

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE
UNA MAQUINA AXIAL-TORSIONAL DE ENSAYO DE MATERIALES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ARAGUILLIN LÓPEZ RICARDO DAVID
ricardo_epn@hotmail.com

MEJÍA CHOLO CÉSAR ANDRÉS
andrescam966@yahoo.com

DIRECTOR: PhD. BANDA GAMBOA HUGO ARCESIO
hugo.banda@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, ARAGUILLIN LÓPEZ RICARDO DAVID y MEJÍA CHOLO CÉSAR ANDRÉS, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

ARAGUILLIN L. RICARDO DAVID

MEJÍA C. CÉSAR ANDRÉS

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por ARAGUILLIN LÓPEZ RICARDO DAVID y MEJÍA CHOLO CÉSAR ANDRÉS, bajo nuestra supervisión.

Ph D. Hugo Banda
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Orlando Cobos
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a Santa Teresita por llenarme la salud y la fortaleza en el transcurso de mi vida y en especial para culminar esta etapa de mi vida.

Al Dr. Hugo Banda por su acertada dirección y al Ing. Orlando Cobos quien más que un codirector fue un amigo y compañero en el desarrollo de este proyecto.

Al personal del LAEV y a todas las personas que colaboraron en la realización de este proyecto.

Ricardo

A Dios por darme la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza para avanzar día a día en mi lucha hacia el éxito y conducirme por el camino del bien.

Al Dr. Hugo Banda y al Ing. Orlando Cobos quienes nos brindaron su amistad y su valiosa ayuda.

Al personal del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, quienes estuvieron dispuestos a colaborarnos en la realización de este proyecto.

Además, a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron hacer realidad este proyecto.

Andrés

DEDICATORIAS

A mi Madre Olgita Susana, símbolo para mí de amor infinito, sacrificio y fortaleza, a mi padre Telmo ejemplo de lucha y dedicación a quienes les debo todo lo que soy.

A Marco por su apoyo incondicional y a Verónica por su cariño y ternura, mis queridos hermanos.

A mis amig@s de quienes aprendí muchas cosas, de ellos me llevo los mejores recuerdos.

Ricardo

A mis padres queridos César y Elena, por su amor incondicional, su lucha diaria y ser un ejemplo a seguir, ya que sin todo ello no hubiera sido tanto mi desarrollo humano, como profesional, y por ende mi formación académica.

A mis hermanas Mónica, Karla y Ana Karen, por creer en mí y quererme tanto.

A mis leales amigos, quienes me brindaron su amistad y su apoyo, de quienes he aprendido la constancia y dedicación al trabajo.

Andrés

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
CONTENIDO	VIII
RESUMEN	XIV
PRESENTACIÓN.....	XV

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES Y CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 ANTECEDENTES	17
1.2 NOCIONES BÁSICAS DE LA MECÁNICA SÓLIDOS	18
1.2.1 ESFUERZOS BAJO CARGA AXIAL	19
1.2.1.1 Esfuerzo y Deformación	19
1.2.1.2 Deformación Unitaria	21
1.2.2 DIAGRAMAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN.....	21
1.2.3 ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD	23
1.2.4 LEY DE HOOKE Y MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	24
1.2.5 FATIGA.....	25
1.2.5.1 Curvas Esfuerzo vs Número de Ciclos S-N.....	25
1.2.5.2 Ensayos de fatiga	26
1.2.6 TORSIÓN	27
1.2.6.1 Análisis de Esfuerzos en un eje	27
1.2.6.2 Deformaciones en un eje circular.....	28
1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AXIAL-TORSIONAL	31
1.3.1 MARCO DE CARGA	33
1.3.1.1 Descripción	33
1.3.1.2 Operación	35
1.3.1.3 Posición del cabezal.....	35
1.3.1.4 Consideraciones para el montaje del espécimen.	35
1.3.2 FUENTE DE PODER HIDRÁULICA.....	36
1.3.2.1 Descripción	37
1.3.2.2 Operación.....	37
1.3.3 ACTUADOR LINEAL.....	39
1.3.4 ACTUADOR ROTACIONAL	40
1.3.5 SERVOVÁLVULA.....	41
1.3.6 SENSORES.....	42
1.3.7 ESTADO DEL SISTEMA AXIAL-TORSIONAL MTS	43
1.4 JUSTIFICACIONES Y OBJETIVOS	44

CAPÍTULO 2

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

2.1 CONTROL DE LA FUENTE DE PODER HIDRÁULICA (HPS)	46
2.1.1 DIAGRAMA DE FUERZA PARA EL ARRANQUE	48
2.2 CONTROL GENERAL DEL SISTEMA MTS.....	50
2.2.1 SELECCIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN	51
2.2.1.1 Módulo de Entradas Análogas.....	52
2.2.1.2 Módulo de Salidas Análogas	53
2.2.1.3 Módulo de Entradas y Salidas Digitales.....	53
2.2.1.4 Puerto de Comunicación USB	54
2.2.2 CONECTOR I/O.....	55
2.3 DISEÑO DEL HARDWARE DE CONTROL	56
2.4 DISEÑO DEL DRIVER PARA LAS SERVOVÁLVULAS.....	59
2.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL084.....	62
2.5 ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES.....	63
2.5.1 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD620	64
2.5.2 FILTRO PASA-BAJOS DE SEGUNDO ORDEN DE BUTTERWORTH	65

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL HMI DEL SCADA

3.1 SELECCIÓN DEL PAQUETE DE DESARROLLO	68
3.1.1 ESPECIFICACIONES DEL PAQUETE COMPUTACIONAL LABVIEW	68
3.1.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA PARA LABVIEW	69
3.2 DESARROLLO DEL HMI.....	70
3.2.1 REQUISITOS DE UNA INTERFACE HMI.	71
3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO CON EL SOFTWARE LabVIEW	71
3.2.2.1 Ingreso a la Aplicación	71
3.2.2.2 Ingreso a la Pantalla “Principal”	73
3.2.2.3 Ingreso a la Pantalla “Funcionamiento Manual”	74
3.2.2.4 Ingreso a la Pantalla “Funcionamiento Automático”	76
3.2.2.5 Ingreso a la Pantalla “Ensayo Axial”	77
3.2.2.6 Ingreso a la Pantalla “Ensayo Torsional”	83
3.2.2.7 Ingreso a la Pantalla “Ensayo Fatiga”	84

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DEL HARDWARE	91
4.2 PRUEBAS DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA.	99
4.2.1 EVALUACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA.	100
4.3 PRUEBAS DEL SISTEMA.....	103
4.3.1 ENSAYO DE COMPRESION CON CARGA SOSTENIDA.....	104
4.3.1.1 Ensayo de operación	104
4.3.1.1.1 <i>Pasos previos al encendido del sistema MTS</i>	104
4.3.1.1.2 <i>Instalación del elemento de ensayo</i>	104
4.3.1.2 Descripción del ensayo.....	104
4.3.2 ENSAYO DE COMPRESION DINAMICA.....	106
4.3.2.1 Descripción del ensayo.....	104
4.3.3 ENSAYO DE TORSION DINAMICA EN VACIO	107
4.3.4 ENSAYO DE COMPRESION Y TORSION DINAMICA	108

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES	111
5.2 RECOMENDACIONES	114

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Barra sujeta a presión	19
Figura 1.2 Esfuerzo en una barra sujeta a presión	20
Figura 1.3 Diagrama Esfuerzo - Deformación.....	22
Figura 1.4 Elasticidad y Plasticidad	23
Figura 1.5 Alargamiento axial y contracción lateral de una barra sometida a tracción.	24
Figura 1.6 Curvas S-N	26
Figura 1.7 Elemento sometido a torsión	27
Figura 1.8 Modelo idealizado de un elemento sometido a torsión	28
Figura 1.9 Deformación en un elemento sometido a torsión	29
Figura 1.10 Distribución de esfuerzos en ejes sometidos a torsión	30
Figura 1.11 Máquina Universal de Ensayos.....	31

Figura 1.12 Esquema General de Funcionamiento del Equipo MTS	32
Figura 1.13 Marco de Carga. Vista Externa.	33
Figura 1.14 Marco de Carga. Vista Interna.	33
Figura 1.15 Fuente de Poder Hidráulica (HPS).	35
Figura 1.16 HPS; controles e indicadores	36
Figura 1.17 Actuador Lineal	38
Figura 1.18 Actuador Rotacional.....	39
Figura 1.19 Servoválvula serie 252	40

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Diagrama de Fuerza para el arranque	48
Figura 2.2 DAQ USB-6008	49
Figura 2.3 Diagrama de Bloques de la DAQ USB-6008	49
Figura 2.4 Diagrama de bloques del módulo entradas análogas	50
Figura 2.5 Diagrama de bloques del módulo de salida análoga.....	51
Figura 2.6 Circuito de control.....	55
Figura 2.7 Forma adecuada de energizar un relé utilizando la DAQ 6008	56
Figura 2.8 Bobina, conector y diagrama esquemático	57
Figura 2.9 Driver de corriente para las servoválvulas	59
Figura 2.10 Distribución de pines del A.O. TL084.....	60
Figura 2.11 Acondicionamiento de sensores	61
Figura 2.12 Amplificador de Instrumentación AD620	62
Figura 2.13 Filtro de Butterworth	63

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Pantalla “Bienvenida”	69
Figura 3.2 Pantalla “Principal”	70
Figura 3.3 Pantalla de “Funcionamiento Manual”	71
Figura 3.4 Pantalla de “Funcionamiento Automático”	73
Figura 3.5 Pantalla de “Ensayo Axial”	75
Figura 3.6 Tipo de Probeta.....	76
Figura 3.7 Ingreso de valores para el Tipo de Probeta	77
Figura 3.8 Condiciones de ensayo	77
Figura 3.9 Ensayo Progresivo	78
Figura 3.10 Ensayo Sostener Carga	78
Figura 3.11 Diagrama de flujo del control	79

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Curva del Sensor de Carga.....	90
Figura 4.2 Prueba de las Entradas y Salidas Digitales	92
Figura 4.3 Prueba de las Salidas Análogas	92
Figura 4.4 Prueba de las Entradas Análogas	93
Figura 4.5 Pantalla “Falla de comunicación PC – DAQ”	94
Figura 4.6 Prueba de la Tarjeta de Adquisición de Datos	95
Figura 4.7 Ventana “Falla en el sistema HPS”	96
Figura 4.8 Diagrama Carga - Deformación	105

LISTA DE TABLAS**CAPÍTULO 1**

Tabla 1.1 HPS, controles e indicadores.	37
--	----

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Datos de Placa del motor trifásico.....	44
Tabla 2.2 Requerimientos mínimos para selección de la tarjeta	48
Tabla 2.3 Características del módulo de entradas análogas	50
Tabla 2.4 Características del módulo de salidas análogas.....	51
Tabla 2.5 Asignación de Terminales Análogos.....	53
Tabla 2.6 Asignación de Terminales Digitales	54
Tabla 2.7 Parámetros de las servoválvulas axiales y torsionales	57
Tabla 2.8 Características eléctricas del Amplificador Operacional TL084	60
Tabla 2.9 Características eléctricas del Amplificador de Instrumentación AD620.....	62

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Mínimos requerimientos de hardware y Software para Labview	67
Tabla 3.2 Descripción de la Pantalla Bienvenida	69
Tabla 3.3 Descripción de la pantalla Principal	70
Tabla 3.4 Descripción de la pantalla Funcionamiento Manual.....	73
Tabla 3.5 Descripción de la pantalla Funcionamiento Automático	74
Tabla 3.6 Descripción de la pantalla de Funcionamiento Axial.	75

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Características de la bomba de refrigeración.....	86
Tabla 4.2 Sensor de Carga. Voltaje vs Carga Aplicada	88
Tabla 4.3 Valores ingresados para ensayo de compresión “Sostener Carga”	99
Tabla 4.4. Resultados Ensayo de Compresión, Carga Sostenida.....	101

Tabla 4.2 Cálculo de Errores.	106
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS	113
ANEXO A CLAVE DE ACCESO	
ANEXO B ACTUADOR LINEAL	
ANEXO C ACTUADOR ROTACIONAL	
ANEXO D SERVOVÁLVULA	
ANEXO E TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6008	
ANEXO F AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL 084	
ANEXO G AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD620	
ANEXO H INFORME TÉCNICO: ENSAYO DE COMPRESIÓN CON CARGA SOSTENIDA	
ANEXO I INFORME TÉCNICO: ENSAYO DE FATIGA	
ANEXO H CONTRASTACION DE CURVAS	

RESUMEN

El presente trabajo ha tenido como finalidad diseñar un sistema de control y adquisición de datos que facilite la operación y el procesamiento de datos del sistema axial-torsional MTS del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN.

Para lograr el objetivo planteado se reactivó la fuente de poder hidráulica (HPS) que provee la fuerza necesaria para realizar las pruebas a los materiales y su intercambiador de calor. Se diseñó e implementó un sistema de control automático encargado de monitorear el equipo MTS desde una interfaz humano-máquina (HMI) que facilita la operación del sistema por personal calificado, usando el software LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments.

El control de la bomba del sistema HPS es de tipo ON/OFF. El manejo axial y torsional de émbolo se lo hace con dos servoválvulas, que son manipuladas por medio de señales analógicas enviadas desde la DAQ. El ensayo de materiales requiere de mediciones de carga, torque y deformación para lo cual el sistema tiene provistos sensores que están conectados a tarjetas acondicionadoras, las medidas realizadas se envían desde la DAQ hacia un computador dedicado para ser almacenadas en una base de datos que al final es aprovechado por el personal del LAEV.

Las pruebas realizadas al equipo MTS demostraron que el sistema de control implementado resultó adecuado, confiable, simple y consistente. Los resultados de los ensayos realizados en el equipo MTS fueron los esperados y contrastados con otra máquina de ensayos del laboratorio.

PRESENTACIÓN

Este trabajo está formado por cinco capítulos en los cuales se han descrito las partes más importantes, los mismos que serán descritos brevemente en los siguientes párrafos:

CAPÍTULO 1: Generalidades. Se realiza una introducción hacia el marco conceptual de la mecánica de sólidos, la cual es indispensable para familiarizarse con las características de operación de los materiales y se describe el funcionamiento del sistema axial-torsional MTS.

CAPÍTULO 2: Diseño e implementación del hardware del sistema. Se describen los parámetros y condiciones de cada parte del sistema para diseñar e implementar los circuitos de: control de la fuente de poder hidráulica (HPS), control general del sistema, driver para las servoválvulas y acondicionamiento de sensores.

CAPÍTULO 3: Desarrollo de la interfaz humano máquina. Se explica sobre la selección del software utilizado para el desarrollo de la interfaz gráfica, además se hace una descripción del programa desarrollado, que permite realizar la supervisión, control y adquisición de datos del sistema axial-torsional MTS y un diagrama de flujo del mismo.

CAPÍTULO 4: Pruebas y resultados. Se expone los resultados de diferentes pruebas aplicadas al sistema axial-torsional MTS, las cuales son: Pruebas de hardware que se refiere a la parte mecánica del sistema. Pruebas del HMI, aquellas que evalúan el enlace entre la tarjeta y el computador y por último están las pruebas del sistema, dentro de las cuales se efectúa un ensayo normalizado de compresión.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones. Se indican todas aquellas conclusiones y recomendaciones que surgieron conforme se fue desarrollando el sistema para la correcta manipulación del sistema axial-torsional MTS.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES Y CONCEPTOS BÁSICOS

La mecánica de sólidos y la realización de ensayos de tracción, compresión y fatiga, para determinar propiedades de los materiales, ocupan un lugar muy importante en el desarrollo de este proyecto, motivo por el cual en este capítulo se hace una breve explicación de los temas antes mencionados, así como también el estudio y diagnóstico del sistema axial-torsional del LAEV, que permite realizar este tipo de pruebas, lo que da paso a la justificación y objetivos del presente trabajo.

1.1 ANTECEDENTES

La mecánica de sólidos ha estado presente en la mente de los inventores y constructores desde los albores de la humanidad. Muchos monumentos, construcciones y otros diseños han sobrevivido al paso del tiempo para contar la historia de su funcionamiento; estas construcciones eran basadas en la experiencia de los “ingenieros” de aquella época. Sin embargo, un acercamiento de carácter científico se le atribuye a Leonardo da Vinci (1452-1519), quien fue el primero en aplicar los principios de la estática para determinar las fuerzas internas en los elementos estructurales y el primero en efectuar experimentos sobre la resistencia de los materiales.

Las áreas de aplicación de la mecánica de sólidos son ilimitadas. Los automóviles, barcos, naves aéreas y espaciales, edificios y otras estructuras, así como máquinas de todos los tamaños y formas, las cuales requieren ser analizadas para ver si son “funcionalmente resistentes” y “suficientemente rígidas”. Cualquier sistema mecánico debe satisfacer los requisitos propios de diseño en cuanto a resistencia y flexibilidad de acuerdo con los principios de la mecánica de sólidos.

En el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, se cuenta con equipos que permiten realizar el análisis e investigación de las características intrínsecas de los materiales. En estos equipos existe un sistema axial-torsional MTS, equipo que se usa para realizar ensayos estáticos y dinámicos de tracción, compresión, torsión y fatiga, con el fin de determinar las propiedades mecánicas de los materiales muy importantes dentro del diseño de toda estructura. A continuación se presentan los conceptos básicos para entender los ensayos mencionados y como se los realiza.

1.2 NOCIONES BÁSICAS DE LA MECÁNICA DE SÓLIDOS

La Mecánica de Sólidos es la rama de la ciencia que estudia el comportamiento de un material sometido a carga. Para dicho estudio se desarrollan fórmulas de manera lógica y razonada, proporcionando soluciones satisfactorias a muchos problemas básicos. Sus métodos son necesarios para los ingenieros que diseñan estructuras de diferentes tipos, pues estos métodos permiten desarrollar construcciones seguras, funcionales con la complejidad requerida y utilizando el mínimo de recursos, teniendo en cuenta requisitos indispensables de resistencia, rigidez, estabilidad y bajo costo.

A continuación se hará una explicación sobre los conceptos de mecánica de materiales que se circunscriben directamente con los ensayos experimentales de análisis de esfuerzo-deformación de materiales.

1.2.1 ESFUERZOS BAJO CARGA AXIAL

1.2.1.1 Esfuerzo y Deformación

Los conceptos de esfuerzo y deformación se explican fácilmente sobre una barra de sección circular constante (A) en toda su longitud (L_0), sometida a una fuerza axial en cada extremo (Figura 1.1), que producen en ella una deformación.

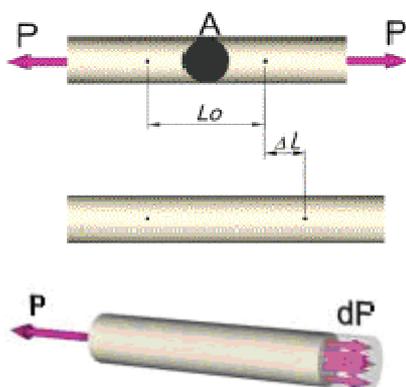


Figura 1.1. Barra sujeta a presión. ¹

Para analizar las acciones internas que aparecen en la barra prismática, originados por las fuerzas axiales, se considera la sección transversal. Se separa la porción situada a la izquierda del corte, considerándola un cuerpo libre.

La carga P actúa en el extremo izquierdo, mientras que en el lado derecho aparecen fuerzas que se distribuyen de manera proporcional sobre la sección transversal que sustituyen a la acción sobre el tramo derecho de la barra. La intensidad de la fuerza, o lo que es lo mismo la fuerza por unidad de superficie, se denomina esfuerzo y se denota con la letra griega σ (sigma).

Si se supone que el esfuerzo tiene una distribución uniforme sobre la sección transversal, es evidente que si A es el área de la sección transversal se tendrá que:

¹ Tomado de: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/lecciones/tem03/lec02_0.htm

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

Ecuación que representa el esfuerzo de una barra de sección transversal uniforme, para soportar una carga P de una forma cualquiera cargada axialmente.

Cuando la barra se tensa bajo la acción de la carga P que tiende a estirla, los esfuerzos resultantes se denominan esfuerzos de tracción. Si el sentido de las fuerzas que actúan sobre la barra originan una compresión, los esfuerzos se denominan de compresión. Dado que σ actúa en dirección perpendicular a la superficie de corte se conoce también como esfuerzo normal. Tradicionalmente a los esfuerzos de tracción se les da signo positivo y a las de compresión signo negativo.



Figura 1.2. Esfuerzo en una barra sujeta a tracción.²

Las unidades del esfuerzo normal σ son unidades de fuerza divididas por unidades de superficie. En el Sistema Internacional de medida se expresa en N/m^2 o Pascales Pa. Sin embargo, como el Pascal es una unidad muy pequeña se suele utilizar el Mega Pascal (MPa).

Para que la ecuación del esfuerzo sea correcta es imprescindible que σ esté uniformemente distribuido en la sección transversal de la barra, condición que se cumple cuando la carga P está aplicada en el centro de gravedad de la sección.

² Tomado de: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/lecciones/tem03/lec02_0.htm

1.2.1.2 Deformación Unitaria

Una barra axialmente cargada sufre una variación en su longitud alargándose o acortándose, según esté sometida a tracción o a compresión. Dado que el esfuerzo σ es constante en toda la barra, todas las fibras longitudinales están estiradas uniformemente. Sea δ la variación total de su longitud y sea L la longitud total de la barra y que esta es de material totalmente uniforme en toda su longitud, se define a la deformación unitaria ε (épsilon) con la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (1.2)$$

ε se denomina deformación unitaria a tracción cuando existe un alargamiento de la barra o deformación unitaria a compresión cuando existe un acortamiento de la misma. Debido a que δ y L se expresan en unidades de longitud ε es adimensional.

1.2.2 DIAGRAMAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN

Como se mencionó anteriormente, el diseño de elementos estructurales implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural. Estas propiedades se pueden relacionar si se evalúa la barra sometida a una fuerza axial para la cual se registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido. Estos valores permiten determinar el esfuerzo y la deformación, que al plasmarse en un gráfico originan el diagrama de Esfuerzo vs. Deformación unitaria.

Los diagramas son similares si se trata del mismo material y de manera general permiten agrupar a los materiales con propiedades afines como materiales dúctiles y materiales frágiles. En general, la curva esfuerzo-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas que resultan fácil de explicar con el siguiente gráfico.

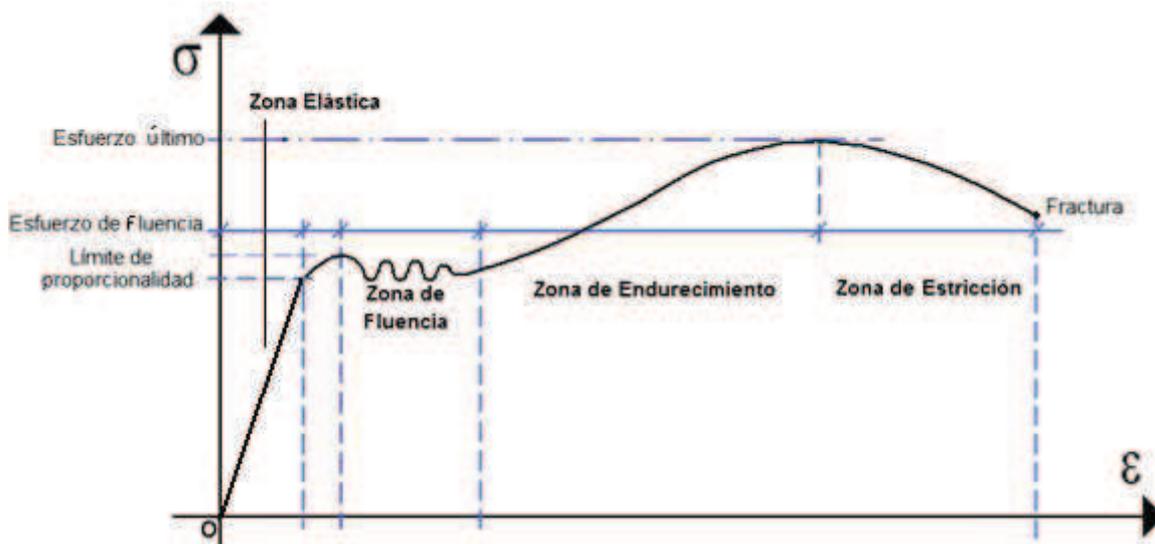


Figura 1.3. Diagrama esfuerzo–deformación típica de un acero estructural.

En la Zona Elástica las deformaciones son de pequeña magnitud y se reparten a lo largo del material de prueba o probeta. En esta zona, si se retira la carga aplicada, la probeta recupera su forma inicial. El esfuerzo más elevado que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno.

En la Zona de Fluencia ocurre una deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. La fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento. No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

Una vez superada la zona de fluencia se presenta la denominada Zona de Endurecimiento, debido a que el material sufre cambios en su estructura cristalina. Así se observa hasta que se llega al valor máximo del esfuerzo, este punto se denomina esfuerzo último.

A partir del último esfuerzo, el alargamiento posterior de la barra va acompañado de una reducción en la carga hasta que se llega al final de la curva y que se denomina punto de fractura.

En este punto la barra experimenta una contracción lateral y disminución de la sección transversal, fenómeno denominado estricción y que da el nombre a esta zona.

1.2.3 ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD

Considere la barra de sección transversal circular, cargada en un punto de la curva. Si al retirar lentamente la carga el material sigue exactamente la misma curva para regresar al origen, se dice entonces que el material es elástico y a esta propiedad se llama elasticidad.

Cuando una barra se somete a una carga relativamente pequeña aparece en ella un alargamiento. Si se retira la carga y la barra vuelve a su longitud inicial, se dice que está trabajando en la zona elástica. Si se repite la acción incrementando progresivamente el valor de la carga se observa que llega a un valor del esfuerzo a partir del cual la barra no vuelve a su longitud inicial. El esfuerzo a partir del cual la barra pierde su elasticidad se conoce con el nombre de límite elástico del material. La característica de un material que le permite soportar deformaciones inelásticas superiores al límite elástico se denomina plasticidad y en la curva tensión-deformación se manifiesta por la aparición de una región elástica seguida de una plástica.

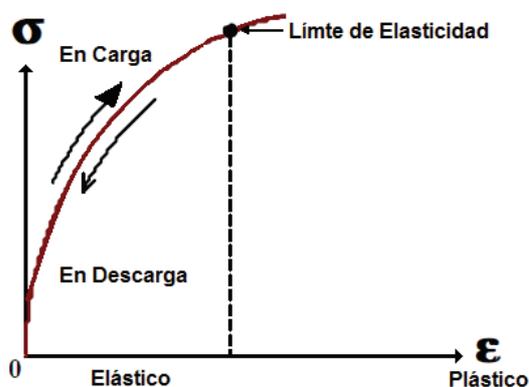


Figura 1.4. Elasticidad y Plasticidad.

