

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN Y
VELOCIDAD DE UNA MESA SÍSMICA**

**GUILLERMO TOMAS TORRES SANJUANELO
PEDRO DARÍO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN Y
VELOCIDAD DE UNA MESA SÍSMICA**

**GUILLERMO TOMAS TORRES SANJUANELO
PEDRO DARÍO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

**CARLOS BORRAS PINILLA
Ingeniero Mecánico, PhD, Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso y a mi familia por su formación, empeño y sacrificio en la educación de sus hijos, siendo siempre ellos mi ejemplo a seguir y los pilares de mi vida.

Guillermo Tomás Torres Sanjuanelo.

DEDICATORIA

A mi madre María Adelina Hernández por su inquebrantable dedicación y apoyo en la formación personal y profesional de sus hijos.

Pedro Darío Rodríguez Hernández.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por su apoyo incondicional en la realización de este proyecto de grado.

Al ingeniero Carlos Borrás Pinilla por su enseñanza acompañamiento y asesoría.

A la escuela de Ingeniería Mecánica UIS en su formación como profesionales.

Al ingeniero Ricardo Cruz por su colaboración.

A la escuela de Ingeniería Civil UIS por su colaboración en la realización de este proyecto de grado.

A Henry Cruz y Fredy Vargas por su amplia colaboración en la realización de este proyecto de grado.

Al Ingeniero Henry Rodríguez por su asesoría.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
1. MARCO TEORICO	21
1.1 MESA SISMICA.	21
1.1.1 Sismo, temblor o terremoto.	22
1.1.2 Mesa para ensayos sísmicos o vibratorios	25
1.1.3 Clases de mesas sísmicas	27
1.1.4 Mesa sísmica servoactuada	28
1.1.5 Funcionamiento de una mesa sísmica servoactuada	28
1.1.6 Descripción de los componentes de una mesa sísmica	29
1.1.7 Mesas sísmicas en Colombia	31
1.2 CONTROL AUTOMATICO	43
1.2.1 Sistemas de control	43
1.2.2 Componentes de un sistema de control	44
1.2.3 Sistemas de control en lazo abierto y cerrado	46
1.3 CONTROLADORES Y ACCIONES BASICAS DE CONTROL	48
1.3.1 Modos de operación del controlador	49
1.3.2 Acciones de control	50
2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	61
2.1 MODELADO DINAMICO DE LA MESA SISMICA	62
2.2 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.	63
2.3 ANÁLISIS DE LA SERVOVÁLVULA	65
2.4 ANÁLISIS DEL ACTUADOR	69
2.5 ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA	72
3. VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO	77

3.1 SISTEMA DE GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	78
3.2 ALGORITMO DE CONTROL.	80
3.2.1 Adquisición de datos	80
3.2.2 Generador de señal	81
3.2.3 Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Posición	82
3.2.4 Registro de datos del sistema	83
3.2.5 Tarjeta National Instruments PCI 6289	84
3.2.6 Módulo de entradas y salidas National Instruments SCB 68	85
3.2.7 LVDT y acondicionador de señal AC-DC	88
3.2.8 Filtro Pasabajos	89
3.2.9 Preamplificador y Amplificador de Corriente.	90
3.2.10 Sintonización y análisis de respuesta del sistema de control	91
3.2.11 Respuesta ante una entrada en escalón	94
3.2.13 Análisis de respuesta en frecuencia	96
3.2.14 Respuesta experimental del sistema por medio de MATLAB	97
4. APLICACIÓN DE LA MESA SÍSMICA COMO HERRAMIENTA PARA ANALISIS ESTRUCTURAL	103
5. CONCLUSIONES	107
6. OBSERVACIONES	109
BIBLIOGRAFIA	111
ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Características de un sismo	23
Figura 2. Tipos de ondas en un sismo.	24
Figura 3. Simulador sísmico servoactuado universidad del valle.	33
Figura 4. Simulador sísmico tele-operable Universidad del Valle.	34
Figura 5. Mesa vibratoria (versionacademica) Universidad de los Andes	36
Figura 6. Simulador sísmico Universidad de los Andes (50 toneladas)	37
Figura 7. Simulador sísmico Universidad EAFIT	38
Figura 8. Mesa sísmica Universidad Industrial de Santander.	40
Figura 9. Esquema de bloques de un sistema de control.	46
Figura 10. Diagrama de Bloques de un sistema en lazo abierto.	47
Figura 11. Diagrama de bloques de un sistema en Lazo Abierto.	48
Figura 12. Configuración del sistema.	50
Figura 13. Diagrama de bloques de un controlador proporcional.	51
Figura 14. Señal de salida al variar la constante proporcional K_p .	52
Figura 15. Diagrama de bloques controlador integral.	53
Figura 16. Respuesta de un control integral ante una perturbacion externa.	54
Figura 17. Diagrama de bloques controlador proporcional-integral (PI).	55
Figura 18. Respuesta de un control integral ante una perturbacion externa.	56
Figura 19. Diagrama de bloques controlador proporcional-derivativo (PD).	57
Figura 20. Diferenciacion grafica de respuesta proporcional vs respuesta PD.	58
Figura 21. Diagrama de bloques controlador proporcional-integral-derivativo (PID).	59
Figura 22. Diferenciacion grafica de respuesta proporcional, PD y PID.	60
Figura 23. Metodología de diseño del sistema de control	61
Figura 24. Esquema simplificado de la planta (conjunto mesa sísmica)	62
Figura 25. Esquema de la fuerza resultante en la mesa.	64

Figura 26. Diagrama con nomenclatura del servoactuador hidráulico	65
Figura 27. Componentes de la servoválvula MOOG serie 76-263.	66
Figura 28. Esquema de presiones y flujo en el actuador y servoválvula	67
Figura 29. Esquema de volúmenes contenidos en cámaras del servoactuador.	70
Figura 30. Modelo físico simplificado de la mesa junto con la masa de prueba	72
Figura 31. Esquema general de bloques del sistema	79
Figura 32. Algoritmo de control.	80
Figura 33. Adquisición de datos del LVDT.	81
Figura 34. Generador de señal de excitación.	82
Figura 35. Control PID.	83
Figura 36. Adquisición de datos para generar diagramas de Bode	84
Figura 37. Tarjeta de adquisición de datos (DAQ) PCI 6289 Serie M.	85
Figura 38. Modulo NI SCB 68 y Cable NI SHC 68-68 EPM.	86
Figura 39. Esquema de conexiones del módulo NI SCB 68.	87
Figura 40. LVDT y Acondicionador de señal Trans-Tek serie 1000-0012 K9.	88
Figura 41. Esquema de bloques de conexión LVDT-Acondicionador de señal Trans-Tek serie 1000-0012 K9.	89
Figura 42. Filtro pasabajos de segundo orden.	89
Figura 43. Simulación del filtro pasabajos de segundo orden.	90
Figura 44. Conexión en paralelo servoválvula MOOG Serie 76-263.	91
Figura 45. Workspace y Toolbox MATLAB	97
Figura 46. System Identification Tool - MATLAB	98
Figura 47. Porcentajes de ajuste para orden 1, 2 y 3 en lazo abierto.	99
Figura 48. Porcentaje de ajuste para orden 1, 2 y 3 en lazo cerrado.	100
Figura 49. Diagrama Teorico de Bode de lazo Abierto vs Lazo Cerrado a 2500 Psi	101
Figura 50. Diagrama de Bode Experimental para tres señales sinusoidales con 1, 2 y 4 mm de amplitud a 2500 Psi de presión.	102
Figura 51. Respuesta a una entrada en escalón unitario para tres señales con 1, 2 y 4 mm de amplitud a 2500 Psi de presión.	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del simulador sísmico servoactuado Universidad del Valle.	33
Tabla2. Especificaciones técnicas del simulador sísmico tele-operable universidad del valle.	35
Tabla3 Especificaciones técnicas del simulador sísmico académico Universidad de los Andes.	36
Tabla4. Especificaciones técnicas del simulador sísmico Universidad de los Andes.	38
Tabla5. Especificaciones técnicas del simulador sísmico Universidad EAFIT.	39
Tabla 6. Características de la mesa sísmica Universidad Industrial de Santander	42
Tabla 7. Propiedades del modelo matemático.	74
Tabla 8. Ecuaciones para el cálculo de constantes de sintonización del controlador según Ziegler y Nichols.	92
Tabla 9. Constantes de sintonización calculadas mediante el método de las oscilaciones sostenidas de Ziegler y Nichols.	93
Tabla 10. Contantes de sintonización final obtenidas de forma experimental.	93

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Catálogo de la servovalvula MOOG	115
ANEXO B. Catalogo de la actuador hidráulico	120
ANEXO C. Catalogo de la unidad de potencia hidráulica	123
ANEXO D. Catalogo del acumulador	127
ANEXO E. Catalogo del LVDT	128
ANEXO F. Catalogo del acondicionador de señal del LVDT.	132
ANEXO G. Catalogo de la tarjeta de adquisición de datos.	134
ANEXO H. Dataseet Integrado Ad 843JN.	138
ANEXO I. Dataseet Integrado LM 833.	141
ANEXO J. Algoritmo para mesa sísmica sin control	145
ANEXO K. Algoritmo para mesa sísmica variando la frecuencia	146
ANEXO L. Manual de usuario	147

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD DE UNA MESA SÍSMICA*

AUTORES: PEDRO DARÍO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

GUILLERMO TOMÁS TORRES SANJUANELO**

PALABRAS CLAVE: Mesa Sísmica, Lazo Cerrado, Control PID, Respuesta en Frecuencia.

DESCRIPCION:

Hoy en día los procesos industriales están en constante evolución y enfocados hacia lograr un mejor desempeño en sus líneas productivas, es por esto que la automatización de estos procesos mediante el control automático se hace indispensable para mejorar y ser más competitivos en este mundo globalizado. Para lograr esto se debe trabajar e integrar diferentes campos de la ingeniería como lo son el diseño mecánico, la electrónica, el software y la automatización. La escuela de ingeniería mecánica cuenta con el centro de investigación en sistemas dinámicos control y robótica DICBOT el cual realizo la construcción y caracterización dinámica de la mesa sísmica en lazo abierto de una mesa sísmica. El primer paso fue realizar el modelado dinámico para obtener el modelo matemático de la planta para así continuar con el diseño del sistema de control y seleccionar los elementos de hardware (tarjeta de adquisición de datos NI) y software (LabVIEW) necesarios, además de diseñar e implementar componentes electrónicos y eléctricos para colocar en operación la mesa sísmica. Posterior a esto se desarrolló y programó el algoritmo de control para el correcto funcionamiento de la planta controlada, esto se logró con el desarrollo de un sistema de control de posición y velocidad implementando un sistema de control de retroalimentación (FEEDBACK) de lazo cerrado como lo es el filtro PID caracterizando el sensor de posición LVDT, para controlar el movimiento tanto en amplitud como en frecuencia, mediante el cual se puede simular señales de excitación (sinusoidal, triangular, escalonada y diente de sierra). Posteriormente se realizaron las pruebas para determinar la respuesta ante una entrada en escalón y respuesta en frecuencia del sistema, generando los diagramas de bode respectivos mediante el procesamiento de los datos (señal de entrada y salida), adquiridos por LabView y procesados en el software MATLAB.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM POSITION AND SPEED OF A SEISMIC TABLE^{*}

AUTHORS: PEDRO DARÍO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ^{*}

GUILLERMO TOMÁS TORRES SANJUANELO^{**}

KEYWORDS: Seismic Table, Closed Loop, PID Control, Frequency Response.

DESCRIPTION:

Today industrial processes are constantly evolving and focused on achieving a better performance in their production lines, which is why automating these processes through the automatic control is indispensable to improve and become more competitive in this globalized world. To accomplish this we must work and integrate different fields of engineering such as mechanical design, electronics, software and automation. School of Mechanical Engineering has research center in control and robotics DICBOT which performed the construction and characterization of seismic dynamic table in an open-loop dynamic systems seismic table. The first step was to perform dynamic modeling to obtain the mathematical model of the plant in order to continue with the design of the control system and select items of hardware (data acquisition card NI) and software (LabVIEW) necessary, as well as designing and implement electronic and electrical components to place in operation the seismic table. Following this was developed and programmed the control algorithm for the proper functioning of the controlled plant, this was achieved with the development of a control system implementing a position and velocity feedback control system (FEEDBACK) closed loop as PID filter is characterized LVDT position sensor to control the movement in both amplitude and frequency by which you can simulate driving signals (sine, triangle, and sawtooth step). Later tests were performed to determine the response to a step input and frequency response of the system, generating the corresponding Bode diagrams by processing the data (signal input and output), acquired by LabView software and processed in MATLAB.

^{*} Ungraduate Thesis

^{**} Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

INTRODUCCIÓN

La mesa vibratoria unidireccional del centro de Investigación en Sistemas Dinámicos Control y Robótica (DICBOT) de la Universidad Industrial de Santander es un equipo utilizado para realizar pruebas por medio de la simulación de movimientos oscilatorios, este equipo hasta el día de hoy había tenido un funcionamiento en lazo abierto en el cual no existía un control preciso de los movimientos, debido a esto se realizó este proyecto de grado con el fin de controlar de forma digital y precisa en lazo cerrado los movimientos que realice la mesa sísmica además de repotenciar el funcionamiento del equipo. Con el fin de cumplir con los requerimientos necesarios para controlar de forma precisa los movimientos que realice la mesa se utilizara un sistema de control de retroalimentación (FEEDBACK) como lo es el filtro PID el cual hace parte del control clásico dentro de las herramientas del control automático.

Para realizar este proyecto de grado en la metodología de investigación utilizaremos un software de simulación llamado Labview además de una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI-6289, un módulo de entradas y salidas NI SCB-68 todos estos de la casa National Instruments, además de una tarjeta de potencia y un filtro pasabajo activo para el control realizado a la servoválvula la cual controla el movimiento del actuador que a su vez es monitoreado por un sensor de posición llamado LVDT por sus siglas en ingles Linear Variable Differential Transformer el cual es alimentado por medio de un acondicionador de señal y un filtro pasabajo pasivo, este acondicionador de señal también registra la señal con la cual se monitorea el movimiento del actuador el cual realiza el movimiento para que se presente la oscilación de la plataforma de la mesa sísmica. Todos estos elementos nos permitirán desarrollar, programar y simular el algoritmo de control, crear una interfaz gráfica amigable para el usuario y así lograr el buen funcionamiento del equipo además de cumplir con la exigencia de la manipulación y precisión de los movimientos oscilatorios que realizara la mesa sísmica.

OBJETIVOS DEL PROYECTO DE GRADO

Objetivo General

Siendo consecuentes con la misión de la universidad industrial de Santander donde el propósito es la formación con alto grado de calidad humana, profesional, formación técnica, capacidad de mejoramiento continuo y progreso en el nivel de vida de la comunidad, se plantea como objetivo principal diseñar, desarrollar e implementar un sistema de control de posicionamiento y velocidad en lazo cerrado con el software de instrumentación virtual (LABVIEW) de una mesa sísmica utilizada como herramienta pedagógica e investigativa, para el fortalecimiento de la investigación en el área de la ingeniería estructural, control pasivo, control activo y sísmica.

Objetivos Específicos

Desarrollar un sistema de control de lazo cerrado para una mesa sísmica unidireccional servo actuada hidráulica por medio de un algoritmo de control de lazo cerrado (Filtro PID). Este proyecto implicara lo siguientes pasos:

- Diseñar un algoritmo de control de lazo cerrado (control PID), basado en el filtro de posición y velocidad, que represente físicamente el movimiento dinámico del servo actuador hidráulico, correspondiente a un cilindro PARKER de doble vástago (características: carrera = 10", $\varnothing_p = 2.5"$, $\varnothing_v = 1.75"$), la servo válvula MOOG de alto desempeño dinámico serie 76-263 (características: 10 GPM@1000 PSI) acoplados a una plataforma de una mesa sísmica.
- Seleccionar los componentes electrónicos y de hardware necesarios para la implementación del lazo cerrado del sistema de control, lo cual implicara la fabricación de una tarjeta de potencia para manejar la servoválvula, diseño y

montaje del circuito eléctrico para el manejo de señales de adquisición, retroalimentación y validación de datos del sistema de control.

- Programar e implementar el algoritmo del servo actuador hidráulico en una interfaz gráfica para recopilar y monitorear datos en un software especializado (LABVIEW) con una tarjeta de adquisición de datos National Instrument NI USB 6289 utilizando una tarjeta amplificadora de señal para la servo válvula y un sensor de posición LVDT, todo conectado a un equipo de cómputo.
- Desarrollar un modelo matemático y caracterización dinámica en el dominio de la frecuencia de la mesa sísmica (planta) en lazo cerrado y validar la simulación con la planta real.
- Elaborar un manual instructivo en el cual se desarrolle el paso a paso a seguir por parte del usuario en torno a los procedimientos de operación, uso seguro y mantenimiento preventivo del conjunto máquina-hardware-software.

1. MARCO TEORICO

1.1 MESA SISMICA.

Durante muchos años la humanidad ha dedicado grandes esfuerzos a través de la ciencia para explicar ciertos fenómenos producidos por la naturaleza y los sismos no han sido la excepción. Siempre que la humanidad afronta nuevos retos tiene que enfrentarse a los desafíos de la naturaleza, es acá donde surge la necesidad de representar situaciones naturales para entenderlas y estudiarlas con el fin de documentar dichos fenómenos. La tecnología nos brinda la oportunidad de desarrollar herramientas mediante las cuales se realizan experimentos que se asemejen a estos fenómenos naturales para obtener información y resultados detallados de una manera controlada sin tener que presenciar los grandes desastres de la naturaleza.

Cada desarrollo tecnológico requiere enfrentar retos que avocan hacia una construcción y apropiación de conocimiento. Conocer más cada fenómeno nos da la oportunidad de mejorar y evitar los efectos indeseados que pueden ocasionar dichas fuerzas naturales y como perturban la vida de las personas directa o indirectamente.

A través de la historia se han registrado y documentado grandes desastres debido a la acción de los sismos por lo cual se ha impulsado a los científicos y a los gobiernos a crear instituciones de investigación y monitoreo de estos fenómenos naturales llegando así al planteamiento de teorías y la presentación de estudios que dan a entender estos fenómenos de una manera más comprensible por la mayoría de las personas.

A menudo se escucha diferentes formas para denominar un movimiento telúrico (sismo, temblor y terremoto) y es usual escuchar a las personas hacer diferencia entre ellos. Cuando hablan de sismo o temblor hacen referencia al movimiento de

baja intensidad y cuando hablan de terremoto se refieren a los movimientos de mayor intensidad que causan daños materiales y por ende accidentes en algunos caso sesgando vidas humanas, pero en contexto, sismo, temblor y terremoto todos estos términos son sinónimos y hacen referencia a lo mismo.

1.1.1 Sismo, temblor o terremoto. Un movimiento sísmico es un movimiento convulsivo debido al choque de las placas tectónicas de la tierra que liberan gran cantidad de energía la cual se propaga en todas las direcciones en forma de ondas a través de la corteza terrestre provocando vibraciones o perturbaciones hasta que la corteza terrestre se reorganiza y alcanza nuevamente un estado de equilibrio mecánico.

Existen también otras clases de sismos como los provocados por la actividad volcánica o por el colapso de grandes cavernas o galerías subterráneas que se han formado por la erosión o la acción del hombre, pero que su efecto es más localizado y su afectación se reduce a zonas y regiones más pequeñas. Su magnitud e intensidad tiende a ser menor que los sismos por movimiento de placas tectónicas.

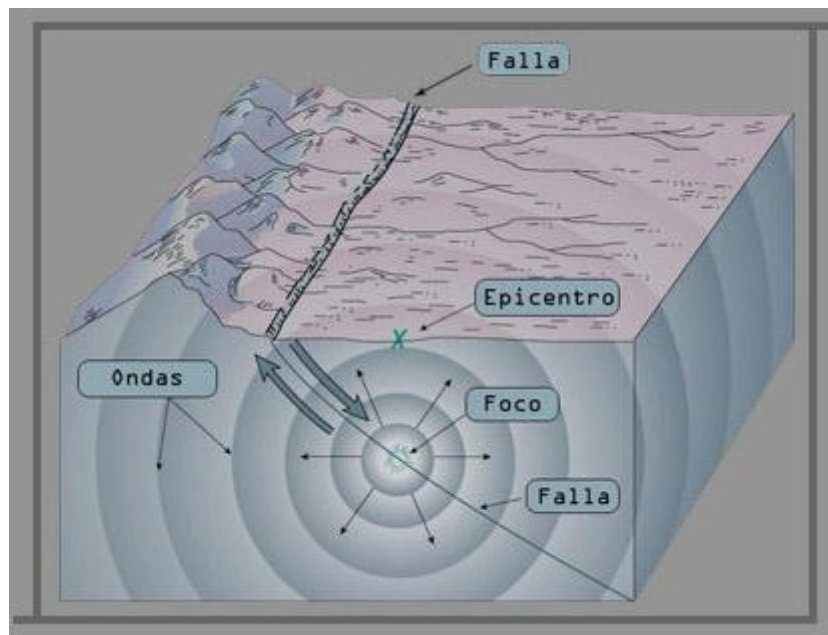
Se registran zonas que tienen una mayor tendencia a sufrir sismos. Se trata de aquellas regiones donde la concentración de fuerzas generada por los límites de las placas tectónicas hace que los movimientos de reajuste sean más frecuentes, tanto en el interior de la corteza terrestre como en la superficie de la tierra.

Un sismo puede catalogarse debido a su intensidad o a su magnitud. La intensidad es una medida de los daños provocados por el sismo, pero en el contexto esta forma de medición carece de valor científico o su valor es muy limitado. El modo de evaluar la intensidad es además relativamente subjetivo y depende de la experiencia del observador, ya que se incluyen en la medición cosas tan variadas como los efectos sobre las personas, los daños sobre las

estructuras artificiales y las construcciones en general, y las modificaciones geológicas y topográficas observables. Por otra parte se realizan dichas observaciones durante e inmediatamente después del evento, cuando hay en todo observador, aun de manera inconsciente una fuerte carga emocional. La magnitud sí es una medida de valor científico ya que es mucho más objetiva que la intensidad, y puede medirse, relacionándola además matemáticamente con la energía liberada en el foco, esta no depende del lugar de observación.

Se pueden establecer ciertas características de un sismo (figura 1): hipocentro y el epicentro. El punto en que se origina el terremoto se llama foco o hipocentro, y se puede situar a un máximo de unos 700 km hacia el interior terrestre. El epicentro es el punto de la superficie terrestre más próximo al foco del terremoto es decir, la proyección hacia la superficie terrestre del hipocentro.

Figura 1. Características de un sismo



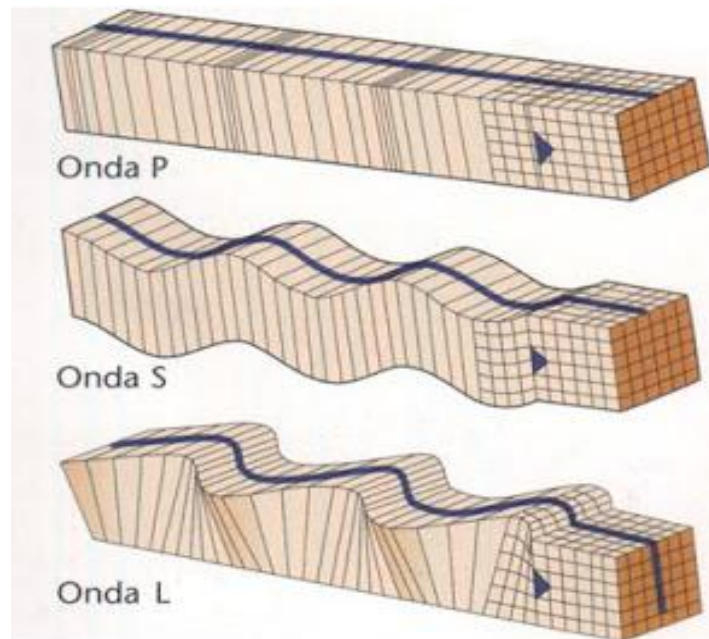
Fuente: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica <http://www.smis.org.mx/htm/sm5.htm>
Para registrar un sismo se usa los sismógrafos los cuales registran las ondas u oscilaciones permanentemente durante la ocurrencia del mismo, produciendo un registro denominado sismograma. Son estos registros llevados a los laboratorios y

reproducidos en los experimentos en equipos como las mesas vibratorias los que finalmente entran a ser objeto de estudio y análisis.

Dado que las ondas sísmicas hacen que el suelo vibre tanto horizontal como verticalmente, una estación sísmica requiere tres sismógrafos para grabar los movimientos completos, uno para grabar los movimientos verticales y dos para grabar los horizontales en dos direcciones, normalmente, norte-sur y este-oeste.

Cuando ocurre un terremoto, los sismógrafos que se encuentran cerca del epicentro son capaces de registrar las ondas P y las S (ondas primarias y secundarias) y ondas L (superficiales), pero en un lugar lo suficientemente apartado sólo pueden registrarse las ondas P.

Figura 2. Tipos de ondas en un sismo.



Fuente: Blog ciencias para el mundo contemporáneo
<http://csdelatierra2011proffautsto.blogspot.com/2011_09_16_archive.html>

✓ **Ondas P**

Son ondas profundas longitudinales o compresionales, es decir, que se propagan en el sentido de desplazamiento de la onda (figura 2) lo cual significa que el suelo

es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente son las viajan a una velocidad mayor y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.

✓ **Ondas S.**

Son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación (figura 2). Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y producen mayores daños que las P, especialmente en las construcciones. Solo se trasladan a través de elementos sólidos.

✓ **Ondas L.**

Cuando las ondas internas llegan a la superficie, se generan las ondas L (figura 2), que se propagan por la superficie de discontinuidad de la interface de la superficie terrestre (tierra-aire y tierra-agua). Son las causantes de los daños producidos por los sismos en las construcciones. Estas ondas son las que poseen menor velocidad de propagación a comparación de las otras dos pero son las que ocasionan los mayores daños.

Para el caso de este trabajo de grado, como primer paso, en el sistema de control para la mesa sísmica se realizara la simulación de sismos artificiales para lo cual se asumirá que el comportamiento de un sismo estará dado principalmente por señales de ondas conocidas como son: sinusoidales, triangulares, escalonadas y otras señales de fácil tratamiento en las cuales se identificaran parámetros como la frecuencia y amplitud de dichas oscilaciones.

1.1.2 Mesa para ensayos sísmicos o vibratorios. Dentro del campo de la ingeniería estructural es de mucha importancia la realización de estudios y ensayos experimentales del comportamiento de elementos dentro de un conjunto

o modelos estructurales debido a cargas dinámicas como lo son las ondas sísmicas.

Aunque existen numerosos tipos de experimentos y ensayos mediante los cuales se puede hacer la caracterización de las propiedades fisicomecánicas de los materiales, los ensayos en mesas vibratorias permiten someter el material a una verdadera excitación dinámica ya sea a un elemento en particular o a un conjunto ensamblado de elementos estructurales.

Una mesa vibratoria por tanto, la podemos describir, como una herramienta tecnológica que permite la generación de movimientos dinámicos oscilatorios, utilizando el control y modulación de dicho movimiento y su aplicación directamente sobre un modelo ya sea a escala real o reducida.

La mesa vibratoria permite realizar ensayos para estudiar el comportamiento de estructuras, equipos, instalaciones y modelos bajo la acción de cargas dinámicas y así disminuir las pérdidas tanto humanas como materiales o daños ocasionados por movimientos telúricos.

La mesa vibrante proporciona en principio una de las técnicas más realistas para el ensayo sísmico de estructuras en el sentido de que, primero, la verdadera excitación se introduce como un movimiento de la base a velocidad real y, segundo, la estructura es verdaderamente deformada por las fuerzas de inercia distribuidas debidas a la masa propia de la estructura. Debido a estos dos aspectos el ensayo en mesa vibrante es superior al ensayo estático. Sin embargo, muchas veces, la mesa vibrante, por ser una mera herramienta de ensayo dinámico, presenta ciertas limitaciones importantes debido a las prestaciones que pueda ofrecer dicha herramienta de ensayo. En primer lugar existen limitaciones físicas en el desplazamiento máximo y la fuerza máxima que vienen dadas por el tipo de mesa y sus componentes de fabricación, en función de la masa movilizad

dicha fuerza determina la aceleración máxima y además, las prestaciones de la unidad de potencia limita la máxima velocidad obtenible. Otra dificultad implícita está en la medida de las fuerzas y desplazamientos que, siendo ahora variables dinámicas, exigen equipos y técnicas de medidas más sofisticadas que los que se utilizan en los ensayos estáticos.

1.1.3 Clases de mesas sísmicas. Existen varios tipos de mesas sísmicas las cuales emplean diferentes materiales en su construcción y varían en la forma o mecanismo para realizar el movimiento oscilatorio así como capacidad de carga.

Las más pequeñas son las que funcionan con servomotores. Son hechas de materiales muy livianos y su uso es solamente académico debido a sus bajas prestaciones. Tienen la de menor capacidad de carga. El movimiento oscilatorio se logra mediante la inversión del giro del motor lo que proporciona una frecuencia de funcionamiento baja y una amplitud fija.

Como un segundo grupo están las que usan el sistema de motor manivela. También de baja capacidad de carga, pero en estas se puede variar tanto la frecuencia como la amplitud de las oscilaciones, pero hay que detener el movimiento para ajustar la amplitud de las mismas.

Las más comunes y más usadas son las mesas sísmicas que usan cilindros hidráulicos para realizar su movimiento puesto que pueden manejar desde bajas hasta altas cargas. El rango de frecuencia y amplitud en el movimiento es muy amplio y ambos parámetros están sujetos a variación incluso durante la ejecución de una determinada prueba. Estas mesas son las más difundidas en el mundo y en el país no es la excepción, debido a la versatilidad en su operación y el alto grado de control que se puede llegar a tener en su movimiento llegando a simular dado el caso movimientos sísmicos muy similares a los registrados en la realidad.

1.1.4 Mesa sísmica servoactuada. Se describe y se hará referencia principalmente a una mesa sísmica hidráulica unidireccional ya que son las más comunes y es el caso que corresponde a la mesa existente en el laboratorio y a la cual se le desarrolló el algoritmo de control.

La mesa sísmica es esencialmente una estructura metálica compuesta por: un marco fijo (masa de reacción) sobre el cual va montado una plataforma vibratoria que permite realizar movimiento unidireccional o multidireccional repetitivo además de un sistema de potencia encargado de proporcionar el movimiento mediante el uso de un actuador hidráulico y un sistema de control encargado de modular dicho movimiento. Es usada para realizar ensayos de estructuras, equipos, instalaciones y modelos bajo la acción de cargas dinámicas. El rango de uso no solo está limitado a la simulación de movimientos sísmicos, sino que también abarca la emulación de movimientos vibratorios en las estructuras de soporte causados por la operación de maquinaria, para posteriormente analizar sus efectos.

Las mesas sísmicas controladas dinámicamente en lazo cerrado, pueden disponer de hasta seis grados de libertad, correspondientes a los tres desplazamientos y tres giros de un sólido rígido. Las características técnicas de las mesas sísmicas se definen principalmente por sus dimensiones, números de grados de libertad, aceleraciones, velocidades, desplazamientos máximos y capacidad de carga.

1.1.5 Funcionamiento de una mesa sísmica servoactuada. El movimiento de la mesa vibratoria se realiza por medio de un conjunto compuesto por un actuador hidráulico, el cual provee de movimiento en una sola dirección repetitivo y una servoválvula comandada por un sistema de control el cual decodifica la señal del movimiento requerido proveniente de un computador y la transforma en una señal eléctrica proporcional para regular el movimiento del spool de la servoválvula y, en consecuencia, el movimiento de la mesa, además, este movimiento es captado

por el sistema de control y retornado al ordenador para que el algoritmo de control efectúe las correcciones necesarias en función de la diferencia entre la posición real de la mesa y el movimiento previsto en los requerimientos del ensayo. El movimiento de la Mesa es posible controlarlo en amplitud como así también en frecuencia. El procedimiento usual es seleccionar y reproducir un acelerograma real registrado durante un terremoto, o en su defecto un acelerograma artificial.

1.1.6 Descripción de los componentes de una mesa sísmica. Los principales sistemas y dispositivos presentes de una mesa sísmica son:

- Soporte y/o marco rígido (masa de reacción)
- Plataforma móvil
- Dispositivo de deslizamiento
- Actuador
- Unidad de potencia
- Sistema de control
- Sistema de seguridad y monitoreo secundario

Cada uno de estos componentes está integrado para cumplir una función específica dentro del conjunto.

✓ **Soporte rígido o masa de reacción:**

Es la estructura que soporta todo el sistema físico del conjunto mesa sísmica. Proporciona la base sobre la cual se monta la plataforma móvil con su respectivo sistema de deslizamiento. Sobre él también está anclado el actuador hidráulico que hace de enlace con la plataforma móvil.

✓ **Plataforma móvil:**

Es una tarima montada y debidamente soportada por un sistema de cojinetes de deslizamiento lineales sobre el marco rígido. Es la parte de la mesa que

proporciona el espacio de soporte y anclaje para el montaje de los modelos que se desean someter a los ensayos.

✓ **Dispositivo de deslizamiento:**

Está compuesto por el sistema de deslizamiento lineal y el respectivo soporte para el mismo. Permiten un movimiento lineal de baja fricción de la plataforma.

✓ **Actuador:**

Es el elemento encargado de convertir y transmitir el movimiento del sistema de potencia a la plataforma móvil. Los actuadores hidráulicos son ampliamente utilizados respecto a otros sistemas como los motores eléctricos debido a que ofrecen ventajas en cuanto a facilidad de control, respuesta rápida, mayor capacidad para aplicar fuerza y como las partes mecánicas están lubricadas con el mismo fluido de trabajo se ahorra en mantenimiento.

✓ **Unidad de potencia:**

Suministra la energía necesaria para el funcionamiento de todo el sistema vibratorio, su escogencia depende las características de la mesa (prestaciones que se desean de la misma) y del tipo de actuador a utilizar. En el caso de un sistema hidráulico esta se encarga de suministrar el caudal necesario hacia el actuador para generar el movimiento de vaivén.

✓ **Sistema de control:**

Este sistema es el encargado de modular el movimiento del actuador de acuerdo las condiciones del ensayo. Está compuesto por un ordenador o procesador de señales, el sistema de adquisición de datos, los sensores y los dispositivos de control necesarios dependiendo del tipo de actuador. En el caso de los sistemas servohidráulicos se usa una servoválvula que recibe la señal eléctrica proveniente del controlador y la transforma en una señal de comando que direcciona el llenado de las cámaras del actuador. Acompañando a servoválvula se ubica un

acumulador que se encarga de mitigar los efectos de pulsación de la bomba y los aumentos repentinos de presión.

✓ **Sistema de seguridad y monitoreo secundario:**

Dentro de este tenemos varios instrumentos de monitoreo que si bien no obedecen directamente al sistema de control son necesarios de ser vigilados como medida preventiva para evitar mal funcionamiento o posibles accidentes. Aquí podemos mencionar, filtros para mantener la calidad y limpieza del fluido hidráulico, termómetro para verificar temperatura de operación del aceite, manómetros para checar la presión del sistema hidráulico, válvula de seguridad para limitar la máxima presión de operación, válvula para el venteo requerida para el arranque en vacío de la unidad de potencia hidráulica o en su defecto cortar la presión hacia el conjunto servoválvula actuador en caso de ser necesario, y un fusible para evitar que sobrecargas eléctricas afecten la parte electrónica del sistema de control.

1.1.7 Mesas sísmicas en Colombia. En nuestro país aunque se encuentran varias mesas sísmicas podemos decir que estamos bastante retrasados en el tema con respecto a otros países de la región y del mundo. Los equipos de este tipo que podemos encontrar en Colombia se limitan a laboratorios en algunas universidades y en gran parte su uso es solamente académico y en muy pocas ocasiones se remonta a la industria de la construcción como tal, de ahí el poco desarrollo en esta área al contar con poca participación de la industria que debería centrar su atención hacia este tema.

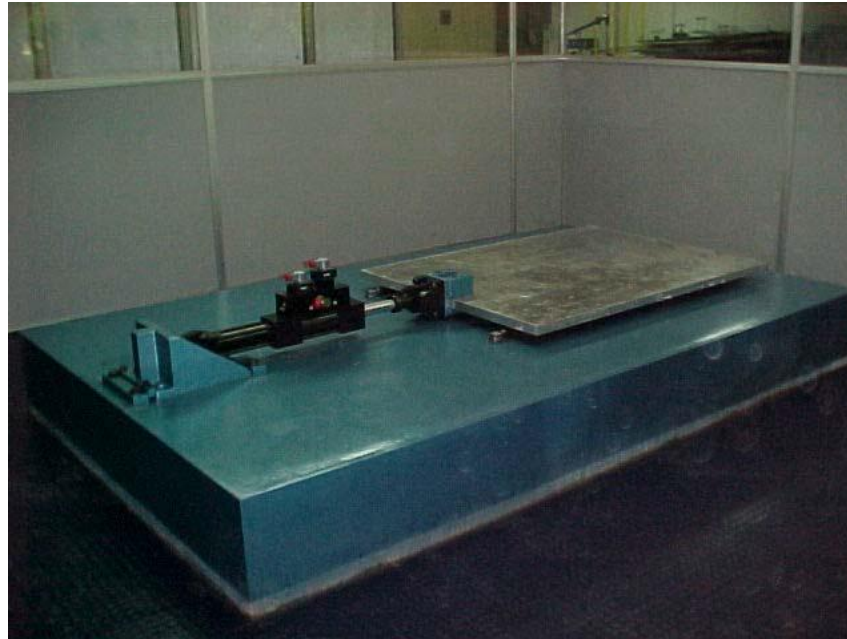
Salvo dos simuladores sísmicos de un tamaño considerable una en la universidad de los andes y otra en la universidad EAFID las cuales poseen una capacidad de 60 y 70 toneladas respectivamente las demás son solo herramientas pedagógicas de las entidades de educación superior que las poseen.

