



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y CALIBRACIÓN DE UNA
MESA DE VIBRAR DE UN GRADO DE LIBERTAD.**

JOSÉ FRANCISCO BARRIENTOS OLIVA

**PROFESOR GUÍA:
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO.**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO HERRERA MARDONES.
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF.**

**SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2008.**

AGRADEZCO PRUFUNDAMENTE

En primer lugar *a mi madre Catalina Oliva*, que ha sabido ser madre y padre todos estos años, por su apoyo incondicional y por ser un ejemplo en mi vida, es a quien le debo mis triunfos, quien me ha impulsado a seguir adelante aún cuando el cansancio hacía mella en mi espíritu, quien me a acompañado desde siempre y que siempre va a estar conmigo.

A mis hermanos Juan y Pamela, pues hacen que todos los días me esfuerce por ser mejor, por ser un ejemplo, por estar ahí para ellos, pues se que ellos estarán siempre que los necesite.

A mis abuelos Francisco y Margarita Oliva, que me criaron como a un hijo, que siempre han estado ahí para apoyarme y a quines les debo una infancia llena de dicha, a pesar de cualquier problema que haya ocurrido.

A mis amigos, que me han acompañado en los momentos más felices de mi vida y en los más difíciles también. A ellos con especial cariño les doy las gracias por aceptarme y quererme tal cual soy.

A mis profesores don Mauricio Sarrazín, Ricardo Herrera y Rubén Boroschek, por todo su apoyo y orientación durante todo este trabajo.

Con un cariño especial, también agradezco *a Pedro Soto* y *a Ricardo León*, personas que me acompañaron en toda esta etapa, escuchando, comprendiendo y alentándome a cada momento, y a quienes ahora, me alegro de llamar *AMIGOS*.

A la memoria de mi abuelo:

FRANCISCO OLIVA MONTOYA

“El único padre que he conocido...

... y a quien le debo ser la clase de hombre que soy”



INDICE

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Introducción General | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 2 |
| 1.3. Metodología | 3 |
| 1.4. Alcances..... | 4 |
| | |
| CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES..... | 6 |
| 2.1. Introducción..... | 6 |
| 2.2. Antecedentes generales de mesas vibratoras | 7 |
| 2.3. Antecedentes generales de Sistemas oleo-hidráulicos | 8 |
| 2.4. Antecedentes generales del Sistema de Control..... | 10 |
| 2.5. Metodología de Calibración..... | 14 |
| | |
| CAPÍTULO 3: MONTAJE DE LA MESA VIBRADORA. | 15 |
| 3.1. Introducción a la Mesa Vibratoria | 15 |
| 3.2. Descripción general de la mesa vibradora | 16 |
| 3.3. Componentes mecánicos. | 17 |
| 3.3.1. Descripción de componentes mecánicos..... | 17 |
| 3.3.2. Montaje de componentes mecánicos..... | 21 |
| 3.4. Sistema Óleo-hidráulico. | 28 |
| 3.4.1. Descripción de sistema óleo-hidráulico..... | 28 |
| 3.4.2. Montaje de sistema oleo-hidráulico. | 43 |
| 3.5. Sistema de control..... | 46 |
| 3.5.1. Descripción de sistema de control. | 46 |
| 3.5.2. Montaje del sistema de control. | 49 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 4: PUESTA EN MARCHA..... | 51 |
| 4.1. Introducción..... | 51 |
| 4.2. Puesta en operación | 52 |
| 4.2.1. Introducción..... | 52 |
| 4.2.2. Modificaciones del sistema hidráulico | 52 |
| 4.2.3. Modificaciones de los equipos mecánicos | 59 |
| 4.2.4. Modificaciones del sistema de control..... | 61 |
| 4.2.4.1 Definición de rangos reales de operación. | 61 |
| 4.2.4.2 Definición del programa de control. | 64 |
| 4.2.4.3 Cambios del módulo LVDT | 65 |
| | |
| CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN. | 66 |
| 5.1. Introducción. | 66 |
| 5.2. Calibración. | 69 |
| 5.3. Realización y análisis de ensayos con señales sinusoidales..... | 94 |
| 5.3.1. Calibración en frecuencia | 94 |
| 5.3.2. Verificación del comportamiento de la mesa. | 109 |
| 5.4. Análisis de resultados y conclusiones de la calibración. | 112 |
| | |
| CAPÍTULO 6: Análisis de resultados y conclusiones..... | 113 |
| 6.1. Análisis de resultados y Conclusiones..... | 113 |
| 6.2. Recomendaciones..... | 115 |
| 6.3. Propositiones para nuevos ensayos..... | 116 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| ANEXO A | SECUENCIAS DE MONTAJE | 118 |
| | A.2. Secuencia ampliación de caseta de unidad de potencia..... | 120 |
| | A.3. Secuencia de modificación de diseño de la mesa..... | 121 |
| ANEXO B | DIAGRAMAS DE FLUJO..... | 126 |
| | B.1. Diagrama de flujo de unidad de potencia original. | 127 |
| | B.2. Diagrama de flujo unidad de potencia 2° diseño. | 128 |
| | B.3. Diagrama de flujo unidad de potencia definitiva..... | 129 |
| | B.4. Diagrama de flujo servo-válvula. | 130 |
| ANEXO C | REGISTROS. | 131 |
| | C.1. Comparación entre espectros de respuesta del registro sísmico de Lollole EW 1985..... | 132 |
| | C.2. Comparación de serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Lollole EW 1985. | 133 |
| | C.3. Comparación de serie de tiempo de velocidades del registro sísmico de Lollole EW 1985. | 134 |
| | C.4. Comparación de serie de tiempo de Desplazamientos del registro de Lollole EW 1985..... | 135 |
| | C.5. Comparación entre espectros de respuesta de registro sísmico de Melipilla NS 1985. | 136 |
| | C.6. Comparación de serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985. | 137 |
| | C.7. Comparación de serie de tiempo de velocidades del registro sísmico de Melipilla NS 1985. | 138 |
| | C.8. Comparación de serie de tiempo de desplazamientos del registro sísmico de Melipilla NS 1985. | 139 |

| | | |
|----------------|--|------------|
| ANEXO D | VALIDACIÓN NUMERICA..... | 140 |
| D.1. | Validación numérica..... | 141 |
| D.1.1. | Introducción..... | 141 |
| D.1.2. | Validación numérica..... | 143 |
| D.2. | Discusión de resultados | 149 |
| ANEXO E | Operación y mantención. | 150 |
| E.1. | Operación de la mesa..... | 151 |
| E.2. | Mantención de la unidad de potencia. | 160 |
| E.3. | Mantención de rieles de precisión. | 160 |
| ANEXO F | CATÁLOGOS..... | 161 |
| ANEXO G | PLANO | |

IINDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1. Especificaciones básicas de diseño. | 15 |
| Tabla 3.2. Características de los rieles de precisión. | 19 |
| Tabla 3.3. Diferencias entre rieles de precisión de diseño y montaje..... | 24 |
| Tabla 3.4. Características del servo-actuador. | 39 |
| Tabla 3.5. Características de la servo-válvula. | 42 |
| Tabla 4.1 Parámetros reales de la mesa..... | 62 |
| Tabla 5.1 Prueba preliminar con sensor ultrasónico. | 70 |
| Tabla 5.2. Valores Calibrados con regresión lineal y errores Porcentuales..... | 71 |
| Tabla 5.3. Escalones de calibración. | 75 |
| Tabla 5.4. Voltajes enviados en pruebas estáticas y resultados..... | 77 |
| Tabla 5.5. Resultados de calibración de rango completo con distintas curvas. | 81 |
| Tabla 5.6. Cálculo del error obtenido de la calibración de rango completo. | 82 |
| Tabla 5.7 Voltajes modificados enviados en pruebas estáticas y resultados. | 83 |
| Tabla 5.8. Resultados obtenidos con calibración polinómica-lineal..... | 87 |
| Tabla 5.9. Valores de atenuación en frecuencia | 95 |
| Tabla 5.10. Resultados curva preliminar de Amplificación. | 97 |
| Tabla D.1 Parámetros reales de la mesa..... | 141 |
| Tabla D.2. Validación numérica sin carga de prototipo. | 144 |
| Tabla D.3. Validación Numérica con carga máxima (<i>prototipo 3 [Ton]</i>). | 145 |
| Tabla D.4. Puntos críticos con carga máxima (<i>prototipo 3 [Ton]</i>). | 146 |
| | |
| Figura 3.1. Esquema general de la Mesa..... | 16 |
| Figura 3.2. Vista de la mesa..... | 18 |
| Figura 3.3. Rieles de soporte..... | 18 |
| Figura 3.4. Rieles de precisión. | 19 |
| Figura 3.5. Soporte de servo-actuador. | 20 |
| Figura 3.6. Conexión rótula-mesa. | 21 |
| Figura 3.7. Caballete para tecla..... | 23 |
| Figura 3.8. Etapas de Montaje..... | 25 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9. Etapas de Montaje 2..... | 26 |
| Figura 3.10. Etapas de Montaje 3..... | 27 |
| Figura 3.11. Esquema del sistema impulsor. | 29 |
| Figura 3.12. Motor Trifásico | 30 |
| Figura 3.13. Bomba óleo-hidráulica | 30 |
| Figura 3.14. Motor de engranajes | 31 |
| Figura 3.15. Bomba óleo-hidráulica..... | 31 |
| Figura 3.16. Manómetro | 32 |
| Figura 3.17. Válvula check..... | 32 |
| Figura 3.18. Válvula reguladora de presión. | 33 |
| Figura 3.19. Filtro de presión. | 34 |
| Figura 3.20. Acumuladores..... | 35 |
| Figura 3.21. Intercambiador de calor. | 36 |
| Figura 3.22. Válvulas de corte. | 36 |
| Figura 3.23. Sistema de filtrado..... | 37 |
| Figura 3.24. Depósito de aceite..... | 38 |
| Figura 3.25. Servo-actuador. | 40 |
| Figura 3.26. Esquema de flujo de servo-válvula de 4 vías y 3 posiciones, intermedia bloqueada..... | 41 |
| Figura 3.27. Servo-válvula de control. | 42 |
| Figura 3.28. Etapas de montaje sistema oleo-hidráulico. | 45 |
| Figura 3.29. LVDT incorporado. | 46 |
| Figura 3.30. Caja módulo de control. | 47 |
| Figura 3.31. Módulos de control..... | 48 |
| Figura 3.32. Conexión servo-válvula..... | 49 |
| Figura 3.33. Conexión LVDT. | 50 |
| | |
| Figura 4.1. Detalle de conexión intercambiador de calor. | 54 |
| Figura 4.2. Visor de temperatura de termocupla. | 55 |
| Figura 4.3. Aislación acustica, esquemas..... | 57 |
| Figura 4.4. Aislación acústica | 58 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 4.5. Láminas de plomo interplaca..... | 59 |
| Figura 4.6. Pernos de sujeción del pasador. | 60 |
| Figura 4.7. Sello de perforaciones de muro. | 61 |
| Figura 4.8. Espectro Tri-logarítmico de la mesa. | 63 |
| | |
| Figura 5.1. Comparación de los espectros de respuesta del registro de Lolloe 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro del registro en la mesa sin corrección. | 66 |
| Figura 5.2. Comparación de los espectro de respuesta del registro de Lolloe 1985, con 5 % amortiguamiento, y el espectro del registro de la mesa luego del cambio del modulo LVDT. | 67 |
| Figura 5.3. Voltajes de pruebas preliminares con los tres sensores..... | 69 |
| Figura 5.4. Calibración Preliminar. | 71 |
| Figura 5.5. Comparación de resultados preliminares de calibración. | 73 |
| Figura 5.6. Comparación de desplazamientos luego de una calibración Lineal. | 74 |
| Figura 5.7. Comparación de la respuesta del LVDT interno y el sensor ultrasónico... | 76 |
| Figura 5.8. Registros de voltaje..... | 78 |
| Figura 5.9. Calibración inicial Tri-lineal. | 79 |
| Figura 5.10. Calibración lineal y Tri-lineal. | 79 |
| Figura 5.11. Comparación calibración lineal v/s Tri-lineal. | 80 |
| Figura 5.12. Calibración Definitiva, Lineal-Polinómica | 85 |
| Figura 5.13 Detalle de función polinómica de quinto grado. | 86 |
| Figura 5.14. Comparación Calibración v/s Prueba. | 88 |
| Figura 5.15. Modificación al programa de Control..... | 89 |
| Figura 5.16. Prueba estática final después de calibración por desplazamiento. | 90 |
| Figura 5.17. Comparación espectro de respuesta con calibración por desplazamiento. | 91 |
| Figura 5.18. Función inicial de amplificación. | 92 |
| Figura 5.19. Comparación espectros de respuesta, 1° corrección por frecuencias..... | 92 |
| Figura 5.20. Serie de ensayos con señales sinusoidales..... | 95 |
| Figura 5.21. Diferencias en frecuencias..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.22. Comparación de registros de desplazamiento obtenido con la mesa luego de amplificar la señal del registro de entrada. | 98 |
| Figura 5.23. Función Hermítica. | 100 |
| Figura 5.24. Función de amplificación. | 101 |
| Figura 5.25. Función de amplificación v/s Valores reales..... | 101 |
| Figura 5.26. Comparación de espectro de respuesta del registro de Lolloe 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa con varios factores de amplificación de señales amplificadas en distintos Porcentajes | 103 |
| Figura 5.27. Detalle de zona de más alta frecuencia de Comparación de espectros de respuesta del registro de Lolloe 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa con varios factores de amplificación. | 104 |
| Figura 5.28. Espectro de respuesta de la mesa con señal amplificada en 55 %..... | 105 |
| Figura 5.29. Serie de tiempo de aceleraciones registro sísmico de Lolloe 1985. | 106 |
| Figura 5.30 Comparación de espectros de respuesta del registro de Melipilla 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa..... | 107 |
| Figura 5.31 Serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985. | 108 |
| Figura 5.32. Registro de ensayo final con señales sinusoidales con 5 [mm] de Amplitud. | 109 |
| Figura 5.33. Respuesta de la mesa en todo su rango. | 110 |
| Figura 5.34. Detalle de respuesta de la mesa en zona de altas frecuencias. | 111 |
| | |
| Figura A. 1. Proceso de refuerzo de losa de reacción..... | 119 |
| Figura A. 2. Proceso de ampliación de caseta. | 121 |
| Figura A. 3. Proceso de modificación de la mesa..... | 122 |
| Figura A. 4. Proceso de montaje de rieles y mesa..... | 123 |
| Figura A. 5. Proceso de montaje de soporte y actuador oleo-hidráulico. | 124 |
| Figura A. 6. Proceso de montaje de equipos electronicos | 125 |
| Figura A. 7. Detalles de conexiones de equipos electrónicos..... | 126 |
| Figura A. 8..... | 126 |

| | |
|--|------------|
| Figura B. 1. Diagrama de flujo de unidad de potencia original. | 127 |
| Figura B. 2. Diagrama de flujo de 2° unidad de potencia. | 128 |
| Figura B. 3. Diagrama de flujo unidad de potencia definitiva | 129 |
| Figura B. 4. Diagrama de flujo interno de la servo-válvula..... | 130 |
| | |
| Figura C. 1. Comparación entre el espectro de respuesta del registro de Llolleo 1985 con 5 % de amortiguamiento y el espectro de respuesta obtenido de la mesa.... | 132 |
| Figura C. 2. Comparación entre las series de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Llolleo 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 133 |
| Figura C. 3. Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Llolleo 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 134 |
| Figura C. 4. Comparación entre las series de tiempo de Desplazamientos del registro sísmico de Llolleo 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 135 |
| Figura C. 5. Comparación entre el espectro de respuesta del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el espectro de respuesta obtenido de la mesa..... | 136 |
| Figura C. 6. Comparación entre las series de tiempo de Aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 137 |
| Figura C. 7. Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 138 |
| Figura C. 8. Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa. | 139 |
| | |
| Figura D. 1. Comparación de espectros tri -logarítmicos de diseño v/s obtenido de montaje..... | 142 |
| Figura D. 2. Gráfico Tri-logarítmico, Puntos críticos teóricos v/s respuesta teórica de la mesa sin carga. | 146 |

| | |
|---|------------|
| Figura D. 3. Gráfico Tri-logarítmico, Puntos críticos teóricos v/s respuesta teórica de la mesa con carga máxima. | 147 |
| Figura E. 1. Inicialización de envío de señal. | 151 |
| Figura E. 2. Señal de 5 Volt. | 152 |
| Figura E. 3. Panel Frontal..... | 153 |
| Figura E. 4. Variables de entrada | 154 |
| Figura E. 5. Elección de directorios para guardar archivos..... | 155 |
| Figura E. 6. Control de rampa. | 156 |
| Figura E. 7. Control de Registros..... | 157 |
| Figura E. 8. Cierre del programa. | 159 |

Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción General

Para avanzar en el estudio de la ingeniería sísmica, no basta con desarrollar modelos analíticos, es necesario realizar pruebas estructurales en forma empírica. En la actualidad la mejor forma de representar el movimiento del suelo durante un evento sísmico son las mesas vibratorias. Países como EE.UU. y Japón, han fabricado esta clase equipos diseñándolos de acuerdo a sus necesidades.

El problema se presenta debido a que los sismos chilenos subductivos, tienen la diferencia fundamental de poseer un mayor contenido de frecuencias altas que la de otros grandes sismos que han ocurrido en otros países, tales como Kobe, Japón (1995) y Northridge, EE.UU. (1994). Por lo tanto, en la actualidad no hay en Chile un equipo capaz de reproducir en el laboratorio de forma adecuada las condiciones reales que se producen durante un evento sísmico chileno.

Lo anterior, hace que sea de vital importancia tener un equipo de ensayo capaz de reproducir esta clase de eventos, principalmente en el rango de frecuencias, que es donde se encuentran más limitados los equipos de que se dispone en estos momentos.

Abordando este problema, se realiza el presente trabajo como un desarrollo experimental pionero en nuestro país, fomentando así el desarrollo de la ingeniería y el estudio sísmico.

1.2.Objetivos.

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo principal de este trabajo es:

Montar, poner en marcha y calibrar una mesa vibradora unidireccional.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Montar exitosamente la mesa vibradora.
- Verificar los parámetros de diseño (desplazamiento, aceleraciones, frecuencias y cargas máximas).
- Calibrar el sistema de control.

1.3. Metodología

Las actividades contempladas para el correcto desarrollo de los objetivos planteados son las siguientes:

- Revisión de los equipos y su correcto funcionamiento antes del montaje.
- Montaje de la mesa y prueba de su funcionamiento.
- Montaje del actuador y prueba de su funcionamiento.
- Prueba del correcto funcionamiento del conjunto actuador y mesa.
- Realización de los ensayos necesarios con señales sinusoidales para la calibración de los parámetros de control.
- Realización de ensayos con registros sísmicos determinados para verificar la validez de los parámetros de control.

1.4. Alcances

Los alcances generales de este trabajo son:

1. Determinación de los rangos reales de funcionamiento de la mesa.
2. Calibración de los parámetros de control.
3. Probar la respuesta de la mesa, con el registro sísmico para el que fue diseñada (Llolleo, 1985).

Los alcances específicos de cada capítulo se detallan a continuación:

En el capítulo 2 se muestran los antecedentes generales acerca de las mesas vibratoras, de los sistemas oleo-hidráulicos y de los sistemas de control, esto con un afán introductorio de los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 3 se describen físicamente las partes mecánicas, óleo-hidráulicas y eléctricas que componen la Mesa, con sus respectivas restricciones y tolerancias. Así como también se describe el montaje de cada una de estas piezas y que se llevó a cabo durante el 2007, en Laboratorio Experimental de Estructuras, ubicado en el primer piso del Edificio de Ingeniería Civil

En el capítulo 4 se describe la puesta en marcha que se realiza con la prueba de los equipos individualmente. Luego del montaje se procederá a la prueba de los equipos en conjunto.

En el capítulo 5 se describe la metodología utilizada para la calibración de las funciones de control es mediante el método empírico (prueba y error), además se muestran los resultados obtenidos con estas funciones después de la calibración. Junto con lo anterior, en éste capítulo se muestran los rangos de funcionamiento reales obtenidos con la mesa en todo el dominio de las frecuencias.

En el capítulo 6 se realiza un análisis de los resultados obtenidos en cada etapa del trabajo, además se dejan recomendaciones y proposiciones para otros ensayos.

Capítulo 2 : ANTECEDENTES GENERALES.

2.1. Introducción

En este capítulo se muestran antecedentes generales del trabajo realizado, se hace referencia de manera específica a los autores que facilitaron la comprensión de los conceptos utilizados para resolver los problemas enfrentados durante las distintas etapas del desarrollo de esta memoria.

Además de lo anterior se mencionan algunas de las actividades adicionales a la realización del trabajo, que ayudaron a comprender y superar de mejor manera los problemas que surgieron.

2.2. Antecedentes generales de mesas vibratoras

Familiarizarse con las mesas vibratoras ya construidas es el primer paso para comprender los componentes que participan del sistema. Por este motivo, se observaron algunos catálogos de mesas que se encuentran en el mercado y que poseen características similares a la mesa vibradora a montar, por ejemplo las pertenecientes a ANCO Engineers Inc. (www.ancoengineers.com) o MTS System Corporation (www.mts.com). Una mesa que es necesario mencionar en este trabajo, por su tamaño, es la mesa vibradora de tres grados de libertad más grande del mundo ubicada en la ciudad de Miki, cerca de Kobe, Japón (Ogawa et al, 2003). En la página del instituto de Investigación Nacional para la Geología y la Prevención de Desastres (The National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention, NIED), <http://www.bosai.go.jp/ehyogo/index.html>, se puede apreciar las dimensiones de esta estructura y algunos ensayos con modelos a escala real. También fue posible interiorizarse del trabajo realizado para la instalación de una mesa en la Universidad de Oklahoma, la cual posee varias similitudes con la mesa que se va a materializar en este trabajo (Kuehn et al, 1999).

El trabajo de interiorización también contempló la visita y observación del funcionamiento de la mesa MTS de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Aquí fue posible observar detalles de montaje y mantención que fueron muy útiles para la realización de éste trabajo. Además, se pudo obtener de primera fuente los detalles de algunos de los problemas que se han detectado en su funcionamiento.

El último antecedente a mencionar, es la mesa **MOOG** modelo **6DOF2000E**, que fue instalada en el mes de abril de 2002 en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras MECESUP. Ésta es un sistema de movimiento de seis grados de libertad controlados, consistente en una base con seis actuadores independientes, los cuales al moverse de manera coordinada permiten desplazamientos en tres ejes perpendiculares y giros en torno a dichos ejes. Ésta, a diferencia de la que se montó durante este trabajo, funciona con actuadores electro-mecánicos, en vez de utilizar actuadores hidráulicos.

2.3. Antecedentes generales de Sistemas oleo-hidráulicos

Líquidos y gases reciben la denominación común de fluidos en razón a que presentan propiedades que derivan de la facilidad con que sus moléculas pueden moverse unas con respecto a las otras. Esto hace que un líquido confinado sea de los medios más versátiles para modificar movimientos y comunicar potencia mediante la transferencia de energía a través de un estado intermedio de la energía cinética.

La oleo-hidráulica nos otorga la facultad de transmitir energía mediante un líquido a presión. La diferencia con la neumática, es que en ésta última se usa aire comprimido a una presión de 7 bar, limitado por la presión máxima servida por el compresor, y, en la oleo-hidráulica, se logran presiones muy superiores de trabajo que pueden alcanzar los 600 bar, aunque ambas se basan en los mismos principios fundamentales de la mecánica de fluidos e hidráulica.

La mesa vibradora es accionada mediante un sistema oleo-hidráulico. Por este motivo, se debe tener conceptos básicos de oleo-hidráulica para comprender el funcionamiento de los equipos que componen el sistema y entender cuales son los posibles problemas que éste pudiera presentar. (Carnicer y Mainar, 1998).

El funcionamiento de un sistema oleo-hidráulico es simple: una bomba se encarga de producir presión continuamente en el líquido, que recorre una red de tuberías que forman un circuito y que conectan con los actuadores de simple o, como en nuestro caso doble efecto, que ejecutan el trabajo hacia el exterior del sistema y por tanto son los que consumen la energía del líquido, el cual retorna a la central hidráulica y vuelve a comenzar el ciclo.

En el intermedio, se utilizan válvulas que gobiernan la dirección de líquido en cada momento, existiendo en el mercado distintas modalidades de válvulas y artículos de control.

La selección y el cuidado que se tenga con el fluido hidráulico tiene en general un efecto muy importante sobre el funcionamiento de una máquina y un efecto aún mayor sobre la vida útil de sus componentes mecánicos.

Por último, el lector debe tener en cuenta que para entender el funcionamiento de los equipos y su validación numérica debe conocer conceptos básicos como *unidades de presión, transmisión de la presión (Principio de Pascal), golpes de ariete, etc.*, cuya explicación no es parte de esta memoria, pero que son utilizados en el desarrollo de éste trabajo.

2.4. Antecedentes generales del Sistema de Control

La ingeniería de control tiene un rol fundamental en el desarrollo de este trabajo, ya que es a través de ésta que la mesa opera. Por lo tanto, fue necesario adquirir conocimientos básicos sobre teoría de control para la correcta calibración de la mesa. Temas tales como función de transferencia, controladores PID, estabilidad de sistemas, sintonización de sistemas, etc., son fundamentales para un buen desarrollo de éste trabajo. (Ogata, 2003; Aström y Hägglund, 1995).

El sistema de control, en si mismo, es la pieza fundamental para equipos sometidos a exigencias de precisión, debido básicamente a que éstos no responden de manera ideal, por lo tanto existe una variación de la respuesta que debe ser corregida para permitir estabilizar la respuesta al valor deseado y además evitar que a futuro esta variación vaya en aumento. Sin un controlador adecuado sobre el sistema no se podrá aprovechar la capacidad del equipo, ya que un simple lazo cerrado, con la incorporación de un controlador, puede mejorar notoriamente la respuesta del sistema disminuyendo el error. Un controlador PID realiza operaciones proporcionales, integrales y derivativas sobre el error para ajustar la señal de salida deseada.

El concepto del sistema de control engloba la parte eléctrica del funcionamiento de la mesa, es decir el transductor de posición LVDT (linear variable differential transformer), el modulo Microcontrolador PI y el programa de comando con el fin de tener un control de lazo cerrado.

El transductor de posición como parte del sistema debe ser calibrado¹ con el fin de obtener una referencia real y estable, para el correcto funcionamiento del sistema de control, el modulo microcontrolador PI realiza un lazo cerrado de control y provee de estabilidad al sistema, éste viene “*calibrado*” de fábrica pero es posible ajustar su ganancia, y utilizar como referencia la señal devuelta por el **LVDT**.

¹ El proceso de calibración, metodología y problemas enfrentados se detallan en el **Capítulo 5**.

Esta memoria además contempló el uso de dos rutinas de comando² realizadas mediante Labview (software de National Instrument para la adquisición y control de señales). Estas contemplan 2 tipos de control:

- 1) Se utiliza únicamente el modulo Servo-amplificador PI, creando un lazo cerrado de control mediante el transductor de posición, pero que no afecta al origen de la señal (*setpoint*), sólo la ajusta.
- 2) El uso de un segundo lazo cerrado a lo indicado en 1), mediante un PID incorporado en la rutina que genera la señal, permite controlar el sistema y, adicionalmente, comparar con el origen de la señal. Para que este control realmente funcione se debe contemplar la incorporación de un sensor externo de control que permita obtener un parámetro independiente al que utiliza el microcontrolador (*en este trabajo se utilizó un LVDT externo*).

Para ayudar a comprender la diferencia entre ambos, se realiza una pequeña introducción a los controladores PID, con el fin de explicar la lógica que hay detrás de estas rutinas.

Un controlador PID, siglas que significan P (*proporcional*), I (*integral*) y D (*derivativa*), tienen las siguientes funciones.

- 1) Proporciona una retroalimentación al sistema.
- 2) Permite eliminar estados de inestabilidad a través de una acción integral.
- 3) Permite anticipar la respuesta futura mediante una acción derivativa.

La ecuación que gobierna este tipo de controlador es la suma de tres términos, uno proporcional, uno integral y uno derivativo respectivamente como se muestra en (2.1)

² El diseño y concepción de estas rutinas no es parte del cuerpo de esta memoria, para más detalles ver *Ref.1*

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Donde,

$u(t)$: Variable de control.

$e(t)$: Error de control.

K_p : Constante proporcional.

T_i : Tiempo integral.

T_d : Tiempo derivativo.

La constante integral (K_i) y derivativa (K_d) se calculan de la siguiente forma.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{y} \quad K_d = K_p \cdot T_d \quad (2.2)$$

A continuación, se describe más en detalle las acciones proporcional, integral y derivativa. Pero se debe tener presente que los sistemas de control usados proporcional (P), Proporcional – integral (PI) (*como es el caso del utilizado en la primera rutina de control*), proporcional – derivativa (PD) o proporcional – integral – derivativa (PID).

- Acción de control proporcional. Como su nombre lo indica, la acción de control proporcional por si sola permite aumentar o disminuir la ganancia del sistema al modificar el error. Por lo tanto, no es común utilizar sólo una acción proporcional (P), ya que se origina un error en estado estacionario frente a una entrada escalón unitario. Ese error se elimina incluyendo la acción integral en el sistema.
- Acción de control integral. Cuando existe un desplazamiento (*offset*) o un error en estado estacionario de la respuesta del equipo frente a una entrada de una función escalón, ese error se puede eliminar mediante una acción de control integral. La acción de control integral calcula el área bajo la curva del error, y por lo tanto la señal de entrada $u(t)$ toma un valor distinto de cero cuando el error es cero, es decir, permite

desplazar la curva. Se debe tener en cuenta que esta acción conduce a una respuesta oscilatoria, donde lo ideal es que el amortiguamiento sea lo más rápido posible, y así el sistema tome el valor deseado en el menor tiempo, ya que una mala decisión en el control puede llevar a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente muy lenta o hasta de amplitud creciente.

- Acción de control derivativa. Una acción de control derivativa siempre va acompañada al menos de un controlador proporcional, ya que por si sola distorsiona la señal. Todo esto debido a que opera sobre la velocidad de cambio del error y no sobre el error mismo. Una acción de control derivativa permite corregir la magnitud del error a futuro, de esta forma produce una respuesta adecuada. De esta forma se pretende disminuir el error antes de que comprometa la estabilidad del sistema. Esta acción es utilizada para estabilizar la señal cuando se está frente a una respuesta del sistema que oscila indefinidamente, ya que incorpora una acción de amortiguamiento en la señal hacia el valor deseado.

La demostración de lo descrito anteriormente se puede ver en el libro “Ingeniería de control moderna” Ogata (2003).

2.5. Metodología de Calibración

El proceso de selección de los parámetros del controlador para que la señal cumpla con las especificaciones del estado transiente y del estado estacionario se conoce como sintonización del controlador. La sintonización de los controladores PID se puede realizar de dos formas.

- 1) Mediante un modelo matemático de la planta, se pueden realizar distintos métodos analíticos de diseño para determinar los parámetros del controlador.
- 2) Si no se posee un modelo matemático de la planta (que es el caso al que estamos enfrentados), por lo complicado de obtener ésta, se puede recurrir a métodos experimentales.

En la literatura existen varios tipos de métodos de sintonización, pero unos de los más usados y con los cuales se obtienen buenos resultados, son los propuestos por Ziegler y Nichols (1942) para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d basándose en la respuesta escalón o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción de control proporcional. Los métodos de Ziegler y Nichols se aplican al diseño de sistemas con modelos analíticos conocidos, pero son muy convenientes para la sintonización experimental por lo sencillo de su aplicación. Se debe tener en cuenta que el sistema resultante puede presentar una gran sobreelongación de su respuesta y por lo tanto no ser aceptable para el sistema. En tales casos, se debe realizar una serie de ajustes finos con el fin de obtener el resultado deseado. Estos ajustes más finos se realizan experimentalmente mediante prueba y error. De esta forma, las reglas de Ziegler y Nichols entregan una estimación de los parámetros del controlador, el cual es el punto de partida para la realización de la sintonía fina. Los métodos de Ziegler y Nichols se detallan en el libro “Optimum settings for automatic controllers” de Ziegler and Nichols (1942).

CAPÍTULO 3: MONTAJE DE LA MESA VIBRADORA

3.1. Introducción a la Mesa Vibratoria

La mesa vibradora es un sistema de 1 grado de libertad, que está accionada por un gato hidráulico. El gato es alimentado por una unidad de potencia hidráulica y controlado por una servo-válvula ésta, a su vez, es controlada por un computador que envía señales de voltaje.

El computador cuenta con 2 programas de control, uno en lazo abierto que sólo emite señales y otro que realiza un lazo cerrado externo mediante un controlador PID (proporcional, integral, derivativo) que permite ir corrigiendo el movimiento del servo-actuador a través del tiempo al comparar las señales enviadas con las obtenidas.

La mesa en cuestión fue diseñada para soportar una carga de 3000 [Kg.], con dimensiones de piso de 2,1 [m] x 1,3 [m]. Ésta fue diseñada considerando los siguientes valores máximos de desplazamiento, aceleración, velocidad y frecuencia máximos son $\pm 0,2$ [m], 1,00 [g], 0,60 [m/s] y 15 [Hz]. Las especificaciones básicas de la mesa se describen en la *Tabla N° 1-1*.

Tabla 3-1. Especificaciones básicas de diseño.

| | |
|------------------------------|---|
| Tamaño | 2,1 [m] x 1,3 [m] |
| Peso máximo de diseño | 3 [Ton] |
| Manejo Mecánico | Central oleohidráulica, acumulador, servo -válvula controladora, servo -actuador hidráulico. |
| Desplazamiento máximo | $\pm 0,2$ [m] |
| Aceleración máxima | 1,00 [g] |
| Velocidad máxima | 0,6 [m/s] |
| Frecuencia | 15 [Hz] |

3.2. Descripción general de la mesa vibradora.

La Mesa vibradora es un sistema de 1 g.d.l. que consiste en una base con rieles de apoyo y un gato hidráulico que permite desplazamientos horizontales.

El gato es un cilindro hidráulico que realiza los desplazamientos, conectado a una servo-válvula de control, que recibe señales generadas por un computador a través de un sistema de control.

La fuente de energía de dicho actuador consiste en una bomba hidráulica con un motor eléctrico de 60 HP

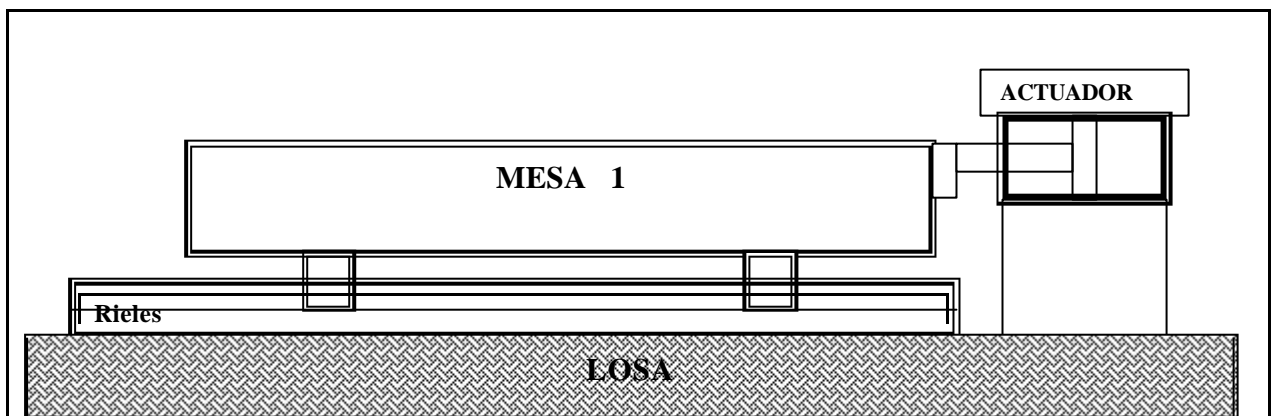


Figura 3.1. Esquema general de la Mesa.

3.3. Componentes mecánicos.

3.3.1. Descripción de componentes mecánicos.

Los componentes mecánicos de la mesa vibradora serán descritos a continuación. Los planos no se incluyen pues son parte de la memoria que antecede a ésta (**Leiva, 2007**).

- 1) Plataforma de acero (*mesa*).
- 2) Perfil para posicionamiento de rieles (*riel de soporte*).
- 3) Riel de precisión.
- 4) Estructura de soporte del servo-actuador hidráulico
- 5) Conexión Rótula-Mesa

1) La mesa de 2100x1300x200 [mm], se muestra en la **Figura 3.2**. Todas las conexiones son soldadas, excepto las conexiones a los carros de los rieles y al actuador hidráulico que deberán fijarse mediante pernos (parte del montaje).

- Placa superior $e = 12$ [mm]
- Las almas de los perfiles y atiesadores son de 178x6 [mm]
- Las alas inferiores de los perfiles perimetrales y centrales son de 100x10 [mm]

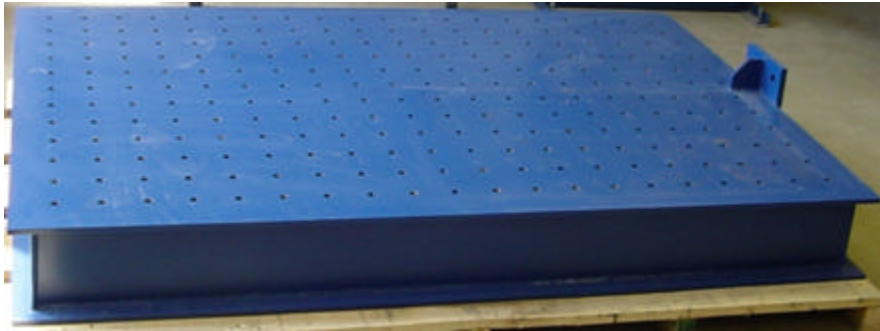


Figura 3.2. Vista de la mesa.

- 2) Los rieles de soporte consisten en dos perfiles del tipo doble T de 2630 [mm] de largo, ala superior ($e=10$ [mm]) con agujeros ojo de gato para ajustar el riel de precisión, alma ($e=6$ [mm]) con perforaciones para poder introducir pernos y tuercas de montaje y ala inferior ($e=10$ [mm]) con perforaciones para conectar a la losa de reacción mediante anclajes químicos (**Figura 3.3**).

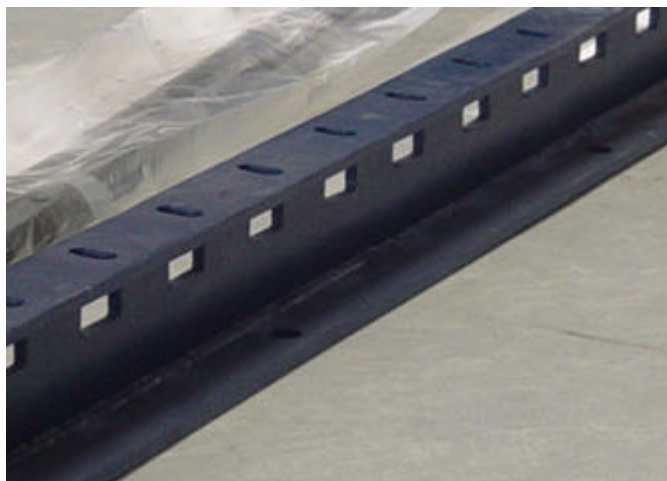


Figura 3.3. Rieles de soporte.

3) Los Rieles de precisión de diseño son modelo KUVÉ45-B-KT-SL, sin embargo, debido a un error en el envío por parte del proveedor (los problemas que esto produjo se detallan en el montaje), el modelo utilizado fue el KUVÉ45 (Figura 3.4). Tienen 2600 [mm] de largo, poseen 4 carros, que son los apoyos deslizantes de la mesa. Las características de éstos se detallan en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Características de los rieles de precisión.

| Características del producto | | | | |
|------------------------------|--------|--------------------|----------|--------------------|
| Dimensiones de los carros | | Capacidad de carga | | |
| H | 60 mm | C | 69000 N | Capacidad de carga |
| B | 120 mm | C0 | 141000 N | Capacidad de carga |
| | | M _{ox} | 3610 Nm | Momento |
| L | 139 mm | M _{oy} | 2485 Nm | Momento |
| | | M _{oz} | 2485 Nm | Momento |



Figura 3.4. Rieles de precisión.

- 4) La estructura de soporte del servo-actuador hidráulico (**Figura 3.5**), es una estructura de acero compuesta por una placa con una perforación al centro de 90 [mm] de diámetro para el anclaje de servo-actuador y 8 perforaciones para los pernos que conectan con la brida delantera. Esta placa cuenta con dos líneas de atiesadores y una placa superior y se apoya sobre la placa de soporte ($e = 20$ [mm]) que se conecta con la losa mediante anclajes químicos.

La estructura consta, además, de dos vigas paralelas al eje del servo-actuador con el fin de transmitir los esfuerzos al muro (liberando con esto, en parte a la losa de soporte). Ambas vigas se conectan con otra viga intermedia, perpendicular al eje del servo-actuador, con el fin de dar un segundo apoyo a éste.



Figura 3.5. Soporte de servo-actuador.

- 5) Conexión Rótula-Mesa, esta pieza está conformada por dos placas de forma triangular, con una perforación que permite conectar la rótula mediante un pasador (para asegurar el pasador, lleva una chaveta atornillada). Estas placas descansan sobre otra placa que posee 4 perforaciones con hilo, para realizar la conexión con la mesa (**Figura 3.6**).

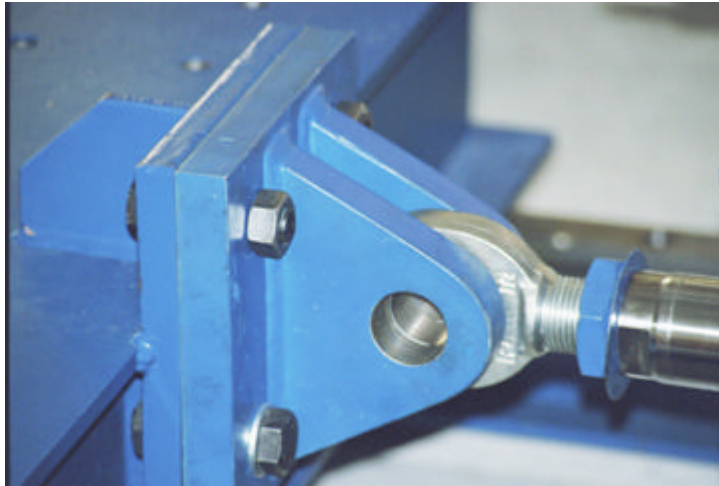


Figura 3.6. Conexión rótula-mesa.

3.3.2. Montaje de componentes mecánicos.

Para el correcto montaje de la mesa fue necesario realizar varios trabajos y al igual que en el resto del proyecto, fue necesario hacer muchas modificaciones de diseño y enfrentar problemas de distinta índole. Los pasos para el montaje se enumeran y describen a continuación:

- 1) **Refuerzo estructural de la losa de reacción:** El montaje de la mesa comenzó con el refuerzo estructural de la losa donde fue montada, esto se detalla en la memoria de Leiva 2007 (*Ref. 1, Cáp. 5.2*) y consiste básicamente en una sobrelosa estructural de 6 cm. de espesor, con refuerzos de acero A63-42H.

- 2) **Ampliación de la caseta de la bomba:** La ampliación de la caseta ubicada a las afueras del laboratorio, con el fin de contener la central óleo-hidráulica en un lugar seguro y cercano. A esta caseta fue necesario hacerle varias modificaciones para su correcto funcionamiento.
- 3) **Trazado de ejes de montaje:** El trazado de los ejes principales se realizó con instrumental topográfico (taquímetro) y presentó serias dificultades pues el espacio de trabajo es muy reducido y esta clase de instrumentos necesita distancias mínimas de trabajo. Por las características del equipo usado, la precisión que se logró de 5 [mm] de error, que está dentro del rango que permiten corregir las perforaciones alargadas (tipo “ojos de gato”) del ala superior del riel de soporte.
- 4) **Marcado y colocación de anclajes químicos:** Se marcaron las posiciones de los pernos de anclaje en la losa para asegurar su correcta instalación. Luego se realizaron las perforaciones para los pernos y se procedió a la instalación de éstos mediante anclajes químicos. Para los pernos que van al muro, se esperó hasta la prueba del servo-actuador con la mesa, pues no era posible definir correctamente su posición antes de este punto.
- 5) **Montaje de los rieles de soporte:** Debido a la exactitud requerida por los rieles de precisión, los rieles de soporte fueron rectificadas en sus alas superiores previo al montaje definitivo. Teniendo los anclajes ya instalados los rieles fueron montados, y nivelados, para alcanzar las tolerancias requeridas. No fue suficiente el equipo topográfico corriente (taquímetro y nivel de doble visada), se necesitó un equipo aún más preciso recurriéndose a un nivel geodésico con prisma paralaje que alcanza una precisión de la décima de milímetro. Con este equipo fueron nivelados ambos rieles de soporte, mediante las tuercas de nivelación de los pernos de anclaje que el diseño tenía contempladas.
- 6) **Montaje de los rieles de precisión:** Los rieles de precisión se unieron a los rieles de soporte mediante pernos tipo parker de alta resistencia. Los rieles

soportantes, como ya se mencionó, cuentan en su parte superior con perforaciones alargadas (tipo “ojo de gato”) para facilitar la unión entre ambas piezas.

La parte más crítica de esta etapa fue cumplir con las tolerancias de uso de los carros (0,1 mm. vertical y 12 μm en horizontal). Con lo explicado en el punto anterior quedó resuelta la nivelación vertical, pero para las tolerancias horizontales se usó un sistema de diales micrométricos para asegurar el paralelismo de los rieles.

- 7) **Fabricación de caballete para tecla:** Para montar la mesa correctamente, fue necesario diseñar y fabricar un equipo para moverla y voltearla (punto 8). Éste debía cumplir con exigencias de diseño en acero y además debía ser portátil (desmontable), lo cual complicó un poco el diseño. En definitiva, la solución encontrada se muestra en la **Figura 3.7**

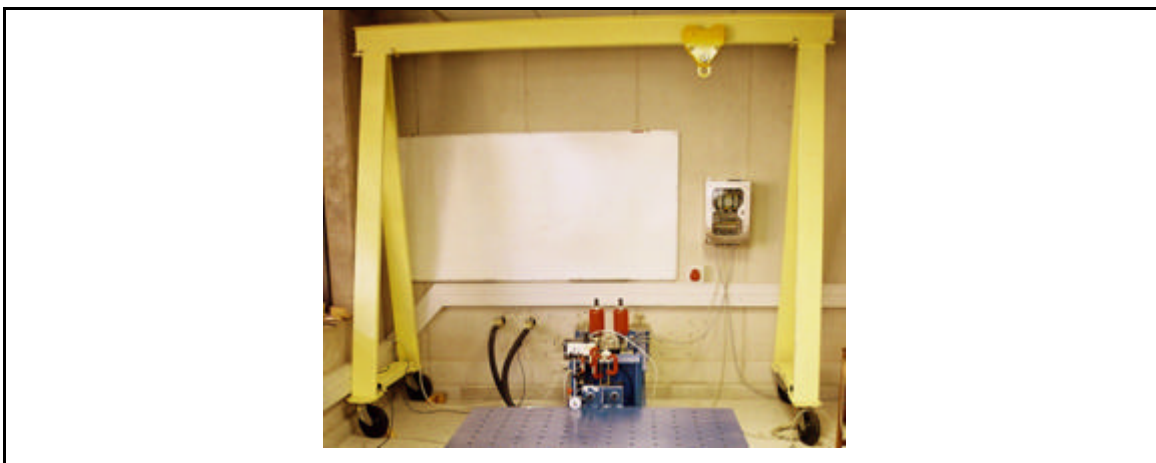


Figura 3.7. Caballete para tecla.