1.2.4 LEY DE HOOKE Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

La mayoría de materiales tienen una región inicial en la cual se comportan de forma elástica lineal. Cuando esto ocurre se dice que el material es *linealmente elástico*. Esta forma de comportamiento es sumamente importante para la construcción de máquinas para asegurar que durante su funcionamiento no aparecerán deformaciones permanentes.

La elasticidad lineal se puede expresar mediante la relación:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (1.3)$$

Donde el esfuerzo axial σ es proporcional a la deformación unitaria ε y E es una constante característica del material, denominada módulo de elasticidad, que en el diagrama esfuerzo-deformación es la pendiente de la recta en la región linealmente elástica. Las unidades en que se mide el módulo de elasticidad comúnmente son Pascales y Mega Pascales. Esta expresión matemática se denomina Ley de Hooke y se aplica únicamente a tracción y compresión simples y es útil sólo en la zona elástica lineal del material.

Es frecuente llamar al módulo de elasticidad, módulo de Young. Cuando una barra se somete a tracción el alargamiento axial va acompañado de una contracción lateral como aparece indicado en la figura siguiente.



Figura 1.5. Alargamiento axial y contracción lateral de una barra sometida a tracción.³

³ Tomado de: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/lecciones/tem03/lec02_0.htm

Esta contracción lateral se aprecia fácilmente en algunos materiales como es el caso del caucho y difícilmente en otros como es el acero. La *deformación unitaria lateral* es proporcional a la *deformación unitaria axial* cuando se trata de cargas inferiores al límite elástico, cuando la barra trabaja en la zona elástica lineal.

El cociente entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial se denomina relación o coeficiente de Poisson y se representa por la letra griega ν .

$$\nu = \frac{-\text{def. unit. lateral}}{\text{def. unit. axial}} \quad (1.4)$$

En una barra sometida a tracción, la deformación lateral representa una reducción de su anchura y la deformación axial un aumento de su longitud.

1.2.5 FATIGA

En el estudio de los materiales debe tenerse en cuenta que generalmente los esfuerzos predominantes a los que están sometidos los cuerpos no son estáticos. Por el contrario, son afectados por cambios de cargas que se repiten periódicamente y que producen la rotura en valores menores que los determinados en ensayos estáticos. Este tipo de rotura que se produce en el tiempo, se denomina fatiga.

1.2.5.1 Curvas Esfuerzo vs. Número de Ciclos (S-N)

Es importante determinar el efecto que tendrá una carga cíclica en una estructura. Para esto se realiza una serie de ensayos donde una probeta del material de la estructura se somete a cargas cíclicas, cuya amplitud máxima es de aproximadamente 2/3 de la resistencia estática a tracción y se cuentan los ciclos hasta la rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes.

Los resultados obtenidos se representan en un diagrama de esfuerzo S , frente al logaritmo del número N de ciclos para cada una de las probetas. Los valores de S se toman normalmente como amplitudes del esfuerzo. La Figura 1.6 indica la curva S-N típica para el aluminio

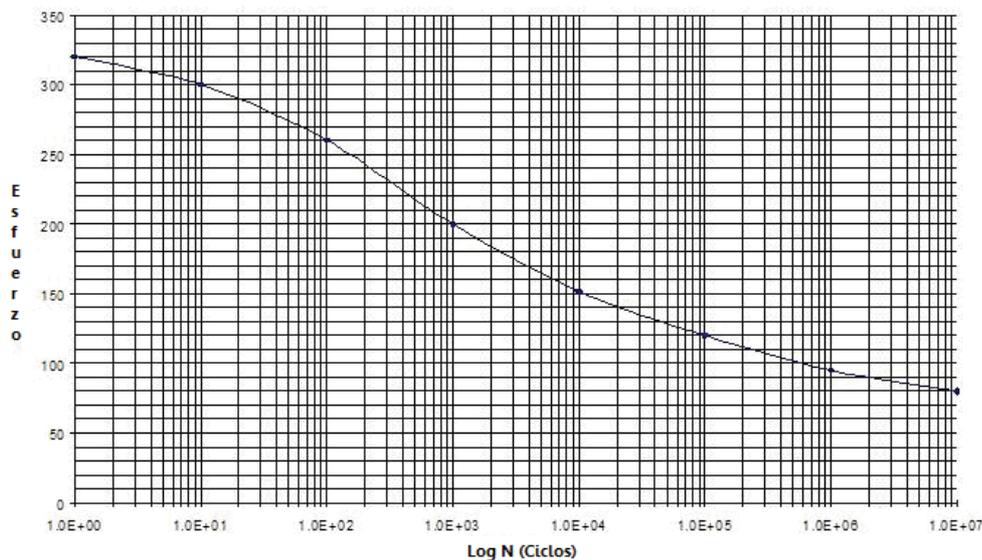


Figura 1.6. Curva S-N. ⁴

1.2.5.2 Ensayos de fatiga

Para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas fluctuantes, se aplica a una probeta una carga media específica, que puede ser cero, y una carga alternante. Se registra el número de ciclos requeridos para producir la falla del material, lo cual se denomina vida a la fatiga. El ensayo se repite con probetas idénticas y a varias cargas fluctuantes. Las cargas se pueden aplicar de manera axial o torsional. Dependiendo de la amplitud de la carga media y cíclica, el esfuerzo neto de la probeta puede estar en una dirección durante el ciclo de carga o puede invertir su dirección. Los datos procedentes de los ensayos de fatiga se presentan en un diagrama S-N. El esfuerzo cíclico representado puede ser la amplitud de esfuerzo, el esfuerzo máximo o el esfuerzo mínimo.

⁴ Tomado de: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/BrittleAluminium320MPA_S-N_Curve.jpg

Cada curva del diagrama representa un esfuerzo medio constante. La mayoría de los ensayos de fatiga se realizan en máquinas de flexión, de vigas rotativas o de tipo vibratorio.

1.2.6 TORSIÓN

La torsión se presenta debido a la deformación helicoidal que sufre un cuerpo cuando se le aplica un par de fuerzas paralelas de igual magnitud y sentido contrario, lo cual se denomina par torsor y se lo puede medir observando la deformación que se produce en este objeto. Al fijar un objeto cilíndrico de longitud determinada por un extremo y si se aplica un par torsor al otro extremo, la cantidad de vueltas que dé un extremo con respecto al otro es una medida de torsión. Los materiales empleados en ingeniería para elaborar elementos de máquinas rotatorias, como los cigüeñales y árboles motores, deben resistir esfuerzos de torsión que les aplican las cargas que mueven.

1.2.6.1 Análisis de esfuerzos en un eje

Al considerar la barra de sección circular de la Figura 1.7 unida a un soporte fijo en un extremo y si se aplica un torque T en el otro extremo, el eje queda sometido a torsión. Su extremo libre rota un ángulo ϕ llamado ángulo de torsión. Dentro de ciertos límites, el ángulo ϕ es proporcional al torque T y a la longitud L del eje. El propósito de este análisis es encontrar la relación entre ϕ , L y T .

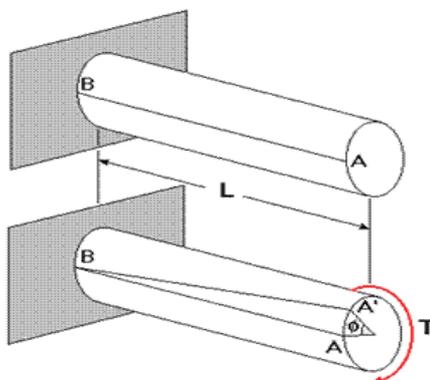


Figura 1.7. Elemento sometido a torsión.⁵

⁵ Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales.shtml>

Cuando se somete a torsión un eje circular las diferentes secciones transversales que se pueden tener a lo largo del eje rotan diferentes cantidades, cada sección lo hace como una losa rígida, como lo indica la Figura 1.8. El hecho de que las secciones de un eje circular permanezcan planas se debe a su simetría axial.

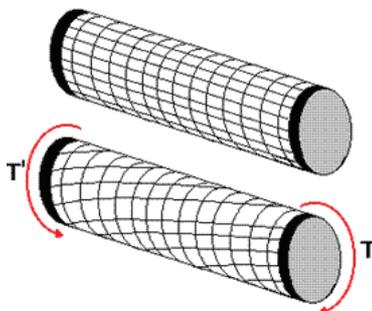


Figura 1.8. Modelo idealizado de un elemento sometido a torsión.⁶

Los resultados del análisis están basados en esta teoría de ejes de extremo rígidos. Este modelo ayuda a definir un problema de torsión para el cual puede obtenerse una solución exacta. Los resultados obtenidos a partir del modelo idealizado pueden extenderse a la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería.

1.2.6.2 Deformaciones en un eje circular

Para determinar la distribución de deformaciones se ha sometido a un ángulo de torsión ϕ a un eje circular de longitud L y radio c . Se realiza una extracción imaginaria de un cilindro de radio ρ . Si se considera un pequeño elemento cuadrado formado por dos círculos adyacentes y dos rectas adyacentes trazadas en la superficie libre de carga (Figura 1.9). Al aplicar carga, el elemento se transforma en un rombo. La deformación representada con la letra griega γ (gama), se mide por el cambio en los ángulos formados por los lados del elemento.

⁶ Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales.shtml>

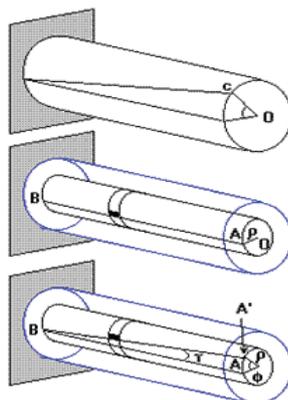


Figura 1.9. Deformación en un elemento sometido a torsión. ⁷

Como los círculos que definen dos de los lados del elemento permanecen constantes, la deformación γ debe ser igual al ángulo entre las líneas AB y A'B. En la Figura 1.9 se observa que, para valores pequeños de γ , puede expresarse la longitud de arco AA' como:

$$AA' = L\gamma \quad (1.5)$$

Pero, por otra parte,

$$AA' = \rho\phi \quad (1.6)$$

Igualando las dos ecuaciones anteriores y despejando se obtiene que:

$$\gamma = \frac{\rho\phi}{L} \quad (1.7)$$

Donde ρ y ϕ están expresados en radianes. La ecuación anterior muestra que la deformación γ en un punto dado de un eje sometido a torsión es proporcional al ángulo de torsión ϕ y a la distancia ρ desde el eje hasta el punto considerado. Así, la deformación en un eje circular varía linealmente con la distancia al centro del eje. Se puede ver que la deformación máxima en la superficie del eje se obtendrá cuando ρ sea igual a c .

⁷ Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales.shtml>

Si el torque T aplicado es tal que todos los esfuerzos permanecen por debajo del límite de proporcionalidad y del límite elástico, aplicará la ley de Hooke y no habrá deformaciones permanentes. La ley de Hooke para una fuerza torsional aplicada se expresa como:

$$\tau = G\gamma \quad (1.8)$$

Donde G es el módulo de rigidez o módulo de elasticidad en torsión y es producto de la relación entre la deformación unitaria y el coeficiente de Poisson, como se expresa la siguiente ecuación.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.9)$$

En la Figura 1.10 se muestra la distribución de esfuerzos en un eje circular sólido de radio c , y la distribución de esfuerzos en un eje hueco circular de radio interno c_1 y exterior c_2 , usando la teoría idealizada de torsión, aquí expresada.

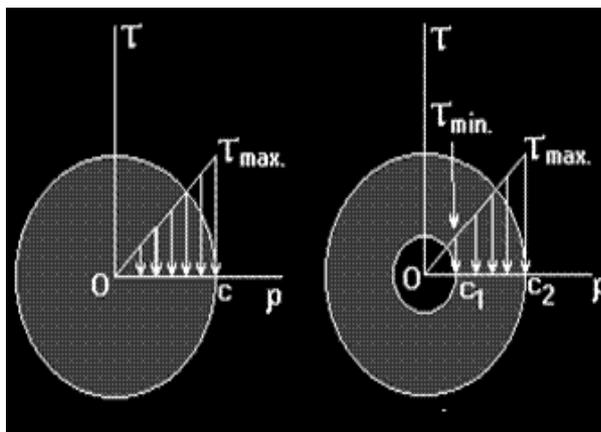


Figura 1.10. Distribución de esfuerzos en ejes sometidos a torsión.⁸

⁸ Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales.shtml>

1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AXIAL-TORSIONAL

Un sistema axial-torsional de ensayos es un equipo que permite realizar ensayos estáticos y dinámicos de tipo axial y torsional, así como también ensayos de fatiga, para determinar propiedades mecánicas de los materiales. En el mercado existen diferentes tipos de sistemas para ensayo de materiales y se caracterizan principalmente por:

- Capacidad de carga para ensayos axiales, capacidad de torque para ensayos de torsión y frecuencia máxima para ensayos de fatiga.
- Tipo de sistema que utiliza para generar la fuerza y el torque necesarios para realizar los ensayos, que pueden ser de tipo hidráulico o electromecánico.
- Tipo de montaje, que puede ser de piso o sobre una mesa de trabajo (benchtóp), y
- El tipo de estructura, que se diferencia por el número de columnas sobre las que se montan el marco de carga y sus mordazas.

El costo de este equipo depende principalmente de las capacidades de la máquina y de los tipos de ensayos que se puedan realizar.

El sistema axial-torsional del LAEV, también llamado equipo MTS, tiene una capacidad nominal de carga axial de 225 kN (50 ksi), una capacidad de torque de 2824 Nm (25k in lbs) y su frecuencia máxima de operación para ensayos de fatiga es de 20 Hz. Tiene una fuente de poder hidráulica de 3000 psi y es de la capacidad de realizar ensayos de tracción, compresión, torsión y fatiga. Su estructura es de dos columnas verticales, de montaje sobre el piso y su instalación requiere de un área de aproximada de 10 m² y una altura de 3.5 m (Figura 1.11).

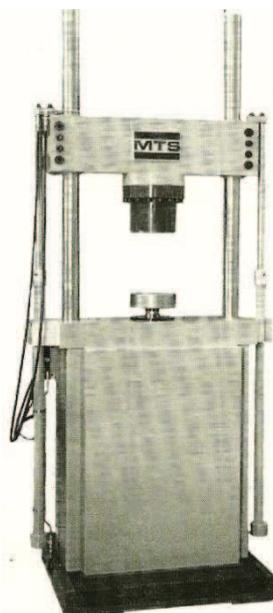


Figura 1.11. Sistema axial-torsional del LAEV.

El siguiente diagrama funcional describe de manera general al sistema axial-torsional y se presenta con el ánimo de que se pueda observar cual es el ciclo correcto que el equipo MTS sigue para realizar los ensayos.

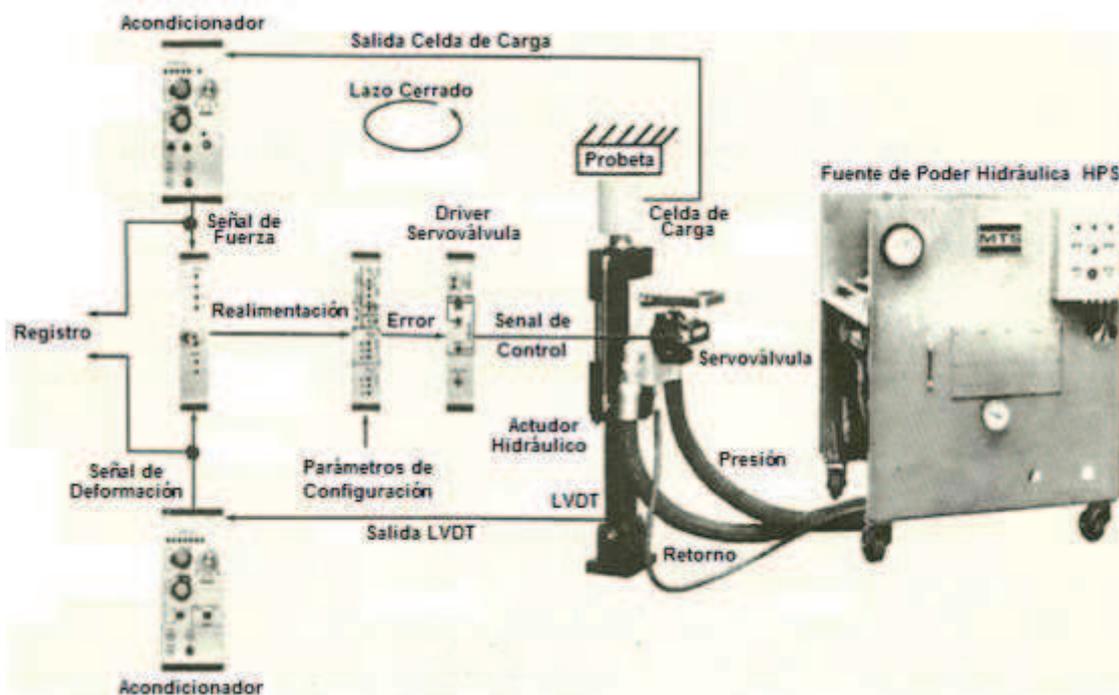


Figura 1.12. Esquema general de funcionamiento del equipo MTS.

Para realizar los ensayos el sistema axial-torsional posee un sistema en lazo cerrado que aplica cargas controladas a la probeta y mide la deformación y la carga hasta el momento de la ruptura del material, con la posibilidad de presentar los resultados de forma gráfica. Para realizar esto, el sistema permite que el operador configure los parámetros para realizar el ensayo. Acorde con estos parámetros se envía una señal de control a través de un driver hacia una servoválvula que permite el paso del fluido hidráulico, proveniente de la HPS, hacia el actuador hidráulico para aplicar una carga a la probeta. Para sensar la carga y la deformación se usa una celda de carga y un LVDT montados sobre el marco de carga. Las señales medidas son registradas para trazar el gráfico esfuerzo vs. deformación y a su vez son realimentadas hacia el controlador para que regule la apertura de la servoválvula y controlar la carga aplicada. A continuación se realiza una descripción detallada del funcionamiento de los componentes del equipo MTS.

1.3.1 MARCO DE CARGA

El marco de carga es usado en laboratorios de pruebas en todo el mundo porque puede ser fácilmente configurado para operación simultánea de carga axial y torsional para cualquier ensayo. El marco está constituido por un tren de carga, un actuador lineal, un actuador rotacional y los transductores; todo esto compuesto en un armazón o marco.

1.3.1.1 Descripción

El marco de carga serie 309 está constituido por un cabezal que se puede posicionar verticalmente, antes del ensayo, a lo largo de dos columnas rígidas montadas en la parte superior de una base firme (Figura 1.13). La base y el cabezal evitan desplazamientos y rotaciones peligrosas para la máquina y posibilitan de ese modo el contar con las condiciones adecuadas de ensayo axial. La celda de carga está asegurada al cabezal. Existe un actuador lineal que lleva acoplado un émbolo en su extremo y que está montado en la base del equipo

(Figura 1.14). Para la sujeción de la probeta se usan mordazas que son ubicadas entre el cabezal y el émbolo.

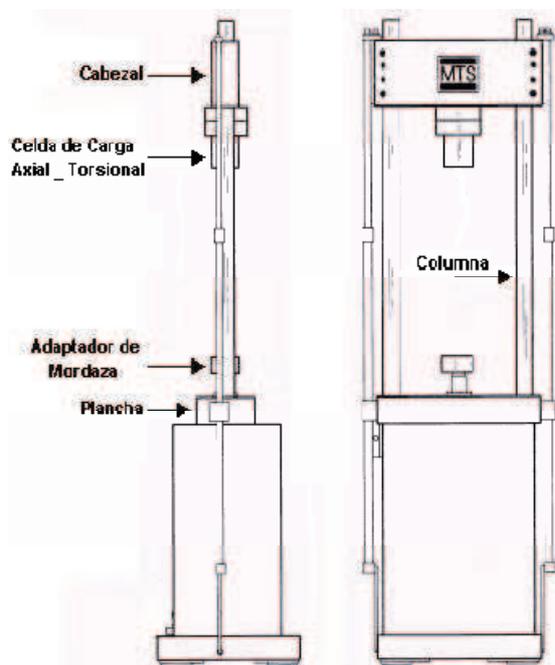


Figura 1.13. Vista externa del marco de carga.

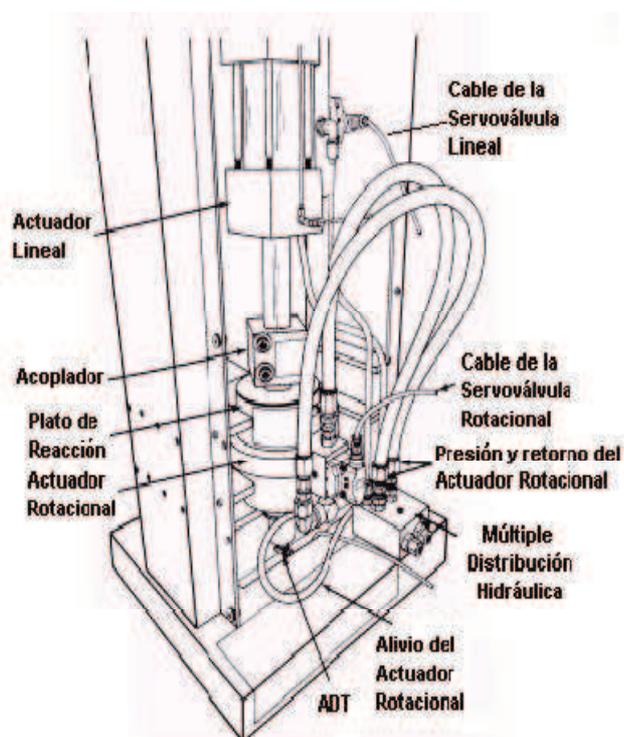


Figura 1.14. Vista interna del marco de carga.

1.3.1.2 Operación

La operación del equipo MTS se debe realizar por personal calificado, por lo que el operario debe estar familiarizado con todos los aspectos del funcionamiento del sistema de control y las restricciones que se aplican al equipo hidráulico. Para la operación de las cargas se debe tener en cuenta ciertas consideraciones para montaje de la probeta y el procedimiento para posicionar el cabezal.

1.3.1.3 Posición del cabezal⁹

Para cambiar la posición del cabezal se deben ejecutar los siguientes pasos:

1. Remover cualquier espécimen que pueda estar en el marco de carga.
2. Asegurar que las dos válvulas de control estén cerradas.
3. Deshabilitar el switch que permite desplazar el cabezal.
4. Encender el sistema de poder hidráulico a baja presión.
5. Cambiar de baja presión a alta presión en el sistema.
6. Habilitar el switch del control del cabezal.
7. Abrir la válvula en posición UP o DOWN de acuerdo con la dirección requerida para desplazar el cabezal. La velocidad de ingreso del fluido es variable de acuerdo a la apertura de las válvulas.
8. Cerrar las válvulas UP y DOWN después de que la posición del cabezal sea la correcta.
9. Deshabilitar el switch de control del cabezal.

1.3.1.4 Consideraciones para el montaje del espécimen¹⁰

Montar la probeta con cuidado reduce la posibilidad de invalidez del ensayo, además de daño del espécimen, del equipo y del operario, motivo por el cual el montaje del espécimen es un paso crítico y peligroso en la operación del sistema. Para evitar accidentes se debe observar las siguientes precauciones:

⁹ “Reference Manual MTS system”, Load Frame

¹⁰ “Operation Manual MTS”, Operator’s Safety Practices

1. No operar a una frecuencia superior a los 20 Hz pues se podría causar daños de los componentes hidráulicos y provocar esfuerzos excesivos en el marco de carga debido a la resonancia mecánica.
2. Apagar el sistema de poder hidráulico, siempre que sea posible cuando se realice trabajos cercanos al marco de carga.
3. Colocar de manera adecuada la probeta para reducir la posibilidad de doblado del espécimen, lo que podría causar daño en el lugar donde la carga es aplicada o incluso en la celda de carga.

1.3.2 FUENTE DE PODER HIDRÁULICA

Para generar la presión requerida por el sistema, el equipo MTS utiliza un suministro de energía hidráulica con una bomba que provee un flujo variable de hasta 23 gpm (87 l/min), la cual se denomina fuente de poder hidráulica (Hydraulic Power Supply, HPS), y que se muestra en la Figura 1.14. Esta fuente de poder, modelo 510.23, está específicamente diseñada para cumplir los requisitos que demanda el sistema de servoválvulas.

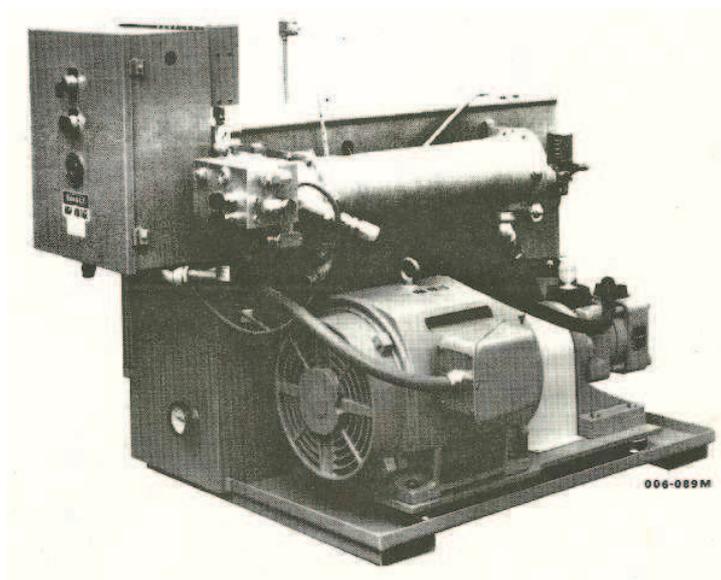


Figura 1.15. Fuente de poder hidráulica (HPS).

1.3.2.1 Descripción

La fuente de poder hidráulica consta de dos modos de funcionamiento: HIGH/LOW Alta presión y Baja presión. La presión de salida para LOW es generalmente ajustada a 150 psi (1 MPa), y para HIGH es ajustable hasta un máximo de 3000 psi (20.7 MPa) de presión continua. Para proteger el sistema hidráulico en general del exceso de presión o del mal funcionamiento del control de las servoválvulas, existe una válvula principal de auxilio y un manómetro que muestra la presión a la que se encuentra el sistema hidráulico.

Para mantener el fluido hidráulico a una temperatura bajo un límite de seguridad, la HPS utiliza un intercambiador de calor que enfría el fluido con agua. Si el fluido hidráulico sobrepasa del límite de temperatura, un detector montado sobre el reservorio de aceite abre un contacto eléctrico y apaga la fuente hidráulica. Un indicador transparente Fluido–Nivel muestra el nivel y la contaminación relativa del fluido hidráulico en el reservorio.