✓ **Simuladores sísmicos Universidad del Valle.**

La Universidad del Valle en Cali Colombia cuenta en la actualidad con dos simuladores sísmicos, el primero es una mesa sísmica unidireccional servoactuada ubicada en el laboratorio de sísmica y dinámica estructural (figura 3), la cual ostenta el título de ser el primer simulador sísmico construido en Colombia. El simulador sísmico posee cojinetes lineales, un actuador hidráulico de 45 KN (10 kip), dos servoválvulas duales de 15 gpm cada una, un LVTD interno, la unidad de potencia opera a 3000 psi y a un caudal máximo de 32 gpm. Este simulador se apoya sobre una base de concreto reforzado de 4 m X 3 m X 1.5 m, aislada del piso.

El controlador digital del sistema hidráulico fue diseñado en la Universidad del Valle usando un sistema de implementación de control en tiempo real desarrollado por Space Inc, que consiste de una tarjeta controlador DS1102 y software para diseñar, simular, e implementar controladores. La tarjeta tiene un procesador digital de señales (DSP) basado en el chip TMS320C31 de 60 MHz, dos canales A/D de 16 bits, dos canales A/D de 12 bits, 4 canales D/A de 12 bits, y 16 líneas de I/O digital. Los controladores fueron diseñados en MATLAB/SIMULINK y compilados al DSP usando el Real-Time Workshop

Figura 3. Simulador sísmico servoactuado universidad del valle.



Fuente: Diseño y construcción del simulador sísmico uniaxial de la Universidad del Valle.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del simulador sísmico servoactuado Universidad del Valle.

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	1.1 X 1.5	m
Capacidad de carga	1000	Kg
Velocidad máxima	90	cm/s
Aceleración máxima	4	g`s
Recorrido máximo	15	cm
Rango de frecuencia	0 – 50	Hz
Movimiento	Unidireccional	

El segundo simulador sísmico consta de una plataforma para ensayos a escala más reducida (figura 4), además es tele-operable, es decir, que puede ser operado remotamente (lugares alejados del campus físico de la universidad del valle) gracias a las tecnologías usadas en el desarrollo de este simulador sísmico.

Figura 4. Simulador sísmico tele-operable Universidad del Valle.



Fuente: Pagina web grupo de investigación G7 Universidad del Valle

El dispositivo que mueve la mesa vibratoria consiste fundamentalmente en un motor lineal ajustado a una placa de aluminio o área de carga que posee una fuerza continua y pico de 1,255N y 2,500N, respectivamente, en vez de un cilindro hidráulico y se desliza por medio de un sistema de rodamiento lineal. El movimiento del motor es monitoreado y controlado por un servocontrolador que recibe una señal de referencia de desplazamiento y una señal de realimentación proveniente de un encoder lineal que mide los desplazamientos de la mesa vibratoria. La señal de referencia es generada en un computador y enviada en forma de voltaje a través de una tarjeta de adquisición y control de datos hacia el servocontrolador.

La selección del controlador/amplificador para el motor lineal se fundamenta en un servocontrolador diseñado para motores lineales que sea capaz de entregar al motor las corrientes nominal y pico que va a consumir durante su movimiento (5A y 11.3A, respectivamente). Se selecciona un servo-controlador que puede suministrar corrientes nominales y pico de 6A y 18A, respectivamente. Además tiene un sistema de control en cascada embebido para motores lineales con lazos

de control de corriente, velocidad y posición, acciones feedforward de velocidad y aceleración, compensación de fricción, *cogging* y *ripple*, entrada +/-10V para setpoint externo, y tasas de muestreo para los lazos de posición, velocidad y corriente de 2,000Hz, 4,000Hz y 16,000Hz, respectivamente. La fuerza de *cogging* es una fuerza magnética desarrollada por la atracción entre los imanes permanentes y el núcleo de hierro del motor, la cual sólo depende de la posición relativa de las bobinas del motor con respecto a los imanes. La fuerza de *triple* es desarrollada debido a la variación periódica de la constante de fuerza del motor; es decir, cuando la posición del motor cambia, la inductancia de los devanados varía, resultando en el cambio de la constante de fuerza por el propio desplazamiento del motor.

La selección del dispositivo de realimentación está ligada a las especificaciones del servocontrolador o viceversa, en este caso, el servo provee las especificaciones, así que se selecciona un encoder lineal para medir desplazamientos hasta 21cm, salidas diferenciales tipo RS-422 y velocidad máxima de 4m/s. Las características de diseño de este simulador sísmico se expresan en la tabla xx.

Tabla2. Especificaciones técnicas del simulador sísmico tele-operable universidad del valle.

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	50 X 50 X 1.2	cm
Capacidad de carga	20	Kg
Recorrido máximo	15	cm
Velocidad máxima	Información no disponible	
Aceleración máxima	2.5	g`s
Rango de frecuencia	0 – 20	Hz
Movimiento	Unidireccional	

✓ **Simuladores sísmicos Universidad de los Andes**

La Universidad de los Andes cuenta actualmente con dos simuladores sísmicos. Están ubicados en el laboratorio de materiales y estructuras de dicha universidad.

En primer lugar se hará referencia al simulador sísmico más pequeño (figura 5), el cual corresponde a una mesa vibrante académica, cuyas características se muestran en la tabla xx

Figura 5. Mesa vibratoria (versionacademica) Universidad de los Andes



Fuente: Diseño y construcción de la cimentación para la mesa vibratoria de la Universidad de los Andes

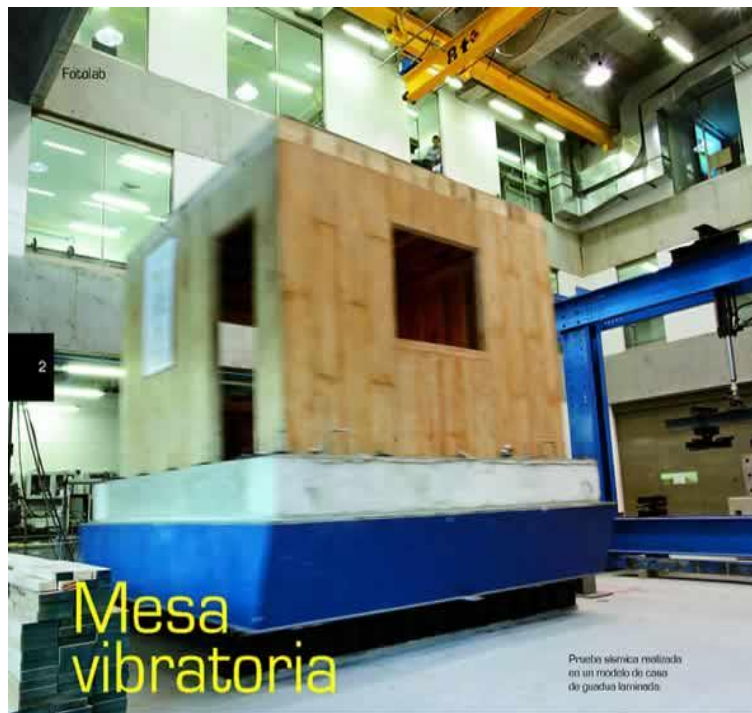
Tabla3 Especificaciones técnicas del simulador sísmico académico Universidad de los Andes.

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	1.05 X 1.05	M
Capacidad de carga	2000	Kg
Recorrido máximo	15	Cm
Velocidad máxima	Información no disponible	
Aceleración máxima	Información no disponible	

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Rango de frecuencia	0 – 50	Hz
Movimiento	Unidireccional	

El segundo simulador corresponde a uno de mayor capacidad (figura 6) en el cual se han realizado ensayos de estructuras a escala real, de acuerdo a las capacidades del equipo. La mesa puede reproducir sismos de diferentes intensidades, hasta de 8 grados en escala de Richter. Antes de someter la estructura a la mesa vibratoria, los investigadores realizan las estimaciones necesarias para predecir su comportamiento en diferentes sismos. Con este análisis numérico adelantado, se introduce la señal o sismo seleccionado a la mesa vibratoria, la cual simula las condiciones que el investigador necesita reproducir para, posteriormente, hacer las correcciones específicas a los modelos teóricos que finalmente se usarán en la práctica.

Figura 6. Simulador sísmico Universidad de los Andes (50 toneladas)



Fuente: Revista contacto Universidad de los Andes

Tabla4. Especificaciones técnicas del simulador sísmico Universidad de los Andes.

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	4.5 X 4.5	M
Capacidad de carga	50000	Kg
Recorrido máximo	30	cm
Velocidad máxima	Información no disponible	
Aceleración máxima	Información no disponible	
Rango de frecuencia	0 – 30	Hz
Movimiento	Unidireccional	

✓ **Simulados sísmico universidad EAFIT**

El laboratorio de investigación en ingeniería sísmica de la universidad EAFIT en Medellín, cuenta con el simulador sísmico más grande del país (figura 7).

Figura 7. Simulador sísmico Universidad EAFIT



Fuente: Página web universidad EAFIT, centro de laboratorios.

El laboratorio es un espacio destinado para la investigación y estudio de la respuesta sísmica de diferentes sistemas estructurales utilizados en la construcción de obras civiles; utilizando básicamente la mesa vibratoria con una

plataforma metálica, sistema motriz hidráulico, todo controlado por un sistema electrónico de alta precisión desarrollado en su mayor parte por personal de la Universidad y empresas nacionales. Sus principales características se resumen en la tabla xx.

Este simulador ha sido usado en proyectos de investigación de las universidades EAFIT, Universidad Nacional (sede Medellín) y Universidad de Medellín.

En el sector productivo, se presta el servicio en el ensayo de sistemas estructurales de mampostería, muros livianos y algunos sistemas prefabricados.

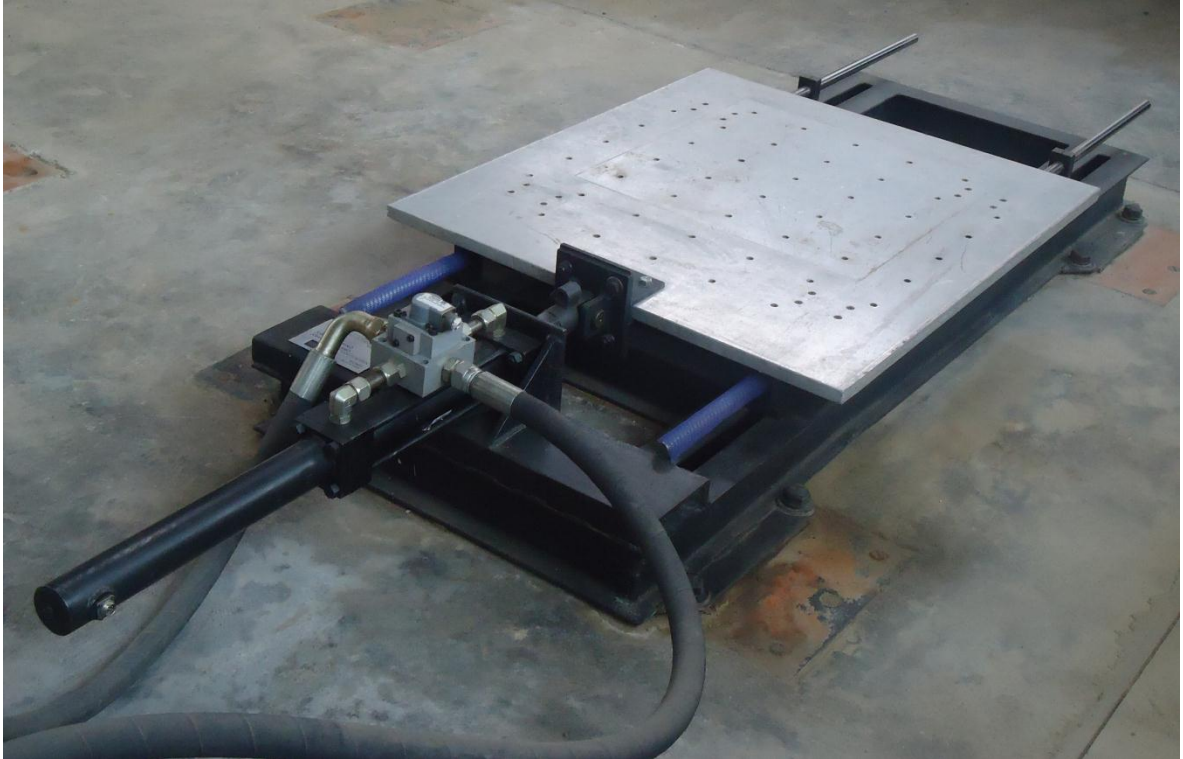
Tabla5. Especificaciones técnicas del simulador sísmico Universidad EAFIT.

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	6 X 6	M
Capacidad de carga	70000	Kg
Recorrido máximo	10	cm
Velocidad máxima	80	cm/s
Aceleración máxima	Información no disponible	
Rango de frecuencia	0.2	Hz
Movimiento	Unidireccional	

✓ **Mesa sísmica Universidad Industrial de Santander**

La mesa sísmica mostrada a continuación (figura 8) ubicada en el laboratorio de estructuras del centro de caracterización de materiales de construcción, edificio Jaime Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander, ha sido un proyecto de la Escuela de Ingeniería Mecánica realizado por el grupo de investigación en Sistemas Dinámicos Control y Robótica DICBOT en cabeza de su director Ingeniero Carlos Borrás Pinilla PhD, Msc., profesor adscrito a esta escuela.

Figura 8. Mesa sísmica Universidad Industrial de Santander.



Fuente: Autores.

El diseño y desarrollo del sistema de control de posición y velocidad de esta mesa vibratoria (segunda etapa del proyecto de la mesa vibratoria) es el objeto de este trabajo de grado, el cual en tuvo una primera etapa de desarrollo e investigación en la cual se logró la construcción de dicho equipo, así como la caracterización dinámica del servoactuador hidráulico y se realizó un estudio del funcionamiento y comportamiento en lazo abierto del mismo. Al final de este primer desarrollo se logró llegar hasta obtener una mesa sísmica construida con los siguientes componentes:

➤ **Masa de reacción:**

El soporte o masa de reacción consiste de un bastidor rectangular de 0.8 x 2 m, construido en acero A36, perfil IPE 120. Adicionalmente en un extremo posee un soporte en forma de pie de amigo, para anclar el actuador hidráulico. Todo el

conjunto de bastidor soporte, es anclado y reforzado, usando lamina HR de ½” de espesor.

➤ **Plataforma móvil:**

La plataforma o superficie para el montaje de los modelos a ensayar está construida en lámina de aluminio 1100 calibrado, rectangular, de 0.9 x 1.1 m y 25 mm de espesor. Posee una matriz de agujeros para anclar los modelos de ensayo mediante tornillos de ½ pulgada.

➤ **Sistema de deslizamiento:**

La plataforma móvil esta soportada sobre el bastidor (masa de reacción) por un conjunto de cuatro rodamientos lineales referencia XR-48-OPN Marca Thompson, montados sobre dos ejes de acero cromados los cuales van sujetos a la estructura del bastidor. Proveen a la mesa de un grado de deslizamiento tal que se considera nula la fricción del sistema.

➤ **Actuador hidráulico:**

El actuador hidráulico es un cilindro Parker de doble vástago con diámetro pistón 2.5 in, diámetro vástago 1.75 in y carrera 10 in.

➤ **Servoválvula:**

El fluido a presión es controlado por una servo válvula MOOG de alto desempeño dinámico serie 73-263 (10 gpm @ 1000psi).

➤ **Sensor de posición LVDT:**

La mesa cuenta con un sensor de posición LVDT Trans-Teck, que tiene un rango de ± 5 in y presenta una no linealidad del 0.5%. El sensor cuenta con un acondicionador de señal Trans-Teck serie 1000, el cual puede ser conectado a la tarjeta de adquisición de datos, PLC o convertidores A/D.

➤ **Acumulador:**

Se instaló un acumulador tipo de vejiga marca HYDAC serie SB 330 (3000 psi) de un galón de capacidad.

➤ **Unidad de potencia hidráulica:**

La unidad de potencia hidráulica es una MTS 505.11, la cual posee una bomba de volumen variable que provee un caudal nominal de 41.6 L/min (11 gpm) y tiene una presión de operación de 21MPa (3000psi).

El sistema hidráulico cuenta con todos los elementos y dispositivos de operación y seguridad necesarios como son: válvula de seguridad para descargar el sistema en caso de sobrecargas, manómetros e indicadores para monitorear presión temperatura y filtros para mantener el buen estado del fluido hidráulico (aceite).

Prestaciones de la mesa sísmica

Como se mencionó al principio de este capítulo, las características técnicas de una mesa sísmica se definen principalmente por sus dimensiones, número de grados de libertad, capacidad de carga y aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos, además, habiendo descrito los componentes de la mesa sísmica objeto de este trabajo de grado, se presenta la tabla xx, la cual ilustra las capacidades de la mesa sísmica.

Tabla 6. Características de la mesa sísmica Universidad Industrial de Santander

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Dimensiones del área de carga	0.9 X 1.1	M
Capacidad de carga	300	Kg
Recorrido máximo	25	Cm
Velocidad máxima	39	cm/s

ESPECIFICACION	VALOR	UNIDADES
Aceleración máxima	2	g`s
Rango de frecuencia	0 – 50	Hz
Movimiento	Unidireccional	

1.2 CONTROL AUTOMATICO

En el progreso de la ingeniería y avances de la ciencia, el control automático ha desempeñado un papel importante e integral debido a que muchos de los procesos modernos industriales tales como el control de posición, velocidad, presión, temperatura, humedad, viscosidad, entre otros, son manejados por sistemas de control dinámico que han sido perfeccionados en el transcurso del tiempo para obtener un óptimo desempeño en una tarea repetitiva y rutinaria.

Podemos definir el control automático como la manipulación directa de las variables de un conjunto de elementos lógicos (PLANTA O PROCESO) por medio de un sistema de control.

1.2.1 Sistemas de control. Un sistema de control es un conjunto de dispositivos de diversa naturaleza (mecánicos, eléctricos, electrónicos, neumáticos, hidráulicos) cuyo fin es controlar una o más variables en el funcionamiento de una máquina o de un proceso.

En todo sistema de control encontramos una señal de entrada que actúa directamente sobre el proceso y una señal de salida suministrada por el sistema.

Para poder asimilar de una forma productiva que es un sistema de control debemos definir primero los componentes que hacen parte del mismo.

1.2.2 Componentes de un sistema de control. Los sistemas de control están conformados por dos o más componentes además de sus conexiones y señales, es por este motivo que es de mucha importancia conocerlos y tener muy presente sus definiciones.

✓ **Variable controlada.**

Es la cantidad o condición física que se mide y controla, comúnmente es la señal de salida (el resultado) del sistema.

✓ **Señal de entrada (Setpoint).**

Es el valor final que se requiere que tenga la variable controlada.

✓ **Señal de error del sistema.**

Es la señal que se genera al comparar continuamente la diferencia entre la señal de entrada y la variable controlada, esta existe hasta que la variable controlada se iguala a la señal de entrada, tomando este comportamiento como el objetivo principal del control.

✓ **Variable manipulada**

Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

✓ **Planta.**

Es el lugar donde se encuentra la variable controlada y puede ser una parte de un equipo o el conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, la cual tiene como propósito realizar una operación en particular

✓ **Proceso.**

En este proyecto llamaremos proceso a cualquier tipo de operación que se vaya a controlar.

✓ **Sistema.**

Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan una tarea determinada.

✓ **Perturbación o ruido.**

Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema, si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna y si se produce por fuera será externa y se tomara como una entrada.

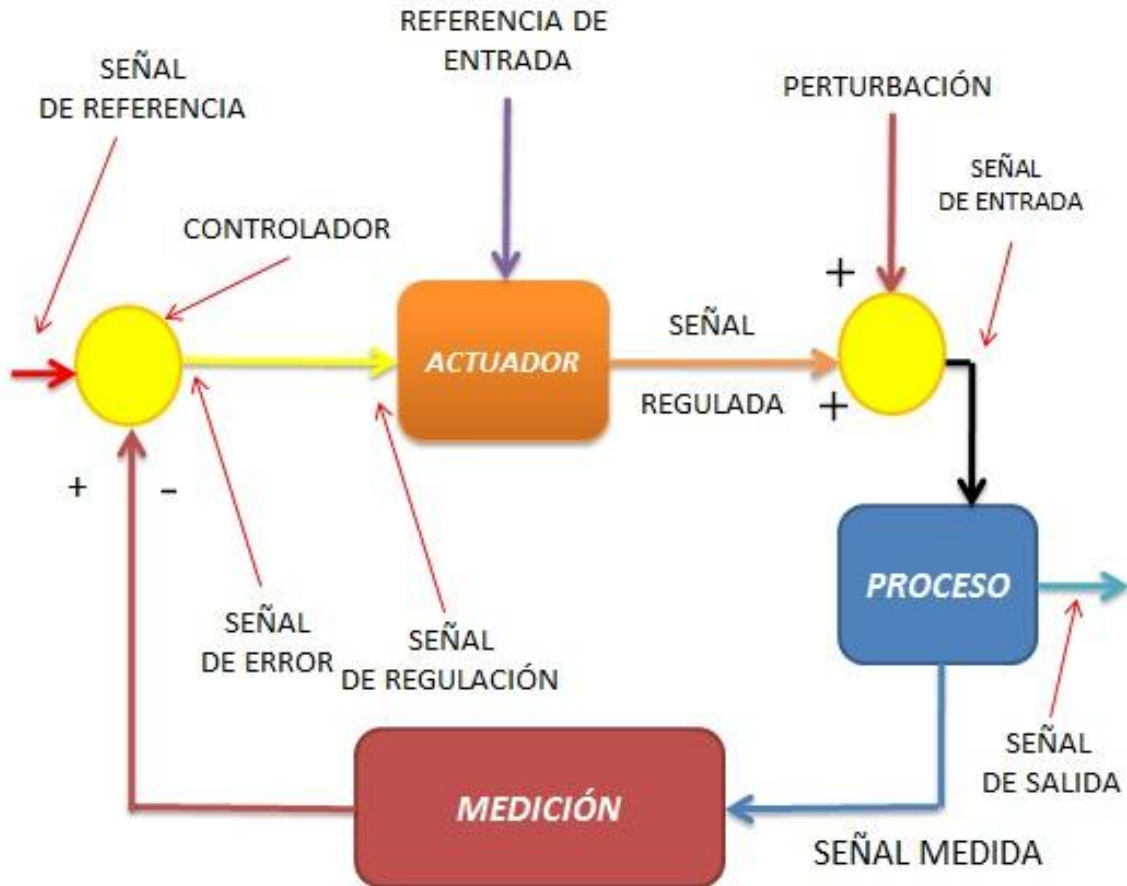
✓ **Controlador.**

Es el elemento que se encarga de comparar el valor real de salida de una planta con la entrada de referencia o setpoint, determina la desviación y produce una señal de error que tiende a reducir la desviación a cero, puede tratarse de un PC o un PLC que realicen las funciones de comparación y computación.

✓ **Control retroalimentado.**

Es una operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

Figura 9. Esquema de bloques de un sistema de control.



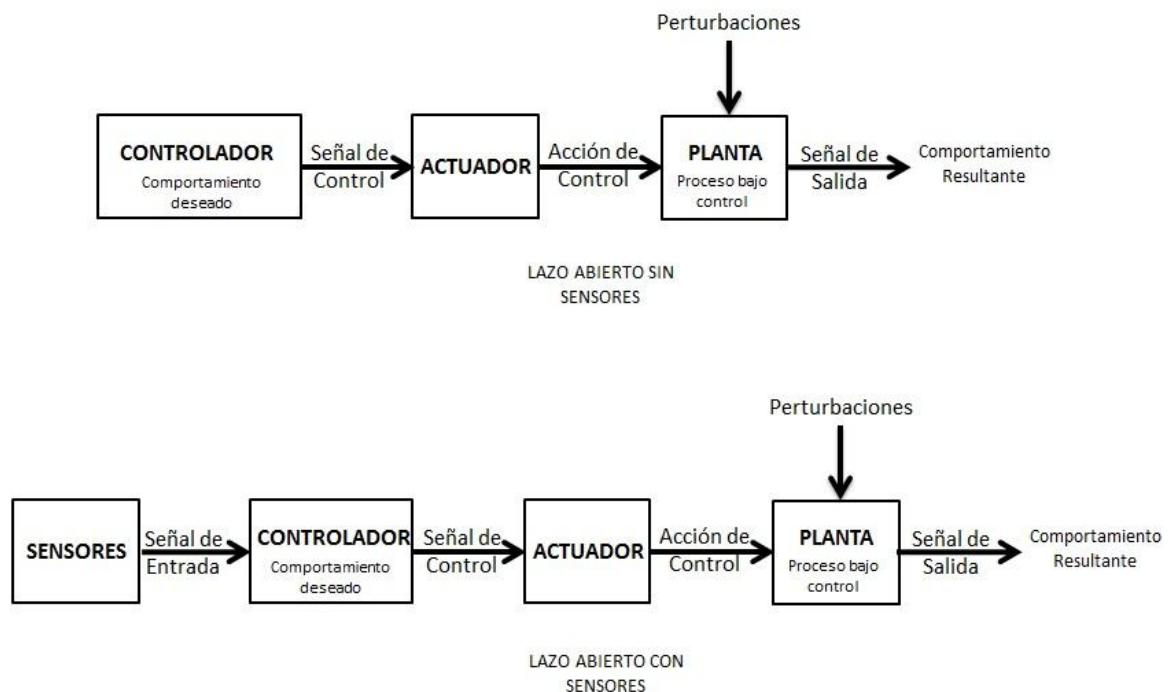
1.2.3 Sistemas de control en lazo abierto y cerrado. Teniendo en cuenta el tipo de procedimiento que tiene el sistema de control con la señal de salida podremos distinguir entre dos tipos de control generales como son los sistemas de control de lazo abierto y de lazo cerrado.

✓ **Sistema de control en lazo abierto.**

Cuando en un sistema de control la acción de control no afecta la señal de salida y esta no se compara con respecto a la señal de entrada (setpoint) se puede considerar esto como un sistema de control en lazo abierto, por lo tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija sobre la señal de

salida. Como resultado de este tipo de operación se puede decir que la precisión del sistema está ligada directamente a la calibración de los componentes y ante la presencia de perturbaciones este tipo de sistemas no realiza la tarea como se requiere. Este tipo de control se usa y se recomienda solo cuando conocemos la relación que hay entre la señal de entrada y la señal de salida además de que no haya perturbaciones internas o externas en el sistema de control.

Figura 10. Diagrama de Bloques de un sistema en lazo abierto.

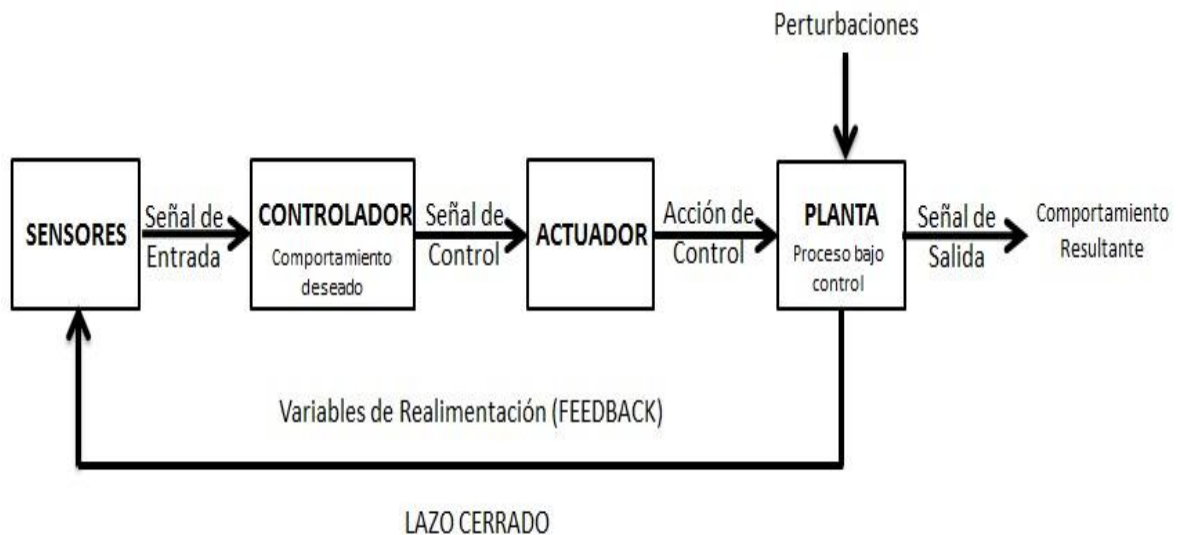


✓ **Sistema de control en lazo cerrado.**

En este tipo de sistemas de control la señal de salida tiene una influencia directa sobre la señal de entrada debido a que la señal de error del sistema se utiliza para corregir la diferencia existente entre estas dos, lo que lleva al final a que la señal de salida sea lo más parecida a la señal de entrada dada por el controlador y así disminuir al máximo la señal de control, a este tipo de efecto sobre los sistemas de control se le denomina realimentación o feedback. Una de las principales ventajas del sistema de control en lazo cerrado es el uso de la realimentación la cual hace

que el sistema se haga más fuerte en consideración con las perturbaciones externas y las variaciones de los parámetros internos que pueden afectar al sistema, es decir que el sistema continuamente está midiendo la señal de salida para así corregir cualquier error del sistema que se presente por perturbaciones internas o externas como se muestra a continuación en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de bloques de un sistema en Lazo Abierto.



1.3 CONTROLADORES Y ACCIONES BASICAS DE CONTROL

En los sistemas de control, el controlador es el componente que se encarga de medir la diferencia entre la señal de salida y la señal de entrada o referencia y producir una señal de control, la cual, se envía al actuador para disminuir el error producido por la diferencia entre las señales y mantener la variable controlada en el valor requerido o estipulado en el setpoint.

Hay varios tipos de controladores y se pueden clasificar de acuerdo al tipo de energía que usan en su operación, los hay neumáticos, hidráulicos, electrónicos, digitales o alguna combinación de estos. También se pueden clasificar de acuerdo al tipo de acciones que ejecuten y pueden ser de dos posiciones (On-Off),

proporcionales, integrales y derivativos. Estos tipos de controladores se seleccionan teniendo en cuenta los factores importantes como son la seguridad, bajo costo, confiabilidad, precisión, condiciones de la planta y operación, etc.

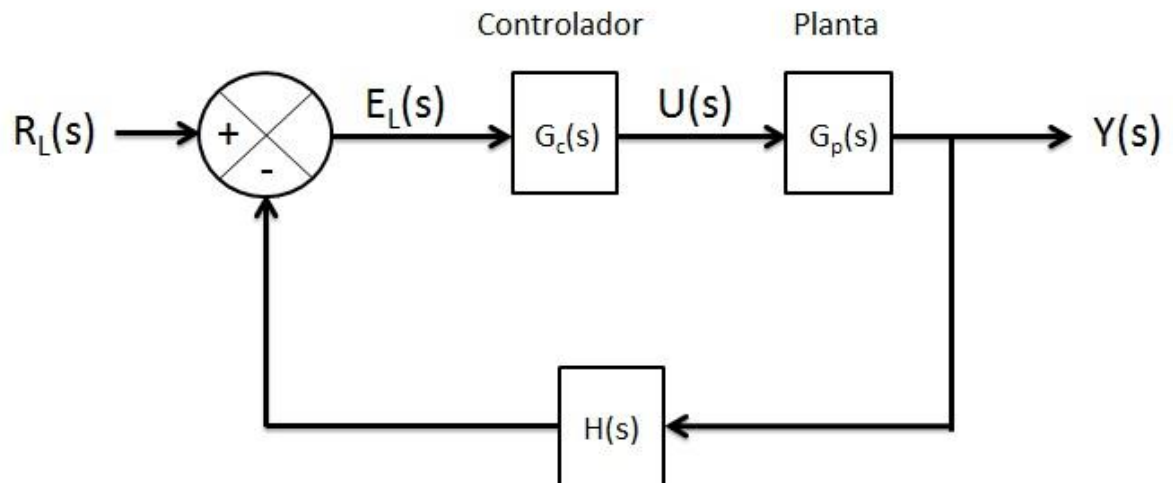
1.3.1 Modos de operación del controlador.

- ✓ Manual. Cuando el controlador está en modo manual, este no toma decisiones, entonces el operario puede hacer cambios en el setpoint.
- ✓ Automático. En este modo, el controlador decide y emite la señal adecuada hacia el elemento final de control, todo esto con el fin de mantener la variable controlada en el valor del setpoint.
- ✓ Local. En este tipo de modo de control el operador controla el punto de referencia desde el panel donde está ubicada la maquina mediante un interruptor o perilla.
- ✓ Remoto. Es cuando el setpoint se fija desde otro dispositivo operador, controlador, relevador o computador.
- ✓ Acción directa. En este modo hay un incremento de la señal de en entrada al controlador teniendo como resultado un incremento en la señal de salida.
- ✓ Acción inversa. En este modo hay un incremento de la señal de en entrada al controlador teniendo como resultado un decremento en la señal de salida.
- ✓ Controladores auto operados. Son elementos económicos y muy sencillos que se integran a una unidad y utilizan la potencia desarrollada por el elemento de medición para hacer su operación específica.

1.3.2 Acciones de control. Una acción de control no es más que la manera en la que el controlador automático crea la señal de control. Conocer este comportamiento de las acciones de control es muy importante para pronosticar la respuesta del sistema, particularmente en los casos en donde las funciones de transferencia no son tan específicas y como consecuencia a esto se puede seleccionar la acción de control más adecuada para cada aplicación del sistema.

En la imagen mostrada a continuación (Figura 12) se muestra la configuración de un controlador de un único lazo con un modelo lineal el cual servirá de guía para las diferentes acciones de control que explicaremos a continuación.

Figura 12. Configuración del sistema.



Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Paul H. Lewis-Chang Yang.

✓ **Acción de control proporcional.**

Para el control proporcional la señal de salida es una señal con un factor de ganancia controlada (K_p) teniendo en cuenta el porcentaje de error. Esta ganancia controlada se da por la relación entre la señal de entrada y la señal de salida del controlador mediante la siguiente ecuación en función del tiempo o en transformada de Laplace

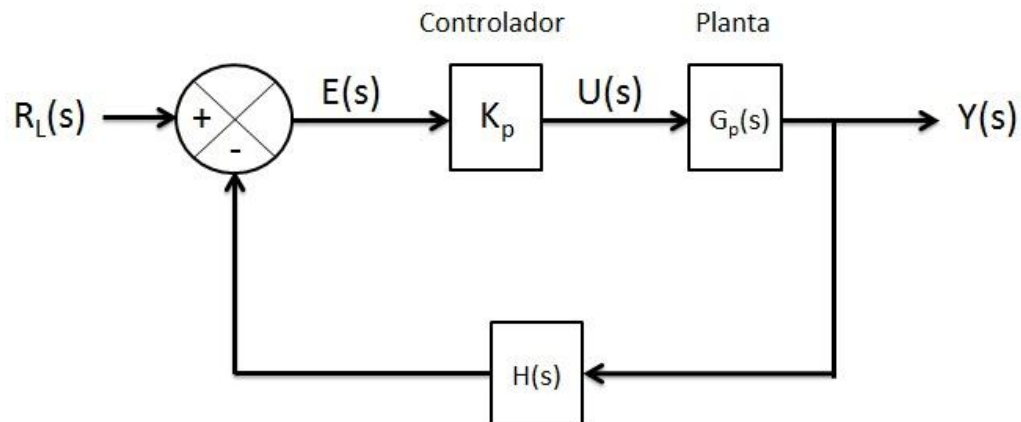
$$\frac{Y(s)}{R_L(s)} = \frac{K_o G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)H(s)} \quad 1$$

Y si $K_p G_p(s)H(s) \gg 1$ entonces la ecuación se transformaría en

$$\frac{Y(s)}{R_L(s)} = \frac{1}{H(s)} \quad 2$$

Si podemos hacer que el sistema se comporte de acuerdo a la ecuación 2 en la práctica podríamos decir que la función de transferencia del sistema se comporta de manera ideal ya que la expresión $1/H(s)$ relaciona $R_L(s)$ con $Y(s)$ y esto se logra mediante un aumento de K_p , sin embargo un aumento sustancial en el factor de ganancia controlada conduciría a un deterioro en la estabilidad del sistema.

Figura 13. Diagrama de bloques de un controlador proporcional.



Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Paul H. Lewis-Chang Yang..

En la siguiente figura observamos la respuesta dinámica sin perturbaciones para un sistema de segundo orden en el cual el tiempo de respuesta y la precisión son muy importantes, al variar el valor de la constante proporcional se observa que si

este se aumenta en forma significativa el sistema tiende a aumentar la amplitud y llega al punto de referencia en un mayor tiempo oscilando entre este punto por lo tanto se debe encontrar un valor en el que la amplitud no sea tan grande y el tiempo sea el menor posible para encontrar el punto de referencia.

Figura 14. Señal de salida al variar la constante proporcional K_p .



