sísmico del sismo de Armenia Colombia, componente E-W. PGD = 4.29 cm, PGV = 27.01 cm/seg, PGA = 518.37 cm/sg².

13.2. REPRODUCCIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS.

La totalidad de estos ensayos se realizaron con el objetivo de estimar la calidad del sistema de control estableciéndose como parámetros de medida: la señal generada (SG), la señal de respuesta (SR) y el error absoluto promedio. Adicionalmente se decidió establecer que un SS de excelente calidad debería arrojar un error absoluto promedio nulo de modo que el decaimiento en la calidad del SS se traduce como un aumento en el valor del error promedio. Se utilizó como elemento de apoyo la visualización simultánea de las señales SG y SR mediante la pantalla del PC.

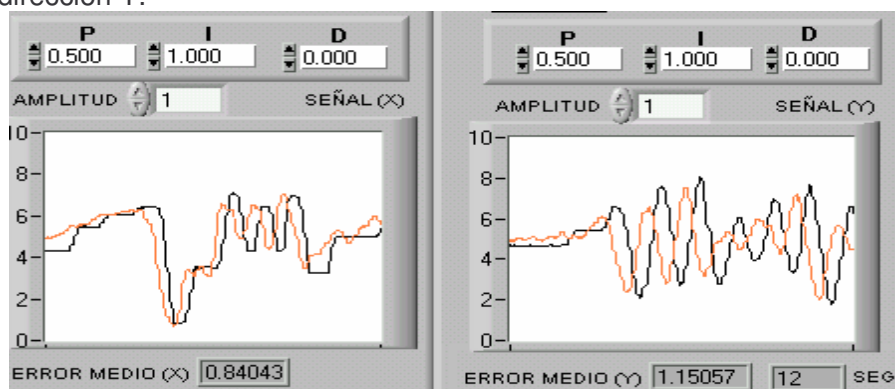
Al inicio de cada ensayo se establecieron la ganancias $K_p=0$, $K_i=0$ y $K_d=0$. Luego a medida que se ejecutaba el ensayo, mediante la técnica de Siegler Nichols se aumentaba paulatinamente la ganancia proporcional K_p , hasta hacer que el sistema oscilara. Paso

seguido se incrementaba la ganancia integral hasta observar un mejor comportamiento de seguimiento en la gráfica que muestra las señales SG y SR. El siguiente paso consistía en aumentar la ganancia derivativa.

13.2.1. OBSERVACIONES

Estas observaciones se realizaron al reproducir las señales sísmicas mediante el mecanismo de ejes neumáticos:

1. Una valor de K_p relativamente bajo ($K_p > 2$), ocasionaba oscilaciones exageradas en la señal de respuesta del sistema SR, por lo que se decidió mantener el valor ($K_p=1$).
2. Con el valor ($K_p=1$), se incrementó la ganancia integral hasta el valor ($K_i=5$).
3. Paso seguido se incrementó la ganancia derivativa y se observó que causaba oscilaciones apreciables sobre la válvula proporcional incluso para valores bajos ($K_d=0.01$). Se decidió mantener entonces el valor ($K_d=0.001$).
4. Establecidas las ganancias ($K_p=1$, $K_i=5$ y $K_d=0.001$), se realizó el ensayo nuevamente y se observó que el sistema funcionaba relativamente bien pero presentaba algunos inconvenientes.
5. Cuando la señal generada SG, presentaba oscilaciones con amplitudes relativamente pequeñas, la señal de respuesta SG se mantenía 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.
6. Cuando decidió aumentarse la cantidad de masa a mover, agregando pesos adicionales. El sistema que antes se mantenía estable empezó a presentar una respuesta inestable (SR con oscilaciones no controladas). Decidió disminuirse las ganancias (K_p , K_i y K_d) y se observó que el sistema se mantenía estable para las nuevas ganancias incluso al disminuir la masa al valor inicial ($K_p=0.5$, $K_i=1$ y $K_d=0$).
7. Los ensayos para el control de dos ejes permitieron observar nuevamente la influencia de la masa en movimiento sobre la estabilidad del sistema. Fue entonces necesario elaborar un bloque de ganancias para cada eje de modo que las ganancias se pudieran controlar en forma independiente.
8. Los ensayos posteriores permitieron ajustar las ganancias ($K_p=0.5$, $K_i=1$ y $K_d=0$). Esto permitió concluir que el control (P I) era el mas recomendable para el control del (SS) para las condiciones dadas como se muestra en la siguiente ilustración, donde se obtuvo un error absoluto promedio de 0.84cm en la dirección X y 1.15cm en la dirección Y.