1.3.2.2 Operación

Para poner en marcha la fuente de poder hidráulica se deben ejecutar los siguientes pasos:

1. Encender el panel de control.
2. Revisar que se encienda la bomba del intercambiador de calor.
3. Conectar el switch de alimentación trifásica de la bomba.
4. Revisar que en el programa no exista ningún tipo de alarma.
5. Encender el sistema de poder hidráulico a baja presión, mantenerlo así durante 30 segundos.
6. Cambiar el sistema de baja presión a alta presión.

La Tabla 1.1 da una explicación de la función de los controles e indicadores que se encuentran en la fuente de poder hidráulica (HPS), para que en caso de

generarse una alarma sepa donde se encuentran dichos controladores e indicadores, los mismos que pueden ser apreciados en la Figura 1.16.

Tabla 1.1. HPS, controles e indicadores.

N°	Control o Indicador	Función
1	Medidor de presión	Este medidor muestra la presión con que opera la HPS
2	Ajuste de válvula LOW presión	Es utilizada para ajustar la presión de operación del HPS en modo LOW presión
3	Válvula de auxilio Principal	Es la que previene por seguridad que sobrepase la máxima presión definida por el sistema
4	Válvula de control de presión	Permite ajustar la presión de operación del HPS en el modo de HIGH presión
5	Selector HIGH/LOW	Selecciona el tipo de operación (LOW/HIGH), sobre el sistema HPS y aplica la presión seleccionada al sistema
6	Botón pulsador STOP	Apaga el HPS y remueve la presión
7	Indicador de nivel del líquido	Este medidor transparente indica el nivel de fluido hidráulico en el reservorio
8	Medidor de temperatura	Muestra la temperatura a la que se encuentra el fluido en el tanque
9	Indicador de filtro Sucio	Este indicador permite saber si el fluido necesita reemplazarse
10	Contador de Tiempo	Permite registrar el total de horas de operación de la bomba

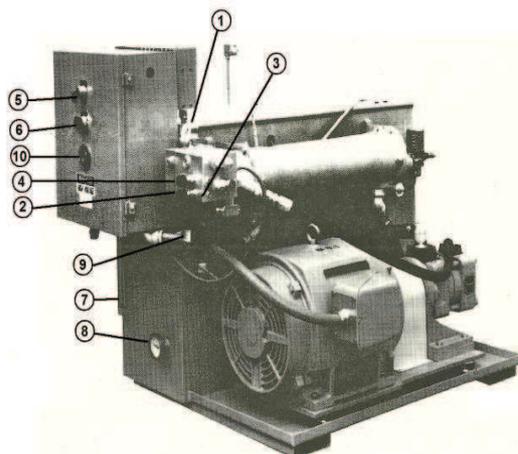


Figura 1.16. HPS, controles e indicadores.

1.3.3 ACTUADOR LINEAL¹¹

El actuador hidráulico de la serie 204 (Figura 1.17), es un generador de fuerza lineal diseñado para una carrera de 165 mm, buen rendimiento en aplicaciones dinámicas e ideal para aplicaciones de alta frecuencia. El actuador es de doble efecto, diseñado para capacidad de respuesta y fiabilidad, presentando una balanceada configuración hidráulica, a través del doble fin del pistón, extendiendo el pistón en ambas direcciones, características que proporcionan una menor fricción y las fugas de aceite de control. Consta de rodamientos metálicos que proporcionan tolerancia a carga lateral y mayor resistencia. Uno de los extremos del émbolo es frecuentemente contenido sin una carcasa y es usado para montarlo sobre una base giratoria, pero en este sistema el pistón está asegurado sobre el marco de carga.



Figura 1.17. Actuador lineal.

¹¹ Para una mayor información acerca del actuador lineal, remitirse al "Reference Manual MTS system", Series 204 Lineary Actuators o a www.mts.com

1.3.4 ACTUADOR ROTACIONAL¹²

El actuador rotacional de la Serie 215 (Figura 1.18) es un accionamiento giratorio pesado, que opera bajo el control de una servoválvula de precisión como parte de un sistema servo-hidráulico cerrado. Es ideal para pruebas de materiales, ejes, acoplamientos, ejes de transmisión y otros componentes que implican el movimiento de rotación. Es un actuador de doble paleta y está diseñado para el movimiento de rotación cíclica y prueba de un espécimen de aplicación.

Su movimiento está limitado a un ángulo máximo de rotación de hasta 100° ($\pm 50^\circ$), y para un desplazamiento dinámico es 90° ($\pm 45^\circ$), debido que el amortiguador hidráulico reduce el desplazamiento angular de 5° para evitar golpes. El actuador rotacional está acoplado con los apropiados componentes a un tren de fuerza, provee un movimiento angular y torsión cíclica en el medio ambiente de prueba.



Figura 1.18. Actuador rotacional.

¹² Para una mayor información acerca del actuador rotacional, remitirse al "Reference Manual MTS System", Series 215 Rotary Actuators o a la página web www.mts.com

1.3.5 SERVOVÁLVULA¹³

La servoválvula de la serie 252 es el actuador del sistema de control del sistema axial-torsional MTS, regula el rango y la dirección del fluido hidráulico que va hacia los actuadores. Está diseñada para un flujo entre 1 a 60 gpm (3.8 a 227 l/min).



Figura 1.19. Servoválvula serie 252.

La servoválvula controla el actuador hidráulico, que se cierra o se abre, de acuerdo a la respuesta de una señal eléctrica que viene desde la tarjeta de control de la válvula. La servoválvula puede abrirse en cualquier dirección, es decir, puede hacer que el pistón se mueva en cualquiera de sus direcciones puesto que el fluido ingresará por una de las dos entradas del actuador, con el objetivo de comprimir o estirar al material de prueba encaso del actuador lineal y cargar de manera horaria o anti-horaria en caso del actuador rotacional. La servoválvula al mismo tiempo que dirige el fluido con presión a un lado del actuador, también marca el camino de retorno del que se encuentra en la contraparte del pistón.

La servoválvula es un dispositivo proporcional. Esto es, que permite el flujo del aceite en proporción directa a la magnitud de la señal de control. La polaridad de la señal de control determina que lado del cilindro actuador recibirá fluido adicional, determinando la dirección del desplazamiento y de la fuerza aplicada por el émbolo.

¹³Para una mayor información acerca de las servoválvulas, remitirse al “Reference Manual MTS System”, Servovalves o a la página web: www.mts.com

1.3.6 SENSORES

Para que el sistema electrónico pueda controlar el proceso, es necesario que reciba información de la evolución de las variables físicas involucradas en el mismo. Para la medición del desplazamiento lineal del pistón se utiliza un Transformador diferencial de variación lineal (LVDT según sus siglas en inglés), que es un transformador eléctrico que posee tres bobinas solenoidales dispuestas extremo con extremo alrededor de un tubo. La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios. Un centro ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuya posición desea ser medida, se desliza con respecto al eje del tubo.

Cuando una corriente alterna circula a través del primario, causa un voltaje que es inducido a cada secundario proporcionalmente a la inductancia mutua con el primario. La frecuencia del oscilador que causa la corriente alterna está en el rango de 1 a 10 kHz.

El desplazamiento angular del pistón se mide con un sensor ADT que usa el mismo principio de transducción del LVDT y tiene características similares de conexión.

La fuerza aplicada durante el ensayo se mide con una celda de carga, que es un sensor que consiste de un metal sobre el que adhiere una galga extensométrica la cuál cambia su resistencia al flexionarse. El metal se dimensiona para que trabaje en su zona elástica. Esto es lo que define la capacidad de una celda.

La deformación que sufre la probeta se mide con una celda de carga conocida como extensómetro, que es un sensor que consiste de dos extremidades acopladas a un metal, al cual está adherida una galga extensométrica. La separación de dichas extremidades flexiona al metal, lo cual provoca una variación de resistencia en la galga.

1.3.7 ESTADO DEL SISTEMA AXIAL-TORSIONAL MTS

El sistema axial-torsional MTS ha estado paralizado por aproximadamente seis años, debido a una falla por sobrecarga en el sistema, tiempo en el cual estuvo expuesto a deterioro continuo, lo que obligó a que este proyecto empiece con la restauración del equipo y el cambio de varios elementos.

El equipo MTS presentó al inicio de este trabajo los siguientes inconvenientes:

- Desconexión de conductores y funcionamiento defectuoso del sistema de arranque, así como en el sistema de control.
- Inexistencia del computador dedicado para la supervisión y control del sistema.
- Falta de voltaje en la red de alimentación trifásica.
- Condición deplorable de la bomba para el sistema de refrigeración.
- Residuos de aceite sobre todo el sistema.
- Fugas de agua y algunas torceduras de las mangueras de refrigeración.
- Daño irreparable del manómetro con que opera la HPS.
- Inexistencia de diagramas esquemáticos y de un manual de usuario para una adecuada puesta en marcha del equipo
- Daño del controlador lógico programable (PLC) y de los drivers de control.
- Pérdidas de las mordazas para realizar los ensayos.

1.4 JUSTIFICACIONES Y OBJETIVOS

El propósito de los responsables del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones es poner nuevamente en funcionamiento al equipo MTS, lo cual involucra:

- Reactivar el sistema hidráulico y de la fuente de poder hidráulica (HPS) que provee la fuerza necesaria al sistema axial-torsional para realizar las pruebas a los materiales.
- Diseñar e implementar un sistema de control automático que sea el encargado del funcionamiento adecuado y del monitoreo del sistema axial-torsional.
- Utilizar una tarjeta de adquisición de datos ADQ para obtener resultados durante la realización de los diversos ensayos.
- Desarrollar una interfaz humano-máquina (HMI) que facilite la operación del sistema, por personal calificado.
- Diseñar una base datos, la cual provea los resultados de las pruebas realizadas.

Lo mencionado anteriormente se convierte en el objetivo de este proyecto. El desarrollo del hardware y software que esto requiere se presenta en los dos siguientes capítulos.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se describen los parámetros y condiciones de cada parte del sistema para diseñar e implementar los circuitos de: control de la fuente de poder hidráulica (HPS), control general del sistema, driver para las servoválvulas y acondicionamiento de sensores, que representan la circuitería necesaria para realizar el funcionamiento adecuado del equipo MTS y a su vez se convierten en el temario de esta sección.

2.1 CONTROL DE LA FUENTE DE PODER HIDRÁULICA (HPS)

Antes de empezar por el diseño del sistema de control para funcionamiento de la HPS se realizó un mantenimiento general de la máquina, el cual consistió en:

- Limpieza de área cercana a la máquina y de cada elemento del sistema.
- Recuperación de la bomba del sistema de refrigeración.
- Cambio de mangueras defectuosas debido a torceduras y fugas.
- Cambio del manómetro.
- Nuevo cableado del tablero de alto voltaje y del tablero de control para una correcta operación de la máquina, acorde con los requerimientos e indicaciones de los manuales.

Luego de reparar los daños que tenía el equipo se procedió a diseñar el control para la fuente de poder hidráulica.

Un motor trifásico de inducción acciona la bomba de la fuente de poder hidráulica, cuyas características se muestran en la Tabla 2.1, para generar la presión de 3000 psi que requiere el sistema.

Tabla 2.1 Datos de placa del motor trifásico.

Voltaje Nominal	220 V /440 V
Corriente nominal	118 A
Potencia	50 hp
Clase del motor	C
RPM	1760
Frecuencia	60 Hz

En la cámara de transformación de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) se dispone de un transformador de 50 kVA, el cual abastece al equipo MTS y a equipos de otros laboratorios, cuya capacidad de corriente se calcula como se indica a continuación:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} * V_L} \quad (2.1)$$

$$I_L = \frac{50.000 VA}{\sqrt{3} * 220 V} = 131.21 A \quad (2.2)$$

Este valor al ser comparado con los 118 A nominales necesarios para que el motor trabaje al máximo de su capacidad deja un margen de apenas 13.21 A. De acuerdo con lo anterior, se deduce que al encender este motor, estando prendidos otros equipos del laboratorio, actuarían las protecciones por sobrecorriente. Por ello se decidió instalar un arranque $Y - \Delta$, para disminuir la corriente pico de arranque y así proteger al motor, al transformador y a los otros equipos. El siguiente cálculo determina el valor de la corriente máxima que soportará el transformador con el arranque $Y - \Delta$.

$$I_L = \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$I_L = \frac{118 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 68.12 \text{ A} \quad (2.4)$$

Este valor indica que la corriente en el arranque disminuye en un 42.27 %, por lo que se puede encender este motor aún estando encendidos otros equipos.

2.1.1 DIAGRAMA DE FUERZA PARA EL ARRANQUE

El circuito de fuerza que se implementó para el accionamiento del motor se muestra en la Figura 2.1

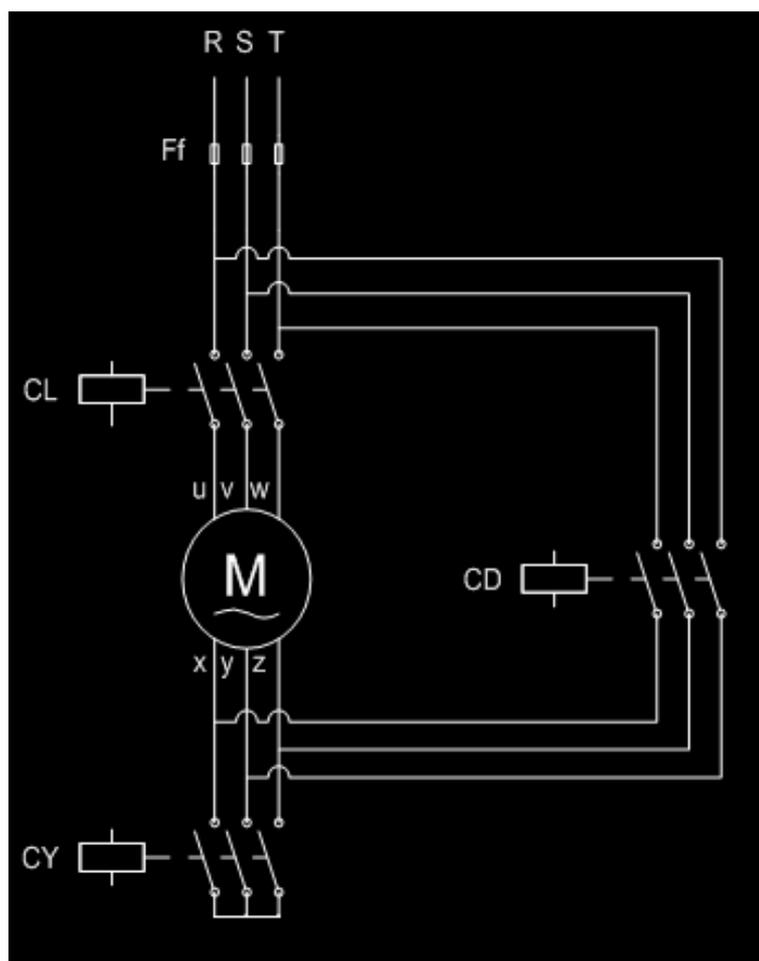


Figura 2.1 Diagrama de fuerza para el arranque.

2.2 CONTROL GENERAL DEL SISTEMA MTS

El sistema MTS requiere de lo siguiente:

1. Marco de Carga: Dispone de cinco sensores, cada uno con su respectiva tarjeta de acondicionamiento con salidas normalizadas de 0 a 10 voltios. Por lo que es indispensable poseer cinco entradas analógicas.
2. Servoválvulas: Una para el accionamiento axial y otra para el torsional, las mismas que operan con un rango de voltaje de -5 V a $+5\text{ V}$. Para lo cual son necesarias dos salidas analógicas.
3. HPS: Tiene dos detectores que entregan una señal de relé, uno de ellos mide sobre-temperatura del fluido hidráulico y el otro detecta el nivel mínimo de aceite en el tanque. Por ello se necesita dos entradas discretas adicionales. Además posee dos modos de funcionamiento, LOW (baja) presión y HIGH (alta) presión por lo que es necesario dos salidas discretas adicionales.
4. Cabezal: Para colocarlo en la posición deseada se utiliza una salida discreta.
5. Paro general: Necesario para detener el sistema en caso de emergencia. Se utiliza una entrada discreta.
6. Operación: Se podrá operar la máquina de forma manual y automática por lo que se necesitará una salida discreta.
7. Red trifásica: Para verificar que el sistema de control de la HPS se encuentre conectado a la red trifásica, se utiliza una entrada discreta.

En resumen, es necesaria una tarjeta de adquisición de datos que cumpla las siguientes características mínimas, mostradas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Requerimientos mínimos para selección de la tarjeta.

Entradas discretas	4 canales
Salidas discretas	5 canales
Entradas analógicas	5 canales
Salidas analógicas	2 canales
Rango de voltaje para las salidas analógicas	0 a 5 V
Rango de voltaje para las entradas analógicas	0 a 10 V

2.2.1 SELECCIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN

Teniendo presente los requisitos impuestos por el sistema de ensayos de materiales MTS indicados en la Tabla 2.2, se ha seleccionado la tarjeta de adquisición DAQ USB-6008¹⁴ (Figura 2.2), dado que suple las necesidades del sistema. Esta tarjeta está formada por cuatro componentes básicos:

1. Módulo de entradas análogas.
2. Módulo de salidas análogas.
3. Módulo de entradas/salidas digitales.
4. Puerto de comunicación USB.

Con el objetivo de lograr una comprensión general del funcionamiento de la tarjeta, en la Figura 2.3 se ilustra el diagrama de bloques de los componentes de la DAQ USB-6008.

¹⁴ Para mayor información acerca de este tipo de tarjeta, remitirse al Anexo E o a la página web www.ni.com.



Figura 2.2. DAQ USB-6008.

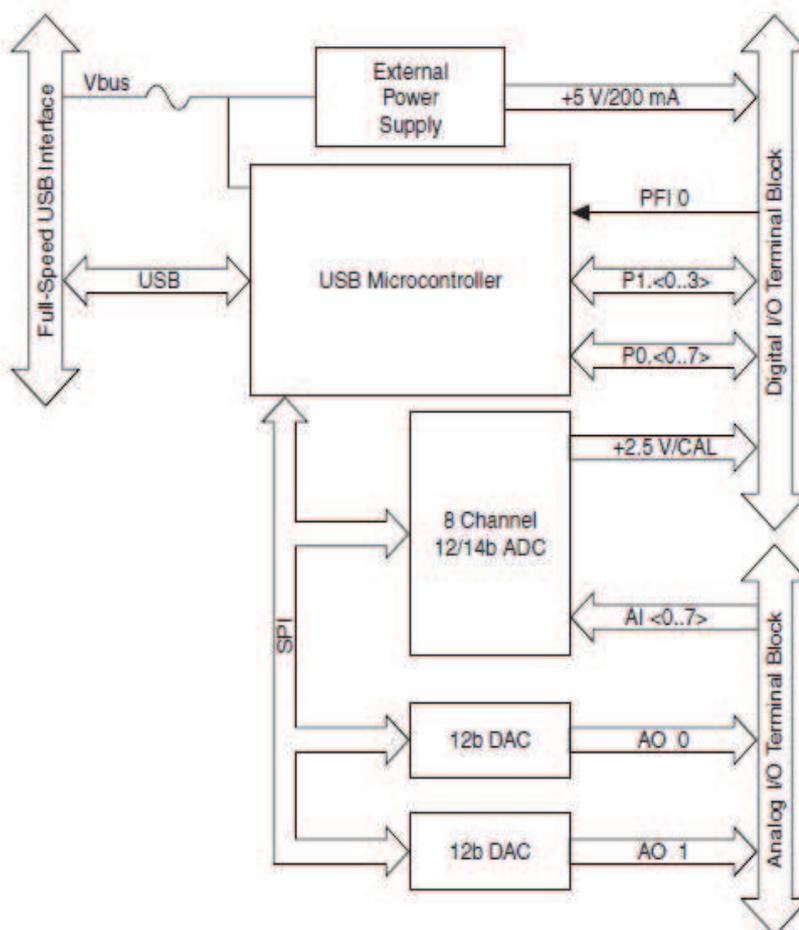


Figura 2.3. Diagrama de bloques de la DAQ USB-6008.

2.2.1.1 Módulo de entradas análogas

El módulo de entradas análogas consta de un multiplexor que permite conectar hasta ocho señales análogas que son enrutadas a un amplificador de ganancia programable para luego ser convertidas a formato digital por el conversor A/D de 12 bits de resolución. La conversión A/D puede realizarse de manera simple o múltiple para un número finito de muestras que son retenidas en un buffer de tipo FIFO durante la adquisición.

La figura 2.4 ilustra el diagrama de bloques del módulo entradas análogas de la DAQ USB-6008.

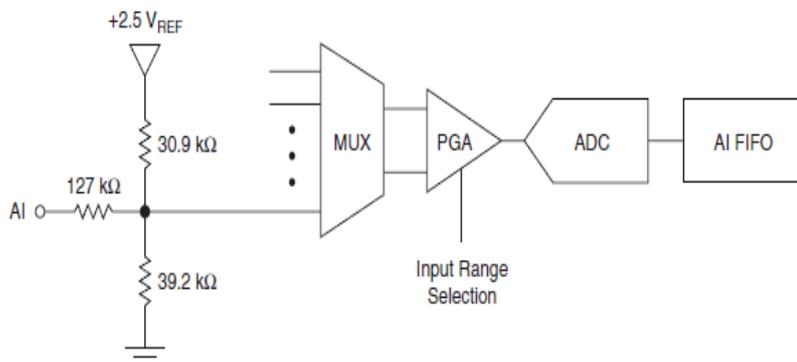


Figura 2.4. Diagrama de bloques del módulo entradas análogas.

Las características del módulo de entradas análogas se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características del módulo de entradas análogas.

Resolución	12 bits
Velocidad máxima de muestreo	10 kS/s
Capacidad del buffer	512 bytes
Tiempo de resolución	41,67 ns
Rango de voltaje	± 10 V
Impedancia de entrada	144 k Ω
Protección de sobrevoltaje	± 35 V

2.2.1.2 Módulo de salidas análogas

Cada salida análoga tiene un módulo que consta de un convertor digital /análogo (DAC) de 12 bits de resolución, un buffer de salida y una resistencia de $50\ \Omega$ para limitar la corriente en caso de cortocircuito.

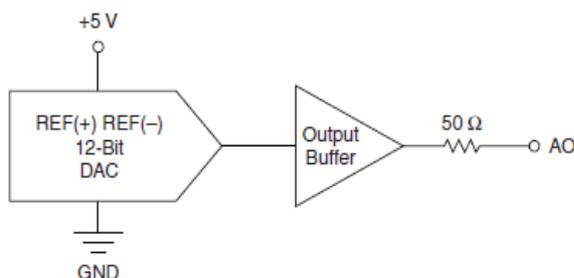


Figura 2.5. Diagrama de bloques del módulo de salida análoga.

Las características del módulo de salidas análogas se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características del módulo de salidas análogas.

Resolución	12 bits
Velocidad máxima de actualización	150 Hz
Corriente de salida	5 mA
Rango de voltaje	0 a +5 V
Impedancia de salida	$50\ \Omega$
Protección de sobrevoltaje	$\pm 35\ V$

2.2.1.3 Módulo de entradas y salidas digitales.

La DAQ USB-6008 consta de 12 líneas digitales que pueden ser individualmente programadas como líneas de entrada o salida. La configuración por defecto de las líneas digitales es a colector abierto, permitiendo un voltaje de 0 ó 5 V con una resistencia de pull-up de $4,7\ k\Omega$. Se puede añadir una resistencia de pull-up para limitar la corriente por línea a 8,5 mA.

2.2.1.4 Puerto de comunicación USB

La interfaz que permite la comunicación entre el computador y la tarjeta DAQ es de tipo USB 2.0 full speed que permite una transferencia de datos a 12 Megabits por segundo (Mb/s).

El puerto de comunicación USB presenta las siguientes ventajas:

- Es totalmente Plug & Play, es decir, el dispositivo es reconocido e instalado de manera inmediata.
- El cable USB permite alimentar dispositivos externos a través de él y tiene un consumo máximo de 200 mA.
- Hasta 127 dispositivos diferentes pueden estar conectados simultáneamente y operando con una misma computadora sobre el Bus Serial Universal.

Las características mencionadas hacen que el uso de una tarjeta de adquisición de datos sea una buena opción para realizar el control y la interface del sistema axial-torsional MTS.

2.2.2 CONECTOR I/O

Los módulos antes mencionados se encuentran distribuidos en dos borneras, las mismas que tienen la asignación de terminales indicado en las siguientes tablas.

Tabla 2.5. Asignación de terminales análogos.

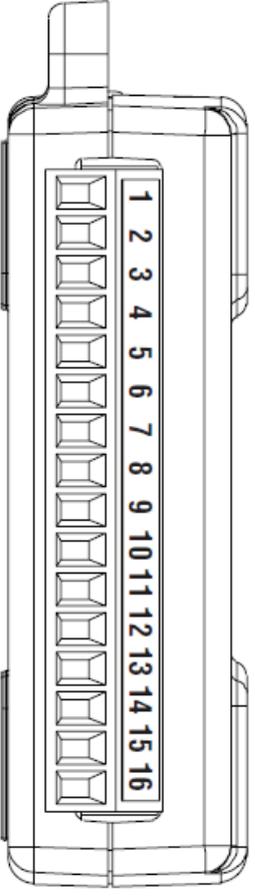
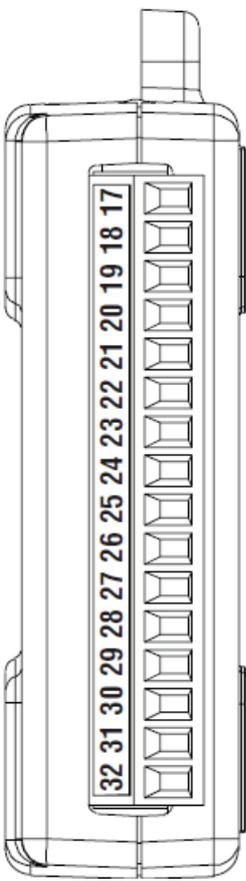
Módulo	Terminal	Nombre	Descripción
	1	GND	Tierra
	2	AI 0	Entrada análoga 0
	3	AI 4	Entrada análoga 4
	4	GND	Tierra
	5	AI 1	Entrada análoga 1
	6	AI 5	Entrada análoga 5
	7	GND	Tierra
	8	AI 2	Entrada análoga 2
	9	AI 6	Entrada análoga 6
	10	GND	Tierra
	11	AI 3	Entrada análoga 3
	12	AI 7	Entrada análoga 7
	13	GND	Tierra
	14	AO 0	Salida análoga 0
	15	AO 1	Salida análoga 1
	16	GND	Tierra

Tabla 2.6. Asignación de terminales digitales.