✓ **Acción de control integral.**

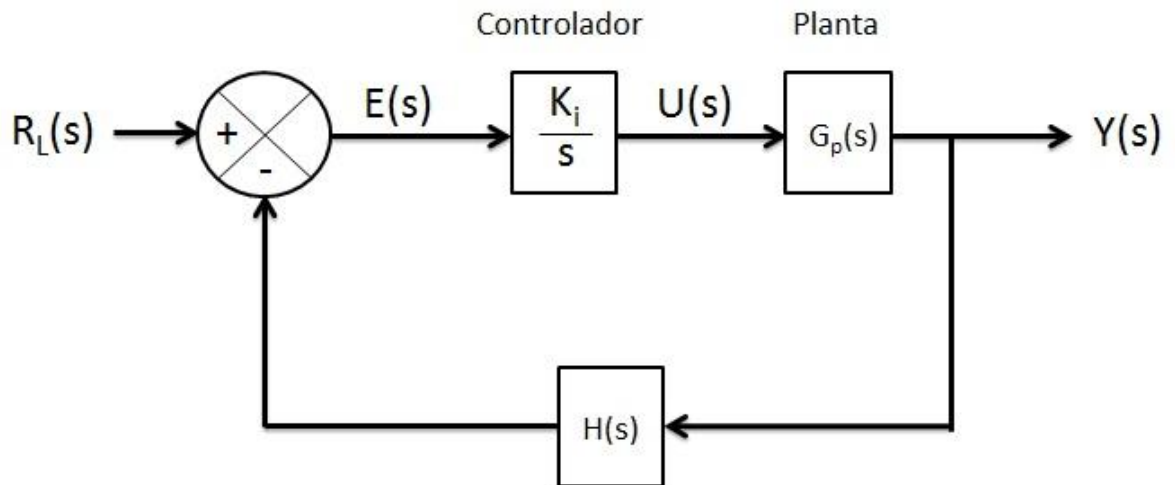
En el control integral la señal de salida del sistema $u(t)$ varía en razón proporcional a la señal de error $e(t)$ y se representa por la siguiente ecuación en función del tiempo o Laplace

$$u(t) = K_{it} * \int e(t) dt \quad \text{ó} \quad \frac{Kt}{s} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad 3$$

Cuando $e(t)$ se duplica $u(t)$ cambia a doble velocidad y si el error es igual a cero, el valor de $u(t)$ permanece invariable. En casos esta acción de control también es llamada control de reposición o restablecimiento.

En la acción de control integral debido a que la corrección de la señal de salida se hace proporcional al error, este en su naturalidad busca reducir el error a cero lo cual es la principal ventaja de este control pero esta acción tiende a sobre corregir el error originando así una respuesta oscilatoria y en algunos casos inestabilidad por lo cual esta es una desventaja de este tipo de control.

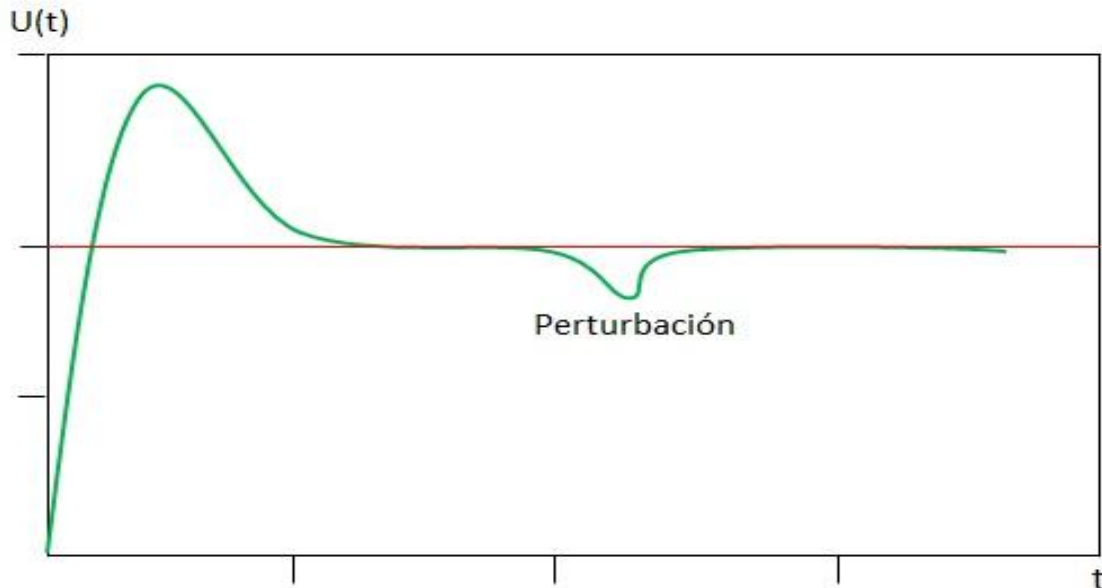
Figura 15. Diagrama de bloques controlador integral.



Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Paul H. Lewis-Chang Yang.

Cuando existe una perturbación externa al sistema y tenemos una acción de control integral el controlador corrige el error en estado estable ante la presencia de dicha perturbación lo cual se puede observar en la figura 16.

Figura 16. Respuesta de un control integral ante una perturbacion externa.



✓ **Acción de control proporcional e integral (PI).**

Esta acción de control como su nombre lo indica es una combinación entre el control proporcional e integral lo cual hace que se produzca una corrección que es la suma de las dos contribuciones individuales de cada control respectivamente, a este control se le denomina control (PI), su relación matemática y función de transferencia se muestra a continuación.

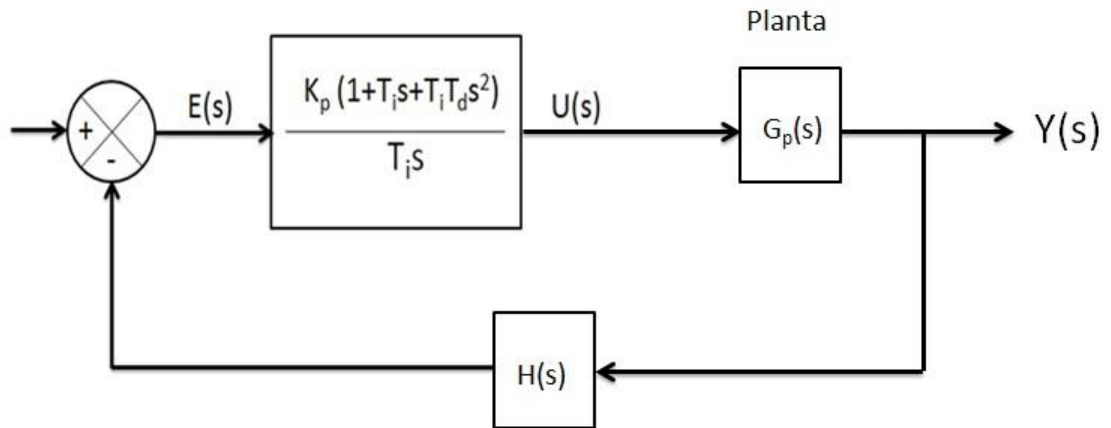
$$U(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt$$

4

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i * s}\right)$$

Se observa en la ecuación que K_p (ganancia proporcional) afecta tanto el incremento proporcional como integral y T_i es llamada tiempo integral, ambos valores K_p , T_i son ajustables. La inversa de T_i se denomina tiempo de reajuste y es el total de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control.

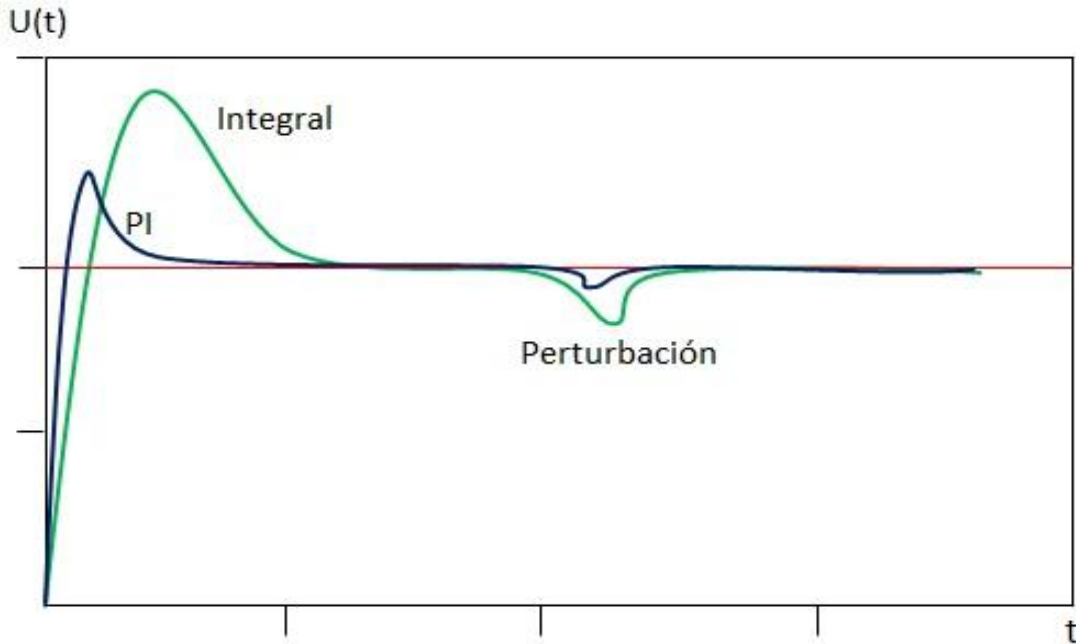
Figura 17. Diagrama de bloques controlador proporcional-integral (PI).



Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

Con la acción de control proporcional – integral se puede eliminar la condición de inestabilidad limitada ya que el control proporcional estabiliza el sistema y el integral elimina el error en estado estacionario como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 18. Respuesta de un control integral ante una perturbacion externa.



✓ **Acción de control proporcional – derivativa (PD).**

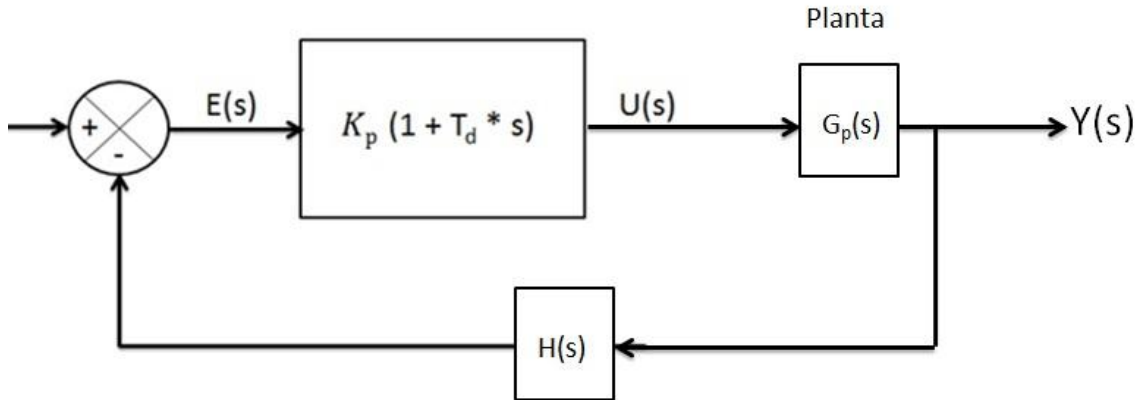
Esta acción de control también se le conoce como acción de control PD y sucede cuando el valor de la señal de salida del controlador es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error, o sea hace una corrección la cual es proporcional a la derivada del error con respecto al tiempo, esta acción de control se relaciona matemáticamente y en función de transferencia de la siguiente manera respectivamente.

$$U(t) = K_p * e(t) + K_p * T_d * \frac{de(t) dt}{dt}$$

5.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * (1 + T_d * s)$$

Figura 19. Diagrama de bloques controlador proporcional-derivativo (PD).

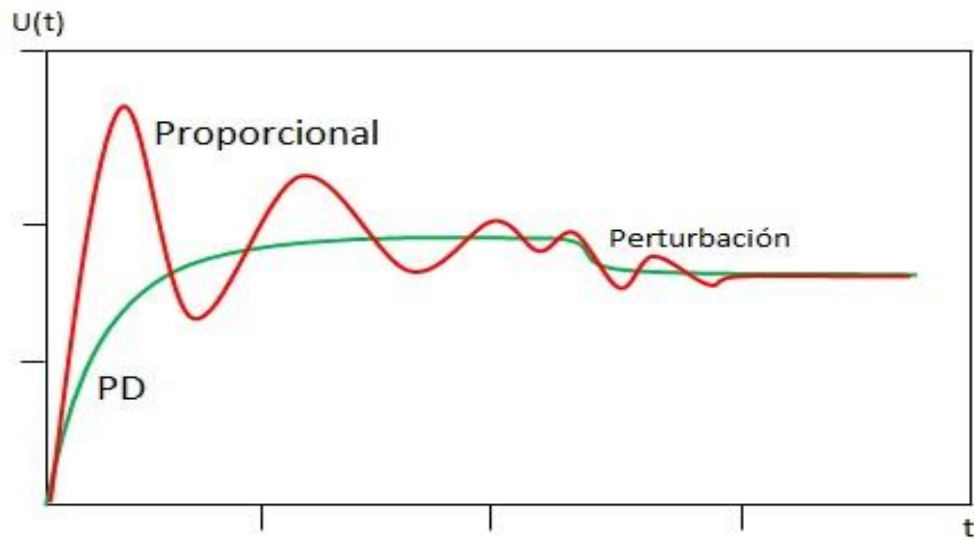


Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

En este diagrama de bloques T_d es una constante llamada tiempo derivativo o tiempo de adelanto y es un intervalo de tiempo en el cual la acción de velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. Se dice que el control derivativo tiene una función previsiva, ya que se anticipa al error, debido a que responde a la rapidez del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud real del error sea grande. Esta acción de control derivativa nunca se usa sola, ya que solo es eficiente en intervalos de tiempo transitorios y posee la desventaja de amplificar señales de ruido que pueden desencadenar en un efecto de saturación en el actuador.

En la figura mostrada a continuación podemos ver que en un sistema determinado la respuesta de la acción de control PD es más rápida y eficaz al inicio ya que responde de manera rápida a la señal de error, en cambio cuando se acerca al punto de referencia, la respuesta con respecto al cambio de la señal de error es más suave y la curva se atenúa hacia el punto de referencia sin oscilaciones, incrementando la precisión de la respuesta del sistema, además de esto también actúa más rápido al existir algún tipo de perturbación externa.

Figura 20. Diferenciación grafica de respuesta proporcional vs respuesta PD.



✓ **Acción de control proporcional - integral - derivativa (PID).**

A la combinación de los efectos de operación de proporcional, integral y derivativo se le llama acción de control proporcional - integral - derivativa (PID) la cual presenta las ventajas individuales de cada una de las tres acciones de control. Esta acción de control es capaz de mantener una variable o un proceso en un punto de referencia deseado dentro del rango de medición del sensor que la mide, el controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar, luego el controlador resta la señal actual a la señal del punto de consigna obteniendo así la señal de error la cual determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medido. Esta señal de error es utilizada por cada una de los tres parámetros del controlador PID para generar tres señales que sumadas componen la señal que el controlador va a utilizar, la señal resultante de la suma de estas tres señales se llama variable manipulada. La señal del control proporcional solo requiere del cálculo de un parámetro (ganancia K_p) la cual se genera de forma bastante rápido, sin embargo este controlador posee una característica indeseable que se conoce como error en estado estacionario (offset), el control integral elimina el offset debido a la respuesta integral del error pero se obtiene una mayor desviación del setpoint (parámetro

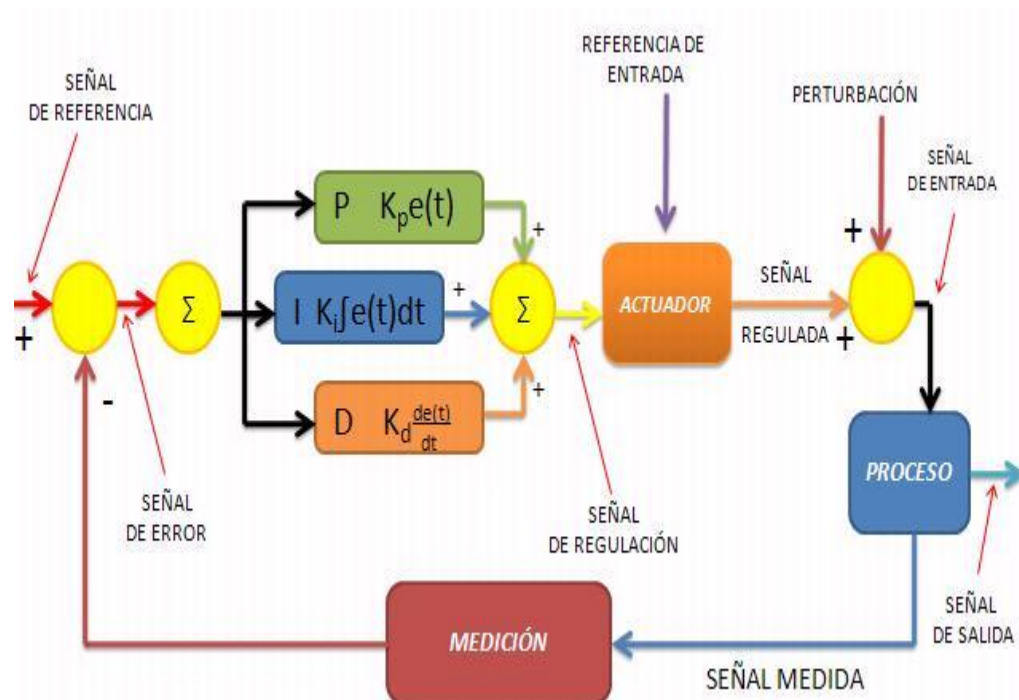
donde el error tiende a cero) teniendo una respuesta más lenta con un periodo de oscilación mayor que la señal del control proporcional, el control derivativo da una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error) logrando así la eliminación del exceso de oscilaciones cuando hay un cambio en el valor absoluto del error, este control no elimina el offset y solamente actúa si el error es variable si no es variable solo funcionan el control proporcional e integral. La relación matemática y función de transferencia de este tipo de acción de control respectivamente son las siguientes.

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int e(t) dt + K_p * T_d * \frac{de(t)}{dt}$$

6.

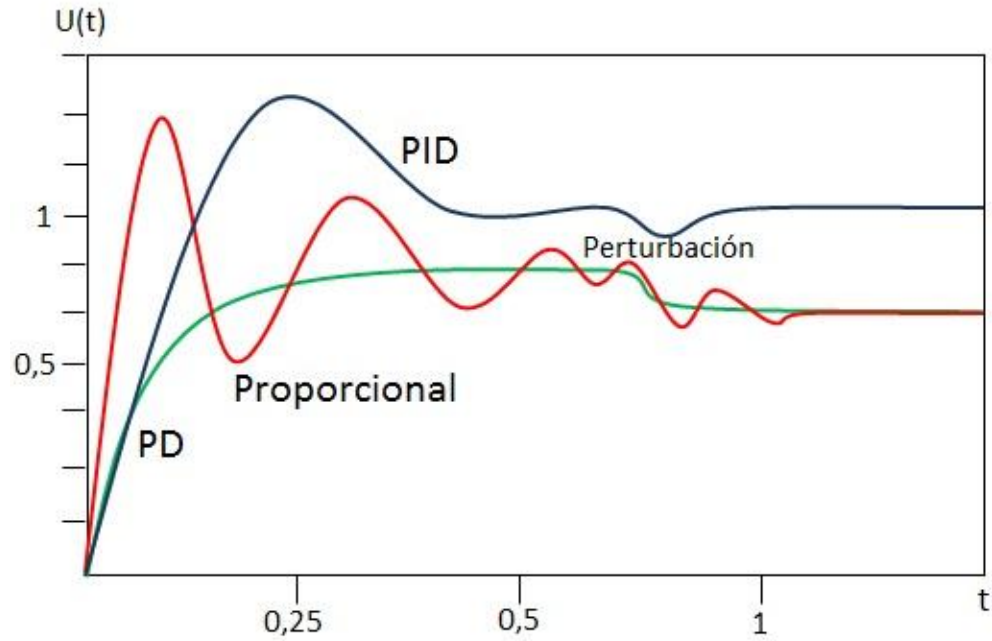
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i * s} + T_d * s \right)$$

Figura 21. Diagrama de bloques controlador proporcional-integral-derivativo (PID).



Fuente. Adaptado de Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

Figura 22. Diferenciación grafica de respuesta proporcional, PD y PID.



En esta imagen podemos observar la diferencia de la respuesta del sistema para cada uno de los distintos tipos de acción de control como son el proporcional, proporcional-derivativo y el proporcional-integral-derivativo.

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El proceso de diseño del sistema de control de la mesa sísmica debe basarse en una metodología ordenada, como todo procedimiento de diseño, con la cual se pueda ir evaluando el comportamiento del sistema a medida que se avanza en el desarrollo del mismo. Se desea llegar a la obtención de un modelo validado experimentalmente siguiendo la metodología presentada en figura 23.

Figura 23. Metodología de diseño del sistema de control



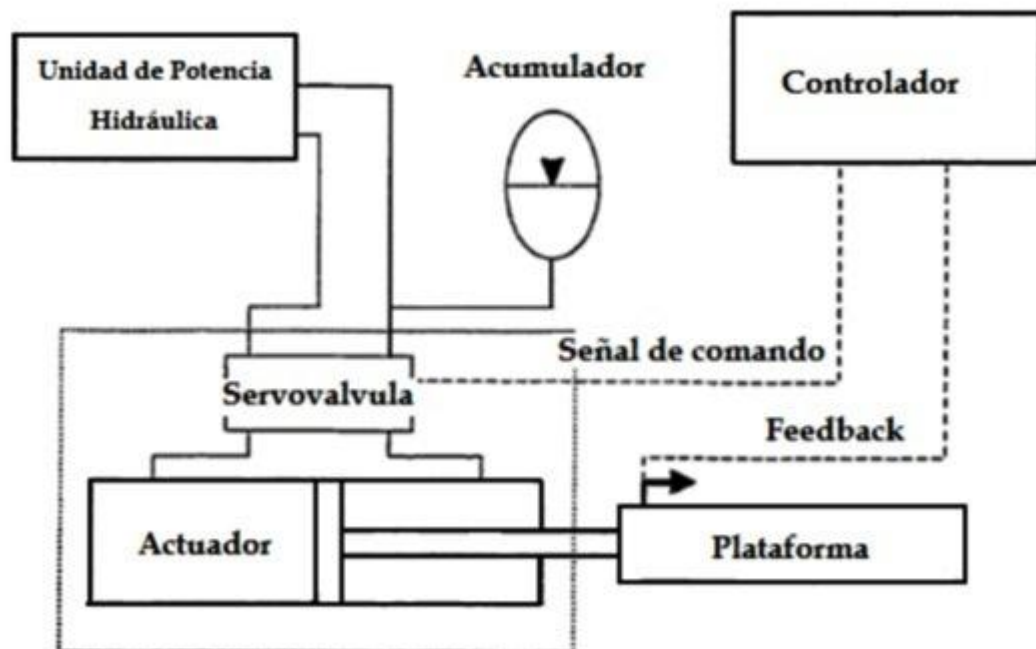
Fuente: Autores

Para el diseño y desarrollo del sistema de control propuesto se debe comenzar con el modelamiento matemático que resulta del análisis del sistema dinámico de lo que se ha denominado planta, que corresponde, a un esquema simplificado y en conjunto de los componentes de la mesa sísmica. A partir de esto se desea obtener un modelo matemático que pueda predecir el comportamiento del conjunto mecánico (servoactuador, mesa sísmica, sistema de potencia).

2.1 MODELADO DINAMICO DE LA MESA SISMICA

Este modelado dinámico se realiza a partir de la aplicación de las leyes físicas que describen particularmente el comportamiento de cada componente para luego integrar todo en un modelo matemático que describa el comportamiento conjunto de la planta.

Figura 24. Esquema simplificado de la planta (conjunto mesa sísmica)



Fuente: Tesis de grado Caracterización dinámica de un servoactuador hidráulico

Se espera que el modelo matemático culmine con la elaboración de la función de transferencia del sistema, que es en últimas lo que en control se desea alcanzar, para así, tener una representación del sistema en términos de una relación entre las señales de entrada y salida que nos ayude a predecir el comportamiento de la planta ante una perturbación externa.

2.2 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.¹

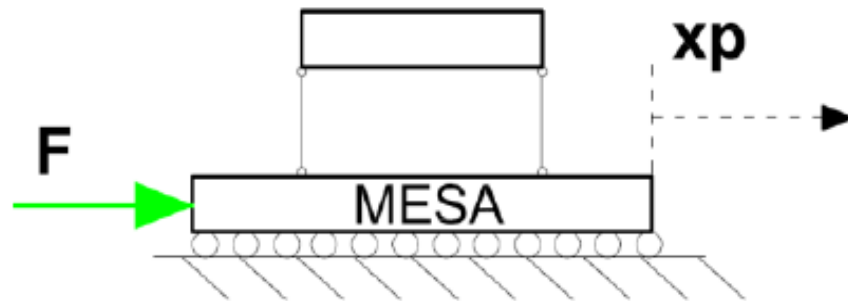
Se trazaran una serie de pasos y consideraciones a seguir para la obtención del modelo matemático de la planta, a partir de una identificación de cada componente físico presente e instalado de la mesa sísmica.

La planta corresponde a una mesa sísmica unidireccional de un grado de libertad y el movimiento realizado por la misma es horizontal. Por otro lado, la frecuencia de la réplica del movimiento se presume este en un punto por debajo de la frecuencia natural de la vibración de la columna del aceite atrapada en el actuador.

La carga útil del sistema ya no es rígida, de manera que el modelo del simulador sísmico se transforma en un sistema de MDOF. La plataforma del simulador y la muestra son un sistema dinámico acoplado. El actuador está representado por una fuerza externa aplicada al sistema. La inercia de las fuerzas generadas por el movimiento de la mesa allí y el cortante en la base creada por el modelo que se equilibran con la fuerza del actuador. El actuador ha de producir la suficiente fuerza para mover la masa rígidamente fijada a la mesa y contrarrestar el cortante en la base producida por la muestra. Esta fuerza, como se mencionó anteriormente, es directamente proporcional a la presión del sistema hidráulico.

¹ El modelo matemático fue tomado de la tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico ya que este proyecto de grado es la continuación al trabajo realizado en la mesa sísmica.

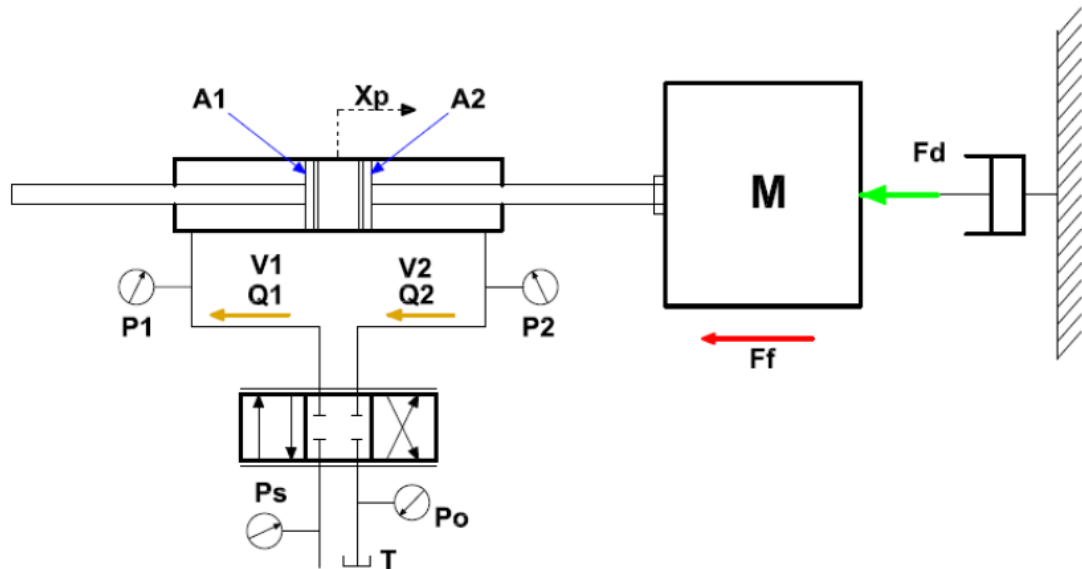
Figura 25. Esquema de la fuerza resultante en la mesa.



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

La fuerza generada por la muestra en su base es una variable que depende de la evolución temporal de entrada, y su valor es necesario para verificar si los límites de capacidad del actuador se han superado. En esta representación, el cortante en la base causado por la muestra se sustituye por una fuerza externa que actúa sobre la plataforma, y el funcionamiento interno de la actuador es prevalente sobre la servo válvula, esquemáticamente representados. Teniendo en cuenta este ejemplo, la ecuación de la fuerza total del actuador puede ser establecida. Esta ecuación incluye también la fuerza necesaria para superar la fuerza de fricción en el pistón. Esta ecuación representa la demanda de la fuerza en el sistema. La potencia entregada por el actuador que sirve tanto para mover la plataforma en sí y la muestra y para romper la fuerza de fricción que es producido por el funcionamiento interno de los sellos del cilindro. Entonces el total de ecuación de balance de la fuerza del sistema puede ser formulada como tal.

Figura 26. Diagrama con nomenclatura del servoactuador hidráulico



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

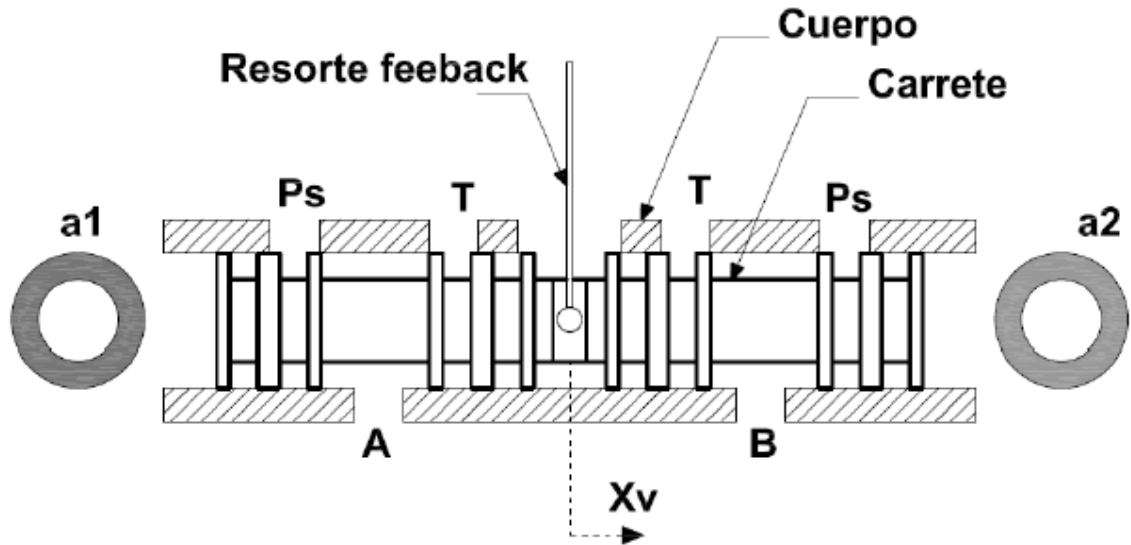
La figura muestra el diagrama esquemático de los servo-mecanismo que representa los diferentes componentes de la mesa sísmica, donde P_s es la presión de trabajo del aceite; P_o es presión del aceite que retorna a tanque; el X_p es el desplazamiento horizontal del pistón; i es corriente eléctrica entrada servo-válvula; $A1$ y $A2$ son áreas eficaces del pistón; $P1$ y $P2$ son las presiones en los dos compartimientos; $Q1$ es el flujo en el compartimiento 1; $Q2$ es el flujo del compartimiento 2; M es masa de la plataforma. Debido a que el amortiguamiento en la estructura es muy pequeño, se ignora en este modelo para el análisis de conveniencia. Las siguientes ecuaciones dinámicas que se deducen del sistema de accionamiento hidráulico describen las características físicas de la mesa vibratoria:

2.3 ANÁLISIS DE LA SERVOVÁLVULA

La válvula se supone subtraslapada y simétrica, suponemos que la inercia y la fricción de la carga son pequeñas comparadas con la gran fuerza hidráulica, también se supondrá en esta parte que el fluido es incompresible y la fuerza de

inercia del actuador de potencia despreciable. Se supone igualmente como es usual que el área del orificio (el ancho de la ranura en la manga de válvula) en cada puerto es proporcional al desplazamiento del spool.

Figura 27. Componentes de la servoválvula MOOG serie 76-263.



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

El flujo a través de los orificios de la servoválvula se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$Q_1 = C_d * a_1 * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_S - P_1)}$$

$$Q_2 = C_d * a_2 * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_2 - P_0)}$$

7

C_d Es el coeficiente de descarga, que es un factor de corrección por las pérdidas de energía de fluido a través de un orificio.

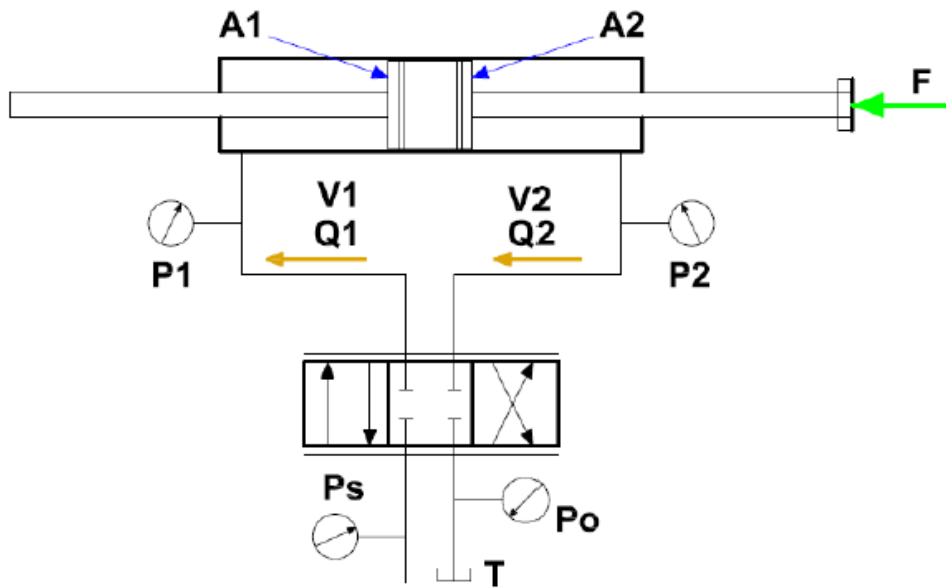
El diferencial de presión es obtenido:

$$P_0 = 0$$

$$P_S = P_1 + P_2$$

8

Figura 28. Esquema de presiones y flujo en el actuador y servoválvula



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

Además se supone que la presión de retorno P_0 en la línea de retorno es pequeña, por lo tanto puede despreciarse. Por lo tanto se define el diferencial de presión entre las cámaras del cilindro como:

$$\Delta P_L = P_1 + P_2$$

$$P_1 = \frac{P_S + P_L}{2}$$

$$P_2 = \frac{P_S - P_L}{2}$$

9

Si se considera que la válvula es simétrica y se asume en esta parte que el fluido es incompresible para simplificar el modelo, se puede decir que los caudales de cada una de las vías de la servoválvula son iguales. Para que la ecuación de caudal quede en función del desplazamiento del (carrete) spool se interpreta el área de orificio proporcional a este, y se da la igualdad aplicando una constante de proporcionalidad:

$$a = k * x_v \quad 10$$

La constante k está en función de los parámetros geométricos de la servoválvula. Remplazando obtenemos:

$$Q_1 = Q_1 = C_d * k * x_v * \sqrt{\frac{1}{g} * (P_S - P_L)} \quad 11$$

Como el caudal es el mismo cuando la corredera principal se desplaza hacia la izquierda o derecha de la posición central, debido a la simetría de cada una de las vías en la servoválvula:

$$Q_1 = Q_1 = Q_L = C_d * k * x_v * \sqrt{\frac{1}{g} * (P_S - P_L)} \quad 12$$

Se usa el teorema de Taylor [1] para linealizar el caudal. El teorema expresa que si una función es infinitamente derivable en un intervalo dado, puede representarse como una serie de potencias. En cierto modo se trata de una especie de polinomio con infinitos términos pero como queremos obtener una expresión lineal que converja en y que se refiere a la posición central del spool por ser el punto de operación. Se evalúa la serie para el primer término y considerando una pequeña perturbación alrededor de la posición de trabajo:

$$Q_L = \left(\frac{\partial Q_L}{\partial x_v} \right)_{x_{v_0}, P_{L_0}} * x_v + \left(\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right)_{x_{v_0}, P_{L_0}} * P_L \quad 13$$

Abreviando un poco tenemos:

$$Q_L = k_q * x_v + k_c * P_L$$

$$k_q = \left(\frac{\partial Q_L}{\partial x_v} \right)_{x_{v_0}, P_{L_0}} = C_d * k * \sqrt{\frac{1}{g} * (P_S - P_L)}$$

$$k_c = \left(\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right)_{x_{v_0}, P_{L_0}} = - \frac{C_d * k * x_{v_0} * \sqrt{1/\rho}}{2 * \sqrt{P_S - P_{L_0}}} \quad 14$$

Los coeficientes k_c y k_q se llaman coeficientes de la válvula varían con el punto de operación del sistema.

Ya que el efecto predominante en la respuesta del sistema está dado por el cilindro, se desprecian los efectos de amortiguación viscosa, fricción e inercia para el modelo de la dinámica del spool.

$$x_v = K_i * k_u * u \quad 15$$

Donde es el desplazamiento del spool de la servoválvula, es la ganancia de carrera del spool para una entrada de corriente, y es la ganancia de la entrada de corriente sobre la entrada de voltaje.