- 8) **Montaje de la mesa sobre los carros:** Como se mencionó en la descripción (3.2.2-3) debido un error de los proveedores se usaron rieles diferentes a los de diseño. Esto hizo necesaria la modificación de la base de la mesa soldando unas placas de 10 mm de espesor con 4 perforaciones que corresponden a la distancia transversal “ J_B ” real de la ubicación de los pernos de sujeción de los carros (diferencias, **Tabla 3.3**).

Para la instalación de las placas primero se debió voltear la mesa (plataforma de acero). Luego, para asegurar la ortogonalidad de los ejes de las placas fue necesario realizar nuevamente un trabajo topográfico de precisión. Luego, se soldaron las placas asegurando que no se curven producto del cordón de soldadura **Figura 3.9 d)** y por último se volteó la mesa nuevamente. (**Figura 3.9 f)**.

Tabla 3.3. Diferencias entre rieles de precisión de diseño y montaje.

| Características del producto | | |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|
| Dimensiones carros | Diseño | Montaje |
| H | 60 mm | 60 mm |
| B | <i>86 mm</i> | <i>120 mm</i> |
| <i>J_B</i> | <i>60 mm</i> | <i>100 mm</i> |
| L | <i>171,1 mm</i> | <i>139 mm</i> |

Más detalles Anexo D-catálogos.

9) Montaje de la mesa (plataforma de acero) sobre los carros: Montar la mesa sobre los carros fue una labor de precisión, se hicieron coincidir las perforaciones de las placas instaladas con las perforaciones de los carros de soporte que tienen una tolerancia de 0,1 [mm]. Una vez montada se niveló con láminas de acero milimétricas y se fijó con 16 pernos de 10 mm de diámetro de alta resistencia tipo parker (4 por carro).

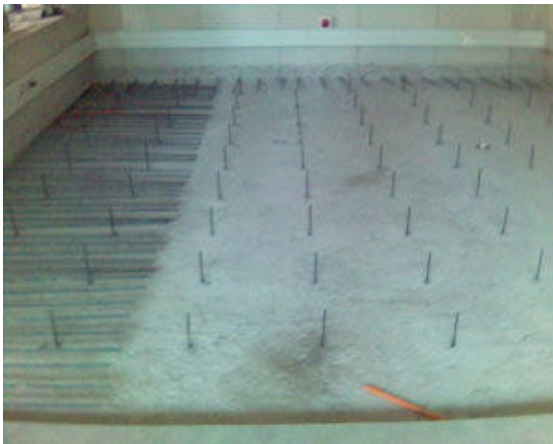
10) Montaje definitivo de la estructura de soporte del servo-actuador: El montaje de la estructura de soporte presentó diversos problemas debido principalmente a que para finiquitar este montaje se necesita tener el vástago del servo-actuador extendido y así asegurar el paralelismo con el eje de la mesa. Primero se montó el servo-actuador y se apernó a la estructura de soporte. Una vez extendido el vástago se procedió a fijar el soporte del actuador al suelo. Fue

necesario limar los agujeros alargados (tipo “ojo de gato”) de la placa base ($e = 22\text{ mm}$) para hacerlos rotar en torno a los anclajes químicos.

11) Montaje de las vigas paralelas: Para el correcto montaje de las vigas paralelas del soporte del servo-actuador, primero se marcaron e instalaron los anclajes químicos en el muro, para la correcta transmisión de esfuerzos. Por último, se lleno con mortero de nivelación el espacio entre placas y apoyos.

12) Conexión Mesa servo-actuador: El montaje de la conexión rótula-mesa, parte con la prueba preliminar del vástago extendido. Se procedió a la conexión de la pieza a la mesa mediante 4 pernos de alta resistencia (sin apriete), se materializó la conexión con vástago del actuador y se probó en distintas posiciones de éste.

En las **Figura 3.8** a **Figura 3.10** se muestra una breve secuencia gráfica del montaje, más detalles se muestra en el **Anexo A**.



(a) Refuerzo de losa

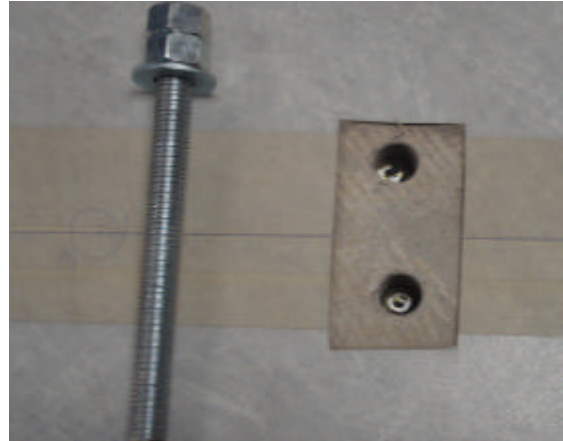


(b) Ampliación caseta

Figura 3.8. Etapas de Montaje.



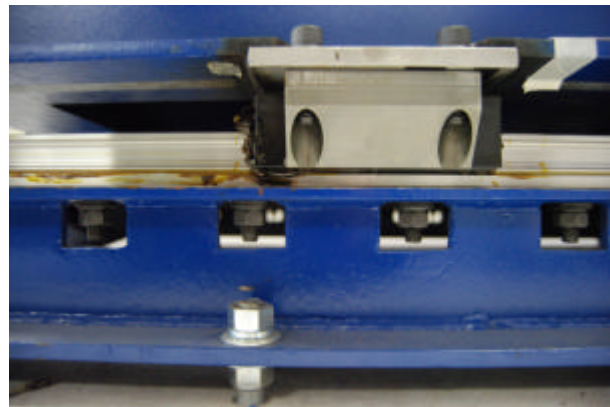
(c) Trazado de Ejes



(d) Anclajes químicos



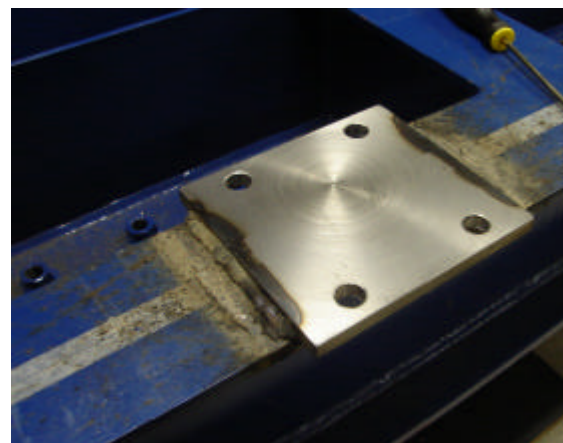
(a) Distribución de anclajes



(b) Montaje de rieles



(c) modificación mesa 1

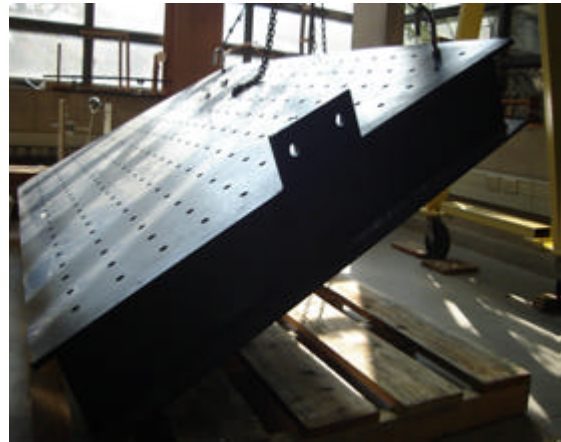


(d) Modificación mesa 2

Figura 3.9. Etapas de Montaje 2.



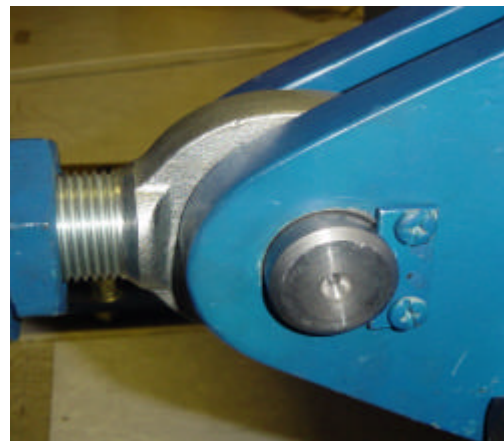
(e) Rieles de precisión



(f) Montaje mesa



(a) Estructura de soporte y vigas paralelas



(b) Conexión rotula mesa

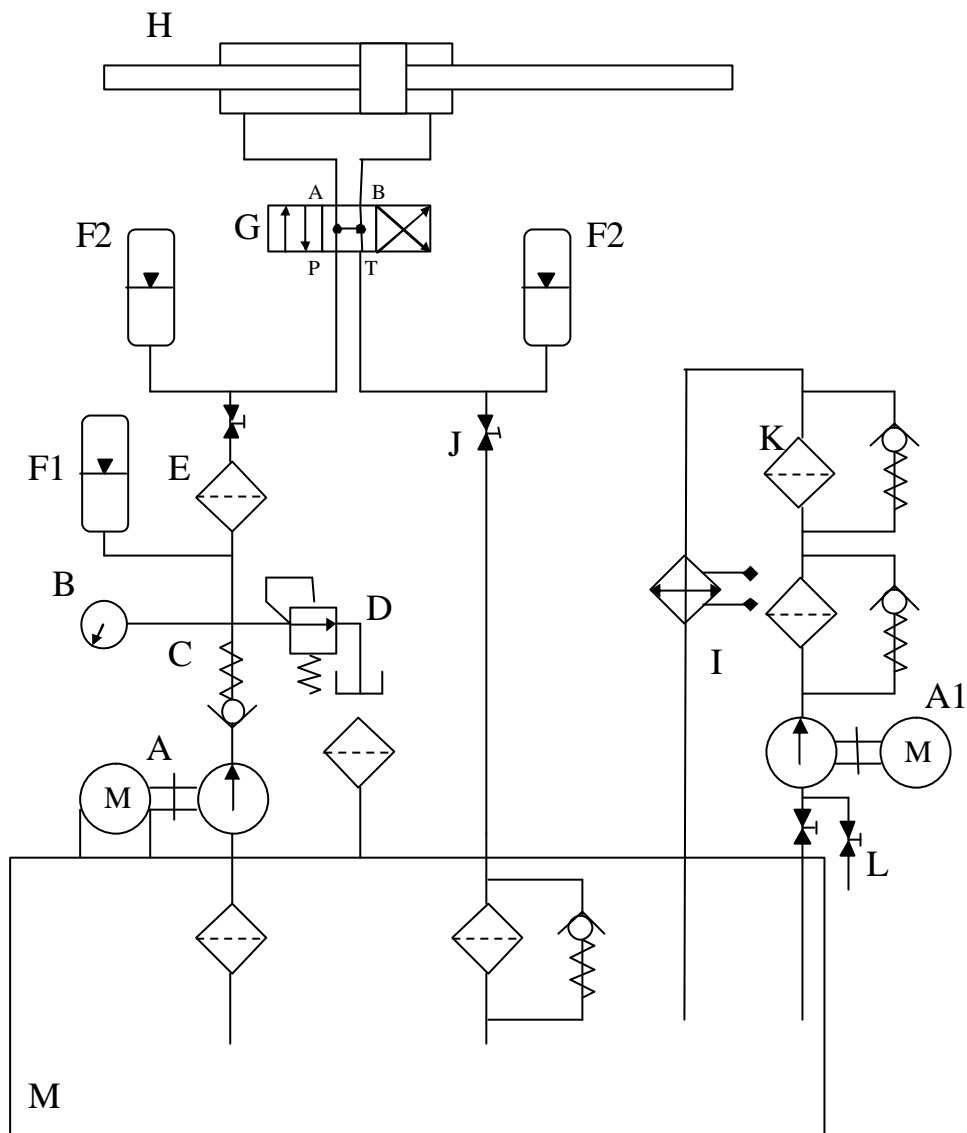
Figura 3.10. Etapas de Montaje 3.

3.4. Sistema Óleo-hidráulico.

3.4.1. Descripción de sistema óleo-hidráulico.

Las componentes del sistema óleo-hidráulico de la mesa vibradora son fundamentalmente 3 partes y serán descritos a continuación:

1) Unidad de potencia: La unidad de potencia es la que suministra la presión y el caudal necesarios para que la mesa pueda realizar correctamente sus movimientos. Éste es el sistema al que más modificaciones se le realizaron; éstas y sus motivos se detallan en la puesta en marcha. En definitiva se tiene el esquema de la **Figura 3.11**, los detalles se presentan a continuación.



- | | |
|---|---------------------------------------|
| A.- Bomba Primaria (Pistón) – Motor. | G.- Servo – Válvula de control. |
| A1.- Bomba Secundaria – Motor. | H.- Servo – Actuador (<i>gato</i>). |
| B.- Manómetro. | I.- Intercambiador de calor. |
| C.- Válvula antirretorno calibrada (válvula check). | J.- Válvulas de aislamiento. |
| D.- Válvula limitadora de presión. | K.- Filtro purificador. |
| E.- Filtro de alta presión. | L.- Válvula de llenado. |
| F _{1,2} .- Acumuladores Hidráulicos. | M.- Deposito de aceite [400 lts.]. |

Figura 3.11. Esquema del sistema impulsor.

A.- Bomba Primaria de pistón: El flujo máximo nominal de la bomba es de 63 [l/min] a una presión de 2700 [psi].

Motor Trifásico (**Figura 3.12**):

Marca: Eberle.

Tipo: Inducción 3 Fases.

Potencia: 60 [HP] (45 [KW])

RPM: 1470

Carcaza Modelo: 525PM4-DX

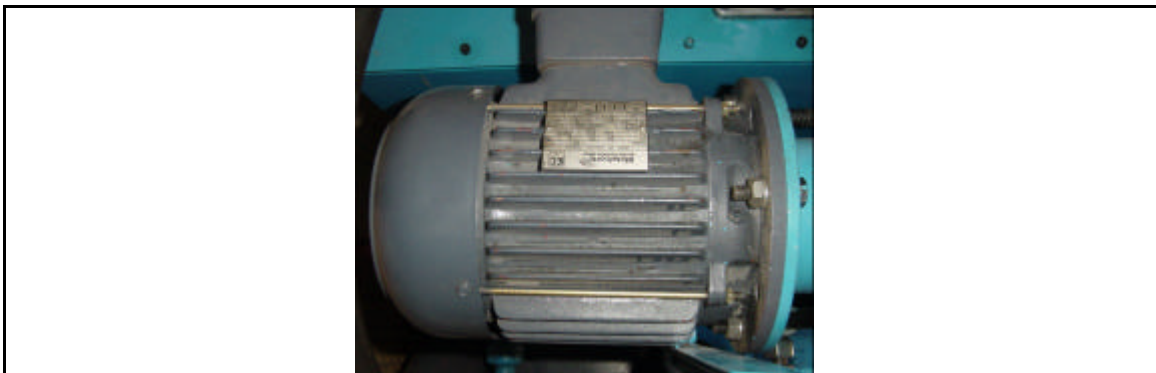


Figura 3.12. Motor Trifásico

Bomba Óleo-hidráulica (**Figura 3.13**):

Marca: Vickers

Modelo: PVQ 45

Tipo: De pistón.

Caudal: 45,1 cm³/ rev.

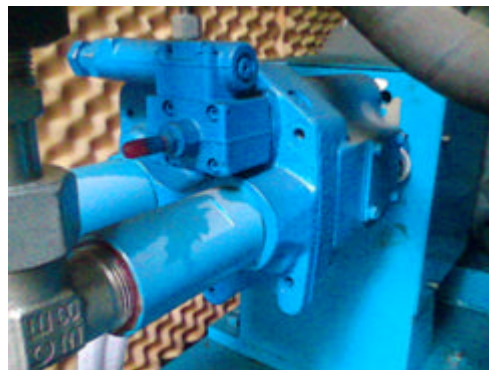


Figura 3.13. Bomba óleo-hidráulica

A1.- Bomba Secundaria de engranajes:

Motor Trifásico (**Figura 3.14**):

Marca: Eberle.
 Tipo: Inducción 3 Fases.
 Potencia: 2 [HP] (1,5 [KW])
 RPM: 1450
 Carcaza modelo: 890L4/OM/OX



Figura 3.14. Motor de engranajes

Bomba – Óleo-hidraulica (**Figura 3.15**):

Marca: Salami.
 Modelo: 2PB 19D G28 P1.
 Caudal: 19,4 cc/rev.

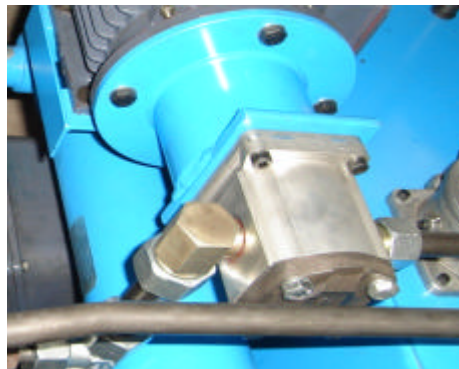
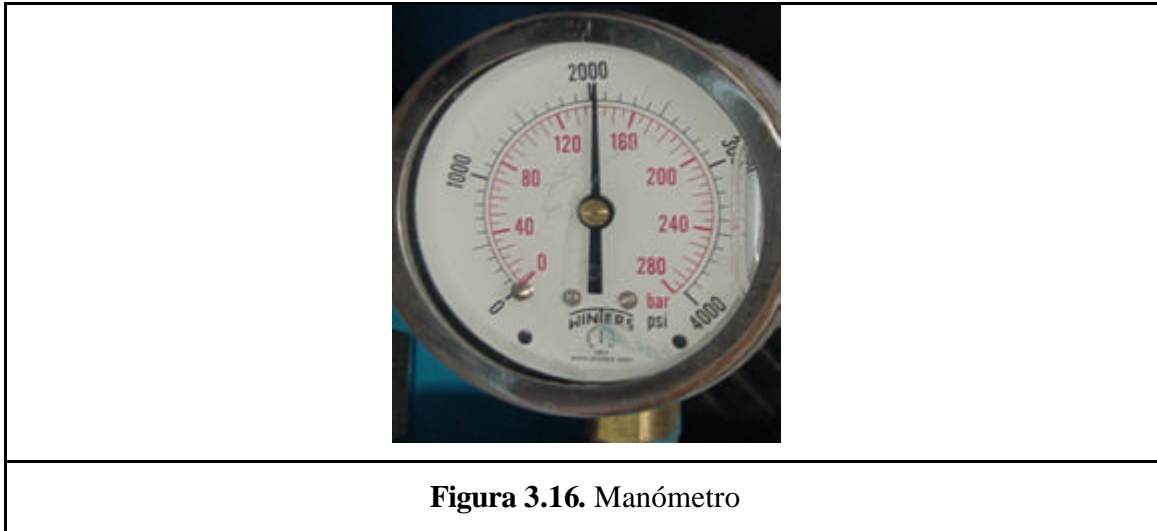


Figura 3.15. Bomba óleo-hidráulica.

B.- Manómetro (Figura 3.16): Instrumento de medición de la presión de un fluido contenido en un recipiente cerrado. Éste se utiliza con el fin de poder tarar la válvula reguladora de presión.



C.- Válvula antirretorno calibrada (válvula check, Figura 3.17): Esta válvula posibilita la circulación de flujo de aceite en un sentido y lo impiden en el sentido contrario, de esta forma el aceite no retorna hacia la bomba.



Figura 3.17. Válvula check.

D.- Válvula reguladora de presión Relief (Figura 3.18): Esta válvula (marca ATOS, modelo **DHI-0639/0 23**) permite regular la presión del aceite. Es controlada desde el laboratorio, mediante un interruptor instalado a un costado del botón de seguridad. Permite enviar el aceite directamente al estanque para evitar que éste se caliente ó dirigirlo hacia el actuador. Esta válvula se tara a 2700 [psi], que es la presión de trabajo.



Figura 3.18. Válvula reguladora de presión.

E.- Filtro de alta presión (Figura 3.19): Este Filtro, de 10 micrones, va instalado en la línea de presión del sistema.

Filtro de alta presión:

Marca: Vickers

Modelo filtro: OFP 135 2 B A 64

Elemento filtro: FP 135 2 A A10N

Presión máx. de operación: 420 [bar] (6000[psi])



Figura 3.19. Filtro de presión.

F.- Acumulador hidráulico: Tiene la función de almacenar la energía absorbiendo un cierto volumen de aceite a presión y entregándolo cuando lo necesite el sistema nuevamente.

En este sistema se utilizan 3 acumuladores marca **Vickers**, uno de vejiga de 5 [gls] **F1 (Figura 3.20)** y dos acumuladores de vejiga **F2** (hidroneumático, **Figura 3.20b**) de ½ [gls] con nitrógeno instalados en líneas “**P**” y “**T**” (**F2**). Estos últimos son de pequeña capacidad, y tienen como principal función la de minimizar el golpe de ariete. No son usados como fuente de energía.



(a) Acumulador



(b) Acumuladores ½ [gls]

Figura 3.20. Acumuladores

G.- Servo-actuador (Figura 3.25).

H.- Servo-válvula de control (Figura 3.27).

I.- Intercambiador de calor (Figura 3.21): El intercambiador de calor va ubicado en la línea de “lavado”, para que el aceite filtrado vuelva al depósito a una temperatura menor. Se utiliza un intercambiador de calor aceite-agua, donde el agua se toma de la red de agua potable.



Figura 3.21. Intercambiador de calor.

J.- Válvulas de corte (Figura 3.22): Válvulas de accionamiento manual, que están ubicadas al interior del laboratorio en ambas líneas “P” y “T”, y permiten el corte de suministro de aceite al circuito, para mantenerlo aislado y libre de impurezas, en caso de hacer mantención u otro trabajo en la unidad de potencia.



Figura 3.22. Válvulas de corte.

K.- Sistema de filtrado purificador (Figura 3.23): Consta de dos filtros de baja presión de 10 y 3 micras respectivamente, su objetivo principal es mantener limpio el aceite y es de vital importancia en el funcionamiento del sistema; ya que el aceite hidráulico sucio dañaría los componentes del sistema.

Estos filtros se deben disponer pues la exposición del vástago del cilindro a la atmósfera introduce contaminantes al retraerse éste. Además, por el sólo hecho de utilizar el aceite, se van creando impurezas que se deben sacar del sistema; ya que un aceite contaminado afecta el rendimiento de la bomba, servo-actuador y sobre todo a la servo-válvula.

Se utiliza un filtro en la línea de salida del aceite y un filtro de alta presión en la línea de presión del sistema, de manera de garantizar que la alimentación de los otros componentes sea con un aceite depurado. Además, como modo de operación se filtra el aceite cada vez y durante todo el tiempo que se utilice la unidad de potencia.



Figura 3.23. Sistema de filtrado.

L.- Válvula de Llenado: Es una llave que permite llenar el depósito de aceite para recargarlo pasando el aceite por el sistema de filtrado antes de ingresarlo al circuito, con esto se evitan todos los problemas de contaminación del aceite.

M.- Depósito de aceite (Figura 3.24): El depósito almacena el aceite, tiene una capacidad de 400 lts., pues debe parcialmente entregar una cierta refrigeración y mantener fuera de éste a las partículas contaminantes. Estas tareas se realizan mediante filtros y el intercambiador de calor. Además cuenta con un termómetro adosado a él que permite medir la temperatura del aceite del depósito directamente.



Figura 3.24. Depósito de aceite.

- 2) El servo-actuador hidráulico *G* (Figura 3.25a), es el encargado de transformar la energía hidráulica en trabajo mecánico, marca **MOOG** modelo **n. CA52726**, sus características se detallan en la **Tabla 3-4**:

Tabla 3-4. Características del servo-actuador.

| Características del Producto | |
|--|------------------------------|
| <i>Servo-actuador MOOG-Italia, mod. n. CA52726</i> | |
| Tipo | Doble acción y doble vástago |
| <i>Pistón</i> | |
| Carrera vástago | 400 mm |
| Diámetro del Embolo | 80 mm |
| Diámetro del Vástago | 56 mm |
| Presión Nominal | 210 [bar] (3000 [psi]) |
| Presión de prueba | 315 [bar] (4500 [psi]) |
| Frecuencia Máx. | 15 [Hz] |
| Carga máxima | 54 [kN] |

Este modelo tiene un transductor de posición LVDT integrado. La forma de montaje es con brida delantera rectangular con agujeros y rotula para fijación de eje. Más detalles en **ANEXO D**.



(a) Servo-actuador



(b) Servo-actuador detalle de zona de conexiones entre el servo-actuador y la servo-válvula, además se muestra el detalle de la conexión para los acumuladores de ½ [gls].

Figura 3.25. Servo-actuador.

- 3) **Servo-válvula de control “H” (Figura 3.27):** Es la que controla la apertura, la detención y la dirección del flujo de aceite. Se utiliza un distribuidor de 4 vías y 3 posiciones, del tipo posición intermedia “H” (P-A-B-T), de flujo máximo 63 [l/min]. La posición de la izquierda permite llenar de aceite la cámara izquierda del actuador y el vaciado hacia el depósito de aceite de la cámara derecha. La posición central mantiene en reposo el pistón al no existir variaciones de aceite en ambas cámaras. La posición de la derecha realiza la operación inversa que la izquierda (**Figura 3.26**), características principales **Tabla 3-5**.

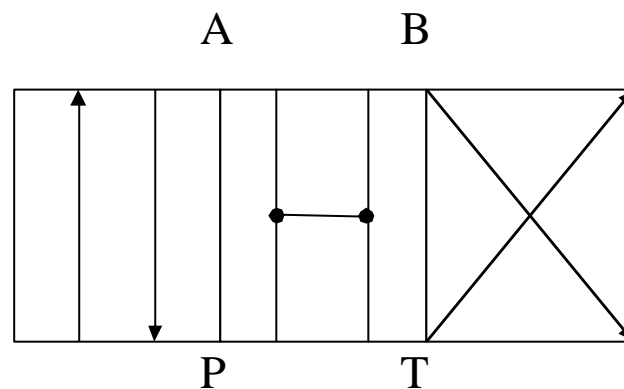


Figura 3.26. Esquema de flujo de servo-válvula de 4 vías y 3 posiciones, intermedia bloqueada.

Donde,

P: Corresponde a la llegada del flujo del aceite suministrado.

T: Retorno al depósito de aceite.

A y B: Conductos de trabajo para suministrar aceite a las cámaras del actuador.



Figura 3.27. Servo-válvula de control.

Tabla 3-5. Características de la servo-válvula.

| Características del producto | |
|--|----------------------------|
| Servo-válvula, MOOG-USA, Modelo G761-3005 | |
| Tipo | S 63 JOGM4 VPL. |
| Característica | Valor Nominal |
| Caudal máx. | 63 [lpm] |
| Rango de temperatura | -20 a 275 [°F] |
| ? P | 1000 [psi] |
| Limpieza de aceite | ISO 4406 < 14/11 |
| Frecuencia de operación estable | 15 [Hz] |

El resto de características se muestran en el ANEXO D.

3.4.2. Montaje de sistema oleo-hidráulico.

Para el correcto montaje del sistema oleo-hidráulico fue necesario realizar varios trabajos y al igual que en la etapa anterior fue necesario hacer muchas modificaciones de diseño y enfrentar problemas de distinta índole. Los pasos para el montaje se numeran y describen a continuación:

- 1) **Montaje de la unidad de potencia:** El montaje de la unidad de potencia corresponde a la instalación en la caseta, por parte del proveedor **VIGNOLA**, de la unidad reacondicionada para funcionar con los otros elementos del sistema. Se hicieron unas perforaciones en el muro de reacción para traspasar las mangueras de aceite.

Luego de esta instalación se realizaron pruebas con la presión de trabajo, para asegurar el correcto funcionamiento y que no hubiera filtraciones en la línea de flujo. El montaje de la unidad de potencia concluye con la conexión de ésta con el servo-actuador y el apriete final de todo el circuito.

- 2) **Montaje del servo-actuador:** El montaje del servo-actuador, como se señaló en el acápite anterior, comienza con la conexión mecánica de éste con su soporte, mediante la brida delantera con 8 pernos de alta resistencia A325 5. (c). Una vez instalada la unidad de potencia, se procedió a conectar las mangueras a las conexiones del servo-actuador **Figura 3.25b y Figura 3.28 Figura 3.28d**, y para terminar se niveló con el nivel geodésico y se reviso con equipo topográfico nuevamente el paralelismo entre el servo-actuador y la mesa.

Se conectaron también al servo-actuador los acumuladores pequeños de ½ gls. **Figura 3.28e**, para minimizar el golpe de ariete que se produce al operar la mesa (en cada cambio de dirección del movimiento del actuador),

en este punto se tuvo especial cuidado con la limpieza de los codos de acople pues la más mínima impureza podría haber dañado seriamente los equipos.

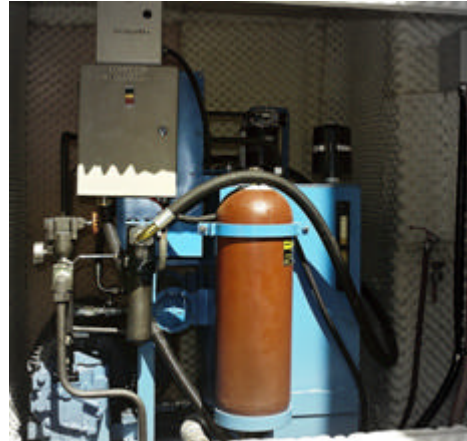
- 3) **Montaje de la servo-válvula:** El montaje de la servo-válvula estuvo a cargo del proveedor **MOOG**, pero éste comenzó mucho antes de la instalación física de la misma, pues para llevar a cabo una correcta instalación el aceite debió cumplir con un código de limpieza (**Tabla 3-5.** Características de la servo-válvula.) y para esto fue necesario filtrar el aceite por 52 horas, labor que se describe con más detalle en la puesta en marcha.

Con la certeza de la calidad del aceite se procedió de la siguiente forma:

Se remueve la tapa plástica que cubre la conexión del servo-actuador y se instala la servo-válvula mediante 4 pernos tipo parker (debe tenerse en cuenta que **las marcas de fábrica** puestas en ambos equipos **MOOG USA** e **Italia no coinciden** dejando constancia de esto a los proveedores a cargo del montaje).



(a) Caseta



(b) Unidad de Potencia



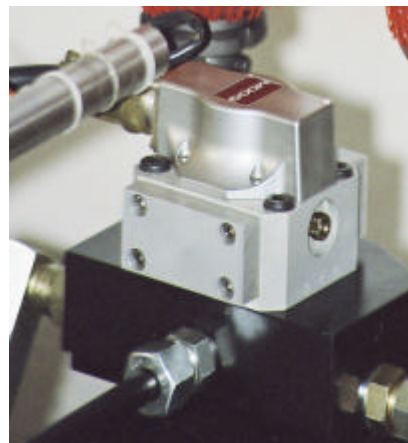
(c) Montaje Servo-Actuador



(d) Conexión mangueras con actuador



(e) Montaje acumuladores ½ [gls];



(f) Montaje servo-válvula

Figura 3.28. Etapas de montaje sistema oleo-hidráulico.

3.5. Sistema de control

3.5.1. Descripción de sistema de control.

El sistema de control consiste en 3 componentes principales que se describen a continuación:

- 1) **Transductor de posición LVDT:** El transductor de posición LVDT, insertado en la parte interior del servo-actuador (**Figura 3.29**) permite obtener la posición del actuador mediante un módulo oscilador/ modulador (parte del módulo de control).



Figura 3.29. LVDT incorporado.

- 2) **Módulos de control:** El módulo de control, provisto por **MOOG**, consta de 3 partes fundamentales instaladas en una caja aislada (**Figura 3.30**).



Figura 3.30. Caja módulo de control

- **Módulo 1:** Fuente de poder modelo **G128-808** (**Figura 3.31a**), es la encargada de suministrar energía al resto del circuito. Recibe los 220 [V], transformándolos a 24 [VDC] con 1,3 [A].
- **Módulo 2:** Microcontrolador modelo P-I Servo-amplificador **G122-824-002** (**Figura 3.31b**), es el encargado de realizar un control de lazo cerrado mediante una amplificación proporcional e integral de la señal enviada.
- **Módulo 3:** Acondicionador de LVDT Modelo **G123-817** (**Figura 3.31c**), es el encargado de convertir el desplazamiento en una señal de voltaje (para mayor información acerca de estos 3 módulos ver **Anexo D**).



(a) Fuente de poder

(b) Microcontrolador

(c) Módulo LVDT

Figura 3.31. Módulos de control.

- 3) **Computador de operación:** El computador de operación debe poseer las siguientes características para el correcto funcionamiento de los programas de control, velocidad suficiente (RAM y procesador) para realizar el proceso de datos en tiempo real, con el objeto de no disminuir la tasa de muestreo por falta de capacidad del hardware (recordemos que la tasa de muestreo del registro de diseño Lollole 1985, es de 200 muestras por segundo). Además, debe poseer una tarjeta de adquisición de datos serie E de National Instruments o compatible, para la correcta ejecución de las rutinas de control de Labview. Junto con lo anterior debe contar con el software Labview 7 o superior.

Durante el desarrollo de este trabajo se cuenta con un computador con procesador 500 [MHz] y 256 [Mb] de RAM, además con la tarjeta de adquisición **NI PCI-6036E (200kS/s, 16 Bit)**, con la cual no se presentaron problemas. Para obtener más información sobre esta tarjeta ver **CD adjunto**.

3.5.2. Montaje del sistema de control.

El correcto montaje de los equipos del sistema de control debe permitir enviar datos desde el PC de control mediante la tarjeta de adquisición de datos hacia el microcontrolador y de ahí a la servo-válvula, la cual controla el flujo de aceite del servo-actuador permitiendo así el movimiento de la mesa. Para el montaje del sistema de control se realizaron los siguientes trabajos:

- 1) Anclaje de la caja de soporte al muro mediante 4 pernos de anclaje.
- 2) Conexiones eléctricas entre el módulo 1 microcontrolador y la servo-válvula mediante un conector hembra de 4 pines **Figura 3.32**. Éste es el que envía la señal eléctrica que la servo-válvula interpreta y produce un desplazamiento.

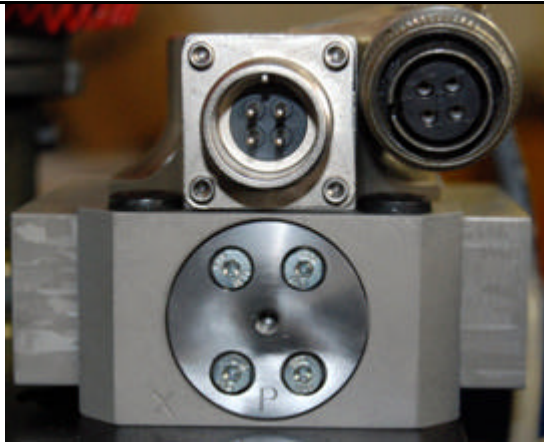


Figura 3.32. Conexión servo-válvula.

- 3) Conexiones eléctricas entre el modulo 3 LVDT y el LVDT interno del servo-actuador mediante un conector de 6 pines **Figura 3.33** (aunque en este caso solo se usan 4), este devuelve una señal que detiene el envío de corriente a la servo-válvula, indicando que ya se alcanzó la posición deseada.



Figura 3.33. Conexión LVDT.

- 4) Conexión a la fuente de poder. La parte crítica de esta operación fue la identificación de “*la fase*” de la corriente alterna de (220 volt) pues equivocarse el suministro de energía dañaría el módulo fuente de poder.
- 5) Por último, conexión al PC mediante la tarjeta de adquisición de datos.

CAPÍTULO 4: PUESTA EN MARCHA

4.1. Introducción

En este capítulo se detallan los trabajos y las pruebas realizadas para la puesta en marcha de la mesa vibradora, ésta consiste en la prueba de equipos por separado y en su conjunto. También se detallan las modificaciones hechas a los equipos y a las instalaciones, los motivos y las mejoras conseguidas con éstas.

Específicamente se describen las modificaciones hechas a los equipos hidráulicos y como afectan al circuito y al funcionamiento en general, además de los cambios de diseño necesarios para lograr un funcionamiento óptimo.

Se detallan las modificaciones de diseño hechas a los equipos mecánicos, razones y mejoras logradas.

Por último, las modificaciones y cambios hechos a los equipos eléctricos, debido a defectos de fabricación presentados. Junto a esto se presentan las modificaciones básicas que debieron hacerse para que el sistema de control comenzara a funcionar (*más detalles en **Cáp. 5 Calibración***).

Después de todos los cambios realizados fue necesario calcular nuevamente la validación numérica del sistema hidráulico, el detalle del cálculo se presenta en el **Anexo D**, esta validación y la definición de los rangos de operación fueron usadas en la calibración de todos los sistemas. Se muestran y discuten los resultados obtenidos en la etapa previa a la calibración del sistema de control.

4.2. Puesta en operación

4.2.1. Introducción

Luego de los problemas detallados en el “*Capítulo 3: Montaje*” y antes de poder conectar el último y principal elemento (*la servo-válvula*), era indispensable cumplir con códigos de limpieza del aceite (**Tabla 3.4**) para lo cual se filtró por 52 hrs. pasándolo por dos filtros de 10 y 5 μm respectivamente (**Fig. 3.23**), este proceso se debió repetir en varias oportunidades, debido a los cambios realizados en la unidad de potencia. Una vez pasado el tiempo de filtrado, el proveedor **MOOG** tomó una muestra de aceite y la hizo analizar (se hizo analizar también una muestra por parte del equipo de trabajo), cumpliendo de sobremanera las exigencias necesarias para el montaje de la servo-válvula.

Este es el hito que da fin exitosamente al montaje, el siguiente paso es la conexión del sistema de control. Aquí comienza la prueba de los equipos, y sus correspondientes modificaciones.

4.2.2. Modificaciones del sistema hidráulico

Las pruebas del sistema arrojaron los problemas que se enumeran y describen a continuación:

- 1) **Problemas con el caudal:** La primera bomba usada una **ATOS PFE-41085**, que tiene una capacidad de 114 [l/min.], este caudal es más del que puede manejar la servo-válvula real produciéndose problemas con el equipo (es importante destacar que aún con la servo-válvula de diseño original también se hubiesen tenido problemas con este caudal), además la bomba estaba en malas condiciones.

Luego el proveedor **VIGNOLA** realizó un nuevo diseño de los equipos de la unidad de potencia y obtuvo una segunda bomba, tipo pistón marca **Vickers** modelo **PVQ 98** la cual arroja un caudal de 93 [l/min.], para que ésta funcionara,

se debió modificar en gran medida la unidad de potencia cambiando entre otras cosas la capacidad del depósito de aceite de 200 a 400 lts. La capacidad inicial, fue una equivocación del proveedor, pues un correcto diseño debe contemplar a lo menos 3 veces el caudal de la bomba en tanque durante la operación. Este segundo diseño también fue errado, pues el cálculo realizado por **VIGNOLA** consideró solo la necesidad de caudal para alcanzar la velocidad de diseño original ($60[\text{cm/s}]$) y no contempló la capacidad de la servo-válvula. Con esta bomba se realizaron pruebas y se encontró que el sistema se volvía inestable, no se estabilizaba en ninguna posición de la mesa, debido a que la servo-válvula no era capaz de controlar el caudal.

Por último, se realizó un diseño considerando **todos** los requerimientos y limitaciones del sistema real montado (caudal, frecuencia, velocidad, etc.), obteniendo en definitiva la bomba primaria tipo pistón Marca **Vickers** modelo **PVQ 45** descrita en el capítulo anterior (más detalles en **Anexo F**), y definiendo con esto la nueva velocidad máxima de diseño 40 [cm/s], además de las respectivas modificaciones necesarias para que ésta funcione. Los cambios en la configuración se muestran en **Anexo B Figura B.1 a Figura B.3**.

Además de lo anterior, se le hicieron varias modificaciones a la unidad de potencia con el fin de mejorarla, como ejemplo: se incorporó una válvula de llenado que permitió cargar el depósito de aceite, pasando el aceite por el sistema de filtrado antes de que ingrese al circuito.

- 2) **Problemas de filtraciones:** Como todo equipo hidráulico fue necesario realizar una “*marcha blanca*” probando los equipos con la presión de trabajo y verificando las conexiones “*fittings*” para darles el apriete definitivo, asegurando con esto que no existen filtraciones. Con respecto a éste último punto aún queda una pequeña filtración de aceite, en la conexión de ingreso al intercambiador de calor **Figura 4.1**, esto debido a que es una conexión entre *fitting* de acero y de bronce con lo que es imposible eliminar al 100% la fuga.

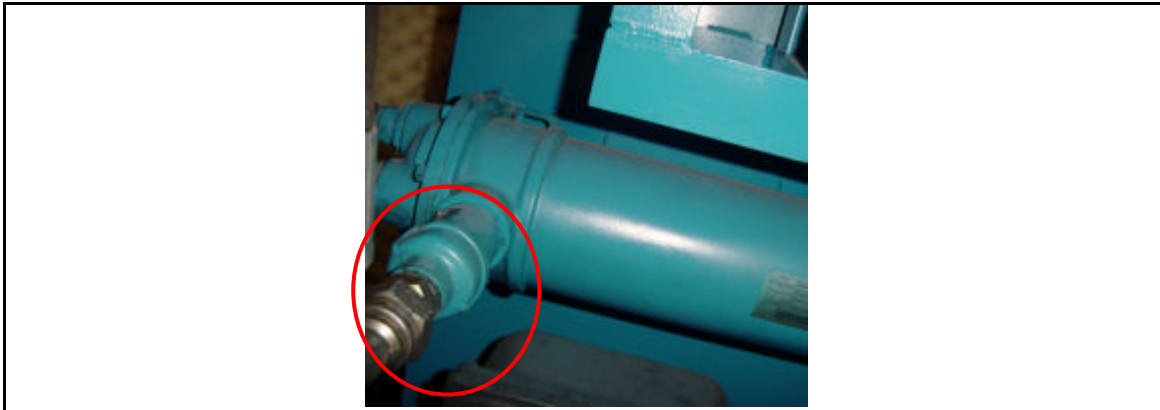


Figura 4.1. Detalle de conexión intercambiador de calor.

- 3) **Problemas con la temperatura de trabajo:** Este problema limitaba el tiempo de uso del equipo haciendo que se elevara de forma desmedida la temperatura del aceite (subiendo aprox. 5°C por cada 7 min. de operación), como dato es importante destacar que la temperatura de trabajo del aceite está entre los 30 y los 60°C , además las recomendaciones del fabricante contemplan una temperatura de trabajo de hasta 60°C para el correcto funcionamiento de los sellos del actuador y de la servo-válvula.

Este problema se resolvió sólo en el último cambio de equipos pues se cambió la configuración del sistema de filtrado (**Figura 3.11**), haciendo que el aceite pasara por el intercambiador antes de filtrarlo (independizando el sistema de enfriamiento del sistema de presión). Permitiendo así, el enfriamiento del flujo de aceite independiente del caudal que pase por la servo-válvula, con esta mejora de diseño se logró mantener un rango de temperatura de uso relativamente constante de 35° a 45°C , y la posibilidad de uso ininterrumpido del equipo durante todo el día.

Además de lo anterior otros cambios importantes de mencionar en relación a este problema son:

- El cambio del modelo de la válvula limitadora de presión (marca **ATOS**) de 2 vías por una marca **ATOS** modelo **DHI-0639/0 23** de 4 vías y tres posiciones **Figura 3.18**, que permite envío de presión al sistema, sólo al energizarla mediante un interruptor adosado al botón de emergencia. Esto regula la cantidad de tiempo que el aceite está con presión y así mismo ayuda a regular su temperatura.
- La incorporación de una termocupla adosada al estanque, que permite supervisar la temperatura del aceite constantemente desde el interior del laboratorio (**Figura 4.2**), sin la necesidad de ir a ver el termómetro del depósito de aceite (**Figura 3.24**), para verificar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento.



Figura 4.2. Visor de temperatura de termocupla.

- El cambio de la capacidad del depósito antes mencionado, también ayuda manteniendo una mayor inercia térmica en el depósito evitando que se caliente rápidamente.

- 4) **Problemas con las vibraciones:** Producto del funcionamiento del equipo (por la presión de trabajo), se producían vibraciones, esto fue resuelto cambiando las tuberías rígidas por mangueras en toda la unidad de potencia. Con esto las vibraciones generadas en la unidad de potencia, y que eran molestas para los otros usuarios del Edificio, fueron disminuidas significativamente.
- 5) **Problemas de ruido :** Sin lugar a dudas fue lo más molesto para los usuarios tanto del Edificio de Ingeniería Civil como para los usuarios de las salas de clases del Edificio de Geología. El problema se presentó en mayor magnitud con la bomba primaria original teniéndose con ésta un ruido muy superior al máximo permitido en la norma Chilena (55 dB). Éste fenómeno se agravaba debido a que la bomba primaria original estaba en malas condiciones. Pero no mejoró mucho con los cambios de bomba primaria. Este problema se resolvió con las recomendaciones de un experto³ en la materia, con estas recomendaciones se diseñó la solución mostrada en la **Figura 4.3**, la cual responde a la necesidad de aislar acústicamente y permitir la suficiente ventilación de la caseta asegurando el correcto funcionamiento de la unidad de potencia y evitando las molestias a los usuarios de ambos Edificios. La instalación real se muestra en la **Figura 4.4**.

³ Gabriel Rodríguez, Ingeniero civil Químico, Profesor de Titular, Universidad de Chile, Especialista en física de la construcción y todo tipo de aislaciones.