Módulo	Terminal	Nombre	Descripción
	17	P0.0	Puerto 0 Línea 0
	18	P0.1	Puerto 0 Línea 1
	19	P0.2	Puerto 0 Línea 2
	20	P0.3	Puerto 0 Línea 3
	21	P0.4	Puerto 0 Línea 4
	22	P0.5	Puerto 0 Línea 5
	23	P0.6	Puerto 0 Línea 6
	24	P0.7	Puerto 0 Línea 7
	25	P1.0	Puerto 1 Línea 0
	26	P1.1	Puerto 1 Línea 1
	27	P1.2	Puerto 1 Línea 2
	28	P1.3	Puerto 1 Línea 3
	29	PFI 0	Entrada Trigger
	30	2,5V	Voltaje de referencia
	31	5V	Fuente auxiliar
	32	GND	Tierra

2.3 DISEÑO DEL HARDWARE DE CONTROL

Basado en el modo de funcionamiento descrito en el manual, se diseñó un sistema que permita al operador controlar el equipo MTS de acuerdo a los requerimientos actuales. Se concibió que el sistema deba detenerse en caso de falla por sobre-temperatura del fluido hidráulico o por escasez del mismo. Por seguridad y facilidad para el operador, se ha provisto de accionamientos para comandar el Paro de Emergencia de tres maneras, un interruptor accionado por software (STOP 1), un interruptor manual en el panel de control (STOP 2) y un interruptor manual en el panel eléctrico de alto voltaje (STOP 3). Esta distribución busca que el operador tenga fácil acceso a cualquiera de ellos como se muestra en la Figura 2.6.

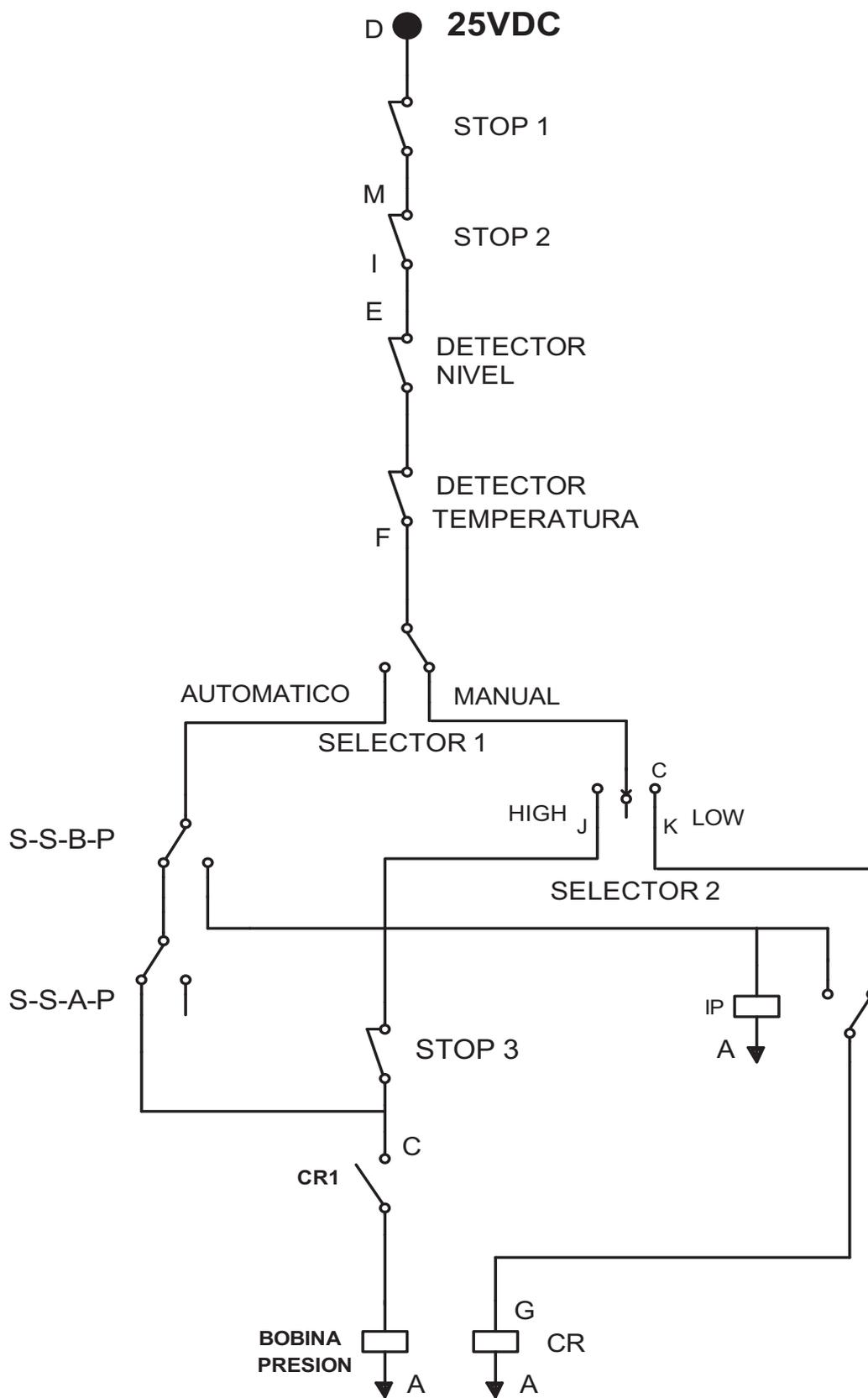


Figura 2.6. Circuito de control.

Se ha provisto al equipo MTS de dos formas de funcionamiento: manual y automático, que pueden ser elegidas mediante el Selector 1 desde el software de control.

El modo manual se ha diseñado únicamente para revisión del equipo, para lo cual el operador deberá activar la máquina en modo de Baja presión por 30 segundos para llenar de fluido el sistema hidráulico, para luego pasar al modo de Alta presión donde se energiza la válvula del control de presión mediante el relé IP y de esta manera comprobar el correcto funcionamiento del cabezal y del émbolo.

El modo automático realiza la secuencia antes mencionada mediante el software de control, activando el relé Stop-Start-Baja-Presión (S.S.B.P.) 30 segundos, luego de lo cual, automáticamente el sistema conmuta al modo de Alta Presión mediante la activación del relé Stop-Start-Alta- Presión (S.S.A.P.)

El relé CR es el elemento que conmuta para la activar del arranque $Y - \Delta$. Para energizar la electroválvula que controla el movimiento axial del cabezal se conmuta un relé, el mismo que es controlado por software con la ayuda del circuito de la Figura 2.6, la cual ilustra la forma adecuada de energizar un relé utilizando la DAQ 6008.

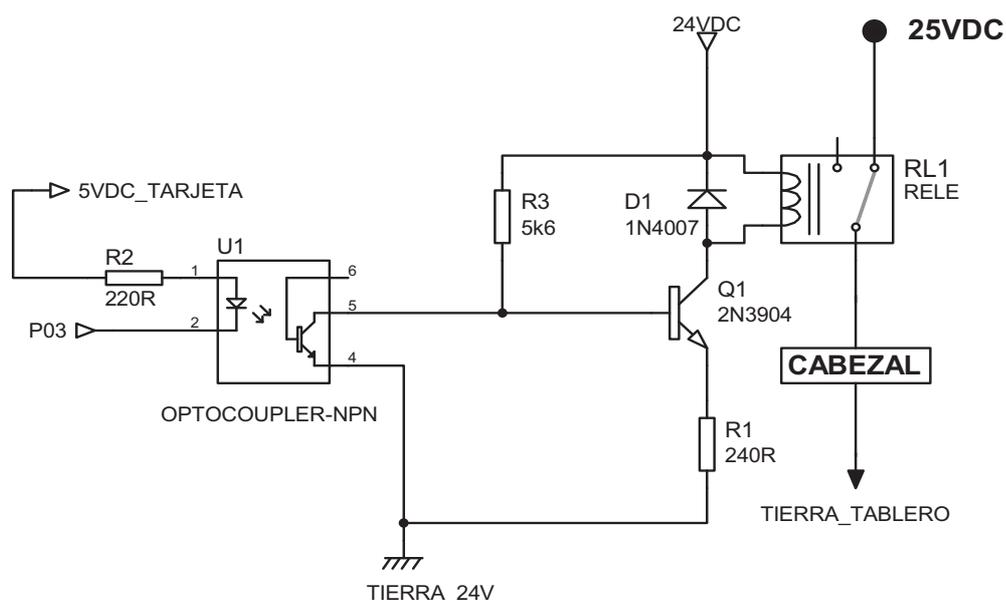


Figura 2.7. Forma adecuada de energizar un relé utilizando la DAQ 6008.

2.4 DISEÑO DEL DRIVER PARA LAS SERVOVÁLVULAS

El sistema MTS consta de dos servoválvulas, una axial y otra torsional. La Tabla 2.7 lista las especificaciones para la servoválvula de la serie 252.

Tabla 2.7. Parámetros de las servoválvulas.

Parámetro	Especificación
Resistencia de la bobina	80 Ω
Máximo rango de entrada de voltaje por bobina	-5 V a 5 V
Máxima corriente de entrada	25 mA(serie), 50 mA(diferencial y paralelo)
Rango de temperatura	-53 °C a 135 °C
Máxima presión de operación	3000 psi (20.7 MPa)
Mínima presión de operación	200 psi (1.4 MPa)

Cada servoválvula se compone de dos bobinas de 80 Ω , las mismas que pueden ser conectadas de tres distintas maneras, tal y como se muestra en la Figura 2.8.

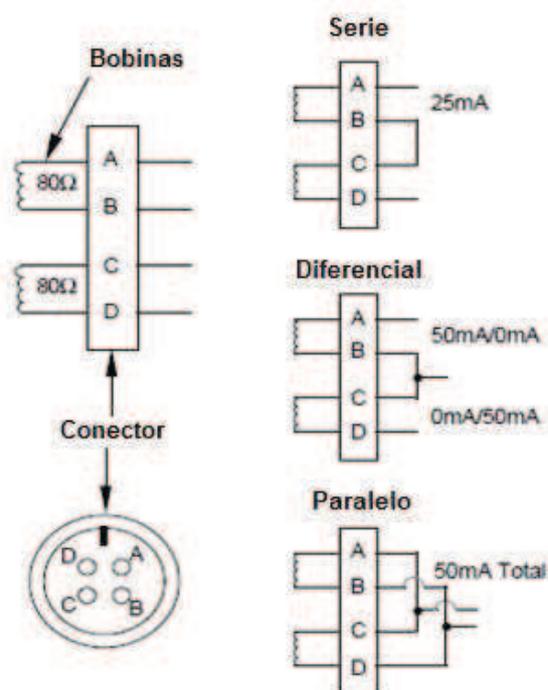


Figura 2.8. Bobina, conector y diagrama esquemático.

Se dispuso de la conexión de las dos bobinas en serie, teniendo una resistencia total de 160Ω y se decidió polarizar con un voltaje máximo de 10 V , con una variación de -5 V a 5 V .

El siguiente cálculo determina el valor de la corriente máxima que soportaría el driver de corriente.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10V}{160\Omega} = 125 \text{ mA} \quad (2.5)$$

El circuito implementado para la obtención del mencionado voltaje y que cumpla los requisitos de corriente es el indicado en la Figura 2.9.

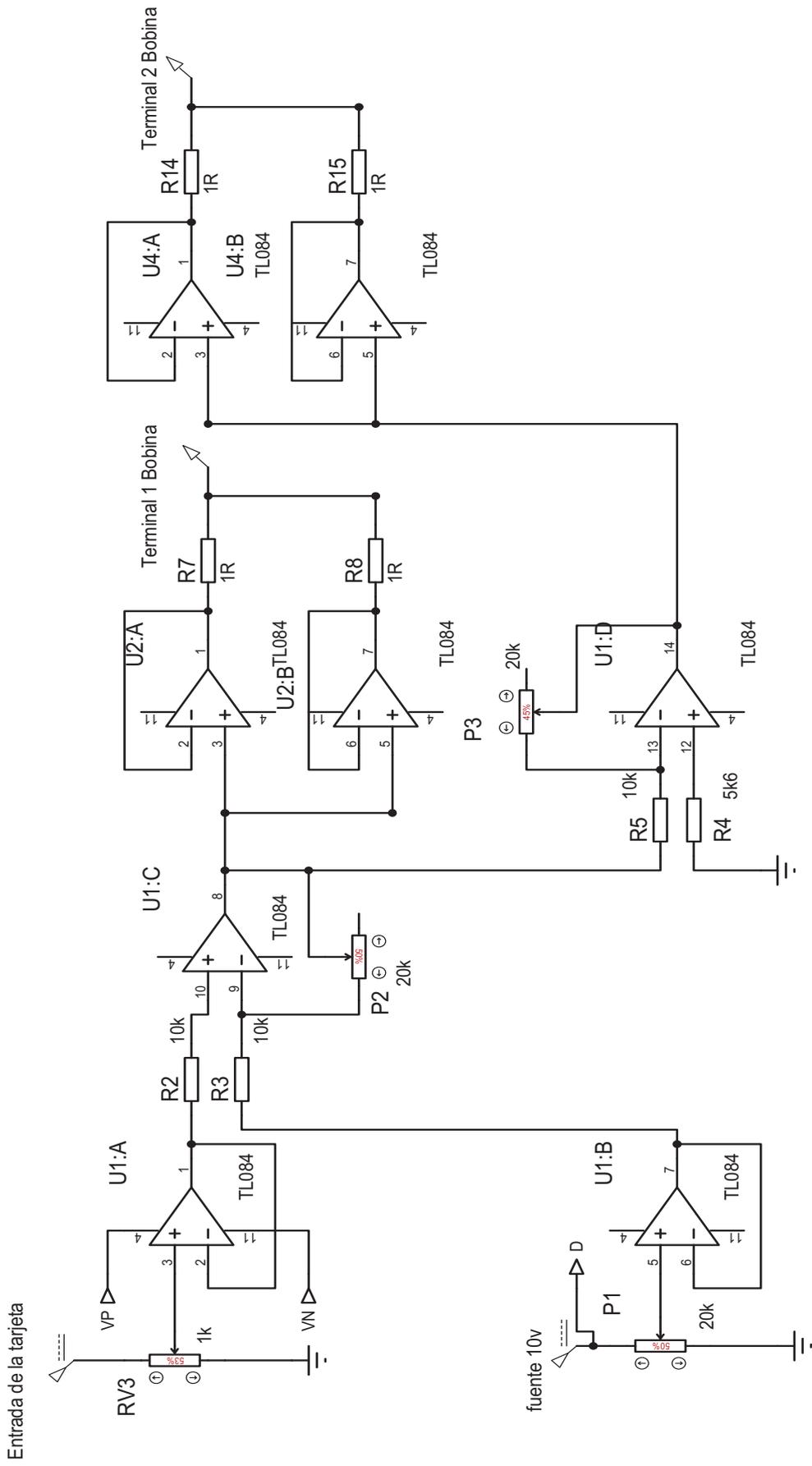


Figura 2.9. Driver de corriente para las servoválvulas.

A continuación se presenta el amplificador operacional TL084 que constituye el driver de corriente.

2.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL084

El TL084 es un amplificador operacional (A.O.) de uso general que en la Figura 2.9 es usado como seguidor de voltaje y amplificador diferencial. Las características eléctricas del amplificador operacional TL084 se especifican en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Características eléctricas del A.O. TL084.

Ganancia	250
Ancho de Banda	500 kHz
Impedancia de entrada	10 M Ω
Voltaje máximo de polarización	18 V
Corriente máxima de salida	40 mA

La distribución de pines es la que se muestra en la Figura 2.10.

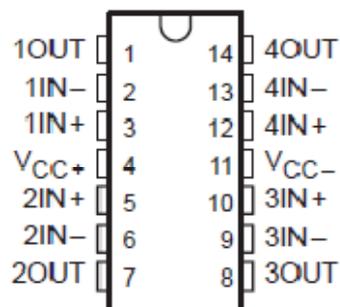


Figura 2.10. Distribución de pines del A.O. TL084.

2.5 ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES

Como se mencionó en el capítulo anterior, la máquina MTS consta de 5 sensores que miden las siguientes variables:

- Carga
- Torque
- Desplazamiento lineal (LVDT)
- Desplazamiento angular (ADT)
- Deformación lineal

El circuito de acondicionamiento que se implementó para cada uno de los sensores, el cual se indica en la Figura 2.11, consta de un amplificador de instrumentación AD620 con la configuración recomendada por el fabricante para este tipo de aplicaciones, con una salida de voltaje que varía entre 0 V y 10 V.

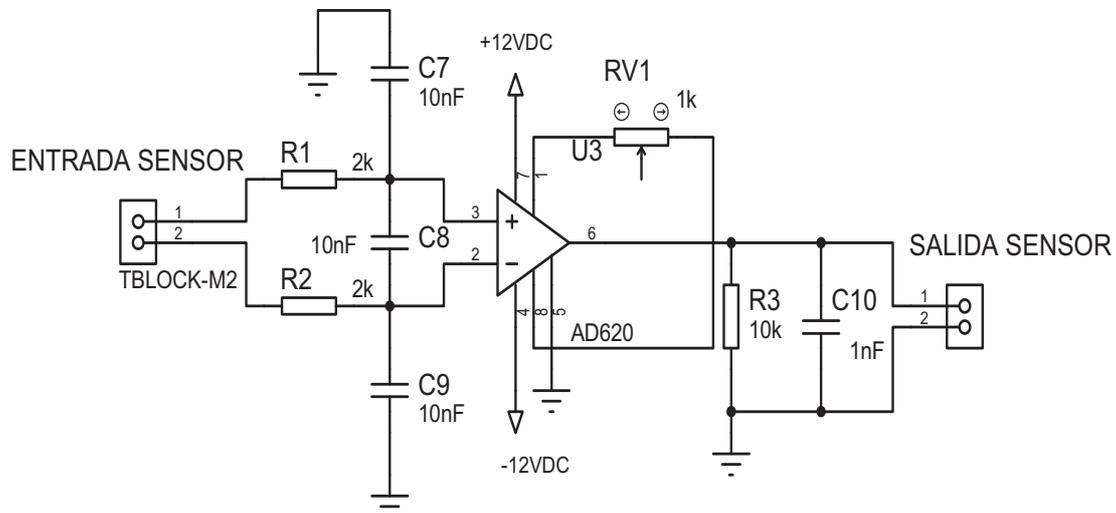


Figura 2.11. Acondicionamiento de sensores.

2.5.1 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD620

El AD620 es un amplificador de instrumentación (A.I.) que permite configurar la ganancia, entre 1 y 1000, mediante una resistencia externa. La ecuación determina el valor de la ganancia del A.I. en función de la resistencia externa R_G , como se indica en la Figura 2.12:

$$G = \left(1 + \frac{49.4K\Omega}{R_G} \right) \quad (2.6)$$

$$R_G = \frac{49.4K\Omega}{500 - 1} \quad (2.7)$$

$$R_G = 98.99 \Omega \quad (2.8)$$

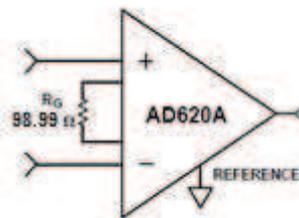


Figura 2.12. Amplificador de instrumentación AD620.

Las características eléctricas del amplificador de instrumentación AD620 se indican en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Características eléctricas del amplificador de instrumentación AD620.

Ganancia	1 - 1000
Ancho de Banda	120 kHz
Impedancia de entrada	10 M Ω
Voltaje máximo de polarización	± 18 V

El ambiente en el cual se encuentra instalado el equipo MTS da lugar a la presencia de ruido debido a interferencias electromagnética (EMI) e interferencias por radiofrecuencia (RFI), especialmente en las señales adquiridas para el sensor de desplazamiento lineal (LVDT) y el de carga, para lo cual fue indispensable la implementación de un filtro.

2.5.2 FILTRO PASA-BAJOS DE SEGUNDO ORDEN DE BUTTERWORTH

Un filtro pasa-bajo permite el paso de frecuencias bajas desde una frecuencia cero hasta una determinada, conocida como la frecuencia de corte.

El filtro activo de segundo orden de Butterworth se caracteriza por producir respuesta en frecuencia lo más plana posible. Las siguientes ecuaciones permiten calcular el valor de los capacitores para una determinada frecuencia (F_c) de corte:

$$C_1 = \frac{1,4142}{2 * \pi * F_c * R} \quad (2.9)$$

$$C_2 = \frac{0,7071}{2 * \pi * F_c * R} \quad (2.10)$$

En donde R puede tomar valores desde 4,7 k Ω hasta 10 k Ω .

La F_c es 100Hz y $R=10\text{k}\Omega$ por lo tanto el valor de los capacitores es el siguiente:

$$C_1 = \frac{1,4142}{2 * \pi * 1000 \text{ Hz} * 10 \text{ k}\Omega} = 0,22 \text{ uF}$$

$$C_2 = \frac{0,7071}{2 * \pi * 1000 \text{ Hz} * 10 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ uF}$$

El circuito implementado para filtrar las señales provenientes del sensor de torque y carga se muestra en la Figura 2.13.

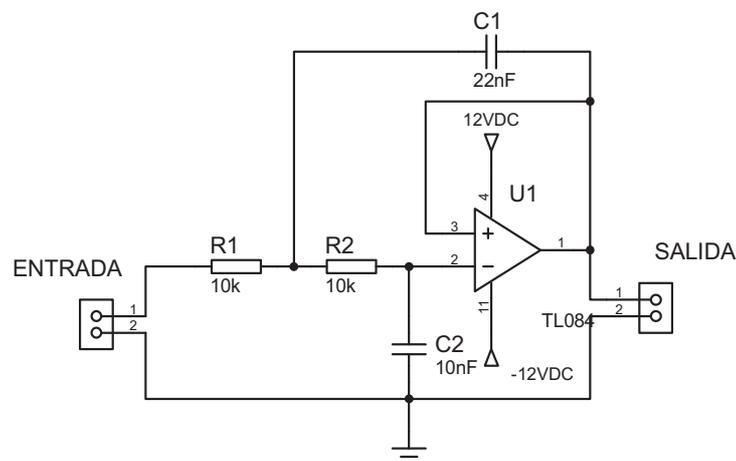


Figura 2.13. Filtro de Butterworth

Los diagramas esquemáticos de cada uno de los circuitos implementados, así como el diseño de las tarjetas electrónicas instaladas se anexan al final de este documento, con la finalidad de que en caso de daño de alguno de estos puedan ser reparados o reemplazados.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

En este capítulo se explica sobre la selección del software utilizado para el desarrollo de la interfaz gráfica, los requerimientos para su uso y los requisitos que deben cumplir una interfaz humano-máquina. Además se hace una descripción del programa desarrollado, que permite realizar la supervisión, control y adquisición de datos del sistema axial-torsional MTS y un diagrama de flujo del mismo.

3.1 SELECCIÓN DEL PAQUETE DE DESARROLLO

En la selección del software de monitoreo y control, hay que verificar que dicho paquete cumpla los requisitos necesarios tales como seguridad, amigabilidad y facilidad de maniobra, para supervisar el sistema de axial-torsional MTS. Debido a que el control del equipo MTS se lo realiza a través de la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB-6008, la HMI se desarrolló en el entorno computacional de LabVIEW, ambos productos de National Instruments. Además se toma en consideración que la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica dispone del software LabVIEW 8.5, así como de la autorización de uso y respectivas licencias.

3.1.1 ESPECIFICACIONES DEL PAQUETE COMPUTACIONAL LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida y control usando para ello íconos gráficos intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Este software ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos. La plataforma LabVIEW es escalable a través de múltiples objetivos y sistemas operativos.

Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- Reducción del tiempo de desarrollo de las aplicaciones de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Posibilita a los usuarios el crear soluciones completas y complejas.
- Integra las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos con un único sistema de desarrollo.
- Lograr la máxima velocidad de ejecución posible al estar dotado de un compilador gráfico.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.
- Puede ser empleado para aplicaciones de 32 bits, con alta velocidad de ejecución para adquisición de datos, ensayos, mediciones, y soluciones de control.
- Simplifica el control y reduce el tiempo de desarrollo de pruebas, eliminando la necesidad de aprender programación en bajo nivel.

3.1.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA PARA LabVIEW

LabVIEW es parte del paquete industrial National Instruments, el mismo que es utilizado para supervisión, control, adquisición y almacenamiento de datos. La Tabla 3.1 describe el mínimo requerimiento del hardware y software necesario para LabVIEW.

Tabla 3.1. Mínimos requerimientos de hardware y software para LabVIEW.

HARDWARE Y SOFTWARE	REQUERIMIENTO MÍNIMO
CPU	Procesador Pentium, 100 MHz
Memoria	256 MB de RAM
Espacio libre en el disco	100 MB
Sistema Operativo	Windows 2000/XP

3.2 DESARROLLO DEL HMI

La interfaz humano máquina (HMI), como su nombre lo indica, es un medio que facilita y posibilita que un operador humano pueda interactuar con un proceso. En el presente caso se trata de desarrollar, con ayuda de un computador y el software adecuado, una serie de pantallas, en ambiente Windows, que permitan la supervisión y control de las variables involucradas en el proceso. Por ello el programa está desarrollado con una serie de pantallas que tratan de asemejarse lo mejor posible al proceso que ejecuta el equipo para facilitar el manejo, monitoreo y control del proceso de tal manera que el operador se sienta atraído por el software y lo use efectivamente.

Dentro de todo sistema de control es importante tener un registro de alarmas que ocurren en el proceso a controlar, motivo por el cual el HMI debe disponer de sus respectivas protecciones y avisos correspondientes para seguridad del operario y del equipo. Estas alarmas deben ser claras y fáciles de detectar. Por ende, el software que realice el monitoreo debe poseer estas propiedades.

También es importante que un sistema de supervisión posibilite el almacenamiento de eventos que ocurren en el proceso a controlar. De aquí que la creación de bases de datos en el sistema HMI es necesaria y útil para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos durante cualquier prueba realizada.

3.2.1 REQUISITOS DE UNA INTERFAZ HMI

FUNCIONALIDAD: Que el software de desarrollo realice el trabajo para el que fue diseñado.

CONFIABILIDAD: Que la operación del sistema resulte segura para cualquier operador calificado.

DISPONIBILIDAD: Que todo operario calificado tenga facilidad de manejo del sistema.

ESTANDARIZACIÓN: Las características de la interfaz de usuario como simbologías, colores, entre otras, deben ser comunes entre múltiples aplicaciones y estándares internacionales.

CONSISTENCIA: Que el apoyo visual sea igual en todas las pantallas para crear un ambiente amigable al usuario, también en lo referente a terminologías, variables y comandos utilizados en la interfaz.