14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de este trabajo de investigación se ha podido concluir a grandes rasgos que construir un SS exige el uso de diversas áreas del conocimiento entre las que podemos enumerar: ingeniería sísmica para el estudio del comportamiento de las señales sísmicas, ingeniería estructural y leyes de similitud para el diseño de modelos estructurales a escala, tratamiento de señales en tiempo discreto, ingeniería de control en bucle cerrado para garantizar la rapidez y precisión del movimiento a reproducir mediante el SS, la hidráulica y neumática para la correcta selección de los motores lineales y la sensórica para la selección apropiada de los sensores del SS, además de otras tecnologías que se involucran.

Se muestra enseguida una lista de conclusiones y recomendaciones al respecto:

1. Se ha encontrado que el accionamiento hidráulico es uno de los mas apropiados a la hora de diseñar un SS debido a que esta tecnología garantiza la generación de movimientos con la precisión del orden de la micras y con fuerzas considerables las cuales juegan un papel importante para garantizar que el simulador sea capaz de reproducir los movimientos sísmicos.
2. La principal desventaja de los mecanismos hidráulicos, es que operan a velocidades relativamente bajas, de modo que los caudales de operación deben ser tenidos en cuenta a la hora de seleccionar los elementos de potencia (Motor eléctrico y bombas hidráulicas). Además hay que tener especial cuidado con no exceder las presiones de operación admisibles a las que han sido diseñados los elementos hidráulicos.
3. El cálculo de la potencia de los mecanismos hidráulicos requiere tener en cuenta los parámetros mas representativos de las señales sísmicas como son: PGA, PGV y PGD.
4. No se recomienda el accionamiento neumático debido a que no garantiza el control del movimiento con precisión debido a los altos índices de compresibilidad del aire.
5. Se encontró que los SS operan bajo ciertos rangos de frecuencia. Al respecto se encontró que la fricción hace imposible la reproducción de señales de baja amplitud y frecuencia y que las frecuencias mas altas están limitadas por el efecto compresivo de las columnas de aceite en los cilindros hidráulicos justo cuando se presenta el efecto de resonancia.
6. Debido a que los SS pueden operar solo bajo ciertos rangos de frecuencia, es necesario por consiguiente someter a un proceso de filtrado en frecuencia a las señales sísmicas antes de enviarlas al sistema de control del SS, para ello se recomienda el uso de la FFT.
7. Aunque se encontró que el algoritmo de control PID respondía relativamente bien como elemento de control para el para el SS mediante accionamiento neumático, se recomienda utilizar otras técnicas de control predictivo para futuros proyectos.

ELEMENTOS DE LABORATORIO

Para el desarrollo de este trabajo se han utilizado diversos tipo de elementos los cuales podemos dividir en tres partes principales: Equipo Neumático, equipo hidráulico y equipo electrónico.

Las especificaciones técnicas de los elementos FESTO se encuentran en los manuales FESTO de NEUMÁTICA EN BUCLE CERRADO e HIDRÁULICA EN BUCLE CERRADO.

Las especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI6014, se encuentran disponibles en el manual NI-PCI 6013/14, disponible en la WEB.

La totalidad de los ensayos de laboratorio, fueron realizados en los laboratorios del SENA Girón regional Santander.



Ilustración 58 Dispositivo de ejes neumáticos FESTO utilizado para realizar los ensayos de control por posición. La masa central es accionada mediante un cilindro neumático el cual es controlado mediante un sistema de control en lazo cerrado y un regulador PID.

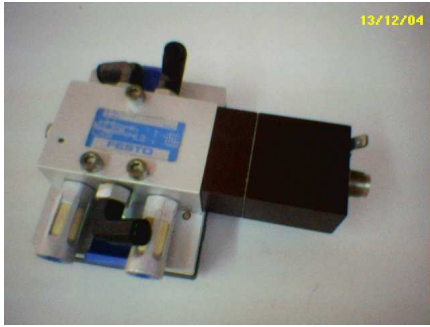


Ilustración 59 Servoválvula MPYE de 5 vías 1/8 FESTO de accionamiento electro neumático



Ilustración 60 Manifold FESTO.