2.4 ANÁLISIS DEL ACTUADOR

En esta parte del proceso se considera la compresibilidad del fluido y las pérdidas de flujo (fugas) en la servoválvula. El módulo de Bulk es una constante que

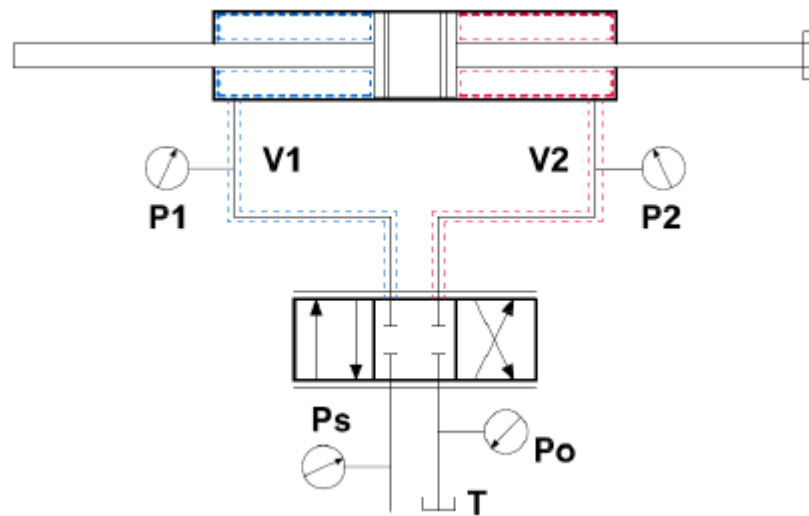
representa el cambio de volumen cuando el fluido es presurizado y obedece a la siguiente expresión:

$$\beta = V * \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad 16$$

Se reacomoda la ecuación para vincularla al modelo:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{V}{\beta} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad 17$$

Figura 29. Esquema de volúmenes contenidos en cámaras del servoactuador.



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

Se analiza el flujo de aceite en cada una de las cámaras de actuador.

$$Q_{c_1} = \frac{V_1}{\beta} * \dot{P}_1 + \dot{V}_1 \quad 18$$

Definiendo a V_1 como el volumen confinado en la cámara 1 del cilindro (V_{c1}), más el volumen desplazado por el pistón.

$$V_1 = V_{c1} + A_p * x_p \quad 19$$

Derivando la ecuación obtenemos la variación del volumen respecto a la posición del embolo en el cilindro.

$$\dot{V}_1 = A_p * \dot{x}_p \quad 20$$

Si el volumen desplazado por el cilindro es bastante menor comparado con el volumen en la cámara del cilindro, la ecuación se reduce:

$$V_1 \cong V_{c1} \quad 21$$

El volumen de cada una de las cámaras es el mismo, y el volumen total es el doble de cualquiera de las cámaras. Reemplazando en la ecuación.

$$Q_{c1} = \frac{V_T}{2\beta} * \dot{P}_1 + \dot{V}_1 + A_p * \dot{x}_p \quad 22$$

Se desarrolla del mismo modo para la otra cámara del cilindro pero teniendo en cuenta el signo por el desplazamiento del spool:

$$Q_{c2} = -\frac{V_T}{2\beta} * \dot{P}_2 + \dot{V}_2 + A_p * \dot{x}_p \quad 23$$

El caudal de carga se define como la suma del caudal de pérdidas más el promedio de los caudales en las cámaras del cilindro:

$$Q_L = C_f * P_L + \frac{Q_{c1} + Q_{c2}}{2} \quad 24$$

En el que C_f el coeficiente total de fugas. El efecto:

$$Q_L = C_f * P_L + A_p * \dot{x}_p + \frac{V_T}{4 * \beta} * \dot{P}_L \quad 25$$

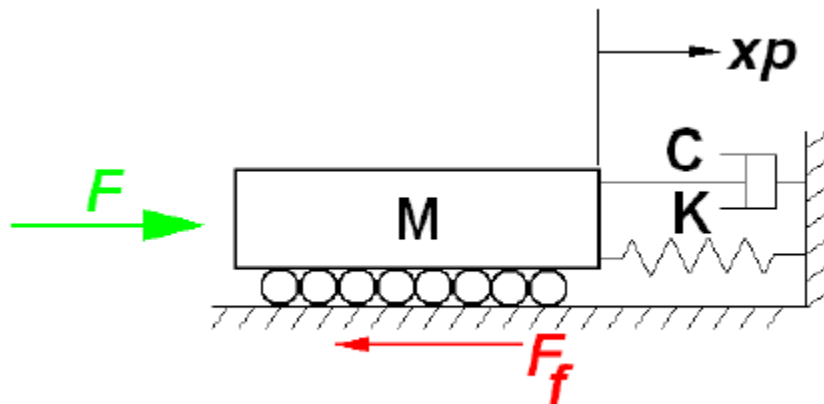
Si se iguala las ecuaciones de Q_L que hay hasta el momento, se reemplaza la ecuación 4.15 y se agrupan términos resulta finalmente:

$$\dot{P}_L = \frac{V_T}{4 * \beta} * [-(C_T + k_c) * P_L - A_p * \dot{x}_p + K_i * k_u * u] \quad 26$$

2.5 ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Para al análisis matemático del sistema nos basamos en el esquema físico que represente de una manera simplificada las variables físicas involucradas y aplicamos la **segunda ley de newton**.

Figura 30. Modelo físico simplificado de la mesa junto con la masa de prueba



Fuente: Tesis de grado Modelado y Caracterización Dinámica de un Servoactuador Hidráulico.

$$\sum F = M * a$$

27

$$A_p * P_L - (c * \dot{x}_p) - (K * x_p) - F_f = M * \ddot{x}_p$$

La fuerza de fricción es muy pequeña comparada con las demás fuerzas involucradas debido a que la mesa se está deslizando sobre cojinetes de deslizamiento que reducen la acción esta fuerza, haciéndola despreciable.

Por tanto la ecuación se reduce a:

$$A_p * P_L - (c * \dot{x}_p) = M * \ddot{x}_p$$

28

Reorganizando la ecuación tenemos:

$$A_p * P_L - (c * \dot{x}_p) = M * \ddot{x}_p$$

29

Haciendo un resumen, las ecuaciones diferenciales que modelan el sistema o planta son:

$$\dot{P}_L = \frac{V_T}{4 * \beta} * [-(C_T + k_c) * P_L - A_p * \dot{x}_p + K_i * k_u * u]$$

30

$$\ddot{x}_p = \frac{A_p}{M} * P_L - \frac{c}{M} \dot{x}_p - \frac{K}{M} * x_p$$

En la siguiente tabla se establecen las constantes y las propiedades físicas que se pueden hallar y establecer con respecto al modelo.

Tabla 7. Propiedades del modelo matemático.

Propiedad/Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Módulo de Bulk	B	4.6e8	N/m^2
Presión de suministro	P_s	3000	psi
Gravedad	G	9.81	m/s^2
Área efectiva del cilindro	A_p	16.15e-4	m^2
Volumen total	V_T	4.34 e -4	m^3
Masa de prueba	M	85.3	Kg
Densidad del fluido	P	858	Kg/ m^3

Fuente: Tesis de grado Caracterización dinámica de un servoactuador hidráulico. Establecidos los parámetros del sistema se calcula la frecuencia natural del servo actuador que está dado por la ecuación, que corresponde a una servoválvula de 2 etapas con un actuador hidráulico no diferencial:

$$\omega = \sqrt{\frac{4\beta(A_p)^2}{MV_T}} = 360 \text{ rad/s}$$

31

$$\omega = 57.3 \text{ Hz}$$

Lo que indica que el sistema presenta un régimen de resonancia alrededor de este valor.

Se realiza la transformada de Laplace para expresar el modelo como función de transferencia donde u deberá ser la entrada del sistema y x_p la salida. Esto permite agrupar parámetros para facilitar la validación del modelo.

El valor de u se dará en voltios (mV) y es trabajo del amplificador operacional convertir esta señal en corriente (Ver anexo A, Manual de la servoválvula), para que finalmente el motor-par de la servoválvula la traduzca en desplazamiento del

spool. Para medir el desplazamiento de la mesa se cuenta con el LVDT de posición y su respectivo acondicionador de señal que arroja una señal de voltaje. Reemplazando la variable compleja y agrupando las ecuaciones anteriores resulta:

$$\frac{X_P(s)}{u(s)} = \frac{(k_q * K_i * k_u)}{\left[\frac{M * V_T}{4 * \beta * A_p} \right] * S^3 + \left[\frac{V_T * C}{4 * \beta * A_p} + \frac{M}{A_p} (C_f + k_c) \right] * S^2 + \left[\frac{K * V_T}{4 * \beta * A_p} + \frac{C}{A_p} (C_f + k_c) \right] * S + \frac{K}{A_p} * (C_f + k_c)} \quad 32$$

Para expresar la posición (x_P) en la función de transferencia en términos de voltajes, se debe tener en cuenta la caracterización del LVDT que no es otra cosa que el valor de voltaje que el sensor registra dependiendo de la posición donde se encuentre el núcleo dentro de las bobinas que componen.

La relación entre voltaje y posición del LVDT está dada por la siguiente ecuación que corresponde a una recta (se debe tener en cuenta que los valores de voltaje están limitados a las características del LVDT):

$$x_p = k_{LVDT} * v \quad 33$$

Al expresar la función de transferencia en estos términos tenemos:

$$G(s) = \frac{v}{u}$$

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{(k_q * K_i * k_u * k_{LVDT})}{\left[\frac{M * V_T}{4 * \beta * A_p} \right] * S^3 + \left[\frac{V_T * C}{4 * \beta * A_p} + \frac{M}{A_p} (C_f + k_c) \right] * S^2 + \left[\frac{K * V_T}{4 * \beta * A_p} + \frac{C}{A_p} (C_f + k_c) \right] * S + \frac{K}{A_p} * (C_f + k_c)} \quad 34$$

Esta función de transferencia se lleva a representación de espacio de estados con el fin de representarla e notación matricial para posteriormente llevar el modelo a una simulación mediante el uso de simulink la cual nos da una idea del posible comportamiento de la planta con el control PID implementado y así tener un punto de comparación cuando se realice la validación del modelo con la planta real.

Para representar el sistema en ecuaciones de estado se hace el cambio de variables para que resulte un conjunto de ecuaciones de primer orden:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_p \\x_2 &= \dot{x}_1 \\x_3 &= P_L\end{aligned}\tag{35}$$

Y se expresa en notación matricial según la definición:

$$\dot{x}_1 = A * x + B * u\tag{36}$$

Donde A y B son las matrices de coeficientes. Se sustituyen las ecuaciones de primer orden en la ecuación anterior.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} & -\frac{A_p}{M} \\ 0 & -\left(\frac{4\beta A_p}{V_T}\right) & -\frac{4\beta(C_f+k_c)}{V_T} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4\beta k_q k_i k_u}{V_T} \end{bmatrix} * u\tag{37}$$

3. VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO

Como se mencionó anteriormente el software de control LABVIEW de la casa National Instruments fue seleccionado para la adquisición, procesamiento y generación de datos, este software fue suministrado por el grupo de investigación de sistemas dinámicos, control y robótica DICBOT, y en la realización del proyecto de grado se observó que en el algoritmo desarrollado para la mesa sísmica podemos diferenciar dos tipos de señales como son:

- ✓ Señal de entrada: Es el tipo de señal escogida por el operario en la interfaz de LABVIEW, que a su vez es enviada a la servoválvula por la tarjeta de adquisición de datos (que está conectada al módulo de entradas y salidas) para que genere el movimiento del actuador hidráulico y este la reproduzca de manera instantánea.
- ✓ Señal de salida: Al instante que el servoactuador ejecute el movimiento característico escogido por el operario el sensor de posición LVDT genera una señal (señal de salida) la cual es recibida por el acondicionador de señal del LVDT que a su vez la transforma y se la transfiere a la tarjeta de adquisición de datos por medio del módulo de entradas y salidas y puede ser observada en la interfaz del software.

Estos dos tipos de señales se encuentran en el dominio del tiempo por lo cual deben ser manipuladas para llevarlas al dominio de la frecuencia que es donde se verá que el control realizado ha sido en beneficio del funcionamiento del sistema, en cuanto a la identificación de las señales para mejor funcionamiento son muestreadas a tiempos discretos ya que comúnmente están distanciados en unidades de tiempo constantes, por lo tanto el inconveniente del control es hacer una correcta relación entre estos dos tipos de señales. La relación de estas dos

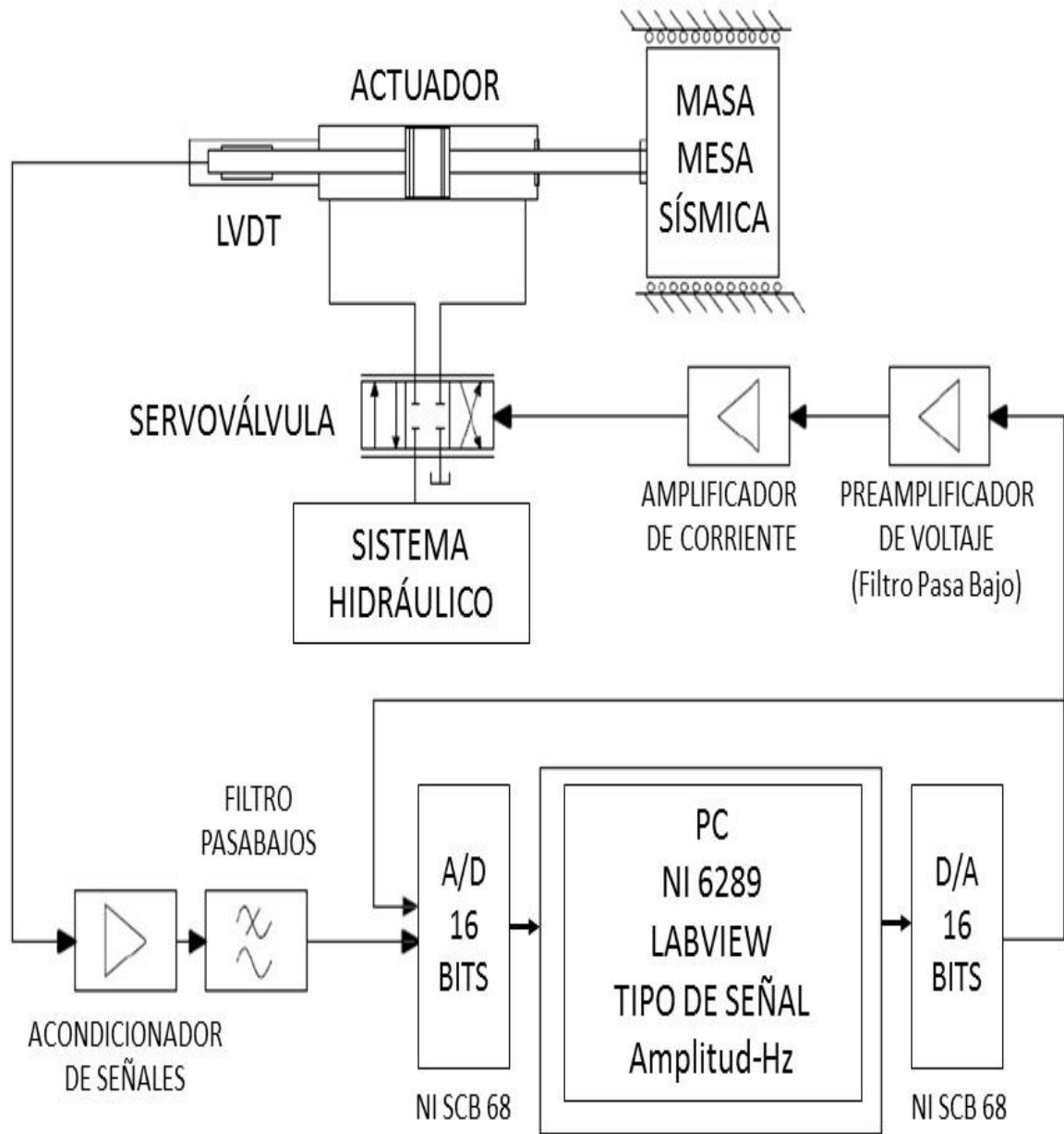
señales se encuentra explicada en el capítulo anterior por medio de la ecuación diferencial de transferencia.

Para el diseño de sistemas de control, se considera de mucha importancia un modelo bien definido de la planta que se desea controlar ya que todo el diseño de este modelo matemático se establecerá alrededor de ese diseño.

3.1 SISTEMA DE GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

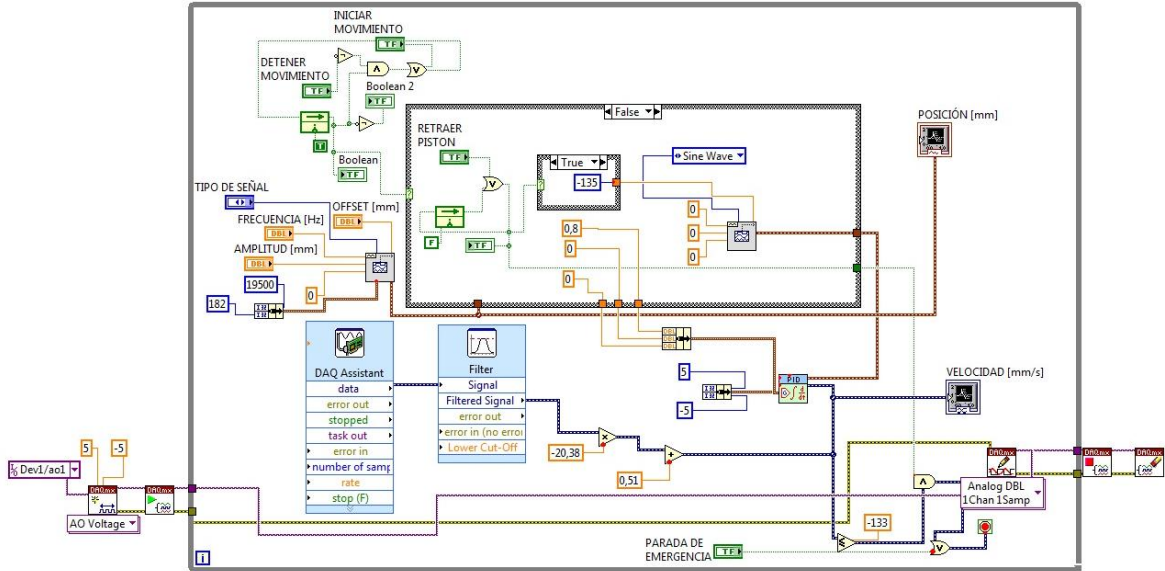
A continuación se muestra un esquema general de bloques en el cual se muestra la totalidad del sistema analizado y la interacción entre los componentes más importantes del sistema de control.

Figura 31. Esquema general de bloques del sistema



3.2 ALGORITMO DE CONTROL.

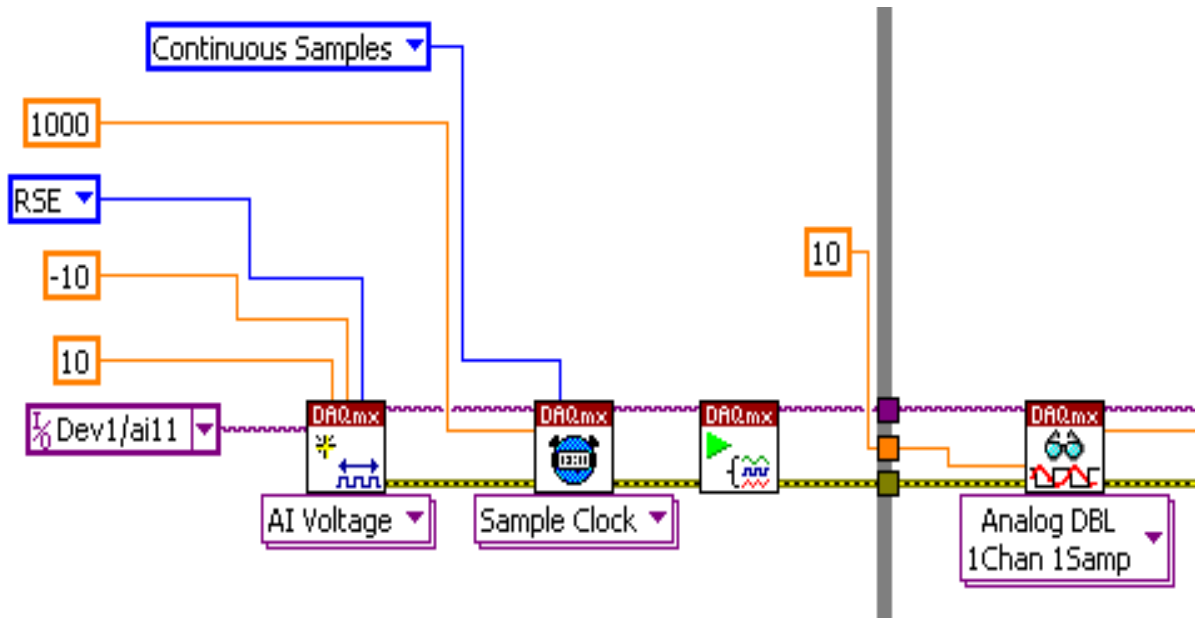
Figura 32. Algoritmo de control.



A continuación describiremos las partes más importantes del algoritmo de control realizado en el software LABVIEW.

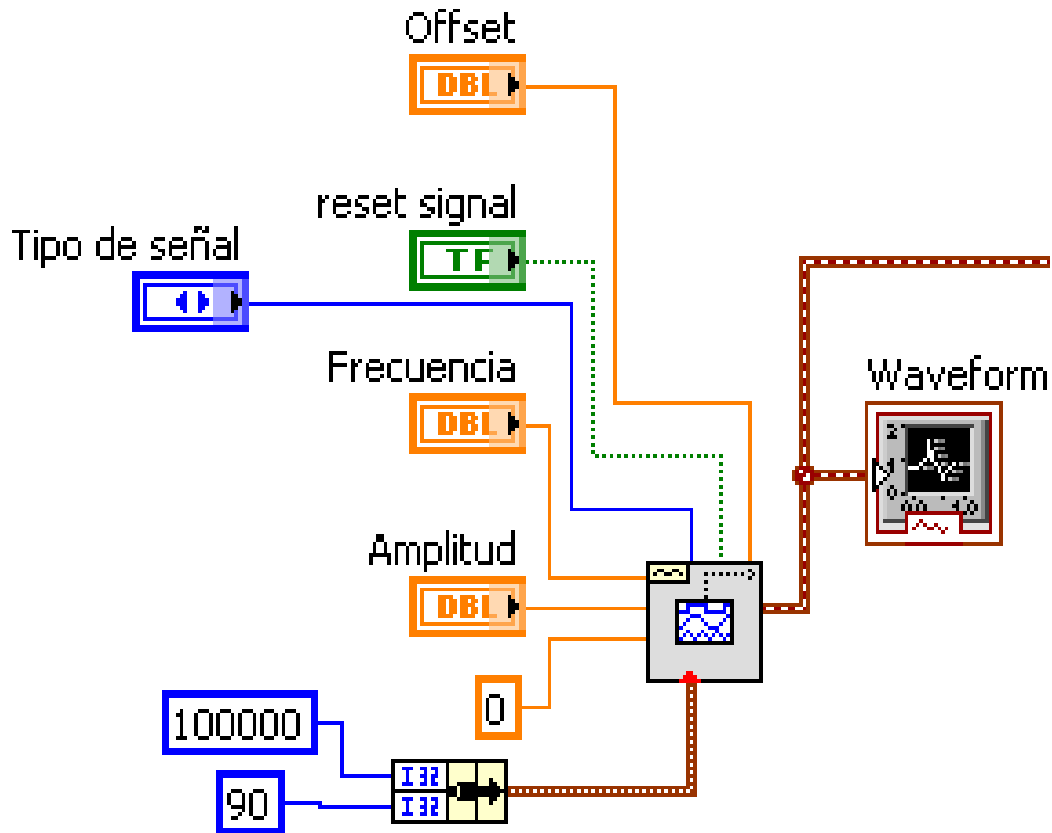
3.2.1 Adquisición de datos. A continuación se representa la primera parte del algoritmo de control programado en el software LABVIEW, la cual se realizó y configuró para ejecutar la lectura de los datos provenientes del sensor de posición (LVDT). Esta parte del código contiene tres instrumentos virtuales o VI's que se conectan de la manera mostrada en la Figura 33, en estos tres instrumentos virtuales se configuran parámetros determinantes de la adquisición de datos como lo son el tiempo de muestreo (1000 muestras por segundo) herramienta Sample Clock, el máximo valor de voltaje permitido (± 10 voltios) y el número del puerto físico de conexión del sensor de posición en el módulo de entradas y salidas NI SCB-68.

Figura 33. Adquisición de datos del LVDT.



3.2.2 Generador de señal. En la Figura 34 mostrada a continuación se muestra el desarrollo del generador de señal en el que se puede encontrar la función Basic Function Generator, mediante la cual se genera una señal de excitación de la mesa sísmica caracterizada por los valores escogidos por el operador de frecuencia, fase, amplitud y offset. Para la correcta utilización de esta herramienta se debe calibrar la tarjeta de adquisición de datos mediante el número de muestras que debe generar (90#s) y la velocidad de generación (1'000.000 Fs), en esta misma figura se puede apreciar el bloque para que el operador seleccione el tipo de señal de entrada (excitación) que puede ser sinusoidal, diente de sierra, rampa, cuadrada o triangular.

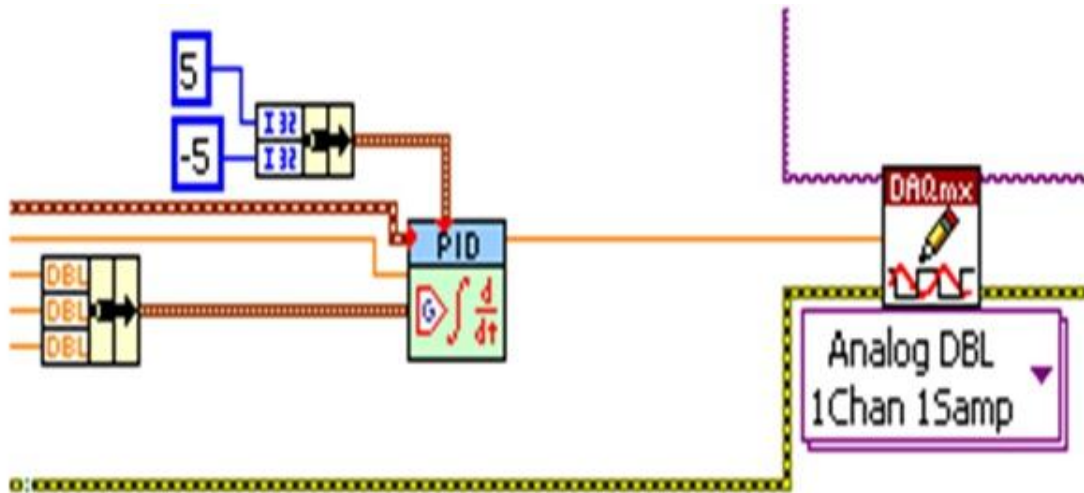
Figura 34. Generador de señal de excitación.



3.2.3 Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Posición. Para poder generar el control del sistema de la mesa sísmica se utilizó un control PID de posición utilizando la herramienta PID de la TOOLKIT de control. Mediante esta herramienta se pudo sintonizar el controlador PID de posición y se creó un canal virtual que corresponde a la señal que genera el controlador, en esta figura también podemos apreciar que los valores máximos del controlador se encuentran en el rango de ± 5 voltios, esto con el fin del correcto funcionamiento del integrado (AD 843 JN) de la tarjeta amplificadora y así prevenir una sobrecarga de voltaje lo cual llevaría a la mesa no responda a las señales de excitación enviadas. Además de esto se configuró en este bloque el valor de las constantes proporcional,

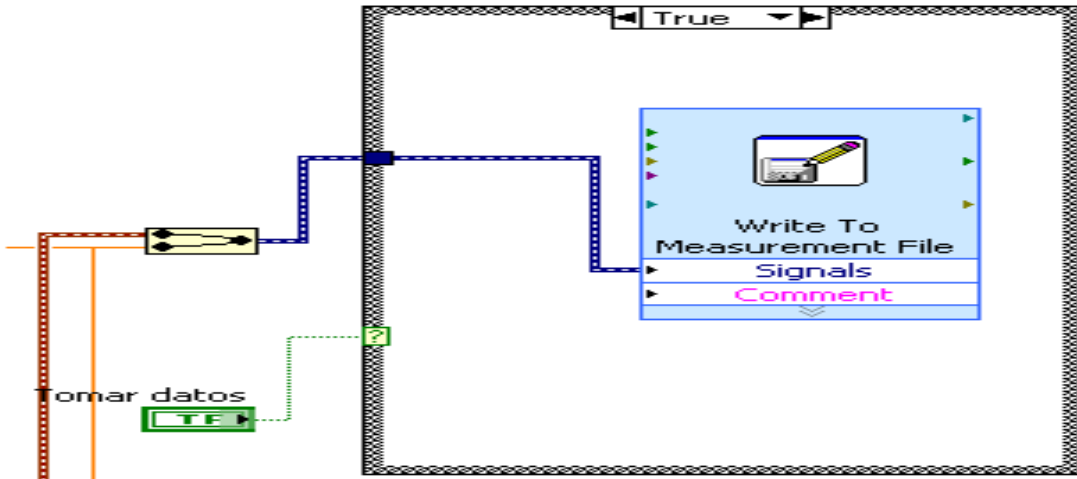
integral y derivativo para que el operador pueda sintonizarlas de acuerdo a la presión de operación.

Figura 35. Control PID.



3.2.4 Registro de datos del sistema. Con el instrumento virtual que se muestra en la figura 36 a continuación se toman los datos que serán procesados mediante el MATLAB para generar los correspondientes diagramas de Bode con los cuales demostramos el análisis de la respuesta en frecuencia del sistema y del control realizado en la mesa sísmica.

Figura 36. Adquisición de datos para generar diagramas de Bode



3.2.5 Tarjeta National Instruments PCI 6289. Es una tarjeta de alta precisión de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la serie M diseñada para una capacidad alta de velocidad de muestreo con la tecnología amplificadora NI-PGIA2 optimizada para bajos niveles de ruido y asentamiento rápido a 18 bits con un filtro pasabajos interno que repele el ruido de alta frecuencia y evita el aliasing (efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente), este tipo específico de tarjeta son ideales para pruebas de control además de 7 entradas programables entre ± 100 mV hasta ± 10 V posee hasta 32 entradas analógicas de 18 bits con una velocidad de muestreo de 625 KS/s y hasta 4 salidas analógicas de 16 bits con una velocidad de 2.8 MS/s.

Figura 37. Tarjeta de adquisición de datos (DAQ) PCI 6289 Serie M.



Fuente. National Instruments.

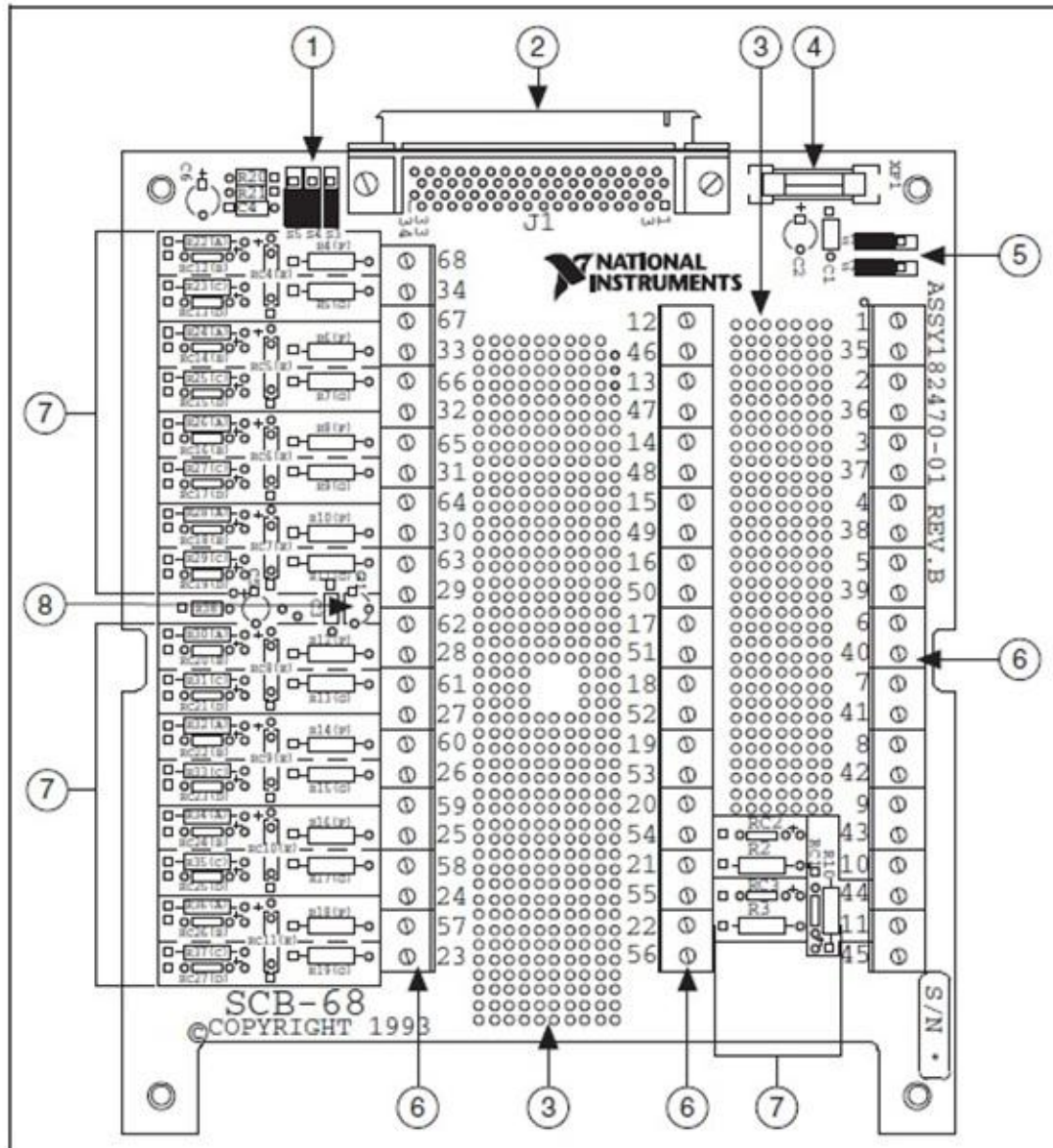
3.2.6 Módulo de entradas y salidas National Instruments SCB 68. Este módulo conector de entradas y salidas funciona como puente para conectar dispositivos de adquisición de datos (DAQ) como la tarjeta PCI 6289 anteriormente especificada a los diferentes componentes del sistema como son el LVDT y la servoválvula por medio del acondicionador de señales y la tarjeta amplificadora respectivamente, además brinda terminación de señal robusta con muy poco ruido. La conexión entre el modulo y la tarjeta la podemos hacer mediante el cable blindado de 68 conductores de alto rendimiento NI SHC 68 68 EPM, con un conector macho de 68 pines VHDCI en un extremo y una hembra con conector tipo D de 68 pines en el otro extremo para la conexión de la serie M.

Figura 38. Modulo NI SCB 68 y Cable NI SHC 68-68 EPM.



Fuente. National Instruments.

Figura 39. Esquema de conexiones del módulo NI SCB 68.



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Switches S3,S4 y S5 | 5. Switches S1 y S2 |
| 2. Conector E/S de 68 pines | 6. Terminales de Tornillo |
| 3. Área de Protoboard | 7. Área de acondicionamiento de señal |
| 4. Fusible (800 mA, 250 V, 5 . 20 mm) | 8. Sensor de Temperatura |

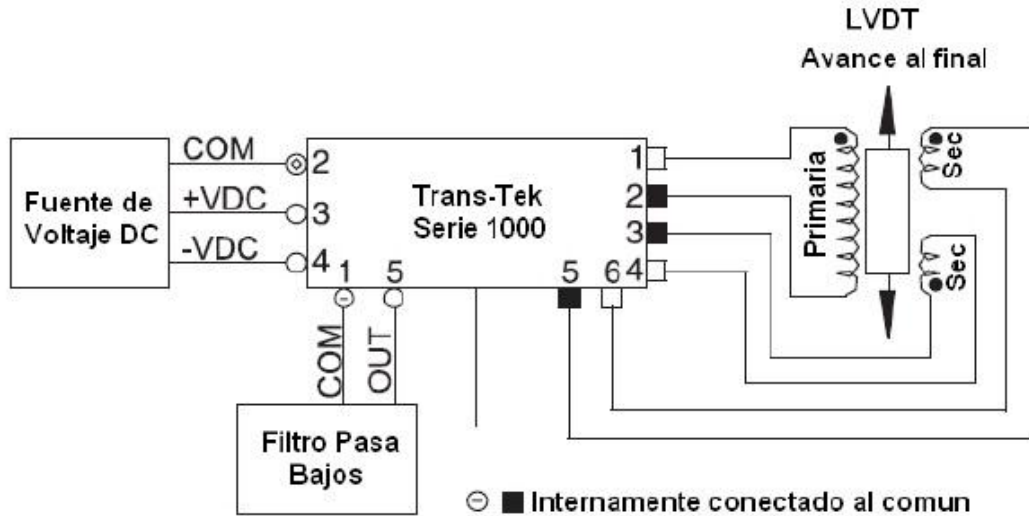
3.2.7 LVDT y acondicionador de señal AC-DC. El LVDT utilizado en este proyecto tiene un rango de ± 127 mm con una no-linealidad de 0.5%, oscila en un rango de 6.79 V y -6.8 V. Este LVDT funciona con un acondicionador de señal Trans-Tek serie 1000-0012 K9 el cual posee una salida ajustable de voltaje de ± 5 VDC. Este acondicionador es alimentado por una fuente de 24 V y es conectado al módulo de entradas y salidas por medio de cables coaxiales blindados contra el ruido.

Figura 40. LVDT y Acondicionador de señal Trans-Tek serie 1000-0012 K9.



Fuente. Trans-Tek Inc.

Figura 41. Esquema de bloques de conexión LVDT-Acondicionador de señal Trans-Tek serie 1000-0012 K9.



Fuente. Trans-Tek Inc.

3.2.8 Filtro Pasabajos. Para amortiguar significativamente la distorsión de la señal proveniente del LVDT se diseñó un filtro pasabajos de segundo orden con una frecuencia de corte aproximada de 150 Hz.

Figura 42. Filtro pasabajos de segundo orden.