PORTABILIDAD: Que el paquete sea reconocido y aceptado por la mayoría de procesadores.

3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO CON EL SOFTWARE LabVIEW

El programa realizado en el software LabVIEW tiene como principal objetivo crear un ambiente amigable, confiable y facilitar al operador el manejo del sistema MTS, el mismo que será descrito a continuación.

3.2.2.1 Ingreso a la aplicación

Al ejecutar el ícono generado por LabVIEW en la PC se muestra la pantalla de “Bienvenida” (Figura 3.1), cuya descripción se muestra en la Tabla 3.2.



Fig. 3.1. Pantalla “Bienvenida”.

Tabla 3.2. Descripción de la pantalla de “Bienvenida”.

Ícono	Descripción
Contraseña	Permite el ingreso de una contraseña conocida únicamente por personal autorizado del Laboratorio de Análisis Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).
Continuar	Permite continuar a la pantalla “Principal”.
Stop	Permite de detener todo el sistema en caso de emergencia.
Salir	Cierra el programa y detiene el proceso que esté ejecutándose.

A pesar de que existen pestañas en la pantalla de “Bienvenida” (“Principal”, “Funcionamiento manual”, “Funcionamiento automático”, “Ensayo axial”, “Ensayo torsional” y “Ensayo de fatiga”), es necesario mencionar que únicamente están activos los íconos que se mencionan en la Tabla 3.2, ya que el programa ha sido desarrollado en forma secuencial. Es decir, las pestañas se habilitan cada vez que se ingresa a una nueva pantalla. En la parte inferior se visualiza una barra de íconos en la cual se muestra el “stop” de emergencia, la fecha, la hora y el ícono de “salir”. La barra de íconos está activada en todas las pantallas del programa.

Los únicos íconos que se pueden manipular en cualquier instante es el “stop” de emergencia que este detendrá el sistema en caso de emergencia y el ícono de “salir” el cual detiene el proceso y cierra el programa.

3.2.2.2 Ingreso a la pantalla “Principal”

Luego de ingresar la clave correcta y hacer clic sobre el ícono “Continuar”, se muestra la pantalla denominada “Principal” (Figura 3.2), la cual permite al operador escoger la forma de operación del sistema de poder hidráulico (HPS): funcionamiento manual o funcionamiento automático. La descripción de la pantalla “Principal” se presenta en la Tabla 3.3.

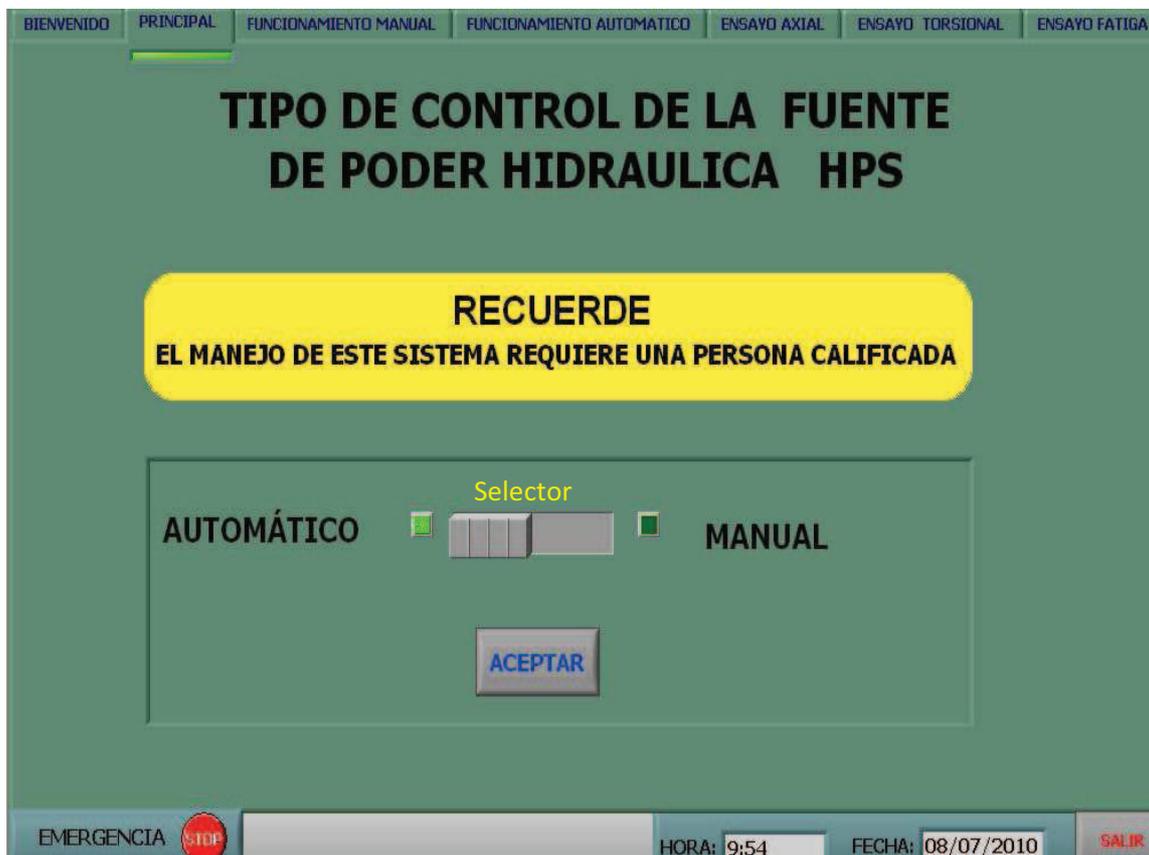


Figura. 3.2. Pantalla “Principal”.

Tabla 3.3. Descripción de la pantalla “Principal”.

Ícono	Descripción
Selector Manual/Automático	Permite seleccionar el modo de operación manual o automático.
Aceptar	Permite continuar a la pantalla “Funcionamiento Manual” o “Funcionamiento Automático” dependiendo de la posición del “Selector”.

3.2.2.3 Ingreso a la pantalla “Funcionamiento manual”

Si el selector Manual/Automático (Figura 3.2) se encuentra en la posición manual y se hace clic sobre el ícono Aceptar, debe desplegarse la pantalla de “Funcionamiento Manual” la cual se muestra en la Figura 3.3.

**Figura 3.3.** Pantalla de “Funcionamiento Manual”.

De acuerdo con los requerimientos del personal del LAEV, el modo manual servirá únicamente para verificar de manera independiente o general el

correcto funcionamiento de la fuente de poder hidráulica (HPS), controlar el movimiento del émbolo y posicionar el cabezal.

El arranque del sistema HPS lo efectúa el operador manipulando el Selector HIGH/LOW (Figura 3.3) ubicado en el panel eléctrico de alto voltaje montado junto al tanque de aceite del HPS. A continuación se indica los pasos a seguir para arrancar de manera correcta la máquina MTS en modo manual:

1. Posicionar el selector HIGH/LOW en la posición LOW por 30 segundos, la presión indicada en el manómetro será de 300 psi.
2. Transcurrido el tiempo indicado, inmediatamente posicionar el selector HIGH/LOW en la posición HIGH, la presión se incrementa a 1500 psi.

Para posicionar el Cabezal se debe seguir los siguientes pasos:

1. Habilitar el ícono “Cabezal ON/OFF” (Figura 3.3).
2. Abrir la válvula UP o DOWN (ubicada a un costado del marco de carga), de acuerdo con la dirección requerida para desplazar el cabezal. La velocidad de desplazamiento varía de acuerdo a la apertura de las válvulas.
3. Cerrar las válvulas UP y DOWN después que la posición del cabezal esté en el lugar correcto.
4. Deshabilitar el ícono “Cabezal ON/OFF”.

Hay que tener en consideración algo muy importante: el programa desarrollado no muestra en la pantalla la posición del cabezal ya que el sistema no dispone de un sensor que efectúe esta medición. Además, las válvulas que controlan el posicionamiento del cabezal son manuales (válvulas UP y DOWN). Por esto es necesario que el operador esté cerca del equipo para ubicar las probetas en el marco de carga.

Para controlar el movimiento del émbolo se debe presionar los botones “Subir émbolo” o “Bajar émbolo” ubicados en el panel de control. La descripción de la pantalla “Funcionamiento manual” se indica en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Descripción de la pantalla “Funcionamiento manual”.

Ícono	Descripción
Émbolo sube	Indica el ascenso del émbolo.
Émbolo baja	Indica el descenso del émbolo.
Presión alta	Indica funcionamiento HPS en alta presión.
Presión baja	Indica funcionamiento HPS en baja presión.
Red AC conectada	Indica presencia de corriente alterna en la red.
Cabezal ON/OFF	Activa la electroválvula para posicionar el cabezal.
Regresa “principal”	Apaga la HPS y regresa a la pantalla “principal”.

3.2.2.4 Ingreso a la pantalla “Funcionamiento automático”

Si el “selector” manual/automático (Figura 3.2) se encuentra en la posición automático, al hacer clic sobre el ícono “aceptar”, se debe mostrar la pantalla de “Funcionamiento automático” indicada en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Pantalla de “Funcionamiento automático”.

La pantalla “Funcionamiento automático” está diseñada con el objetivo de mostrar en forma general el proceso que se está realizando. En ella se puede observar la fuente de poder hidráulica (HPS), el sistema de enfriamiento (cisterna, intercambiador de calor y bomba de refrigeración) y la máquina de ensayos MTS.

Para arrancar el sistema HPS de forma automática es necesario hacer un clic sobre el ícono “ON/OFF” (Figura 3.4). Inmediatamente el sistema arranca en baja presión por 30 segundos y muestra este estado en el indicador “Baja presión” (Figura 3.4). Transcurrido el tiempo anterior el sistema cambia automáticamente de baja a alta presión y se enciende el indicador “Alta presión” (Figura 3.4). La descripción de la pantalla “Funcionamiento automático” se indica en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Descripción de la pantalla “Funcionamiento automático”.

Ícono	Descripción
Presión alta	Indica funcionamiento HPS en alta presión.
Presión baja	Indica funcionamiento HPS en baja presión.
Red AC conectada	Indica presencia de corriente alterna en la red.
Cabezal ON/OFF	Activa la electroválvula para posicionar el cabezal.
Elegir tipo ensayo	Permite elegir el tipo de ensayo a realizar.
Ir	Permite continuar al tipo de ensayo elegido.

3.2.2.5 Ingreso a la pantalla “Ensayo axial”

Luego de elegir el tipo de ensayo y hacer clic sobre el ícono “IR” (Figura 3.4), se despliega la pantalla “Ensayo axial”, la misma que se indica en la Figura 3.5.

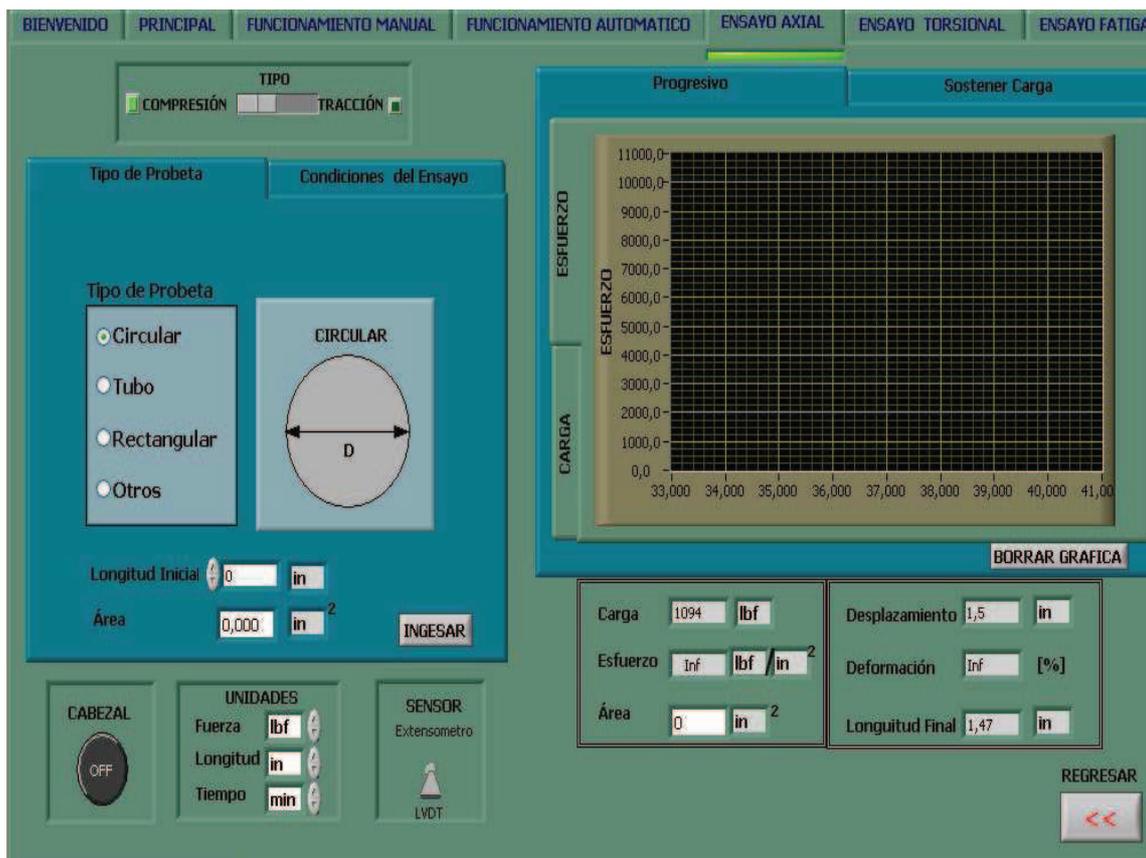


Figura 3.5. Pantalla de “Ensayo axial”.

La descripción de los principales íconos de la pantalla de “Ensayo axial” se indica en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Descripción de la pantalla de “Ensayo axial”.

Ícono	Descripción
Tipo	Permite elegir entre ensayo axial de tracción o compresión.
Cabezal ON/OFF	Activa la electroválvula para posicionar el cabezal.
Sensor	Permite elegir el tipo de sensor con el que se va a realizar el ensayo. LVDT o extensómetro.
Borrar gráfica	Borra la gráfica actual.
Unidades	Permite elegir el tipo de unidades.
Regresar	Permite retornar a la pantalla de “Funcionamiento automático” para elegir otro tipo de ensayo.

En la pantalla de “Ensayo axial” (Figura 3.5) se muestra seis indicadores que representan los datos principales del ensayo y los resultados del mismo, en las unidades que el usuario elige trabajar, estos indicadores son:

- Longitud Inicial
- Área
- Fuerza
- Esfuerzo
- Desplazamiento
- Longitud Final

Al interior de la pantalla de “Ensayo axial” (Figura 3.5) se encuentra un tab con dos pestañas “Tipo de probeta” y “Condiciones de ensayo”. Al hacer clic sobre la pestaña “Tipo de probeta” se tiene una pantalla tal como la que se muestra en la Figura 3.6.

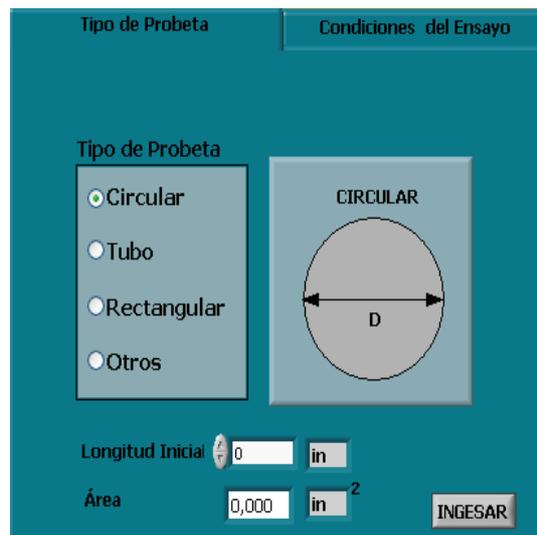


Figura 3.6. Pantalla “Tipo de probeta”.

Para elegir el tipo de probeta se debe seguir los siguientes pasos:

1. Elegir el tipo de probeta.
2. Hacer clic en el ícono “INGRESAR” (Figura 3.6) e ingresar los parámetros requeridos, como se indica en la Figura 3.7.

DIMENSIONES DE LA PROBETA CIRCULAR

INGRESE EL DIAMETRO DE LA PROBETA Nota: Se requieren el ingreso tres valores

D1= 4

D2= 4,3

D3= 4,2

Ingresar Cancelar

Figura 3.7. Ingreso de valores para el “Tipo de probeta”.

- Luego de hacer clic sobre el ícono “INGRESAR” (Figura 3.7), el sistema calcula automáticamente el área de la probeta y coloca este valor sobre la casilla área.

Al hacer clic sobre la pestaña “Condiciones del ensayo” se despliega una pantalla tal como la que se muestra en la Figura 3.8.

Tipo de Probeta Condiciones del Ensayo

Progresivo Sostener Carga

Fuerza 1 100 lbf Velocidad 1 0,5 in /min

Fuerza 2 100 lbf Velocidad 2 0,5 in /min

Velocidad 3 45 in /min

Velocidad de ensayo

0,5 10 20 30 45

INICIAR ENSAYO

Inicar ensayo

Figura 3.8. Pantalla “Condiciones del ensayo”.

La opción “Condiciones del ensayo” permite optar por dos tipos de ensayos: “Sostener carga” y “Progresivo”.

Al hacer clic sobre la pestaña “Progresivo” se tiene una pantalla como se muestra en la Figura 3.9. El programa está desarrollado para que varíe su velocidad en 3 etapas, que son:

- Velocidad 1, mientras la probeta experimenta una carga entre cero y el valor especificado en “Fuerza 1”.
- Velocidad 2, mientras la probeta experimenta una carga entre el valor especificado en “Fuerza 1” y el valor especificado en “Fuerza 2”.
- Velocidad 3, cuando la probeta experimenta una carga mayor al valor especificado en “Fuerza 2”.

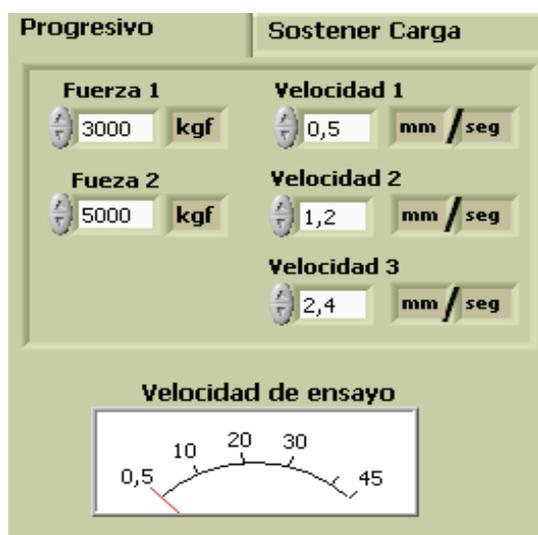


Figura 3.9. Pantalla ensayo “Progresivo”.

La velocidad de ensayo mostrada en la pantalla anterior se refiere a la velocidad a la que se desplazará el émbolo hasta llegar a la carga especificada. Para este ensayo se pueden obtener la gráfica de esfuerzo y carga en función del desplazamiento o la deformación. El usuario puede elegir entre deformación o desplazamiento haciendo clic sobre el ícono “sensor” descrito en la tabla 3.6. La gráfica antes mencionada se muestra en la Figura 3.10.

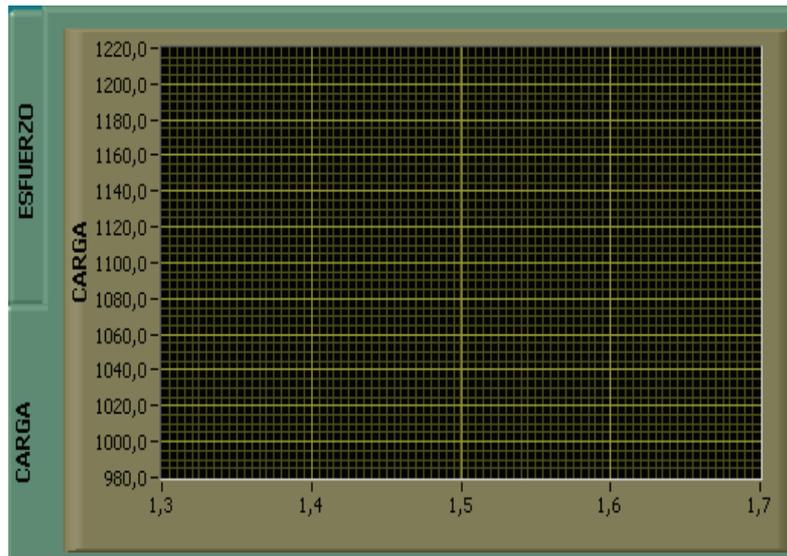


Figura 3.10. Pantalla ensayo “Progresivo”.

Al hacer clic sobre la pestaña “Sostener carga” se despliega la pantalla mostrada en la Figura 3.11. En esta pantalla se tiene un ícono de fuerza que hace referencia al valor máximo de carga que se desea aplicar a la probeta. Además existe un indicador que le permite al usuario visualizar el porcentaje máximo de carga que se puede obtener de la máquina.



Figura 3.11. Pantalla ensayo “Sostener carga”.

Para iniciar cualquiera de los ensayos antes mencionados el operador debe hacer clic en el ícono “iniciar ensayo”. Cada vez que se inicia un nuevo ensayo

se abre automáticamente una hoja de cálculo en Excel donde también se recopilan los datos obtenidos durante el ensayo. Para detener el ensayo y retirar la probeta el operador debe hacer clic en el ícono “detener ensayo”. Finalmente para regresar al émbolo a su posición inicial y realizar un nuevo ensayo el operador debe hacer clic en el ícono “regresar a condiciones iniciales”.

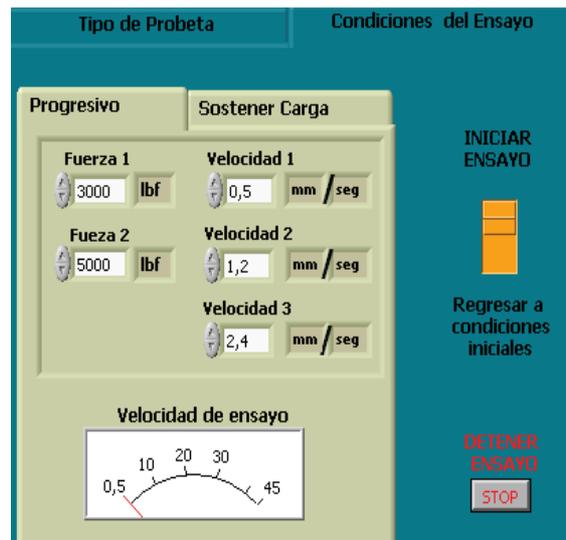


Figura 3.12. Pantalla “Condiciones de ensayo”.

3.2.2.6 Ingreso a la pantalla “Ensayo torsional”

Al elegir ensayo torsional en la pantalla de funcionamiento automático se despliega la pantalla “Ensayo torsional”, la misma que se indica en la Figura 3.13. Debido a que este ensayo se realiza de manera similar al ensayo axial y para facilidad del usuario se diseñó también una pantalla semejante, que permite realizar los ensayos de torsión en sentido horario o antihorario y aplicar a la probeta un torque constante. Además, se presenta en forma gráfica los resultados de los ensayos.

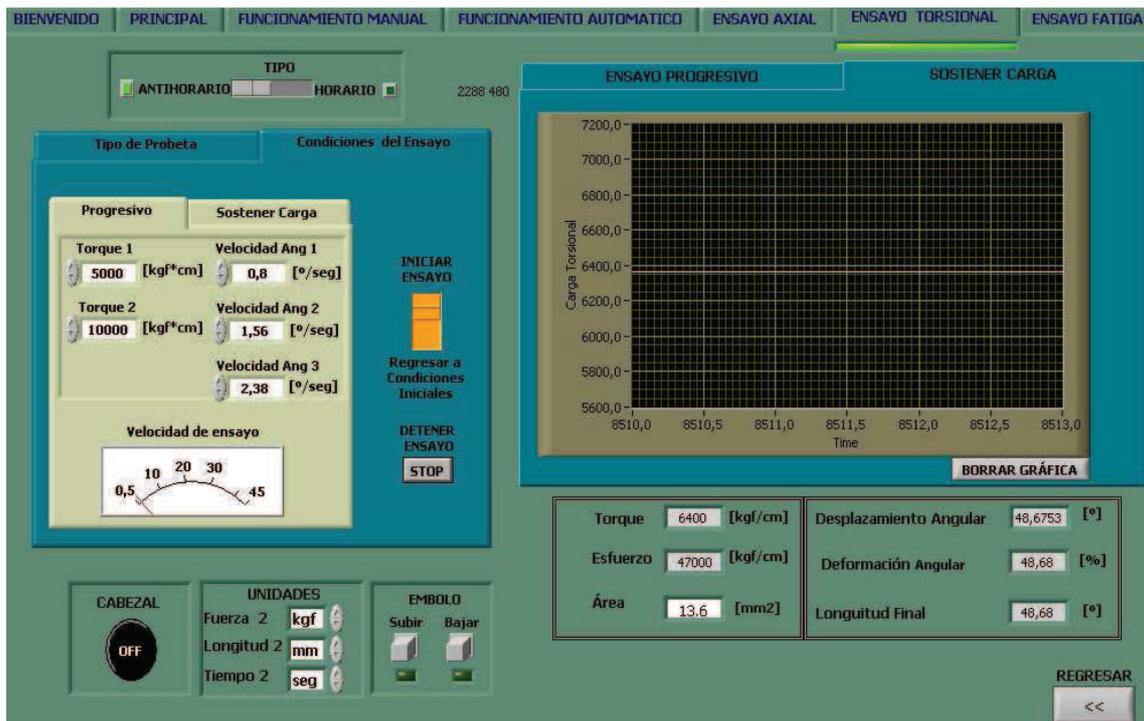


Figura 3.13. Pantalla de “Ensayo torsional”.

3.2.2.7 Ingreso a la pantalla “Ensayo fatiga”

Al elegir ensayo de fatiga en la pantalla de funcionamiento automático se despliega la pantalla “Ensayo fatiga”, la misma que se indica en la Figura 3.14.