Ilustración 61 Unidad de compresión de aire FESTO.



Ilustración 62 Banco de trabajo de hidráulica básica.

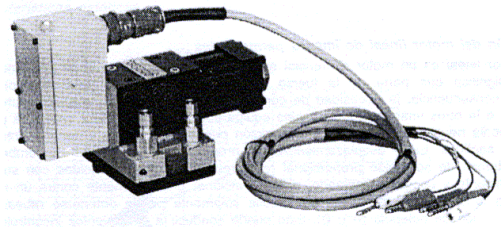


Ilustración 63 Válvula proporcional



Ilustración 64 Unidad de potencia hidráulica.

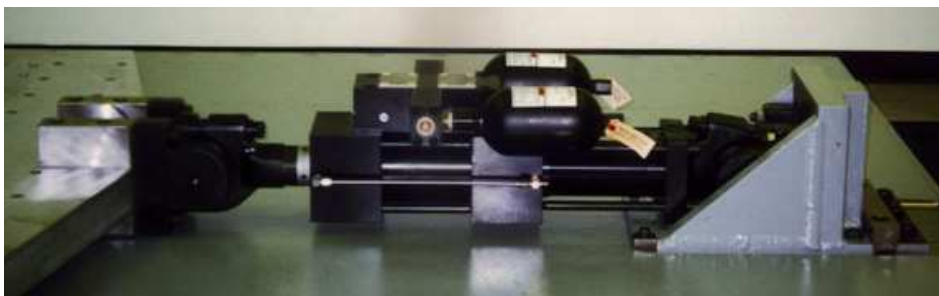


Ilustración 65 Unidad lineal de accionamiento hidráulico.

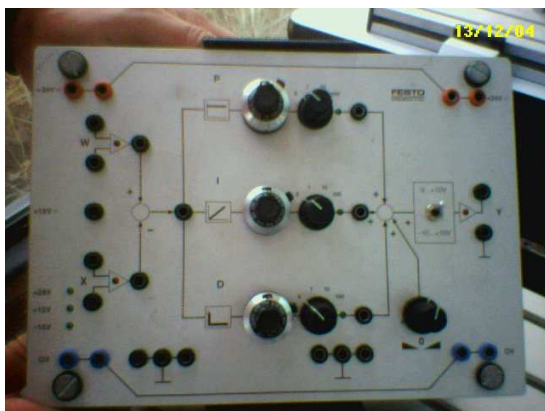


Ilustración 66 Tarjeta PID FESTO



Ilustración 67 Generados de ondas de amplitud y frecuencia controlada con diferentes tipos de señales periódicas: cuadrada, senoidal y triangular.