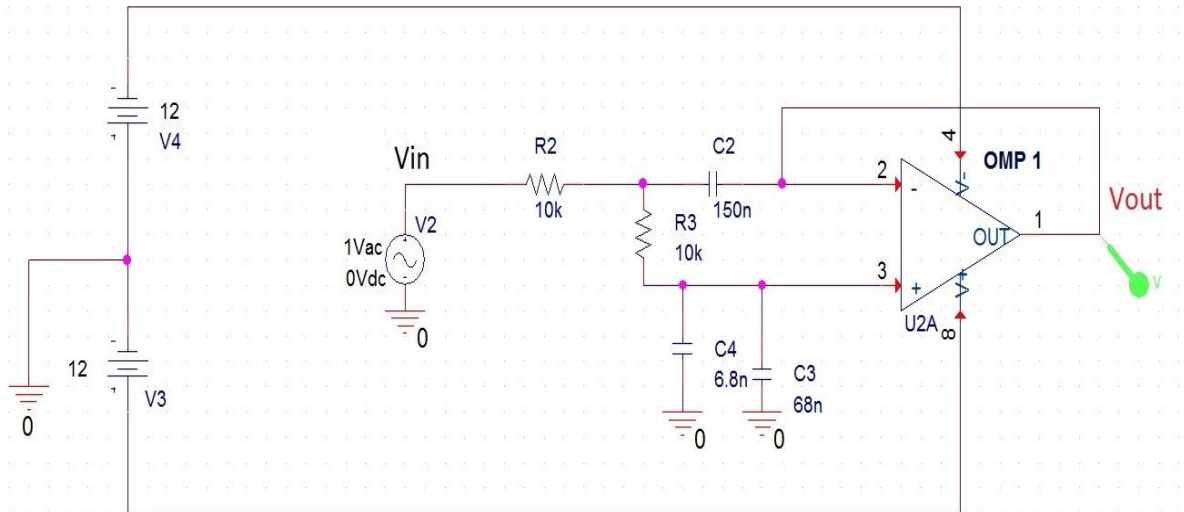
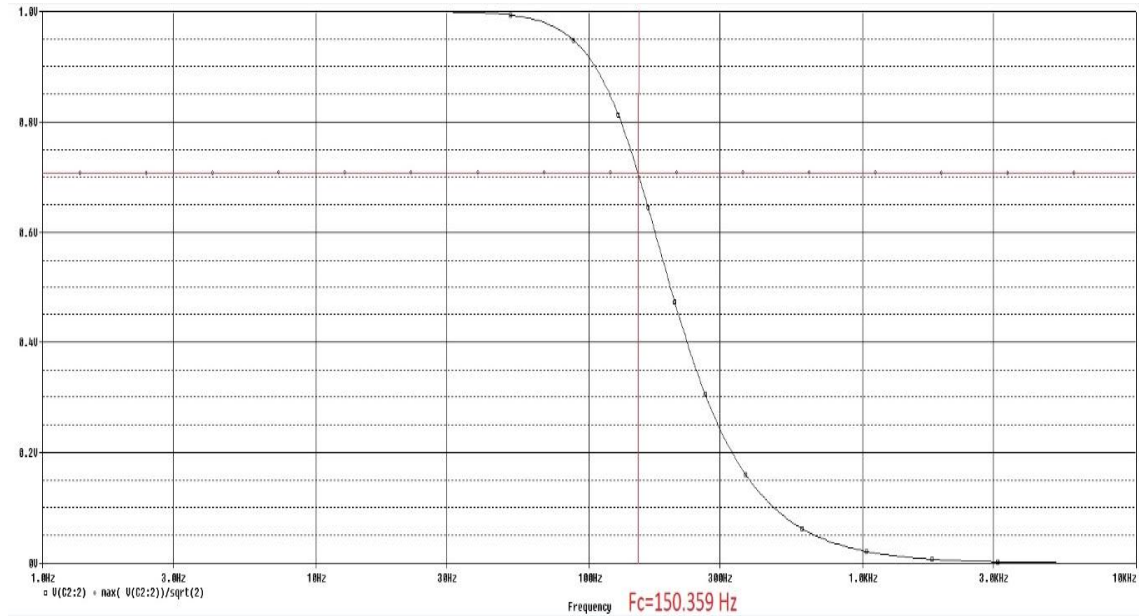


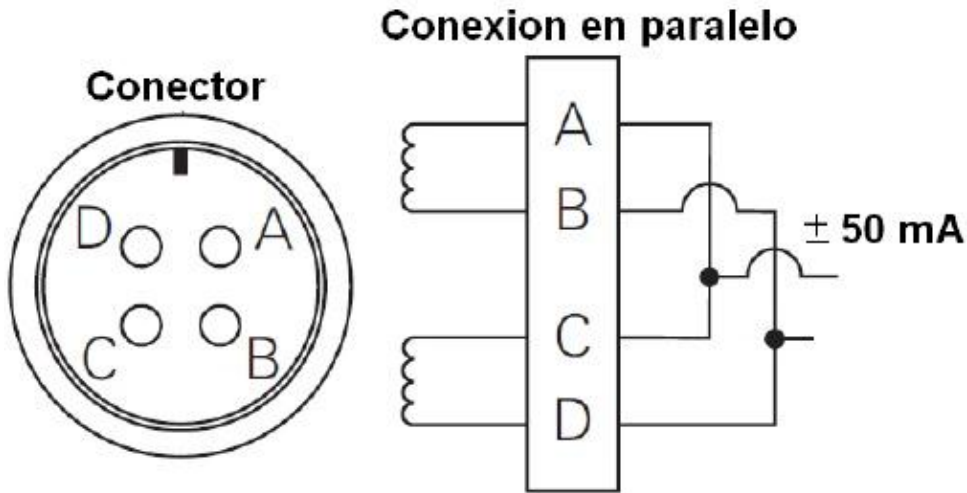
Figura 43. Simulación del filtro pasabajos de segundo orden.



3.2.9 Preamplificador y Amplificador de Corriente.² El preamplificador (seguidor de voltaje) es un dispositivo a través del cual la señal proveniente de la servoválvula no presenta ganancia o inversión alguna teniendo su aplicación como convertidor de impedancia debido a que toma la señal del circuito anterior (alta impedancia) y entrega una señal prácticamente nula al circuito de carga (baja impedancia) y así se logra aislar y proteger la señal generada por la tarjeta.

² Preamplificador y amplificador suministrados por el Profesor Carlos Borrás P. de su tesis de maestría Pattern Recognition In Hydraulic Backlash Neural Network Thesis (Master of Science). University of Oklahoma Norman, Aerospace and Mechanical Engineering Department. USA, 2001.

Figura 44. Conexión en paralelo servoválvula MOOG Serie 76-263.



El amplificador de corriente convierte la señal de voltaje procedente del preamplificador a corriente para la conexión en paralelo de las bobinas de la servoválvula (corriente nominal $\pm \text{mA}$).

3.2.10 Sintonización y análisis de respuesta del sistema de control. Con el fin de optimizar y analizar el sistema de control que regula el funcionamiento de la mesa sísmica es necesario ajustar las constantes del controlador PID (sintonización) con el fin de hallar los valores de las constantes K_p (constante proporcional), K_i (constante integral) y K_d (constante derivativa) para los cuales se consiga el funcionamiento más estable de la mesa.

En la sintonización del sistema de control que se desarrolló para la mesa vibratoria se utilizó el método de las oscilaciones sostenidas de Ziegler y Nichols, siguiendo cada paso como lo indica el método.

Tabla 8. Ecuaciones para el cálculo de constantes de sintonización del controlador según Ziegler y Nichols.

controlador	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5 K_{cu}$	-	-
PI	$0.45 K_{cu}$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6 K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$

- Se encendió el algoritmo de control el cual al ponerlo en modo RUN ubica le mesa en su posición central o cero de posición.
- Se dejaron en cero las constantes Integral y Derivativa, y se empezó a aumentar la constante Proporcional hasta que esta alcanzo una oscilación constante en amplitud y frecuencia y se registró este valor como K_{cu} (constante Proporcional critica o ultima)
- Se procedió a graficar esta oscilación (figura 45) y se le calculo el periodo T_u (periodo crítico o último).
- De acuerdo a las ecuaciones dadas en la tabla 8 para un controlador PID se calcularon las constantes proporcional, integral y derivativa. Los valores que se obtuvieron de sintonización son mostrados en la tabla 9.

Figura 45. Oscilación sostenida para cálculo de periodo último.

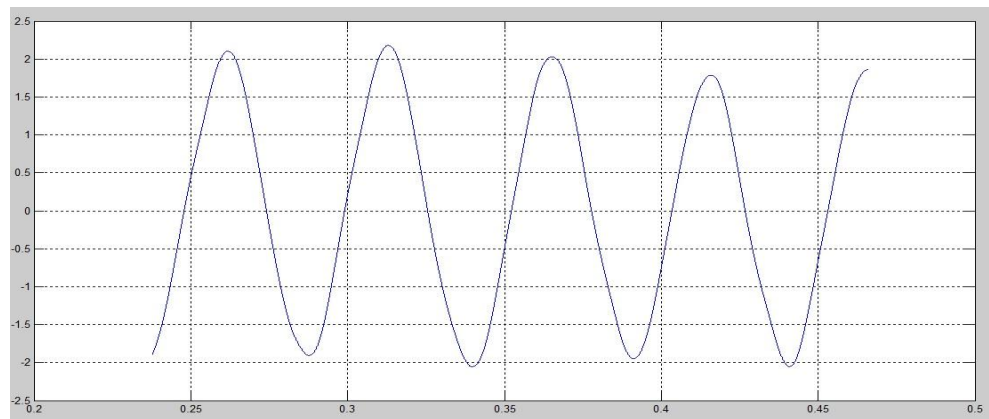


Tabla 9. Constantes de sintonización calculadas mediante el método de las oscilaciones sostenidas de Ziegler y Nichols.

Constante	Valor
K_p	1.65
K_i	0.025
K_d	0.0064

Posteriormente se procedió a introducir estas constantes dentro del algoritmo de control PID y realizar pruebas de respuesta del sistema, el resultado de estas pruebas nos arrojó un sistema bastante inestable debido a que al tratar de posicionar la mesa en su punto cero de posición esta presentaba oscilaciones alrededor de este punto sin llegar a estabilizarse. Cuando se le introdujo una entrada en escalón de 5 cm presentaba el mismo comportamiento. A partir de este momento se realizó un ajuste de forma empírica siempre teniendo como punto de partida los valores antes obtenidos. Los valores obtenidos se indican en la tabla 10

Tabla 10. Contantes de sintonización final obtenidas de forma experimental.

CONSTANTE	VALOR
K_p	0,11
K_i	0
K_d	1e-5

Durante la etapa de sintonización, se pudo establecer que el controlador presenta un funcionamiento óptimo solamente mediante la introducción de una acción proporcional $K_p = 0.11$, las demás acciones pueden tomarse como cero o muy cercanas a este valor.

También se pudo establecer mediante las pruebas de funcionamiento que una acción integral introduce al sistema de control movimientos erráticos por lo cual se decidió dejar esta contante finalmente en cero.

3.2.11 Respuesta ante una entrada en escalón. Durante la etapa de sintonización del controlador se realizaron pruebas de funcionamiento con el fin de graficar la respuesta ante una entrada en escalón de 50mm, para diferentes configuraciones de constantes (K_p , K_i , K_d) hasta obtener una respuesta del sistema de control que fuera satisfactoria.

Figura 46. Respuesta ante una entrada en escalón de 50mm $K_p = 0.5$, $K_i = 0$ y $K_d = 1e-5$

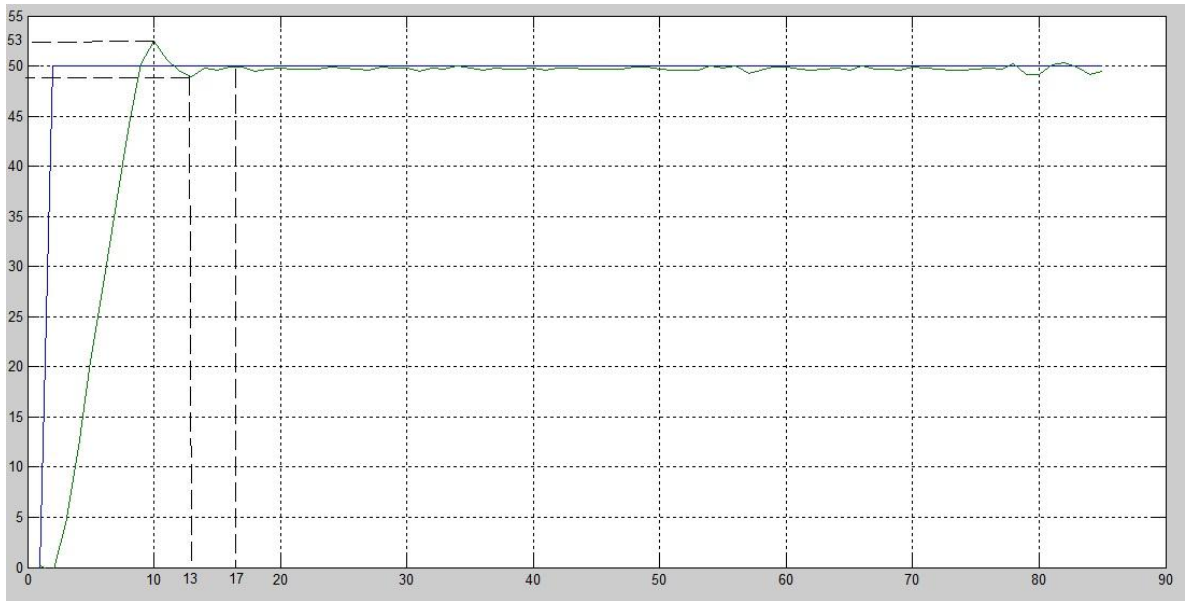


Figura 47. Respuesta ante una entrada en escalon de 50mm $K_p = 0.2$, $K_i = 0$ y $K_d = 1e-5$

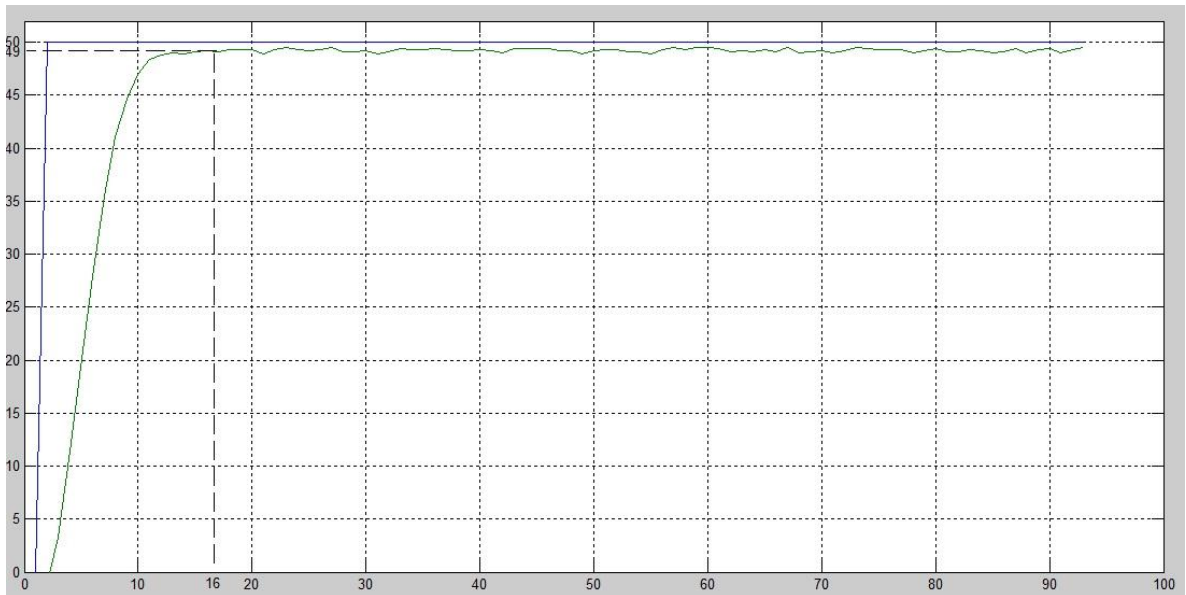


Figura 48. Respuesta ante una entrada en escalon de 50mm $K_p = 0.15$, $K_i = 0$ y $K_d = 1e-5$

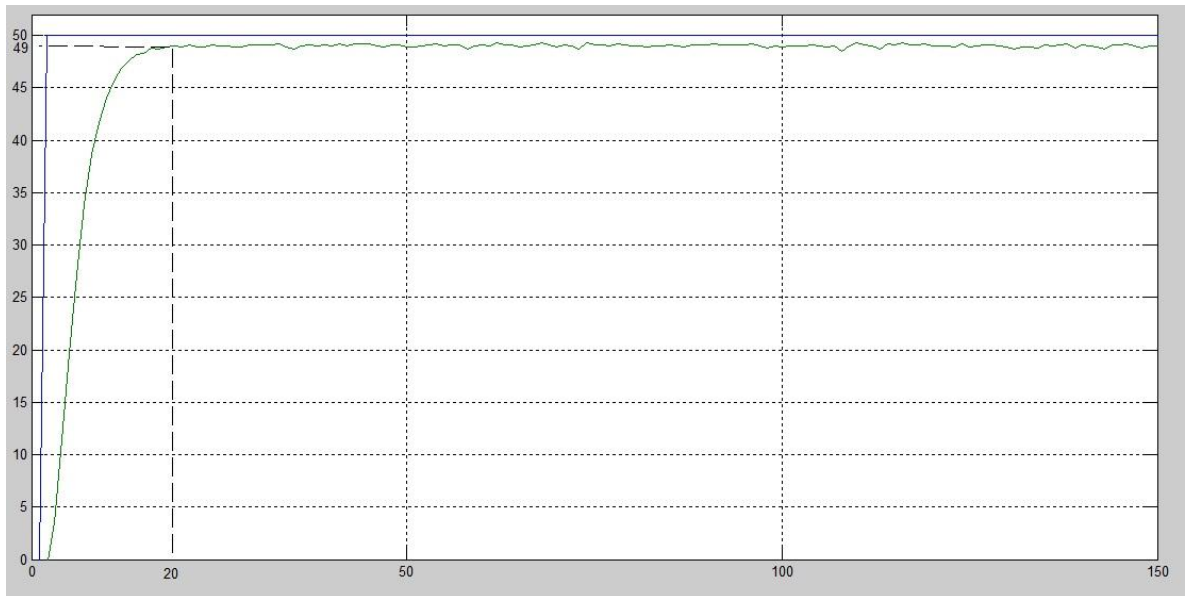
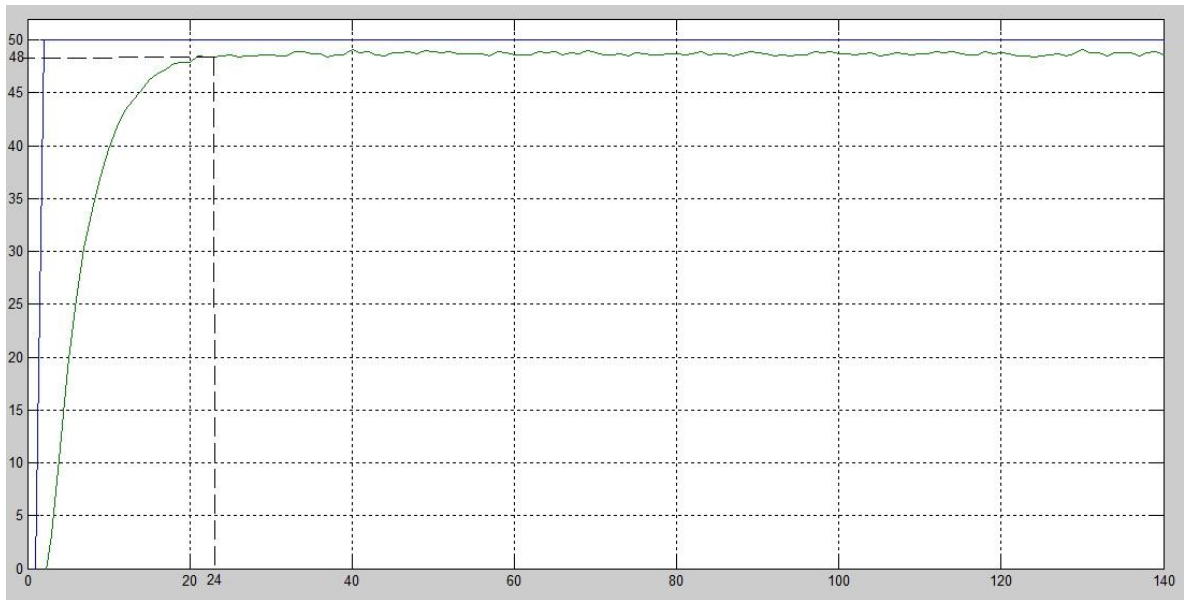


Figura 49. Respuesta ante una entrada en escalon de 50mm Kp = 0.11, Ki = 0 y Kd = 1e-5



3.2.13 Análisis de respuesta en frecuencia. Como parte del análisis del sistema de control de la mesas sísmica se procede a realizar pruebas de respuesta ante una entrada sinusoidal con el fin de encontrar para diferentes amplitudes de movimiento oscilatorio la respuesta o salida de la planta con respecto a la señal de entrada. La comparación de las dos señales (entrada y salida) se representa mediante un diagrama de Bode el cual nos da una idea del ancho de banda o frecuencias que puede reproducir fielmente la planta a una amplitud determinada, además del desfase que se produce entre la señal de entrada y de salida

Para esto se implementó una señal de entrada pseudorandómica (ecuación 38) en la que A es la amplitud, ω la frecuencia y t el tiempo. Esta señal tiene la característica de que se le da una amplitud fija y una frecuencia inicial y posteriormente esta va aumentando la frecuencia a medida que pasa el tiempo.

$$X(t) = A \text{ Sen}(\omega t^2) \quad 38$$

Luego de esto se implementó esta señal en los algoritmos de control en lazo abierto y en lazo cerrado creados en LABVIEW y se realizaron pruebas para amplitudes de 1mm, 2mm y 5mm, con una frecuencia inicial de 0.5 Hz durante un tiempo de 30 segundos y se registraron los datos de la señal de entrada y salida para cada caso. Los datos guardados se exportaron y luego se trazaron los respectivos diagramas de bode como se explica a continuación mediante el uso del Software MATLAB y se compararon entre sí, para establecer la diferencia del ancho de banda entre los dos lazos de control.

3.2.14 Respuesta experimental del sistema por medio de MATLAB. Con el fin de realizar una correcta identificación del sistema procedemos a cargar los datos generados por LabVIEW en el dominio del tiempo de la práctica realizada en el Workspace de MATLAB (Figura 50), luego se ingresa a la Toolbox de identificación de digitando las siglas ident en el Command Windows de dicho software y en la ventana desplegada de la herramienta, se cargan los datos con el nombre que se le adjudico (Figura 46).

Figura 50. Workspace y Toolbox MATLAB

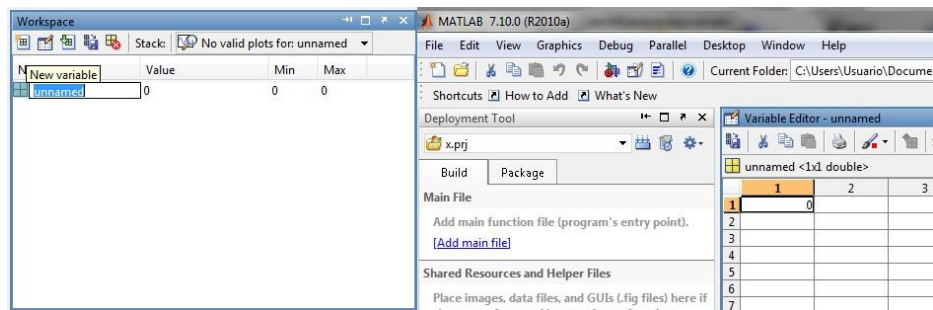
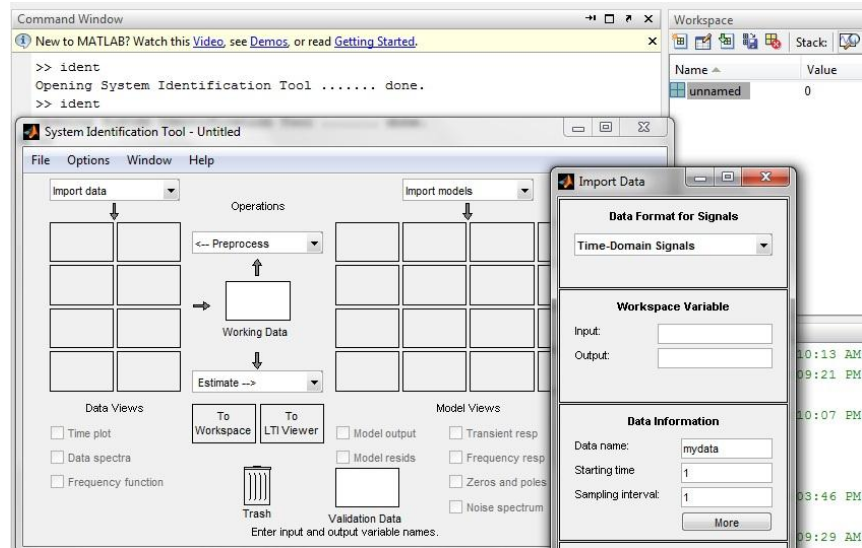


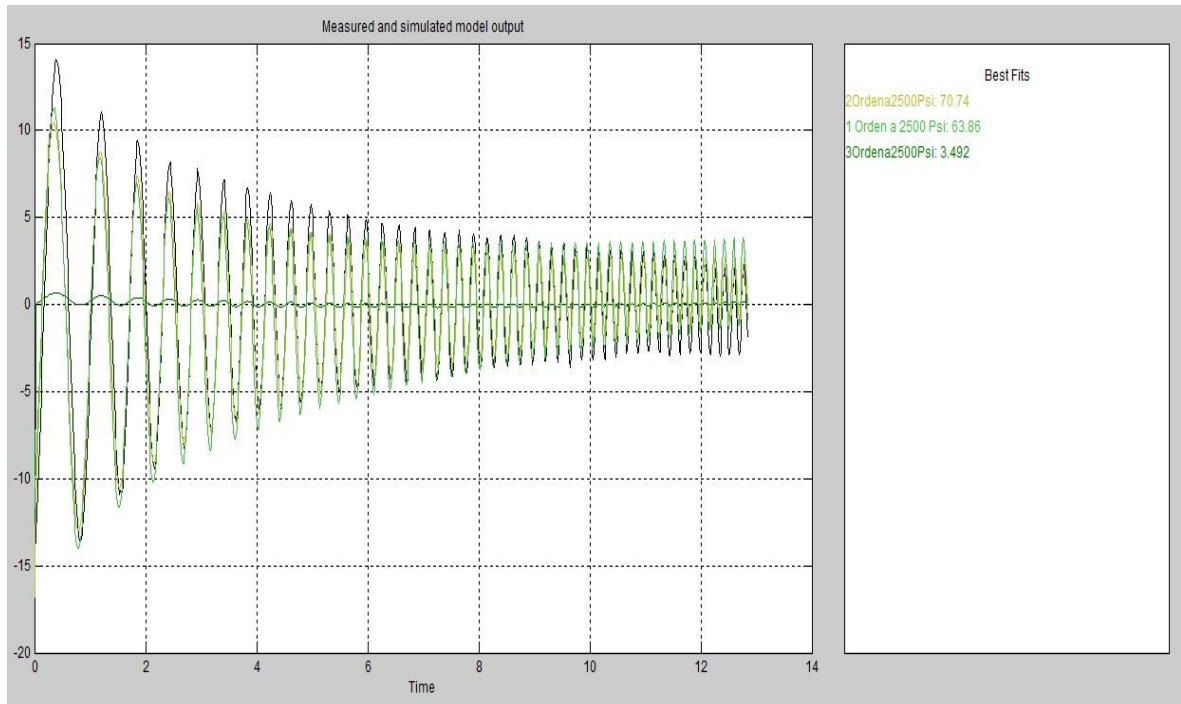
Figura 51. System Identification Tool - MATLAB



Para la identificación del sistema en lazo abierto se hace necesario remover el offset de la señal, esto se lleva a cabo con la herramienta Remove trends en la opción Preprocess. Para el caso de los datos tomados en lazo cerrado no es necesario realizar este preproceso ya que con la implementación del algoritmo de control PID se elimina el offset del sistema. Luego de haber realizado el preproceso a los datos que son necesarios se procede a realizar la identificación de los dos sistemas, en lazo abierto y en lazo cerrado, en modelo de función de transferencia.

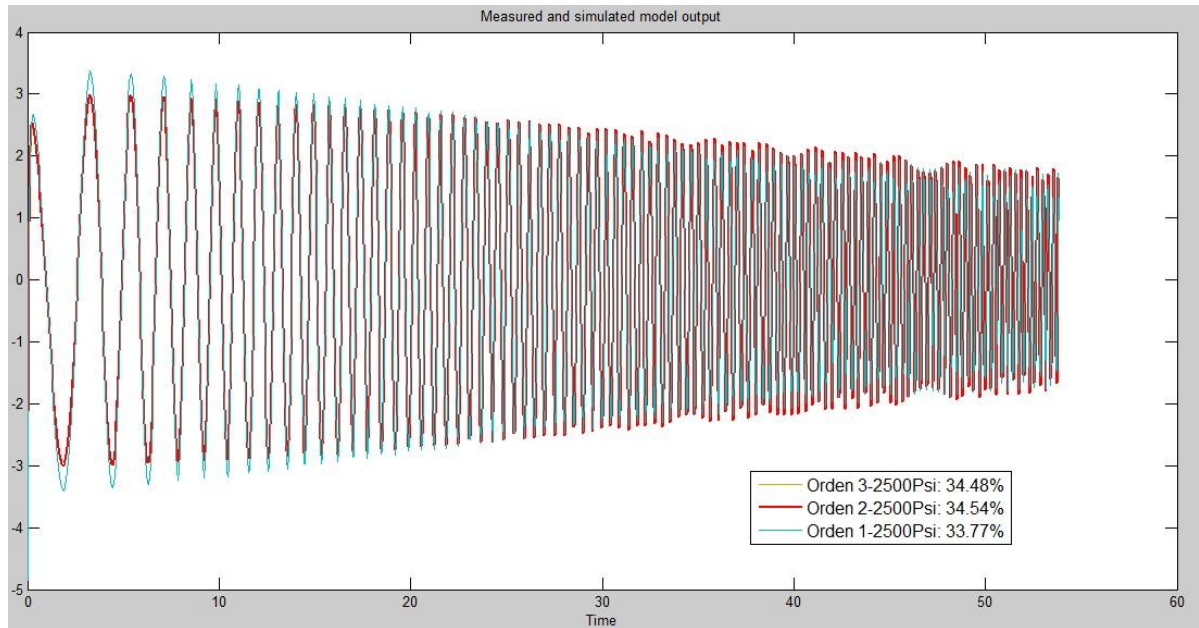
Se realizó la identificación del sistema para orden uno, orden dos, orden tres y a cada uno de ellos además se les agrego un integrador para observar el modelo que se ajustaba mejor a la planta. Para el caso de lazo abierto la mejor aproximación que se obtuvo fue la de orden 2 con un porcentaje de 70.74% sin integrador como lo muestra la figura 52.

Figura 52. Porcentajes de ajuste para orden 1, 2 y 3 en lazo abierto.



Para el caso del lazo cerrado la mejor aproximación fue la de orden 2 con un porcentaje de 34.54% como lo muestra la figura 53.

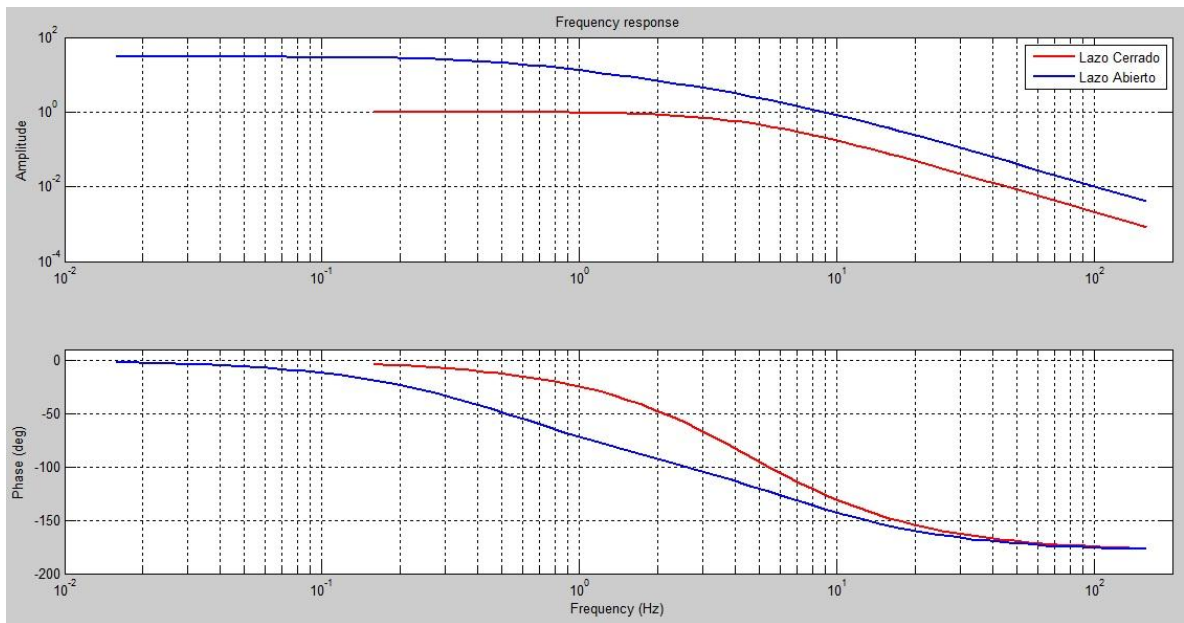
Figura 53. Porcentaje de ajuste para orden 1, 2 y 3 en lazo cerrado.



Teniendo en cuenta esto se escogieron los estos dos modelos para el análisis de respuesta en frecuencia (herramienta Frequencyresp de MATLAB) y así generar los diagramas de Bode respectivos y estudiar el comportamiento en el dominio de la frecuencia del lazo cerrado vs lazo abierto.

En la figura 54 encontramos la gráfica de los diagramas de bode de los dos sistemas de segundo orden identificados anteriormente y podemos comprobar teóricamente que en el caso de lazo cerrado obtuvimos un mayor rango de respuesta en frecuencia debido a que la señal azul (lazo abierto) tiene una tendencia a decaer a una menor frecuencia que la señal roja (lazo cerrado), además podemos observar que en un desfase de -90° la señal roja también posee un mayor ancho de banda en la respuesta en la frecuencia del sistema.

Figura 54. Diagrama Teorico de Bode de lazo Abierto vs Lazo Cerrado a 2500 Psi .



En las figuras 55 y 56 mostradas a continuación se observa el comportamiento experimental de la respuesta en frecuencia para diferentes tipo de señales como sinusoidal y entrada a un escalon a diferentes amplitudes, que pueden ser reproducidas en la mesa vibratoria

Figura 55. Diagrama de Bode Experimental para tres señales sinusoidales con 1, 2 y 4 mm de amplitud a 2500 Psi de presión.

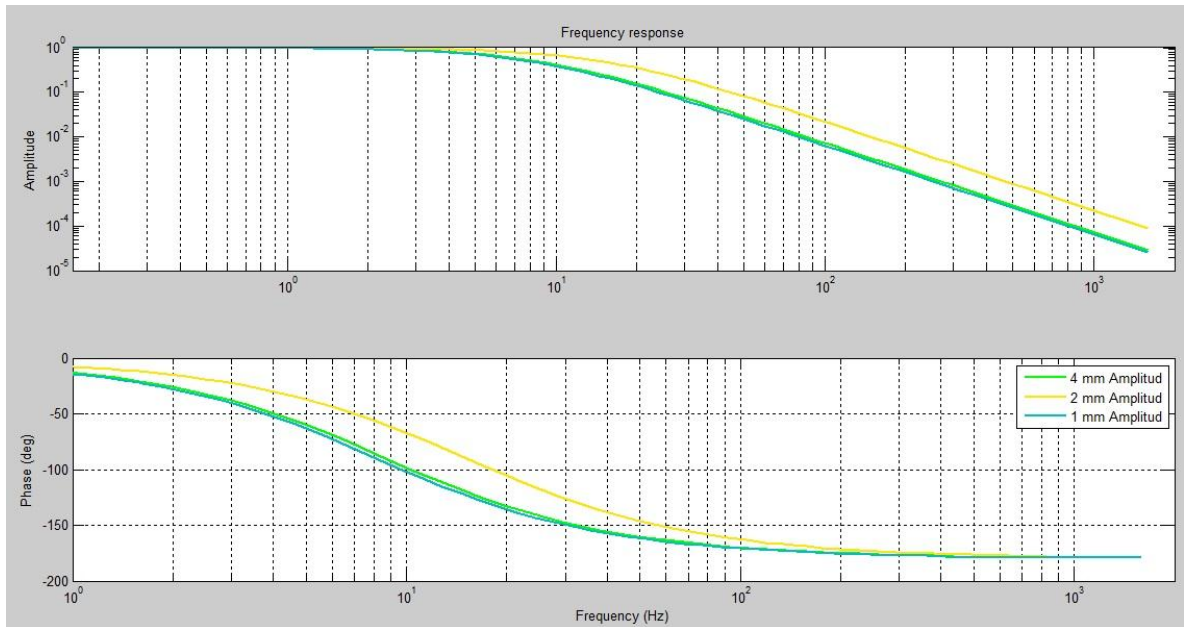
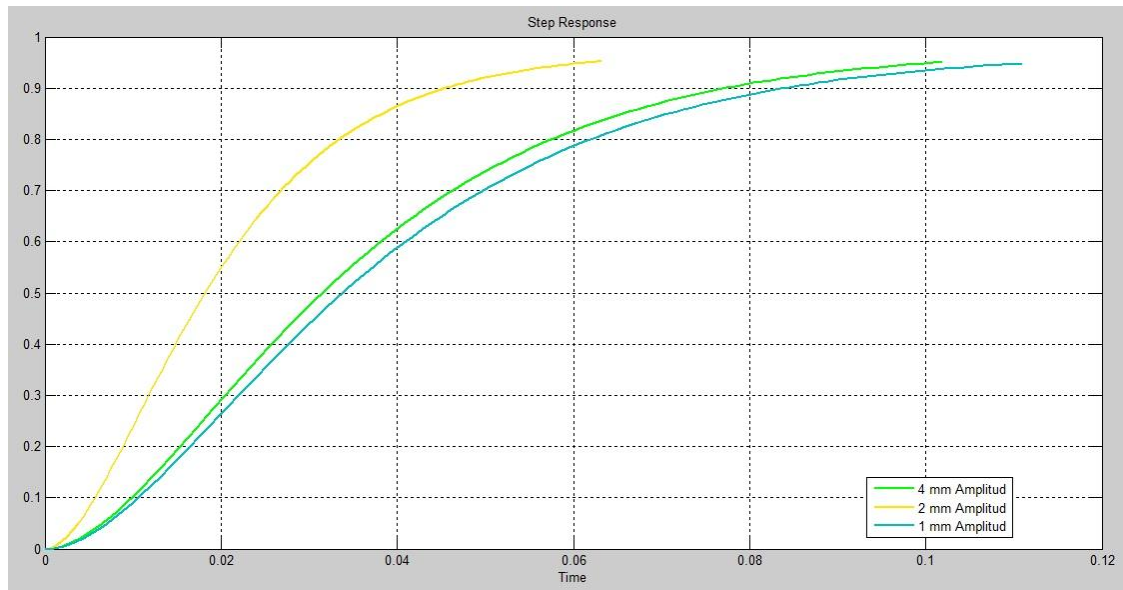


Figura 56. Respuesta a una entrada en escalón unitario para tres señales con 1, 2 y 4 mm de amplitud a 2500 Psi de presión.