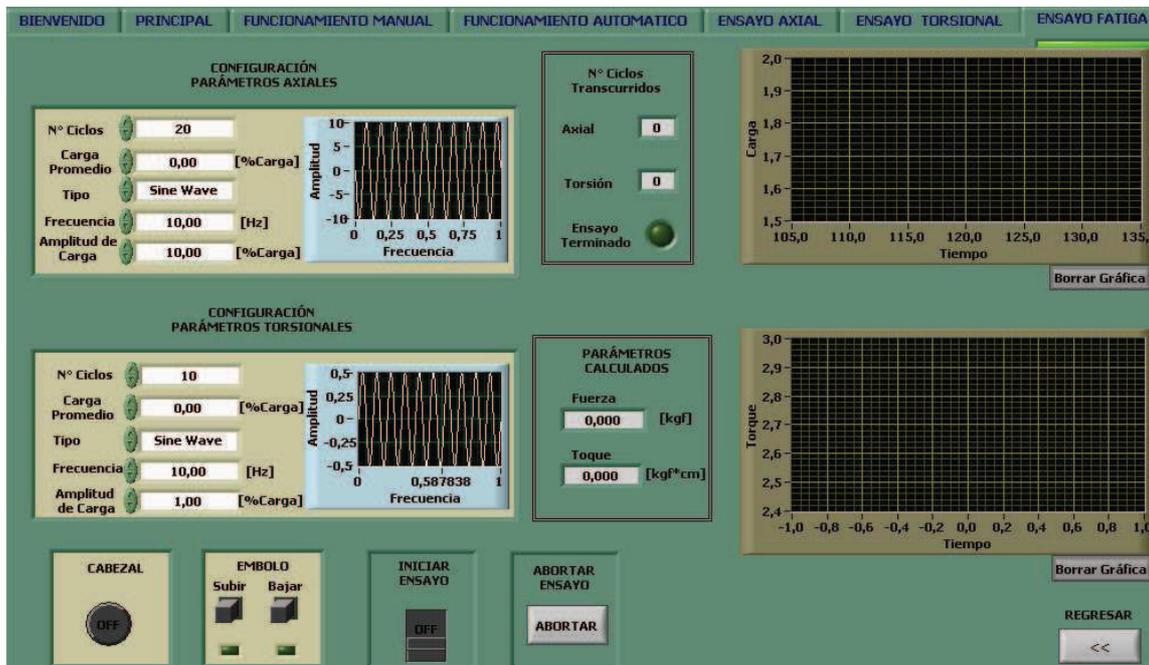


Figura 3.14. Pantalla de “Ensayo fatiga”.

La descripción de los principales íconos de la pantalla de “Ensayo fatiga” se indica en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Descripción de la pantalla de “Ensayo fatiga”.

Ícono	Descripción
Cabezal ON/OFF	Activa la electroválvula para posicionar el cabezal.
Émbolo	Permite desplazar al émbolo.
Iniciar ensayo	Inicia el ensayo.
Abortar ensayo	Detiene el ensayo.
Borrar gráfica	Borra la gráfica actual.
Regresar	Permite retornar a la pantalla de “Funcionamiento automático” para elegir otro tipo de ensayo.
Configuración de parámetros	
Nº ciclos	Permite ingresar el número de veces que se desea aplicar carga a la probeta.
Carga promedio	Valor de carga promedio que se desea aplicar a la probeta.
Tipo	Forma en que se desea que varíe la carga: senoidal, triangular, cuadrada y diente de sierra.
Frecuencia	Frecuencia a la que se se dea aplicar la carga.
Amplitud de carga	Amplitud de la carga que se aplica a la probeta.

La configuración de parámetros es similar para el tipo axial como para el tipo torsional. En caso de no desear aplicar carga en sentido axial o torsional, se debe encerrar los parámetros correspondientes a cada tipo de carga.

El diagrama de flujo del control del sistema axial-torsional MTS se indica en la Figura 3.15. La lógica de los diagramas de flujo para el ensayo de torsión y de fatiga es similar al mostrado para el ensayo axial.

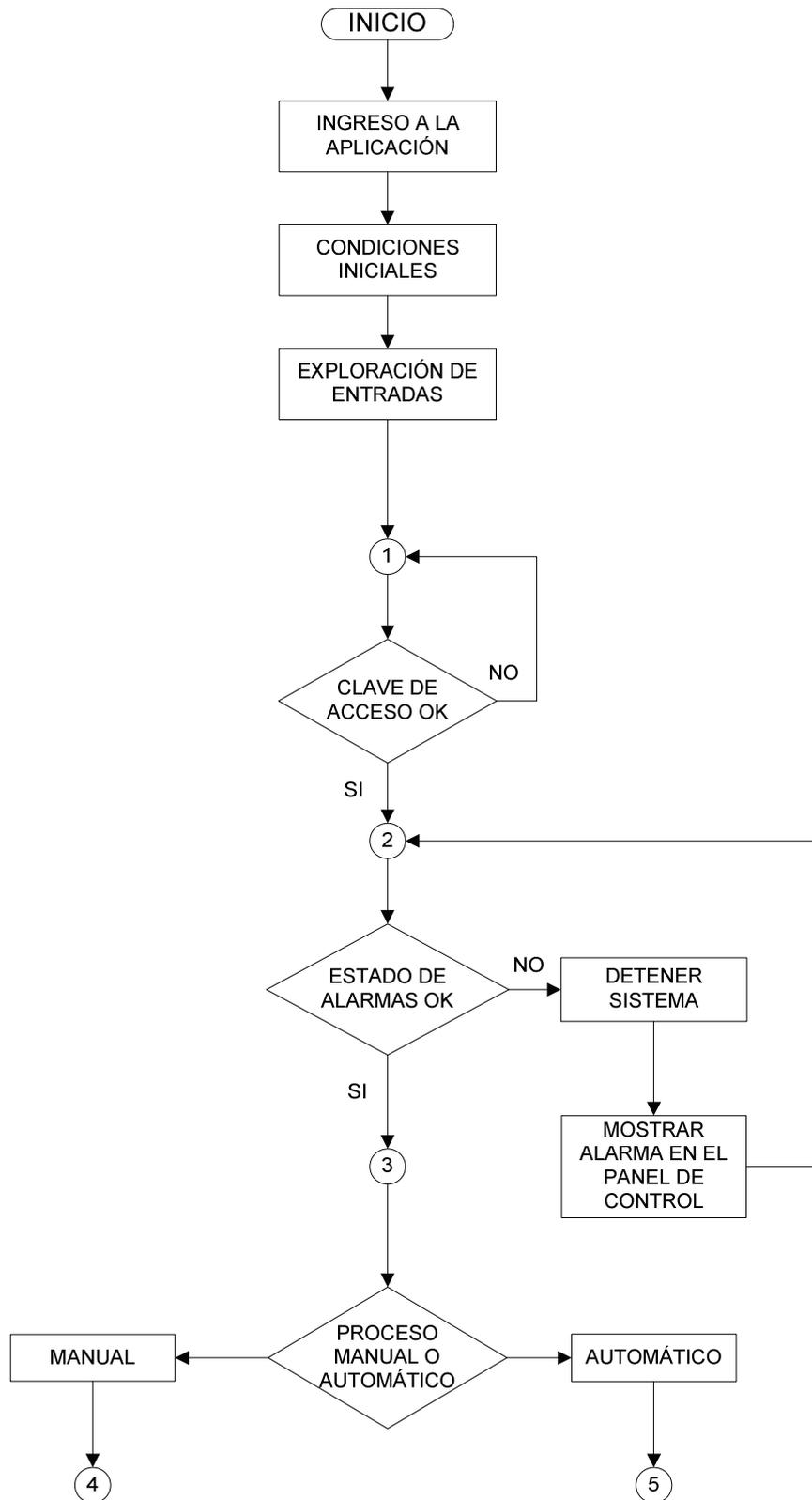


Figura 3.15. Diagrama de flujo del control del sistema axial-torsional MTS.

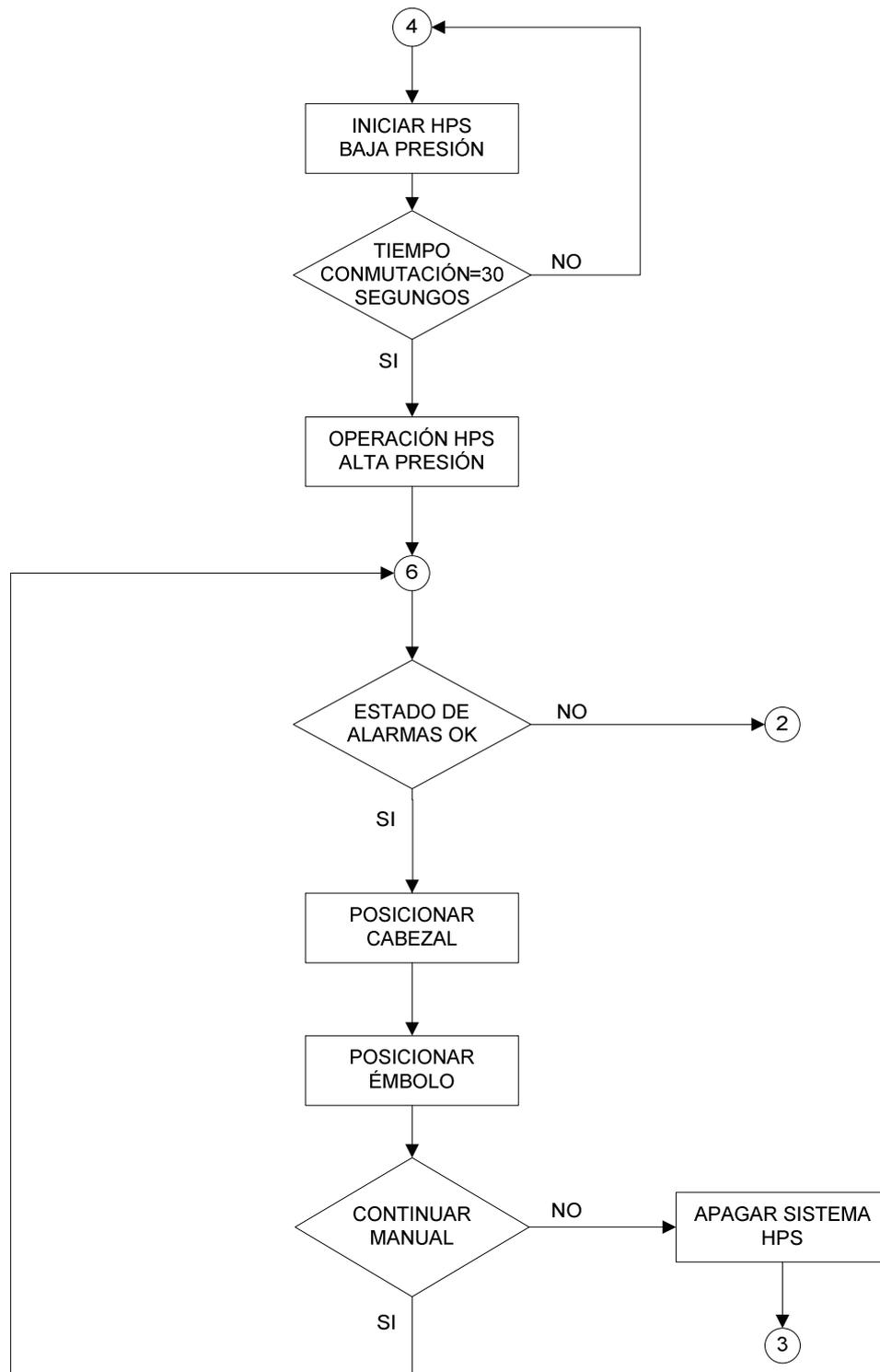


Figura 3.15. Diagrama de flujo del control del sistema axial-torsional MTS (Continuación).

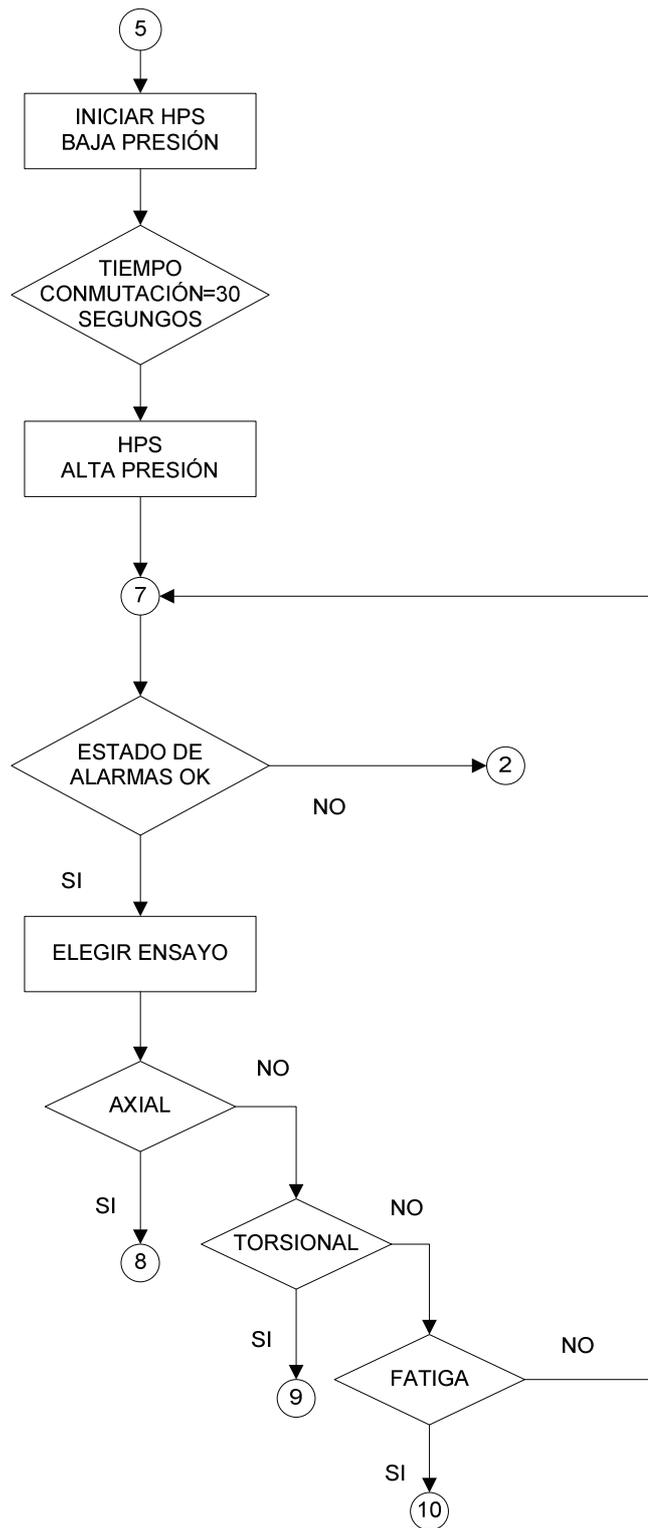


Figura 3.15. Diagrama de flujo del control del sistema axial-torsional MTS
(Continuación).

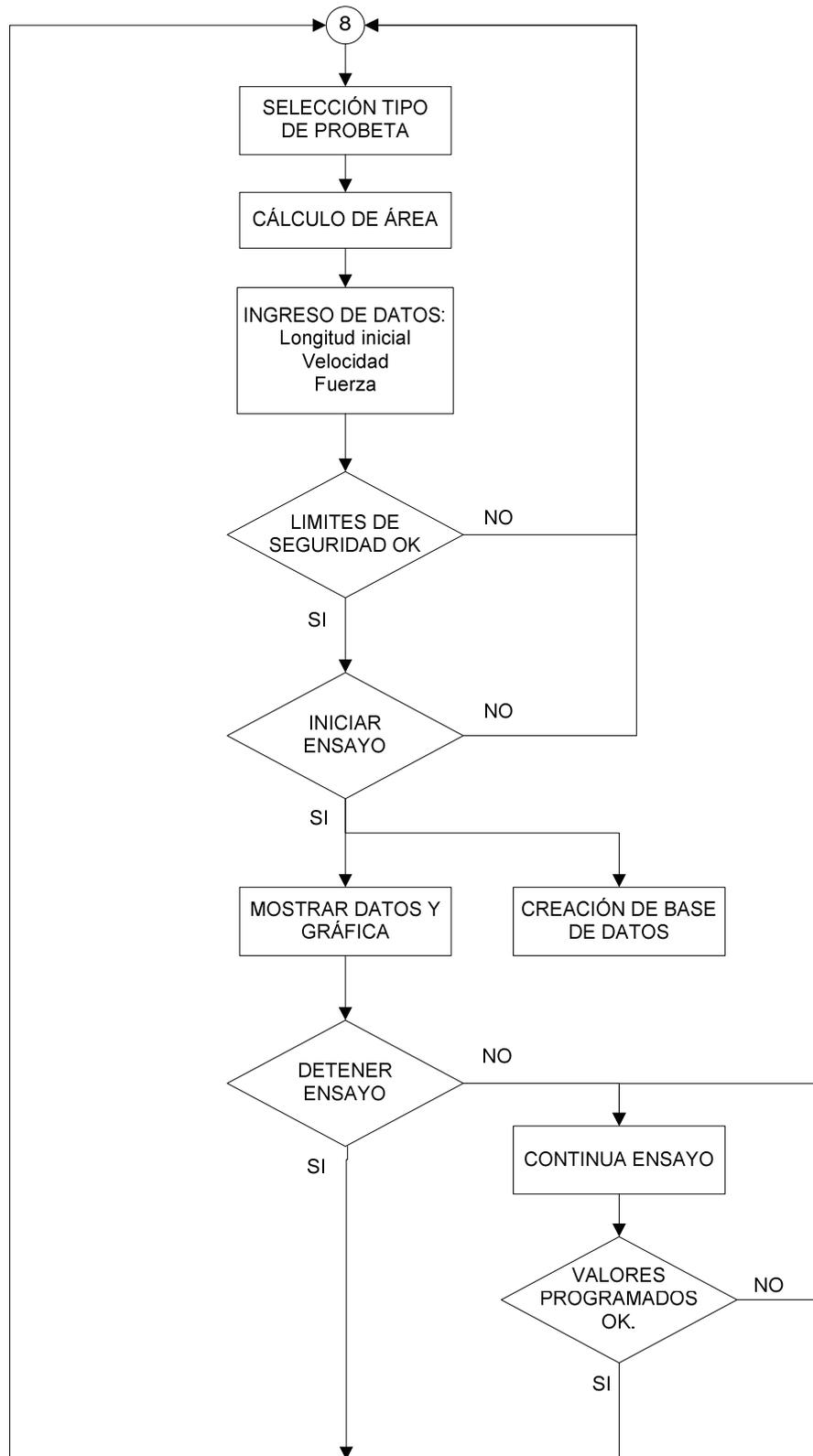


Figura 3.15. Diagrama de flujo del control del sistema axial-torsional MTS (Continuación).

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Después de desarrollar el sistema de control y automatización del sistema axial- torsional, se procedió a diseñar las pruebas correspondientes para obtener los resultados que verifiquen la correcta operación de todo el equipo MTS. Las pruebas realizadas corresponden a verificar: la operación adecuada de la fuente de poder hidráulica (HPS), el hardware de control y la tarjeta de adquisición de datos DAQ, la interfaz humano máquina (HMI), la detección de fallas en la comunicación PC – DAQ y la realización de ensayos. Estas pruebas constituyen el temario de este capítulo.

4.1 PRUEBAS DEL HARDWARE

La fuente de poder hidráulica es la parte primordial de equipo MTS, por lo que en esta parte se comprobó de manera rigurosa su operación acorde con la información disponible en los manuales. Dentro de la parte mecánica del sistema se revisaron y comprobaron las siguientes partes:

- Al encender el panel de control, el sistema de refrigeración debe ser lo primero en activarse, para que el agua fluya por el intercambiador de calor y así asegurar que el aceite y tuberías de la fuente de poder hidráulica se encuentren refrigeradas al momento del encendido. Para comprobar el funcionamiento adecuado de la bomba de refrigeración se compararon los datos de placa de características con los datos medidos en funcionamiento normal. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de la bomba de refrigeración.

	Datos de Placa	Datos Medidos
Voltaje	220 V	218 V
Corriente	2,4 A	2,58 A
Potencia	550 VA	562.4 VA
Temperatura	---	43 °C

Con estos datos se determina que la recuperación de la bomba ha sido exitosa y que el sistema de refrigeración funciona correctamente.

- Con el propósito de evitar problemas eléctricos se revisó la continuidad y correcta conexión de los cables en el tablero de alto voltaje, donde se encuentran instalados contactores para realizar un arranque Y- Δ , que disminuye los picos de corriente al momento del arranque. La corriente que consume el motor al momento del encendido es de 68.12 A y en estado estable es de 118 A. Con las pruebas realizadas se evidenció que el consumo de corriente es proporcional a la presión generada por la bomba. Con estos valores se dimensionó las protecciones y se determinó que los fusibles instalados son los adecuados.
- Al encender el motor trifásico de la HPS, se proporciona un nivel de presión al sistema (200 psi). Luego el sistema HPS es puesto a operar en alta presión, entregando un nivel máximo de presión al sistema de 1500 psi, en estado estable. El sistema HPS pudo ser conmutado de alta a baja presión, primero controlado de forma manual y luego desde el computador, de acuerdo a los requerimientos impuestos. Las pruebas realizadas demostraron que la HPS presenta fallas, debido al tiempo en que ha estado en desuso y sin mantenimiento, pues la presión máxima que debe generar es de 3000 psi.

- En el reservorio de la fuente de poder hidráulica se dispone de indicadores que muestran la temperatura y el nivel del aceite. Para evitar que el aceite sobrepase el nivel máximo de temperatura (135 °C) y que el tanque quede vacío, la HPS posee dos sensores que detectan estas anomalías. Al detectarse una de estas fallas se apaga el motor trifásico, con el objetivo de no dañar a la bomba y se generan señales que son utilizadas para detener el sistema y alertar al usuario. Estos sensores e indicadores funcionan correctamente.
- En la operación del equipo MTS intervienen cinco válvulas: dos servoválvulas, una electroválvula y dos válvulas manuales. El control del movimiento tanto lineal como angular del pistón se realiza por medio de la operación de dos servoválvulas: una axial y otra torsional, las mismas que funcionan con un voltaje (-5 a +5 Vdc) que es controlado desde la DAQ con la ayuda del driver de control. Para habilitar el desplazamiento del cabezal es necesario energizar la electroválvula localizada sobre el mismo con un voltaje de 24 Vdc y las válvulas manuales UP, DOWN, ubicadas a un costado del marco de carga, que mueven el cabezal hacia la posición deseada. Al ser energizadas con los voltajes indicados todas las válvulas descritas funcionaron óptimamente.
- Para el análisis de las características de un material, el sistema posee cinco sensores analógicos que son: dos galgas que miden carga y torque y están montadas sobre la celda de carga, un LVDT que mide desplazamiento lineal, un ADT que mide desplazamiento angular y un extensómetro que mide la deformación axial. Las señales de estos sensores son enviadas a tarjetas de acondicionamiento para obtener salidas normalizadas de voltaje (0 – 10 Vdc), estas señales normalizadas son aceptadas por la tarjeta de adquisición de datos. Las tarjetas de acondicionamiento se encuentran dentro del panel de control y fueron probadas cada una por medio de enviar señal (milivoltios) del sensor correspondiente, para luego ser calibradas hasta el valor aceptado por las entradas analógicas de la DAQ.

- Para determinar la curva del sensor de carga se realizó una calibración con una máquina de ensayos calibrada disponible en el LAEV. El procedimiento consistió en someter al sensor a una carga progresiva de manera continua y medir el voltaje entregado por el sensor. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Sensor de carga. Voltaje vs. carga aplicada.

Carga aplicada [kgf]	Voltaje del sensor [mV]	Carga aplicada [kgf]	Voltaje del sensor [mV]
0	0	2320	1.9
170	0.1	2500	2
290	0.2	2550	2.1
410	0.3	2670	2.2
500	0.3	2900	2.3
520	0.4	3000	2.4
640	0.5	3020	2.5
760	0.6	3130	2.6
890	0.7	3250	2.7
1000	0.7	3365	2.8
1020	0.8	3480	2.9
1140	0.9	3500	2.9
1270	1	3590	3
1370	1.1	3700	3.1
1500	1.2	3820	3.2
1610	1.3	3930	3.3
1740	1.4	4000	3.3
1850	1.5	4050	3.4
1970	1.6	4160	3.5
2000	1.6	4270	3.6
2080	1.7	4380	3.7
2200	1.8	4490	3.8

Carga aplicada [kgf]	Voltaje del sensor [mV]	Carga aplicada [kgf]	Voltaje del sensor [mV]
4500	3.8	5520	4.7
4620	3.9	5630	4.8
4710	4	5740	4.9
4840	4.1	5850	5
4940	4.2	5990	5.1
5000	4.2	6000	5.1
5070	4.3	6080	5.2
5180	4.4	6190	5.3
5290	4.5	6300	5.4
5500	4.6	6420	5.5

Los datos recopilados fueron graficados en la Figura 4.1. Como se puede observar en esta figura, la curva del sensor de carga es lineal.

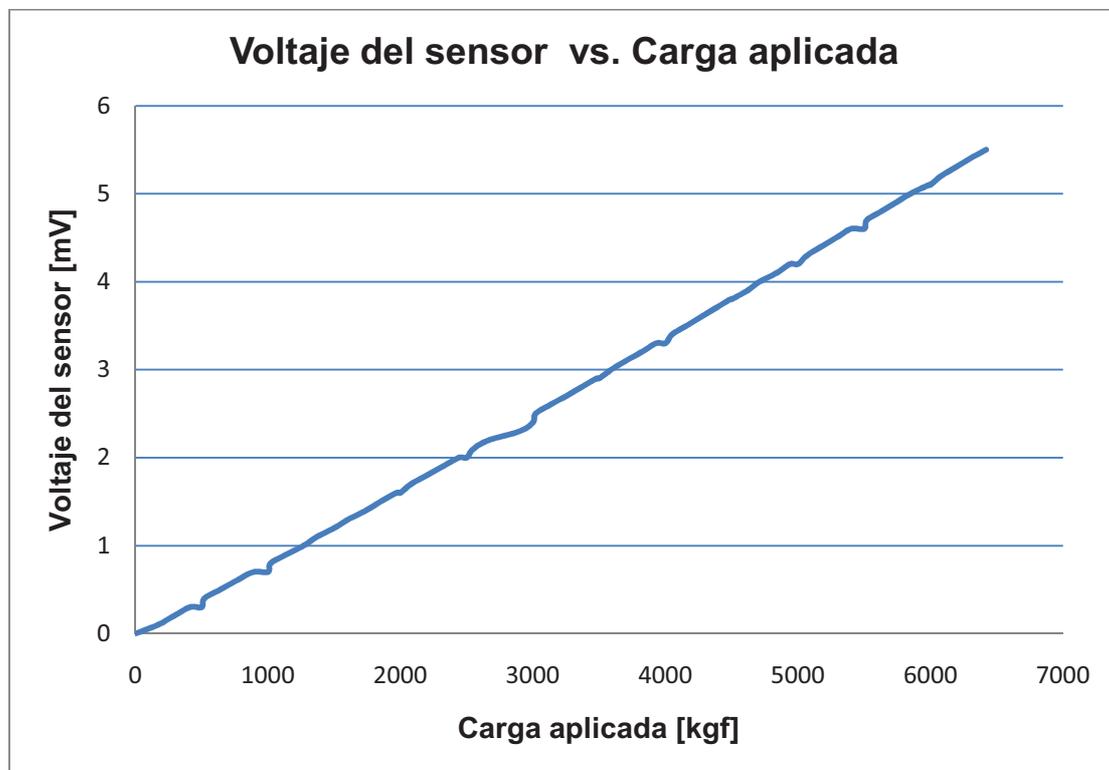


Figura 4.1. Curva del sensor de carga.