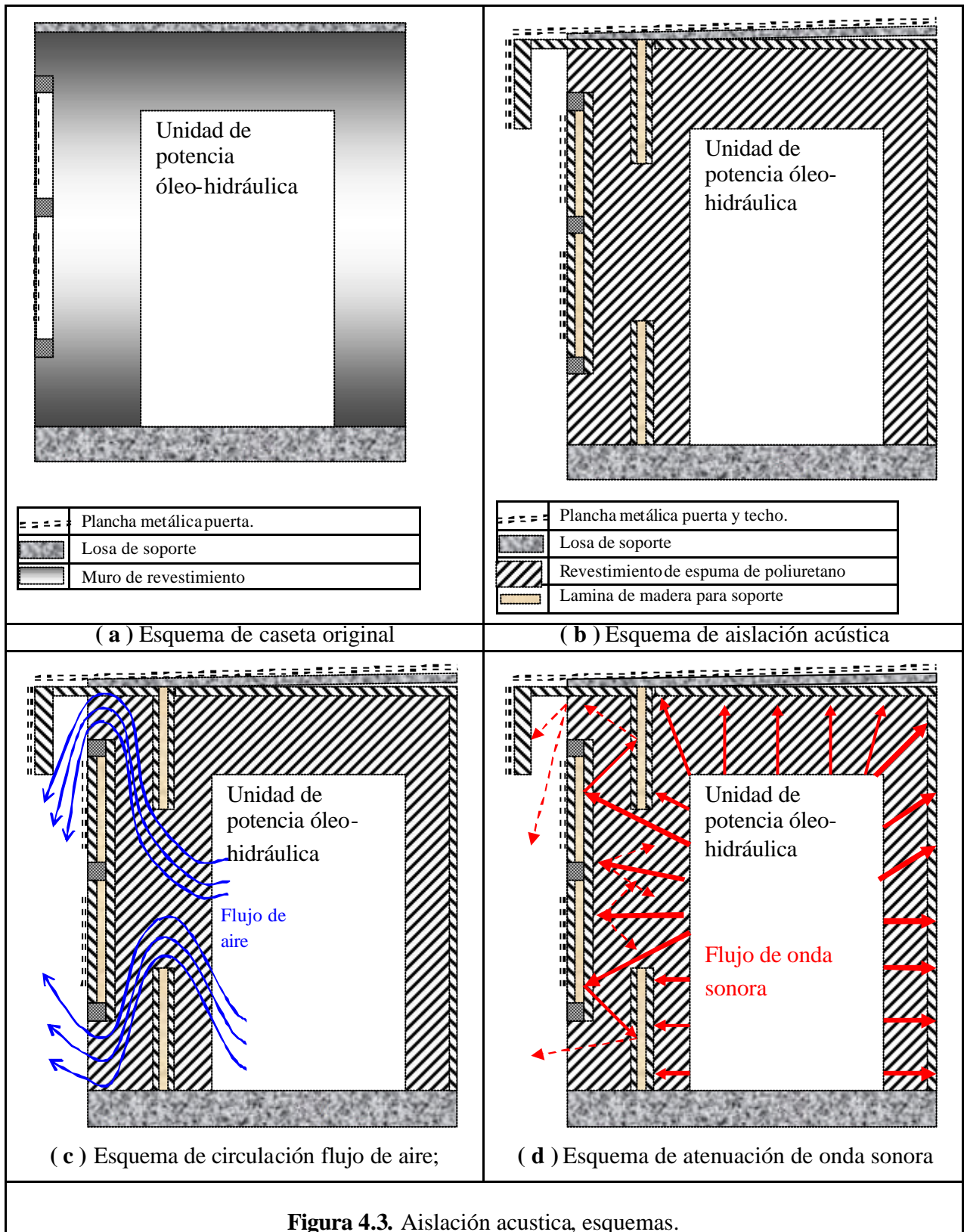
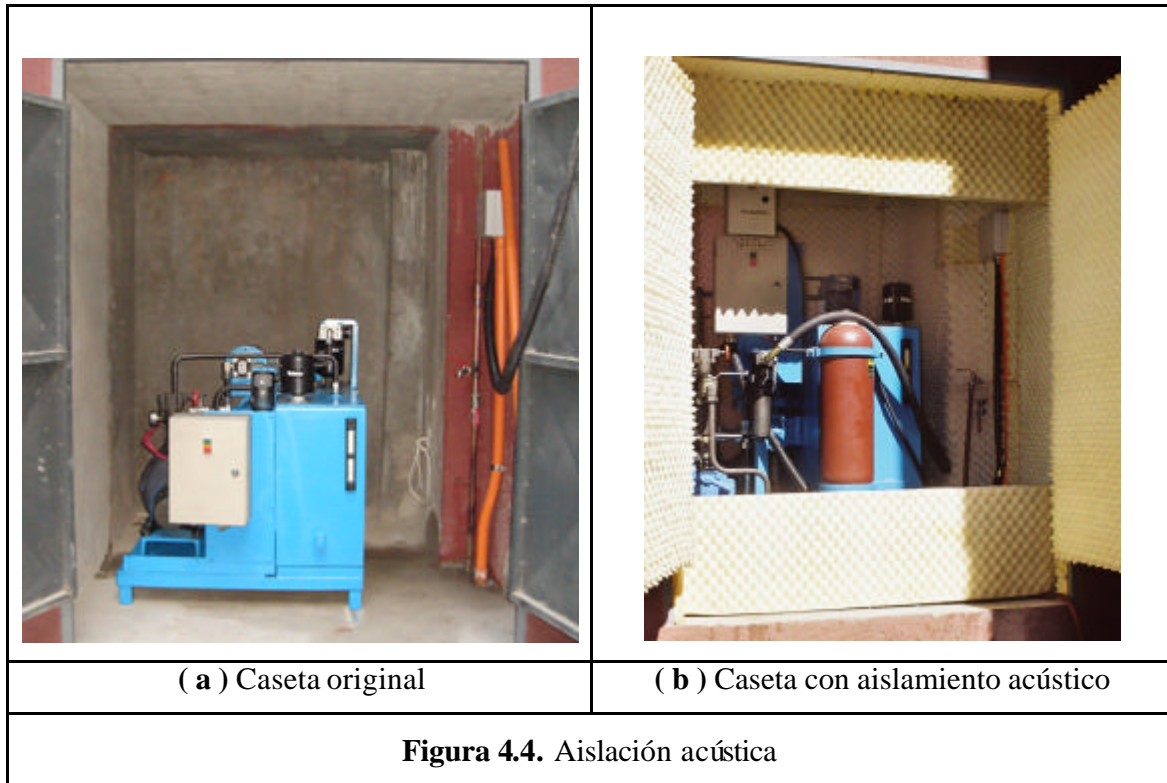


Figura 4.3. Aislación acústica, esquemas.



- 6) **Problemas Eléctricos:** Luego de las primeras pruebas se detectaron problemas con el interruptor automático de la caja eléctrica. Después de un análisis detenido, se detectó que éste no tenía la suficiente capacidad y se cambió la conexión eléctrica instalando un interruptor automático aislado (con mayor capacidad) exclusivo para las necesidades de la unidad de potencia.

4.2.3. Modificaciones de los equipos mecánicos

Después de reiteradas pruebas del sistema, se detectaron problemas en dos partes, el primero en la conexión rótula-mesa, pieza que es crítica para el correcto funcionamiento de la mesa y el segundo en las perforaciones del muro por el cual pasan las mangueras del aceite. El detalle de éstos describe a continuación:

I) Problemas de Conexión: En la conexión rótula-mesa se detecto un golpeteo. Para corregirlos se realizaron 3 modificaciones de diseño:

- Se elimino el hilo de las perforaciones de la placa y se usaron pernos con tuerca para poder hacer el apriete.
- Debido a que la placa de contacto de la mesa fue soldada, esta tiene una convexidad. Para mejorar el contacto entre ambas placas se colocaron 2 laminas de plomo de 1,5 [mm] de espesor entre la placa de la mesa y la placa de la conexión de la rotula. (**Figura 4.5**).

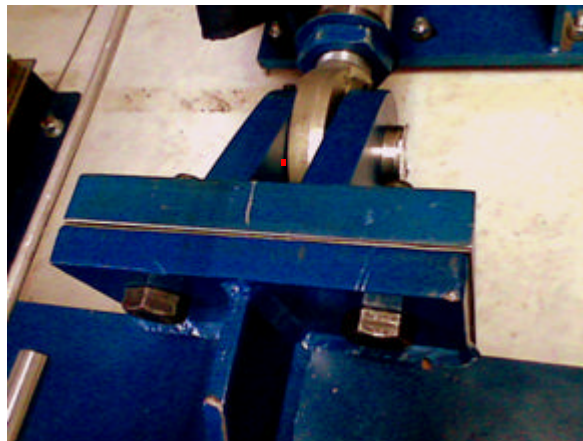
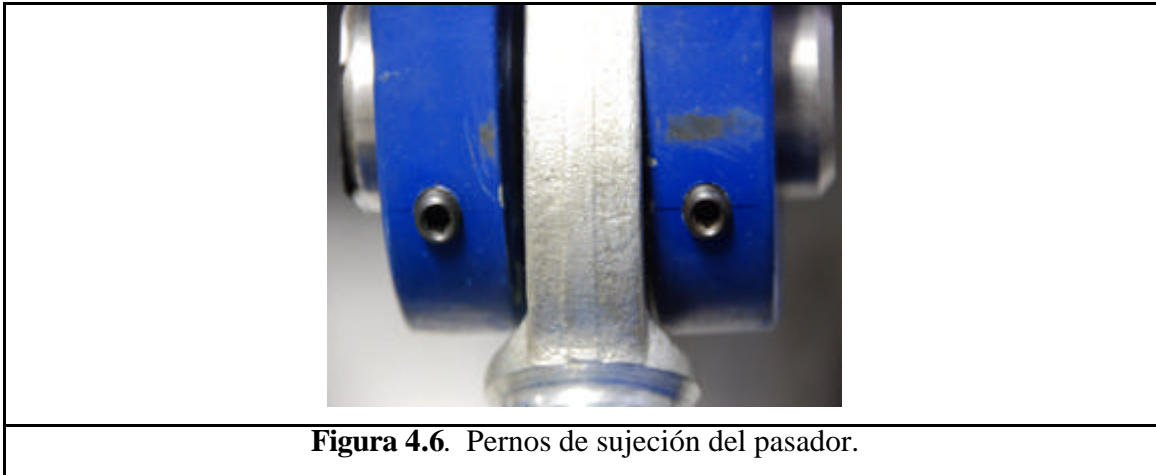


Figura 4.5. Láminas de plomo interplaca.

- El diseño original contemplaba una chaveta para fijar el pasador. Aún con esta chaveta (**Figura 3.10b**) el pasador tenía “*juego*”. Para corregir esto se incorporaron 4 pernos tipo parker con una contratuerca que aseguran al pasador. (**Figura 4.6**).



Con estas modificaciones se logró eliminar el golpeteo que aparecía en los registros de movimiento de la mesa.

- 2) **Problemas de vibraciones:** Se eliminó la transmisión de vibraciones de las mangueras por el contacto con el muro al atravesarlo agregando un sello de poliuretano (*Sika Boom-S*) (**Figura 4.7**).



| |
|--|
| Figura 4.7. Sello de perforaciones de muro. |
|--|

4.2.4. Modificaciones del sistema de control

El sistema de control contempla las partes descritas en la etapa de montaje. De ellas, el modulo LVDT (**Figura 3.31c**), presentó problemas de fábrica por lo que fue cambiado. Aparte de esto, se hicieron unas modificaciones a los parámetros de funcionamiento (**Tabla N° 1-1**). Por último, durante las pruebas se descartó el uso del programa de control **ATS**, pues presentaba problemas para el correcto control de la mesa.

El resto de los ajustes se refieren a modificaciones al programa de control y se describen en el capítulo 5.

4.2.4.1 Definición de rangos reales de operación.

Los rangos de operación de diseño son los mostrados en la **Tabla 3.1**, pero estos fueron concebidos sin considerar las limitaciones reales obtenidas en el montaje. Debido a ello fue necesario hacer modificaciones a los parámetros. El resumen de las modificaciones se muestra en la **Tabla 4.1**. La diferencia en el espectro de tri-logarítmico de operación de la mesa se muestra en la **Figura D.1** el nuevo espectro Tri-logarítmico de la mesa se muestra en la **Figura 4.8**.

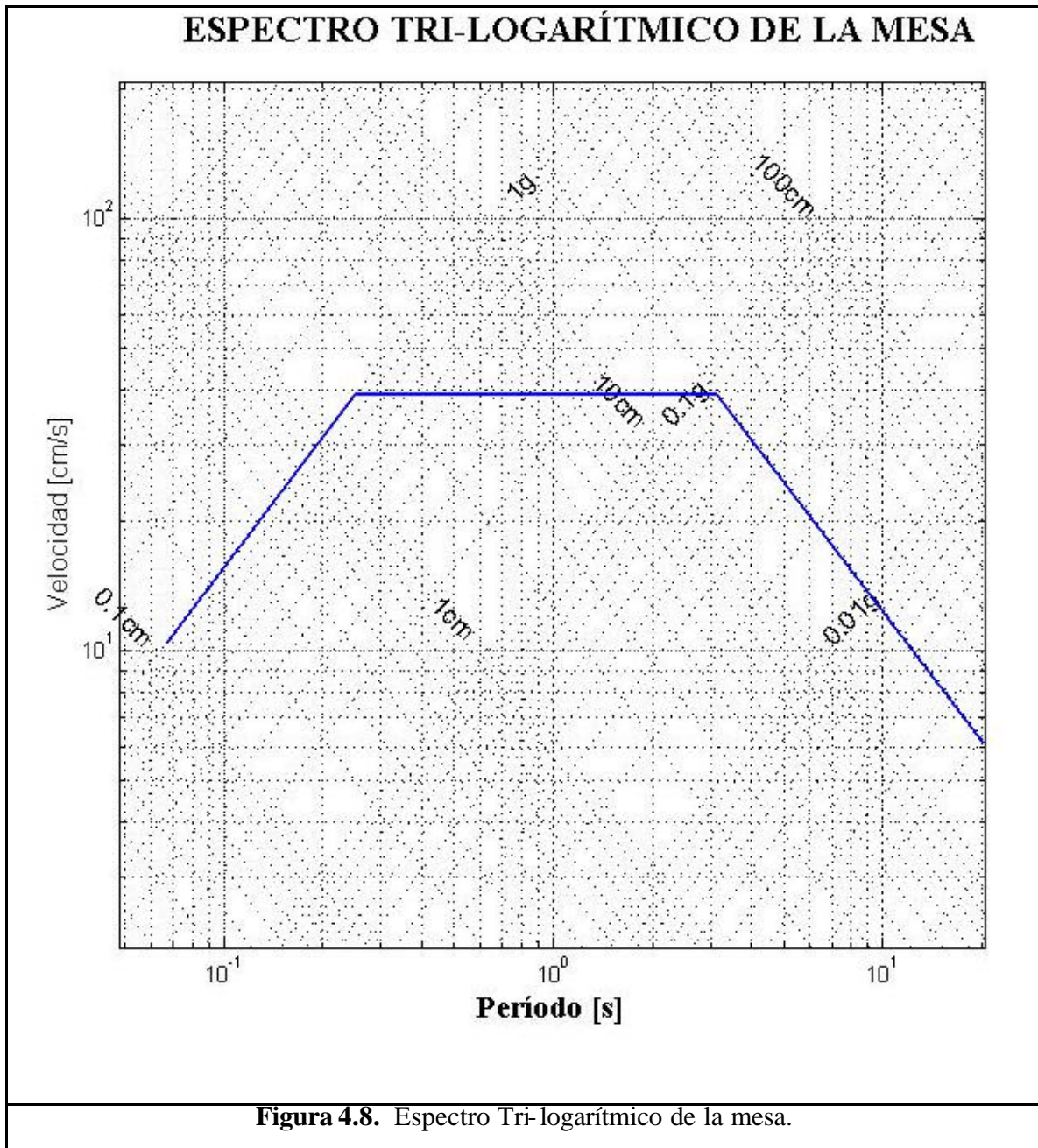
- El primer parámetro a considerar es la velocidad máxima de diseño. Éste depende directamente del caudal y para alcanzar la velocidad del diseño original (60 [cm/s]) es necesario contar con un caudal superior a los 90 [lts/min.] que es un 50 % mayor que el caudal máximo de 63 [lts/min.] $\pm 5\%$ de la bomba. Con esta limitante se obtiene un caudal real de 60 [lts/min.], el que implica una velocidad máxima aprox. 40 [cm/s] (el cálculo de este parámetro se detalla en el **Anexo D**).

- El segundo parámetro que debió ser modificado es el desplazamiento máximo, esto debido a que durante las pruebas preliminares el vástago del actuador golpeó los sellos y, por motivos de seguridad, se decidió limitar el desplazamiento de ± 200 a ± 195 [mm], dejando una holgura de seguridad pues la carga máxima del prototipo considerada es de 3 [Ton] y un golpe a los sellos con esa fuerza podría dañarlos para ello fue necesario modificar el programa de Leiva (2007).
- Por último, para la definición de los rangos reales de operación se debió considerar la aceleración máxima de 1 [g] con la carga máxima de 3 [Ton].

Con estas modificaciones se obtiene la **Tabla 4.1** con los parámetros reales obtenidos después del montaje.

| Tabla 4.1 Parámetros reales de la mesa. | | |
|--|---------------|-----------------|
| Parámetro | Diseño | Reales |
| Peso máximo | 3 [Ton] | 3 [Ton] |
| Desplazamiento máximo | $\pm 0,2$ [m] | $\pm 0,195$ [m] |
| Aceleración máxima | 1,00 [g] | 1,00 [g] |
| Velocidad máxima | $0,6$ [m/s] | $0,4$ [m/s] |
| Frecuencia | 15 [Hz] | 15 [Hz] |

Con estos parámetros más el caudal se calcula el espectro tri-logarítmico de la mesa **Figura 4.8**.



4.2.4.2 Definición del programa de control.

Luego de realizar numerosas pruebas con el programa desarrollado por Leiva (2007), se pudo concluir que éste presentaba algunas falencias. Antes de comenzar a modificar dicho programa se probó un programa de control denominado **ATS**. Luego de varias pruebas, este fue descartado debido a dos falencias graves que presentaba:

- El sistema tenía un algoritmo de control que no efectuaba una transición entre las condiciones iniciales y la condición deseada en forma gradual, generando movimientos súbitos en la mesa. Esto motivó su descarte para el caso de señales sinusoidales, optándose por modificar uno de los programas de Leiva (2007) para lograr transiciones graduales de reposo a movimiento y de movimiento a reposo.
- No era posible ingresar registros arbitrarios de desplazamientos al programa **ATS**.

Luego de estas pruebas, se decidió que la mejor alternativa de control de la mesa era el programa de Leiva, y se comenzó a realizar las mejoras necesarias para que éste funcionara de manera óptima.

4.2.4.3 Cambios del módulo LVDT

Después de realizar pruebas del sistema y al modulo LVDT en forma aislada, se llegó a la conclusión de que el módulo 2 LVDT (**Figura 3.11c**), del sistema de control presentaba problemas de fábrica. El proveedor **MOOG** opto por cambiarlo trayendo uno nuevo desde Australia. Este es el hito con que se da fin a la puesta en marcha y se comienzan a realizar pruebas necesarias para la calibración de la mesa ⁴ .

⁴ *Nota: Con el modulo defectuoso se realizaron varias series de ensayos los resultados se encuentran en el **CD de respaldo** adjunto a este trabajo, de estos se compararan solo los más relevantes (como los ensayos realizados con el registro sísmico de Llolleo 1985).*

CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN.

5.1. Introducción.

Leiva (2007) diseñó los programas de control utilizando el software LabView, con los cuales se envían señales a la mesa de forma adecuada. Estos programas dependen del correcto funcionamiento del módulo LVDT interno (**Figura 3.29**) pues lo toman como referencia para calcular la posición del actuador asumiendo un comportamiento lineal en todo el rango de operación. De estos programas se utilizó el que funciona con control de lazo abierto, pues el programa con control de lazo cerrado utiliza el mismo algoritmo para el envío de señales, y para el correcto funcionamiento de éste se necesitaba primero confirmar el envío y recepción adecuados de las señales.

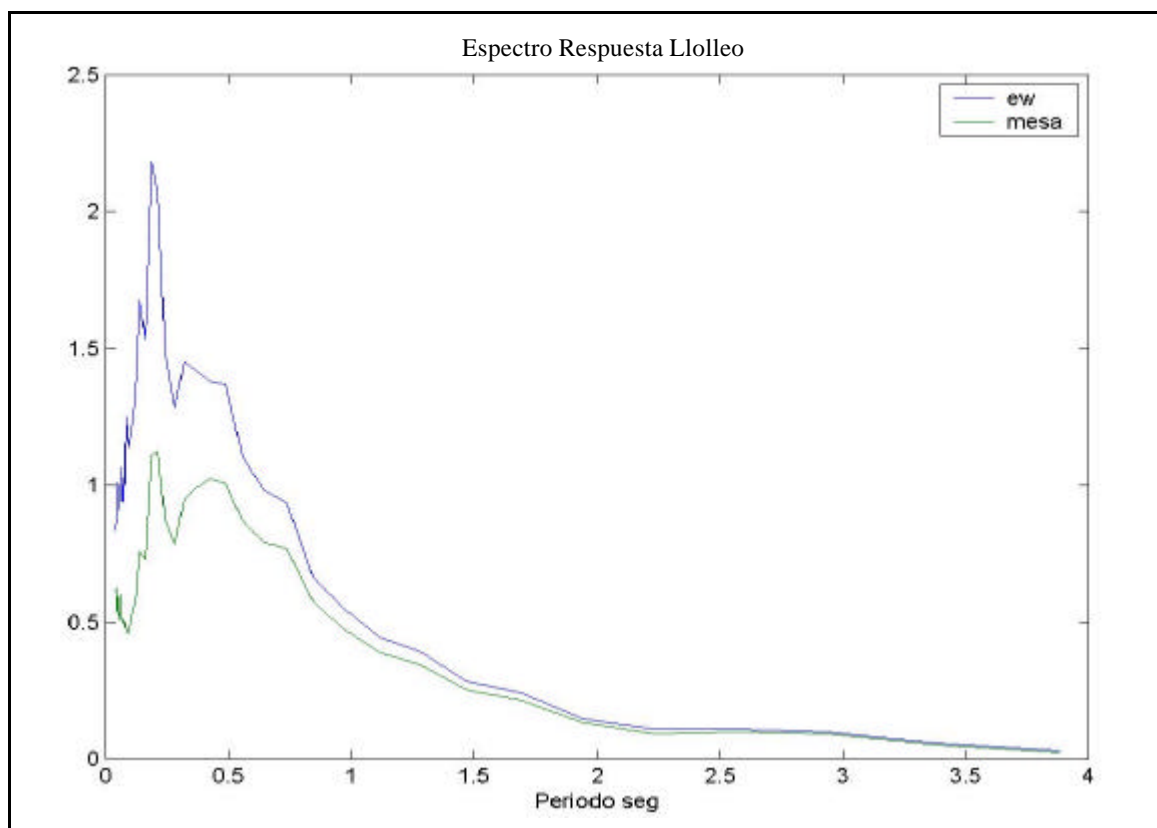


Figura 5.1. Comparación de los espectros de respuesta del registro de Lollo 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro del registro en la mesa sin corrección.

En la **Figura 5.1** se aprecia el espectro de respuesta del registro sísmico de Lollole 1985 y su comparación con lo obtenido de la mesa. Luego del cambio del modulo LVDT del sistema de control, hito que pone fin exitosamente a la puesta en marcha, se obtuvieron los resultados mostrados en la **Figura 5.2**, que son apreciablemente mejores.

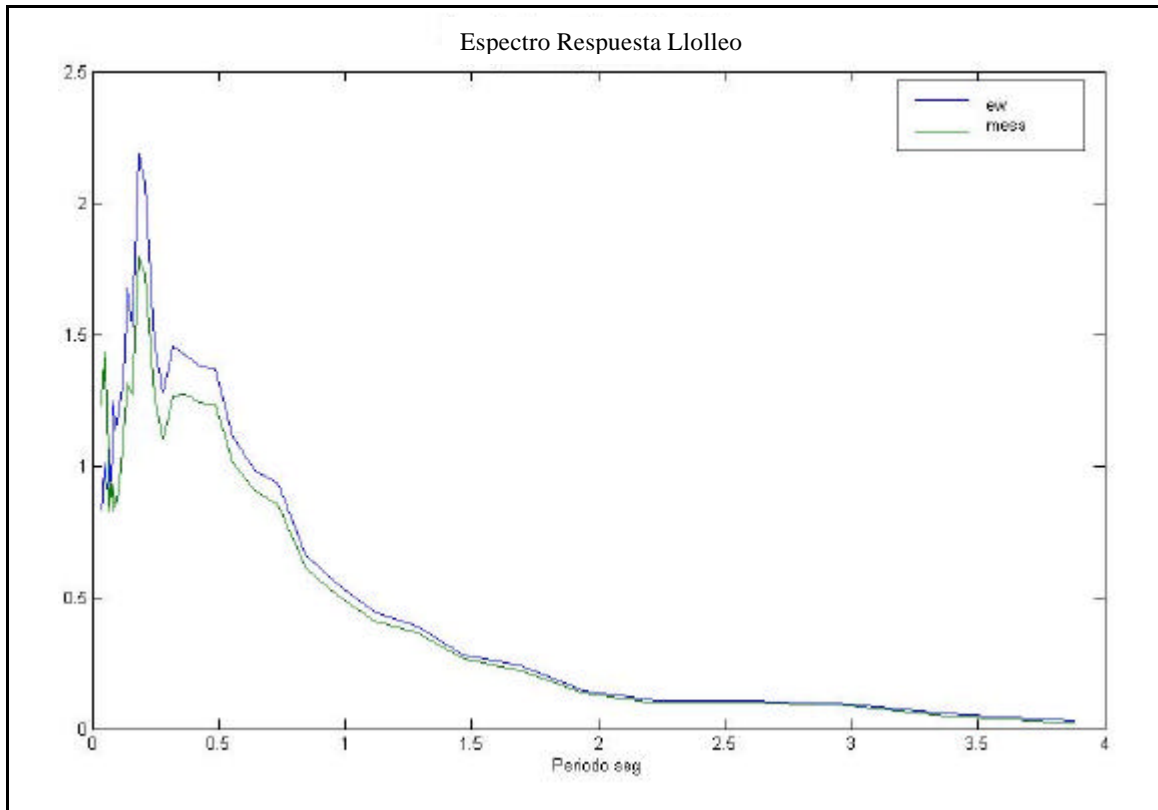


Figura 5.2. Comparación de los espectro de respuesta del registro de Lollole 1985, con 5 % amortiguamiento, y el espectro del registro de la mesa luego del cambio del modulo LVDT.

Este es el punto que da comienzo a la calibración mediante pruebas de calibración estáticas del rango completo de operación, para encontrar así la mejor función que represente el comportamiento del sistema. Estas pruebas contemplan además la calibración de un transductor de posición LVDT externo al sistema que servirá como control.

Una vez encontrada la función que asocia los voltajes enviados con los desplazamientos reales de la mesa, se procedió con las pruebas con señales sinusoidales corregidas para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos en todo el rango de desplazamientos. Luego de estas pruebas, se vió la necesidad de hacer una nueva corrección, esta vez por frecuencia, pues ya había constancia de que los sistemas de control atenúan las señales de altas frecuencias (Caprile (2002), Gómez (1998)). Luego de cada etapa de calibración se realizaron pruebas con el registro sísmico de diseño (Llolleo 1985). Dentro de los resultados obtenidos se muestra la evolución de espectros de respuesta obtenidos y como mejoran éstos con cada etapa de calibración.

5.2. Calibración.

Para calibrar el LVDT interno se instaló un LVDT externo y se hicieron pruebas con un sensor de desplazamiento ultrasónico que ayudó a comprender mejor el comportamiento del LVDT interno en las cercanías del centro de su rango de operación (**Tabla 5.1**). Estas pruebas consistieron en el envío de señales de voltaje, para así comparar las respuesta de estos tres sensores (**Figura 5.3**).

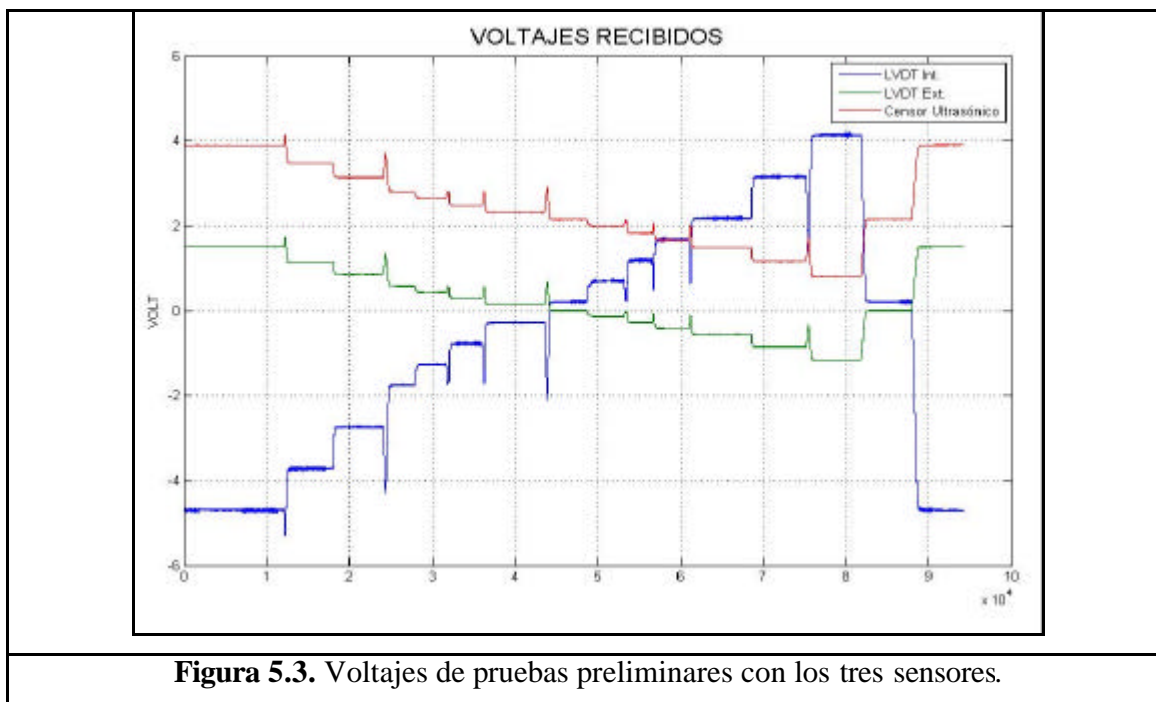


Figura 5.3. Voltajes de pruebas preliminares con los tres sensores.

Tabla 5.1 Prueba preliminar con sensor ultrasónico.

| Voltaje | VOLTAJES RECIBIDOS | | | CENTRADO | | |
|----------|--------------------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Enviado | LVDT int | LVDT ext | Ultrasónico | LVDT | LDVText | Ultrasónico |
| [Volt] | [Volt] | [Volt] | [mm] | [Volt] | [Volt] | [mm] |
| 2.5 | -4.696 | 1.510 | 245.458 | -4.908 | 1.512 | 95.806 |
| 3 | -3.718 | 1.141 | 221.917 | -3.930 | 1.143 | 72.265 |
| 3.5 | -2.736 | 0.859 | 203.772 | -2.948 | 0.861 | 54.120 |
| 4 | -1.753 | 0.581 | 185.830 | -1.965 | 0.583 | 36.177 |
| 4.25 | -1.263 | 0.434 | 176.830 | -1.475 | 0.436 | 27.178 |
| 4.5 | -0.773 | 0.291 | 167.765 | -0.985 | 0.293 | 18.113 |
| 4.75 | -0.280 | 0.147 | 158.696 | -0.492 | 0.149 | 9.044 |
| 5 | 0.212 | -0.002 | 149.652 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5.25 | 0.702 | -0.137 | 140.646 | 0.490 | -0.135 | -9.006 |
| 5.5 | 1.192 | -0.278 | 131.647 | 0.980 | -0.276 | -18.005 |
| 5.75 | 1.682 | -0.424 | 122.589 | 1.471 | -0.422 | -27.063 |
| 6 | 2.177 | -0.560 | 113.396 | 1.966 | -0.558 | -36.257 |
| 6.5 | 3.154 | -0.855 | 95.193 | 2.942 | -0.853 | -54.460 |
| 7 | 4.138 | -1.167 | 75.570 | 3.927 | -1.165 | -74.082 |
| 5 | 0.209 | -0.002 | 149.725 | -0.003 | 0.000 | 0.073 |
| 2.5 | -4.700 | 1.510 | 245.716 | -4.911 | 1.512 | 96.064 |

La **Tabla 5.1** se obtiene del gráfico de la **Figura 5.3** tomando como parámetro la calibración inicial del sensor ultrasónico. Luego, estos datos son centrados restandoles el centro de coordenadas (5 Volt). Graficar se obtienen las funciones, para obtener la calibración lineal de de ambos LVDT (**Figura 5.4**).

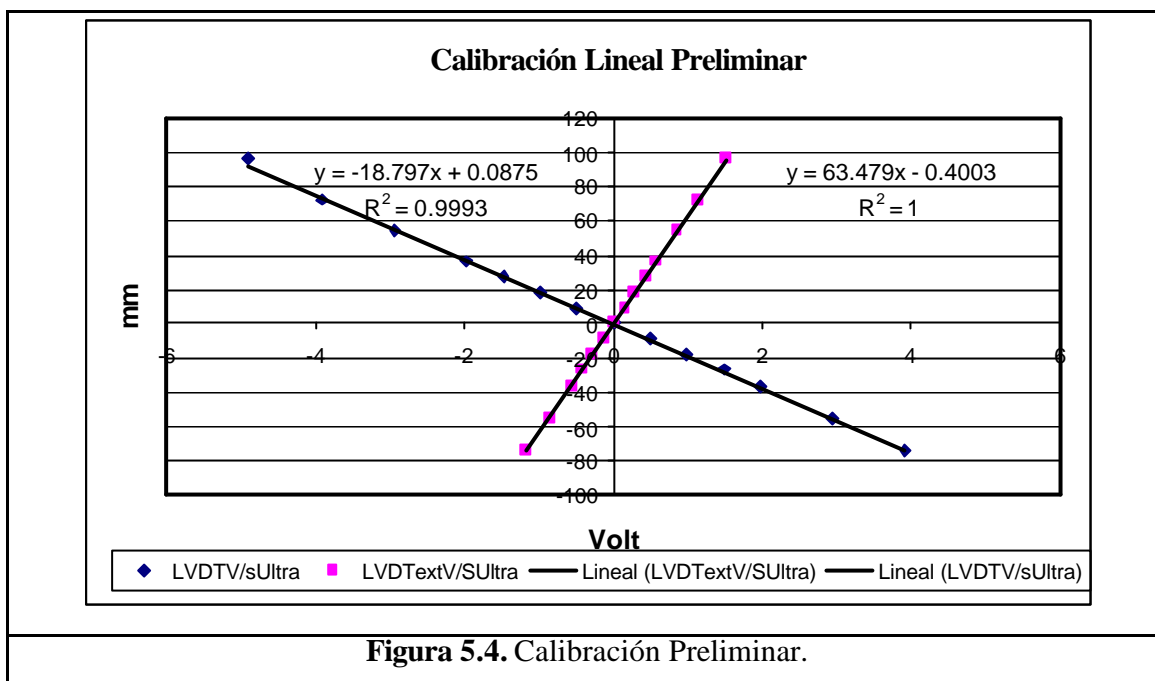


Figura 5.4. Calibración Preliminar.

Con los valores de las regresiones lineales se obtiene los valores calibrados y, además, los errores de cada medida mostrados en la **Tabla 5.2**. El resultado de la calibración preliminar se muestra **Figura 5.5**.

Tabla 5.2. Valores Calibrados con regresión lineal y errores Porcentuales.

| Referencia | CALIBRADO | | ERROR | |
|------------|-------------------|------------------|-----------|---------------|
| | LVDT int. [mm] | LVDTText [mm] | LVDT % | LVDTText % |
| 95.806 | 92.3394 | 95.5482 | -3.62% | -0.27% |
| 72.265 | 73.9578 | 72.1245 | 2.34% | -0.19% |
| 54.120 | 55.4992 | 54.2234 | 2.55% | 0.19% |
| 36.177 | 37.0255 | 36.5826 | 2.34% | 1.12% |
| 27.178 | 27.8074 | 27.2829 | 2.32% | 0.39% |
| 18.113 | 18.6025 | 18.1800 | 2.70% | 0.37% |
| 9.044 | 9.3300 | 9.0581 | 3.16% | 0.16% |
| 0.000 | 0.0875 | -0.4003 | null | 0.00% |
| -9.006 | -9.1249 | -8.9700 | 1.31% | -0.41% |
| -18.005 | -18.3411 | -17.9015 | 1.87% | -0.58% |
| -27.063 | -27.5535 | -27.1694 | 1.81% | 0.39% |
| -36.257 | -36.8599 | -35.8343 | 1.66% | -1.16% |
| -54.460 | -55.2208 | -54.5479 | 1.40% | 0.16% |
| -74.082 | -73.7189 | -74.3470 | -0.49% | 0.36% |
| 0.073 | 0.1439 | -0.3876 | 98.20% | -633.89% |
| 96.064 | 92.4071 | 95.5609 | -3.81% | -0.52% |

El error de la **Tabla 5.2** se calculó como

$$e(c) = \frac{V_{ref} - V_c}{V_{ref}} \cdot 100$$

Donde,

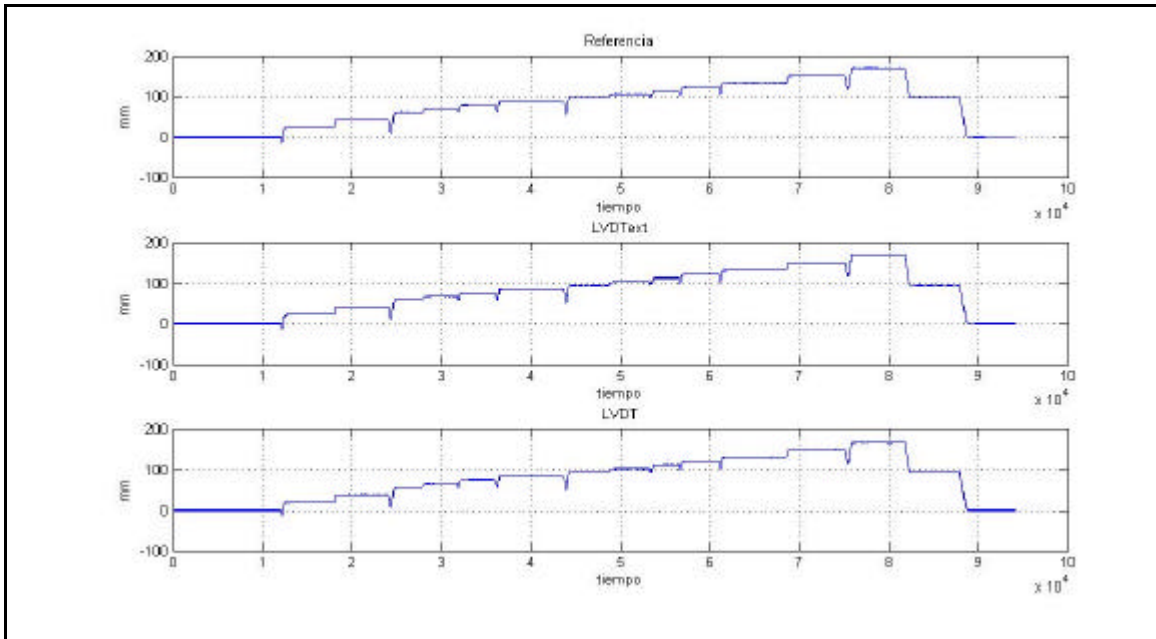
e (c) : error del valor calibrado.

V_{ref} : Valor obtenido del LVDT de referencia.

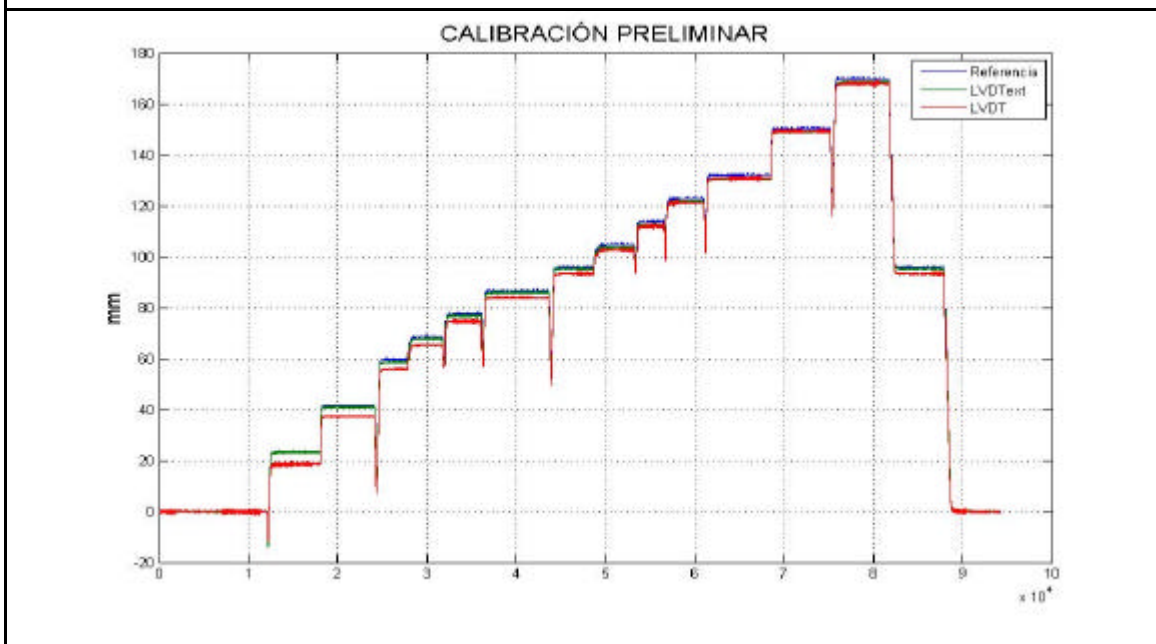
V_c : Valor obtenido de la calibración con la calibración correspondiente.

En la **Figura 5.4** se puede apreciar claramente que los resultados del LVDT interno presentan mucho más error que el del LVDT externo y con esto se comprueba además que es posible usar este último como referencia para calibrar el LVDT interno.

Se concluye de la **Tabla 5.2** es que el error del LVDT no es lineal.



(a) Resultado de calibración preliminar.



(b) Comparación de los tres sensores.

Figura 5.5. Comparación de resultados preliminares de calibración.

Con esta calibración inicial se realizaron nuevos ensayos estáticos (**Figura 5.6**) y también con el registro sísmico de Lolloe 1985, y se pudo comprobar que con una calibración correcta la reproducción de éste mejoraba. En la **Figura 5.6** se puede apreciar la comparación de los registros de desplazamientos obtenidos con la mesa (solo con una calibración lineal).

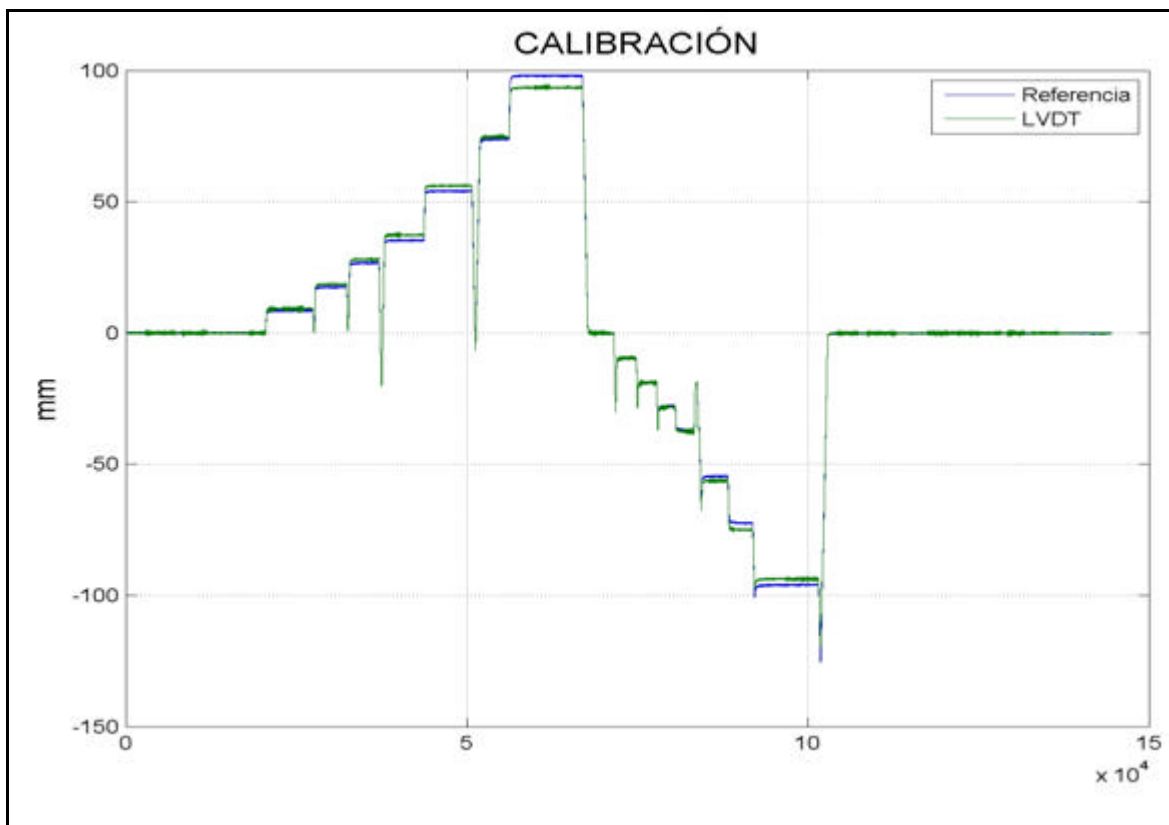


Figura 5.6. Comparación de desplazamientos luego de una calibración Lineal.

De la **Figura 5.6** se obtiene la **Tabla 5.3** tomando el promedio de cada escalón. Luego, graficando estos promedios con los voltajes enviados es posible apreciar claramente que el LVDT interno se comporta no-linealmente. ()

Tabla 5.3. Escalones de calibración.

| Señal de entrada [Volt] | Referencia [mm] | LVDT [mm] | Despl. Teórico [mm] |
|-------------------------|-----------------|-----------|---------------------|
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0 |
| 4.75 | 8.5 | 9.3 | 10 |
| 4.5 | 17.5 | 18.6 | 20 |
| 4.25 | 26.7 | 28.0 | 30 |
| 4 | 54.1 | 56.1 | 40 |
| 3.5 | 64.0 | 65.3 | 60 |
| 3 | 73.8 | 74.6 | 80 |
| 2.5 | 98.0 | 93.5 | 100 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0 |
| 5.25 | -9.6 | -9.6 | -10 |
| 5.5 | -18.8 | -18.8 | -20 |
| 5.75 | -27.9 | -28.2 | -30 |
| 6 | -36.9 | -37.6 | -40 |
| 6.5 | -54.6 | -56.4 | -60 |
| 7 | -72.5 | -75.0 | -80 |
| 7.5 | -96.1 | -93.7 | -100 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 0 |

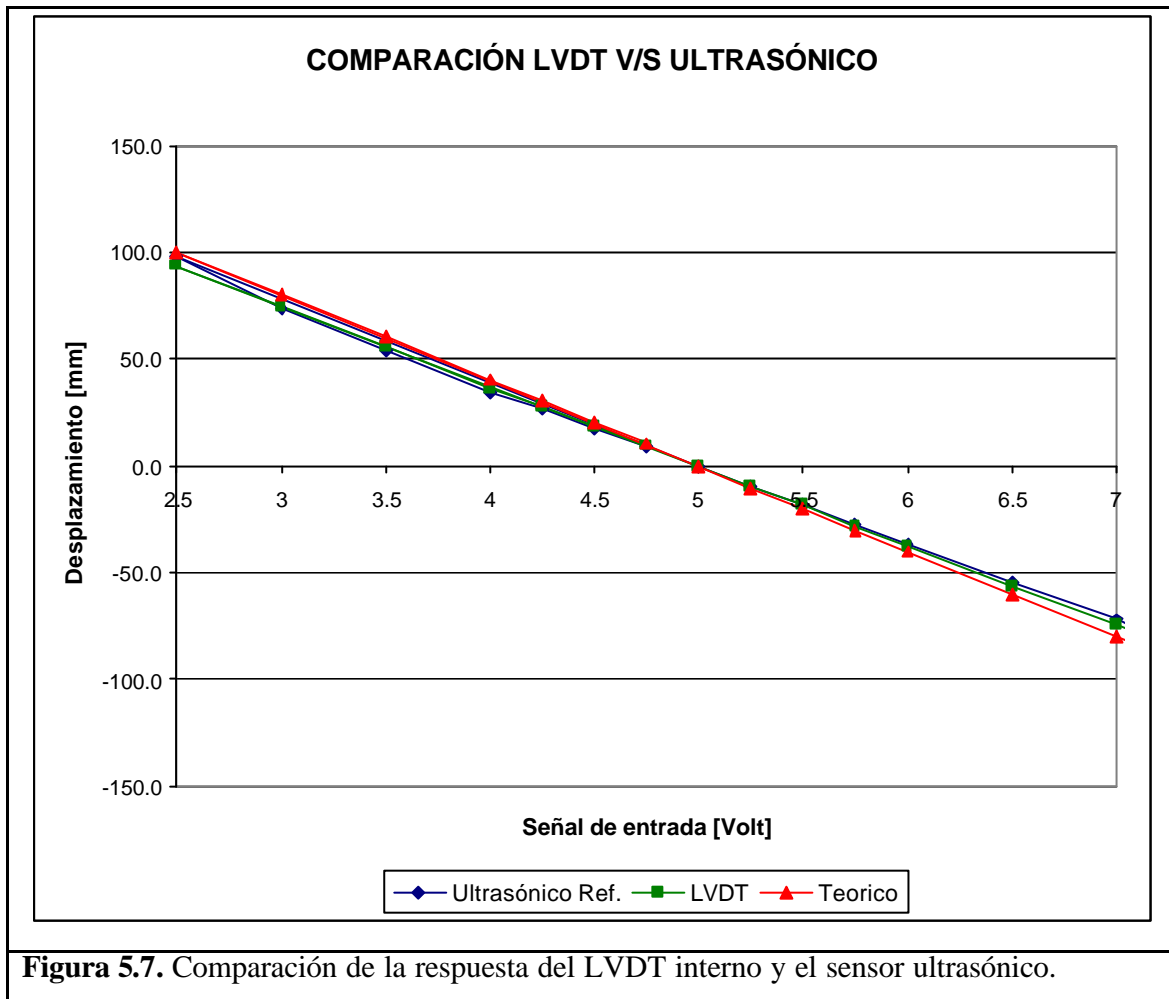


Figura 5.7. Comparación de la respuesta del LVDT interno y el sensor ultrasónico.