4. APLICACIÓN DE LA MESA SÍSMICA COMO HERRAMIENTA PARA ANALISIS ESTRUCTURAL

Con el fin de plasmar en este documento una de las formas en que puede ser utilizada la mesa sísmica como aplicación, se realizaron dos pruebas por separado correspondientes a dos proyectos de grado titulados ANALISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SISMICOS TIPO PENDULO DE FRICCION y COMPARACION DE LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA EN ADOBE DE UN PISO ANTE UN MOVIMIENTO VIBRATORIO CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MUROS pertenecientes a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

En la primera prueba correspondiente al proyecto de grado ANALISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SISMICOS TIPO PENDULO DE FRICCION se hizo el anclaje de la estructura a plataforma de ensayos de la mesa sísmica y se procedió a realizar un movimiento oscilatorio sinusoidal a una amplitud de 1 cm hasta hallar la frecuencia de resonancia. Como resultado de esta prueba se halló una frecuencia de resonancia de 4,7 Hz la cual se encontraba dentro de los parámetros del proyecto hallados teóricamente.

Figura 57. Estructura a escala de un aislador sísmico tipo péndulo de fricción.



Para la segunda prueba realizada correspondiente al proyecto de grado COMPARACION DE LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA EN ADOBE DE UN PISO ANTE UN MOVIMIENTO VIBRATORIO CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MUROS se hizo el montaje en la plataforma de ensayos en la mesa sísmica y se procedió a reproducir un movimiento oscilatorio sinusoidal con una amplitud de 1 cm y una frecuencia inicial de 1 Hz haciendo un incremento de 1 Hz de esta última cada 30 segundos hasta observar físicamente el fallo estructural en el modelo a escala. Se obtuvieron resultados de falla de 8 Hz de frecuencia para la estructura de forma cuadrada, 10 Hz para la estructura de forma circular y 11 Hz para la forma de muros convexos con contrafuertes en las esquinas. Cabe resaltar que estos resultados obtenidos son innovadores y de mucha importancia ya que actualmente no se cuenta con mucha información detallada de este material en el uso para estructuras de construcción de vivienda.

Figura 58. Estructura a escala de una vivienda con muros cuadrados en ladrillo de adobe.

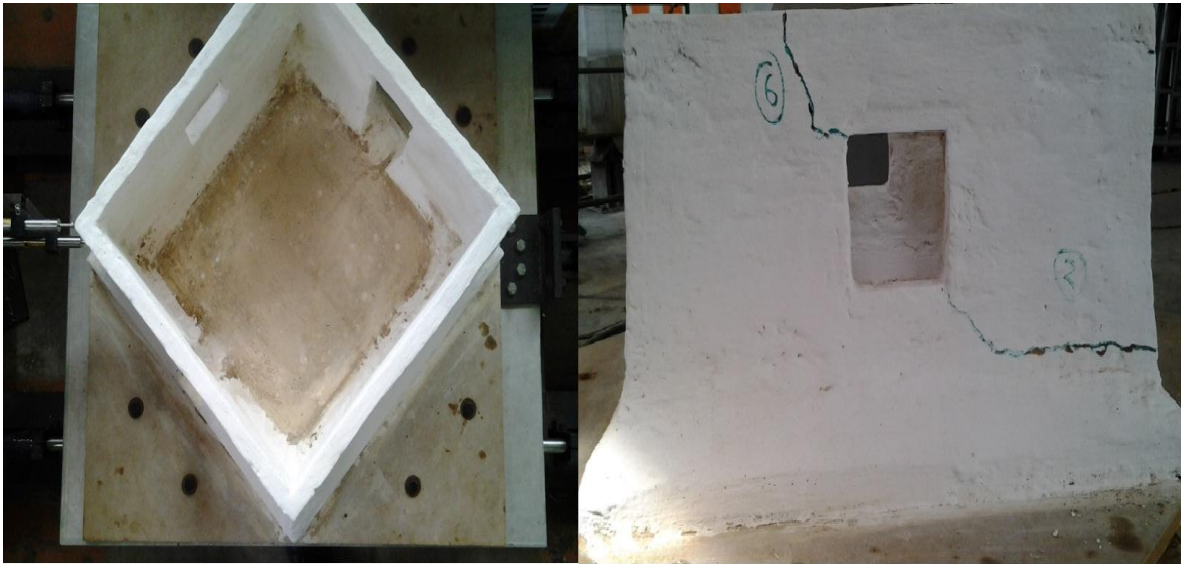


Figura 59. Estructura a escala de una vivienda con muros cuadrados en ladrillo de adobe.



Figura 60. Estructura a escala de una vivienda con muros cuadrados en ladrillo de adobe.



5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló e implementó una aplicación vi (instrumento virtual) en LabVIEW para realizar control en lazo cerrado de la mesa vibratoria, mediante el cual se puede generar señales de entrada captar señales de salida y realizar el monitoreo del comportamiento de la misma durante su funcionamiento.
- Se diseñó y construyó la interfaz de control para la mesa vibratoria, la cual consta de un módulo en lámina galvanizada calibre 22 dentro del cual se ubicaron la fuente de alimentación de la tarjeta de potencia ± 15 VDC, el filtro pasa bajos el cual se diseñó para una frecuencia de corte de 150 Hz, la tarjeta de potencia (amplificador), la fuente de alimentación del acondicionador de señal del LVDT ± 24 VDC y su respectivo filtro pasa bajos también diseñado para una frecuencia de corte de 150 Hz.
- Se programó el algoritmo de control en el software LabVIEW mediante el cual logramos controlar el movimiento de la mesa tanto en amplitud como en frecuencia además de poder reproducir diferentes tipos de señales, como son: sinusoidales, triangulares, cuadradas y diente de sierra.
- Aunque para la sintonización del control PID se siguió el método de las oscilaciones sostenidas de Ziegler-Nichols, los valores de las constantes obtenidos no satisfacen en su totalidad las necesidades de control de la mesa vibratoria y su ajuste final se realiza empíricamente obteniendo los valores de $K_p=0.11$, $K_i=0$ y $K_d=1e-5$ @2500 Psi. Además, durante las pruebas de implementación del sistema de control se evidenció que las constantes de sintonización del control PID varían para diferentes presiones.
- Al realizar el modelamiento matemático de la mesa sísmica se pudo contar con una manera teórica de predecir el comportamiento de la misma y de tener un

punto de partida con el cual comparar posteriormente a la hora de validar el modelo.

- Se elaboró el respectivo manual de instrucciones mediante el cual de una manera clara e ilustrada se expresa el procedimiento a seguir por parte del usuario para la conexión, operación y uso seguro de cada equipo involucrado en la mesa vibratoria. Esto incluye: Equipos hidráulico, eléctrico, electrónico y de cómputo.
- Se realizaron pruebas para determinar la frecuencia de resonancia de una estructura a escala correspondiente al proyecto de grado ANALISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SISMICOS TIPO PENDULO DE FRICCION de la escuela de Ingeniería Civil obteniendo resultados dentro del rango calculado de forma teórica.
- Se pruebas estructurales de modelos a escala para viviendas de diferente forma geométrica fabricadas en ladrillos de Adobe logrando los resultados teóricos esperados por parte de los estudiantes que estaban realizando el proyecto de grado titulado COMPARACION DE LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA EN ADOBE DE UN PISO ANTE UN MOVIMIENTO VIBRATORIO CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MUROS perteneciente a la escuela de Ingeniería Civil.
- Se evidenció la importancia del trabajo interdisciplinario conjunto para el desarrollo de proyectos que benefician y favorecen en primera instancia el aprendizaje y formación de los estudiantes de ingenierías mecánica y civil de la Universidad Industrial de Santander.

6. OBSERVACIONES

- Durante el desarrollo del modelo dinámico que representa el funcionamiento de la mesa vibrante se realizaron varias consideraciones a fin de facilitar el modelamiento matemático lo cual puede producir algunas diferencias en la comparación de los resultados teóricos y experimentales.
- Es de gran importancia que proyectos de esta naturaleza tengan continuidad y un mejoramiento en la parte de infraestructura tecnológica ya que una renovación permanente en este aspecto optimizará la calidad de la información que se extraiga de las pruebas y ensayos realizados en esta herramienta pedagógica.
- Se hizo necesario utilizar herramientas adicionales como lo fueron el osciloscopio y un generador de señales para verificar y comparar las señales de entrada y salida de la planta.
- Para el proyecto se usaría una unidad de potencia hidráulica MTS existente en el laboratorio de estructuras del centro de caracterización de materiales de construcción, edificio Jaime Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander, y aun cuando se contaba con las autorizaciones respectivas para usar dicho equipo este permanece ocupado la mayor parte del tiempo debido a que en dicho laboratorio se prestan servicios a la industria de la construcción realizando pruebas de falla a diferentes materiales (tubos para alcantarillado, parales para construcción y otros) y no se puede contar con el servicio del equipo en el tiempo y periodicidad necesario para la ejecución del proyecto. Por tanto, como se estaba sujeto a la disponibilidad del mencionado equipo hidráulico, se decidió desistir del uso de este y construir una unidad de potencia hidráulica propia e independiente para usarla en el proyecto.

- Se recomienda construir un sistema de refrigeración para la unidad de potencia construida debido a que en el uso prolongado a altas presiones de dicho equipo se produce un incremento significativo de la temperatura del aceite lo que puede llegar a causar daños en los componentes críticos del sistema.
- En el plan de proyecto se había estipulado el uso de una tarjeta NI (National Instruments) USB 6216 para la adquisición de datos, esta tarjeta fue remplazada por la NI PCI 6289, debido a que posee un mejor rendimiento que la anterior.

BIBLIOGRAFIA

- Automatización y control de procesos [en línea] 2010 <<http://es.scribd.com/doc/44614510/Libro-de-Control-Clasico>>
- BOLTON, William. Ingeniería de Control. Traducido por Francisco José Rodríguez Ramírez. 2 ed. México D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. de C.V., 2001. 397 p. ISBN 970-15-0636-7.
- BORRAS PINILLA, Carlos; Tesis de maestría: Pattern Recognition in hydraulic backlash using Neural Network Thesis (Master of Science). University of Oklahoma, Norman, Aerospace and Mechanical Engineering Department. USA, 2001
- CHAVARRO PEÑUELA, Johan Reyzel; MARIÑO LEON, Carlos Andrés. Modelado y caracterización dinámica de un servoactuador hidráulico. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010. 168 p.
- CLAVIJO CARTAGENA, Juan Carlos; RAMIREZ CONTRERAS, Luis Reinaldo. Diseño, modelamiento y simulación de una mesa sísmica unidireccional hidráulica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011. 123 p.
- CRUZ VENTURA José Luis; ONTIVEROS PAREDES Sandra Denisse; MAYOLO SALGADO Isidro y TORRES VITE Luis Ángel. [En línea]. Reseña de control clásico Vs control moderno. HUAUCHINANGO, 2012. <<http://es.scribd.com/doc/80422946/Control-Clasico-y-Control-Moderno>>

- DORF, Richard C. y BISHOP, Robert H. Sistemas de control moderno. Traducido por Sebastián Dormido Canto y Raquel Dormido Canto. 10 ed. Pearson educación S.A., Madrid, 2005. 857 p. ISBN 84-205-4401-9
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36 p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION.. Referencias Bibliográficas. Contenido, forma y estructura, NTC 5613. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 33 p.
- KUO, Benjamín. Sistemas de Control Automático. Traducido por Guillermo Aranda Pérez. 7 ed. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1996. 897 p. ISBN 968-880-723-0.
- MASAT, Emilio L. Tecnologías de control. Material producido en el Laboratorio pedagógico. Guadalupe Norte, 2011
<<https://sites.google.com/site/390tecnologiasdecontrol/home>>
- NATIONAL INSTRUMENTS [en línea]. Adquisición de datos (DAQ; <<http://www.ni.com/data-acquisition/esa/>>
- NISE, Norman. Sistemas de Control para Ingeniería. 3 ed. México D.F.: COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL., 2004. 970 p.
- OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Traducido por Miguel Ángel Martínez Sarmiento. 3 ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 1998. 997 p. ISBN 970-17-0048-1.

- RUBIANO CALDERÓN, Freddy Alexander; CEDIEL PINTO, Julián Eduardo. Diseño y construcción de un banco de experimentación para servosistema hidráulico de control de posición (Servoválvula MOOG 760 y actuador). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011. 184 p.
- CORAL ENRÍQUEZ, Horacio Andrés, Control robusto activo para la minimización de vibraciones en una estructura flexible de tres pisos bajo excitaciones sísmicas, Tesis de Maestría en Ingeniería con énfasis en Automática. Cali: Universidad del Valle.

ANEXOS

ANEXO A. Catálogo de la servovalvula MOOG

760 SERIES TWO STAGE SERVOVALVES



MOOG

760 Series
Servovalves
ISO 10372 Size 04

760 SERIES SERVO VALVES

The 760 Series flow control servovalves are throttle valves for 3-, and preferably 4-way applications. They are a high performance, two-stage design that covers the range of rated flows from 1 to 15 gpm at 1000 psi valve drop. The output stage is a closed center, four-way, sliding spool. The pilot stage is a symmetrical double-nozzle and flapper, driven by a double air gap, dry torque motor. Mechanical feedback of spool position is provided by a

cantilever spring. The valve design is simple and rugged for dependable, long life operation.

These valves are suitable for electrohydraulic position, speed, pressure or force control systems with high dynamic response requirements.

Principle of operation

An electrical command signal (flow rate set point) is applied to the torque motor coils and creates a magnetic force which acts on the ends of the pilot stage armature. This causes a

deflection of armature/flapper assembly within the flexure tube. Deflection of the flapper restricts fluid flow through one nozzle which is carried through to one spool end, displacing the spool.

Movement of the spool opens the supply pressure port (P) to one control port while simultaneously opening the tank port (T) to the other control port. The spool motion also applies a force to the cantilever spring, creating a restoring torque on the armature/flapper assembly.

Once the restoring torque becomes equal to the torque from the magnetic forces, the armature/flapper assembly moves back to the neutral position, and the spool is held open in a state of equilibrium until the command signal changes to a new level.

In summary, the spool position is proportional to the input current and, with constant pressure drop across the valve, flow to the load is proportional to the spool position.

VALVE FEATURES

- > 2-stage design with dry torque motor
- > Low friction double nozzle pilot stage
- > High spool control forces
- > High dynamics

- > Rugged, long-life design
- > High resolution, low hysteresis
- > Completely set-up at the factory
- > Optional fifth port for separate pilot supply
- > Intrinsically safe or flameproof valve versions are available

The actual flow is dependent upon electrical command signal and valve pressure drop. The flow for a given valve pressure drop can be calculated using the square root function for sharp edge orifices:

$$Q = Q_r \sqrt{\frac{P}{\Delta p_r}}$$

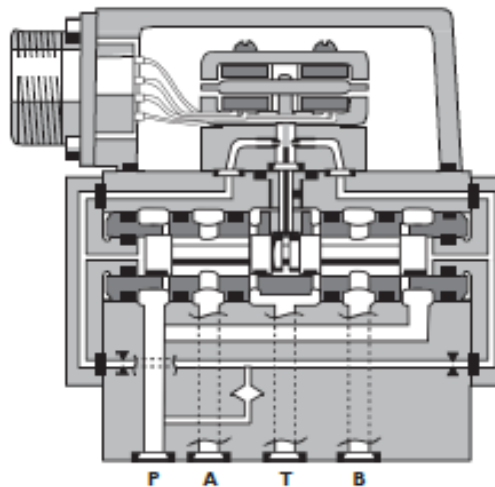
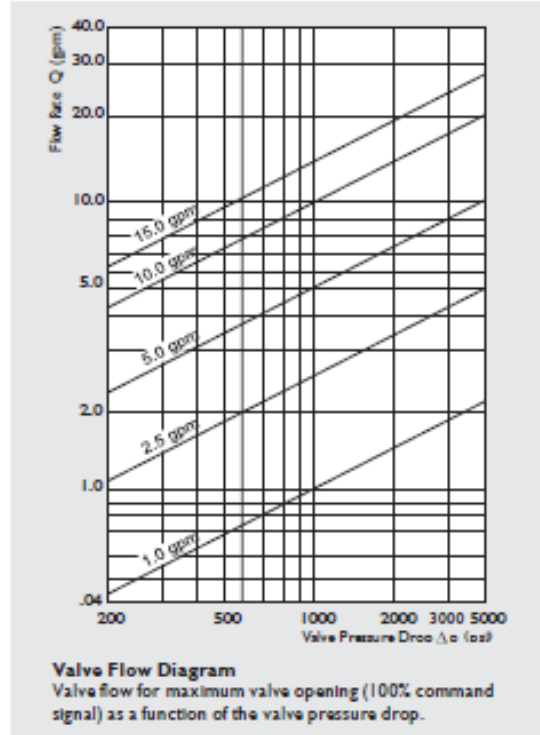
- Q [gpm] = calculated flow
- Q_r [gpm] = rated flow
- Δp [psi] = actual valve pressure drop
- Δp_r [psi] = rated valve pressure drop



**760 SERIES
TWO STAGE SERVOVALVES**

Operating Pressure*	up to 3,000 psi
ports P, X, A and B	up to 3,000 psi
port T	
Temperature Range	
Fluid	-20°F to 275°F
Ambient	-20°F to 275°F
Seal Material	Viton**
Operating Fluid	Compatible with common hydraulic fluids, other fluids on request.
Recommended viscosity	60 – 450 SUS @ 100°F
System Filtration:	High pressure filter (without bypass, but with dirt alarm) mounted in the main flow and, if possible, directly upstream of the valve. Refer to Moog filtration catalog for recommended filtration scheme.
Class of Cleanliness:	The cleanliness of the hydraulic fluid greatly affects the performance (spool positioning, high resolution) and wear (maturing edges, pressure gain, leakage) of the servovalve.
Recommended Cleanliness Class	
For normal operation	ISO 4406 < 14/11
For longer life	ISO 4406 < 13/10
Filter Rating recommended	
For normal operation	$B_{10} \geq 75$ (10 μ m absolute)
For longer life	$B_1 \geq 75$ (5 μ m absolute)
Installation Operations	Any position, fixed or movable.
Vibration	30 g, 3 axes
Weight	1.13 lb (1.91 lb for steel body)
Degree of Protection	EN60529P: class IP65, with mating connector mounted.
Shipping Plate	Delivered with an oil sealed shipping plate.

* Maximum special order is 8,000 psi
** Other seal material upon request



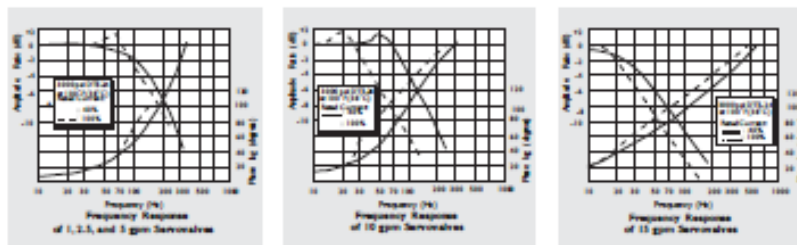
760 SERIES

Model... Type	760-.....						
Mounting Pattern	ISO 10372 - 04 - 04 - 0 - 92						
Valve Body Version	4-way						
	2-stage with spool-bushing assembly						
	Nozzle/Flapper, Highflow						
Pilot Stage	X						
Pilot Connection	Optional, Internal or External						
Rated Flow	($\pm 10\%$) at $\Delta p_v = 1,000$ psi						
	Standard	[gpm]	1.0	2.5	5.0	10.0	15.0
	High Response	[gpm]	1.0	2.5	5.0	10.0	15.0
Response Time @ 3000 psi	Standard	[ms]	6	6	6	10	16
	High Response	[ms]	4	4	4	7	13
Threshold*		[%]					0.5
Hysteresis*		[%]					3.0
Null Shift	at $\Delta T = 100^\circ F$	[%]					< 2.0
Null Leakage Flow*	max.	[gpm]					0.40 to 0.61
Pilot Leakage Flow*	max.	[gpm]					0.26
Spool Drive Area	Standard	[in ²]					.076
	High Response	[in ²]					.053
	Super High Response	[in ²]					.025

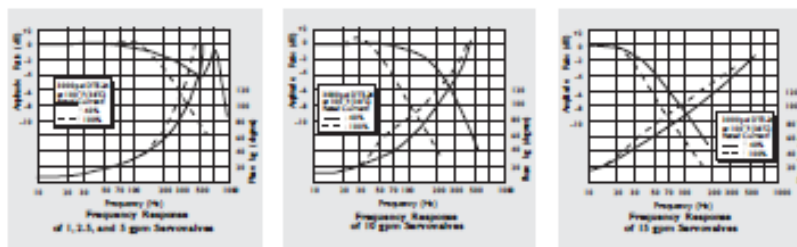
* Measured at 3,000 psi pilot or operating pressure

Typical Characteristic Curves with $\pm 40\%$ and $\pm 100\%$ Input signal, measured at 3,000 psi pilot or operating pressure.

Standard Valves



High and Super High Response Valves



Rated current and coil resistance

A variety of coils are available for 760 Series Servovalves, which offer a wide choice of rated current. See Table I.

Coil connections

A four-pin electrical connector (that mates with an MS3106/145/25) is standard. All four torque motor leads are available at the connector so external connections can be made for series, parallel, or differential operation.

760 Series Servovalves can be supplied on special order with other connectors or a pigtail.

Servoamplifier

The servovalve responds to input current, so a servoamplifier that has high internal impedance (as obtained with current feedback) should be used. This will reduce the effects of coil inductance and will minimize changes due to coil resistance variations.

ELECTRICAL CONNECTIONS
(Examples with tricoil 760 series coils)
Connector MIL-C-5015/145-25

		Parallel	Series	Single
Coil Resistance	[Ω]	100	400	200
Rated Current	[mA]	±15	±7.5	±15
Inductance	[H]	0.59	2.20	.72
Electrical Power	[W]	.023	.023	.045
Connectors for Valve Operation		A and C (+) B and D (-)	A (+), D (-) B and C connected	A (+), B (-) or C (+), D (-)
P, R, A, Y				

Note: Before applying electrical signals the pilot stage has to be pressurized.

TABLE I

Nominal Resistance Per Coil at 77°F (25°C) [Ω]	Recommended Rated Current—mA		Approximate Coil Inductance*—Henrys		
	Parallel, Differential or Single Coil Operation	Series Coils	Single Coils	Series Coils	Parallel Coils
80	±40	±20	0.22	0.66	0.18
200	±15	±7.5	0.72	2.20	0.59
1000	±8	±4	3.20	9.70	2.60

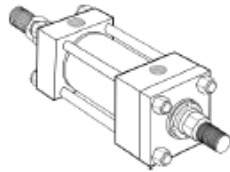
* Measured at 50 Hz

ANEXO B. Catalogo de la actuator hidráulico

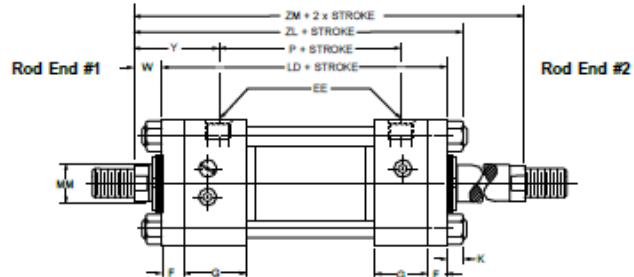
Double Rod Models
1½" to 6" Bore Sizes

Series 2H
Heavy Duty Hydraulic Cylinders

How to Use Double Rod Cylinder Dimensioned Drawings



1½" to 6" Bores



Mounting Styles for Single Rod Models	Mounting Styles for Corresponding Double Rod Models*	Dimensions Shown on This Page Supplement Dimensions on Pages Listed Below
		1½" - 6" Bore Page No.
T	KT	44
TB	KTB	44
TD	KTD	44
J	KJ	46
JB	KJB	46
JJ	KJJ	46
C	KC	50
E	KE	50
F	KF	50
CB	KCB	52
G	KG	52
D	KD	54
DD	KDD±	54

To determine dimensions for a double rod cylinder, first refer to the desired single rod mounting style cylinder shown on preceding pages of this catalog. (See table at left.) After selecting necessary dimensions from that drawing, return to this page supplement the single rod dimensions with those shown on drawing at right and dimension table below. Note that double rod cylinders have a head (Dim. G) at both ends and that dimension LD replaces LB and ZL replaces ZB, etc. The double rod dimensions differ from, or

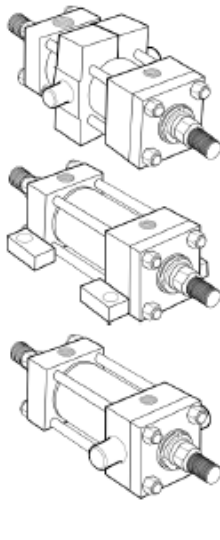
are in addition to those for single rod cylinders shown on preceding pages and provide the information needed to completely dimension a double rod cylinder.

On a double rod cylinder where the two rod ends are different, be sure to clearly state which rod end is to be assembled at which end. Port position 1 is standard. If other than standard, specify pos. 2, 3 or 4 when viewed from rod end #1 only. See port position information in Section C.

*If only one end of these Double Rod Cylinders is to be cushioned, be sure to specify clearly which end this will be.

±Specify XI dimension from rod end #1.

All dimensions are in inches and apply to Code 1 rod sizes only. For alternate rod sizes, determine all envelope dimensions (within LD dim.) as described above and then use appropriate rod end dimensions for proper rod size from single rod cylinder.



Bore	Rod No.	Rod Dia. MM	Add stroke											Add 2X Stroke
			LD	ZL	SA _k	XA _k	ZA _k	SN _k	SS _k	SE _k	XE _k	ZE _k	ZM	
1½	1	5/8	5 5/8	6 1/4	7 5/8	7 1/4	7 5/8	2 1/8	4 1/8	7 5/8	7 1/8	7 1/2	8 7/8	
2	1	1	6 1/8	6 7/8	8 5/8	8 1/8	8 5/8	2 7/8	3 7/8	8	7 13/16	8 5/16	7 5/8	
2½	1	1	6 1/4	7	8 5/8	8 5/16	8 3/4	3	3 5/8	8 5/8	7 15/16	8 7/16	7 3/4	
3¼	1	1 1/8	7 1/4	8 1/8	10 7/8	9 15/16	10 5/8	3 1/2	4 5/8	9 1/2	8 1/4	9 7/8	9	
4	1	1 3/4	7 3/4	8 3/4	12	10 7/8	11 3/4	3 3/4	4 1/4	10	9 7/8	10 1/2	9 3/4	
5	1	2	8 1/4	9 3/8	12 1/2	11 1/2	12 5/8	4 1/4	4 3/4	11 1/4	10 7/8	11 5/8	10 1/2	
6	1	2 1/2	9 3/8	10 3/8	14 1/4	13 1/16	14 1/8	4 7/8	5 1/8	12 3/4	12 5/16	13 5/16	11 7/8	
Replaces:			LB	ZB	SA	XA	ZA	SN	SS	SE	XE	ZE	—	
On single rod mounting styles:			All Mtg. Styles			CB		F	C,E		G		All Mtg.	

a
n

For additional information – call your local Parker Cylinder Distributor.

Series 2H Heavy Duty Hydraulic Cylinders

Side Lugs, Centerline Lugs
and Side Tapped Mountings
1½" to 6" Bore Sizes

Table 1—Envelope and Mounting Dimensions

Bore	E	EE		F	G	J	K	NT	SB*	ST	SU	SW	TN	TS	US	Add Stroke			
		NP	IF-C													SAE*	LB	P	SN
1½	2½	½	10	¾	1¾	1½	¾	¾-16	7/16	½	1½	¾	¾	¾	4	5	2½	2½	3½
2	3	½	10	¾	1¾	1½	7/16	1½-13	9/16	¾	1¼	½	1½	4	5	5¼	2½	2½	3½
2½	3½	½	10	¾	1¾	1½	7/16	¾-11	13/16	1	1½	1½	1½	4½	6¼	5½	3	3	3½
3¼	4½	¾	12	¾	2	1¾	9/16	¾-10	13/16	1	1½	1½	1½	5½	7¼	6¼	3½	3½	4½
4	5	¾	12	7/8	2	1¾	9/16	1-8	1½	1¼	2	7/8	2½	6¼	8½	6½	3¾	3¾	4
5	6½	¾	12	7/8	2	1¾	13/16	1-8	1½	1¼	2	7/8	2½	8¼	10	7½	4¼	4¼	4½
6	7½	1	16	1	2¼	2¼	7/8	1¼-7	13/16	1½	2½	1½	3½	9¼	12	8½	4½	5½	5½

* SAE straight thread ports are standard and are indicated by port number.
 ⊕ NPTF ports are available at no extra charge.
 * Upper surface spotfaced for socket head screws.

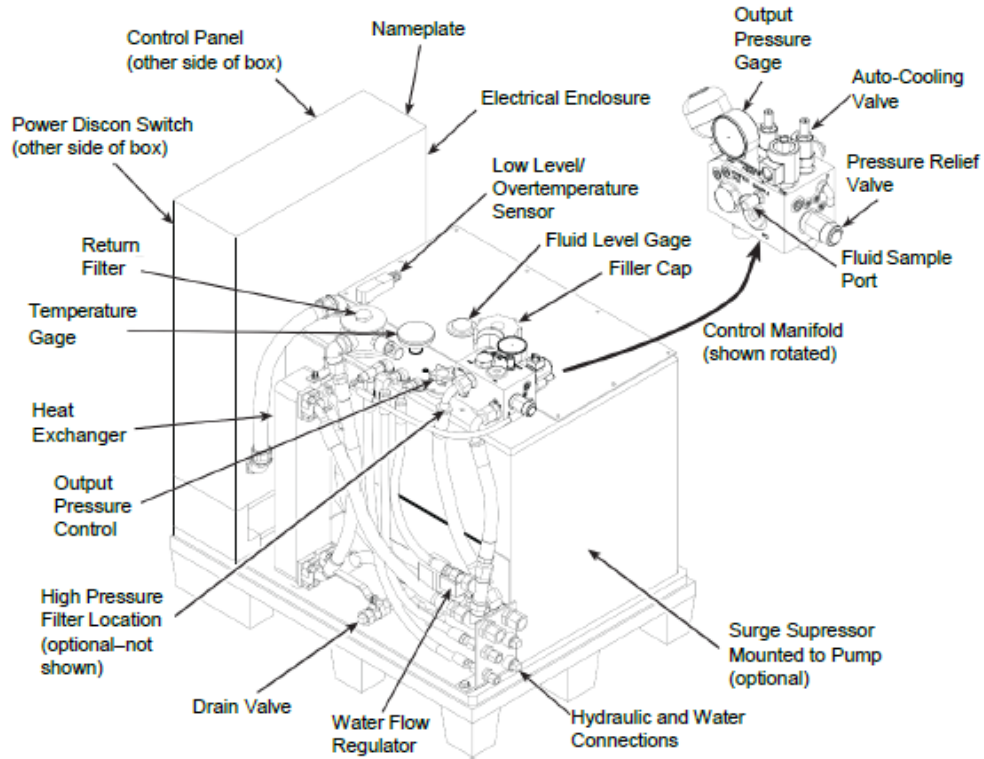
Table 2—Rod Dimensions

Bore	Rod No.	Rod Dia. MM	Thread		Rod Extensions and Pilot Dimensions								ND	XS	XT	Y	ZB	Add Stroke
			Style 8 CC	Style 4 & 9 KK	A	+0.000 -0.002 B	C	D	LA	NA	V	W						
1½	1(Std.)	¾	1½-20	7/16-20	¾	1.124	¾	½	1¾	9/16	¼	¾	¾	¾	1¾	2	2	6
	2	1	7/8-14	¾-16	1½	1.499	½	7/8	2½	13/16	½	1	¾	1¾	2½	2½	6½	
2	1(Std.)	1	7/8-14	¾-16	1½	1.499	½	7/8	1¾	13/16	¼	¾	7/8	1¾	2½	2½	6½	
	2	1½	1¼-12	1-14	1½	1.999	5/8	1½	2½	13/16	¾	1	7/8	2½	2½	6½		
2½	1(Std.)	1	7/8-14	¾-16	1½	1.499	½	7/8	1¾	13/16	¼	¾	½	2½	2½	6½		
	2	1¾	1½-12	1¼-12	2	2.374	¾	1½	3¼	1½	½	1¼	½	2½	2½	7½		
	3	1¾	1¼-12	1-14	1½	1.999	5/8	1½	2½	13/16	¾	1	½	2½	2½	6½		
3¼	1(Std.)	1¾	1¼-12	1-14	1½	1.999	5/8	1½	2½	13/16	¼	7/8	1½	2½	2½	7½		
	2	2	1¾-12	1½-12	2¼	2.624	7/8	1½	3½	1½	¾	1¼	1½	2½	3½	8½		
	3	1¾	1½-12	1¼-12	2	2.374	¾	1½	3½	1½	¾	1½	1½	2½	3	7½		
4	1(Std.)	1¾	1½-12	1¼-12	2	2.374	¾	1½	3	1½	¼	1	1½	2½	3	8½		
	2	2½	2¼-12	1¾-12	3	3.124	1	2½	4½	2½	¾	1¾	1½	3½	3½	8½		
	3	2	1¾-12	1½-12	2¼	2.624	7/8	1½	3½	1½	¼	1½	1½	2½	3½	8½		
5	1(Std.)	2	1¾-12	1½-12	2¼	2.624	7/8	1½	3½	1½	¼	1½	1	2½	3½	9½		
	2	3½	3¼-12	2½-12	3½	4.249	1	3	4½	3½	¾	1¾	1	3½	3½	9½		
	3	2½	2¼-12	1¾-12	3	3.124	1	2½	4½	2½	¾	1¾	1	3½	3½	9½		
	4	3	2¼-12	2¼-12	3½	3.749	1	2½	4½	2½	¾	1¾	1	3½	3½	9½		
6	1(Std.)	2½	2¼-12	1¾-12	3	3.124	1	2½	4¼	2½	¼	1¼	1¼	3½	3½	10½		
	2	4	3¼-12	3-12	4	4.749	1	3½	5¼	3½	¼	1¼	1¼	3½	3½	10½		
	3	3	2¾-12	2¼-12	3½	3.749	1	2½	4¼	2½	¼	1¼	1¼	3½	3½	10½		
	4	3½	3¼-12	2½-12	3½	4.249	1	3	4¼	3½	¼	1¼	1¼	3½	3½	10½		

For additional information – call your local Parker Cylinder Distributor.

ANEXO C. Catalogo de la unidad de potencia hidráulica

Component Identification



Component Locations

Component Descriptions (part 1 of 2)

COMPONENT	DESCRIPTION
Auto-Cooling Valve	Keeps the hydraulic fluid clean and cool by circulating the fluid through the return filter and the heat exchanger while the HPU is in high pressure mode and the fluid demand by the external circuit is very low.
Control Panel	Controls the operation of the power unit and indicates the current status of several detectors.
Electrical Enclosure	Houses the electrical and control components of the HPU. The main power lines enter the unit at the top. The power disconnect switch removes electrical power whenever the enclosure door is opened.
Filler Cap	Vents the hydraulic fluid reservoir. This is where you add hydraulic fluid.
Filter	Filters particles out of the hydraulic fluid as it is returned to the HPU.