- Para determinar la curva del LVDT se realizó una calibración con un calibrador pie de rey digital marca Mitutoyo adquirido hace un año por el LAEV. El calibrador tiene las siguientes características: resolución 0.01mm, precisión $\pm 0.02\text{mm}$, repetibilidad 0.01mm. Estos datos fueron obtenidos del certificado de calibración de dicho calibrador. El procedimiento consistió en desplazar el émbolo en pasos de milímetros midiendo con el calibrador y medir el voltaje a la salida de la tarjeta de acondicionamiento. Los datos reflejan que el sensor tiene una característica lineal, que se puede expresar matemáticamente como:

$$\text{Voltaje de salida} = 0,061 \left[\frac{\text{V}}{\text{mm}} \right] * \text{desplazamiento} \quad (4.1)$$

- Para determinar la curva del extensómetro se realizó una calibración con un calibrador pie de rey digital marca Mitutoyo adquirido hace un año por el LAEV. El calibrador tiene las siguientes características: resolución 0.01mm, precisión $\pm 0.02\text{mm}$, repetibilidad 0.01mm. Estos datos fueron obtenidos del certificado de calibración de dicho calibrador. El procedimiento consistió en separar las extremidades del extensómetro en pasos de medio milímetro y medir el voltaje a la salida de la tarjeta de acondicionamiento. Los datos reflejan que el extensómetro tiene una característica lineal, que se puede expresar matemáticamente como:

$$\text{Voltaje de salida} = 1 \left[\frac{\text{V}}{\text{mm}} \right] * \text{separación} \quad (4.2)$$

- Para verificar el estado del sensor de desplazamiento angular ADT se realizó pruebas girando el émbolo progresivamente en sentido horario y antihorario para tomar datos de las variaciones de voltaje a la salida del sensor. Luego de realizar varias pruebas se determinó que no existen dichas variaciones de voltaje, por lo que se concluyó que el sensor se encuentra dañado.

- El sistema tiene cuatro fuentes de voltaje DC que proporcionan diferentes niveles de voltaje que son utilizados por los diferentes dispositivos del sistema. Estas cuatro fuentes son:
 1. Fuente de +24 Vdc, que energiza la tarjeta de hardware de control.
 2. Fuente de ± 15 Vdc, que es usada para los drivers de las servoválvulas.
 3. Fuente + 24 Vdc, que energiza los relés que controlan el funcionamiento del motor trifásico que acciona la bomba hidráulica.
 4. Fuente ± 26 Vdc, +10 Vdc, es utilizada para energizar las tarjetas acondicionadoras de señal enviadas por los sensores.

Las fuentes al ser energizadas independientemente con 120 Vac, entregaron cada una los valores correctos, indicando que están en perfecto estado.

- Antes de realizar el programa de control con la tarjeta de adquisición de datos, el fabricante recomienda realizar pruebas de funcionamiento de la DAQ y el hardware adicional que se use desde el Measurement & Automation Explorer, un software que permite verificar el correcto funcionamiento de los módulos de la DAQ. Las pantallas de la interfaz de este programa se presentan a continuación.

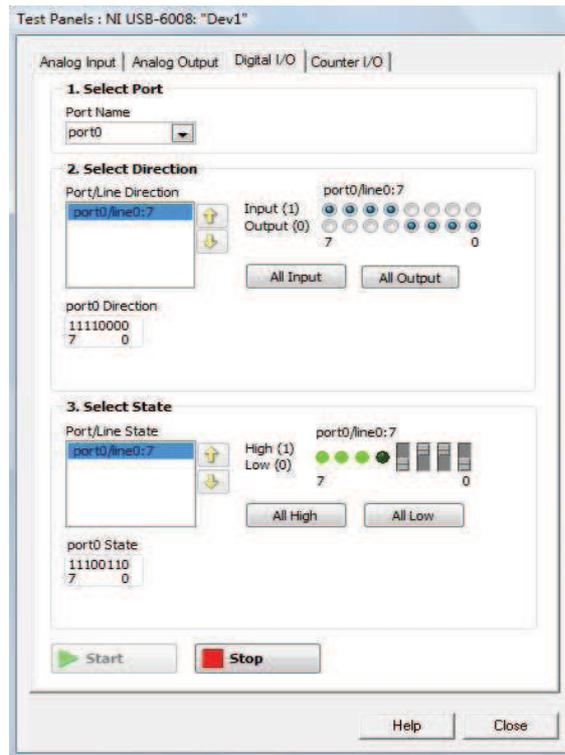


Figura 4.2. Prueba de las entradas y salidas digitales.

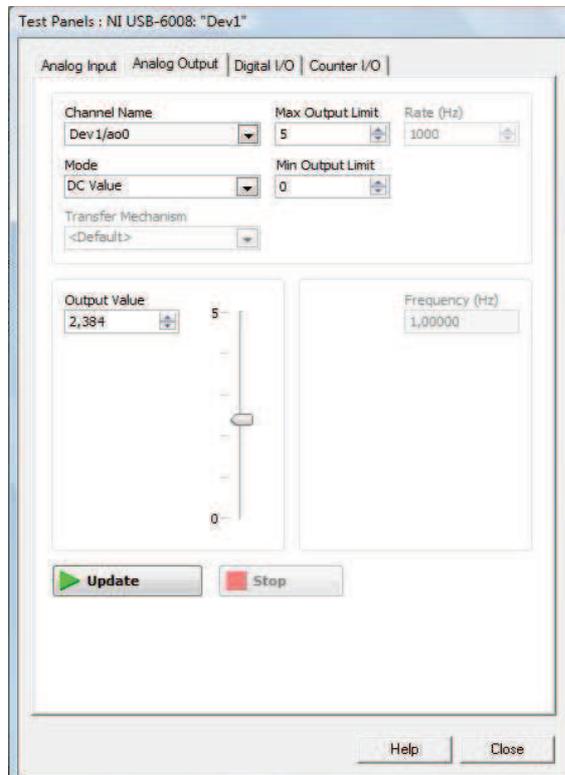


Figura 4.3. Prueba de las salidas análogas.

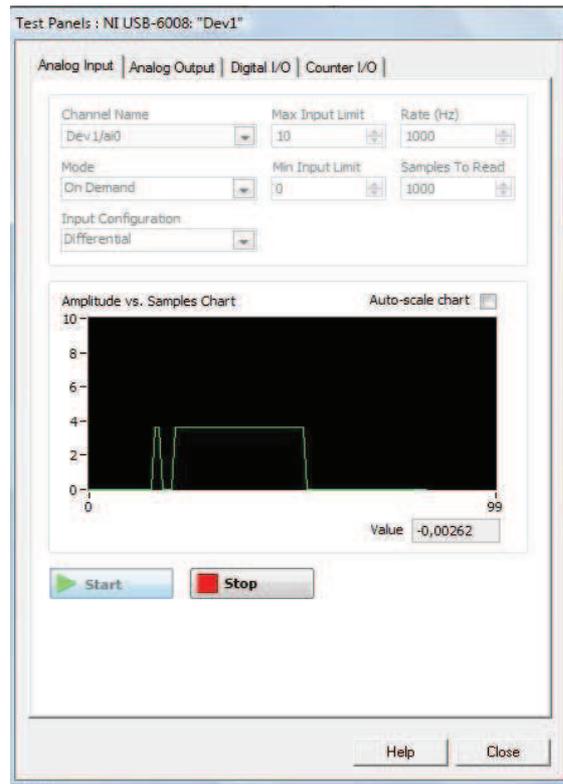


Figura 4.4. Prueba de las entradas análogas.

Los módulos de la DAQ al ser probados desde las diferentes pantallas entregaron los resultados esperados, indicando que estaban en perfecto estado. Con esto se pudo comprobar también el funcionamiento del equipo MTS desde el computador.

4.2 PRUEBAS DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

Los objetivos globales cumplidos por la interfaz dentro del equipo MTS se describen a continuación:

CONFIABILIDAD: La operación del sistema resulta segura desde cualquier punto de vista ya que se ha tomado todas las precauciones que han sido necesarias para su correcta operación y protección del operador.

SIMPLICIDAD: El programa resulta amigable y fácil de maniobrar de manera que reduce el tiempo de aprendizaje en la operación del sistema y en la

elaboración de los ensayos. Además cuenta con una ayuda básica que puede ser consultada en todo momento por el operador.

CONSISTENCIA: Los resultados obtenidos después de las pruebas sobre un elemento produjeron información similar en todos los casos para un tipo de ensayo dado.

PORTABILIDAD: El programa desarrollado puede ser ejecutado en cualquier computador con un sistema operativo Windows XP, Windows Vista o superior, siempre y cuando el computador cuente con las especificaciones mínimas requeridas.

4.2.1 EVALUACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA

Es indispensable tener precaución con todo el sistema, por lo que se evaluó los posibles problemas que pueden ocurrir durante la operación del equipo MTS.

- Durante el funcionamiento general del sistema se expuso a una falla de comunicación al equipo, desconectando el cable de comunicación USB. De manera inmediata se apagó el sistema pues ya no recibió una señal. Además, el software de control diseñado detectó la desconexión y mostró la pantalla de aviso en el computador (Figura 4.5). De esta manera se evitan fallas que puedan causar daño al operador o al equipo.



Figura 4.5. Pantalla “Falla de comunicación PC – DAQ”.

En caso de que el cable esté desconectado al correr la aplicación, se desplegará la pantalla de aviso y se detendrá el programa, sin prender al sistema.

Antes de realizar el ensayo se abre automáticamente el programa Excel, pero se recomienda abrir previamente el programa Excel, para evitar la pérdida de los primeros datos adquiridos al realizar el primer ensayo.

En caso de no tener total seguridad del funcionamiento correcto de la DAQ, se puede hacer una prueba desde el Measurement & Automation Explorer. Al seleccionar el dispositivo conectado en la subcarpeta NI-DAQmx Devices y dando clic en la opción “Self-Test”, se despliega la pantalla de la Figura 4.6. Si el test es satisfactorio se puede tener total seguridad de que la DAQ se encuentra en perfectas condiciones.

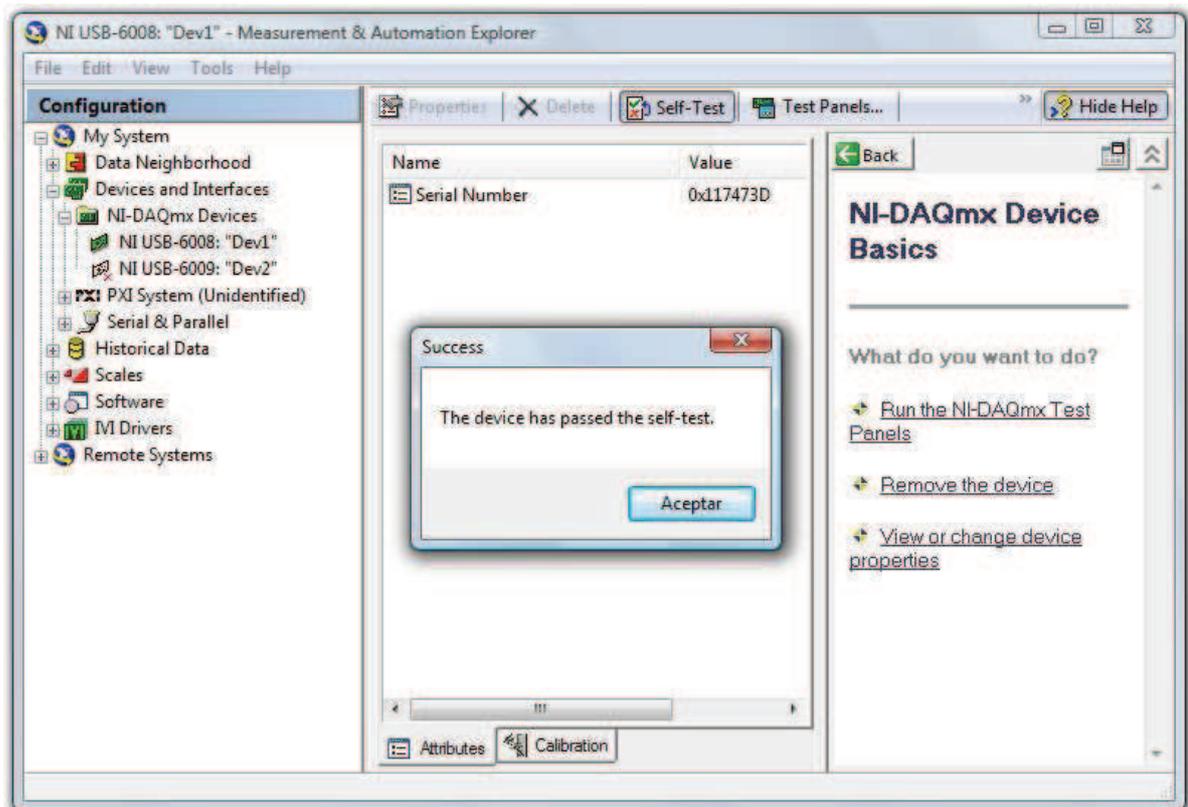


Figura 4.6. Prueba de la tarjeta de adquisición de datos.

- La fuente de poder hidráulica es quien entrega el flujo de aceite al sistema, por lo que es importante revisar su funcionamiento. Para simular el bajo nivel de aceite se levantó el sensor de nivel y comprobó su correcto funcionamiento. Para elevar la temperatura del aceite se hizo operar el sistema hidráulico en un lazo cerrado y se verificó el funcionamiento adecuado del sensor de sobretemperatura. Al detectarse las fallas evaluadas el hardware implementado genera una señal que es receptada por la DAQ e informa al programa de control para que desconecte el motor trifásico por motivos de seguridad. Se diseñó además al programa de control para que al detectarse una de las anomalías antes mencionadas despliegue una ventana de advertencia (Figura 4.7). El mismo resultado se obtiene si existe una desconexión de la red trifásica a la cual se conecta el motor de la HPS.

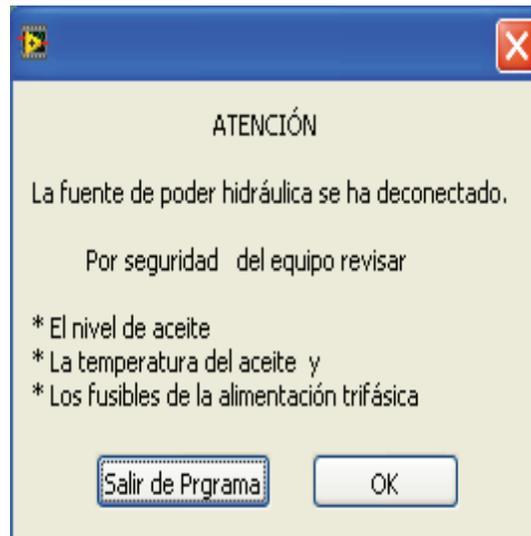


Figura 4.7. Ventana “Falla en el sistema HPS”.

- Se verificó el que se descarten los valores ingresados fuera del rango indicado por la variable. Por ejemplo, cuando se introdujo un valor superior al aceptado por la variable, el valor que se registró fue el mayor permitido. Similar criterio se utilizó al ingresar un valor inferior al permitido y se registró el valor mínimo permitido. El programa de control discrimina entre valores reales, enteros y de palabra, motivo por el cual se probó un mal ingreso del tipo de datos, dando como resultado un rechazo por parte del programa de control, y se mantuvo el valor anterior en la variable.

4.3 PRUEBAS DEL SISTEMA

Para efectuar las pruebas del sistema se realizó los siguientes ensayos:

- Ensayo de compresión con carga sostenida.
- Prueba de compresión dinámica.
- Prueba de torsión dinámica en vacío.
- Prueba de compresión y torsión dinámica simultánea en vacío.

4.3.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN CON CARGA SOSTENIDA

Este ensayo fue posible debido a que el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones dispone de los platos de compresión correspondientes.

4.3.1.1 Procedimiento de operación

En esta sección se explica el procedimiento general para operar y realizar ensayos en el equipo MTS. Para poder operar el equipo MTS se requiere de un procedimiento metódico y secuencial. Este procedimiento servirá de guía al operador para que comprenda mejor las calibraciones necesarias previas al ensayo.

4.3.1.1.1 Pasos previos al encendido del sistema MTS

Antes de encender el equipo MTS se debe cumplir con los siguientes pasos para evitar cualquier causa de desperfectos:

- El amperaje por cada línea en el armario de “breakers” de la cámara de transformación no debe ser superior a 150 A.
- Al encender el panel de control verificar que también se prenda la bomba de refrigeración.
- Identificar y conectar los fusibles principales del motor trifásico que mueve a la bomba de la fuente de poder hidráulica.
- Encender el computador y abrir la aplicación.
- Iniciar el funcionamiento en modo automático y seleccionar el tipo de ensayo.

4.3.1.1.2 Instalación del elemento de ensayo

Para realizar el ensayo es necesario posicionar en forma adecuada el elemento de ensayo en las mordazas del marco de carga. La instalación de la probeta se considera como un procedimiento peligroso, porque si está mal colocado el

elemento, se puede incurrir en accidentes que causen daño al operador y a la probeta a ensayar.

De acuerdo con el tamaño de la probeta, se debe ubicar previamente el cabezal y el émbolo, para lo cual es necesario inicialmente prender la fuente de poder hidráulica HPS según se explica en el capítulo 2. Si se requiere mover el cabezal es necesario habilitar el funcionamiento de la electroválvula ON-OFF desde el programa de control y manipular las dos válvulas manuales UP (subir) o DOWN (bajar) hasta la posición deseada, ubicadas a un costado del marco de carga.

Por otro lado, de acuerdo con el tipo de ensayo que se desee realizar es necesario habilitar la pantalla “Funcionamiento automático”, prender la HPS, esperar alta presión y seleccionar el ensayo. En las pantallas correspondientes a los ensayos existen los íconos pertinentes con la especificación adecuada para cada operación.

4.3.1.2 Descripción del ensayo

Una vez posicionada la probeta, el siguiente paso es ingresar valores iniciales en la pantalla “Tipo de probeta” (Figura 3.6) en la ventana “Ensayo axial”. Para el ensayo de compresión realizado se introdujeron los parámetros que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores ingresados para ensayo de compresión “Sostener carga”.

ÍCONO	VALOR
Área	524 mm ²
Longitud inicial	38.80 mm
Carga	6500 Kgf
Tiempo	60 min

Una vez ingresado los valores correspondientes, como se explica en la Tabla 4.3, se inicia el ensayo al dar clic en el botón “Iniciar ensayo”. Una vez iniciado el ensayo se debe tener cuidado de que no se destruya totalmente la probeta o de que choquen las mordazas, pues eso puede causar daño en la celda de carga.

Al transcurrir el tiempo determinado se detuvo el émbolo para quitar la carga aplicada, retirar la probeta y regresar el émbolo a su posición inicial. Los resultados obtenidos se muestran en un informe técnico en el Anexo H.

4.3.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN DINÁMICA

Para iniciar este ensayo se siguieron los pasos descritos en el literal 4.3.1.1, con lo cual se asegura la correcta operación del equipo y montaje de la probeta.

4.3.2.1 Descripción del ensayo

Una vez posicionada la probeta, el siguiente paso es ingresar valores iniciales en la pantalla “Configuración de parámetros axiales” en la ventana “Ensayo fatiga”. Para el ensayo realizado se introdujeron los parámetros que se muestran en la Figura 4.8. Para evitar un desplazamiento angular del émbolo se configuró los parámetros torsionales en cero.

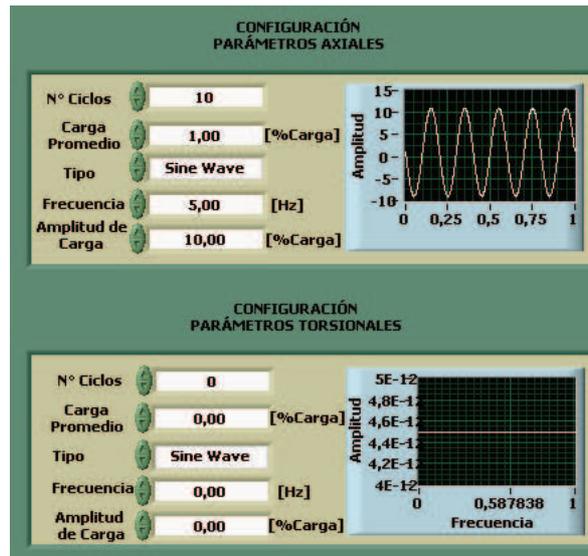


Figura 4.8. Configuración de parámetros para ensayo de compresión dinámica.

Una vez ingresado los valores correspondientes, se inició el ensayo al dar clic en el botón “Iniciar ensayo”. Una vez terminado el ensayo se detuvo el émbolo y se retiró la probeta. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.9.

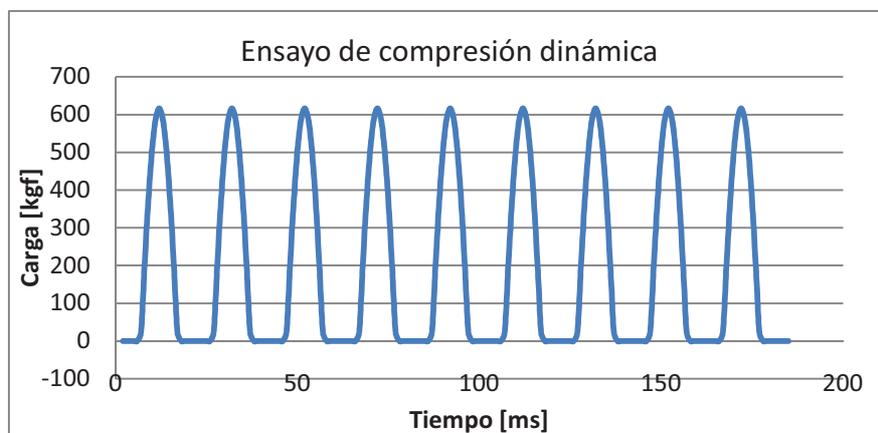


Figura 4.9. Resultado del ensayo de compresión dinámica.

4.3.3 ENSAYO DE TORSIÓN DINÁMICA EN VACÍO

Se ingresó los valores iniciales en la pantalla “Configuración de parámetros torsionales” en la ventana “Ensayo fatiga”. Para el ensayo realizado se introdujeron los parámetros que se muestran en la Figura 4.10. Este ensayo sirvió para caracterizar el equipo MTS para pruebas de fatiga torsional. Para

evitar un desplazamiento vertical del émbolo se configuró los parámetros axiales en cero.

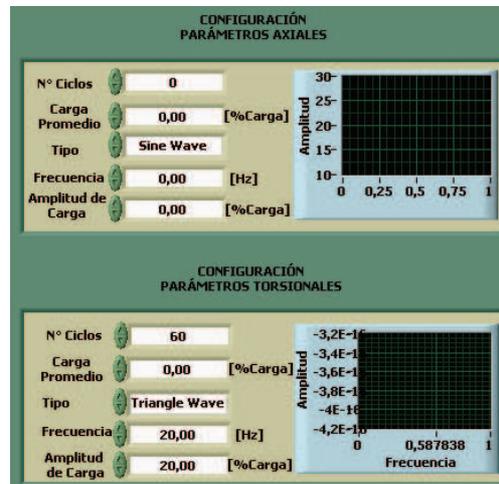


Figura 4.10. Configuración de parámetros para ensayo de torsión dinámica.

Una vez ingresado los valores correspondientes, se inició el ensayo al dar clic en el botón “Iniciar ensayo”. Al terminar el ensayo se detuvo el émbolo y se demostró que el equipo está apto para efectuar este tipo de ensayos a la frecuencia máxima de 20 Hz.

4.3.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN Y TORSIÓN DINÁMICA

Se ingresó los valores iniciales en las pantallas de configuración de parámetros en la ventana “Ensayo fatiga”. Para el ensayo realizado se introdujeron los parámetros que se muestran en la Figura 4.11. Este ensayo sirvió para caracterizar el equipo MTS para pruebas de fatiga torsional. Para evitar un desplazamiento vertical del émbolo se configuró los parámetros axiales en cero.

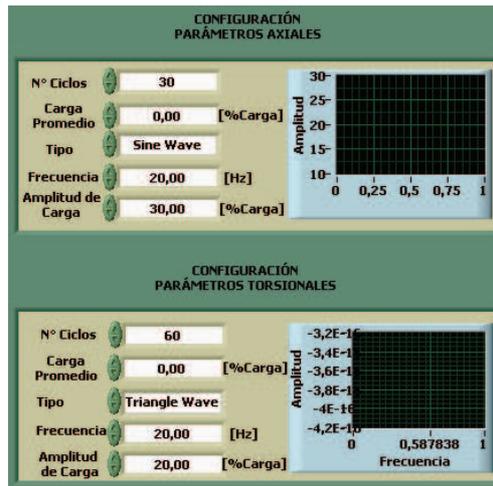


Figura 4.11. Configuración de parámetros para ensayo de compresión y torsión dinámica.

Una vez ingresado los valores correspondientes, se inició el ensayo al dar clic en el botón “Iniciar ensayo”. Al terminar el ensayo se detuvo el émbolo y se demostró que el equipo responde satisfactoriamente a las señales enviadas desde el sistema de control a través de la tarjeta de adquisición de datos.

Con estas pruebas se comprobó que el equipo MTS es idóneo para realizar los ensayos mencionados a una frecuencia máxima de 20 Hz.