Ilustración 68 Unidad potenciométrica FESTO como Sensor de posición



Ilustración 69 Computadora personal Pentium



Ilustración 70 Tarjeta de adquisición de datos NI6014.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adrian Rodriguez-Marek. Unidirectional Shake Table. WSU.
<http://www.curee.org/organization/members/schools/WSU.html>.
- [2] Alejandro Nava. "Los Terremotos".
<http://lectura.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumne1/ciencia2/34/html/terrem.htm>.
- [3] Alfaro Aras y A. Alfaro. Caracterización en los dominios de la frecuencia de sismos Colombianos registrados en la estación Boco. C. Instituto Geofísico Universidad Javeriana. <http://ansuca.javeriana.edu.co/geofisico/documentos/carcate-boco.pdf>
- [4] Angel Perles Ivars, José Vicente Busquets Mataix. Como conectar dispositivos digitales a nuestro ordenador. PC World Mayo 1999.
- [5] Angel Perles Ivars, José Vicente Busquets Mataix. Instalación y funcionamiento de una tarjeta. PC World Abril 1999.
- [6] Angel Perles Ivars, Antonio Martí Campoy, Francisco Rodríguez. Como Controlar un equipo doméstico.. PC World Junio 1999.
- [7] Antonio martí, Angel Perles Ivars, José Vicente Busquets Mataix. Control de dispositivos electrónicos externos. PC World Marzo 1999.
- [8] Aplicaciones electrónicas. Conexión y programación con el puerto paralelo.
- [9] ASCE 2002 PSWRC. Seismic Design <http://www.eng.uci.edu/asceconference/>.
- [10] Asociación Española de ingeniería sísmica. Otros grupos y asociaciones de ingeniería sísmica. <http://www.aeis.es/default.htm>.
- [11] Berkeley Digital Seismic Network. Make your own seismogram
http://quake.geo.berkeley.edu/bdsn/make_seismogram.html.
- [12] Berkeley Digital Seismic Network. Quicklook Seismograms.
<http://quake.geo.berkeley.edu/bdsn/quicklook.html>.
- [13] Carlos Eduardo Córdoba. Metodología de la Investigación. Universidad Industrial de Santander 1985.
- [14] CEDEX. Comparación de análisis sísmico mes con prueba real.
http://www.caesoft.es/productos/algor/notcas/algor_noticias.htm
- [15] CEDEX. Simulador sísmico con seis grados de libertad.
<http://www.cedex.es/presentacion/datos/instalaciones/ins7.html>
- [16] COLCIENCIAS. Guía para la presentación de proyectos de investigación Científica y tecnológica.. : www.colciencias.gov.co
- [17] Cristan Alexis Salamanca Sánchez, Pedro Alejandro Santana Herrera Monitoreo y control PID de motores DC con microcontroladores PIC.. Universidad Industrial de Santander. 1998.
- [18] Charles e. Crede. Conceptos sobre choque y vibración en el diseño de ingeniería. Agencia para el desarrollo internacional (AID).
- [19] Chih-Lyang Hwang. "Neural-Network-Based Variable Structure Control of Electrohydraulic Serosystems Subject to Huge Uncertainties Wihtout Persistent Excitation".
- [20] Choosing Data Acquisition Boards and Software. www.datx.com.
- [21] Chuck Sphar. Aprenda Microsoft Visual C++ 6.0 Ya. Editorial Mc GrawHill.

- [22] Devin P. Newell, Honggliang Dai, Michael K. Sain, Peter Quast y B.F. Spencer Jr. Nonlinear Modeling and control of a hydraulic seismic simulator. <http://www.nd.edu/~stpaul/research/papers/devin.pdf>
- [23] DV Rogers. Earthquakes. <http://allshookup.org/quakes/earth.htm>
- [24] Ebrahim Abbaspour-Sani, Ruey-Shing Huang y Chee Yee Kwok. A Novel Optical Accelerometer. IEEE.
- [25] Ecole Polytechnique de Montreal, Civil Engineering – Structures. High performance seismic simulator. <http://www.stru.polymtl.ca/english/laboratory.htm>
- [26] Edison Duque C. Curso Avanzado de Microcontroladores PIC. CEKIT.
- [27] Edison Duque C. Curso avanzado de Microcontroladores PIC. CEKIT.
- [28] Eduard Pigdemunt i Gelabert. Puerto Paralelo. <http://www.pchardware.org/puertos/paralelo.php>.
- [29] El puerto paralelo. www.angelfire.com/pa2/jcgr/tecnica/PP/pp.htm.
- [30] Enric Figueras Solé. Diseño de aplicaciones SCADA con LabView.
- [31] Enric Figueras Solé. Diseño de aplicaciones SCADA con LabView.
- [32] Ernest E. Lewis, Hansjoerg Stern. Design of Hydraulic Control Systems.
- [33] FACILITIES. Earthquake Simulator. www.nd.edu/~quake/facilities/simulator.htm.
- [34] Felipe González G. La Robótica Componentes de los Robots.. CEKIT.
- [35] Felipe González G. La Robótica. CEKIT.
- [36] FESTO. Ejes Neumáticos NC. Manual de Estudio. 90179.
- [37] FESTO. Introducción a la electro neumática. Manual de estudio 90877.
- [38] FESTO. Neumática en bucle cerrado. Manual didáctico.TP-111.
- [39] FESTO. Hidráulica en bucle cerrado. Libro de Trabajo. 094368.
- [40] Francis H. Raven. “Ingeniería del control automático”. Universidad de Buenos Aires. 1973.
- [41] Franz Piwinger. La pratique de la régulation automatique. Presses Academiques Europeennes. Bruxelles.
- [42] Fu Yi, Shirley J. Dyke, Juan M Caicedo y David Carlson. Experimental Verification of Multi-Input Seismic Control Strategies for Smart Dampers. <http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/pdfs/jmultmr99.pdf>.
- [43] G. Ferrate, J. Amat, L. Basañez, F. Ferrer, R. Huber, C. Torres. “Robótica Industrial”. Editorial Marcombo. 1986.
- [44] GEOL695. Interpretación of seismograms <http://www.seismo.unr.edu/htdocs/geol695/>
- [45] Gianluca Gentili. Todo acerca de los puerto paralelo Monografía.com. www.monografias.com/trabajos/paralelos/paralelos.shtml#arriba.
- [46] Guillermo García Arenas. El microcomputador como elemento de control..1988. Universidad Industrial de Santander.
- [47] Guillermo García Arenas. Sistemas de Control y Automática. Universidad Industrial de Santander.
- [48] Guillermo Ramos R. Automatización Industrial. CEKIT.
- [49] Harold Alberto Muñoz. Sismo en el Eje Cafetero. Revista Noticreto # 51 de junio de 1999.
- [50] Harry G. Harris y Gajanan M. Sabnis. “Structural Modeling and Experimental Techniques”. Segunda edición Editorial CRC.
- [51] Henry Antonio Roncancio, Hector Cifuentes. Tutorial de Labview. Universidad Distrital.
- [52] Henry Roncancio y Hugo Velasco. Una Introducción a Labvie. Laboratorio de Instrumentación Virtual U.D.
- [53] IGEOMINAS Conceptos Básicos . http://www.ingecoin.gov.co/red/red_de_acelografos/conceptos.htm