Luego, de las pruebas de la puesta en marcha, se comprueba que el LVDT interno *no* tiene un comportamiento lineal en todo su rango de funcionamiento, detectándose problemas en las cercanías del centro del rango. Para lograr la correcta calibración de este equipo, se hicieron pruebas estáticas barriendo el rango total de operación, enviando señales de voltaje en vez de utilizar el programa de Leiva (2007). Esto debido a la necesidad de una medida que pudiese ser repetible y un rango de comparación independiente de las modificaciones que se le hicieran a dicho programa. Estas pruebas se realizaron con el equipo sin presión de trabajo (se demostró también que esto es irrelevante en pruebas de este tipo). Los voltajes enviados en estas pruebas y sus resultados se muestran en la **Tabla 5.4**.

Tabla 5.4. Voltajes enviados en pruebas estáticas y resultados.

| | Voltaje | Voltaje recibido | | Centrado | |
|--|----------|------------------|---------------|----------|----------|
| | Enviado | LVDT int | LVDT ext | LVDT | LDVText |
| | [Volt] | [Volt] | [Volt] | [Volt] | [Volt] |
| | 5 | 0.1568 | 0.0138 | -0.0345 | 0.0092 |
| | 2.5 | -4.726 | 1.5234 | -4.9173 | 1.5188 |
| | 0 | -9.6355 | 3.134 | -9.8268 | 3.1294 |
| | 0.5 | -8.6592 | 2.8223 | -8.8505 | 2.8177 |
| | 1 | -7.6738 | 2.509 | -7.8651 | 2.5044 |
| | 1.5 | -6.6949 | 2.1869 | -6.8862 | 2.1823 |
| | 2 | -5.6999 | 1.8689 | -5.8912 | 1.8643 |
| | 2.5 | -4.7257 | 1.5219 | -4.917 | 1.5173 |
| | | | | | |
| | 3 | -3.7421 | 1.1497 | -3.9334 | 1.1451 |
| | 3.5 | -2.7594 | 0.8632 | -2.9507 | 0.8586 |
| | 4 | -1.7746 | 0.5864 | -1.9659 | 0.5818 |
| | 4.5 | -0.7924 | 0.298 | -0.9837 | 0.2934 |
| | 5 | 0.1913 | 0.0046 | 0 | 0 |
| | 5.5 | 1.1716 | -0.2708 | 0.9803 | -0.2754 |
| | 6 | 2.1541 | -0.5509 | 1.9628 | -0.5555 |
| | 6.5 | 3.1382 | -0.8477 | 2.9469 | -0.8523 |
| | 7 | 4.1205 | -1.1595 | 3.9292 | -1.1641 |
| | | | | | |
| | 7.5 | 5.1012 | -1.5392 | 4.9099 | -1.5438 |
| | 8 | 6.0851 | -1.8566 | 5.8938 | -1.8612 |
| | 8.5 | 7.0717 | -2.1717 | 6.8804 | -2.1763 |
| | 9 | 8.0544 | -2.4899 | 7.8631 | -2.4945 |
| | 9.5 | 9.0383 | -2.7958 | 8.847 | -2.8004 |
| | 10 | 9.9993 | -3.109 | 9.808 | -3.1136 |
| | 5 | 0.1869 | 0.0056 | -0.0044 | 0.001 |

Los resultados preliminares de las pruebas de rango completo mostrados en la **Tabla 5.4** fueron centrados restándoles el valor correspondiente a los 5 Volt. De aquí se obtuvo el gráfico tri-lineal de la **Figura 5.9** (los espacios en blanco de la **Tabla 5.4**, son los puntos de separación entre las rectas) y con estas curvas se obtuvieron nuevos resultados, que si bien presentaban errores menores que los obtenidos con la calibración inicial (lo que demostraba que la metodología es la adecuada), aún no eran suficientemente correctos, pues aún eran de orden milimétrico (demasiado grandes, para la correcta reproducción de los registros, pues se necesitan errores de un orden menor).

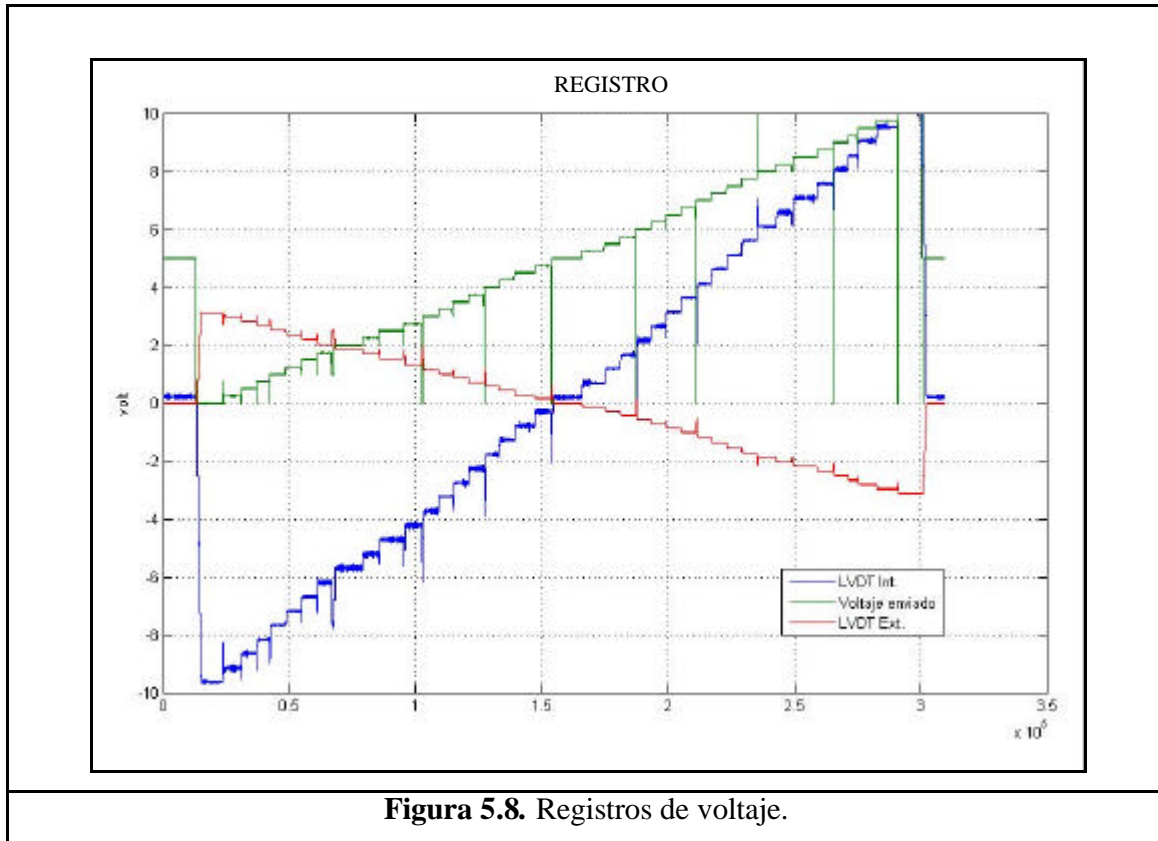


Figura 5.8. Registros de voltaje.

De estos datos se obtienen, como se muestra en la **Figura 5.9**, tres líneas con las que se probó nuevamente la calibración mostrada en las **Figura 5.10** y **Figura 5.11**. Además, en busca de la función óptima, fueron probadas distintas curvas polinómicas de 3° y 5° grado. Con las que se calculó nuevamente el error porcentual con respecto a la referencia del LVDT externo. Estos cálculos se muestran en la **Tabla 5.5** y **Tabla 5.6**.

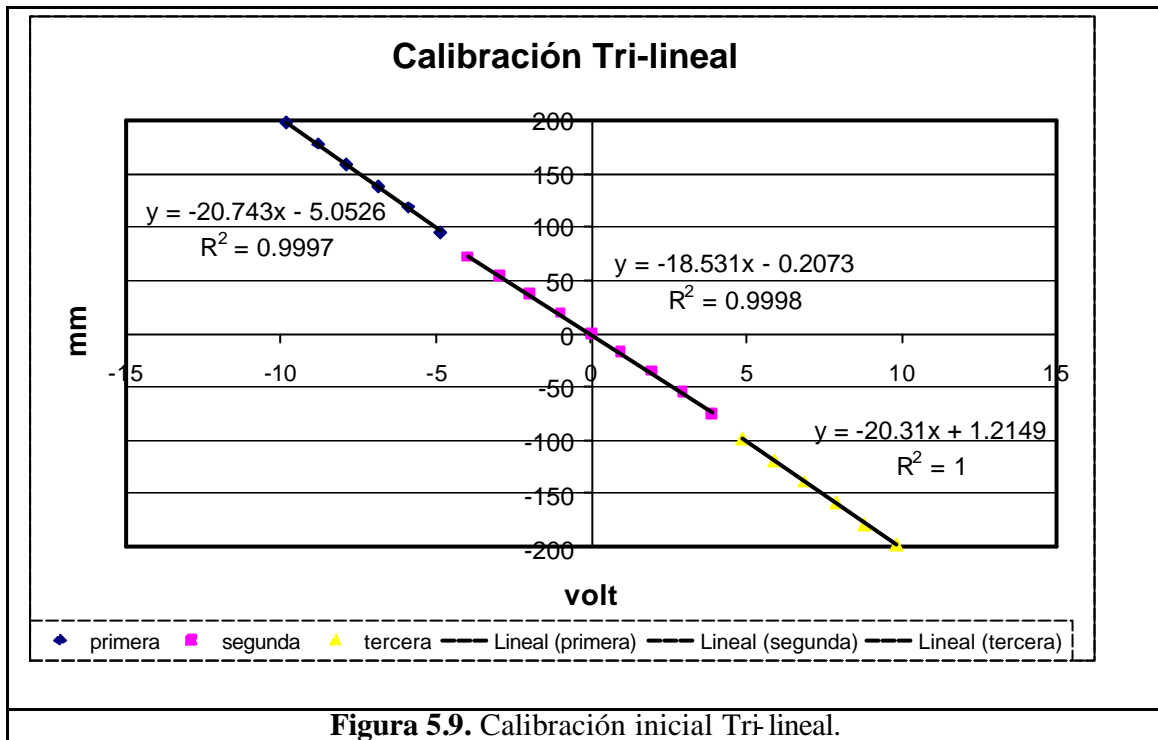


Figura 5.9. Calibración inicial Tri-lineal.

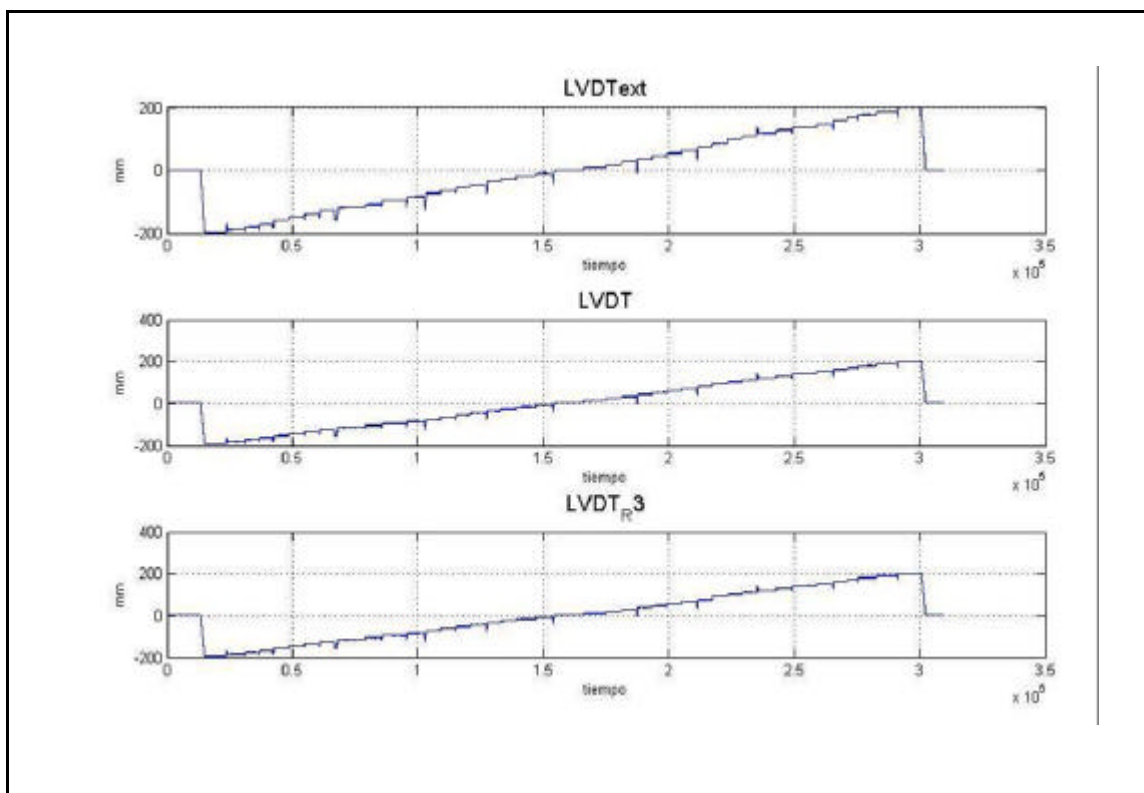


Figura 5.10. Calibración lineal y Tri-lineal.

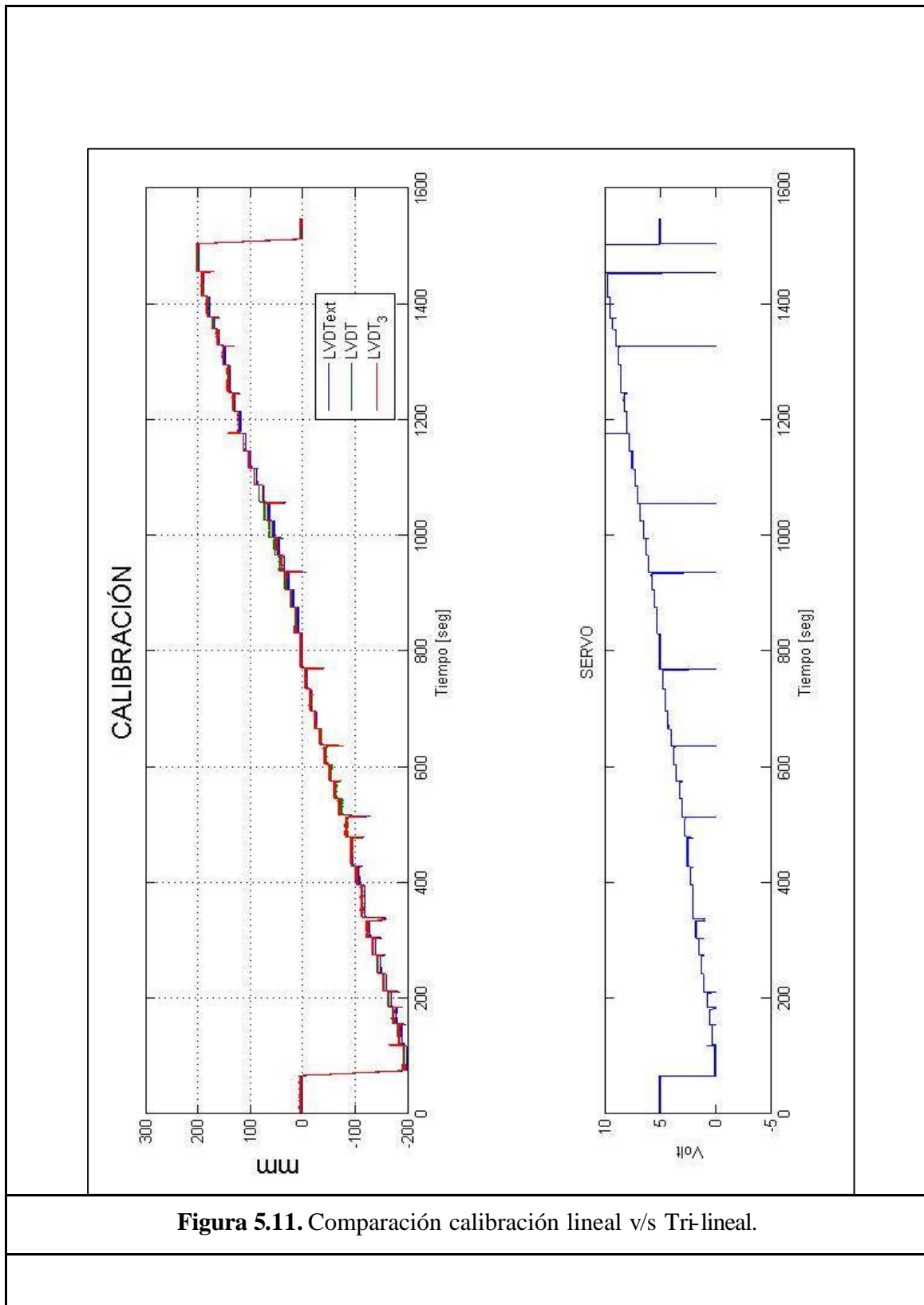


Figura 5.11. Comparación calibración lineal v/s Tri-lineal.

Tabla 5.5. Resultados de calibración de rango completo con distintas curvas.

| CALIBRADO | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|------------|------------------------|------------------------|
| Voltaje | LVDT | LVDT | LVDT | LVDT | LVDT |
| Enviado | Ext. Ref. | Lineal | Tri-lineal | Pol. Cubico | Pol. Quinto |
| [Volt] | [mm] | [mm] | [mm] | R ² =0.9997 | R ² =0.9999 |
| 5 | 0.1837 | 0.3165 | 0.3165 | 0.2977 | 0.4397 |
| 2.5 | 96.0116 | 97.9042 | 97.9042 | 95.9313 | 95.1529 |
| 0 | 198.2509 | 196.0254 | 198.8830 | 199.9523 | 195.0481 |
| 0.5 | 178.4645 | 176.5131 | 178.6218 | 178.2695 | 177.9675 |
| 1 | 158.5765 | 156.8189 | 158.1718 | 156.9488 | 158.2414 |
| 1.5 | 138.1299 | 137.2546 | 137.8567 | 136.2682 | 137.4170 |
| 2 | 117.9436 | 117.3685 | 117.2075 | 115.6943 | 115.9196 |
| 2.5 | 95.9164 | 97.8982 | 96.9899 | 95.9252 | 95.1466 |
| 3 | 72.2895 | 78.2399 | 72.6825 | 76.2797 | 74.7908 |
| 3.5 | 54.1028 | 58.5997 | 54.6497 | 56.9055 | 55.1993 |
| 4 | 36.5318 | 38.9175 | 36.4004 | 37.6817 | 36.2685 |
| 4.5 | 18.2244 | 19.2872 | 18.1992 | 18.6377 | 17.9155 |
| 5 | -0.4003 | -0.3730 | -0.0297 | -0.3684 | -0.1941 |
| 5.5 | -17.8824 | -19.9653 | -18.1957 | -19.3039 | -18.2656 |
| 6 | -35.6629 | -39.6015 | -36.4024 | -38.3389 | -36.6931 |
| 6.5 | -54.5035 | -59.2697 | -54.6387 | -57.5244 | -55.7105 |
| 7 | -74.2962 | -78.9020 | -72.8417 | -76.8560 | -75.4028 |
| 7.5 | -98.3992 | -98.5023 | -98.5052 | -96.3986 | -95.7845 |
| 8 | -118.5474 | -118.1665 | -118.4882 | -116.3106 | -116.7913 |
| 8.5 | -138.5496 | -137.8847 | -138.5260 | -136.6471 | -138.0240 |
| 9 | -158.7487 | -157.5249 | -158.4847 | -157.3337 | -158.6788 |
| 9.5 | -178.1669 | -177.1891 | -178.4677 | -178.5383 | -177.8894 |
| 10 | -198.0485 | -196.3957 | -197.9856 | -199.7849 | -193.9588 |
| 5 | -0.3368 | -0.2851 | 1.3043 | -0.2834 | -0.1133 |

De la **Tabla 5.5** se debe destacar que el **R²**, de las curvas polinómicas tanto cúbica como de quinto grado, es mucho más cercano a **1** que el obtenido con la curva lineal y con la curva Tri-lineal. Esto sienta un precedente para el resto del trabajo de calibración pues ya se demostró que el **LVDT** interno tiene un comportamiento no-lineal, luego, se debe encontrar cual es efectivamente la o las curvas que representan mejor el funcionamiento del **LVDT**.

Tabla 5.6. Cálculo del error obtenido de la calibración de rango completo.

| Voltaje Enviado [Volt] | ERROR % | | | |
|------------------------------|---------|------------|-------------|-------------|
| | LVDT | LVDT | LVDT | LVDT |
| | Lineal | Tri-Lineal | Pol- Cubico | Pol. Quinto |
| 5.0 | 72.29% | 72.29% | 62.07% | 139.34% |
| 2.5 | 1.97% | 1.97% | -0.08% | -0.89% |
| 0.0 | -1.12% | 0.32% | 0.86% | -1.62% |
| 0.5 | -1.09% | 0.09% | -0.11% | -0.28% |
| 1.0 | -1.11% | -0.26% | -1.03% | -0.21% |
| 1.5 | -0.63% | -0.20% | -1.35% | -0.52% |
| 2.0 | -0.49% | -0.62% | -1.91% | -1.72% |
| 2.5 | 2.07% | 1.12% | 0.01% | -0.80% |
| 3.0 | 8.23% | 0.54% | 5.52% | 3.46% |
| 3.5 | 8.31% | 1.01% | 5.18% | 2.03% |
| 4.0 | 6.53% | -0.36% | 3.15% | -0.72% |
| 4.5 | 5.83% | -0.14% | 2.27% | -1.70% |
| 5.0 | -6.82% | -92.57% | -7.97% | -51.51% |
| 5.5 | 11.65% | 1.75% | 7.95% | 2.14% |
| 6.0 | 11.04% | 2.07% | 7.50% | 2.89% |
| 6.5 | 8.74% | 0.25% | 5.54% | 2.21% |
| 7.0 | 6.20% | -1.96% | 3.45% | 1.49% |
| 7.5 | 0.10% | 0.11% | -2.03% | -2.66% |
| 8.0 | -0.32% | -0.05% | -1.89% | -1.48% |
| 8.5 | -0.48% | -0.02% | -1.37% | -0.38% |
| 9.0 | -0.77% | -0.17% | -0.89% | -0.04% |
| 9.5 | -0.55% | 0.17% | 0.21% | -0.16% |
| 10.0 | -0.83% | -0.03% | 0.88% | -2.06% |
| 5.0 | -15.37% | -487.23% | -15.85% | -66.37% |

De los valores observados en la **Tabla 5.6**, se deben descartar los valores asociados a los **5,0** [Volt], pues estos valores son obtenidos dividiendo por un valor muy pequeño (*cercano a cero*). Es por este motivo que se salen de rango.

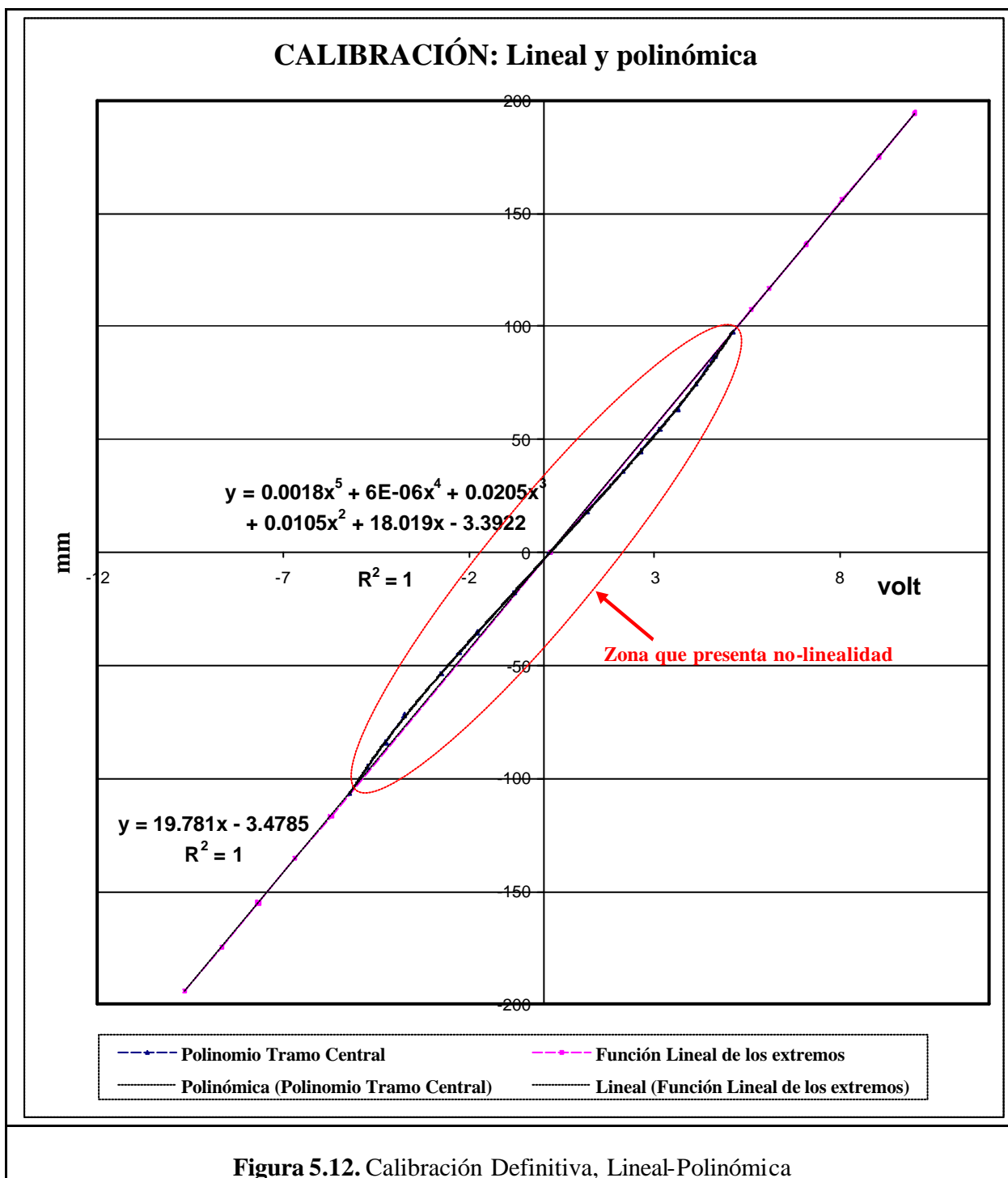
Junto con lo anterior, es importante destacar que se confirma lo concluido con los datos de la **Tabla 5.5**, pues se aprecia que el error porcentual es mucho menor con las curvas polinómicas que con la lineal o la Tri-lineal.

Después de un análisis de los datos se consiguió detectar y aislar efectivamente el sector que presentaba problemas (entre 2 y 4 [Volt] y entre 6 y 8 [Volt]), luego los voltajes enviados previamente **Tabla 5.4** fueron modificados con el fin de detallar más en estos sectores. Se utilizaron los nuevos valores de la **Tabla 5.7**.

Tabla 5.7 Voltajes modificados enviados en pruebas estáticas y resultados.

| Voltaje Enviado [Volt] | Medida Referencia [cm] | Referencia Centrada [mm] | Volt. Int. Recibidos [Volt] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 5.00 | 30.00 | 0.00 | 0.2038 |
| 0.00 | 49.40 | 19.40 | -9.6321 |
| 0.50 | 47.45 | 17.45 | -8.6478 |
| 1.00 | 45.50 | 15.50 | -7.6643 |
| 1.50 | 43.60 | 13.60 | -6.6849 |
| 2.00 | 41.65 | 11.65 | -5.7025 |
| 2.25 | 40.65 | 10.65 | -5.2112 |
| 2.50 | 39.55 | 9.55 | -4.7181 |
| 2.75 | 38.35 | 8.35 | -4.2271 |
| 3.00 | 37.25 | 7.25 | -3.7356 |
| 3.25 | 36.25 | 6.25 | -3.241 |
| 3.50 | 35.40 | 5.40 | -2.7509 |
| 3.75 | 34.50 | 4.50 | -2.2629 |
| 4.00 | 33.60 | 3.60 | -1.7718 |
| 4.50 | 31.80 | 1.80 | -0.7901 |
| 5.00 | 30.00 | 0.00 | 0.1883 |
| 5.50 | 28.20 | -1.80 | 1.1702 |
| 6.00 | 26.45 | -3.55 | 2.1548 |
| 6.25 | 25.55 | -4.45 | 2.6463 |
| 6.50 | 24.60 | -5.40 | 3.1376 |
| 6.75 | 23.65 | -6.35 | 3.6281 |
| 7.00 | 22.55 | -7.45 | 4.12 |
| 7.25 | 21.35 | -8.65 | 4.611 |
| 7.50 | 20.25 | -9.75 | 5.104 |
| 7.75 | 19.25 | -10.75 | 5.5953 |
| 8.00 | 18.40 | -11.60 | 6.0858 |
| 8.50 | 16.35 | -13.65 | 7.0689 |
| 9.00 | 14.45 | -15.55 | 8.0533 |
| 9.50 | 12.50 | -17.50 | 9.0345 |
| 10.00 | 10.55 | -19.45 | 9.9998 |
| 5.00 | 30.00 | 0.00 | 0.1904 |

Los resultados de estas pruebas definitivas se muestran en la **Tabla 5.8**. La curva de calibración del LVDT es efectivamente lineal, pero presenta problemas en las cercanías de cero. Después del procesamiento de los datos, se definió con exactitud el rango (*límites definidos numéricamente*) y la curva que mejor representa este sector es un polinomio de quinto grado **Figura 5.12** y **Figura 5.13**, obteniéndose con éstas un factor de correlación $R^2 = 1$ para todo el rango de operación.



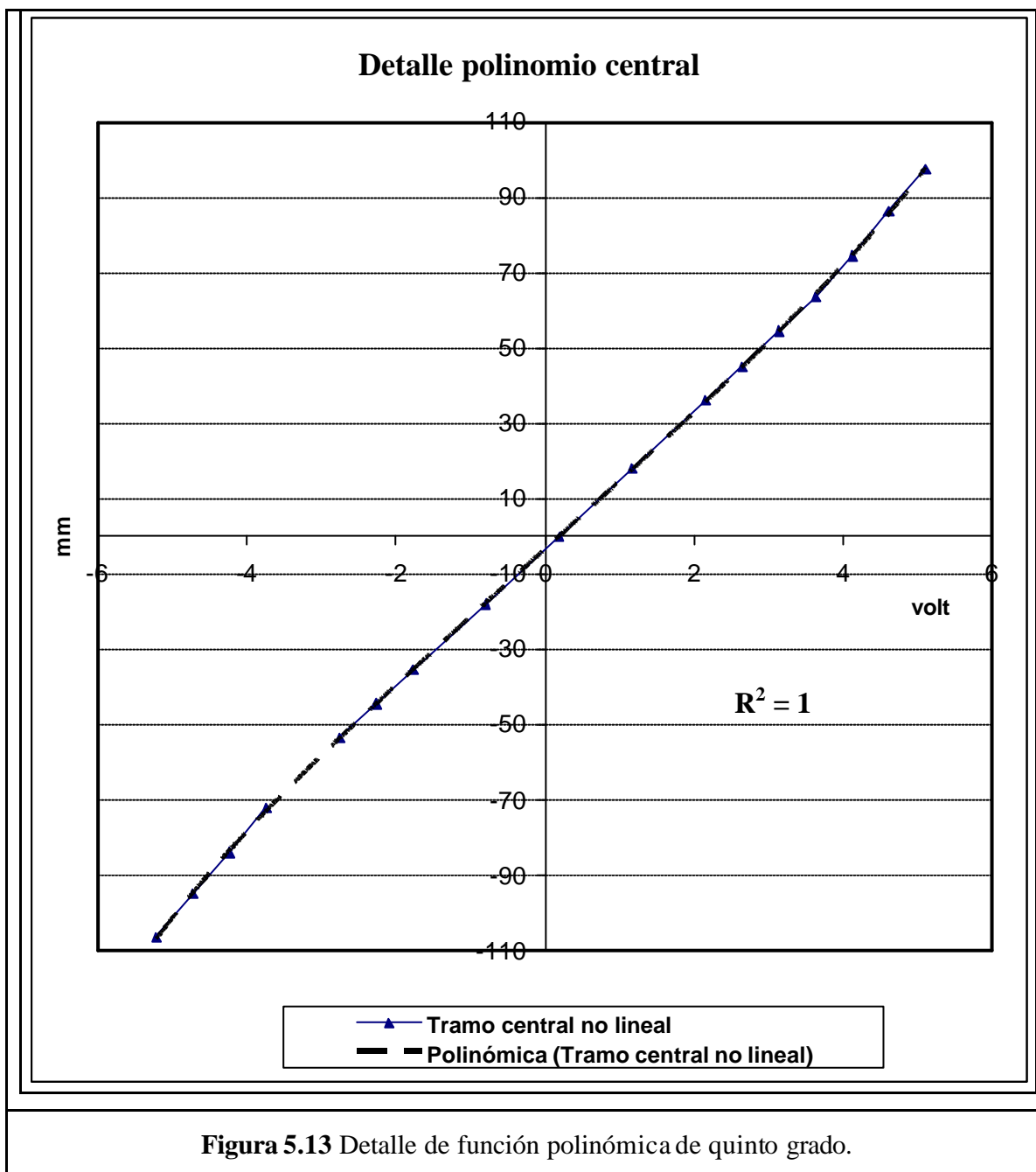


Tabla 5.8. Resultados obtenidos con calibración polinómica-lineal.

| Calibración lineal / Quinta | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Real | Despl. Real | Voltaje calibrado | Despl. Calibrado | Voltaje calibrado | Despl. Calibrado | Voltaje calibrado | Despl. Calibrado |
| Volt | [mm] | [Volt] | [mm] | [Volt] | [mm] | [Volt] | [mm] |
| 0.2038 | 0.0 | 10.00 | 194.33 | 3.80 | 67.78 | -3.40 | -66.16 |
| -9.6321 | 194.0 | 10.00 | 194.33 | 3.60 | 63.66 | -3.60 | -70.17 |
| -8.6478 | 174.5 | 9.80 | 190.38 | 3.40 | 59.62 | -3.80 | -74.26 |
| -7.6643 | 155.0 | 9.60 | 186.42 | 3.20 | 55.65 | -4.00 | -78.45 |
| -6.6849 | 135.5 | 9.40 | 182.46 | 3.00 | 51.75 | -4.20 | -82.76 |
| -5.7025 | 116.5 | 9.20 | 178.51 | 2.80 | 47.90 | -4.40 | -87.19 |
| -5.2112 | 106.5 | 9.00 | 174.55 | 2.60 | 44.10 | -4.60 | -91.76 |
| -4.7181 | 95.0 | 8.80 | 170.59 | 2.40 | 40.34 | -4.80 | -96.49 |
| -4.2271 | 84.0 | 8.60 | 166.64 | 2.20 | 36.61 | -5.00 | -101.41 |
| -3.7356 | 72.0 | 8.40 | 162.68 | 2.00 | 32.91 | -5.17 | -105.75 |
| -3.2410 | | 8.20 | 158.73 | 1.80 | 29.23 | -5.17 | -105.75 |
| -2.7509 | 53.5 | 8.00 | 154.77 | 1.60 | 25.57 | -5.20 | -106.34 |
| -2.2629 | 44.5 | 7.80 | 150.81 | 1.40 | 21.92 | -5.40 | -110.30 |
| -1.7718 | 35.5 | 7.60 | 146.86 | 1.20 | 18.29 | -5.60 | -114.25 |
| -0.7901 | 18.0 | 7.40 | 142.90 | 1.00 | 14.66 | -5.80 | -118.21 |
| 0.1883 | 0.0 | 7.20 | 138.94 | 0.80 | 11.04 | -6.00 | -122.16 |
| 1.1702 | -18.0 | 7.00 | 134.99 | 0.60 | 7.43 | -6.20 | -126.12 |
| 2.1548 | -36.0 | 6.80 | 131.03 | 0.40 | 3.82 | -6.40 | -130.08 |
| 2.6463 | -45.0 | 6.60 | 127.08 | 0.20 | 0.21 | -6.60 | -134.03 |
| 3.1376 | -54.5 | 6.40 | 123.12 | 0.00 | -3.39 | -6.80 | -137.99 |
| 3.6281 | -63.5 | 6.20 | 119.16 | -0.20 | -7.00 | -7.00 | -141.95 |
| 4.1200 | -74.5 | 6.00 | 115.21 | -0.40 | -10.60 | -7.20 | -145.90 |
| 4.6110 | -86.5 | 5.80 | 111.25 | -0.60 | -14.20 | -7.40 | -149.86 |
| 5.1040 | -97.5 | 5.60 | 107.30 | -0.80 | -17.81 | -7.60 | -153.81 |
| 5.5953 | -107.5 | 5.40 | 103.34 | -1.00 | -21.42 | -7.80 | -157.77 |
| 6.0858 | -116.5 | 5.20 | 99.38 | -1.20 | -25.04 | -8.00 | -161.73 |
| 7.0689 | -136.5 | 5.10 | 97.40 | -1.40 | -28.66 | -8.20 | -165.68 |
| 8.0533 | -156.0 | 5.05 | 96.40 | -1.60 | -32.30 | -8.40 | -169.64 |
| 9.0345 | -175.0 | 5.05 | 96.40 | -1.80 | -35.95 | -8.60 | -173.60 |
| 9.9998 | -194.5 | 5.05 | 96.43 | -2.00 | -39.61 | -8.80 | -177.55 |
| 0.1904 | 0.0 | 5.00 | 95.16 | -2.20 | -43.29 | -9.00 | -181.51 |
| | | 4.80 | 90.20 | -2.40 | -47.00 | -9.20 | -185.46 |
| | | 4.60 | 85.42 | -2.60 | -50.74 | -9.40 | -189.42 |
| | | 4.40 | 80.81 | -2.80 | -54.52 | -9.60 | -193.38 |
| | | 4.20 | 76.35 | -3.00 | -58.35 | -9.63 | -194.01 |
| | | 4.00 | 72.01 | -3.20 | -62.22 | -9.80 | -197.33 |

En la tabla **Tabla 5.8** se aprecian los límites numéricos de las curvas lineal y polinómica (**5.05** y **-5.17 [Volt]**). Se aprecia también de esta calibración que la regresión lineal es única en todo el rango del LVDT pero presenta unas pequeñas no-linealidades que deben ser corregidas, con estas 2 curvas es posible representar cabalmente el comportamiento del LVDT en todo el rango (**Figura 5.14**).

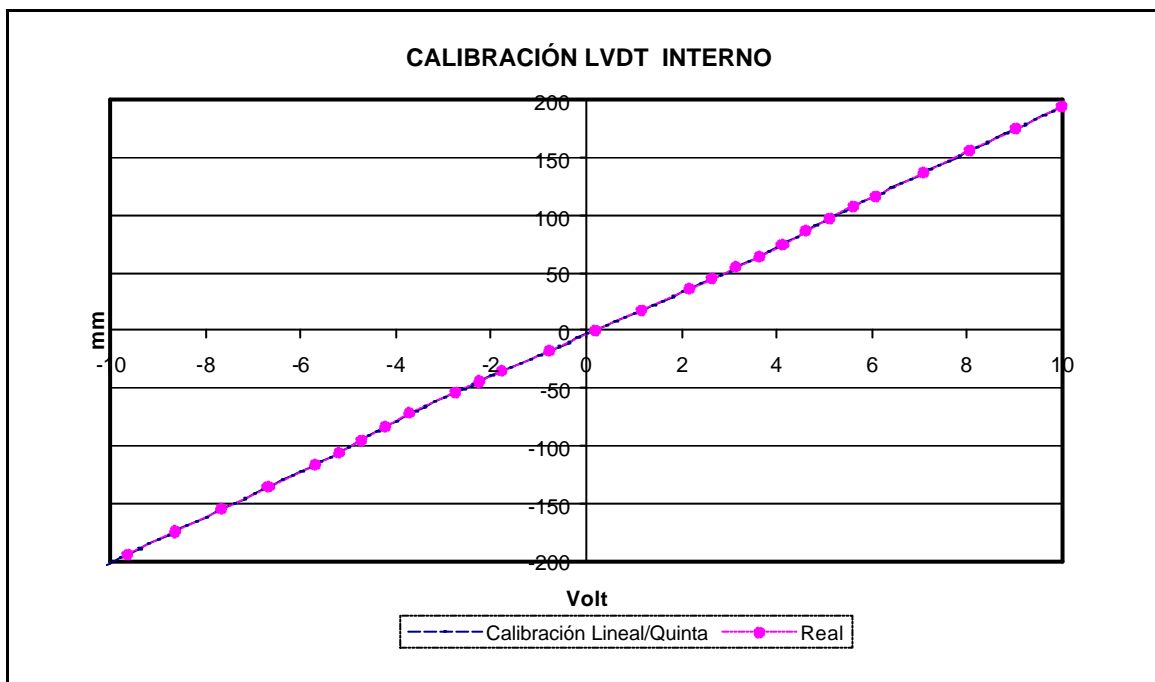


Figura 5.14. Comparación Calibración v/s Prueba.

Luego de esta etapa, se encontraron las curvas definitivas que permiten obtener el desplazamiento correcto a partir de los voltajes entregados por el LDVT interno. Luego, se modificó el programa de control⁵ **Figura 5.15** haciendo que este funcione suficientemente bien al enviar diferentes desplazamientos (con errores del orden de décimas de mm), lo que es suficientemente exacto para los alcances de este trabajo. Sin embargo, el programa fue modificado para que reciba registros previamente corregidos, pues la corrección de estos registros en la misma rutina de LabView hacía demasiado lento el procesamiento de los datos. Se crearon rutinas que permiten hacer las correcciones a los registros.

⁵ En las figura se observa sólo la parte modificada del programa, el plano con el nuevo programa completo se incluye en el **Anexo G**.

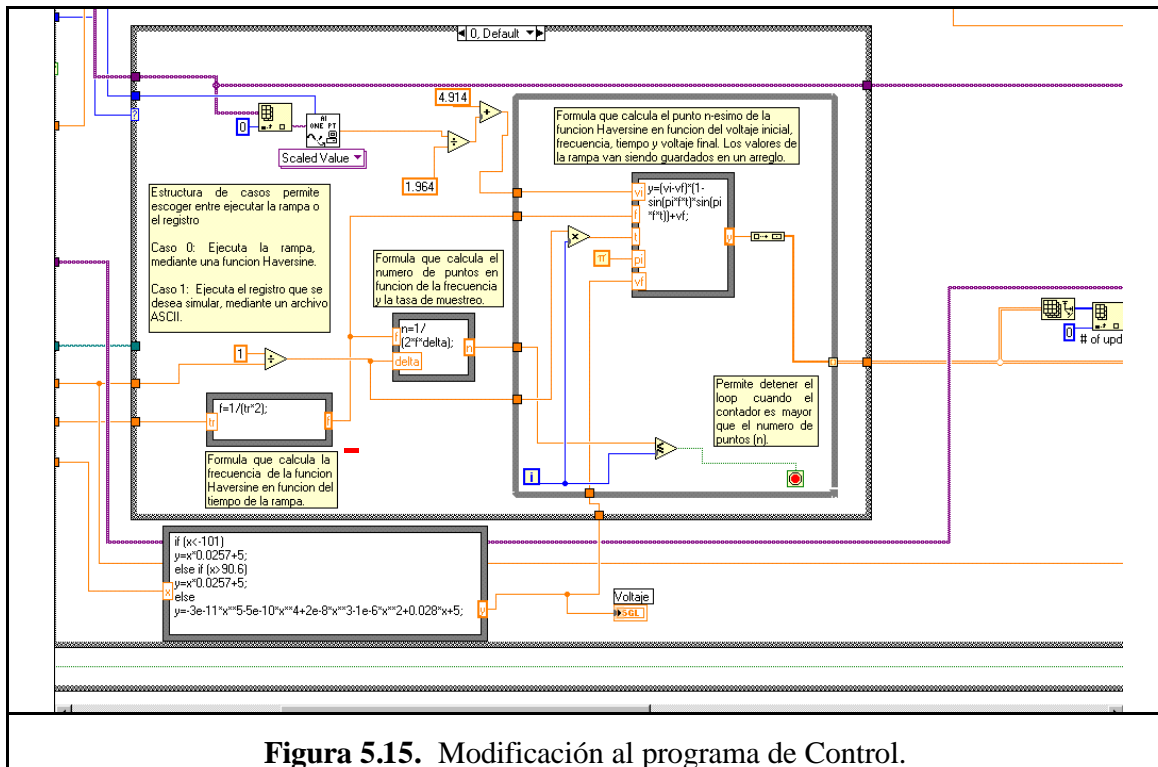


Figura 5.15. Modificación al programa de Control.

El cuadro de la **Figura 5.15** nos muestra la condición impuesta en la variable de entrada (desplazamiento en mm), ingresada en el panel frontal como “posición final” en los parámetros de la rampa, y permite discernir acerca de cual curva usar para convertir estos desplazamientos en el voltaje final “vf” que utiliza la función Haversine para generar la rampa, y así enviar desde el sistema de control los voltajes adecuados debido a la corrección encontrada.

Algoritmo,

Si $x < -101$

$$Y = 0.0257 * x + 5;$$

Si $x > 90.6$

$$Y = 0.0257 * x + 5;$$

En otro caso

$$Y = -3e-11 * x^5 + -5e-10 * x^4 + 2e-8 * x^3 + -1e-6 * x^2 + 0.028 * x + 5;$$

Donde,

x es el desplazamiento requerido en la rampa.