Series 505 HPU General Specifications

General Specifications	
PARAMETER	SPECIFICATION
Environmental	For use in a controlled environment 5–
Operating temperature	40°C (41–104°F)
Humidity	0–85% noncondensing
Heat load	<630 kcal/hr (2500 BTU/hr)
Noise [*] rating at 1 m	60 dB (A) fully compensated
Hydraulic fluid	Exxon Mobil DTE 25 or Shell Tellus 46 AW 43–
Typical operating temperature range	49°C (110–120°F)
Filtration	3 microns nominal
Reservoir capacity	174 L (46 gal) maximum
Heat exchanger	Water-cooled stainless steel plate
Flow requirements	See “Water flow rating (input temperature)”
Water pressure	0.24–0.34 MPa (35–50 psi differential)
Maximum pressure	0.83 MPa (120 psi)
Cooling	see the Model Specific Specifications table
Water hose	19 mm (0.75 in)–inside diameter
Hydraulic connections	Each requires an O-ring face seal
Pressure	-12
Return	-12
Drain	-8 and -6 (two connections)
Water Connections	-12 (3/4 in NPT) for both In and Out
Electrical power	
Line voltage	200–575 V AC, 3∅ at 50/60 Hz
Control voltage	24 V DC
Dimensions	
Height	1067 mm (42 in)
Length	990 mm (39 in)
Width	711 mm (28 in)

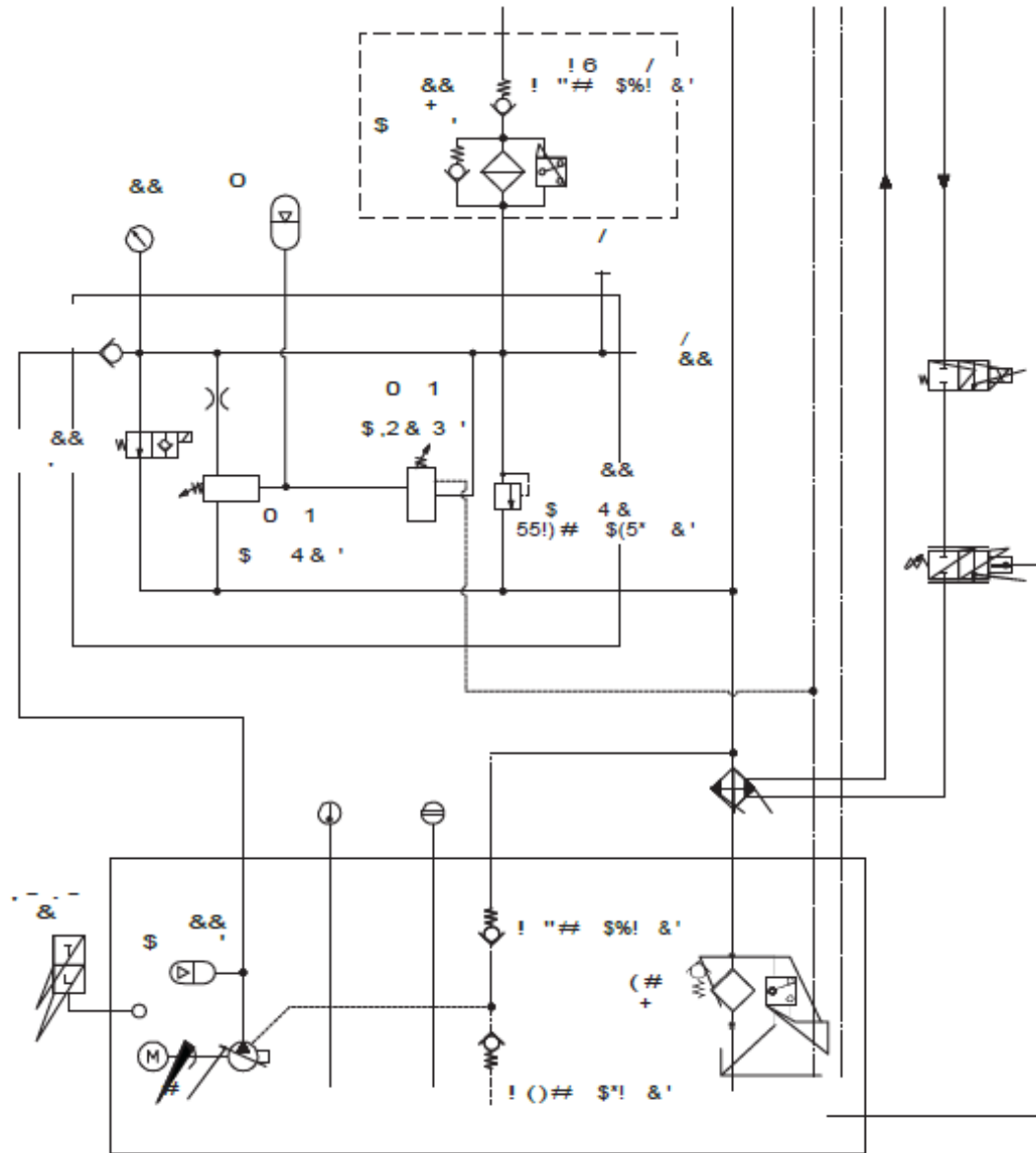
* Sound pressure level [db (A)] is expressed as a free field value. Readings may vary with the acoustic environment.

Model Specific Specifications

PARAMETER	505.07 SPECIFICATION	505.11 SPECIFICATION
Pump/motor	Line voltage starter configuration	Wye-Delta starter configuration
Maximum Continuous pressure	21 MPa (3000 psi)	21 MPa (3000 psi)
Maximum Flow capacity	22.7 L/m (6 gpm) at 50 Hz 26.5 L/m (7 gpm) at 60 Hz	41.6 L/m (11 gpm) at 50/60 Hz
Motor rating	11.2 Kw (15 hp) at 50/60 Hz	18.6 Kw (25 hp) at 50/60 Hz
Water flow rating (input temperature)		
10.0°C (50°F)	3.8 L/m (1.0 gpm)	7.2 L/m (1.9 gpm)
15.5°C (60°F)	4.9 L/m (1.3 gpm)	9.1 L/m (2.4 gpm)
21.1°C (70°F)	6.1 L/m (1.6 gpm)	12.1 L/m (3.2 gpm)
26.7°C (80°F)	8.3 L/m (2.2 gpm)	18.9 L/m (5.0 gpm)
32.2°C (90°F)	15.9 L/m (4.2 gpm)	49.2 L/m (13.0 gpm)
Heat load (maximum)	12.3 kW (42,000 Btu/hr)	20.5 kW (70,000 Btu/hr)
Weight with maximum oil 174 L (46 gal)	450 kg (992 lb)	473 kg (1042 lb)

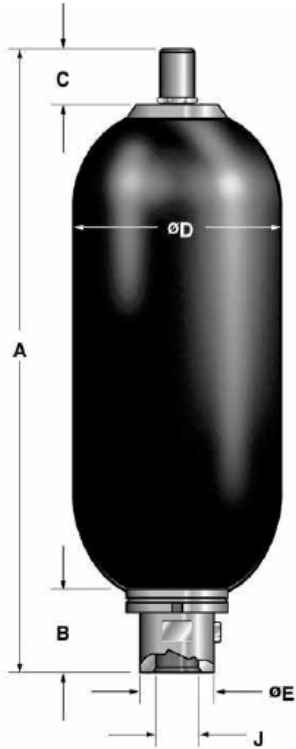
505.7 /1.11 HPU Hydraulic Schematic

The hydraulic schematic shows the functional layout of the Series 505 Hydraulic Power Unit.



ANEXO D. Catalogo del acumulador

Dimensions Bottom Repairable



SB 330... (3000 psi)

Size #1	Nom. Vol. (gal.)	Eff. Gas Vol. lmp/(gal.)	Weight	A	B*	C	ØD	ØE	Thread-J		QF
									SAE	NPTF	
1	1/4	66 (0.29)	10 (4.5)	12.0 (303)	2.0 (51)	2.3 (58)	4.6 (117)	1.4 (36)	1 1/16-12 UN (SAE-12)	3/4"	60
4	1	226 (0.98)	30 (14)	16.3 (415)	2.6 (66)	2.3 (58)	6.6 (168)	2.1 (53)	1 5/8-12 UN (SAE-20)	1 1/4"	160
6	1 1/2	340 (1.47)	33 (15)	20.5 (521)	2.6 (66)	2.3 (58)	6.6 (168)	2.1 (53)	1 5/8-12 UN (SAE-20)	1 1/4"	160
10	2 1/2	566 (2.45)	86 (39)	22.0 (559)	3.1 (80)	2.3 (58)	9.1 (231)	3.0 (76)	1 7/8-12 UN (SAE-24)	2"	240
20	5	1125 (4.87)	140 (63)	34.5 (876)	3.1 (80)	2.3 (58)	9.1 (231)	3.0 (76)	1 7/8-12 UN (SAE-24)	2"	240
32	10	2080 (9.00)	226 (102)	54.7 (1390)	3.1 (80)	2.3 (58)	9.1 (231)	3.0 (76)	1 7/8-12 UN (SAE-24)	2"	240
42	11	2320 (10.04)	270 (123)	60.2 (1530)	3.1 (80)	2.3 (58)	9.1 (231)	3.0 (76)	1 7/8-12 UN (SAE-24)	2"	240
54	15	3205 (13.87)	330 (150)	78.3 (1990)	3.1 (80)	2.3 (58)	9.1 (231)	3.0 (76)	1 7/8-12 UN (SAE-24)	2"	240

See notes at bottom of page

Dimensions are for general information only, all critical dimensions should be verified.

Dimensions are in inches/(mm) and lbs/(kg)

ANEXO E. Catalogo del LVDT

Series 210-220 Long Stroke AC LVDTs

The Series 210-220 AC LVDTs offer precision linear displacement measurements for applications with strokes from 1.5 to 60 inches. The transducers have been designed with an extremely low temperature coefficient, and non-linearity of less than $\pm 0.25\%$ F.S. Variable pitch secondary windings are incorporated into the design with computer controlled winding machines to minimize package length to stroke ratio, and assure a uniform product.



KEY FEATURES

- Ranges from $\pm 0.25''$ to $60''$
- Non-linearity $< 0.25\%$
- Low Temperature Coefficient
- Stainless Steel Construction
- High Sensitivity
- Splashproof

TRANSDUCER SPECIFICATIONS

MODEL	FULL STROKE Inches (mm)	MAX. USABLE STROKE Inches (mm)	BODY LENGTH L Inches (mm)	CORE PIN	CORE LENGTH Lc Inches (mm)	CORE MASS Grams	INPUT IMPEDANCE Ohms	DC INPUT RESISTANCE Ohms	OUTPUT IMPEDANCE Ohms	PHASE ANGLE Degrees
0215-0000	0.25 (6.4)	0.65 (16.5)	2.50 (63.5)	C005-0108	1.00 (25.4)	5.1	205	22	265	13
0216-0000	0.50 (12.7)	0.95 (24.1)	3.25 (82.6)	C005-0108	1.00 (25.4)	5.1	235	31	310	17
0217-0000	1.00 (25.4)	1.45 (36.8)	4.50 (114.3)	C005-0113	1.25 (31.8)	5.6	195	36	205	19
0218-0000	2.00 (50.8)	2.70 (68.9)	7.50 (190.5)	C005-0107	1.50 (38.1)	5.1	200	46	255	22
0219-0000	3.00 (76.2)	3.80 (96.5)	10.00 (254.0)	C005-0106	1.90 (48.3)	10.9	225	57	265	25
0220-0000	5.00 (127.0)	5.95 (151.1)	15.00 (381.0)	C005-0105	2.50 (63.5)	14.7	360	89	460	31
0221-0000	7.50 (190.5)	8.45 (214.6)	21.50 (546.1)	C005-0104	4.00 (101.6)	24.5	235	55	235	30
0222-0000	10.00 (254.0)	11.00 (279.4)	28.00 (711.2)	C005-0103	5.50 (139.7)	34.4	330	72	265	31
0223-0000	15.00 (381.0)	16.40 (416.6)	40.00 (1016)	C005-0100	7.00 (177.8)	44.4	450	57	365	25
0224-0000	20.00 (508.0)	21.30 (541.0)	50.00 (1270)	C005-0100	7.00 (177.8)	44.4	560	100	560	30
0225-0000	25.00 (635.0)	26.20 (665.5)	60.00 (1524)	C005-0100	7.00 (177.8)	44.4	210	41	365	28
0226-0000	30.00 (762.0)	31.30 (795.0)	70.00 (1778)	C005-0100	7.00 (177.8)	44.4	200	45	410	30

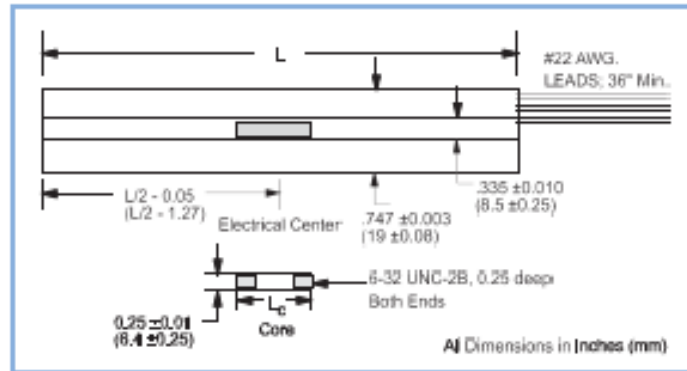
(Specifications at reference frequency)

NON-LINEARITY	$\pm 0.25\%$ FS (Best Fit Straight Line)
REFERENCE FREQUENCY	Models 0215-0000 thru 0222-0000, 7.0 KHz; Models 0223-0000 thru 0226-0000, 3.0 KHz
SENSITIVITY	0.50 V/V $\pm 10\%$ at FULL SCALE
INPUT VOLTAGE	20 VRMS, Max.
NULL VOLTAGE	$< 1.0\%$ Excitation Voltage
TEMPERATURE COEFFICIENTS	$< \pm 0.001\%$ FS/ $^{\circ}$ F Zero, $< \pm 0.01\%$ Reading/ $^{\circ}$ F Span
TEMPERATURE RANGE	-67 $^{\circ}$ F to +257 $^{\circ}$ F (-55 $^{\circ}$ C to +125 $^{\circ}$ C) Operating -67 $^{\circ}$ F to +275 $^{\circ}$ F (-55 $^{\circ}$ C to +135 $^{\circ}$ C) Storage
OUTER HOUSING AND BORE LINER	300 Series Stainless Steel
CORE	Chrome Plated Iron/Nickel Alloy

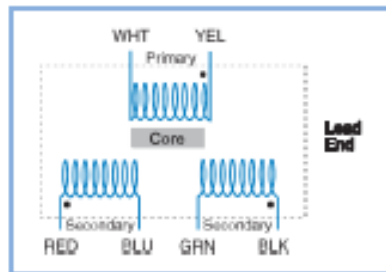
Tel: 800-828-3964 Fax: 860-872-4211
860-872-8351 Web: www.translekinc.com

SERIES 210-220
Long Stroke
AC LVDTs

DIMENSIONAL DIAGRAM



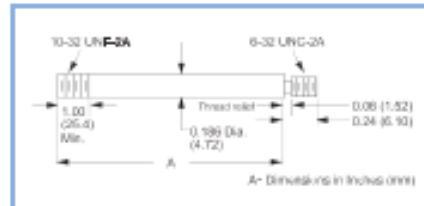
SCHEMATIC



CORE EXTENSION RODS (Sold Separately)

The recommended core extension rods are made of nonmagnetic stainless steel and are sized to allow the transducers to operate over their full range. Extension rods from models with longer strokes may be used to facilitate installation. Using extension rods shorter than recommended may reduce the LVDT's usable measurement range.

DIMENSIONAL DIAGRAM



MODEL	RECOMMENDED CORE EXTENSION ROD	DIMENSION A Inches (mm)
0215-0000	C008-0174	3.00 (76.2)
0216-0000	C008-0175	3.60 (91.4)
0217-0000	C008-0178	4.70 (119.4)
0218-0000	C008-0177	7.20 (182.8)
0219-0000	C008-0178	9.30 (238.2)
0220-0000	C008-0179	13.70 (348.0)
0221-0000	C008-0180	19.00 (482.8)
0222-0000	C008-0181	24.20 (614.7)
0223-0000	C008-0182	35.00 (890.0)
0224-0000	C008-0183	45.50 (1156)
0225-0000	C008-0184	58.00 (1422)
0226-0000	C008-0185	68.50 (1689)

TRANS-TEK
INCORPORATED

Series 210-220 DC-DC System Operation Modified Versions

DC-DC OPERATION WITH OPTIONAL OSCILLATOR/DEMULATOR

To facilitate prototyping, or in instances where a DC in - DC out system is preferred, any of the standard, high temperature or vented Series 210-220 can be used in conjunction with the Series 1000 Oscillator/Demodulator. The DC system provides the same level of performance as a stand-alone AC LVDT. The high level DC output voltage can be directly interfaced with analog circuits

as well as data acquisition cards, PLCs, or A/D converters. Each Oscillator/Demodulator can be customized to provide a zero-offset and nonstandard gain, meeting specific user requirements. Detailed connection information can be found in the Accessories portion of this catalog.

SYSTEM SPECIFICATIONS *(Combined Performance of LVDT and Oscillator/Demodulator)*

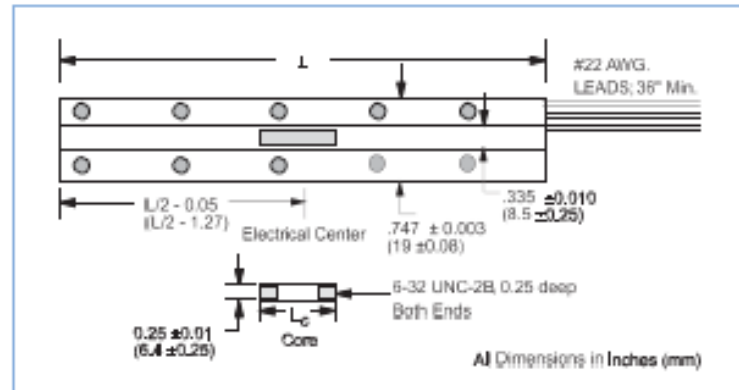
SELECTED OSCILLATOR/DEMULATOR	Model 1000-0011: Models 0223-0000 thru 0226-0000 Model 1000-0012: Models 0215-0000 thru 0222-0000
NON-LINEARITY	$\pm 0.25\%$ FS (Best Fit Straight Line)
INPUT	± 14.5 to ± 28.0 VDC, ± 100 mA Max., internal regulation and input reversal protection provided
OUTPUT	Adjustable to ± 5.0 VDC at end of linear stroke, via SPAN adjustment
FREQUENCY RESPONSE (-3dB)	Systems with 1000-0011: 500 Hz Min.; Systems with 1000-0012: 1000 Hz Min.
OUTPUT RIPPLE	< 0.03 VRMS Max.
TEMPERATURE COEFFICIENTS	$< \pm 0.0035\%$ FS/°F Zero, $< \pm 0.02\%$ Reading/°F Span
TEMPERATURE RANGE	LVDT: -67°F to +257°F (-55°C to +125°C) Operating LVDT: -67°F to +275°F (-55°C to +135°C) Storage Osc./Dem: +32°F to +158°F (0°C to +70°C) Operating, -67°F to +257°F (-55°C to +125°C) Storage

SERIES 210-220 MODIFIED FOR USE IN HIGH PRESSURE ENVIRONMENTS

The high pressure version of the Series 210-220 is suitable for operation in nonconductive and noncorrosive fluids or gases at pressures up to 5,000 P.S.I. The vented housing eliminates

pressure differentials between the environment and the transducer's interior, allowing rapid and extreme pressure changes without damage or degradation in performance.

DIMENSIONAL DIAGRAM



MODEL	STROKE ±inches (mm)
0215-0003	0.25 (6.35)
0216-0005	0.50 (12.7)
0217-0005	1.00 (25.4)
0218-0010	2.00 (50.8)
0219-0014	3.00 (76.2)
0220-0011	5.00 (127)
0221-0005	7.50 (191)
0222-0007	10.00 (254)
0223-0005	15.00 (381)
0224-0004	20.00 (508)
0225-0004	25.00 (635)
0226-0003	30.00 (762)

Note: All electrical and physical specifications are the same as the standard Series 210-220 LVDTs.

Tel: 800-828-3964 Fax: 860-872-4211
860-872-8351 Web: www.transstekinc.com

SERIES 210-220
Long Stroke
AC LVDTs

SERIES 210-220 MODIFIED FOR USE IN HIGH TEMPERATURE ENVIRONMENTS

The High Temperature version of the Series 210-220 has been designed to operate in temperatures from -67°F to +400°F. The LVDTs are identical electrically and mechanically to the standard Series 210-220 transducers, providing the same high level of performance and reliability. To achieve the elevated operating temperature, materials such as the epoxy, solder, and magnet wire have been replaced by their high temperature equivalents.

MODEL	STROKE inches (mm)
0215-0004	0.25 (6.35)
0216-0006	0.50 (12.7)
0217-0008	1.00 (25.4)
0218-0011	2.00 (50.8)
0219-0015	3.00 (76.2)
0220-0012	5.00 (127)
0221-0006	7.50 (191)
0222-0008	10.00 (254)
0223-0006	15.00 (381)
0224-0005	20.00 (508)
0225-0005	25.00 (635)
0226-0004	30.00 (762)

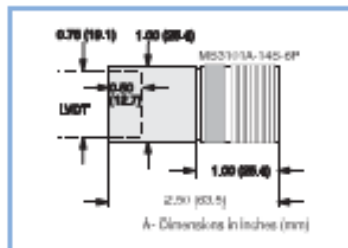
Note: All electrical and physical specifications are the same as the standard Series 210-220 LVDTs.

SALES OPTIONS

The following options are available with this series of transducer. The option must be specified at the time an order is placed.

Option #	Description
X0006	±0.10% Max. Non-Linearity
X0009	Provide longer leads to a specified length
X0012	Replace leads with an integral connector type MS3101A-14S-6P; Adaptor for connector has 1.00" O.D.; mating connector included

OPTION X0012



For more detailed information about these options, please contact the factory.



ANEXO F. Catalogo del acondicionador de señal del LVDT.

Series 1000 Oscillator/Demodulator

The Series 1000 Oscillator/Demodulators provide complete electrical support for AC LVDTs. Working from an unregulated DC input, the modules generate a stable sinusoidal excitation voltage for the transducer. The LVDT's secondary voltages are converted into DC voltage by the module's phase sensitive demodulator. The demodulator has automatic phase synchronization which simplifies installation and setup by eliminating the need to make phase angle adjustments for each transducer. An active, three-pole filter in the final stage reduces output ripple while maximizing frequency response. Other features include zero and span controls, full encapsulation, threaded inserts for mounting, and self locking terminal strips.



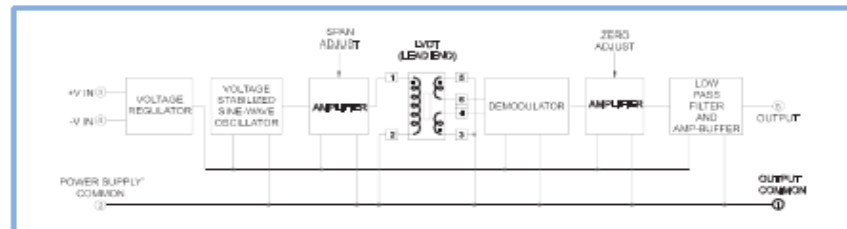
KEY FEATURES

- Works with 5 and 6 wire LVDTs
- Internally Regulated
- DC Voltage or 4-20 mA Output
- High Frequency Response

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

INPUT POWER	Voltage	± 14.5 to ± 28 VDC, Input polarity protected NOTE: DUAL DC OUTPUT POWER SUPPLY REQUIRED
	Current	± 150 mA Max. plus LVDT current
OSCILLATOR OUTPUT TO LVDT	Voltage	4.25 to 5.75 VRMS adjustable via 15 turn span control
	Current	Will drive LVDTs with primary impedance of 100 Ohms or greater. Short circuit and thermally protected
SIGNAL OUTPUT - VOLTAGE	Voltage	DC output is 2 times the RMS output of the LVDT. Output voltage is limited to ± 12 VDC.
MODELS 1000-0011, 1000-0012, 1000-0014	Current	± 3 mA without distortion
	Impedance	Less than 5 Ohms
	Ripple	0.015 VRMS Max.
SIGNAL OUTPUT - CURRENT	Current	4-20 mA output with LVDT whose sensitivity is 0.5 V/V ($\pm 10\%$). Min. Full Scale Output current: 2-22 mA
MODELS 1000-0021, 1000-0022, 1000-0024	Load Impedance	$> 1 \times 10^6$ Ohms; Operation into loop impedance between 5 and 400 Ohms.
	ACCURACY	Non-linearity $\pm 0.05\%$ Max. over ± 10 VDC output Temp. Coef. $< \pm 0.00025\%/^{\circ}\text{F}$ Zero, $< \pm 0.01\%$ output/ $^{\circ}\text{F}$ Span
TEMPERATURE RANGE	Operating	$+32^{\circ}\text{F}$ to $+158^{\circ}\text{F}$ (0°C to $+70^{\circ}\text{C}$)
	Storage	-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$ (-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$)
ZERO ADJUSTMENT		± 0.40 Min. VDC via 15 turn zero control
TERMINAL CONNECTIONS		Friction terminals with self locking screws, accepts up to #16 AWG wire.

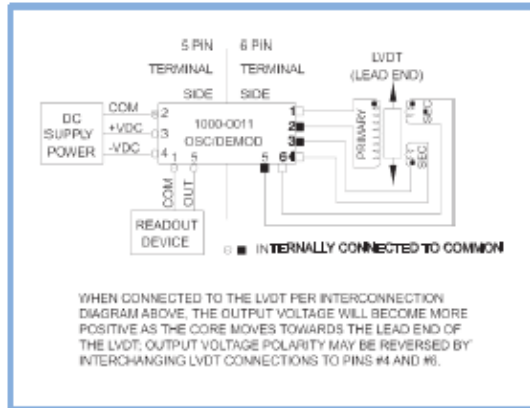
BLOCK DIAGRAM



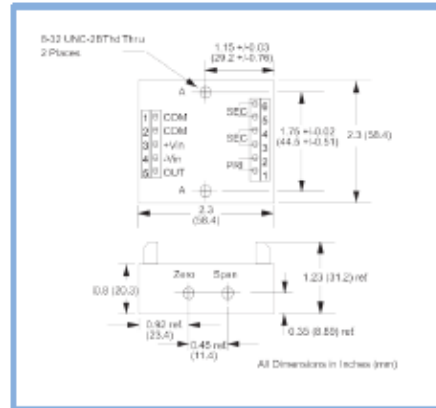
Tel: 800-828-3964 Fax: 860-872-4211
860-872-8351 Web: www.transstekinc.com

SERIES 1000
Oscillator/
Demodulator

INTERCONNECTION DIAGRAM



DIMENSIONAL DIAGRAM



NOTE:

1. 4 wire LVDT connection requires access to the center connection of both secondaries. One wire from each of the secondaries and the primary will be tied together and attached to COMMON. The remaining three leads will be connected as shown in the connection diagram.

VOLTAGE AND 4-20 MA OUTPUT VERSIONS

The equivalent models for voltage and 4-20 mA output are shown in the table below, along with frequency, phase angle and frequency response for each. All of these modules are physically

identical and require the same dual bipolar voltage supply. The output pins 5 and 1 are used for the current output.

VDC MODEL	4-20 mA MODEL	FREQUENCY KHz ±10%	LVDT PHASE ANGLE	FREQUENCY RESPONSE, Hz
1000-0011	1000-0021	3	ALL	> 500
1000-0012	1000-0022	7	> 10 Degrees	> 1000
1000-0014	1000-0024	7	< 10 Degrees	> 1000

Note: Current Loop impedance must be between 5 and 400 Ohms for linear operation.

SALES OPTIONS

Option #	Description
X0003:	Provide special zero offset and/or sensitivity
X0005:	Provide special cutoff frequency



ANEXO G. Catalogo de la tarjeta de adquisición de datos.



NI PCI-6289

18 Bits, 500 kSs (Multicanal), 625 kS/s (Monocanal), 32 Entradas Analógicas

- Cuatro salidas analógicas de 16 bits (2.8 MS/s), 48 E/S digitales, dos contadores de 32 bits a 80 MHz
- E/S digital correlacionada (32 líneas sincronizadas, 10 MHz), disparo analógico y digital
- Filtros paso bajo programables de 40 kHz
- La tecnología de calibración NI-MCal proporciona una mayor precisión
- Disponible en versión compatible con RoHS (No. de Parte 779737-01); llame para hacer su pedido
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos



Resumen de Especificaciones

General

Producto	PCI-6289
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Formato Físico	PCI
Número de Parte	779737-01 , 779111-01
Sistema Operativo/Objetivo	Real-Time , Linux , Mac OS , Windows
Soporte para LabVIEW RT	Sí
Familia de Productos DAQ	Serie M
Tipos de Medida	Frecuencia , Voltaje , Codificadores de cuadratura , Digital
Tipo de Aislamiento	None
Compatibilidad con RoHS	Sí
Acondicionamiento de Señales	Filtrado de bajo paso

Entrada Analógica

Canales	32 , 16
Canales de una sola terminal	32
Canales Diferenciales	16
Resolución	18 bits
Velocidad de Muestreo	625 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	980 . μ V
Sensibilidad Máxima del Rango de Voltaje	24 . μ V
Rango de Voltaje Mínimo	-100 mV , 100 mV
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	28 . μ V
Mínima Sensibilidad del Rango de Voltaje	0.8 . μ V
Número de Rangos	7
Muestreo Simultáneo	No
Memoria Interna	4095 muestras

Salida Analógica

Canales	4
Resolución	16 bits
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	1540 .V
Rango de Voltaje Mínimo	-1 V , 1 V
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	259 .V
Razón de Actualización	2.86 MS/s
Capacidad de Corriente Simple	5 mA

E/S Digital

Canales Bidireccionales	48
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Temporización	Software , Hardware
Líneas Sincronizadas	32
Máximo Rango de Tiempo	10 MHz
Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sourcing , Sinking
Salida de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Filtros de Entrada Programables	Sí
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	Sí
Capacidad de Corriente Simple	24 mA
Capacidad de Corriente Total	1 A
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	Sí
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V

Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	2
Número de Canales DMA	2
Operaciones a Búfer	Sí
Eliminación de Rebotes	Sí
Sincronización GPS	No
Rango Máximo	0 V , 5 V
Frecuencia Máxima de la Fuente	80 MHz
Generación de Pulso	Sí
Resolución	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL
Especificaciones Físicas	
Longitud	15.5 cm
Ancho	9.7 cm
Conector de E/S	VHDCI hembra de 68 pines
Temporización/Disparo/Sincronización	
Disparo	Digital , Analógico
Bus de Sincronización (RTSI)	Sí

ANEXO H. Datasete Integrado Ad 843JN.



34 MHz, CBFET
Fast Settling Op Amp

AD843

FEATURES

AC PERFORMANCE

Unity Gain Bandwidth: 34 MHz
Fast Settling: 135 ns to 0.01%
Slew Rate: 250 V/μs
Stable at Gains of 1 or Greater
Full Power Bandwidth: 3.9 MHz

DC PERFORMANCE

Input Offset Voltage: 1 mV max (AD843K/B)
Input Bias Current: 0.6 nA typ
Input Voltage Noise: 19 nV/√Hz
Open Loop Gain: 30 V/mV into a 500 Ω Load
Output Current: 50 mA min
Supply Current: 13 mA max
Available in 8-Pin Plastic Mini-DIP & Cerdip, 16-Pin SOIC,
20-Pin LCC and 12-Pin Hermetic Metal Can Packages
Available in Tape and Reel in Accordance with EIA-
481A Standard
Chips and MIL-STD-883B Parts Also Available

APPLICATIONS

High Speed Sample-and-Hold Amplifiers
High Bandwidth Active Filters
High Speed Integrators
High Frequency Signal Conditioning

PRODUCT DESCRIPTION

The AD843 is a fast settling, 34 MHz, CBFET input op amp. The AD843 combines the low (0.6 nA) input bias currents characteristic of a FET input amplifier while still providing a 34 MHz bandwidth and a 135 ns settling time (to within 0.01% of final value for a 10 volt step). The AD843 is a member of the Analog Devices' family of wide bandwidth operational amplifiers. These devices are fabricated using Analog Devices' junction isolated complementary bipolar (CB) process. This process permits a combination of dc precision and wideband ac performance previously unobtainable in a monolithic op amp. The 250 V/μs slew rate and 0.6 nA input bias current of the AD843 ensure excellent performance in high speed sample-and-hold applications and in high speed integrators. This amplifier is also ideally suited for high bandwidth active filters and high frequency signal conditioning circuits.

Unlike many high frequency amplifiers, the AD843 requires no external compensation and it remains stable over its full operating temperature range. It is available in five performance grades: the AD843J and AD843K are rated over the commercial temperature

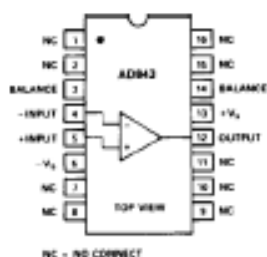
range of 0°C to +70°C. The AD843A and AD843B are rated over the industrial temperature range of -40°C to +85°C. The AD843S is rated over the military temperature range of -55°C to +125°C and is available processed to MIL-STD-883B, Rev. C.

REV. D

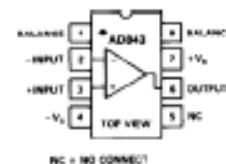
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

CONNECTION DIAGRAMS

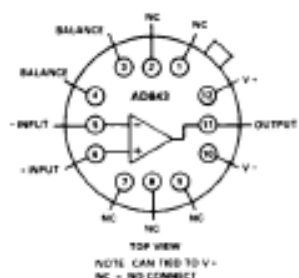
16-Pin SOIC (R-16) Package



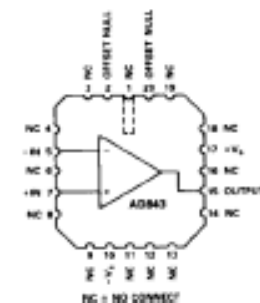
Plastic (N-8) and Cerdip (Q-8) Package



TO-8 (H-12A) Package



LCC (E-20A) Package



The AD843 is offered in either 8-pin plastic DIP or hermetic cerdip packages, in 16-pin SOIC, 20-Pin LCC, or in a 12-pin metal can. Chips are also available.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The high slew rate, fast settling time and low input bias current of the AD843 make it the ideal amplifier for 12-bit D/A and A/D buffers, for high speed sample-and-hold amplifiers and for high speed integrator circuits. The AD843 can replace many FET input hybrid amplifiers such as the LH0032, LH4104 and OPA600.
2. Fully differential inputs provide outstanding performance in all standard high frequency op amp applications such as signal conditioning and active filters.
3. Laser wafer trimming reduces the input offset voltage to 1 mV max (AD843K and AD843B).
4. Although external offset nulling is unnecessary in many applications, offset null pins are provided.
5. The AD843 does not require external compensation at closed loop gains of 1 or greater.

© Analog Devices, Inc., 1995

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. Tel: 617/321-9470 Fax: 617/326-8703

AD843-SPECIFICATIONS (@ T_A = +25°C and 15 V dc, unless otherwise noted)

Model	Conditions	AD843/A			AD843S/B			AD843S ¹			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE ¹ Offset Drift	T _{MIN} -T _{MAX}	1.0	2.0		0.5	1.0		1.0	2.0		mV
		1.7	4.0		1.2	2.0		3.0	4.5		mV / °C
INPUT BIAS CURRENT	Initial (T _J = +25°C) Warm-Up ² T _{MIN} -T _{MAX}	60	2.5		40	1.0		60	2.5		pA
		0.8	60/160		0.6	23/65		0.8	2600		nA nA
INPUT OFFSET CURRENT	Initial (T _J = Warm-Up ² T _{MIN} -T _{MAX}	30	1.0		20	0.4		30	1.0		pA
		0.25	23/64		0.2	9/26		0.25	10/25		nA nA
INPUT CHARACTERISTICS Input Resistance Input Capacitance		10 ¹⁰ 6			10 ¹⁰ 6			10 ¹⁰ 6			pF
INPUT VOLTAGE RANGE Common Mode		610	+12, -43		610	+12, -43		610	+12, -43		V
COMMON-MODE REJECTION	V _{CM} = 10 V T _{MIN} -T _{MAX}	60	72		70	76		60	72		dB dB
INPUT VOLTAGE NOISE Wideband Noise	f = 10 kHz 10 Hz to 10 MHz	19 60			19 60			19 60			nV/√Hz μV rms
OPEN LOOP GAIN	V _O = 10 V R _{LOAD} = 500 Ω T _{MIN} -T _{MAX}	15	25		20	30		15	30		V/mV V/mV
OUTPUT Voltage Current Output Resistance	R _{LOAD} = 500 Ω V _{OUT} = 10 V Open Loop	610	+11.5, -12.6		610	+11.5, -12.6		610	+11.5, -12.6		V mA
		50	12		50	12		50	12		Ω
FREQUENCY RESPONSE Unity Gain Bandwidth Full Power Bandwidth ³	V _{OUT} = 90 mV p-p V _O = 20 V p-p R _L = 500 Ω	34			34			34			MHz
		2.5	3.9		2.5	3.9		2.5	3.9		MHz
Rise Time	A _{OL} = -1	10			10			10			ns
Overshoot	A _{OL} = -1	15			15			15			%
Slew Rate	A _{VCL} = -1	160			160			160			V/μs
Settling Time	10 V Step A _{OL} = -1										
Overdrive Recovery	-Overdrive +Overdrive	95			95			95			ns
		to 0.01%			135			135			ns
Differential Gain	f = 4.4 MHz	200			200			200			ns
		700			700			700			ns
Differential Phase	f = 4.4 MHz	0.02			0.025			0.025			°
POWER SUPPLY Rated Performance Operating Range Quiescent Current	T _{MIN} -T _{MAX} ±5 V to ±18 V T _{MIN} -T _{MAX}	64.5	15	618	64.5	15	618	64.5	15	618	V V mA
			12	13		12	13		12	13	
Rejection Ratio		65			70			65			dB
Rejection Ratio		62			65			62			dB
TEMPERATURE RANGE Operating, Rated Performance Commercial (0°C to +70°C) Industrial (-40°C to +85°C) Military		AD843 J AD843			AD843 K AD843			AD843S			
PACKAGE OPTIONS Plastic (N-8) CerDip (Q-8) Metal Can (H- 12A) LCC (E- 20A) SOIC (R- 16) Tape & Reel		AD843JN AD843AQ			AD843K N AD843B Q AD843B H			AD843SQ, AD843SQ/883B AD843SH, AD843SH/883B AD843SE/883B			

ANEXO I. Dataset Integrado LM 833.