- [54] INETER. Agencias que reportan informaciones sobre sismos.
<http://www.ineter.gob.ni/geofisica/sis/agencias.html>.
- [55] INGEOMINAS. Historia Red Nacional de Acelerógrafos Ingeominas
http://www.ingeomin.gov.co/red/red_de_acelografos/red_de_acelografos.htm
- [56] Instituto Geofísico Universidad Javeriana.
<http://ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/Links.htm>.
- [57] Ivan Alameda Carballo. Programación del puerto paralelo.
- [58] J. Amat, J. Ayza, L. Basañez, G. Ferrate, F. Ferrer, R. Huber, C. Torres.
ROBÓTICA INDUSTRIAL. Marcombo Boixareu Editores.
- [59] J. Faisandier. Los Mecanismos Hidráulicos. Editorial Continental.
- [60] Javier Alexander Ballén y Hugo Velasco. Sistema de adquisición de datos a través del puerto paralelo y plataforma Labview. Laboratorio de Instrumentación Virtual LIV. Facultad de Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia.
- [61] Javier Cevallos Sierra. Visual C++, Editorial Alfa Omega.
- [62] Jir Zahradnik, G-Axis Tselentis. Modeling strong-motion accelerograms by PEXT method, application to the Athens 1999 earthquake.
<http://ses30.karlov.mff.cun.cz/papers/strong/>
- [63] Joel G. Bennett. Richard C Dove, Wade E. Dunwoody, Elton Endebrook, Charles Farrar and Peggy Goldman. Simulated Seismic Test on 1/42 and 1/14 Category I, Auxiliary Building. Los Alamos National Laboratory.
<http://www.lanl.gov/projects/ncsd/pubs/00323147.pdf>
- [64] José Salcedo Luna. Introducción al fenómeno sísmico. Universidad Industrial de Santander.
- [65] Juan Carlos Galarza Roca. The parallel port.
- [66] La Constitución de la tierra y la sismicidad global.
<http://docentes.usaca.edu.co/jarojas/geo/sismicidad.htm>
- [67] Leonardo Zeevaert. Mediciones y Cálculos sísmicos durante los temblores registrados en la Ciudad de México en mayo de 1962. <http://www.fundacion-ica.org.mx/COMPENDIO/41/articulo41.html>.
- [68] Luis Eduardo García J. Jorge Mario Jaramillo P. Diseño e implementación de algoritmos de control digital para una planta de etanol. Instituto Politécnico Colombiano, Jaime Isaza Cadavid.
- [69] Luis Enrique García Reyes. Dinámica Estructural Aplicada al diseño sísmico. Universidad de Los Andes Facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil, Bogotá Colombia 1988.
- [70] Luis Joyanes Aguilar. Programación Orientada a Objetos. Editorial Mc Graw Hill.
- [71] M.Sc. Nubia Amparo Ortiz Guerrero. La elaboración de los proyectos de investigación. <http://www.monografias.com/index.shtml>.
- [72] Maldonado Rondon Esperanza, Chio Cho Gustavo. Dinámica Estructural. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil.
- [73] MICROLINK. Data Acquisition Techniques. <http://www.microlnk.co.uk/dataaq.html>
- [74] MTS. High Performance Seismic Simulations. <http://www.mts.com/aesd/Seismic.htm>.
- [75] MTS. Series 323 Multi-Axis Simulation Table. <http://www.mts.com>
- [75] National Earthquake Information Center. The Richter Magnitude Scale, Measuring the size of an Earthquake, The Modified Mercalli Intensity Scale, Magnitude and Intensity, The Richter Magnitude Scale. <http://neic.usgs.gov/neis/>.
- [76] National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, Denver Plate Tectonics.. http://neic.gov/neis/plate_tectonics/plate_tectonics.html