Y es el voltaje que se va a enviar para que se realice dicho desplazamiento, por este motivo parte en 5 Volt pues el centro de la carrera del actuador y es la coordenada cero del sistema.

Luego de calibrar correctamente el dispositivo LVDT interno y realizar las modificaciones necesarias al programa de control (**Figura 5.15**), el siguiente paso fue la prueba “estática” de la mesa en todo su rango de funcionamiento (**Figura 5.16**). Además de comparar el comportamiento de la mesa con estas modificaciones, se realizaron pruebas con el registro sísmico de Llolleo 1985 con el fin de comparar las mejoras obtenidas (**Figura 5.17**). Más detalles y gráficos comparativos se incluyen en el **Anexo E**.

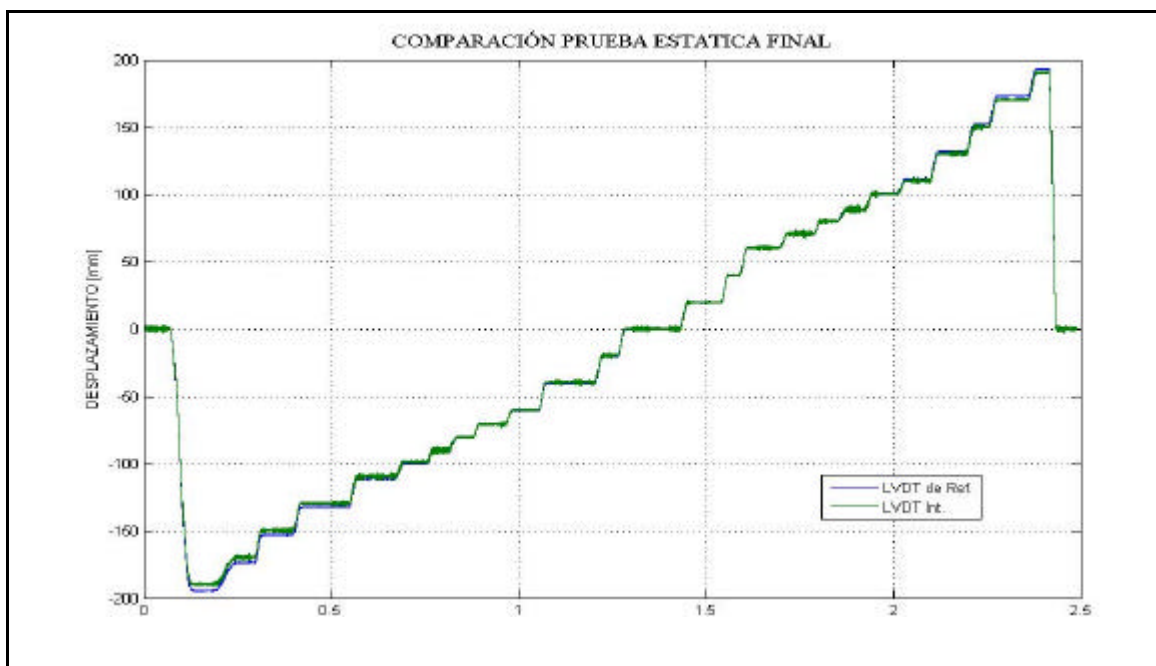


Figura 5.16. Prueba estática final después de calibración por desplazamiento.

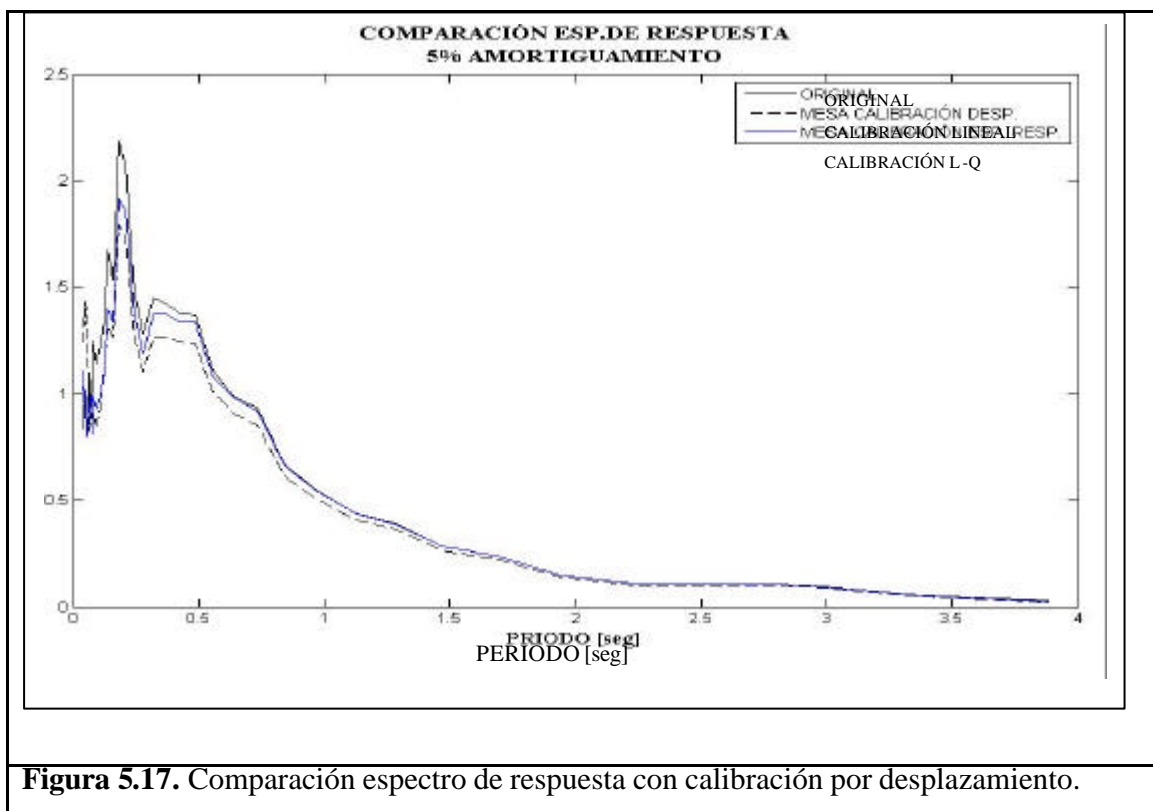


Figura 5.17. Comparación espectro de respuesta con calibración por desplazamiento.

Después de estos ensayos, se detectó que la mesa tenía problemas para reproducir altas frecuencias al comparar el espectro de respuesta de la señal original con la obtenida de la mesa (**Figura 5.17**). Para corregir esta desviación se decidió modificar la señal de entrada del registro de Llole. Para esto se realizó el cociente entre los espectros de respuesta obteniéndose los valores de la **Figura 5.18**.

Con estos valores se generó una función preliminar en el dominio de las frecuencias, **Figura 5.18**, y luego se amplificó la transformada de Fourier de la señal original multiplicándola por esta función. De aquí se obtuvo una transformada de Fourier modificada y, por último, haciendo la anti-transformada se obtuvo un registro amplificado en las zonas de alta frecuencia. Este nuevo registro fue filtrado y utilizado para el control de la mesa. La comparación de los espectros de respuesta se muestra en la **Figura 5.19**. Esta muestra una notoria mejoría con respecto a la comparación de la **Figura 5.17**.

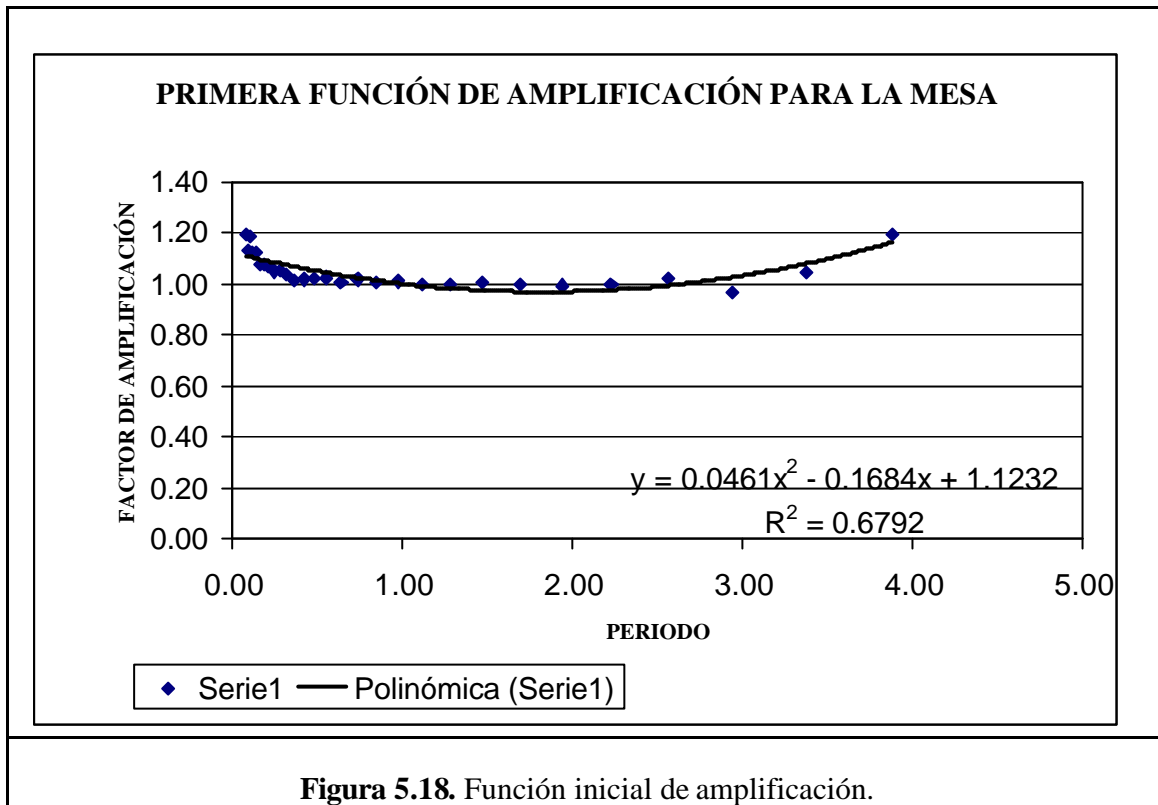


Figura 5.18. Función inicial de amplificación.

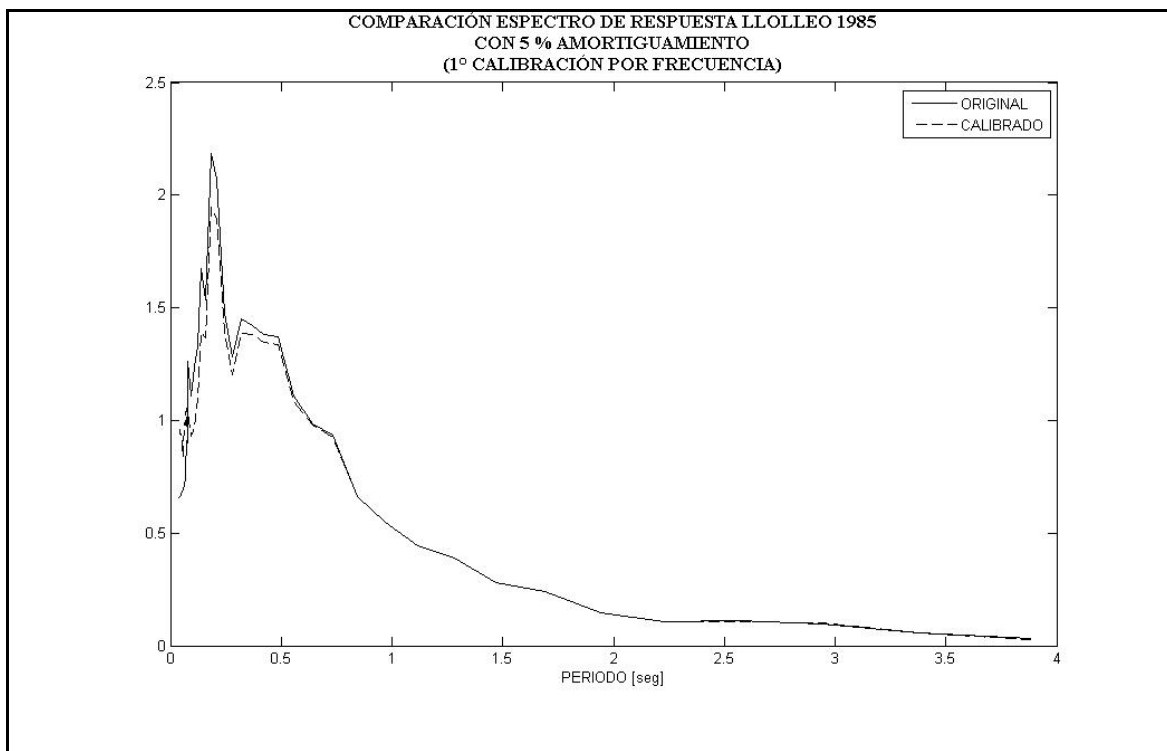


Figura 5.19. Comparación espectros de respuesta, 1º corrección por frecuencias.

De la **Figura 5.19** se pueden destacar 2 cosas importantes:

- La forma de corrección del espectro presenta una grave falencia. En el gráfico de la figura se muestra unas irregularidades en el orden 0.06 [seg] de periodo. Este problema fue abordado en la nueva forma de amplificación que se utilizó, pues después de varias pruebas se tenía más detalles del origen del problema, este venía del cambio de pendiente que generaba de función de amplificación. Debemos recordar que este punto está en el límite de funcionamiento de la mesa.
- La mesa, aún con este procedimiento, no lograba reproducir de forma adecuada altas frecuencias. Por esto se hizo necesario realizar un análisis más detallado “*refinando la malla*” para encontrar la función de amplificación correcta, dando paso con esto, a los ensayos con señales sinusoidales en todo el rango de frecuencias para detallar en forma más precisa el nivel de atenuación en cada frecuencia.

5.3. Realización y análisis de ensayos con señales sinusoidales.

Después de la calibración inicial del sistema y de realizar las modificaciones necesarias al programa de control, se realizaron pruebas con señales sinusoidales con dos objetivos específicos lograr una correcta calibración en todo el rango de frecuencias y verificar el comportamiento de la mesa en todo su rango de funcionamiento (gráfico tri-logarítmico **Figura 4.8**).

5.3.1. Calibración en frecuencia

Luego de pruebas preliminares, se confirmó que el sistema de control del equipo *MOOG* atenúa las señales de altas frecuencias.

Con estos antecedentes, se realizó una serie de ensayos del rango completo de frecuencias con señales sinusoidales desde 1 hasta 12 [Hz], con una amplitud constante 5 [mm] (**Figura 5.20**), con el objetivo de obtener el valor de la atenuación en función de la frecuencia. Los resultados se encuentran en la **Tabla 5.9** y la **Figura 5.21**.

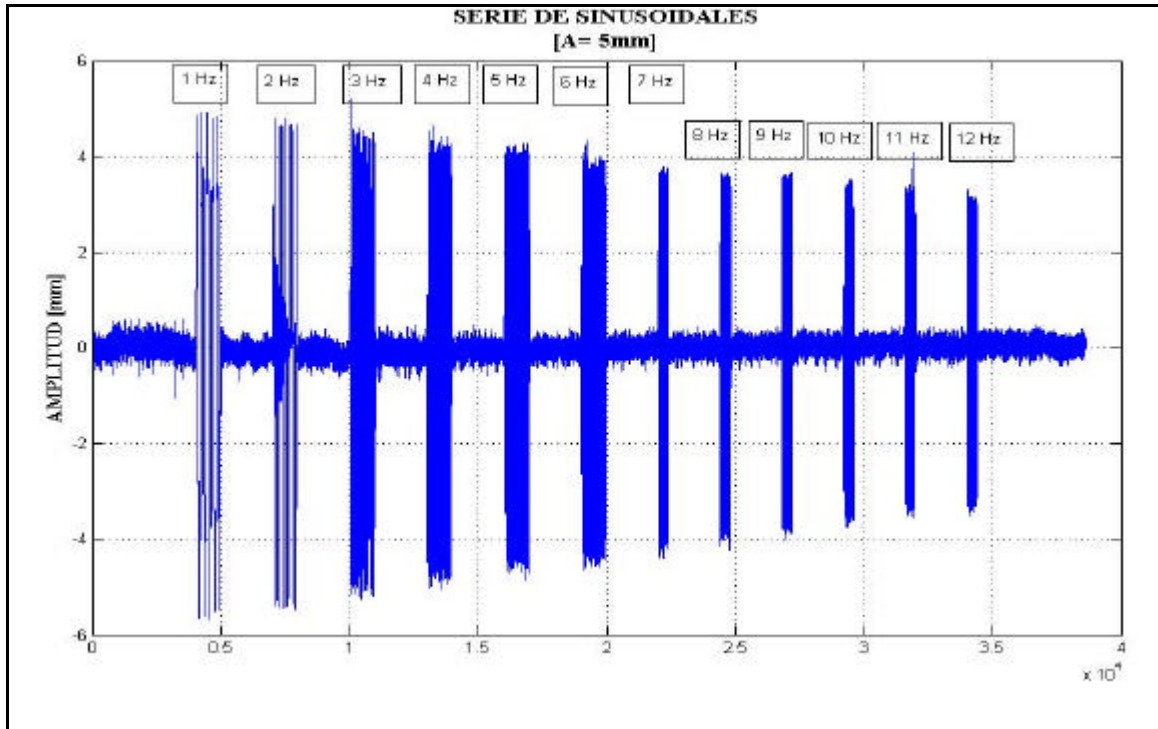
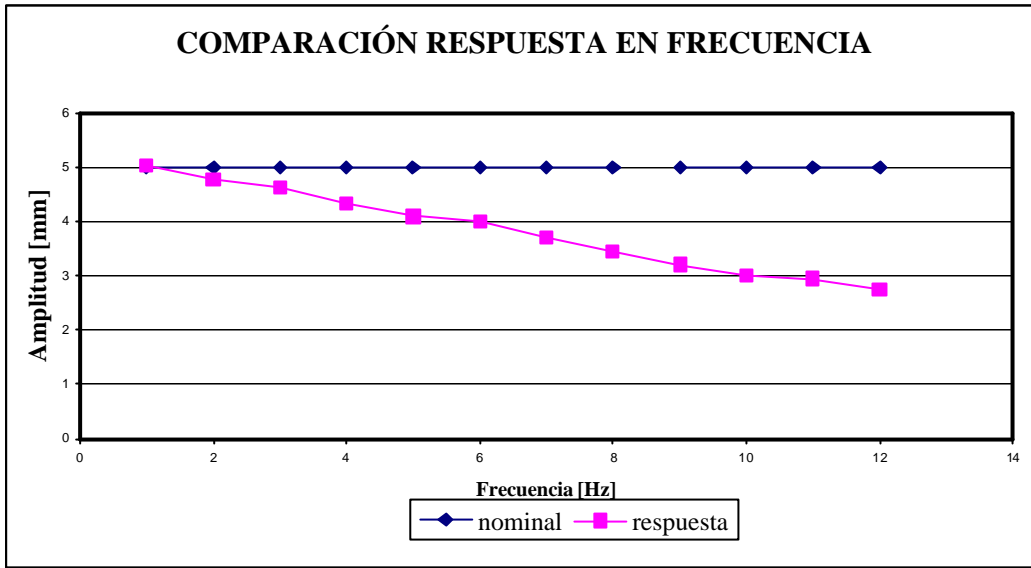


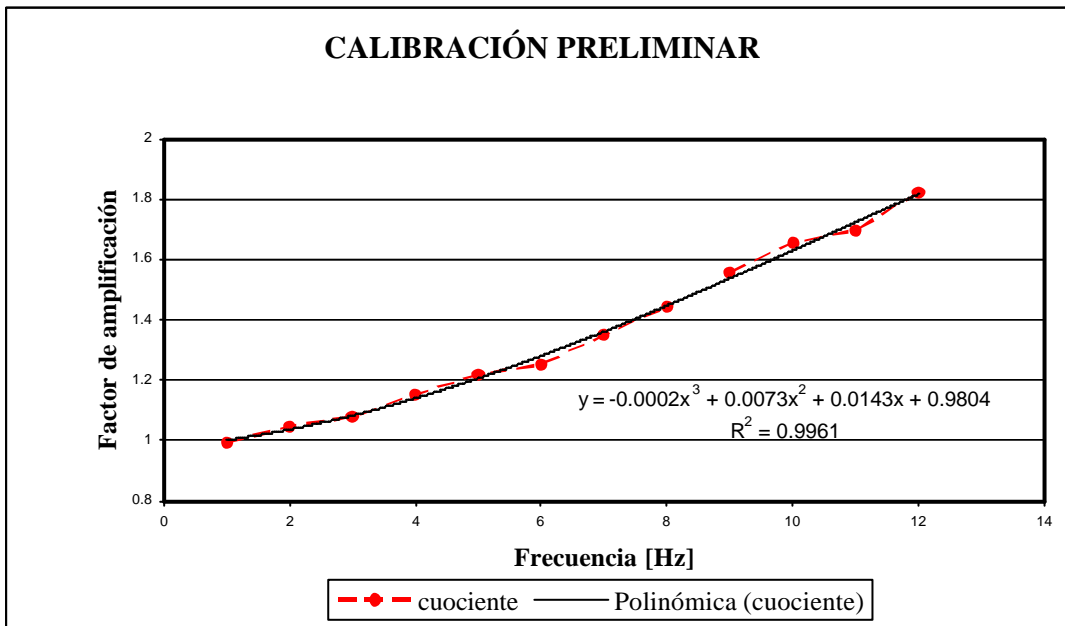
Figura 5.20. Serie de ensayos con señales sinusoidales.

Tabla 5.9. Valores de atenuación en frecuencia

| F | Amplitud | Respuesta | Cuociente | Error |
|------|----------|-----------|-----------|--------|
| [Hz] | [mm] | [mm] | | % |
| 1 | 5 | 5.030 | 0.994 | -0.61% |
| 2 | 5 | 4.781 | 1.046 | 4.39% |
| 3 | 5 | 4.634 | 1.079 | 7.32% |
| 4 | 5 | 4.338 | 1.153 | 13.25% |
| 5 | 5 | 4.100 | 1.220 | 18.00% |
| 6 | 5 | 3.992 | 1.253 | 20.16% |
| 7 | 5 | 3.707 | 1.349 | 25.87% |
| 8 | 5 | 3.460 | 1.445 | 30.79% |
| 9 | 5 | 3.214 | 1.556 | 35.72% |
| 10 | 5 | 3.021 | 1.655 | 39.58% |
| 11 | 5 | 2.949 | 1.695 | 41.02% |
| 12 | 5 | 2.742 | 1.823 | 45.16% |



(a) Atenuación producto de la frecuencia



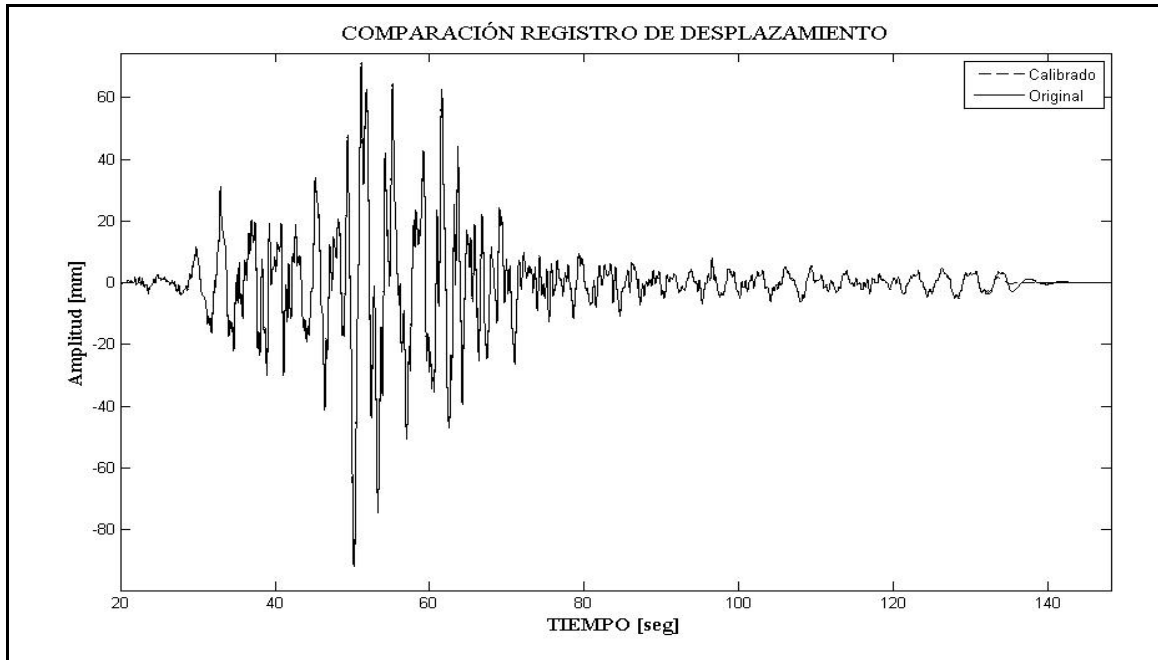
(b) Curva de amplificación preliminar.

Figura 5.21. Diferencias en frecuencias.

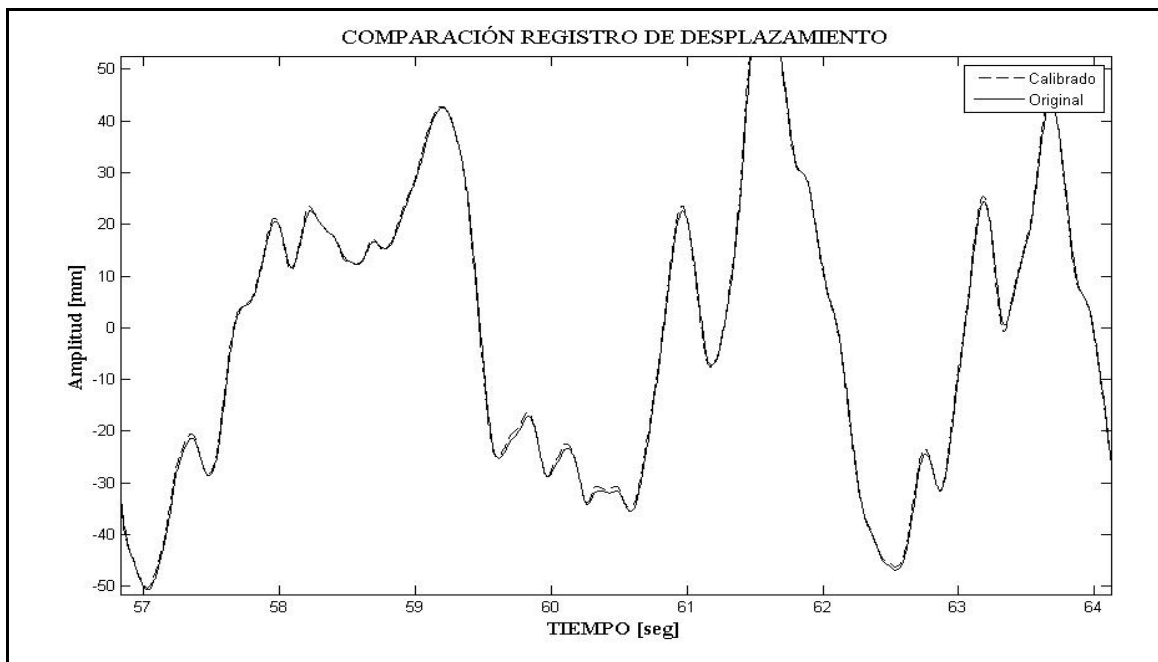
En el gráfico de la **Figura 5.21. (a)** se aprecia claramente que la atenuación producida por el equipo es grande llegando al 45 %. Se necesita entonces obtener una función que represente esta atenuación, para amplificar con ella las señales. Como primera aproximación se usó el cociente mostrado en la **Tabla 5.9** a ella se puede ajustar una función cúbica de la **Figura 5.21. (b)**. Los valores que se obtienen con esta curva y el error porcentual que se produce se muestran en la **Tabla 5.10**.

| Tabla 5.10. Resultados curva preliminar de Amplificación. | | | | |
|--|-------------|------------------|--------------|--------------|
| | F | Cuociente | Valor | Error |
| | [Hz] | | curva | % |
| | 1 | 0.994 | 1.0018 | -0.79% |
| | 2 | 1.046 | 1.0366 | 0.89% |
| | 3 | 1.079 | 1.0836 | -0.43% |
| | 4 | 1.153 | 1.1416 | 0.97% |
| | 5 | 1.220 | 1.2094 | 0.83% |
| | 6 | 1.253 | 1.2858 | -2.65% |
| | 7 | 1.349 | 1.3696 | -1.53% |
| | 8 | 1.445 | 1.4596 | -1.02% |
| | 9 | 1.556 | 1.5546 | 0.07% |
| | 10 | 1.655 | 1.6534 | 0.10% |
| | 11 | 1.695 | 1.7548 | -3.50% |
| | 12 | 1.823 | 1.8576 | -1.88% |

Luego, con esta curva se multiplica la transformada de Fourier del registro original de desplazamientos, y haciendo la anti-transformada se obtiene un registro de desplazamientos amplificado en las altas frecuencias (**Figura 5.22**).



(a) Registro de desplazamientos amplificado



(b) Detalle de Zona de máximo desplazamiento.

Figura 5.22. Comparación de registros de desplazamiento obtenido con la mesa luego de amplificar la señal del registro de entrada.

Luego de ensayar la mesa con el registro corregido por frecuencias en esta forma, se obtuvo un espectro de respuesta mejor que el obtenido sólo con la calibración por desplazamientos (**Figura 5.17**) y con la 1° calibración por frecuencias (**Figura 5.19**), pero se presentan algunos problemas por el cambio de pendiente brusco de las derivadas al inicio y al final.

Luego de variadas pruebas, se encontró que la función debía cumplir con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= 1 & -1 < x < 1 \\
 F(x) &= p & x = -12 \vee x = 12 \\
 \frac{\partial F}{\partial x} &= 0 & x = \pm 1 \wedge x = \pm 12
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Donde,

x es el dominio de la función $F(x)$ y comprende el rango de frecuencias positivas y negativas de la transformada de Fourier del registro sísmico de Llolleo 1985.

p es el porcentaje de amplificación máximo que se desea entregar.

nota: se usa $x = 1$ y $x = 12$, como valores extremos pues son los límites que se emplearon en los ensayos con señales sinusoidales.

Para cumplir con las condiciones anteriores se puede usar una función Hermítica (**Figura 5.23**), utilizada en elementos finitos, que en variables naturales tiene la forma siguiente:

$$F(x) = \frac{1}{4}(2 + 3x - x^3) \quad \forall x \in [-1 \ 1]
 \tag{5.3}$$

Gráficamente se aprecia de esta forma:

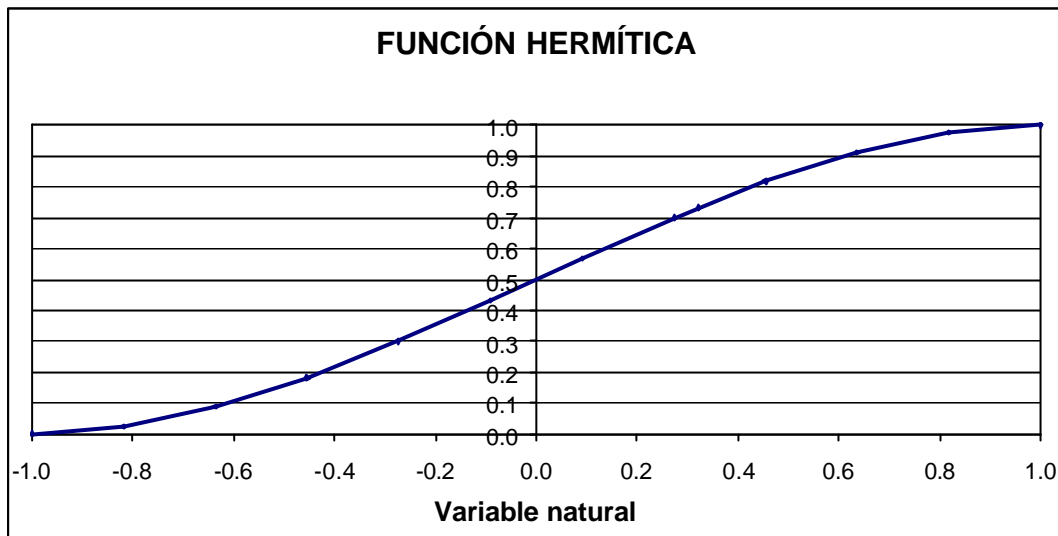


Figura 5.23. Función Hermítica.

Para la correcta utilización de esta función en el rango que se desea fue necesario el cambio de variables mostrado en la ecuación 5.4:

$$\mathbf{x} = \frac{2x - x_1 - x_0}{(x_1 - x_0)} \quad \forall x \in [1 \ 12] \quad (5.4)$$

En este caso:

$$x_1 = 12 \quad x_0 = 1$$

Con este cambio de variables y haciendo las correcciones necesarias para los valores negativos, se obtiene la función mostrada en la **Figura 5.24**:

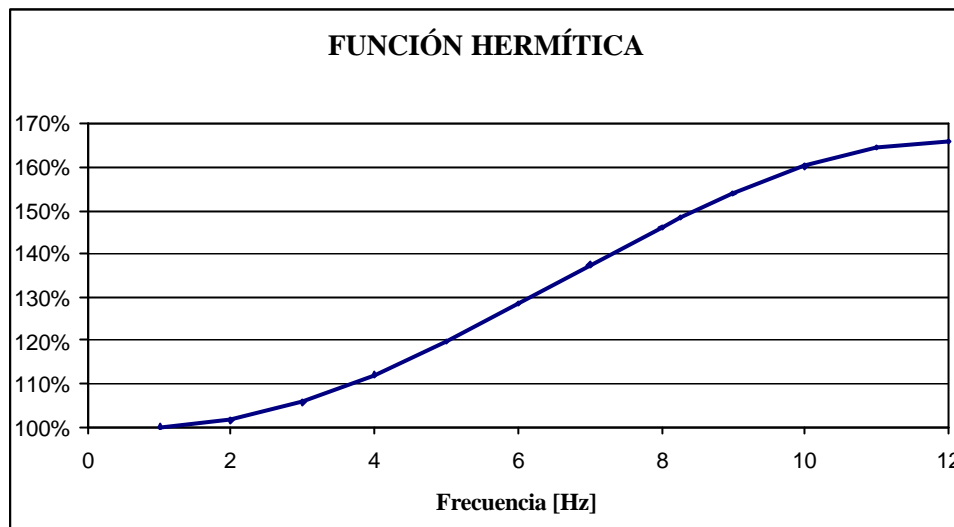


Figura 5.24. Función de amplificación.

Con esta función se obtiene la relación que se muestra en la **Figura 5.25**, donde se muestran los valores reales obtenidos con los ensayos y los representados con esta función.

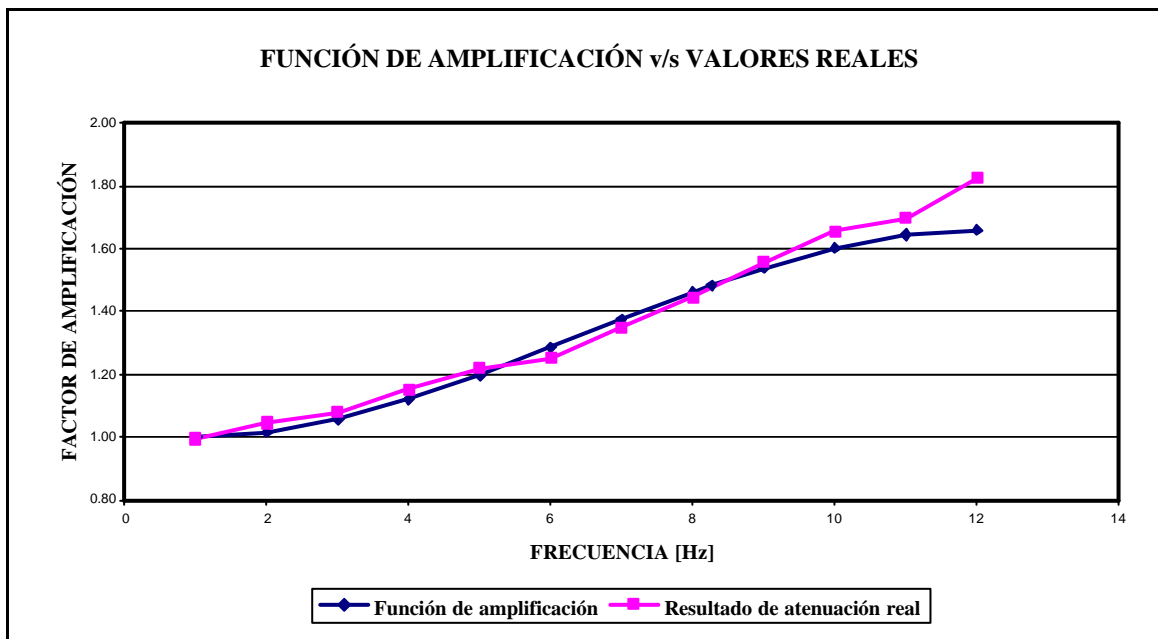


Figura 5.25. Función de amplificación v/s Valores reales.

Luego del proceso de amplificación, se obtienen los resultados mostrados en la **Figura 5.26** y **Figura 5.27**. De aquí se tiene que el porcentaje de amplificación que permite representar más exactamente el espectro de respuesta del registro sísmico de Lollole 1985 es un 55% de amplificación (**Figura 5.28**), con el cual se obtiene la serie de tiempo de aceleraciones⁶ mostrada en la **Figura 5.29**. Con esto se da por finalizada la calibración de la mesa.

⁶ Las otras series de tiempo de aceleraciones se incluyen en el **Anexo C**.

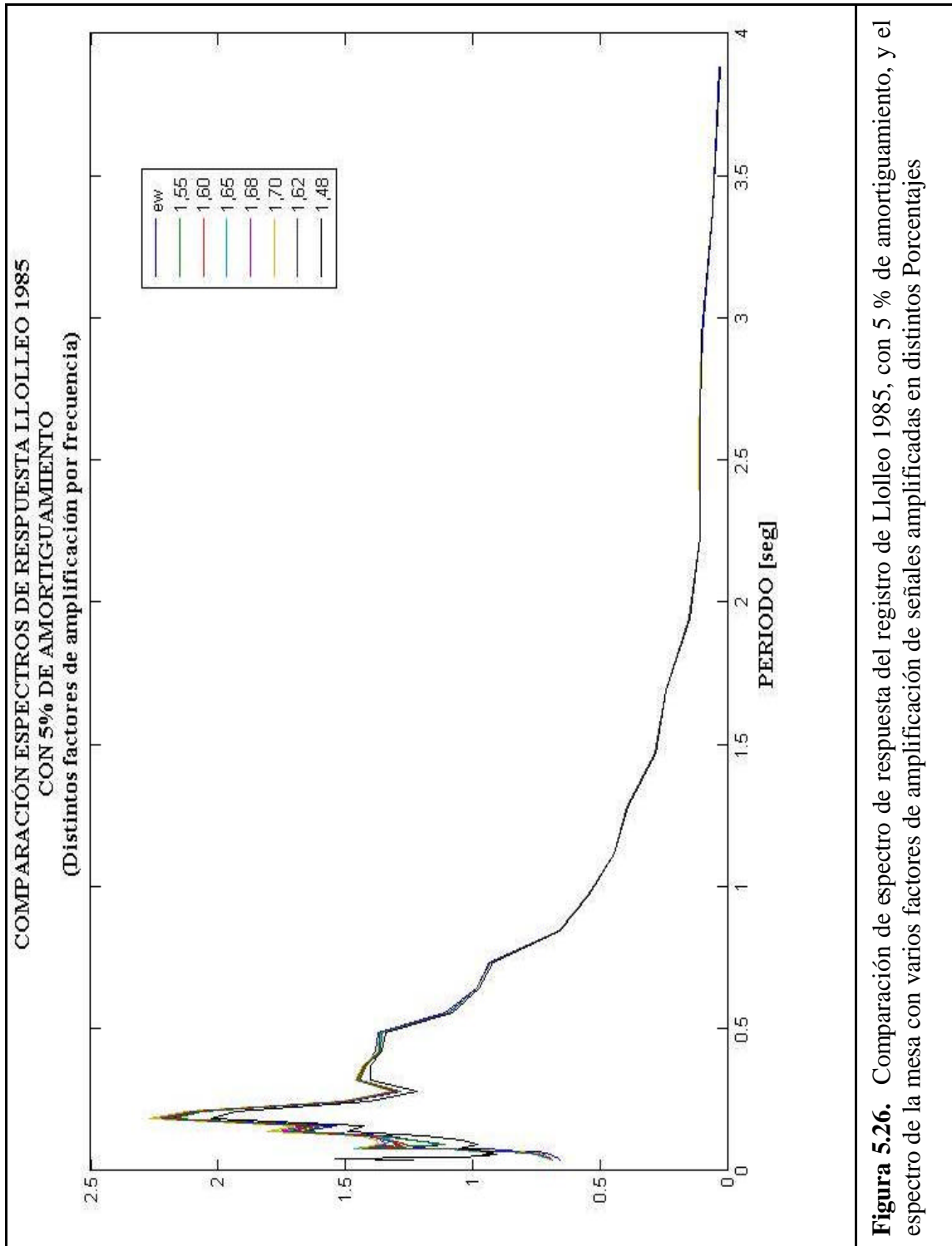


Figura 5.26. Comparación de espectro de respuesta del registro de Llolleo 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa con varios factores de amplificación de señales amplificadas en distintos Porcentajes

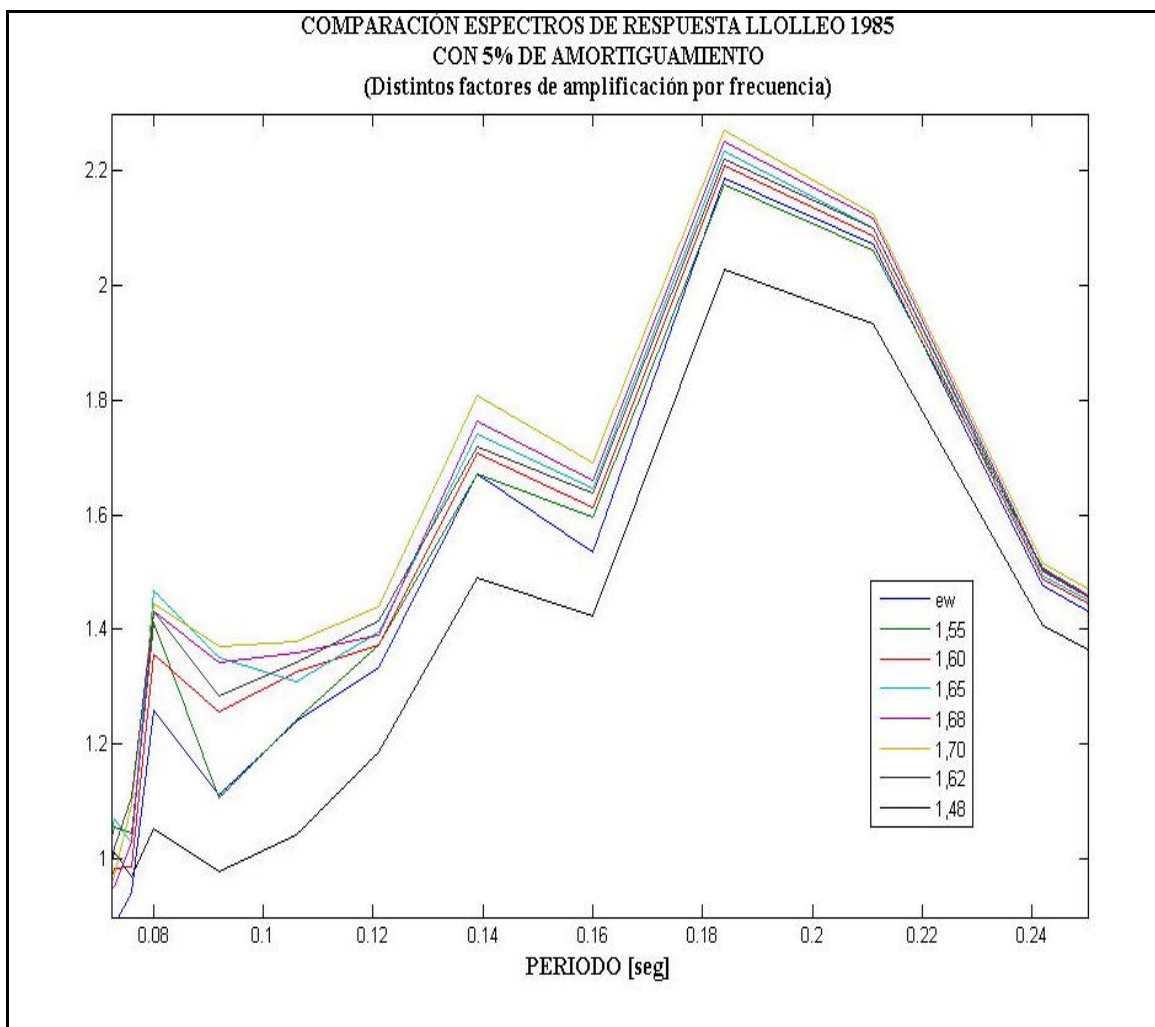


Figura 5.27. Detalle de zona de más alta frecuencia de Comparación de espectros de respuesta del registro de Lollole 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa con varios factores de amplificación.