LM833

www.ti.com

SLOS481A – JULY 2010 – REVISED AUGUST 2010

DUAL HIGH-SPEED AUDIO OPERATIONAL AMPLIFIER

Check for Samples: LM833

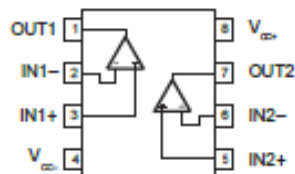
FEATURES

- Dual-Supply Operation: ± 5 V to ± 18 V
- Low Noise Voltage: $4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Low Input Offset Voltage: 0.15 mV
- Low Total Harmonic Distortion: 0.002%
- High Slew Rate: $7 \text{ V}/\mu\text{s}$
- High-Gain Bandwidth Product: 16 MHz
- High Open-Loop AC Gain: 800 at 20 kHz
- Large Output-Voltage Swing: 14.1 V to -14.6 V
- Excellent Gain and Phase Margins
- Available in 8-Pin MSOP Package (3mm x 4.9mm x 0.65mm)

APPLICATIONS

- HiFi Audio System Equipment
- Pre-amplification and Filtering
- Set Top Box
- Microphone Pre-Amplifier Circuit
- General-Purpose Amplifier Applications

D (SOIC), DGK (MSOP), OR P (PDIP) PACKAGE
(TOP VIEW)



DESCRIPTION

The LM833 is a dual operational amplifier with high-performance specifications for use in quality audio and data-signal applications. This device operates over a wide range of single- and dual-supply voltage with low noise, high-gain bandwidth, and high slew rate. Additional features include low total harmonic distortion, excellent phase and gain margins, large output voltage swing with no deadband crossover distortions, and symmetrical sink/source performance.

The dual amplifiers are utilized widely in circuit of audio optimized for all preamp and high level stages in PCM and HiFi systems. LM833 is pin-for-pin compatible with industry-standard dual operation amplifiers' pin assignments. With addition of a preamplifier, the gain of the power stage can be greatly reduced to improve performance.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of submission date.
Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2010, Texas Instruments Incorporated

ORDERING INFORMATION⁽¹⁾

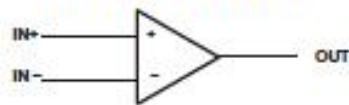
T _A	PACKAGE ⁽²⁾		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING ⁽³⁾
–40°C to 85°C	PDIP – P	Tube of 50	LM833P	LM833P
		Tube of 75	LM833D	
	SOIC – D	Reel of 2500	LM833DR	LM833
		Reel of 2500	LM833DGKR	
	V88OPMBOP – DGK	Reel of 250	LM833DGKT	RS_

(1) For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum at the end of this document, or see the TI web site at www.ti.com.

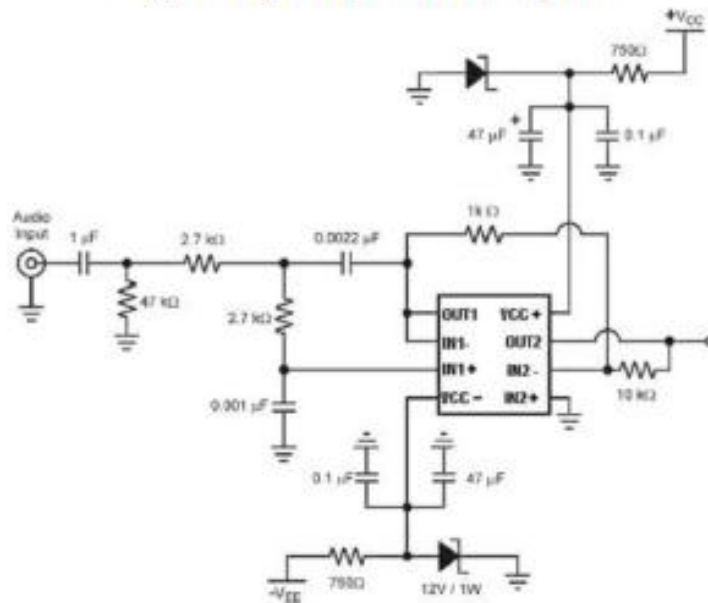
(2) Package drawings, thermal data, and symbolization are available at www.ti.com/packaging.

(3) DGK: The actual top-side marking has one additional character that designates the wafer fab/assembly site.

Symbol (Each Amplifier)



Typical Design Example Audio Pre-Amplifier



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT
V_{CC+}	Supply voltage ⁽²⁾		18	V
V_{CC-}	Supply voltage ⁽²⁾		-18	V
$V_{CC+} - V_{CC-}$	Supply voltage		36	V
	Input voltage, either input ^{(2) (3)}		V_{CC+} or V_{CC-}	V
	Input current ⁽⁴⁾		±10	mA
	Duration of output short circuit ⁽⁵⁾		Unlimited	
θ_{JA}	Package thermal impedance, junction to free air ^{(6) (7)}	D package	97	°C/W
		DGK package	172	
		F package	85	
T_J	Operating virtual junction temperature		150	°C
T_{stg}	Storage temperature range	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltage values, except differential voltages, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
- (3) The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage.
- (4) Excessive input current will flow if a differential input voltage in excess of approximately 0.6 V is applied between the inputs, unless some limiting resistance is used.
- (5) The output may be shorted to ground or either power supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure the maximum dissipation rating is not exceeded.
- (6) Maximum power dissipation is a function of $T_J(\max)$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(\max) - T_A) / \theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.
- (7) The package thermal impedance is calculated in accordance with JEDEC 51-7.

ELECTROSTATIC DISCHARGE RATINGS

		MIN	MAX	UNIT
ESD	Human-Body Model (HBM)		2.5	kV
	Charged-Device Model (CDM)		1.5	

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

		MIN	MAX	UNIT
V_{CC-}	Supply voltage	-5	-18	V
V_{CC+}		5	18	
T_A	Operating free-air temperature range	-40	85	°C

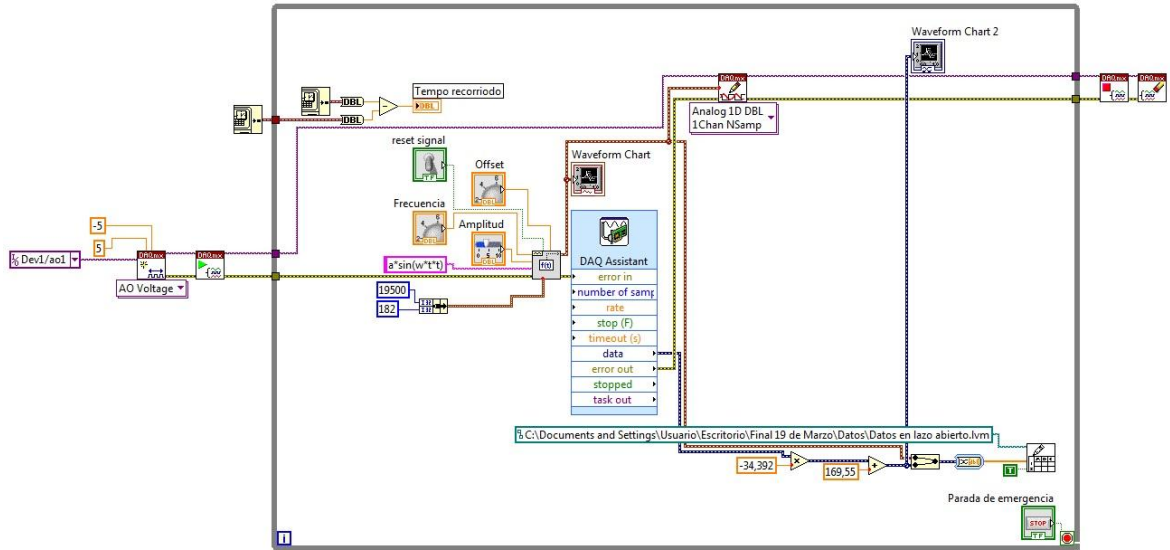
ELECTRICAL CHARACTERISTICS $V_{CC-} = -15\text{ V}$, $V_{CC+} = 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$, $R_B = 10\ \Omega$, $V_{CM} = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.15	2	mV
		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C			3	
dV_{IO} Input offset voltage temperature coefficient	$V_O = 0$, $R_B = 10\ \Omega$, $V_{CM} = 0$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C		2		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_B Input bias current	$V_O = 0$, $V_{CM} = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		300	750	nA
		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C			800	
I_O Input offset current	$V_O = 0$, $V_{CM} = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		25	150	nA
		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C			175	
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$\Delta V_{IO} = 5\text{ mV}$, $V_O = 0$		± 13	± 14		V
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_O = \pm 10\text{ V}$			90	110	dB
				85		
V_{OM} Maximum output voltage swing	$V_{ID} = \pm 1\text{ V}$	$R_L = 600\ \Omega$	V_{OM+}		10.7	V
			V_{OM-}		-11.9	
		$R_L = 2\text{ k}\Omega$	V_{OM+}	13.2	13.8	
			V_{OM-}	-13.2	-13.7	
		$R_L = 10\text{ k}\Omega$	V_{OM+}	13.5	14.1	
			V_{OM-}	-14	-14.6	
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IN} = \pm 13\text{ V}$		80	100		dB
k_{AV} ⁽¹⁾ Supply-voltage rejection ratio	$V_{CC+} = 5\text{ V}$ to 15 V , $V_{CC-} = -5\text{ V}$ to -15 V		80	105		dB
I_{OS} Output short-circuit current	$ V_{IO} = 1\text{ V}$, Output to GND	Source current	15	29		mA
		Sink current	-20	-37		
I_{CC} Supply current (per channel)	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	2.05	2.5		mA
		$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C			2.75	

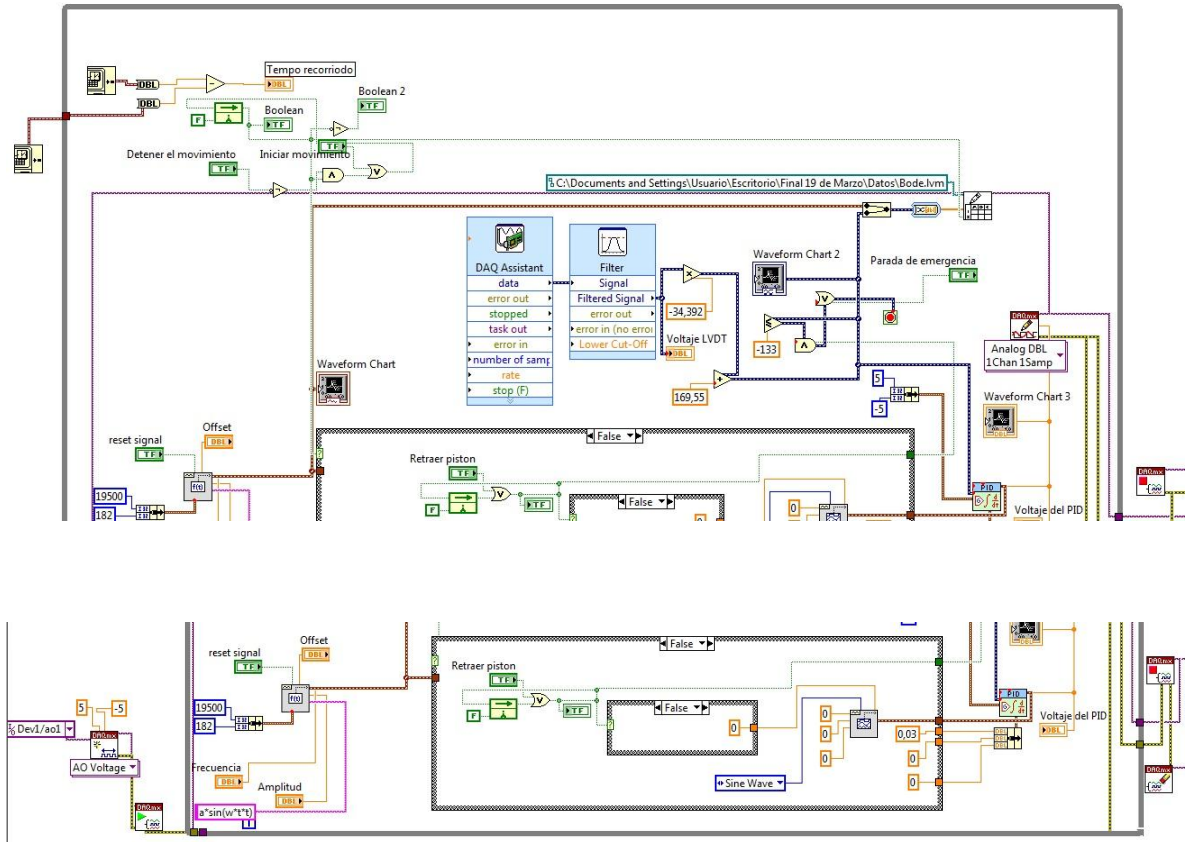
(1) Measured with V_{CCs} differentially varied at the same time**OPERATING CHARACTERISTICS** $V_{CC-} = -15\text{ V}$, $V_{CC+} = 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
SR Slew rate at unity gain	$A_{VD} = 1$, $V_{IN} = -10\text{ V}$ to 10 V , $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$		5	7		V/ μs
GBW Gain bandwidth product	$f = 100\text{ kHz}$		10	16		MHz
B_1 Unity gain frequency	Open loop			9		MHz
G_m Gain margin	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	$C_L = 0\text{ pF}$		-11		dB
		$C_L = 100\text{ pF}$		-6		
ϕ_m Phase margin	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	$C_L = 0\text{ pF}$		55		deg
		$C_L = 100\text{ pF}$		40		
Amp-to-amp isolation	$f = 20\text{ Hz}$ to 20 kHz		-120			dB
Power bandwidth	$V_O = 27\text{ V}_{(PP)}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, THD $\leq 1\%$			120		kHz
THD Total harmonic distortion	$V_O = 3\text{ V}_{(RMS)}$, $A_{VD} = 1$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $f = 20\text{ Hz}$ to 20 kHz		0.002			%
Z_o Open-loop output impedance	$V_O = 0$, $f = 9\text{ MHz}$			37		Ω
r_{id} Differential input resistance	$V_{CM} = 0$			175		k Ω
C_{id} Differential input capacitance	$V_{CM} = 0$			12		pF
V_n Equivalent input noise voltage	$f = 1\text{ kHz}$, $R_B = 100\ \Omega$			4.5		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
I_n Equivalent input noise current	$f = 1\text{ kHz}$			0.5		pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

ANEXO J. Algoritmo para mesa sísmica sin control



ANEXO K. Algoritmo para mesa sísmica variando la frecuencia



ANEXO L. Manual de usuario

MANUAL DEL USUARIO

Para un correcto funcionamiento y mantenimiento preventivo del banco de prueba de la mesa sísmica se realizó el siguiente manual de operaciones para el usuario.

Con el fin de realizar una práctica dentro de los parámetros del buen funcionamiento de la mesa sísmica se deben seguir estrictamente los siguientes pasos que mostraremos a continuación.

Realizar las siguientes conexiones:

- ✓ Conectar el módulo de entradas y salidas NI SCB 68 con el cable de datos respectivo (NI SHC 68-68 EPM) a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) PCI 6289 Serie M que está ubicada en el interior de la CPU y tiene un puerto de conexión PCI en la parte posterior de esta misma, teniendo en cuenta que el terminal azul del cable va a el módulo de entradas y salidas y el terminal plateado a el puerto de conexión de la tarjeta de adquisición de datos.

Módulo de entradas y salidas, Cable de datos y Puerto PCI de la tarjeta de adquisición de datos.



- ✓ Conectar el cable de alimentación de la caja de control a una fuente de potencia eléctrica de 110 V.
- ✓ Servoválvula.

El cable (de 4 pines) se debe conectar del puerto SERVOVÁLVULA ubicado en la caja de control directamente en el puerto de conexión ubicado en la servoválvula MOOG serie 76-263 situada en la parte superior del actuador hidráulico.

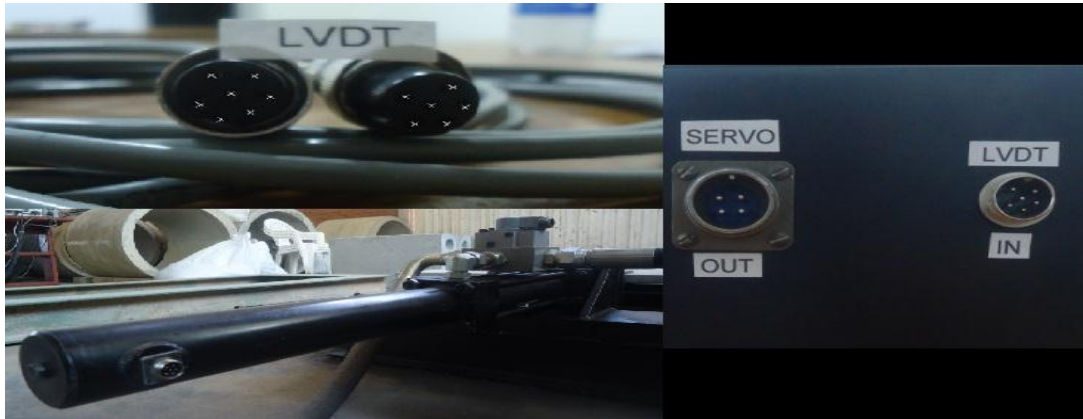
Servoválvula cable de datos y puertos de conexión.



✓ Para el LVDT.

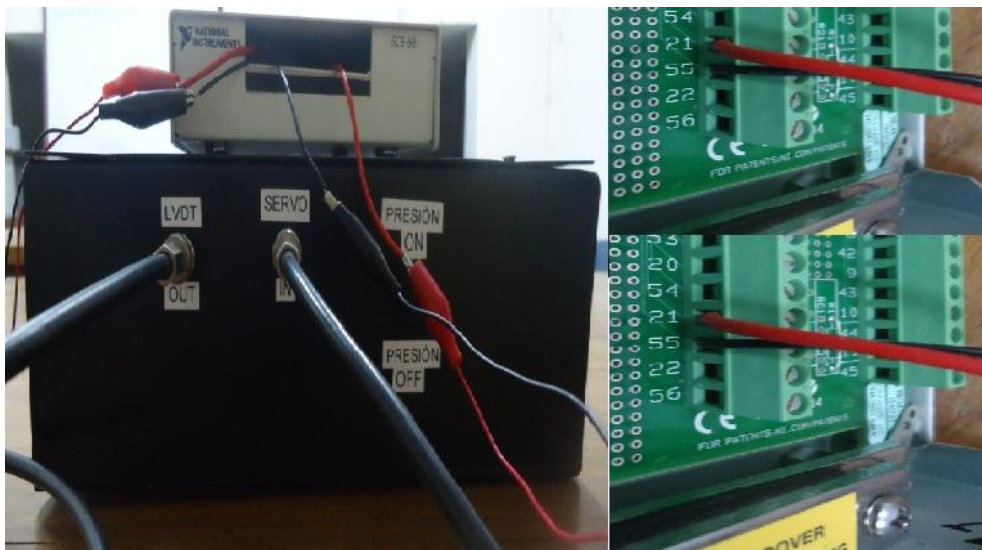
El cable (de 6 pines) se debe conectar del puerto LVDT IN ubicado en la caja de control al puerto físico del LVDT ubicado en el cilindro que hace parte del actuador de la mesa sísmica

LVDT, cable de datos y puertos de conexión.



- ✓ Conectar los dos cables coaxiales con conector VNC de entrada y salida de señales entre el módulo de entrada y salidas NI SCB 68 y la caja de control uno va del puerto SERVO IN y otro del puerto LVDT OUT a los pines 21-55 y 29-63 del módulo de entradas y salidas respectivamente.

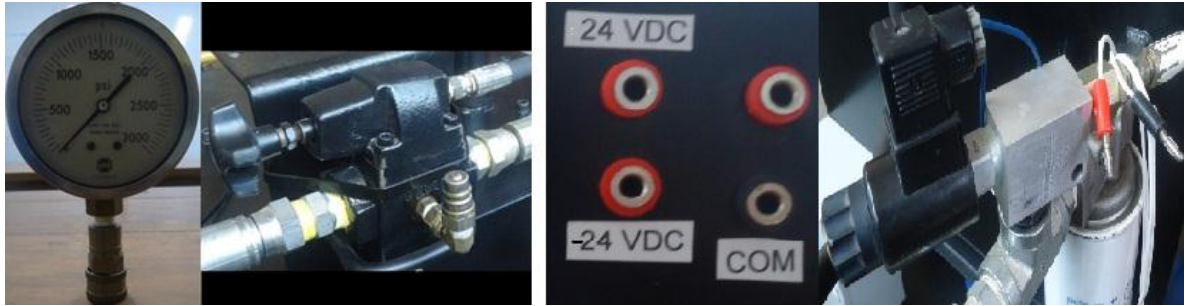
Conexión con cables coaxiales entre el modulo y la caja de control con sus respectivos puertos de conexión.



- ✓ Para la conexión de la unidad de potencia procedemos a conectar el manómetro de 3000 Psi en la válvula de seguridad y a realizar la conexión

eléctrica del solenoide conectando los cables de este último a la caja de control en los puertos de +24V y COM.

Manómetro, Válvula de Seguridad, Solenoide y Puertos de conexión.



- ✓ Antes de realizar cualquier tipo de conexión para el encendido del conjunto motor-bomba de la unidad de potencia es importante confirmar en el tablero de control de potencia eléctrica del laboratorio, que el interruptor de corriente de 220-440 V se encuentra apagado (inclinado hacia el indicador rojo), luego de haber hecho el chequeo de este paso se procede a hacer la conexión de la clavija en el tomacorriente respectivo teniendo en cuenta de colocar el seguro roscado que posee la misma. Después de haber realizado esto el usuario deberá activar el interruptor de corriente (inclinado hacia el indicador verde) anteriormente mencionado en el tablero de control de potencia eléctrica del laboratorio.

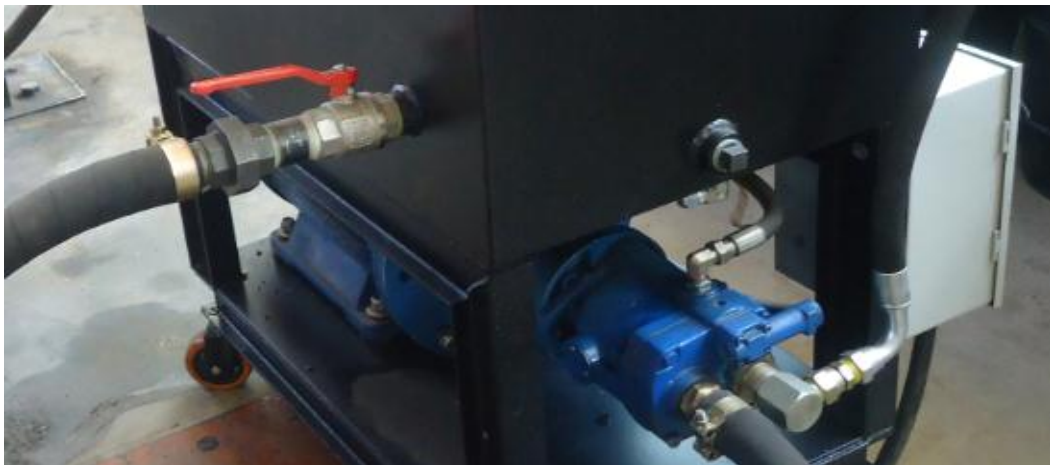
Tablero de potencia eléctrica, Clavija y Toma.



Luego de haber realizado todos estos pasos minuciosamente se debe verificar la condición de las siguientes válvulas de paso:

- ✓ Verificar que la llave de paso de la línea de succión de la bomba ubicada en la cara del tanque de almacenamiento de aceite opuesta a la válvula de seguridad este totalmente abierta, esta condición se da cuando la manecilla de la válvula se encuentra de forma paralela a la línea de succión.

Llave de paso de succión



- ✓ Verificar que la llave de paso de la línea de drenaje de la bomba este en la misma condición que la de la línea de succión (totalmente abierta), esta válvula se encuentra ubicada entre la parte inferior del tanque y la parte superior del motor.

Llave de paso de drenaje de la bomba.



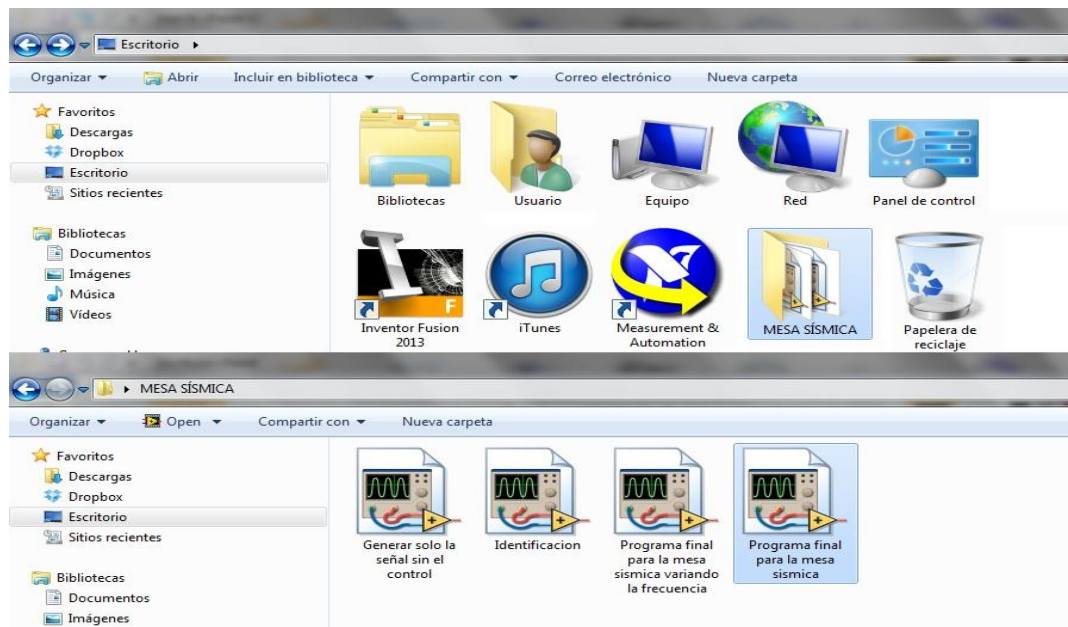
- ✓ Verificar que la llave de paso entre la línea de presión y la línea de descarga de la mesa sísmica se encuentre totalmente cerrada esto se da cuando la manecilla no permite movimiento horario.

Llave de paso de la línea de presión.



Después de haber realizado todas estas instrucciones se procede a encender el computador y la caja de control teniendo en cuenta que el botón de encendido/apagado del solenoide se encuentre en Off (interruptor con la luz apagada indica que el solenoide está desenergizado). Posterior a esto, se abre la carpeta con el nombre MESA SÍSMICA ubicada en el escritorio del PC que contiene los archivos con los algoritmos de control realizados en LabVIEW.

Ventana correspondiente a la carpeta de archivos MESA SÍSMICA.



Se debe abrir el archivo Interfaz Gráfica Mesa Sísmica.

En el tablero de control de la unidad de potencia se enciende el motor eléctrico de la bomba pulsando el interruptor verde, luego de esto se debe dejar recircular el aceite por aproximadamente 15 minutos antes de dar inicio a alguna prueba (esto solo se hace cuando se enciende por primera vez la unidad de potencia). Luego de pasados 15 minutos se puede activar el solenoide (interruptor con la luz encendida indica solenoide energizado) para darle presión al sistema y realizar cualquier tipo de prueba en la mesa sísmica comprobando siempre en el

manómetro que el sistema se encuentra a la presión de operación adecuada (2000 Psi).

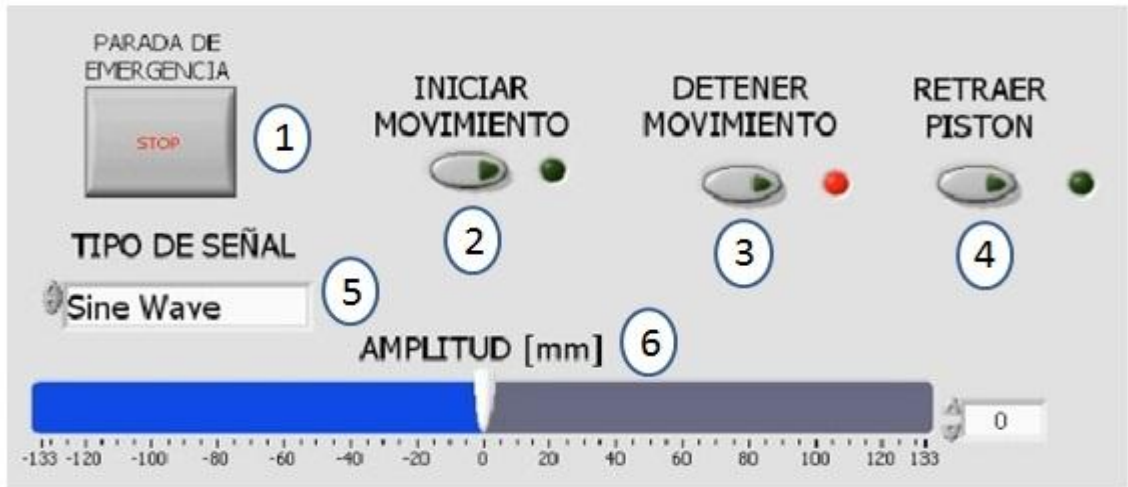
Tablero ON-OFF del conjunto Bomba-Motor eléctrico e interruptor de presión.



Para dar inicio al funcionamiento del programa de la mesa sísmica se va a la interfaz gráfica del archivo Interfaz Gráfica Mesa Sísmica y se da click en el botón Run ubicado en la parte superior izquierda con forma de flecha hacia la derecha.

A continuación explicaremos detalladamente cada componente de la interfaz gráfica realizada para el control de la posición y velocidad de la mesa sísmica para que el usuario pueda realizar una práctica de manera eficiente y segura.

Sección 1 interfaz gráfica del algoritmo de control.



1. Parada de emergencia.

Al pulsar este botón la mesa se detiene el movimiento que esté realizando.

2. Iniciar Movimiento.

Este pulsador hace que la mesa se posicione en el 0 de posición y esté lista para iniciar el movimiento que el usuario elija.

3. Detener Movimiento.

Al pulsar este botón la mesa detiene el movimiento que esté realizando y regresa al 0 de posición.

4. Retraer Pistón.

Este pulsador se utiliza para retraer el pistón al finalizar la prueba.

5. Tipo de Señal.

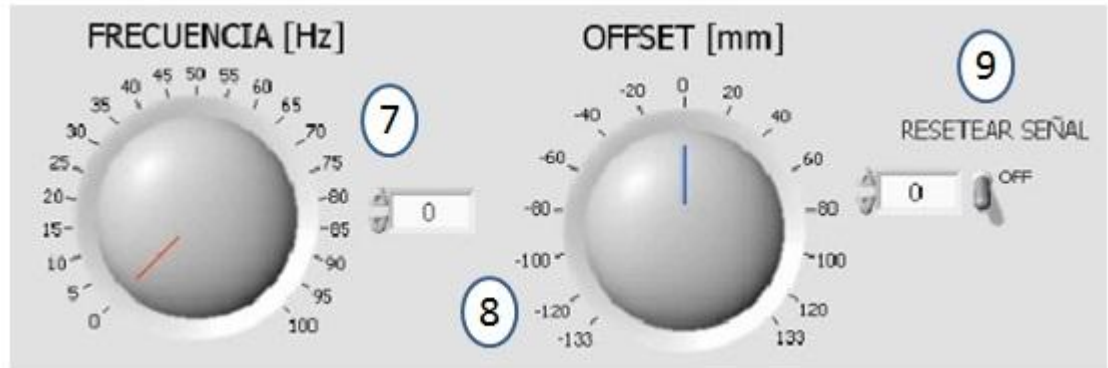
En esta barra el usuario selecciona el tipo de señal (sinusoidal, diente de sierra, rampa, cuadrada o triangular) a reproducir en la mesa.

6. Amplitud.

En esta barra el usuario selecciona el valor de la amplitud en milímetros que desea mover la mesa ya sea hacia la derecha (magnitud positiva) o a la izquierda (magnitud negativa), el usuario debe saber que puede escoger este valor de

magnitud deslizando la barra hacia la izquierda y derecha o digitando la magnitud en la casilla que se encuentra en la parte derecha enseguida de la barra.

Sección 2 interfaz gráfica del algoritmo de control.



7. Frecuencia.

En este dial se puede seleccionar el valor de la magnitud de la frecuencia que el usuario desea que la mesa reproduzca.

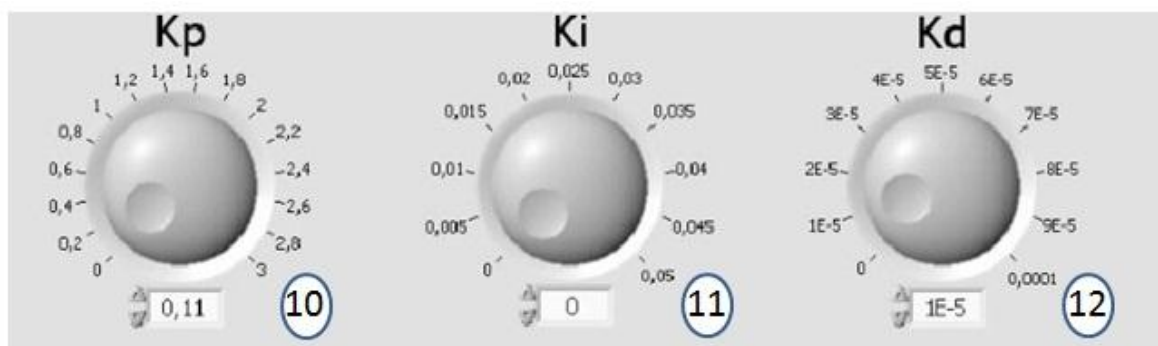
8. Offset.

Con este dial el usuario puede desplazar la mesa de manera libre hasta una posición determinada dentro del rango de movimiento de la misma.

9. Resetear Señal.

Al activar este interruptor el usuario hace que todos los diales tengan una magnitud igual a 0.

Sección 3 interfaz gráfica del algoritmo de control.



10. Kp.

Dial para que el usuario seleccione el valor de la constante proporcional Kp.

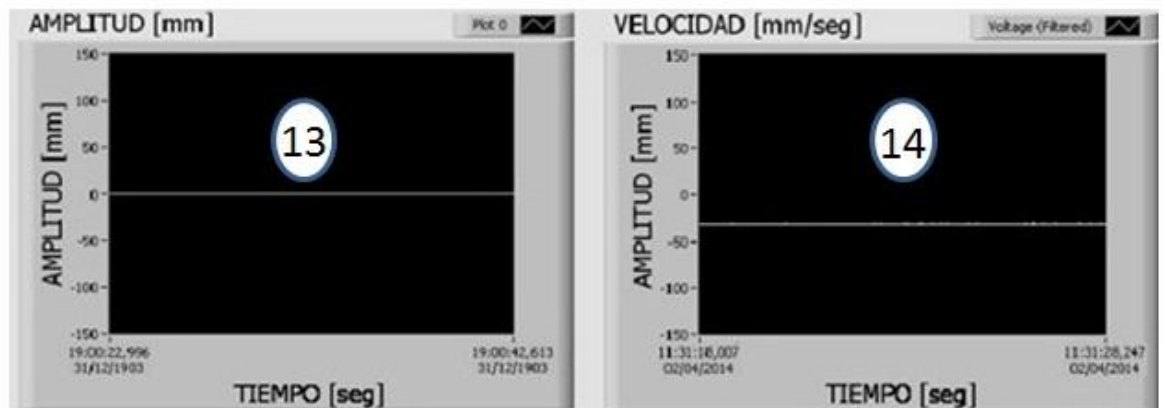
11. Ki.

Dial para que el usuario seleccione el valor de la constante integral Ki.

12. Kd.

Dial para que el usuario seleccione el valor de la constante derivativa Kd.

Sección 4 interfaz gráfica del algoritmo de control.



13. Amplitud vs Tiempo.

En esta sección el usuario puede ver en tiempo real la magnitud del desplazamiento de la mesa vs el tiempo transcurrido de la prueba.

14. Velocidad vs Tiempo

En esta sección el usuario puede ver en tiempo real el valor xxxxx de la mesa vs el tiempo transcurrido de la prueba.

Para dar inicio a la prueba el usuario debe seleccionar las características del movimiento que se quiere reproducir en la mesa sísmica tales como tipo de señal, amplitud y frecuencia. Luego de haber seleccionado estas características se debe pulsar el botón INICIAR MOVIMIENTO en la interfaz gráfica y analizar el

comportamiento en las dos graficas en tiempo real. Al final de la prueba el usuario debe pulsar el botón DETENER MOVIMIENTO y posteriormente el botón RETRAER PISTON.

Luego de haber retraído el pistón desenergizamos el solenoide y pulsamos el botón rojo en el tablero de la unidad de potencia para apagar el motor eléctrico de la bomba, después de hacer esto desactivamos en el tablero de control de potencia eléctrica del laboratorio el interruptor de corriente de 220-440 V (inclinado hacia el indicador rojo), y se procede a desconectar la clavija del toma respectivo.

Para terminar se desconectan todos los dispositivos mencionados anteriormente y se abren las llaves de paso que estaban cerradas y viceversa, se apaga el PC, se guardan todos los componentes electrónicos del sistema además del manómetro de presión utilizado en la unidad de potencia.