- [77] National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, Denver. Earthquake and Plate Tectonics.
http://neic.gov/neis/plate_tectonics/rift_man.html
- [78] National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, Denver. Magnitude and Intensity.
http://neic.usgs.gov/neis/general/handouts/magnitude_intensity.html
- [79] National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, Denver. The Modified Mercalli Intensity Scale.
<http://neic.usgs.gov/neis/general/handouts/mercalli.html>
- [80] National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology, Denver. Measuring the Size of an Earthquake.
<http://neic.usgs.gov/neis/general/handouts/measure.html>
- [81] National Instruments 1999. Measurement and Automation, Catálogo 1999.
- [82] National Instruments, "Manual de usuario NI 6013/6014". Julio de 2002.
- [83] NCREE. Tri-Axial Seismic Simulator.
http://www.ncree.gov.tw/old/EquipRent/intro_TASS.htm.
- [84] Normas Colombianas de Ingeniería Sísmica. Normas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.
- [85] Observatorio Sismológico del Sur Occidente. O.S.S.O, <http://osso.univalle.edu.co>
- [86] Pablo Cazau. Guía de redacción y publicación científica. .
<http://www.galeon.com/pcazau/index.htm>
- [87] Paul H. Lewis Chang Yang. Sistemas de control en ingeniería.. Editorial Prentice Hall.
- [88] PCB Piezotronics. Precision Accelerometers. <http://www.pcb.com/links.html>
- [89] PEPP. Example of seismograms recorded by PEPP.
http://lasker.princeton.edu/sample_seismogram.html
- [90] Puerto Paralelo.
<http://comunidad.ciudad.com.ar/internacional/aruba/megat/nuevo4.htm>. Mecatrónica.
- [91] R. Ewald, J. Hutter, F. Liedhegener, W. Cchenkel, A. Schmitt, M. Reik y HYDA GmbH, Sulzbach. Proportional and Servovalve Technology. Editorial Mannesmann Rexroth GmbH, Lohr am Main.
- [92] Raul Guenther. Eduardo A. Perondi. "The Pneumatic Positioning System Cascade Control with friction compensation".
- [93] Richard C. Dorf. Modern Control Systems. University of Santa Clara. 1970.
- [94] Robert L. Wiegel. Earthquake Engineering. Editorial Prentice Hall.
- [95] ROBOTEC. Tarjetas IO, Manual de Instalación. <http://www.robotec.com>.
- [96] Roger S. Pressman. "Ingeniería del Software". Cuarta edición. Editorial McGraw-Hill.
- [97] Ron Adressin, Daniel Raichel's. Transducers and their Applications. University of Hartford Biomedical Engineering.
<http://uhavax.hartford.edu/biomed/gateway/TransducersandtheirApplications.html>
- [98] Rosanna L. Hamilton. Earth's Interior & Plate Tectonics.
<http://www.solarviews.com/eng/earthint.htm>
- [99] S. J. Dyke. Laboratory Facilities. <http://cive.wustl.edu/quake/facilities.htm>.
- [100] S.J. Dyke, B. NEPOTE y J.M: Caicedo. Earthquake Simulator Control by the Transfer Function Iteration Method.
<http://128.252.240.153/users/jumaca/papers/TFI1.pdf>.
- [101] S.J. Dyke, B. Nepote, and J.M Caicedo. "Earthquake Simulator Control by the Transfer Function Iteration Method.
- [102] Saber Electrónica. Revista Nro. 72.