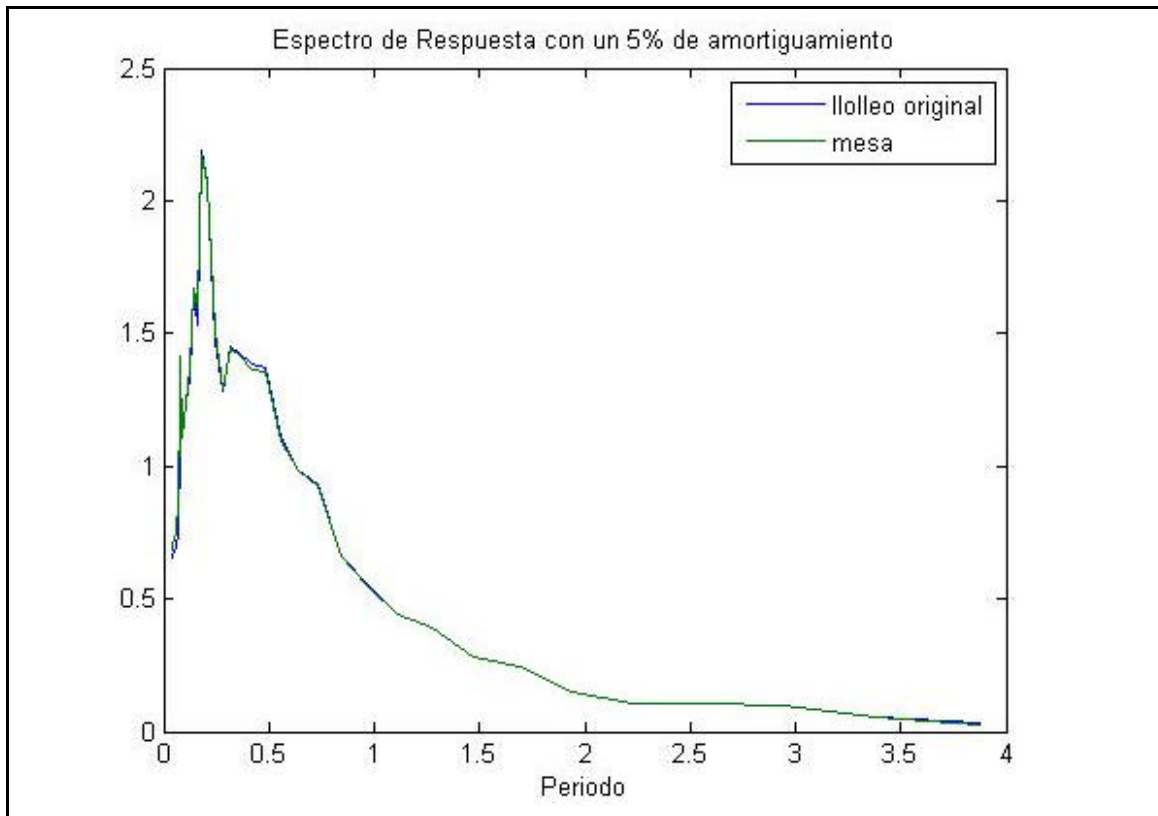
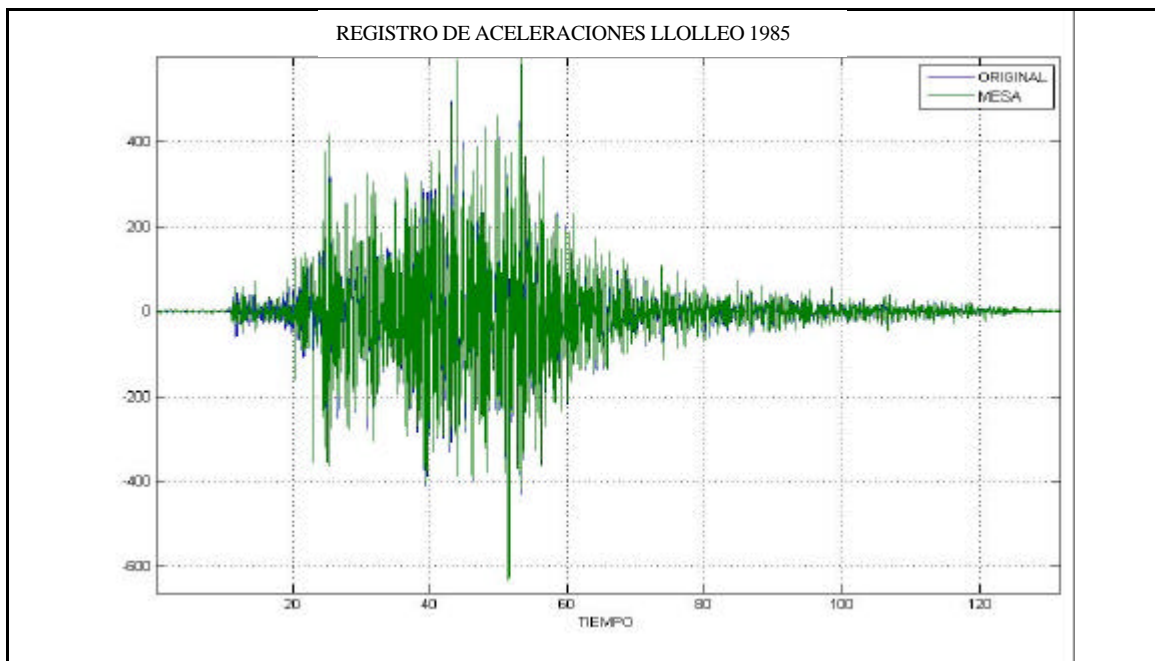
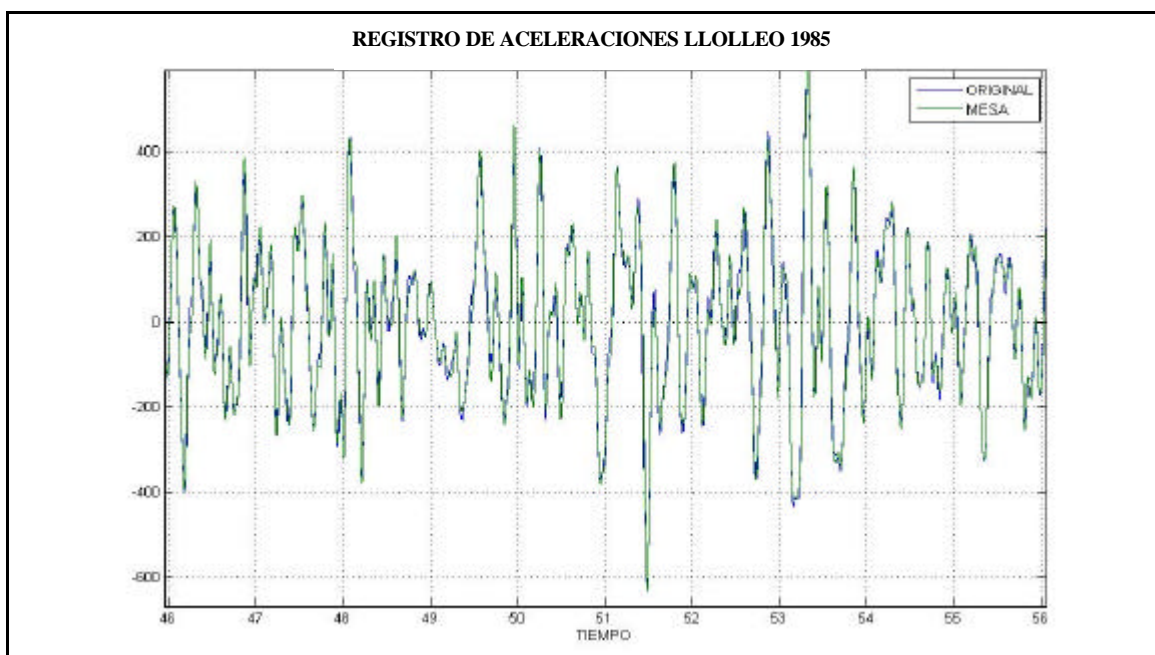


Figura 5.28. Espectro de respuesta de la mesa con señal amplificada en 55 %.



(a) Serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Lolloe 1985 v/s registro obtenido de la mesa con factor de amplificación de 55%.



(b) Detalle de la zona de máxima aceleración de (a).

Figura 5.29. Serie de tiempo de aceleraciones registro sísmico de Lolloe 1985.

Además de lo anterior se realizaron pruebas con otros registros como el de Melipilla 1985, resultado que se muestra en la **Figura 5.30** y **Figura 5.31**.

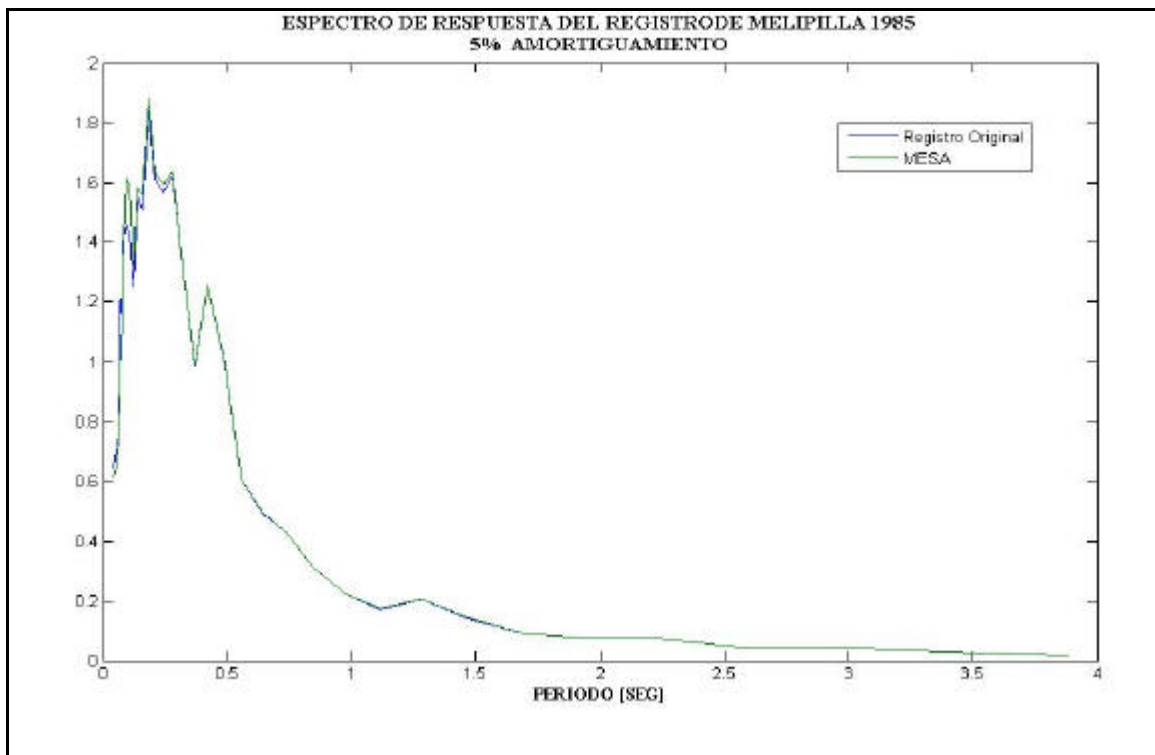
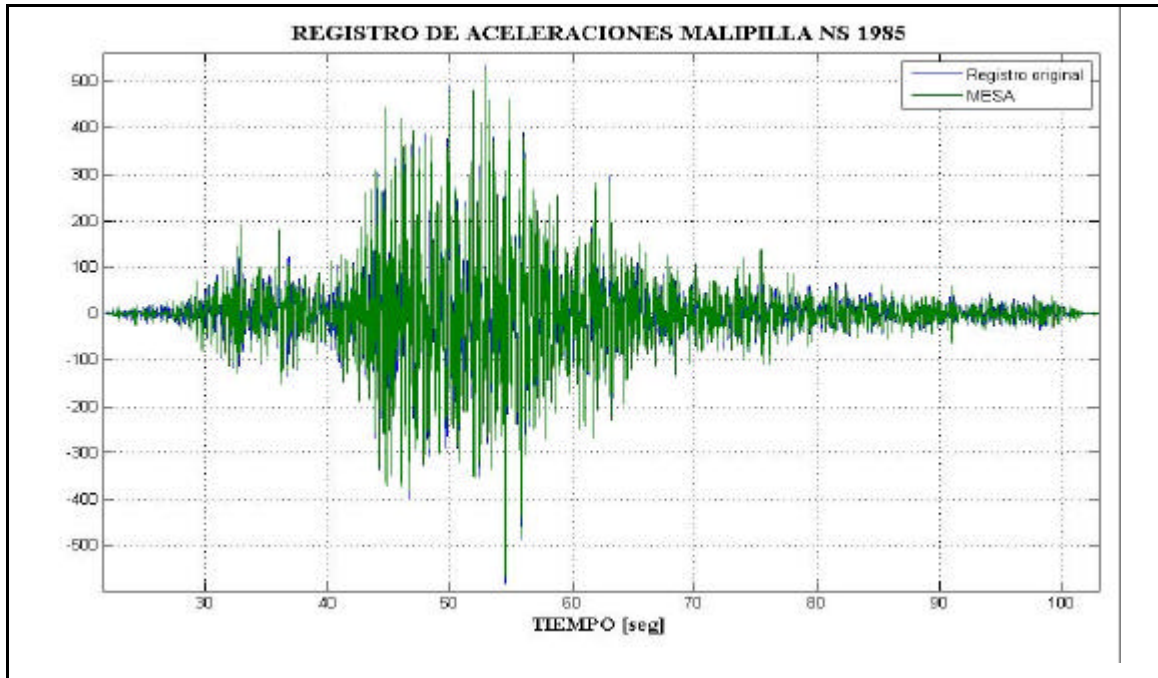
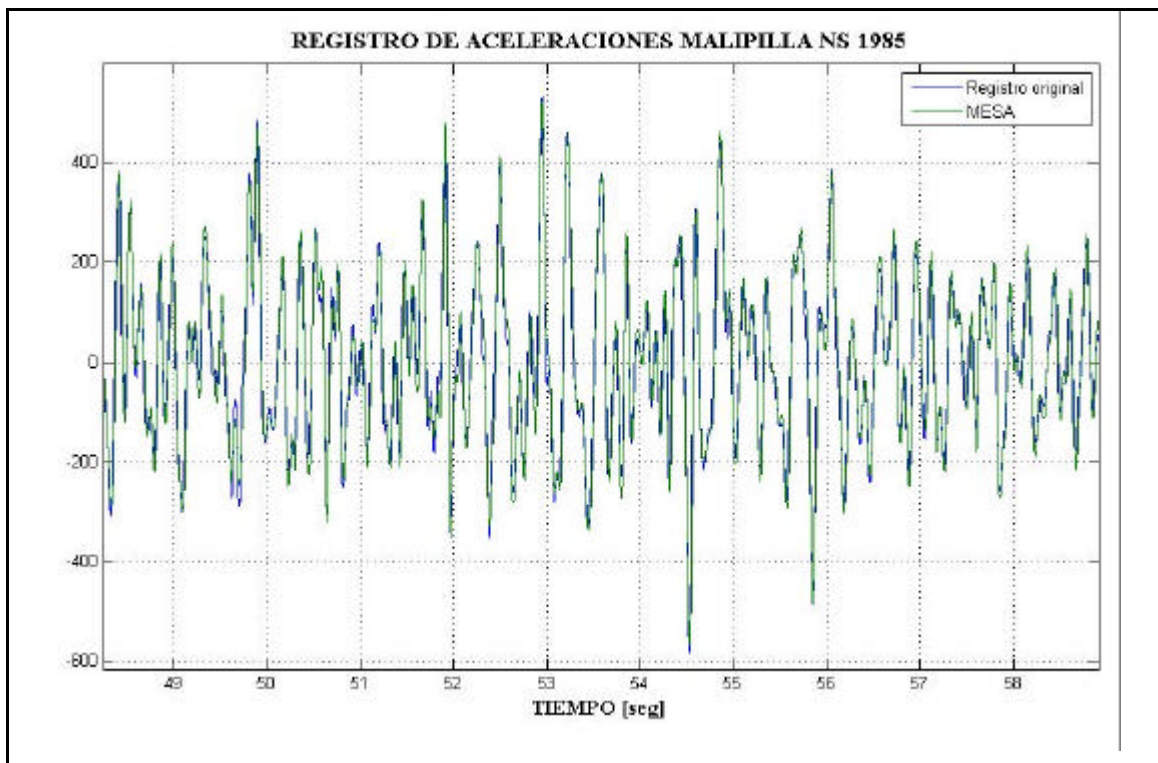


Figura 5.30 Comparación de espectros de respuesta del registro de Melipilla 1985, con 5 % de amortiguamiento, y el espectro de la mesa.



(a) Serie de tiempo de Aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985 v/s registro obtenido de la mesa.



(b) Detalle de la zona de máximo desplazamiento de (a).

Figura 5.31 Serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985.

Con estos resultados, sólo restaba probar el comportamiento de la mesa en todo el rango de frecuencias, con respecto a su espectro de Tri-logarítmico de respuesta.

5.3.2. Verificación del comportamiento de la mesa.

Luego de obtener la calibración de la mesa, la función de amplificación y el porcentaje de amplificación que permite representar adecuadamente el registro de diseño, se realizó otra serie de ensayos con señales sinusoidales barriendo el rango completo de frecuencias de 1 a 11 [Hz] con una amplitud constante de 5 mm (**Figura 5.32**), para así confirmar que esta función con el 55% de amplificación era adecuada. Comparando los resultados con los mostrados en la **Figura 5.20** se aprecia la mejoría lograda con la calibración.

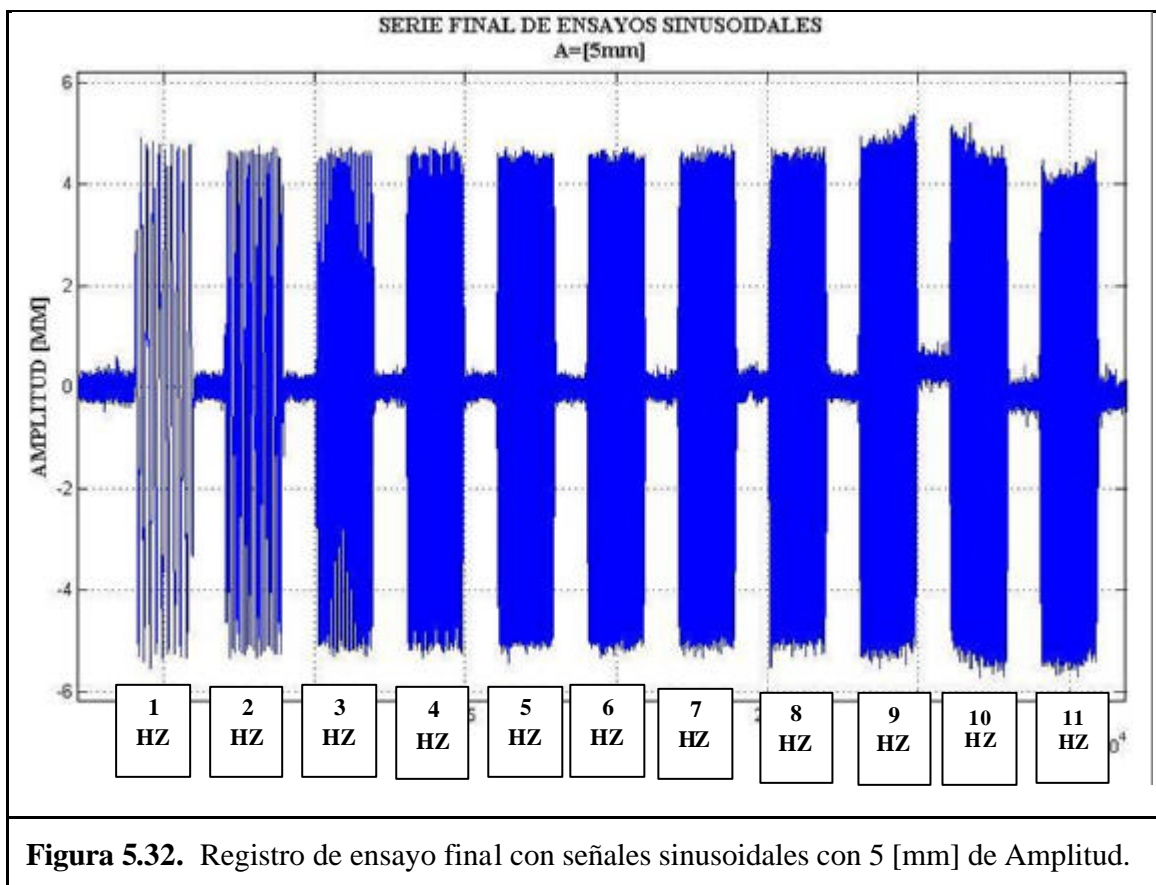
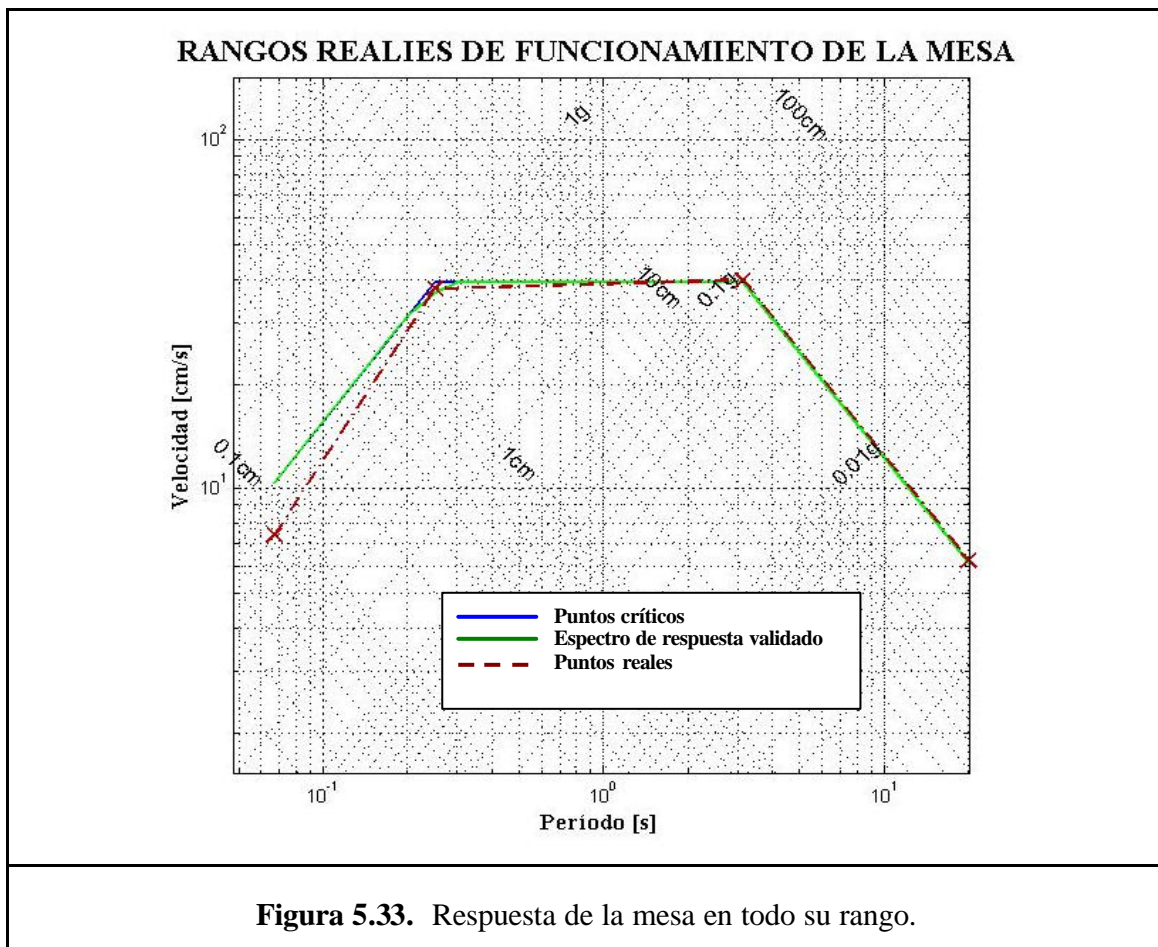


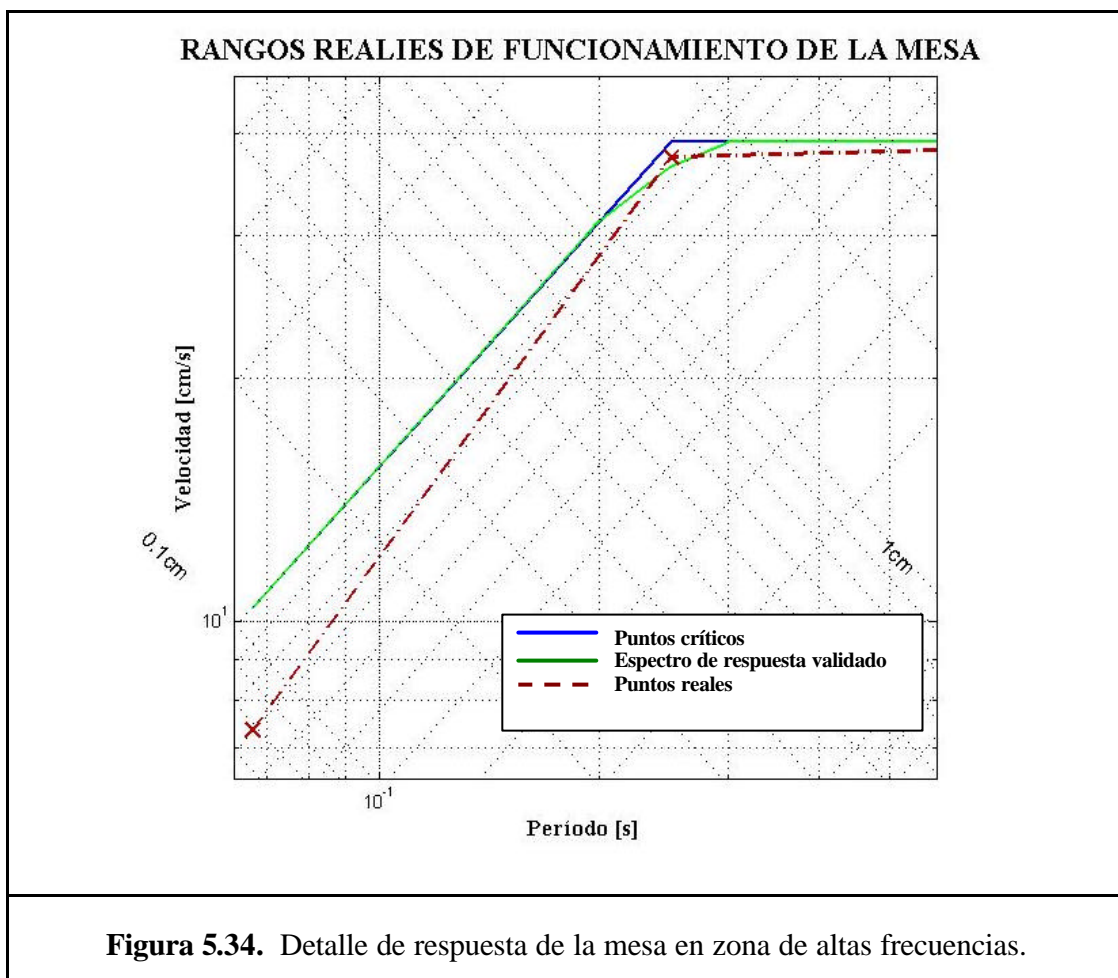
Figura 5.32. Registro de ensayo final con señales sinusoidales con 5 [mm] de Amplitud.

En la **Figura 5.32** se aprecia una desviación de la señal entre los 9 y 10 Hz. Esto se debe a que la sujeción del LVDT de referencia se movió.

Comparando los resultados de los ensayos sinusoidales de la con los mostrados previamente en la **Figura 5.20**, se puede apreciar una notable mejoría en cuanto a la capacidad de la mesa.

Además de los ensayos mostrados en la **Figura 5.32**, se realizaron ensayos con sinusoidales en periodos específicos (en los puntos esquina) y obtienen los rangos reales de funcionamiento de la mesa. Comparándolos con el espectro de respuesta de Tri-logarítmico de la mesa (**Figura 4.31**). Se obtienen los resultados mostrados en la **Figura 5.33**.





5.4. Análisis de resultados y conclusiones de la calibración.

De los resultados obtenidos en la calibración (**Figura 5.28** y **Figura 5.29**), se puede concluir que la mesa es capaz de reproducir de forma suficientemente exacta el registro sísmico de diseño de Lollole EW 1985.

También es posible concluir que la mesa tiene un comportamiento estable tanto para ensayos “estáticos” con rampas de desplazamientos (**Figura 5.16**), como para ensayos dinámicos con registros reales. Además, se concluye que todo tipo de ensayo es repetible, garantizando con esto el correcto funcionamiento de los equipos y del software.

De los resultados mostrados en las **Figura 5.30** y **Figura 5.31** se puede concluir que la mesa es capaz de reproducir de forma adecuada otros registros sísmicos aparte del de diseño.

De la **Figura 5.32** es posible concluir que la amplificación de la señal de la mesa es la adecuada para minimizar el porcentaje de atenuación por frecuencia que genera el sistema de control.

Por último, y teniendo presente lo explicado en el Capítulo 2, se concluye que, es muy probable que si se ajustan correctamente los parámetros del sistema de control (**PI**) debería poderse reproducir cualquier registro sin necesidad de amplificarlos previamente por frecuencia. Por esto se recomienda la prueba y calibración del segundo programa desarrollado por Leiva (2007).

CAPÍTULO 6: Análisis de resultados y conclusiones

6.1. Análisis de resultados y Conclusiones.

Este trabajo tiene como objetivo principal montar, poner en marcha y calibrar la mesa vibradora descrita, objetivo que se cumplió, como sigue:

- 1) Se logró montar todos y cada uno de los componentes que forman la mesa vibradora, realizando las modificaciones de diseño necesarias y, además, cumpliendo con todos los requisitos de los fabricantes (*tolerancias de montaje, códigos de limpieza, etc.*). El funcionamiento de los equipos fue el adecuado durante todo el proceso, respondiendo de forma estable en todas las pruebas realizadas.

- 2) La puesta en marcha realizada por el equipo de trabajo, tuvo como objetivo principal garantizar el correcto funcionamiento de todos los equipos que conforman la mesa. Durante este proceso se realizaron las pruebas de todos los equipos, encontrándose que parte de los equipos del sistema de control tenían defectos de fabricación. Como conclusión final de la puesta en marcha, se puede garantizar efectivamente el correcto funcionamiento de todos los equipos que componen la mesa vibradora. Además, se logró estandarizar los procedimientos de mantención y cuidado de los mismos.

- 3) La calibración realizada, contempló dos etapas:
- En la primera etapa de calibración se revisó la linealidad de la respuesta del LVDT interno del actuador, con el fin de encontrar la función que represente la respuesta de éste en todo el rango de movimiento. Luego de encontrar esta función se aprecia una mejoría notable el desempeño de la mesa, esto se puede apreciar al comparar la **Figura 5.6** con la **Figura 5.16**.

Se puede concluir que esta calibración estática es suficiente para la realización de ensayos con rampas y a baja frecuencia. Con esta calibración, técnicamente debería bastar si el sistema de control MOOG no atenuara las señales. Para superar este problema fue necesaria la segunda etapa de calibración.

- La segunda etapa de calibración consistió en una amplificación por frecuencia debido a que el sistema de control atenúa las señales. Para lograr esto se realizaron pruebas con señales sinusoidales de todo el rango de frecuencias **Figura 5.20** y se consiguió establecer la función que permite dar la adecuada amplificación. Ésta arrojó resultados aceptables para señales sinusoidales (**Figura 5.32**). Además, como se muestra en las **Figura 5.28** y **Figura 5.29** del capítulo anterior, los resultados obtenidos para el registro de diseño también son los adecuados.

Luego, es posible dar por cumplidos los alcances de este trabajo, pues se determinaron los rangos reales de funcionamiento de la mesa, fueron encontradas las funciones que gobiernan el sistema de control y, por último, la mesa vibradora fue capaz de reproducir el registro sísmico de Lolleo de 1985 de forma adecuada.

6.2. Recomendaciones.

Se recomienda seguir los pasos indicados en el **Anexo C**, sobre todo para la operación, pues los equipos son delicados y su operatoria, aunque sencilla, requiere del estricto orden de los pasos ahí definidos. Con respecto a la mantención de los diferentes componentes de la mesa, se recomienda tener especial cuidado con la temperatura y la limpieza del aceite, pues la vida útil de los equipos depende directamente de que estos dos parámetros estén bajo un adecuado control.

Se recomienda la revisión y modificación del programa de control. Si bien éste funciona, la interfaz podría ser mejorada para simplicidad del usuario.

Se recomienda la instalación de un sistema externo al sistema de la mesa definitivo de medición, tanto de desplazamiento como de aceleraciones. Para esto se debe contemplar el diseño de soportes y anclajes definitivos.

Se recomienda, también, probar software con el sistema de control PID, pues a pesar de que la respuesta para el sismo de diseño es adecuada, con un control externo se podría garantizar la correcta reproducción de cualquier registro (dentro de los límites de la mesa).

Por último, se recomienda además, la prueba del programa de control de lazo cerrado (Leiva, 2007), pues en teoría, encontrando los parámetros adecuados del **PID**, es posible eliminar la amplificación por frecuencia que se realizó en este trabajo.

6.3. Propositiones para nuevos ensayos.

Se deja propuesta la prueba y calibración del programa que contempla un control de lazo cerrado externo al sistema de control de fábrica utilizando. Para este efecto, usar el LVDT externo, ya calibrado durante este trabajo, dejando así el microcontrolador sólo como “driver” de control. En teoría, con la correcta calibración del controlador PID sería posible obtener resultados parecidos a los de este trabajo sin la necesidad de amplificar los registros en función de la frecuencia.

Sin lugar a dudas, lo más importante que se puede recomendar es la realización de ensayos con carga (si es posible con la carga de diseño), punto que no fue tocado en este trabajo, pero que es parte fundamental en la prueba de todo equipo.

Por último, se recomienda hacer ensayos con otros registros sísmicos no contemplados en este trabajo por falta de tiempo. Además, con esto se podría generar una base de datos de los registros corregidos y de los resultados obtenidos, para así facilitar pruebas futuras.

Se recomienda, además, que si a futuro se produjese algún cambio en los equipos (servo-válvula, sistema de control, etc.) se realice nuevamente una calibración adecuada, pues es probable que algunos de los parámetros o de las funciones encontradas durante la realización de este trabajo cambien.

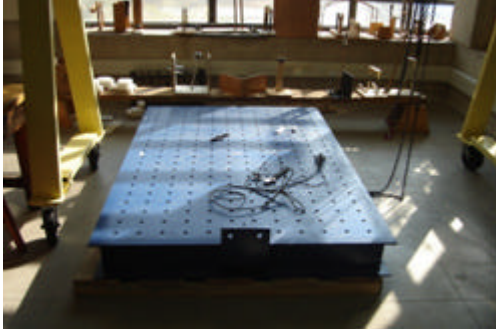
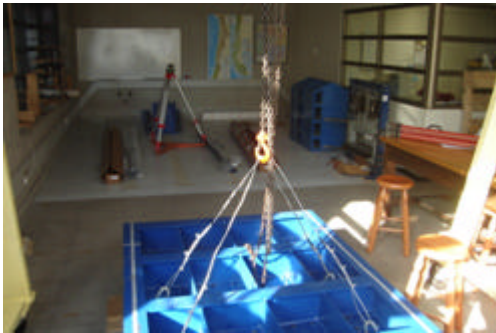
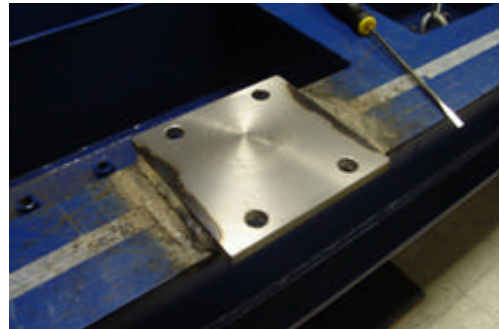
BIBLIOGRAFÍA.

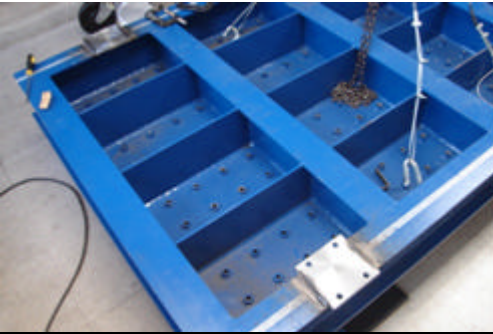


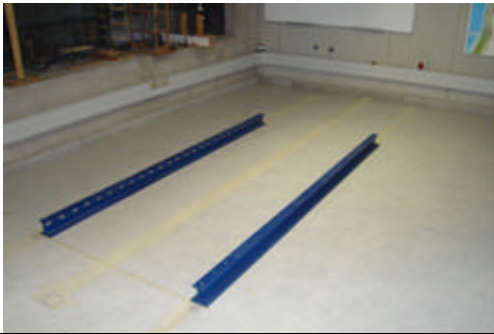



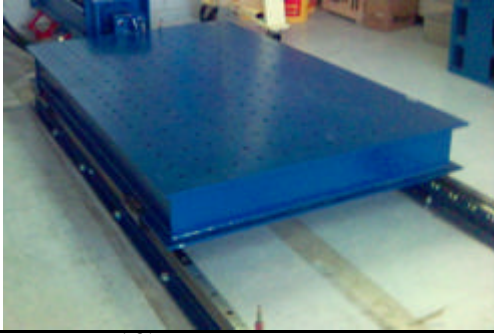
1. Åström, K. y Tore Hägglund – “PID controllers: Theory, design and tuning” –2nd edition. Research Triangle Park: Instrument Society of America, cop. 1995.
2. M. Blondet and C. Esperanza. - “Analysis of shaking table-structure interaction effects during seismic simulation tests”. - Earthquake Engineering Structure Dynamics (1998).
3. Caprile Gonzáles, Maximiliano Alejandro. – “Validación experimental del modelo de comportamiento de un cuerpo rígido no anclado bajo excitación bidimensional en mesa vibradora”.- Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2003.
4. E. Carnicer y C. Mainar – “Oleohidráulica: Conceptos básicos”. – Editorial Paraninfo, 1998.
5. S. Dyke, B. Spencer, P. Quast and M. Sain. – “Role of control – structure interaction in protective system design”. – Journal of Engineering Mechanics 121(2), 322-338 (1995).
6. Gómez Romero, Néstor Alejandro. – “Diagnostico y evaluación del sistema de control del banco de pruebas de aisladores sísmicos”.- Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 1998.
7. J. Kuehn, D. Epp and W. N. Patten. – “High – fidelity control of seismic shake table” – Center for Structural control, University of Oklahoma 1999. – Earthquake Engineering Structure Dynamics 28, 1235-1254 (1999).
8. Leiva, Juan Enrique. – “Diseño y fabricación de mesa vibratoria uni-direccional con un actuador hidráulico”.- Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas. Universidad de Chile 2007.
9. Ogata, Katsuhiko – “Ingeniería de control moderna” Cuarta edición – Editorial Pearson Educación, 2003.
10. N. Ogawa, K. Kajiwara, K. Ohtani y T. Katayama – “Construction and use of the 3-D full scale earthquake testing facility” - 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structure, Control of structure, Yerevan, Armenia, 2003.
11. J. B. Ziegler and N. B. Nichols – “Optimum setting for automatic controllers” – ASME *Transactions*, v64 (1942).


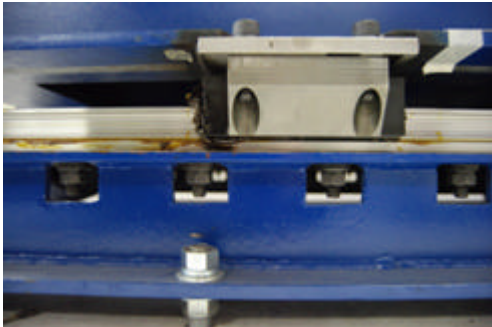






ANEXO A SECUENCIAS DE MONTAJE.

| A.1. Secuencia de refuerzo de la losa de reacción. | |
|---|--|
|  |  |
| (a) Losa preliminar | (b) Losa sin baldosa |
|  |  |
| (c) Detalle Losa sin baldosa | (d) Espárragos de conexión |
|  |  |
| (e) Armadura de refuerzo | (f) Proceso de hormigonado |
|  |  |
| (g) Hormigonado final | (h) Losa final Reforzada. |
| Figura A. 1. Proceso de refuerzo de losa de reacción | |

| A.2. Secuencia ampliación de caseta de unidad de potencia. | |
|--|--|
|  <p>(a) Caseta original</p> |  <p>(b) Colocación de pilar</p> |
|  <p>(c) Ampliación Muro</p> |  <p>(d) Alzaprimado de losa</p> |
|  <p>(e) Armadura Losa</p> |  <p>(f) Descimbre</p> |
|  <p>(g) Instalación de tuberías</p> |  <p>(h) Caseta Ampliada</p> |

Figura A. 2. Proceso de ampliación de caseta.**A.3. Secuencia de modificación de diseño de la mesa.****(a)** Plataforma de Acero (Mesa)**(b)** Giro de la mesa**(c)** Trazado de Ejes**(d)** Nivelación**(e)** Corte a perfil de la mesa y placa de refuerzo**(f)** Soldado de placa

| | |
|---|--|
|  |  |
| <p>(g) Mesa modificada</p> | <p>(h) Prueba preliminar con rieles de precisión</p> |
| <p>Figura A. 3. Proceso de modificación de la mesa.</p> | |
| <p>A.4. Secuencia montaje rieles y mesa.</p> | |
|  |  |
| <p>(a) Trazado de Ejes</p> | <p>(b) Marcado de puntos para anclajes</p> |
|  |  |
| <p>(c) Perforación para anclajes</p> | <p>(d) Colocación anclajes</p> |
|  |  |
| <p>(e) Detalle Anclajes Químicos</p> | <p>(f) Montaje preliminar</p> |

| | |
|---|--|
|  |  |
| (g) Detalle de conexión anclajes y rieles | (h) Detalle conexión rieles y mesa |
| Figura A. 4. Proceso de montaje de rieles y mesa. | |
| A.5. Secuencia montaje soporte y servo-actuador. | |
|  |  |
| (a) Trazado de Ejes | (b) Marcado de Anclajes de Suelo |
|  |  |
| (c) Perforaciones para anclajes Suelo | (d) Montaje Actuador |
|  |  |
| (e) Montaje acumuladores y mangueras | (f) Nivelación y marcado perforaciones muro |



(g) Grout de relleno

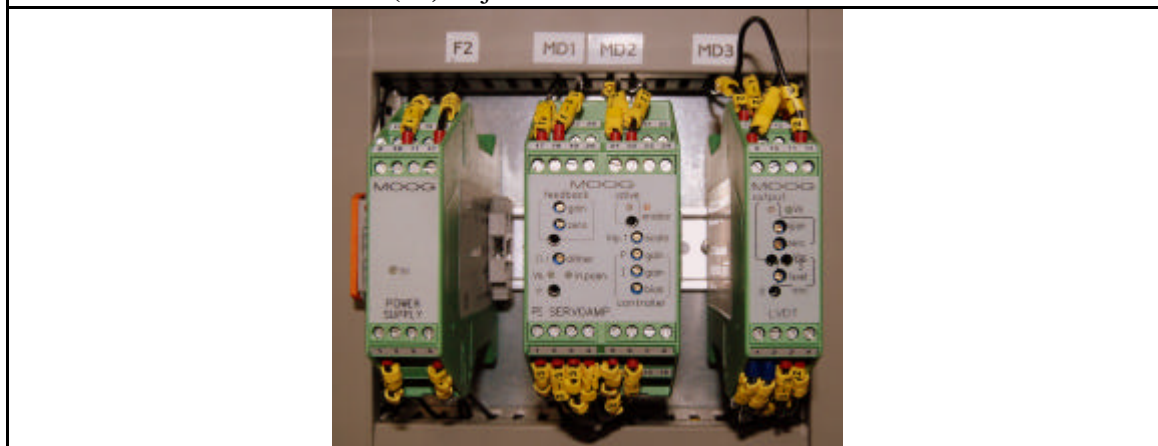
(h) Montaje final.

Figura A. 5. Proceso de montaje de soporte y actuador oleo-hidráulico.

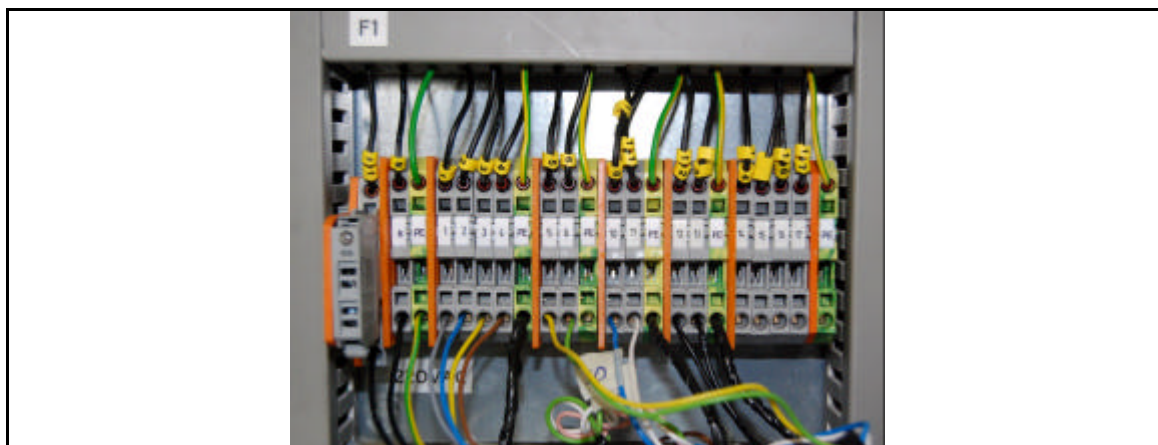
A.6. Secuencia montaje de equipos electrónicos 1.



(a) Caja de módulos eléctricos



(c) Detalle módulos eléctricos



(d) Conexiones eléctricas

Figura A. 6. Proceso de montaje de equipos electronicos



(e) Detalle de conexión de recepción de señales del computador



(f) Detalle de conexión de envío de señales a servo-válvula.