- [103] SASO Facilities. Earthquake Activity, Make your own seismogram.
<http://geo.arizona.edu/saso/info/faciltes.html>
- [104] Schaevitz. Sensores de posición lineal, Sensores de posición LVDT, Servoacelerómetros lineales y angulares. <http://www.idm-Instrumentos.es/Sensores/posici.htm>
- [105] Sensores y accesorios, Adquisición de datos.
<http://www.databox.es/Sensores%20y%20Accesorio%202.htm>
- [106] SHAKE-PLAN. Earthquake simulator. www.engineering.co.kr/etc/vibra.htm
- [107] Shakhzod M. Takhirov, Gregory L. Fenves, Eric Fujisaki y Don Clyde. "Ground Motions for Earthquake Simulator Qualification of Electrical Substation Equipment". PPER Report 2004/XX Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley.
- [108] Shirley J. Dyke and Laura M. Jansen. "Implications of Control-Structure Interaction in Scaled Structural Control System Testing".
- [109] Shirley J. Dyke and Laura M. Jansen. Implications of Control-Structure Interaction in Scaled Structural Control System Testing.
<http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/pdfs/cca99.pdf>.
- [110] Shirley J. Dyke. Experiences in integrating Research and Education.<http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/pdfs/FIE.pdf>.
- [111] Structures. K. Yamamoto, T. Yamamoto, H. Ohmori y A. Sano. Adaptive Feedforward Control Algorithms for Active Vibration Control of Tall Structures. IEE.
- [112] Tamayo y Tamayo Mario. El proceso de la investigación científica. Editorial Limusa.
- [113] The IRIS Consortium. Institutions for Seismology.
<http://www.iris.edu/Docs/irir.htm>.
- [114] UC Berkeley Seismological Laboratory Northern California Earthquake Data center. Viewing Digital Seismograms. <http://quake.geo.berkeley.edu/bdsn/seismograms.html>.
- [115] UC Berkeley Seismological Laboratory. Earthquake Information.
<http://www.seismo.berkeley.edu/seismo/Homepage.html>
- [116] UC Berkeley Seismological Laboratory. Earthquakes of Interest.
http://quake.geo.berkeley.edu/bdsn/seismograms_of_interest.html
- [117] USGS. Live Internet Seismic Server. USGS.
http://aslwww.cr.usgs.gov/Seismic_Data/heli2.htm
- [118] USGS. Seismograms from the Interactive Deaggregation Web page
http://eqint1.cr.usgs.gov/eq/html/Stochastic_Sesmogram_Theory.html
- [119] Victor Juliano de Negri. Sérgio Sarquis Attié. Leonardo Bastos de Toledo. "Controle de Posicao Utilizando Servoválvulas e Válvulas Proporcionais Electro-hidráulicas".
- [120] Virgilio Gómez Negrete. Conversión Digital/Analógico.
www.modelo.edu.mx/univ/virtech/circuito/dacwin.htm#superior.
- [121] Virgilio Gomez Negrete. Visual Basic 6.0 y el puerto paralelo.
www.modelo.edu.mx/univ/virtech/circuito/.
- [122] Virgilio Gómez Negrete. Programación del puerto paralelo.
- [123] Y. Liu and H. Handroos. "Application of Sliding Mode Control to an Electrohydraulic Servosystem with Fexible Mechanical Load".
- [124] Yongqian Zhao Sinh Le Quoc. "Nonlinear Zuzzy Control on A Hydraulic Servo System".
- [125] Yongqian Zhao, Sinh LeQuoc Maarouf Saad. "Nonlinear Fuzzy Control on A Hydraulic Servo System".