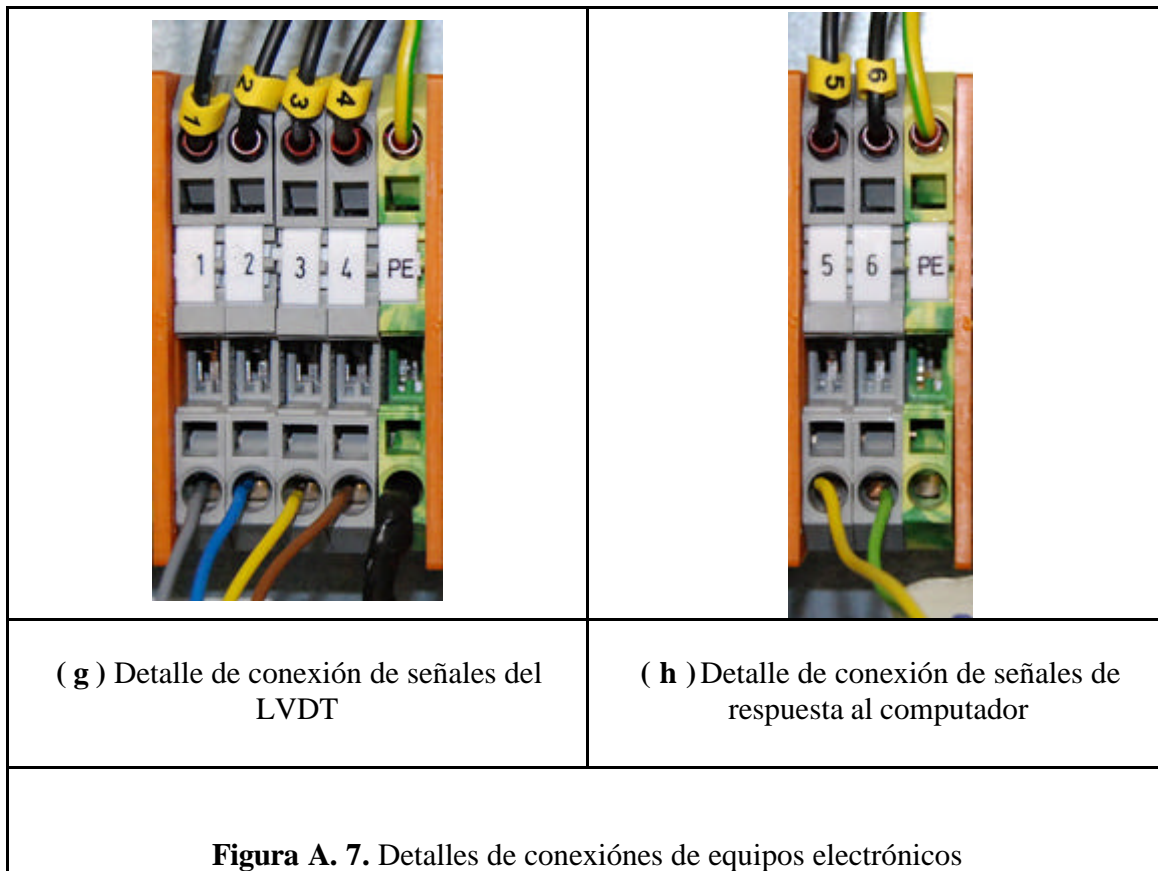
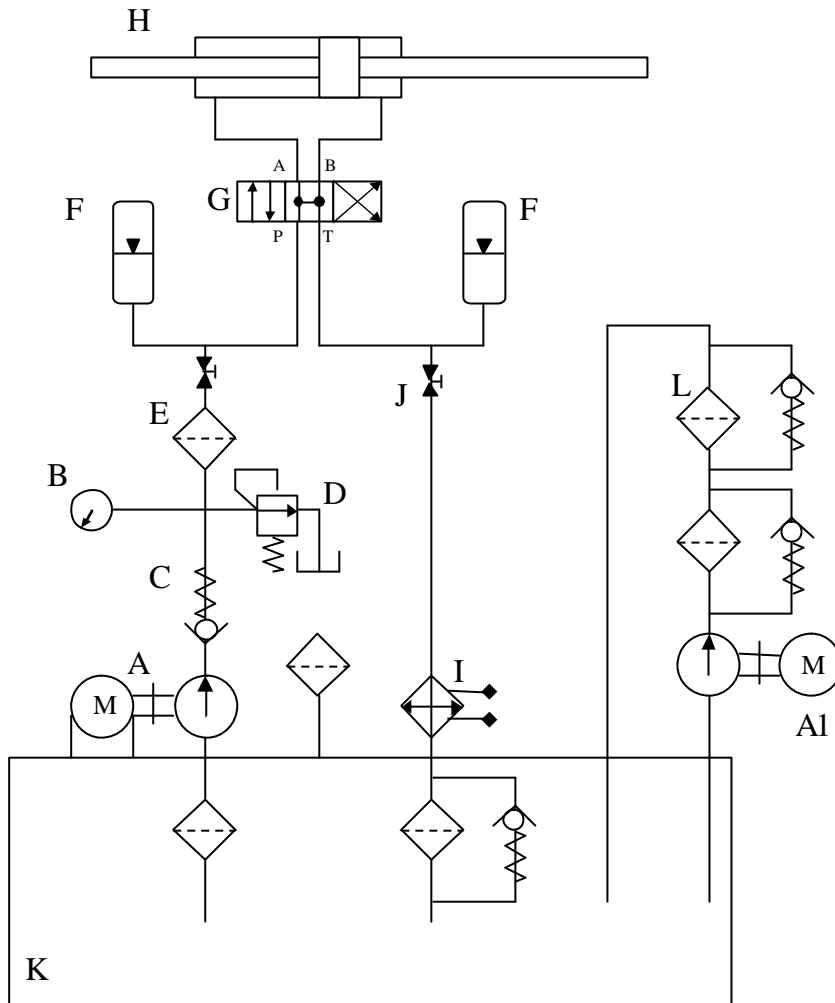


Figura A. 8

ANEXO B DIAGRAMAS DE FLUJO.

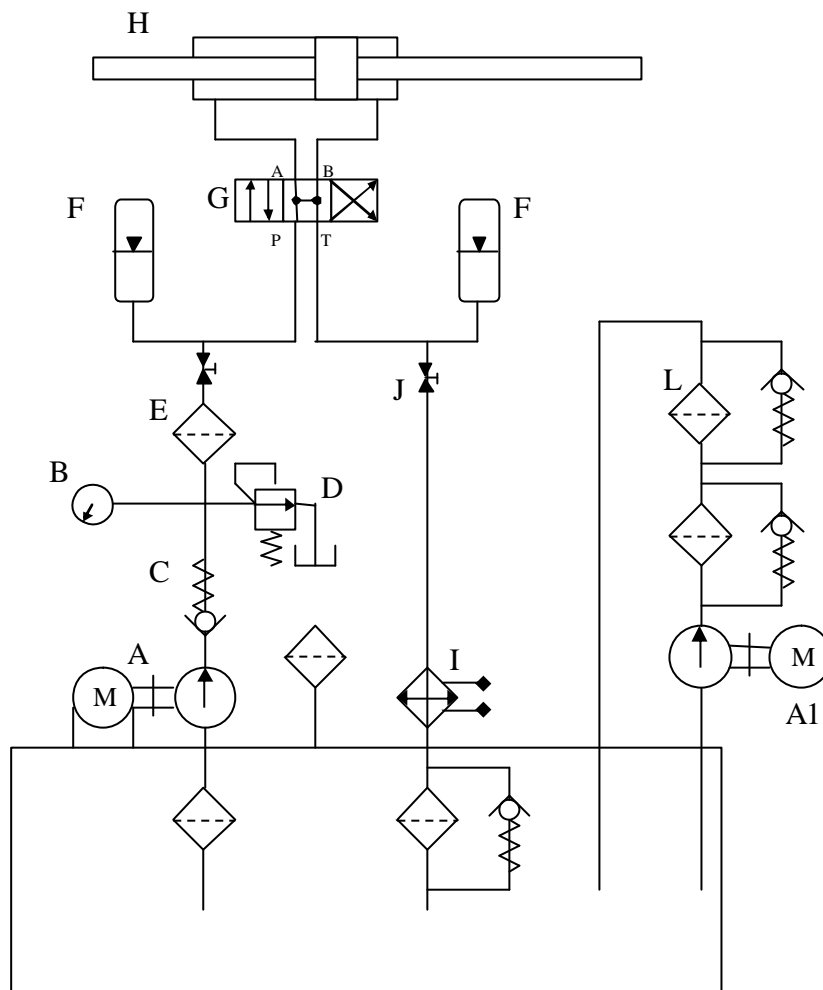
B.1. Diagrama de flujo de unidad de potencia original.



| | |
|--|---------------------------------------|
| A.- Bomba Primaria (Paletas) – Motor | F.- Acumuladores Hidráulicos. |
| A1.- Bomba Secundaria – Motor | G.- Servo – Válvula de control. |
| B.- Manómetro. | H.- Servo – Actuador (<i>gato</i>). |
| C.- Válvula antirretorno calibrada (válvula check) | I.- Intercambiador de calor. |
| D.- Válvula limitadora de presión. | J.- Válvulas de aislamiento. |
| E.- Filtro de alta presión. | K.- Deposito de aceite [200 lts.] |
| | L.- Filtro purificador. |

Figura B. 1. Diagrama de flujo de unidad de potencia original.

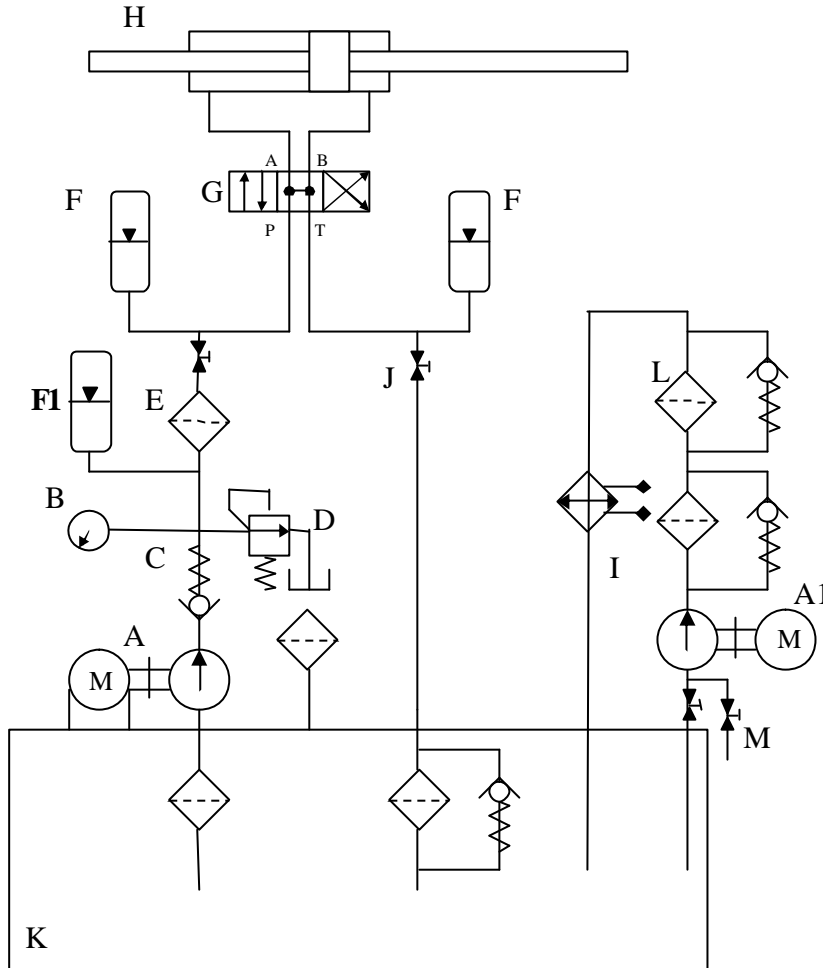
B.2. Diagrama de flujo unidad de potencia 2° diseño.



| | |
|--|--|
| A.- Bomba Primaria (Pistón) – Motor | F.- Acumuladores Hidráulicos. |
| A1.- Bomba Secundaria – Motor | G.- Servo – Válvula de control. |
| B.- Manómetro. | H.- Servo – Actuador (<i>gato</i>). |
| C.- Válvula antirretorno calibrada (válvula check) | I.- Intercambiador de calor. |
| D.- Válvula limitadora de presión. | J.- Válvulas de aislamiento. |
| E.- Filtro de alta presión. | K.- Deposito de aceite [400 lts]. |
| | L.- Filtro purificador. |

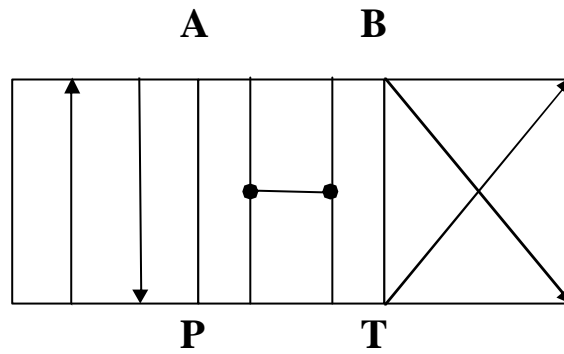
Figura B. 2. Diagrama de flujo de 2° unidad de potencia.

B.3. Diagrama de flujo unidad de potencia definitiva.



| | |
|---|---------------------------------------|
| A.- Bomba Primaria (Pistón) – Motor. | F1.- Acumulador Hidráulico. |
| A1.- Bomba Secundaria – Motor. | G.- Servo – Válvula de control. |
| B.- Manómetro. | H.- Servo – Actuador (<i>gato</i>). |
| C.- Válvula antirretorno calibrada (válvula check). | I.- Intercambiador de calor. |
| D.- Válvula limitadora de presión. | J.- Válvulas de aislamiento. |
| E.- Filtro de alta presión. | K.- Deposito de aceite [400 lts.]. |
| F.- Acumuladores Hidráulicos. | L.- Filtro purificador. |
| | M.- Válvula de llenado |

Figura B. 3. Diagrama de flujo unidad de potencia definitiva

B.4. Diagrama de flujo servo-válvula.

Donde,

P : Corresponde a la llegada del flujo de aceite suministrado

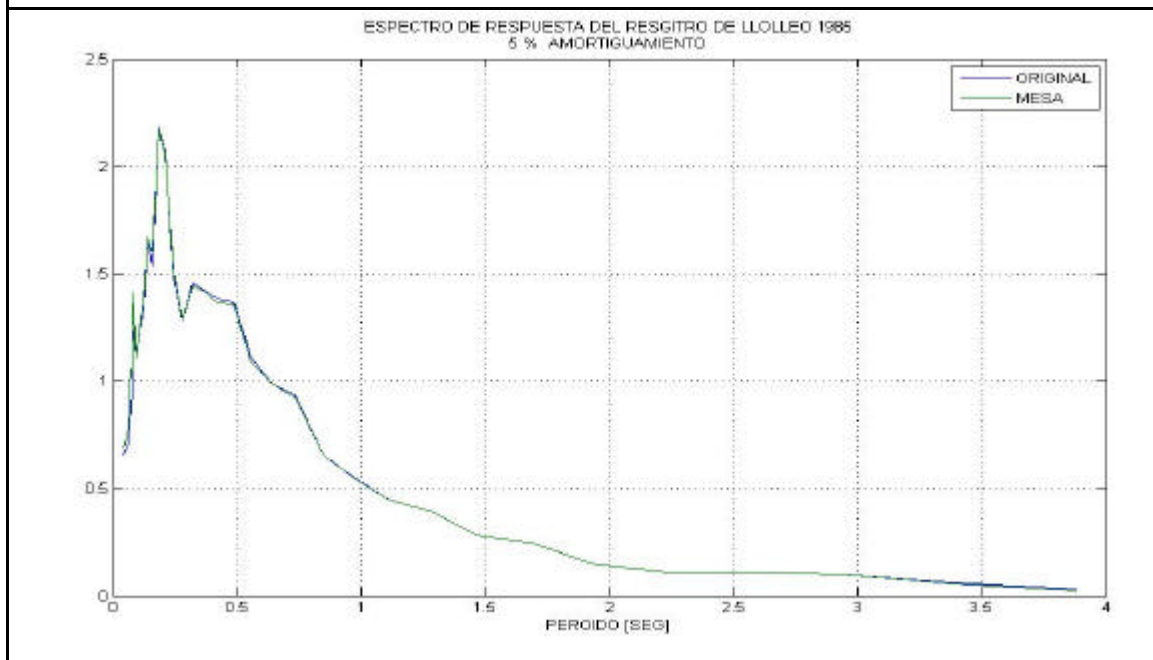
T : Retorno al depósito de aceite.

A y B : Conductos de trabajo para suministrar aceite a las cámaras del actuador

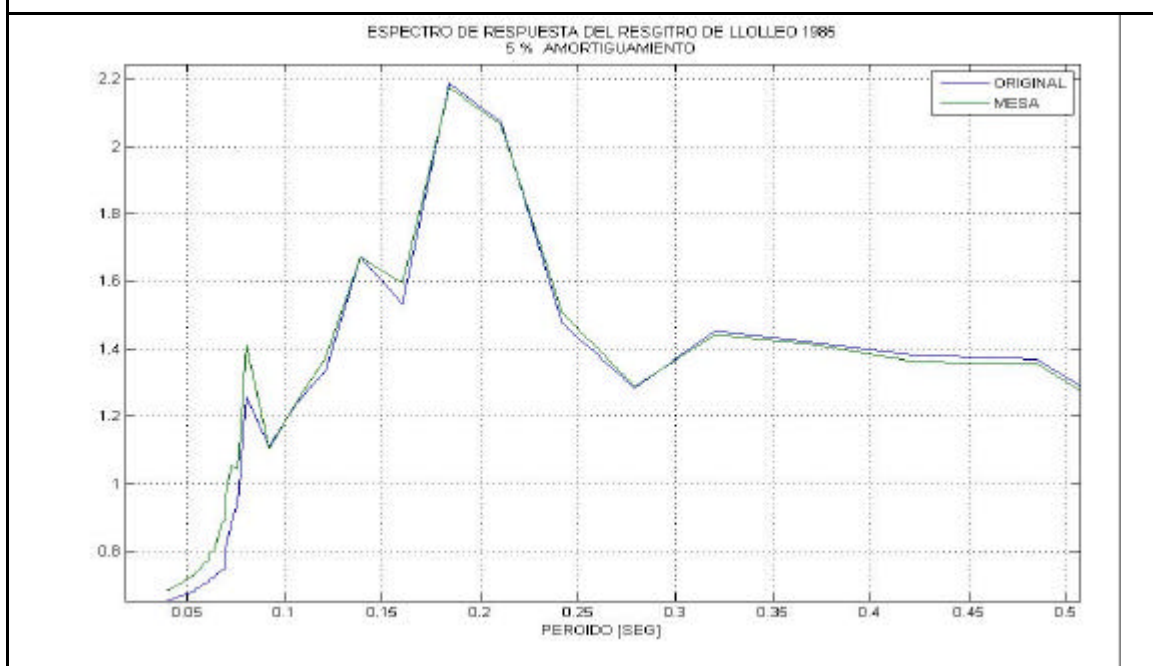
Figura B. 4. Diagrama de flujo interno de la servo-válvula.

ANEXO C REGISTROS.

C.1. Comparación entre espectros de respuesta del registro sísmico de Lolloe EW 1985.



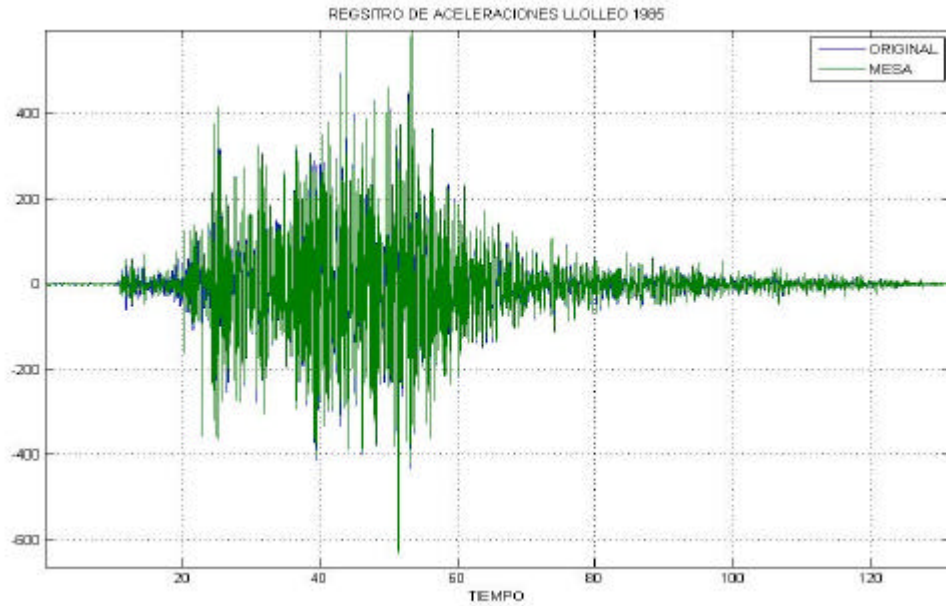
(a) Comparación entre espectros de respuesta Lolloe 1985 con 5 % amortiguamiento.



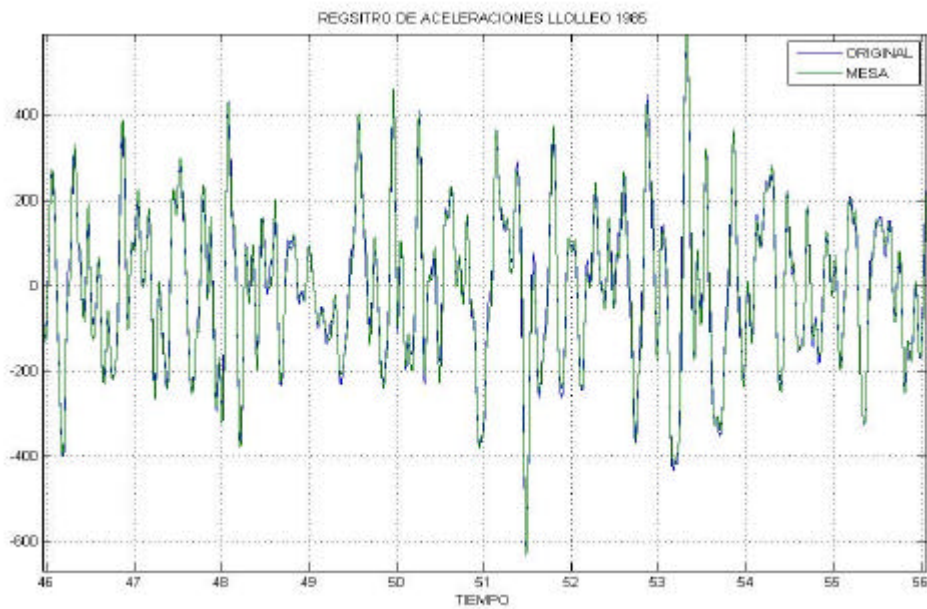
(b) Detalle de (a).

Figura C. 1. Comparación entre el espectro de respuesta del registro de Lolloe 1985 con 5 % de amortiguamiento y el espectro de respuesta obtenido de la mesa.

C.2. Comparación de serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Lollole EW 1985.

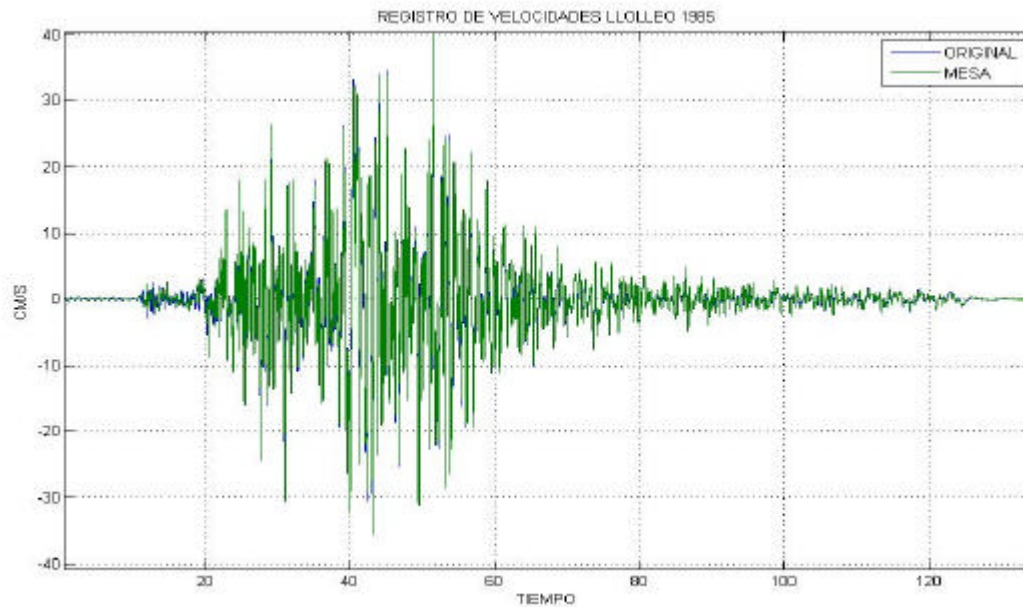
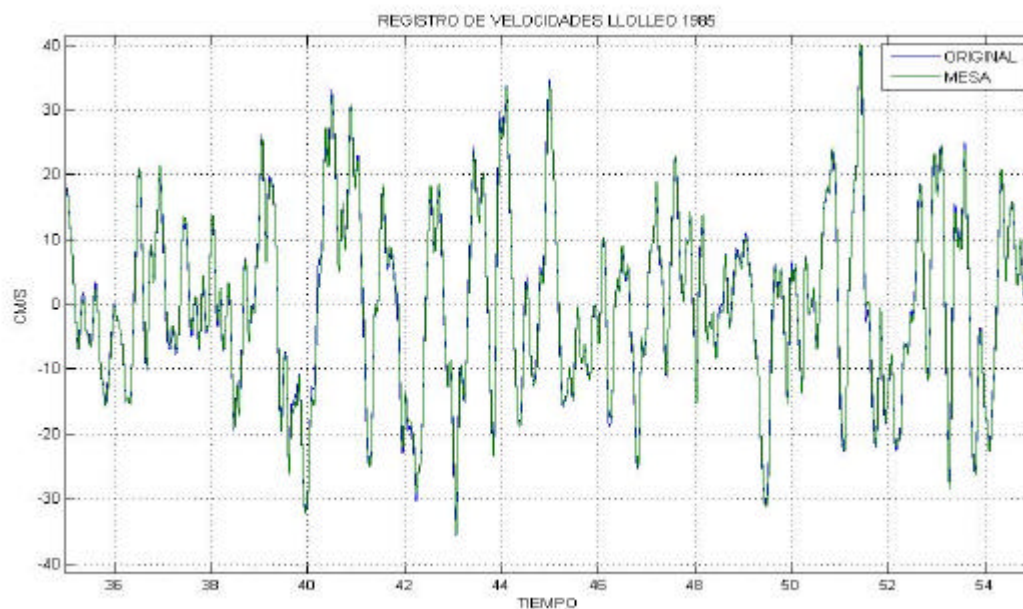


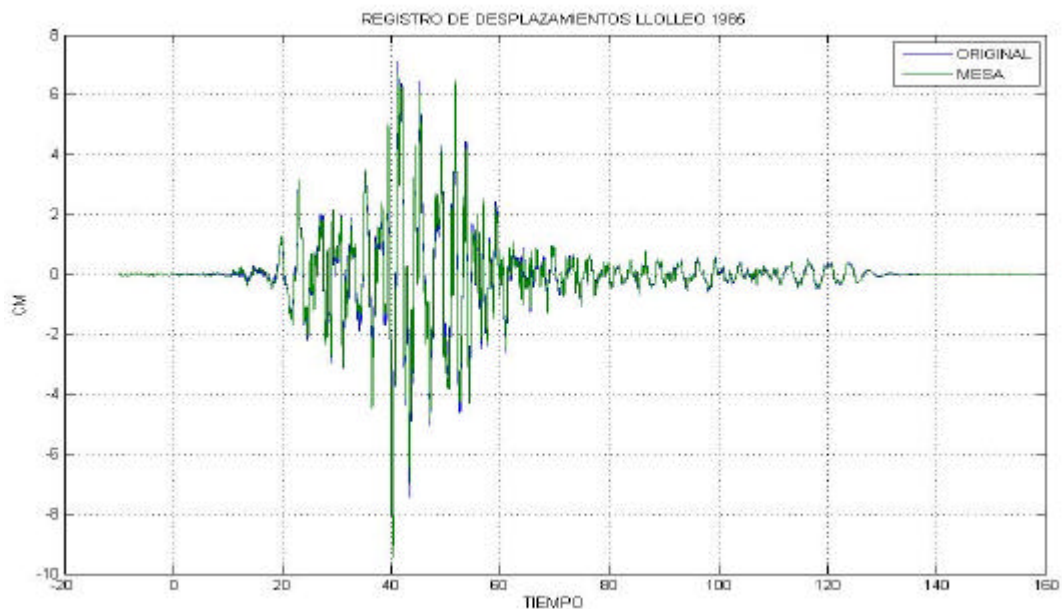
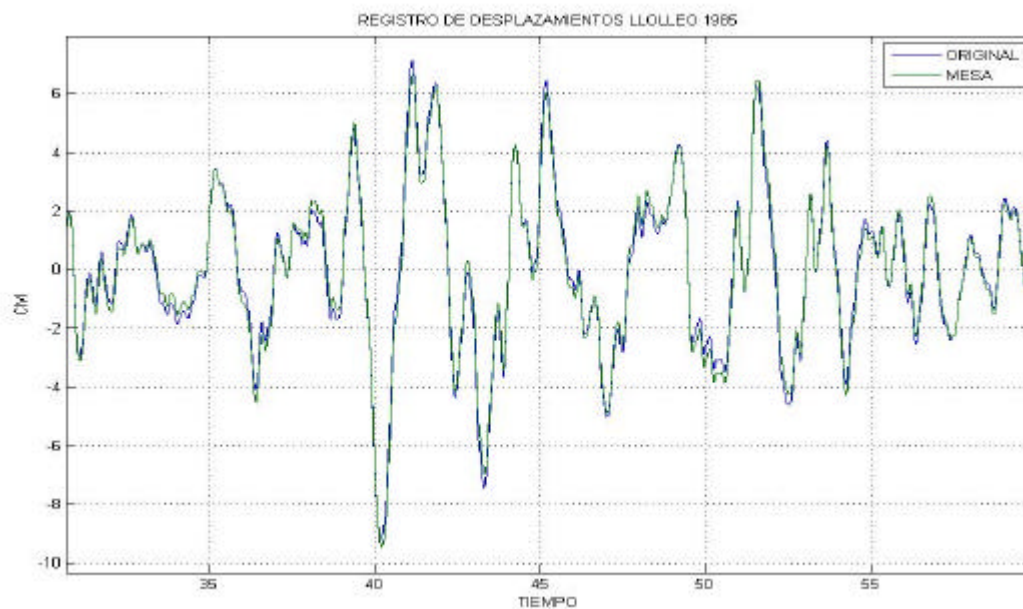
(a) Serie de tiempo de Aceleraciones Lollole EW 1985



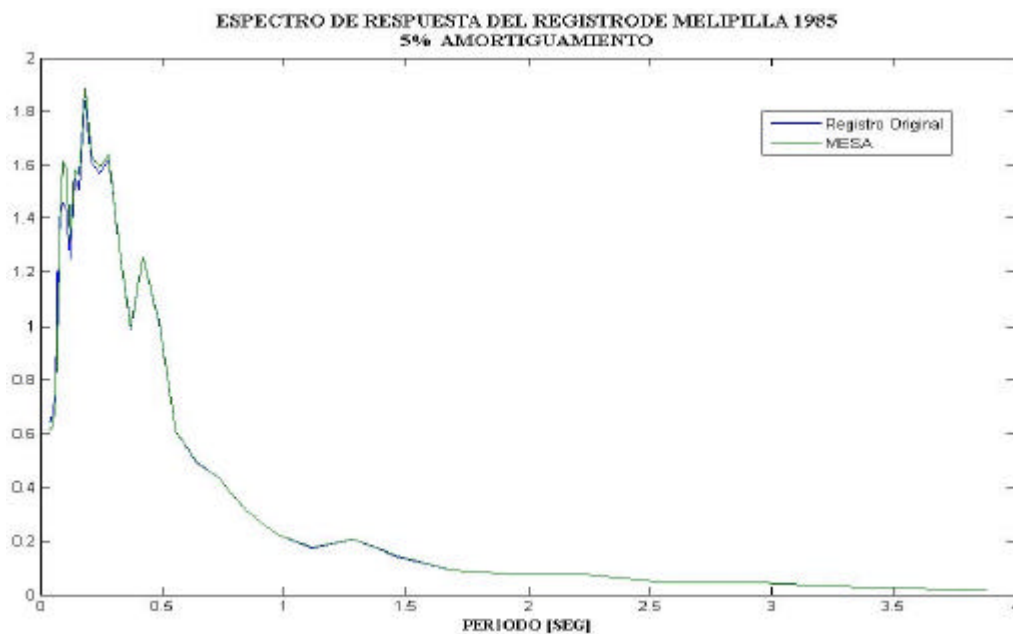
(b) Detalle de la zona de máximas Aceleraciones de (a)

Figura C. 2. Comparación entre las series de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Lollole 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

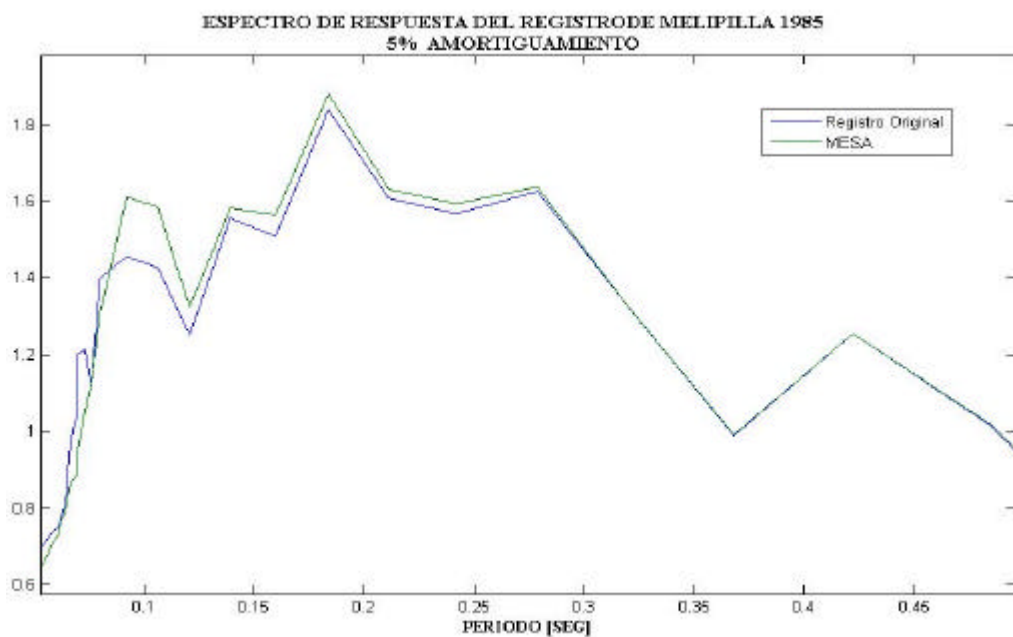
C.3. Comparación de serie de tiempo de velocidades del registro sísmico de Lollole EW 1985.**(a)** Serie de tiempo de Velocidades Lollole EW 1985**(b)** Detalle de zona de máximas velocidades de (a)**Figura C. 3.** Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Lollole 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

C.4. Comparación de serie de tiempo de Desplazamientos del registro de Llolleo EW 1985.**(a)** Serie de tiempo de Desplazamientos Llolleo EW 1985**(b)** Detalle de zona de máximos desplazamientos de (a)**Figura C. 4.** Comparación entre las series de tiempo de Desplazamientos del registro sísmico de Llolleo 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

C.5. Comparación entre espectros de respuesta de registro sísmico de Melipilla NS 1985.



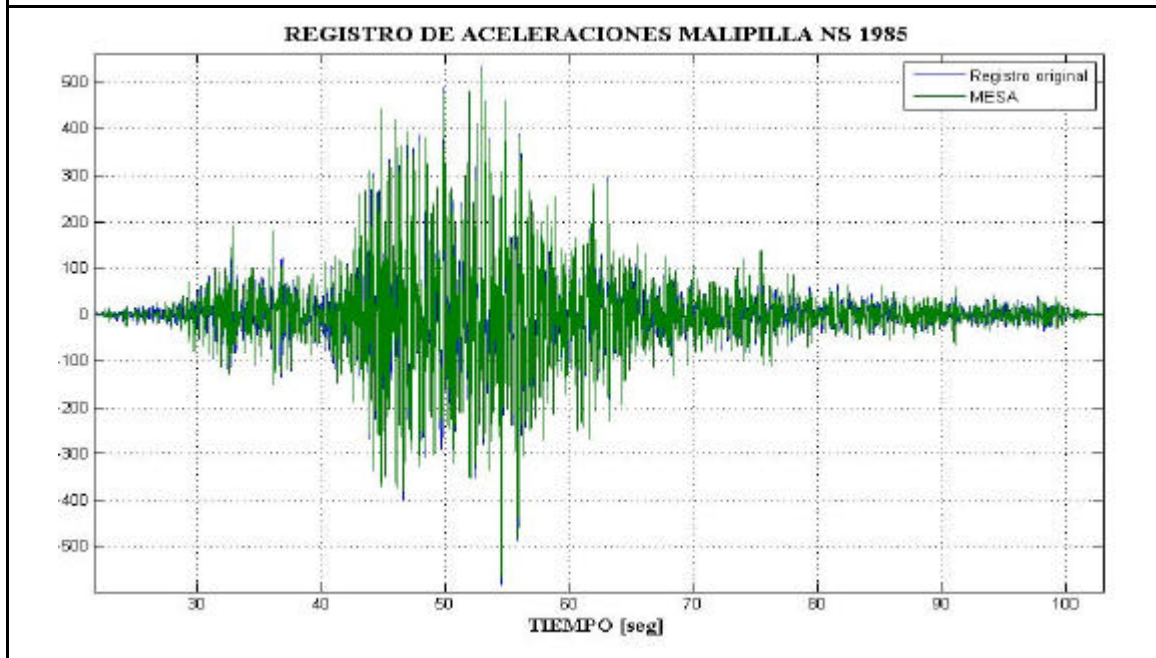
(a) Comparación entre espectros de respuesta Melipilla 1985 con 5 % amortiguamiento.



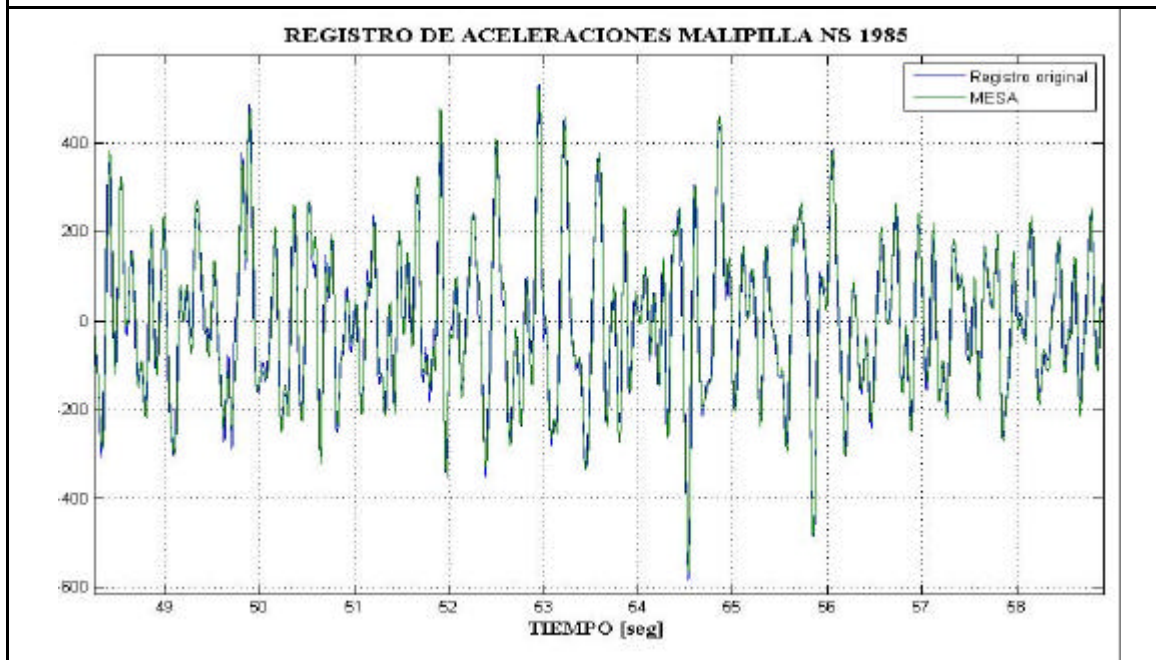
(b) Detalle de la zona de máxima frecuencia de (a).

Figura C. 5. Comparación entre el espectro de respuesta del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el espectro de respuesta obtenido de la mesa.

C.6. Comparación de serie de tiempo de aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985.



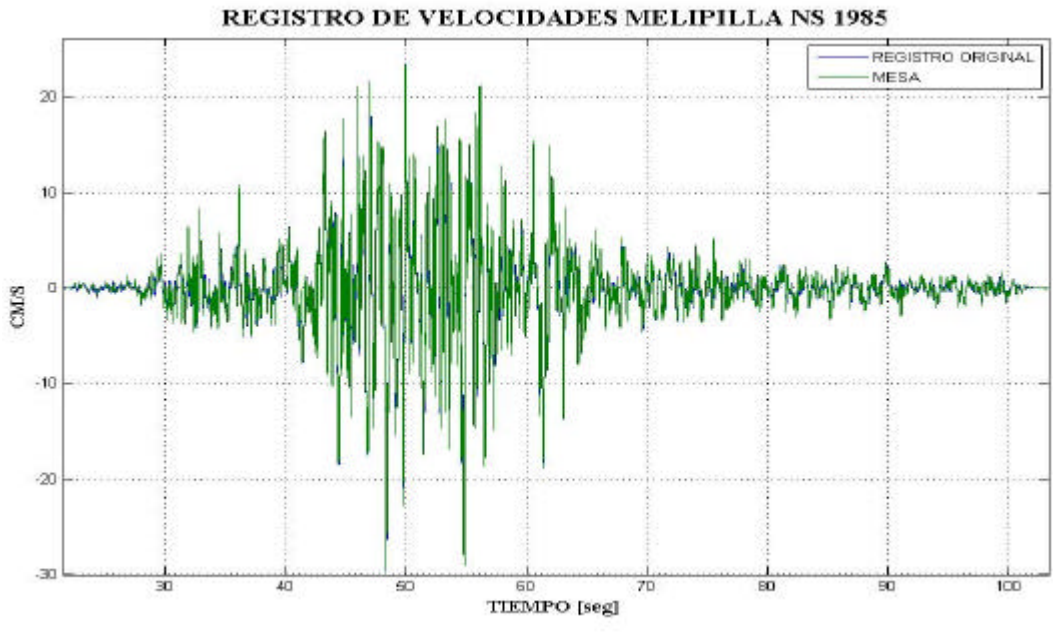
(a) Serie de tiempo de Aceleraciones Melipilla NS 1985



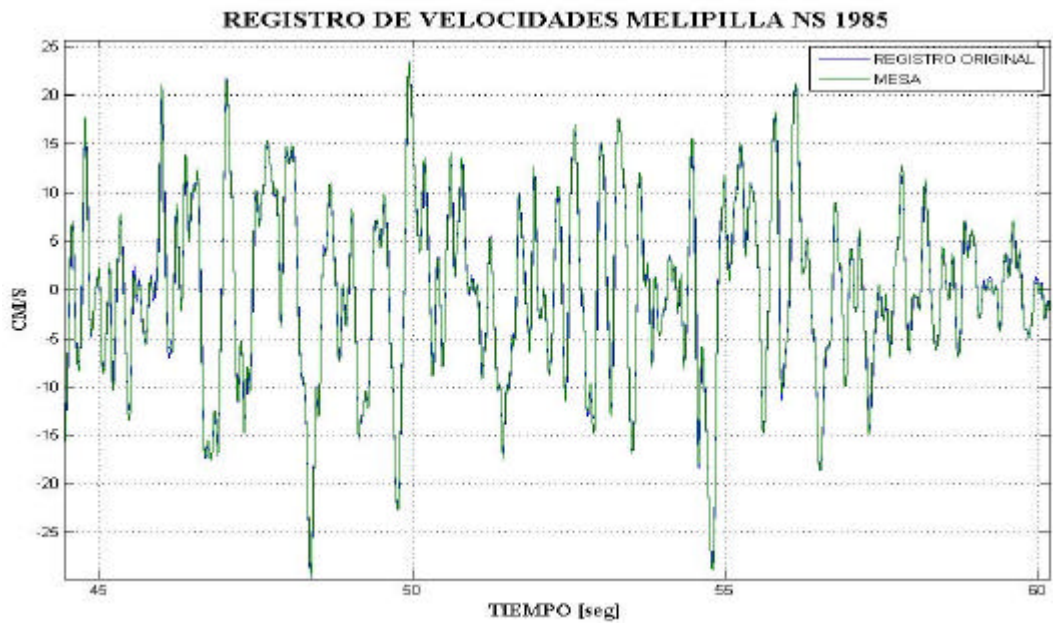
(b) Detalle de la zona de máximas aceleraciones de (a)

Figura C. 6. Comparación entre las series de tiempo de Aceleraciones del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

C.7. Comparación de serie de tiempo de velocidades del registro sísmico de Melipilla NS 1985.



(a) Serie de tiempo de Velocidades Melipilla NS 1985



(b) Detalle de la zona de máximas Velocidades de (a)

Figura C. 7. Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

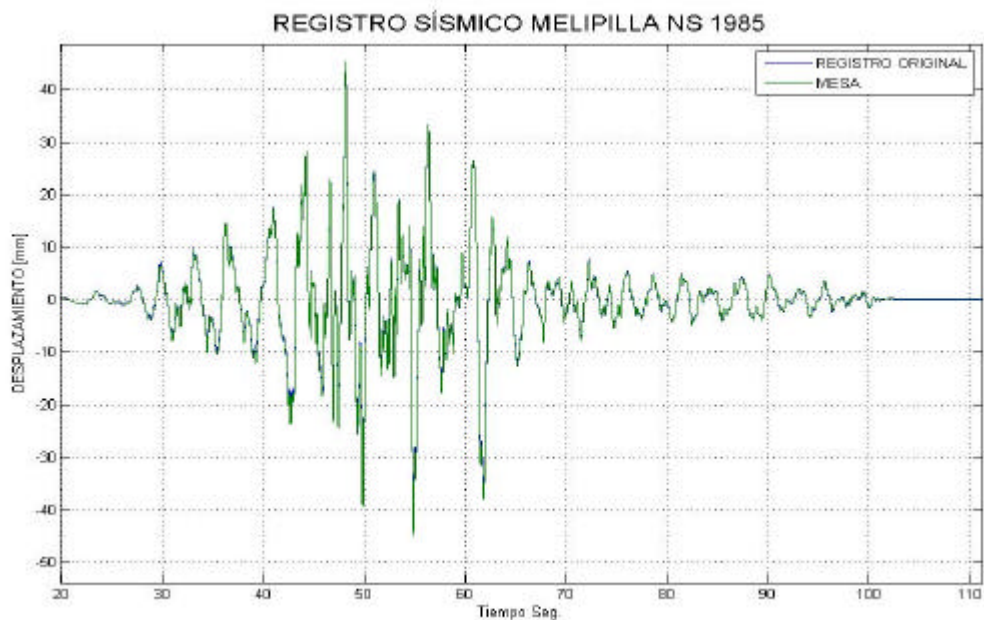
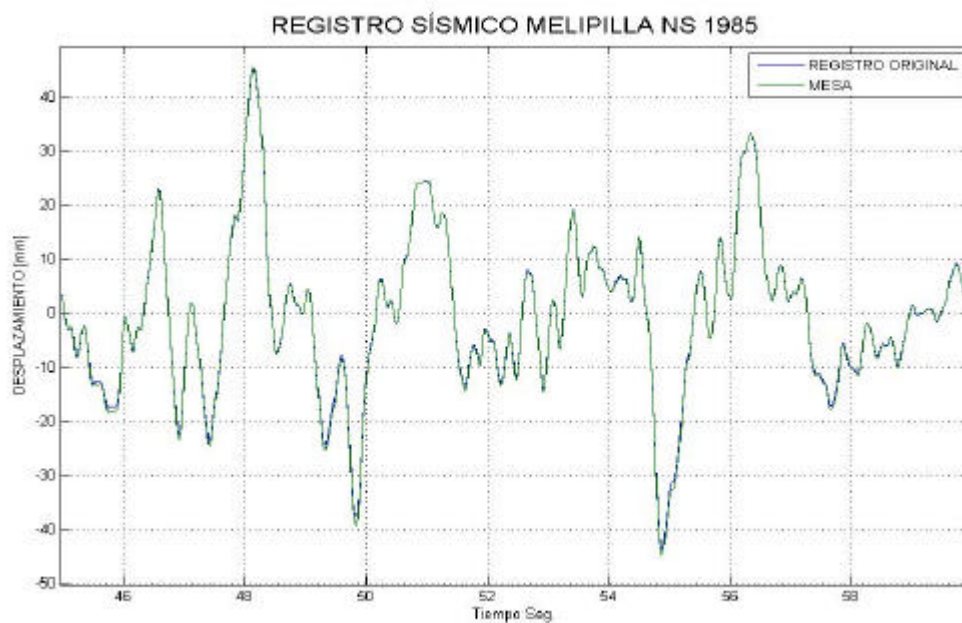
C.8. Comparación de serie de tiempo de desplazamientos del registro sísmico de Melipilla NS 1985.**(a)** Serie de tiempo de Desplazamientos Melipilla NS 1985**(b)**Detalle de la zona de máximos desplazamientos de (a)

Figura C. 8. Comparación entre las series de tiempo de Velocidades del registro sísmico de Melipilla 1985 con 5 % de amortiguamiento y el obtenido de la mesa.

ANEXO D VALIDACIÓN NUMERICA.

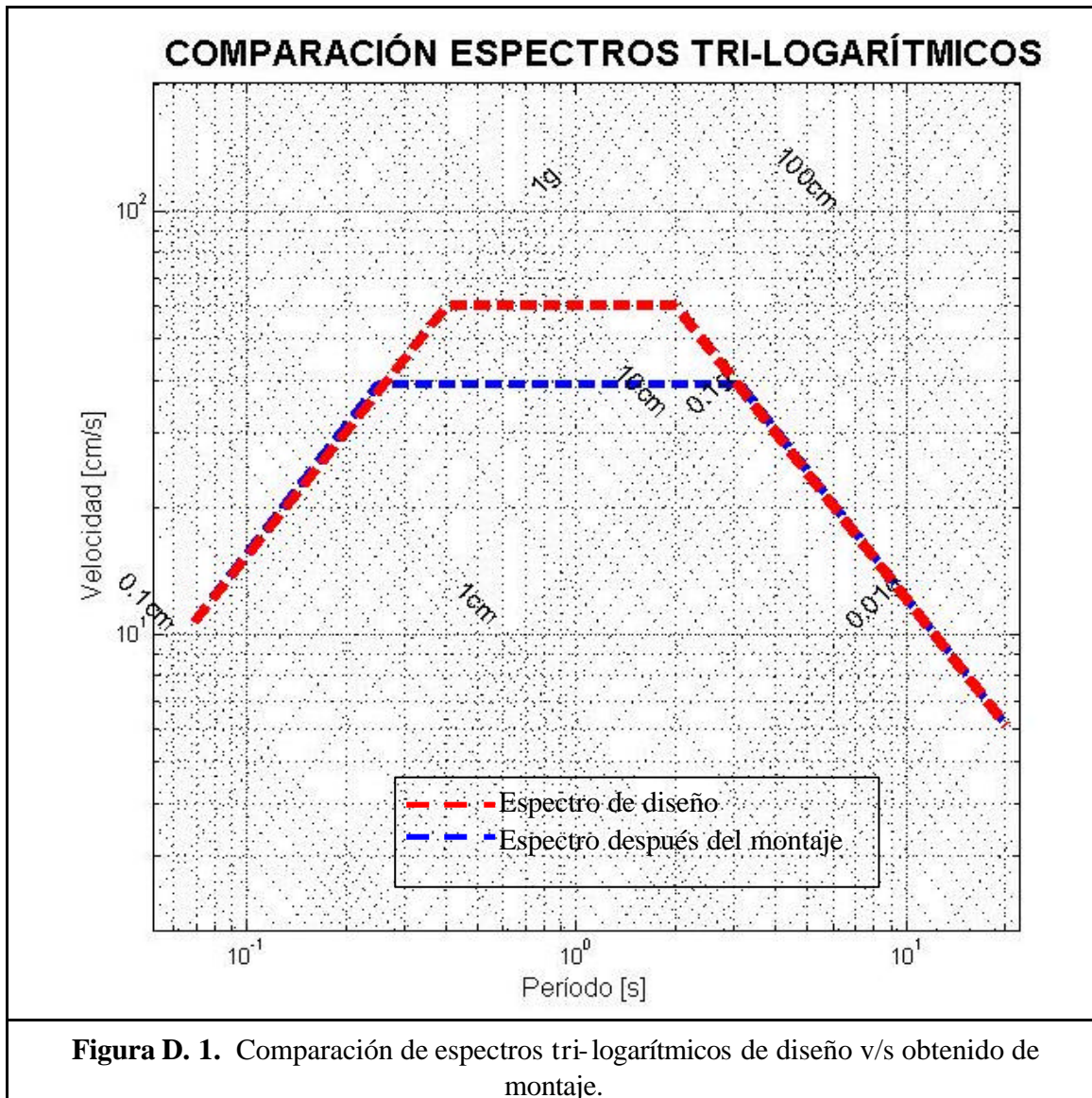
D.1. Validación numérica.

D.1.1. Introducción

Luego de todos los cambios realizados al equipo hidráulico señalados en el acápite anterior, fue necesario validar numéricamente estos equipos frente a los requerimientos de la mesa. Del montaje se obtuvieron las diferencias mostradas en la **Tabla 4.1** con respecto a los parámetros de diseño originales.

| Tabla D.1 Parámetros reales de la mesa. | | |
|--|---------------|-----------------|
| Parámetro | Diseño | Reales |
| Peso máximo | 3 [Ton] | 3 [Ton] |
| Desplazamiento máximo | $\pm 0,2$ [m] | $\pm 0,195$ [m] |
| Aceleración máxima | 1,00 [g] | 1,00 [g] |
| Velocidad máxima | $0,6$ [m/s] | $0,4$ [m/s] |
| Frecuencia | 15 [Hz] | 15 [Hz] |

Con estos nuevos parámetros fue posible obtener una curva trazada en un gráfico tri-logarítmico (**Figura D. 1**), donde se muestra la comparación entre los espectros tri-logarítmicos de diseño y el obtenido luego del montaje. Éste último espectro fue usado para validar la respuesta teórica de la mesa, pero calculada con los rangos reales obtenidos del montaje, para un máximo de aceleración de 1[g], velocidad de 0,4 [m/s] y desplazamientos de $\pm 0,195$ [m] se obtendrán los desplazamientos, velocidades y aceleraciones para distintos periodos. Además, fueron consideradas dos condiciones de carga, una con el prototipo y otra sin carga de prototipo, debido a la momentánea imposibilidad de conseguir un prototipo de 3 [Ton], y puesto que fue absolutamente necesario obtener los límites teóricos del sistema para evitar dañarlos.



Los resultados se obtienen en base a los diámetros del embolo y vástago, caudal nominal, variación de presión y masa. Las fórmulas utilizadas son las siguientes.

1. $F = m \cdot a$
2. $F = P_{carga} \cdot A$
3. $v = w \cdot d$
4. $a = w^2 \cdot d$
5. $Q = v \cdot A$

6. $\frac{Q}{Q_n} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_n}}$
7. $?P = 175 - P_{carga}$
8. $w = 2 \cdot p \cdot f$

Donde;

- F : Fuerza.
 P_{carga} : Presión de carga
 m : Masa total (mesa y prototipo)
 d : Desplazamiento.
 v : Velocidad.
 a : Aceleración.
 w : Frecuencia angular.
 f : Frecuencia.
 A : Área útil.
 Q : Caudal.
 Q_n : Caudal no minal.
 $?P$: Variación de presión.
 $?P_n$: Variación de presión nominal.

D.1.2. Validación numérica

Para la validación numérica, ya definimos el diámetro del émbolo y vástago del actuador, se calcula el caudal, la presión y la fuerza para distintos periodos. Los datos utilizados son los siguientes:

| | |
|-------------------------------|---|
| Diámetro del émbolo : | $D_{\text{émbolo}} = 80$ [mm] |
| Diámetro vástago : | $D_{\text{vástago}} = 56$ [mm] |
| Área útil : | $A_{\text{útil}} = 25.6$ [cm ²] |
| Caudal Nominal : | $Q_n = 63$ [$\frac{lt}{\text{min}}$] |
| Variación de presión nominal: | $?P_n = 1000$ [psi] ~70 [bar] |

Para la masa m se considerarán 2 casos: la mesa sin prototipo (**Tabla D.2**) y con un prototipo de 3000 kg (carga máxima de diseño) con esto se tendrán los casos más extremos de funcionamiento del equipo (**Tabla D.3**).

Los valores calculados se observan en las siguientes tablas:

Tabla D.2. Validación numérica sin carga de prototipo.

| t | f | d | v | a | Finercial | Q | Qn | DP | Pcarga | Fmax |
|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|----------|----------|--------|--------|-------|
| [s] | [Hz] | [cm] | [cm/s] | [g] | [kgf] | [lt/min] | [lt/min] | [bar] | [bar] | [kgf] |
| 0.033 | 30.00 | 0.18 | 33.16 | 6.377 | 3189 | 50.9 | 60 | 50.433 | 124.6 | 3189 |
| 0.040 | 25.00 | 0.23 | 36.43 | 5.84 | 2920 | 56.0 | 60 | 60.898 | 114.1 | 2921 |
| 0.048 | 20.68 | 0.30 | 39.08 | 5.182 | 2591 | 60.0 | 60 | 70.051 | 104.9 | 2687 |
| 0.067 | 15.00 | 0.41 | 39.08 | 3.758 | 1879 | 60.0 | 60 | 70.045 | 105.0 | 2687 |
| 0.080 | 12.50 | 0.50 | 39.08 | 3.132 | 1566 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.083 | 12.00 | 0.52 | 39.08 | 3.007 | 1503 | 60.0 | 60 | 70.059 | 104.9 | 2686 |
| 0.1 | 10.00 | 0.62 | 39.08 | 2.506 | 1253 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.2 | 5.00 | 1.24 | 39.08 | 1.253 | 626 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.3 | 3.33 | 1.87 | 39.08 | 0.835 | 418 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.35 | 2.86 | 2.18 | 39.08 | 0.716 | 358 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.4 | 2.50 | 2.49 | 39.08 | 0.626 | 313 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.6 | 1.67 | 3.73 | 39.08 | 0.418 | 209 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 0.8 | 1.25 | 4.98 | 39.08 | 0.313 | 157 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 1 | 1.00 | 6.22 | 39.08 | 0.251 | 125 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 2 | 0.50 | 12.44 | 39.08 | 0.125 | 63 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 2.5 | 0.40 | 15.55 | 39.08 | 0.1 | 50 | 60.0 | 60 | 70.068 | 104.9 | 2686 |
| 3 | 0.33 | 18.66 | 39.08 | 0.084 | 42 | 60.0 | 60 | 70.053 | 104.9 | 2687 |
| 3.135 | 0.32 | 19.50 | 39.08 | 0.08 | 40 | 60.0 | 60 | 70.070 | 104.9 | 2686 |
| 4 | 0.25 | 19.50 | 30.63 | 0.049 | 25 | 47.0 | 60 | 43.041 | 132.0 | 3378 |
| 6 | 0.17 | 19.50 | 20.42 | 0.022 | 11 | 31.4 | 60 | 19.130 | 155.9 | 3990 |
| 8 | 0.13 | 19.50 | 15.32 | 0.012 | 6 | 23.5 | 60 | 10.760 | 164.2 | 4205 |
| 10 | 0.10 | 19.50 | 12.25 | 0.008 | 4 | 18.8 | 60 | 6.887 | 168.1 | 4304 |
| 20 | 0.05 | 19.50 | 6.13 | 0.002 | 1 | 9.4 | 60 | 1.722 | 173.3 | 4436 |

Los puntos de periodos 0.048 y 3.315 son los puntos esquina del espectro sintético pues son los puntos donde por una parte se obtienen las mayores fuerzas inerciales con la máxima velocidad 39.08 [cm/s], que usa todo el caudal de aceite disponible. Cabe destacar que este punto contempla una frecuencia aprox. de 20 [Hz], que es muy superior a la frecuencia de diseño. El otro punto es donde convergen el máximo desplazamiento con la máxima velocidad.

Tabla D.3. Validación Numérica con carga máxima (*prototipo 3 [Ton]*).

| Validación numérica servo-actuador | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|----------|--------------------------------|---------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|
| t [s] | f [Hz] | d [cm] | v [cm/s] | a [g] | F _{inercial} [kgf] | Q [lt/min] | Q _n [lt/min] | ? P [bar] | P _{carga} [bar] | F _{max} [kgf] |
| 0.033 | 30.00 | 0.03 | 5.20 | 1.000 | 3500 | 8.0 | 60 | 1.240 | 187.8 | 4807 |
| 0.040 | 25.00 | 0.04 | 6.24 | 1.000 | 3498 | 9.6 | 60 | 1.784 | 187.2 | 4793 |
| 0.060 | 16.67 | 0.09 | 9.36 | 1.000 | 3501 | 14.4 | 60 | 4.021 | 185.0 | 4735 |
| 0.067 | 15.00 | 0.11 | 10.40 | 1.000 | 3499 | 16.0 | 61 | 4.796 | 184.2 | 4716 |
| 0.080 | 12.50 | 0.16 | 12.48 | 1.000 | 3501 | 19.2 | 60 | 7.145 | 181.9 | 4655 |
| 0.083 | 12.00 | 0.17 | 13.00 | 1.000 | 3500 | 20.0 | 59 | 8.016 | 181.0 | 4633 |
| 0.100 | 10.00 | 0.25 | 15.60 | 1.000 | 3501 | 24.0 | 60 | 11.166 | 177.8 | 4553 |
| 0.150 | 6.67 | 0.56 | 23.39 | 1.000 | 3500 | 35.9 | 60 | 25.107 | 163.9 | 4196 |
| 0.190 | 5.26 | 0.90 | 29.63 | 1.000 | 3499 | 45.5 | 60 | 40.276 | 148.7 | 3807 |
| 0.200 | 5.00 | 0.99 | 31.20 | 1.000 | 3500 | 47.9 | 61 | 43.194 | 145.8 | 3733 |
| 0.250 | 4.00 | 1.45 | 36.48 | 0.936 | 3274 | 56.0 | 60 | 61.051 | 127.9 | 3275 |
| 0.300 | 3.33 | 1.87 | 39.08 | 0.835 | 2923 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 0.350 | 2.86 | 2.18 | 39.08 | 0.716 | 2506 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 0.400 | 2.50 | 2.49 | 39.08 | 0.626 | 2192 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 0.600 | 1.67 | 3.73 | 39.08 | 0.418 | 1462 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 0.800 | 1.25 | 4.98 | 39.08 | 0.313 | 1096 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 1.000 | 1.00 | 6.22 | 39.08 | 0.251 | 877 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 2.000 | 0.50 | 12.44 | 39.08 | 0.125 | 438 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 3.000 | 0.33 | 18.66 | 39.08 | 0.084 | 292 | 60.0 | 60 | 70.068 | 118.9 | 3045 |
| 3.135 | 0.32 | 19.50 | 39.08 | 0.080 | 280 | 60.0 | 60 | 70.070 | 118.9 | 3045 |
| 4.000 | 0.25 | 19.50 | 30.63 | 0.049 | 172 | 47.0 | 60 | 43.041 | 146.0 | 3737 |
| 6.000 | 0.17 | 19.50 | 20.42 | 0.022 | 76 | 31.4 | 60 | 19.130 | 169.9 | 4349 |
| 8.000 | 0.13 | 19.50 | 15.32 | 0.012 | 43 | 23.5 | 60 | 10.760 | 178.2 | 4563 |
| 10.000 | 0.10 | 19.50 | 12.25 | 0.008 | 27 | 18.8 | 60 | 6.887 | 182.1 | 4662 |
| 20.000 | 0.05 | 19.50 | 6.13 | 0.002 | 7 | 9.4 | 60 | 1.722 | 187.3 | 4794 |

Tabla D.4. Puntos críticos con carga máxima (*prototipo 3 [Ton]*).

| Validación numérica servo-actuador | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|--------|-------|-----------------------|----------|----------------|--------|--------------------|------------------|
| t | f | d | v | a | F _{inercial} | Q | Q _n | ? P | P _{carga} | F _{max} |
| [s] | [Hz] | [cm] | [cm/s] | [g] | [kgf] | [lt/min] | [lt/min] | [bar] | [bar] | [kgf] |
| 0.067 | 15.00 | 0.11 | 10.40 | 1.000 | 3499 | 16.0 | 61 | 4.796 | 184.2 | 4716 |
| 0.251 | 3.99 | 1.56 | 39.08 | 1.000 | 3500 | 60.0 | 59 | 72.470 | 116.5 | 2983 |
| 3.135 | 0.32 | 19.50 | 39.08 | 0.080 | 280 | 60.0 | 60 | 70.070 | 118.9 | 3045 |
| 20.000 | 0.05 | 19.50 | 6.13 | 0.002 | 7 | 9.4 | 60 | 1.722 | 187.3 | 4794 |

La **Tabla D.3** muestra un detalle del cálculo teórico donde se aprecia claramente el punto esquina periodo 0.251 [seg.], en la **Tabla D.4** se muestran los puntos críticos, con los que es posible comparar los cálculos teóricos sin la carga de prototipo y con ésta. De estas tablas se desprenden los gráficos que se muestran en las **Figura D. 2** y **Figura D. 3**.

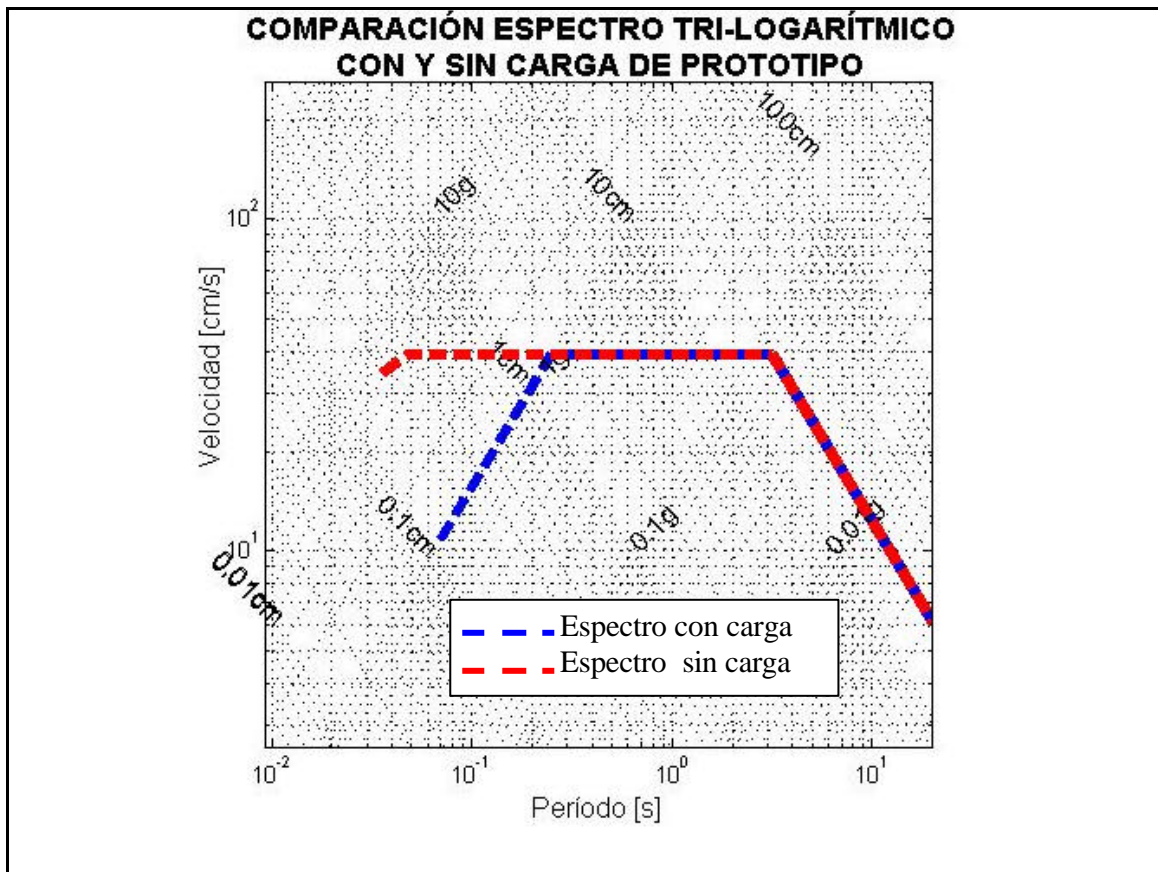
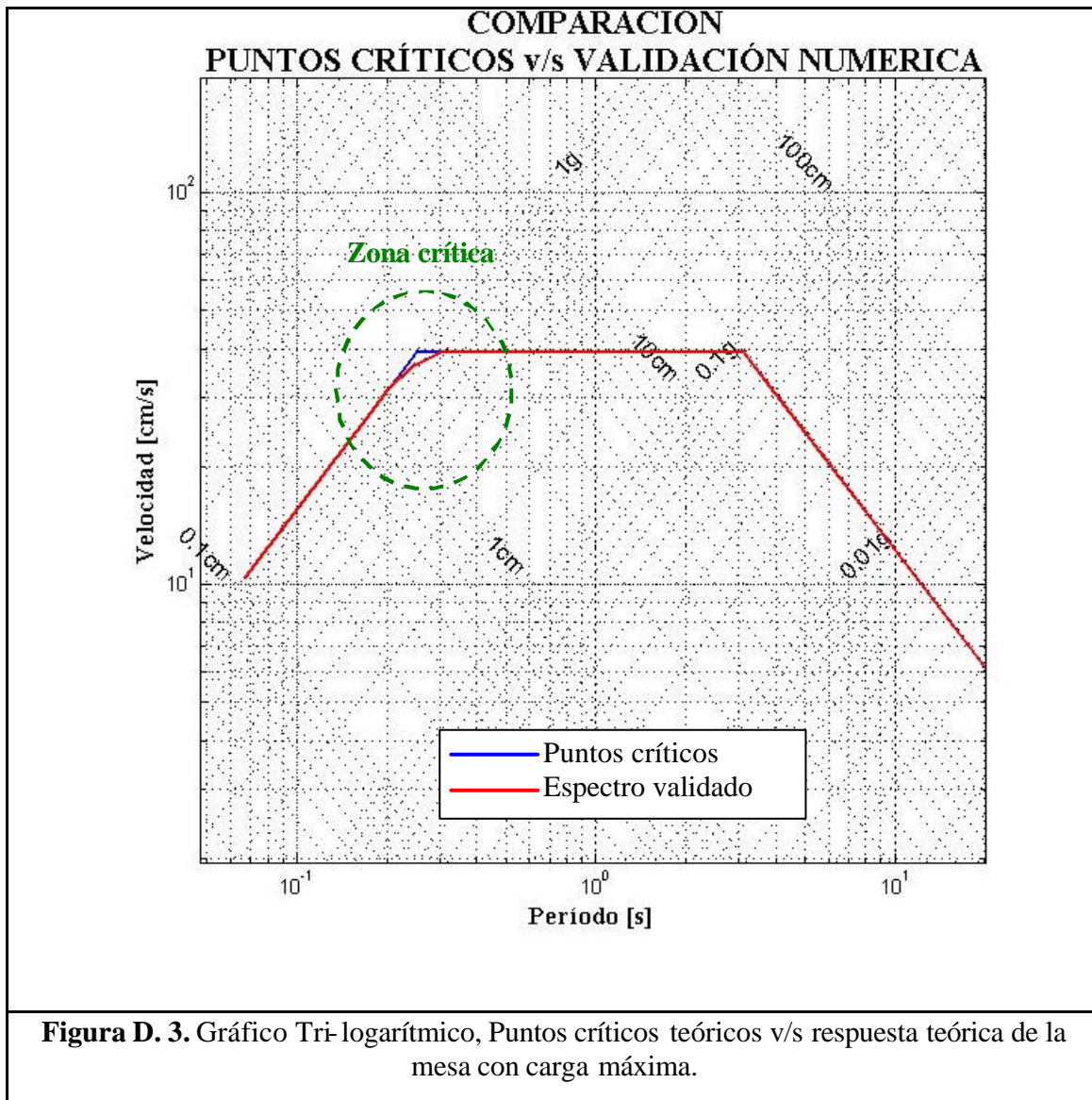


Figura D. 2. Gráfico Tri-logarítmico, Puntos críticos teóricos v/s respuesta teórica de la mesa sin carga.

En la **Figura D. 2** se muestra la comparación entre las respuestas teóricas de la mesa con y sin carga de prototipo, de aquí se desprende que la mesa como equipo hidráulico en teoría podría superar los 6 [g] de aceleración estando sin carga y que la limitante en ese caso sería el caudal. Se observa además que la mesa en teoría podría barrer completamente el rango de puntos críticos determinado en la **Tabla D.4**.



En la **Figura D. 3** se muestra la comparación entre los puntos críticos mostrados en la **Tabla D.4** y la respuesta teórica de la mesa con carga máxima, se observa claramente que teóricamente la mesa no podría cumplir con el punto crítico del período $t = 0,25$ [seg] donde se juntan las restricciones de velocidad máxima con la de aceleración máxima.

De la **Tabla D.3** se observa que el punto con $t = 0,25$ [seg] tiene una respuesta teórica máxima de 36,48 [cm/seg] en vez de los 39,08 [cm/seg] esperados. Por otra parte, se tiene que la aceleración que teóricamente alcanzaría es de 0,936 [g] en vez de 1 [g] que es lo calculado con los puntos críticos.

D.2. Discusión de resultados

De los resultados de las **Tabla D.2** y **Tabla D.3**, se observa que el caudal limita la velocidad, debido a que no se puede sobrepasar el caudal entregado por la bomba, ni el caudal que puede manejar la servo-válvula. Luego, se obtiene que teóricamente la velocidad máxima que alcanza el sistema será de **39,08** [cm/s].

Se comprueba además, que teóricamente el equipo tendría suficiente presión de carga (ésta debe ser menor que 189 [bar] [2700 PSI]), para cumplir con los requerimientos de fuerza que necesitaría para trabajar con carga máxima, aún en periodos muy bajos.

Como era esperable la acción de la carga del prototipo es teóricamente más restrictiva para las velocidades y las presiones actuantes en el sistema. Pero aún así se comprueba que el equipo podría cumplir con los requerimientos.

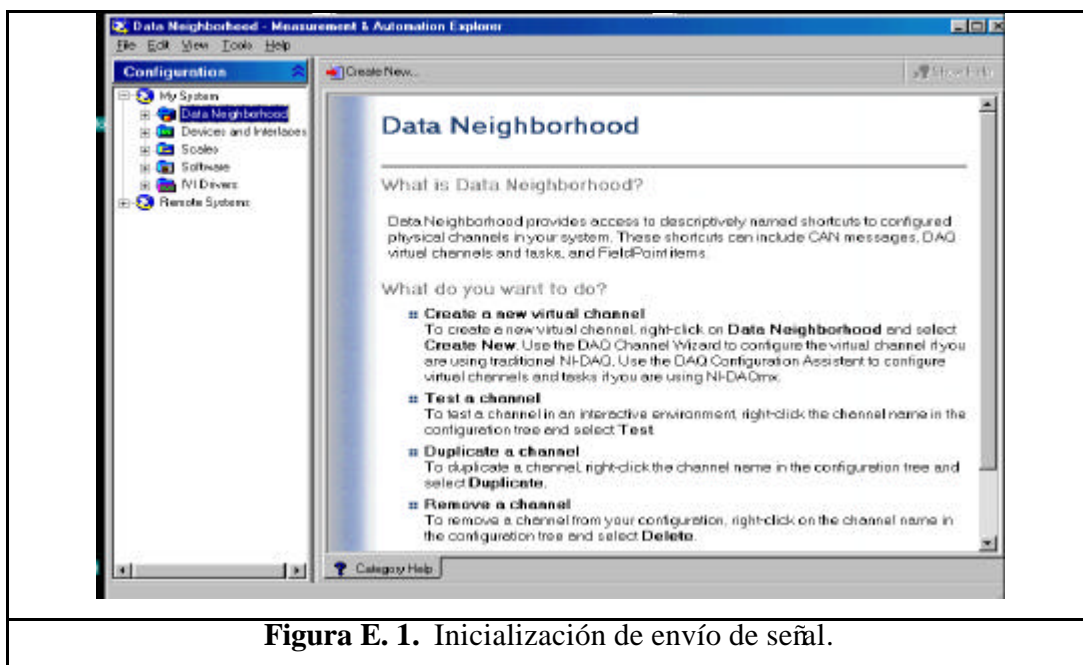
Es importante destacar que para estos cálculos se consideran la servo-válvula y la bomba primaria al límite de sus capacidades de funcionamiento, ya que para frecuencias intermedias (velocidades de 39,08 [cm/s]) está casi al límite de su caudal y para los extremos está en el límite de la presión máxima. Para alcanzar valores mayores, por lo menos teóricamente, sería necesario pasar a otra servo-válvula de esta misma serie u otra con mayor capacidad (por ejemplo a la de 96 [lt/min] de caudal del diseño original) y aumentar la capacidad de la bomba. En caso de necesitar más capacidad de carga sería necesario aumentar las dimensiones del servo-actuador.

ANEXO E Operación y mantención.

E.1. Operación de la mesa.

La mesa es una maquina compuesta de varios sistemas que operan en conjunto. Para lograr su pleno funcionamiento se debe tener en cuenta los aspectos críticos de cada uno de sus componentes, a continuación se describen en detalle los pasos a seguir para hacer funcionar la mesa correctamente.

- 1) Primero, se deben enchufar la fuente de poder de los módulos de control y el computador de control teniendo especial cuidado en respetar “la fase” de la corriente alterna de (220 volt) pues equivocarse el suministro de energía podría dañar el módulo fuente de poder. Por otra parte, si no se conecta adecuadamente el computador la señal de registro obtenida estará contaminada con ruido.
- 2) Luego de verificar la conexión al computador de control, se debe iniciar en el escritorio el icono **Measurement &Automation – My System – Data Neirhborhood**(Figura E. 1).



Luego, se debe buscar el canal de envío de señales “a0” para esto en **Tradicional NI-DAQ Virtual Channel** hacer clic con el botón derecho sobre la señal a0 y elegir la alternativa **Test**, aparecerá una nueva ventana **Virtual Channel Test Panel**, ahí cambiar el valor de “value” a 5.00 [volt] (**Figura E. 2**). Esto inicializa la señal en 5 Volt, que es el centro del recorrido del actuador y es el punto de partida estándar definido en este trabajo. Este punto es de suma importancia, pues sino se respeta, la mesa comenzaría a moverse a la posición 0 Volt (completamente retraido) en cuanto se encienda la unidad de potencia.

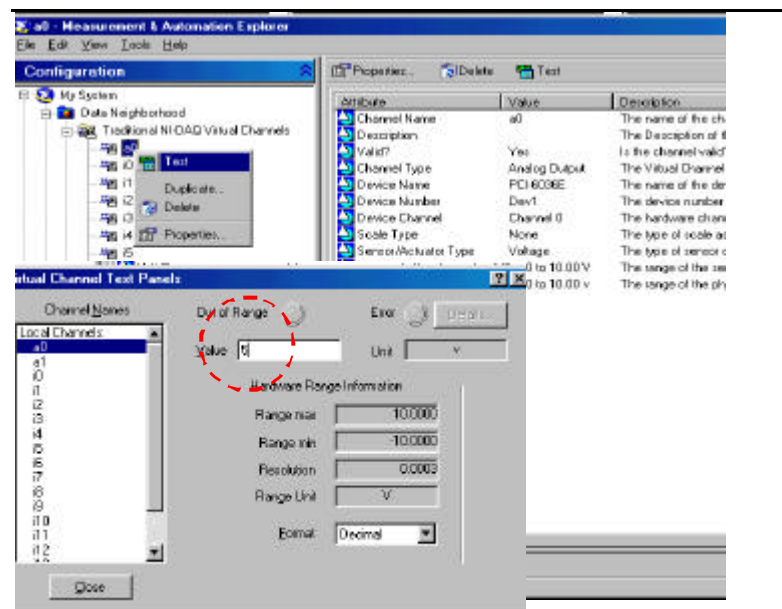


Figura E. 2. Señal de 5 Volt.

- 3) Una vez inicializada la señal de envío de voltaje, se procede a correr la rutina de control de LabView “Control de lazo abiertoV1.vi” que es la rutina que controla la mesa, aparecerá el panel frontal de control. (Figura E. 3)

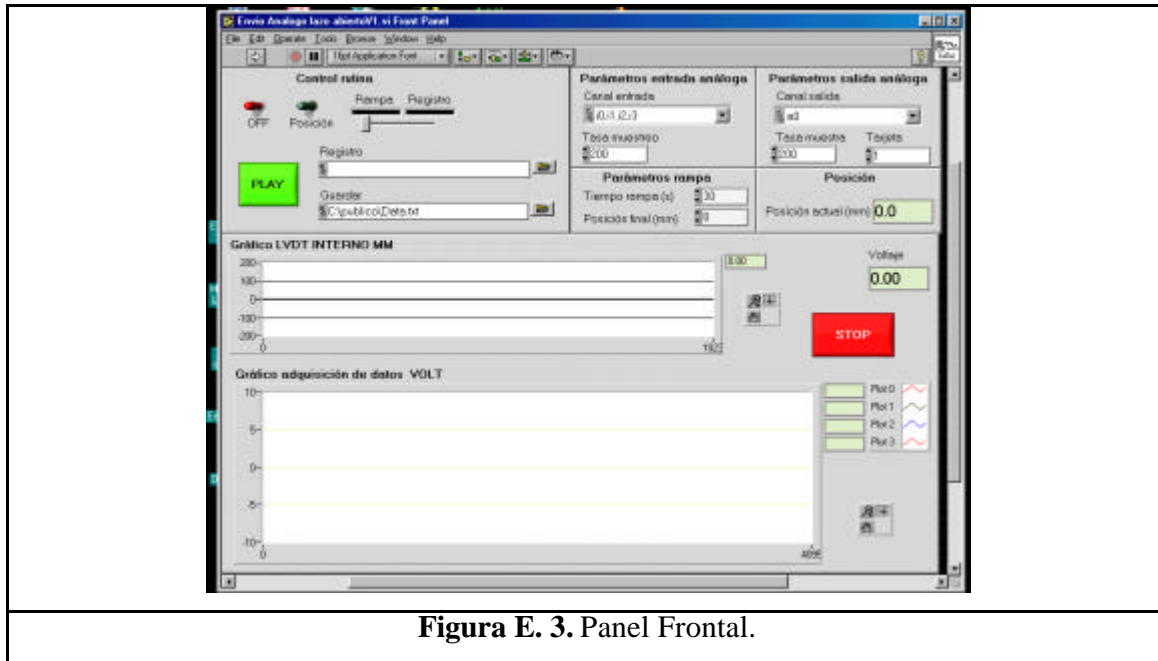


Figura E. 3. Panel Frontal.

- 4) Una vez activado el panel frontal la variable que controla la señal de voltaje es a0 por defecto. Junto a esto se debe definir la tasa de muestreo a la que se desea enviar la señal (es 200 por defecto), pero se hicieron pruebas con 100, 200 y hasta 400 muestras por segundo sin observarse mayores problemas.
- 5) En este punto ya es seguro encender la unidad de potencia verificado primero que el botón de paro de emergencia no este activado, y que el interruptor que tiene adosado la botonera de seguridad esté en posición “tanque” (que indica que el aceite esta siendo enviado al depósito de aceite).

- 6) Junto con la unidad de potencia se debe iniciar el sistema de filtrado y enfriamiento, con esto se garantiza que el equipo pueda funcionar todo el día. Para iniciar la unidad de filtrado, primero se debe llevar la manguera de desagüe hasta el sumidero, luego accionar la bomba secundaria y por último abrir la llave de corte de agua para dejar que ésta fluya.
- 7) Se debe elegir cuales van a ser las variables de entrada que serán capturadas, haciendo “clic” en el cuadro parámetros de entrada análoga y luego **‘Browse’** se tiene acceso a un ventana que permite elegir las variables a capturar (**Figura E. 4**). Además se debe definir la tasa de muestreo para la captura de datos.

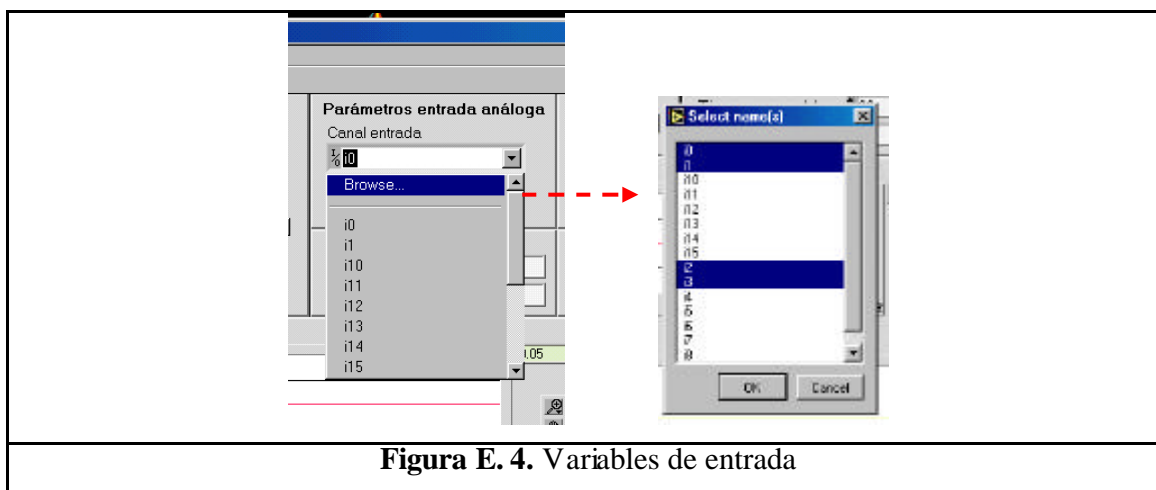


Figura E. 4. Variables de entrada

En el ejemplo de la **Figura E. 4** se muestra la elección de la variables i0, i1, i2 e i3, si se considera además la tasa de muestreo de 200 (por defecto), se obtiene exactamente lo mostrado en el bloque parámetros de entrada análoga de la **Figura E. 3**.

- 8) Después se debe elegir el directorio donde se desean guardar los archivos, en el cuadro control de rutina hacer “clic” sobre el icono (carpeta) para buscar el directorio deseado. El programa trae por defecto el nombre “**DATA.txt**” y queda guardado en el directorio “**C:\publico**”.(Figura E. 5)

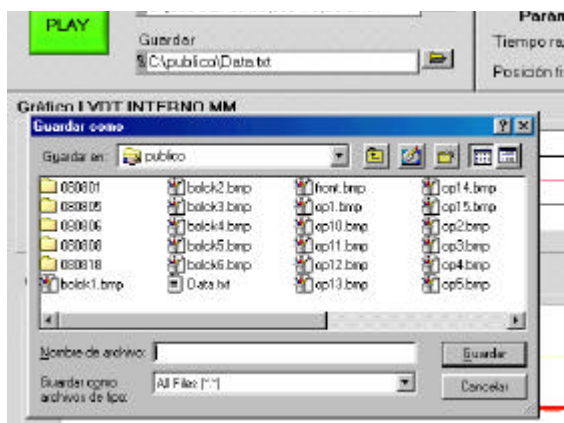


Figura E. 5. Elección de directorios para guardar archivos.

- 9) Ahora se procede cambiando la posición del interruptor adosado a la botonera de seguridad, llevándolo a la posición “**actuador**” que energiza la válvula limitadora de presión haciendo que el sistema se presurice.
- 10) Se debe elegir que tipo de movimiento se desea realizar con la mesa, se tienen 2 alternativas rampas ó mediante registros de voltajes. A continuación se explicaran ambas alternativas en el mismo orden.
- 11) Para trabajar con rampas, el primer paso es dejar el botón de posición/función en “**Función**” y el interruptor rampa/registro en la posición “**Rampa**”. Luego, se deben definir los parámetros de la rampa tanto la **Posición final** a la que se desea llevar la mesa en mm, como el “**Tiempo rampa**” tiempo en que se desea alcanzar dicho punto. (Figura E. 6).

Por último se hace “clic” sobre el botón **“PLAY”**, una vez alcanzada la posición final se hace “clic” sobre el botón **“STOP”**, con esto se detiene la captura de datos conservando la posición final.

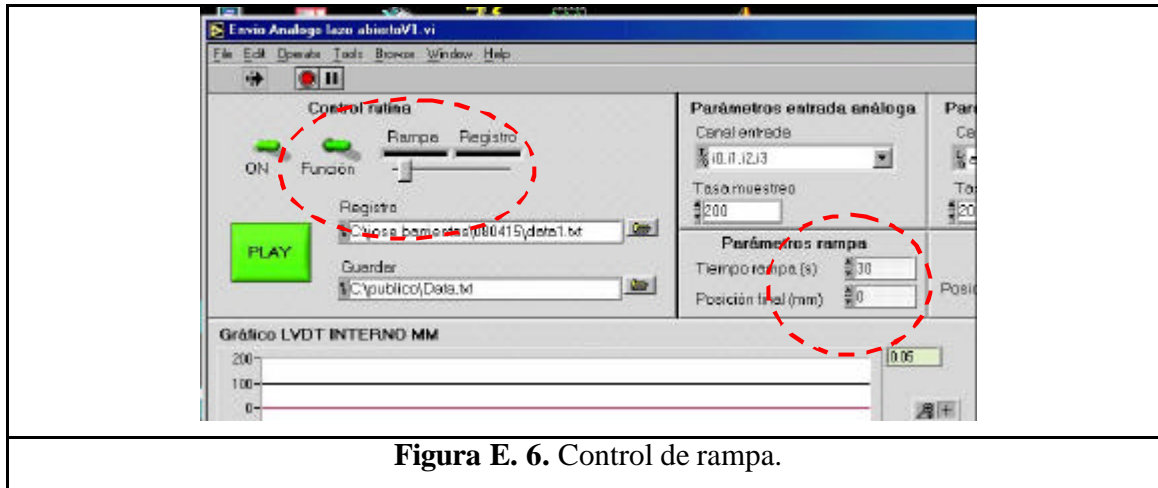


Figura E. 6. Control de rampa.

12) Para trabajar con registros lo primero es procesar el registro como se describe a continuación:

- Se debe filtrar el registro de aceleraciones con un filtro pasabajos con frecuencia de corte de 15 [Hz], luego se obtiene mediante una integración numérica el registro de desplazamientos.
- Luego se debe procesar el registro de desplazamientos por la rutina de amplificación por frecuencia para esto solo se necesita el registro y la frecuencia de muestreo, la rutina fue hecha como parte del trabajo de esta memoria y se adjunta en el CD de respaldo (nombre de la rutina **“correfre.m”**).

- Por último se debe corregir el registro de desplazamiento mediante la rutina de MatLab también incluida en el CD de respaldo “**calibración_Lineal_quinta**”, que permite corregir los desplazamientos enviados a la mesa, con la curva lineal y polinómica de 5° grado.
- Adicionalmente y solo como un estándar propio del laboratorio se le agregan 20 segundos de registro nulo al principio y al final del registro, esto por razones de seguridad pues se tienen 20 segundos al comienzo para detectar cualquier posible problema y detener la ejecución, y en el caso final se deja al actuador centrado y listo para la próxima partida.

13) Una vez corregido el registro se procede como sigue, nuevamente el interruptor posición/función debe estar en “**Función**”, pero esta vez el interruptor rampa/registo debe estar en la posición “**Registro**”. Esto permite al programa reconocer el registro que se desea reproducir. Luego, se debe buscar el archivo del registro que se desea, para esto se debe hacer “clic” en el icono “carpeta” y se abrirá una ventana donde se podrá buscar el registro en cuestión. (**Figura E. 7**)

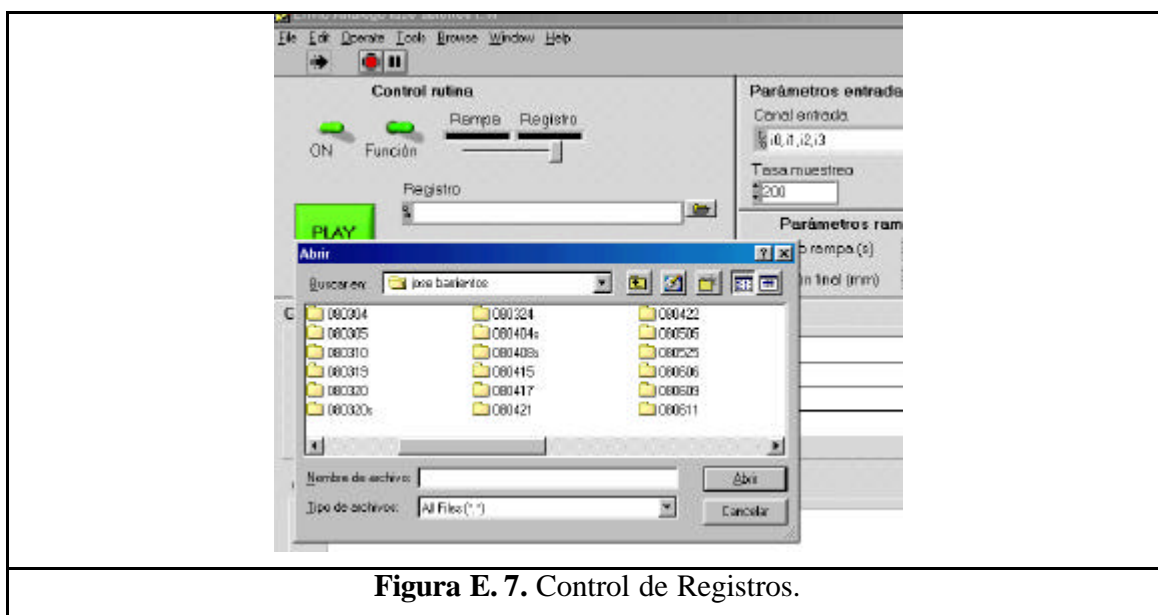


Figura E. 7. Control de Registros.

- 14)** Después de cargado el registro, se debe hacer “clic” en el botón **“PLAY”** al hacer esto el registro comienza a ser enviado.
- 15)** Al terminar el registro hace “clic” en el botón **“STOP”** y se debe mantener presionado hasta que se deje de registrar datos.
- 16)** Una vez terminados los ensayos a realizar se dejó establecido como procedimiento estándar llevar a la mesa a la posición 0, es decir enviar una señal de 5 Volt. pues así la mesa queda en la misma posición siempre que se inicie la actividad de la mesa.
- 17)** Por último, para apagar los sistemas el orden es como sigue:
- Se procede cambiando la posición del interruptor adosado a la botonera de seguridad, llevándolo a la posición **“tanque”** con esto se despresuriza todo el sistema.
 - Se apagan la bomba primaria y la de filtrado, con esto se restringe completamente el movimiento de la mesa, además, se cierra la llave del agua.
 - Se cierran los programas de computador de control, para esto se cambia de posición el interruptor On/Off dejándolo en **“Off”** y luego se presiona **“PLAY”**, aparecerá una ventana que pregunta si **“¿desea salir de la ejecución del problema?”** al hacer clic en **“SI”** se cierra el programa.
- (Figura E. 8)**



Figura E. 8. Cierre del programa.

- y por último se desenchufan tanto el módulo fuente de poder como el computador de control.

E.2. Mantenimiento de la unidad de potencia.

La mantención del sistema oleo-hidráulico, como la de cualquier equipo de este tipo se basa en la limpieza del aceite (debido a que éste no es un equipo de alto nivel de uso) se recomienda para la mantención del aceite un filtrado de 48 hrs. al mes. Junto a lo anterior se recomienda seguir las indicaciones del fabricante con respecto a la duración de los filtros.

E.3. Mantenimiento de rieles de precisión.

Los rieles de precisión son elementos muy delicados que requieren la precaución de mantener limpio el lugar de trabajo, pues al tener grasa expuesta acumulan polvo y pelusas que podrían dañar el equipo.

Para su adecuada mantención se recomienda limpiar los rieles una vez al mes con un papel absorbente que no deje pelusas, luego de esto hacer que la mesa deslice lentamente en todo el rango de operación para que deje una película fina de grasa limpia, que protegerá los rieles del oxido.

Por último, se recomienda engrasar los rieles según recomendaciones del fabricante cada 6 meses. Para esto utilizar la grasera manual y la grasa recomienda por el fabricante (la especificación técnica de este tipo de grasa en particular se encuentra en el CD adjunto).