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Al finalizar el presente proyecto se puede concluir:

- El sistema de control y adquisición de datos diseñado para el sistema axial-torsional MTS del LAEV, se realizó considerando la capacidad mecánica del equipo MTS y la disponibilidad económica del LAEV, obteniendo como resultado una operación adecuada y segura de todo su conjunto, una Interfaz Humano Máquina fácil de manejar, confiabilidad en los datos adquiridos y consistencia de los resultados.
- Para proteger al transformador de la FIM y a los equipos que se conectan a dicho transformador, resultó una opción satisfactoria el implementar un arranque $Y - \Delta$ para el motor trifásico de la fuente de poder hidráulica HPS, con lo que se logró disminuir la corriente pico en el arranque y se evita sobrecargar al transformador.
- La reparación del motor y cambio de mangueras del intercambiador de calor resultó conveniente para mantener el aceite de la fuente de poder hidráulica HPS en un nivel de temperatura adecuada para el funcionamiento del sistema.
- El sistema axial-torsional implementado quedó configurado para realizar los siguientes ensayos:
 - Ensayo de compresión
 - Ensayo de tracción
 - Ensayo de torsión
 - Ensayo de fatiga axial

- Ensayo de fatiga torsional
 - Ensayo de fatiga axial y torsional
-
- El sistema axial-torsional MTS está en condiciones de desarrollar pruebas totalmente confiables para los ensayos de compresión: sostener carga y ensayo progresivo, hasta 10 000 kgf que corresponde a la mitad de su capacidad máxima. Esto se consiguió gracias a que el LAEV dispone de los platos para el ensayo de compresión. Los ensayos de tracción, torsión y fatiga no se pudieron calibrar debido a que el LAEV no dispone de las mordazas respectivas.
 - El equipo MTS estuvo descuidado por muchos años, tiempo en el cual se malograron varias partes. Uno de los problemas más importantes que ha causado el paso del tiempo en la máquina es el deterioro del control de presión en el sistema hidráulico, motivo por el cual la presión máxima estable que puede obtenerse es de 1500 psi, siendo la principal causa para no mantener el émbolo en un punto fijo, por lo que los ensayos deben comenzarse desde la posición inicial configuradas por defecto.
 - Las pruebas de fatiga demostraron que la velocidad de actualización de valores que se puede tener mediante el protocolo de comunicación USB 2.0 (200Mbps), resulta suficiente para realizar la generación de señales sinusoidal, triangular, diente de sierra y cuadrada. Las señales de referencia enviadas hacia las servoválvulas que controlan el desplazamiento tanto lineal como angular del émbolo están diseñadas para una frecuencia máxima de 20 Hz, acorde con el diseño original del sistema hidráulico y mecánico.
 - Puesto que el equipo MTS realiza ensayos estáticos y dinámicos, resulta crítica la velocidad de adquisición de datos, por ende registrar un dato a una velocidad de 110 ms es más que suficiente para obtener las características intrínsecas del elemento de ensayo, como lo demuestran las pruebas realizadas. Por lo descrito anteriormente, resulta una opción

satisfactoria la creación de una base de datos en Excel el mismo que funciona bajo Windows XP o superior y que cumpla con los requerimientos mínimos de hardware y software para el paquete computacional LabVIEW. Esto permite al operador tener a disponibilidad los datos adquiridos para realizar cálculos adicionales.

5.2 RECOMENDACIONES

El equipo MTS ha sido recuperado y funciona adecuadamente gracias al esfuerzo y trabajo en conjunto de Ingeniería en Electrónica y Control e Ingeniería Mecánica. La experiencia adquirida durante la elaboración de este proyecto permite dar las siguientes recomendaciones:

- Se realice un estudio detallado del grado de deterioro que tiene el control de presión del sistema hidráulico, para determinar la factibilidad de repotenciar el equipo MTS, lo cual implica:
 - Revisar el filtro de la fuente de poder hidráulica HPS.
 - Cambiar las electroválvulas axial y torsional ubicadas en el marco de carga.
 - Revisar el manifold para determinar la posibilidad de realizar una compensación de carga mediante nitrógeno.

De esta manera se evitará pérdidas de presión en la máquina, provocadas por la falta de mantenimiento que tuvo el equipo por varios años y así lograr un desempeño del sistema hidráulico a su máxima capacidad.

- Se realice un mejoramiento al sistema de control y monitoreo del equipo MTS lo cual implica:
 - Obtener las mordazas para realizar la calibración del sistema en los ensayos de torsión y de fatiga mediante normas ASTM.
 - Reemplazar los sensores de desplazamiento lineal (LVDT) y desplazamiento angular (ADT), por un encoder comercial de 8000 o más divisiones para tener una resolución adecuada.

De esta manera garantizar que los ensayos realizados en el LAEV sean confiables y dar servicio de calidad al medio externo.

- Adquirir un computador que cumpla con los requerimientos mínimos del paquete computacional LabVIEW, que sea dedicado para uso exclusivo del sistema de control y monitoreo desarrollado en este proyecto.
- Durante la fase de recopilación de información sobre el funcionamiento general del sistema axial-torsional MTS se encontró en la tesis del

ingeniero Christian E. Larrea, “Estudio, diagnóstico y reparación del equipo universal de ensayos MTS” que el costo de un sistema similar al planteado en este proyecto, diseñado por el fabricante de la máquina para el año 2000 costaría cien mil dólares americanos, razón por la cual se reitera que resulta favorable dar mantenimiento eventual al equipo que realizar una reparación posterior, por lo que se recomienda limpiar y dar mantenimiento eventual al sistema HPS y al panel de control; además, se debe evitar que los cables estén dispersos en el suelo lo que ocasionaría que sean pisados frecuentemente y sufrir roturas.

- Para que los resultados obtenidos en los ensayos de compresión sean correctos se deben colocar probetas de un área menor a la superficie de las mordazas, de no ser así, al aplicar la carga la distribución del esfuerzo no será uniforme en la probeta.

BIBLIOGRAFÍA

- **BEER, Ferdinand; JOHNSTON, Russell, Mecánica de Materiales. Cuarta Edición. McGraw-Hill. México, D.F. 2007.**
- **GERE, James, Mecánica de Materiales. Cuarta Edición. Thompson Learning. México, D.F. 2002.**
- **OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderno, Tercera edición, Prentice Hall, 1998.**
- **LARREA, Christian. Estudio, Diagnóstico y Reparación del Equipo MTS, Tesis. Quito, 1999.**
- **National Instrument, NI USB 6008/6009 [en línea]. User Guide and Especifications. [Fecha de consulta: 27 Agosto 2009]. Disponible en: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303l.pdf>>**
- **CEPEDA, Luis Eduardo. Universidad Nacional de Colombia [en línea]: Mecánica de los cuerpos deformables. [Fecha de consulta: 10 Julio 2009]. Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/lecciones/tem03/lec02_0.htm>**
- **BEN, Allen. Fatiga de Materiales [en línea]: Brittle Aluminium. [Fecha de consulta: 24 Enero 2010]. Disponible en: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/BrittleAluminium320MPA_S-N_Curve.jpg>**

ANEXOS

ANEXO A
CLAVE DE ACCESO

CLAVE DE ACCESO

CONTRASEÑA PARA INGRESAR AL PROGRAMA DE CONTROL

CONTRASEÑA: LAEV2010

Al momento de ingresar la contraseña en el programa de control no se debe presionar la tecla "Enter", porque el programa lo reconoce esto como un carácter más y además tiene la facultad de discriminar entre mayúsculas o minúsculas.

La contraseña establecida es la clave de acceso con las que se entregó el proyecto.

ANEXO B

ACTUADOR LINEAL

ANEXO C

ACTUADOR ROTACIONAL

ANEXO D

SERVOVÁLVULA

ANEXO E

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6008

ANEXO F

AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL 084

ANEXO G

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD620

ANEXO H

ENSAYO DE COMPRESIÓN PARA FABRICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

ENSAYO DE COMPRESIÓN PARA FABRICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

Fecha de ensayo: 2010-05-19

Realizado por: Ing. Patricia Pontón, Ricardo Araguillin, Andrés Mejía.

OBJETIVO.

Comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control del Equipo MTS, mediante la realización de un ensayo de Compresión de Carga Sostenida para elaboración de material compuesto.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Material: Material compuesto (Resina y fibra de abacá)

DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA

$L_o = 38.80 \text{ mm}$

$A_o = 524 \text{ mm}^2$

RESULTADOS OBTENIDOS

Lf = 33.20 mm

Tabla 1. Resultados ensayo de compresión para carga sostenida.

Deformación (mm)	Esfuerzo (kgf)	Elongación %
0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.13
0.08	0.00	0.21
0.11	0.00	0.28
0.13	0.00	0.33
0.14	0.00	0.36
0.15	6912.41	0.39
0.17	6912.41	0.44
0.18	6912.41	0.46
0.21	6912.41	0.54
0.20	6912.41	0.52
0.22	6876.17	0.57
0.26	6791.60	0.67
0.28	6791.60	0.72
0.32	6670.78	0.82
0.34	6670.78	0.88
0.35	6670.78	0.90
0.38	6658.70	0.98
0.41	6658.70	1.06
0.45	6646.62	1.16
0.50	6622.46	1.29
0.54	6622.46	1.39
0.56	6622.46	1.44
0.56	6622.46	1.44
0.59	6610.38	1.52
0.63	6610.38	1.62
0.66	6610.38	1.70
0.67	6610.38	1.73
0.71	6574.13	1.83
0.73	6574.13	1.88
0.74	6574.13	1.91
0.79	6525.81	2.04
0.82	6525.81	2.11
0.85	6525.81	2.19
0.87	6513.73	2.24

Deformación (mm)	Esfuerzo (kgf)	Elongación %
0.89	6513.73	2.29
0.90	6513.73	2.32
0.90	6513.73	2.32
0.91	6513.73	2.34
0.92	6513.73	2.37
0.93	6513.73	2.40
0.95	6513.73	2.45
0.99	6513.73	2.55
1.02	6513.73	2.63
1.04	6513.73	2.68
1.05	6513.73	2.70
0.87	6501.65	2.24
0.86	6501.65	2.22
0.86	6501.65	2.22
0.88	6501.65	2.27
0.90	6501.65	2.32
0.92	6501.65	2.37
0.94	6501.65	2.42
0.96	6501.65	2.47
1.00	6501.65	2.58
1.03	6501.65	2.65
1.05	6501.65	2.70
1.03	6501.65	2.65
1.01	6501.65	2.60
0.99	6489.56	2.55
0.96	6489.56	2.47
0.93	6489.56	2.40
0.89	6489.56	2.29
0.85	6489.56	2.19
0.82	6489.56	2.11
0.80	6489.56	2.06
0.80	6489.56	2.06
0.81	6489.56	2.09
0.83	6489.56	2.14
0.87	6489.56	2.24
0.90	6501.65	2.32
0.92	6489.56	2.37
0.93	6489.56	2.40
0.94	6489.56	2.42
0.96	6489.56	2.47

Deformación (mm)	Esfuerzo (kgf)	Elongación %
0.99	6489.56	2.55
1.02	6489.56	2.63
1.03	6489.56	2.65
1.05	6489.56	2.70
1.06	6489.56	2.73
1.07	6489.56	2.76
1.08	6489.56	2.78
1.10	6489.56	2.83
1.11	6489.56	2.86
1.13	6513.73	2.91
1.15	6477.48	2.96
1.20	6477.48	3.09
1.24	6477.48	3.19
1.26	6477.48	3.25
1.29	6489.56	3.32
1.30	6489.56	3.35
1.32	6489.56	3.40
1.35	6501.65	3.48
1.37	6501.65	3.53
1.36	6501.65	3.50
1.33	6501.65	3.43
1.29	6501.65	3.32
1.25	6501.65	3.22
1.22	6501.65	3.14
1.21	6489.56	3.12
1.22	6489.56	3.14
1.25	6489.56	3.22
1.27	6489.56	3.27
1.29	6489.56	3.32
1.30	6489.56	3.35
1.31	6489.56	3.37
1.32	6489.56	3.40
1.32	6489.56	3.40
1.32	6489.56	3.40
1.31	6489.56	3.37
1.29	6489.56	3.32
1.28	6489.56	3.30
1.28	6489.56	3.30
1.30	6489.56	3.35
1.33	6489.56	3.43

Deformación (mm)	Esfuerzo (kgf)	Elongación %
1.35	6489.56	3.48
1.46	6501.65	3.76
1.52	6489.56	3.92
1.55	6489.56	3.99
1.61	6501.65	4.15
1.65	6489.56	4.25
1.73	6489.56	4.46
1.76	6489.56	4.53
1.81	6489.56	4.66
1.91	6477.48	4.92
2.01	6477.48	5.18
2.11	6489.56	5.44
2.23	6489.56	5.74
2.30	6489.56	5.92
2.42	6477.48	6.23
2.51	6465.40	6.47
2.60	6465.40	6.70
2.72	6489.56	7.01
2.80	6477.48	7.21
2.90	6477.48	7.47
3.01	6477.48	7.75
3.10	6477.48	7.99
3.15	6489.56	8.11
3.26	6477.48	8.40
3.34	6465.40	8.60
3.45	6465.40	8.89
3.55	6465.40	9.14
3.66	6477.48	9.43
3.77	6477.48	9.71
3.87	6465.40	9.97
3.96	6465.40	10.20
4.06	6465.40	10.46
4.16	6465.40	10.72
4.25	6465.40	10.95
4.35	6465.40	11.21
4.45	6465.40	11.46
4.55	6477.48	11.72
4.64	6477.48	11.95
4.74	6477.48	12.21
4.86	6477.48	12.52

Deformación (mm)	Esfuerzo (kgf)	Elongación %
4.94	6477.48	12.73
5.03	6465.40	12.96
5.08	6465.40	13.09
5.04	6513.73	12.98
5.13	6513.73	13.21
5.24	6525.81	13.50

Durante los sesenta minutos en que se desarrolló este ensayo se obtuvieron 32285 datos, motivo por el cual en la Tabla 1 se presenta un resumen de los datos recogidos en el Excel. El diagrama carga vs. tiempo de la Figura 1 representa la variación de carga en el tiempo que se tuvo durante el ensayo.



Figura 1. Diagrama Carga - Tiempo

CÁLCULOS

Porcentaje de deformación:

$$\delta = \frac{|l_f - l_o|}{l_o} \times 100$$

$$\delta = \frac{|33.5 - 38.8|}{38.8} \times 100$$

$$\delta = 13.65\%$$

CÁLCULO DE ERRORES

Tabla 2. Cálculo de Errores.

CARACTERÍSTICAS	VALOR REAL	VALOR CALCULADO	PORCENTAJE DE ERROR
Longitud final	33.5	33.29	0.27%
Deformación	5.3	5.24	1.13%
Porcentaje de elongación	13.65%	13.5	1.13%

CONCLUSIONES DEL ENSAYO

- Con la realización de este ensayo se demuestra que el equipo MTS puede efectuar ensayos de compresión de carga sostenida por un tiempo de sesenta minutos, y que el Excel soporta el manejo de una base de datos de las magnitudes requeridas por el sistema implementado de manera satisfactoria.
- El diagrama carga vs. tiempo que se tuvo durante el ensayo, mostrado en la Figura 1, refleja una subida drástica de la carga al inicio del ensayo y luego se estabiliza la carga en el valor configurado. Esto se debe a que se acomodan las mordazas y el material, al momento de ser comprimido.
- Además, se pudo comprobar que los valores obtenidos del ensayo son muy cercanos a los valores de las propiedades físicas del material del elemento de prueba.
- El material ensayado presentó las características esperadas y al ser comparado con otros materiales ensayados, por personal del LAEV con otros métodos, no existió ninguna diferencia.

Ing. Patricia Pontón

Responsable del Ensayo

ANEXO I

ENSAYO DE FATIGA



INFORME TÉCNICO

ENSAYO DE FATIGA

Fecha de ensayo: 2010-07-05

Realizado por: Ricardo Araguillin, Andrés Mejía.

OBJETIVO.

Comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control del Equipo MTS, mediante la realización de un ensayo de fatiga.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Material: Espuma térmica

DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA

$L_0 = 53.70 \text{ mm}$

$A_0 = 10040 \text{ mm}^2$

RESULTADOS OBTENIDOS

$L_f = 13 \text{ mm}$

Tabla 1. Resultados ensayo de fatiga.

TIEMPO	CARGA
0.005	498.22
0.01	535.39
0.015	571.97
0.02	607.39
0.025	641.09
0.03	672.53
0.035	701.23
0.04	726.72
0.045	748.61
0.05	766.56
0.055	780.27
0.06	789.53
0.065	794.2
0.07	794.2
0.075	789.53
0.08	780.27
0.085	766.56
0.09	748.61
0.095	726.72
0.1	701.23
0.105	672.53
0.11	641.09
0.115	607.39
0.12	571.97
0.125	535.39
0.13	498.22
0.135	461.05
0.14	424.47
0.145	389.05
0.15	355.35
0.155	323.91
0.16	295.21
0.165	269.72
0.17	247.83
0.175	229.89
0.18	216.18
0.185	206.91
0.19	202.25
0.195	202.25
0.2	206.91
0.205	216.18

TIEMPO	CARGA
0.215	247.83
0.22	269.72
0.225	295.21
0.23	323.91
0.235	355.35
0.24	389.05
0.245	424.47
0.25	461.05
0.255	498.22
0.26	535.39
0.265	571.97
0.27	607.39
0.275	641.09
0.28	672.53
0.285	701.23
0.29	726.72
0.295	748.61
0.3	766.56
0.305	780.27
0.31	789.53
0.315	794.2
0.32	794.2
0.325	789.53
0.33	780.27
0.335	766.56
0.34	748.61
0.345	726.72
0.35	701.23
0.355	672.53
0.36	641.09
0.365	607.39
0.37	571.97
0.375	535.39
0.38	498.22
0.385	461.05
0.39	424.47
0.395	389.05
0.4	355.35
0.405	323.91
0.41	295.21
0.415	269.72

TIEMPO	CARGA
0.43	216.18
0.435	206.91
0.44	202.25
0.445	202.25
0.45	206.91
0.455	216.18
0.46	229.89
0.465	247.83
0.47	269.72
0.475	295.21
0.48	323.91
0.485	355.35
0.49	389.05
0.495	424.47
0.5	461.05
0.505	498.22
0.51	535.39
0.515	571.97
0.52	607.39
0.525	641.09
0.53	672.53
0.535	701.23
0.54	726.72
0.545	748.61
0.55	766.56
0.555	780.27
0.56	789.53
0.565	794.2
0.57	794.2
0.575	789.53
0.58	780.27
0.585	766.56
0.59	748.61
0.595	726.72
0.6	701.23
0.605	672.53
0.61	641.09
0.615	607.39
0.62	571.97
0.625	535.39
0.63	498.22

TIEMPO	CARGA
0.635	461.05
0.64	424.47
0.645	389.05
0.65	355.35
0.655	323.91
0.66	295.21
0.665	269.72
0.67	247.83
0.675	229.89
0.68	216.18
0.685	206.91
0.69	202.25
0.695	202.25
0.7	206.91
0.705	216.18
0.71	229.89
0.715	247.83
0.72	269.72
0.725	295.21
0.73	323.91
0.735	355.35
0.74	389.05
0.745	424.47
0.75	461.05
0.755	498.22
0.76	535.39
0.765	571.97
0.77	607.39
0.775	641.09
0.78	672.53
0.785	701.23
0.79	726.72
0.795	748.61
0.8	766.56
0.805	780.27
0.81	789.53
0.815	794.2
0.82	794.2
0.825	789.53
0.83	780.27
0.835	766.56
0.84	748.61
0.845	726.72
0.85	701.23

TIEMPO	CARGA
0.86	641.09
0.865	607.39
0.87	571.97
0.875	535.39
0.88	498.22
0.885	461.05
0.89	424.47
0.895	389.05
0.9	355.35
0.905	323.91
0.91	295.21
0.915	269.72
0.92	247.83
0.925	229.89
0.93	216.18
0.935	206.91
0.94	202.25
0.945	202.25
0.95	206.91
0.955	216.18
0.96	229.89
0.965	247.83
0.97	269.72
0.975	295.21
0.98	323.91
0.985	355.35
0.99	389.05
0.995	424.47
1	461.05
1.005	498.22
1.01	535.39
1.015	571.97
1.02	607.39
1.025	641.09
1.03	672.53
1.035	701.23
1.04	726.72
1.045	748.61
1.05	766.56
1.055	780.27
1.06	789.53
1.065	794.2
1.07	794.2
1.075	789.53

TIEMPO	CARGA
1.085	766.56
1.09	748.61
1.095	726.72
1.1	701.23
1.105	672.53
1.11	641.09
1.115	607.39
1.12	571.97
1.125	535.39
1.13	498.22
1.135	461.05
1.14	424.47
1.145	389.05
1.15	355.35
1.155	323.91
1.16	295.21
1.165	269.72
1.17	247.83
1.175	229.89
1.18	216.18
1.185	206.91
1.19	202.25
1.195	202.25
1.2	206.91
1.205	216.18
1.21	229.89
1.215	247.83
1.22	269.72
1.225	295.21
1.23	323.91
1.235	355.35
1.24	389.05
1.245	424.47
1.25	461.05
1.255	498.22
1.26	535.39
1.265	571.97
1.27	607.39
1.275	641.09
1.28	672.53
1.285	701.23
1.29	726.72
1.295	748.61
1.3	766.56

TIEMPO	CARGA
1.31	789.53
1.315	794.2
1.32	794.2
1.325	789.53
1.33	780.27
1.335	766.56
1.34	748.61
1.345	726.72
1.35	701.23
1.355	672.53
1.36	641.09
1.365	607.39
1.37	571.97
1.375	535.39
1.38	498.22
1.385	461.05
1.39	424.47
1.395	389.05
1.4	355.35
1.405	323.91
1.41	295.21
1.415	269.72
1.42	247.83
1.425	229.89
1.43	216.18
1.435	206.91
1.44	202.25
1.445	202.25
1.45	206.91
1.455	216.18
1.46	229.89
1.465	247.83
1.47	269.72
1.475	295.21
1.48	323.91
1.485	355.35
1.49	389.05
1.495	424.47
1.5	461.05
1.505	498.22
1.51	535.39
1.515	571.97
1.52	607.39
1.525	641.09

TIEMPO	CARGA
1.535	701.23
1.54	726.72
1.545	748.61
1.55	766.56
1.555	780.27
1.56	789.53
1.565	794.2
1.57	794.2
1.575	789.53
1.58	780.27
1.585	766.56
1.59	748.61
1.595	726.72
1.6	701.23
1.605	672.53
1.61	641.09
1.615	607.39
1.62	571.97
1.625	535.39
1.63	498.22
1.635	461.05
1.64	424.47
1.645	389.05
1.65	355.35
1.655	323.91
1.66	295.21
1.665	269.72
1.67	247.83
1.675	229.89
1.68	216.18
1.685	206.91
1.69	202.25
1.695	202.25
1.7	206.91
1.705	216.18
1.71	229.89
1.715	247.83
1.72	269.72
1.725	295.21
1.73	323.91
1.735	355.35
1.74	389.05
1.745	424.47
1.75	461.05

TIEMPO	CARGA
1.76	535.39
1.765	571.97
1.77	607.39
1.775	641.09
1.78	672.53
1.785	701.23
1.79	726.72
1.795	748.61
1.8	766.56
1.805	780.27
1.81	789.53
1.815	794.2
1.82	794.2
1.825	789.53
1.83	780.27
1.835	766.56
1.84	748.61
1.845	726.72
1.85	701.23
1.855	672.53
1.86	641.09
1.865	607.39
1.87	571.97
1.875	535.39
1.88	498.22
1.885	461.05
1.89	424.47
1.895	389.05
1.9	355.35
1.905	323.91
1.91	295.21
1.915	269.72
1.92	247.83
1.925	229.89
1.93	216.18
1.935	206.91
1.94	202.25
1.945	202.25
1.95	206.91
1.955	216.18
1.96	229.89
1.965	247.83
1.97	269.72
1.975	295.21

TIEMPO	CARGA
1.985	355.35
1.99	389.05
1.995	424.47
2	461.05
2.005	498.22
2.01	535.39
2.015	571.97
2.02	607.39
2.025	641.09
2.03	672.53
2.035	701.23
2.04	726.72
2.045	748.61
2.05	766.56
2.055	780.27
2.06	789.53
2.065	794.2
2.07	794.2
2.075	789.53
2.08	780.27
2.085	766.56
2.09	748.61
2.095	726.72
2.1	701.23
2.105	672.53
2.11	641.09
2.115	607.39
2.12	571.97
2.125	535.39
2.13	498.22
2.135	461.05
2.14	424.47
2.145	389.05
2.15	355.35
2.155	323.91
2.16	295.21
2.165	269.72
2.17	247.83
2.175	229.89
2.18	216.18
2.185	206.91
2.19	202.25
2.195	202.25
2.2	206.91

TIEMPO	CARGA
2.21	229.89
2.215	247.83
2.22	269.72
2.225	295.21
2.23	323.91
2.235	355.35
2.24	389.05
2.245	424.47
2.25	461.05
2.255	498.22
2.26	535.39
2.265	571.97
2.27	607.39
2.275	641.09
2.28	672.53
2.285	701.23
2.29	726.72
2.295	748.61
2.3	766.56
2.305	780.27
2.31	789.53
2.315	794.2
2.32	794.2
2.325	789.53
2.33	780.27
2.335	766.56
2.34	748.61
2.345	726.72
2.35	701.23
2.355	672.53
2.36	641.09
2.365	607.39
2.37	571.97
2.375	535.39
2.38	498.22
2.385	461.05
2.39	424.47
2.395	389.05
2.4	355.35
2.405	323.91
2.41	295.21
2.415	269.72
2.42	247.83
2.425	229.89

TIEMPO	CARGA
2.435	206.91
2.44	202.25
2.445	202.25
2.45	206.91
2.455	216.18
2.46	229.89
2.465	247.83
2.47	269.72
2.475	295.21
2.48	323.91
2.485	355.35
2.49	389.05
2.495	424.47
2.5	461.05
2.505	498.22
2.51	535.39
2.515	571.97
2.52	607.39
2.525	641.09
2.53	672.53
2.535	701.23
2.54	726.72
2.545	748.61
2.55	766.56
2.555	780.27
2.56	789.53
2.565	794.2
2.57	794.2
2.575	789.53
2.58	780.27
2.585	766.56
2.59	748.61
2.595	726.72
2.6	701.23
2.605	672.53
2.61	641.09
2.615	607.39
2.62	571.97
2.625	535.39
2.63	498.22
2.635	461.05
2.64	424.47
2.645	389.05
2.65	355.35

TIEMPO	CARGA
2.66	295.21
2.665	269.72
2.67	247.83
2.675	229.89
2.68	216.18
2.685	206.91
2.69	202.25
2.695	202.25
2.7	206.91
2.705	216.18
2.71	229.89
2.715	247.83
2.72	269.72
2.725	295.21
2.73	323.91
2.735	355.35
2.74	389.05
2.745	424.47
2.75	461.05
2.755	498.22
2.76	535.39
2.765	571.97
2.77	607.39
2.775	641.09
2.78	672.53
2.785	701.23
2.79	726.72
2.795	748.61
2.8	766.56
2.805	780.27
2.81	789.53
2.815	794.2
2.82	794.2
2.825	789.53
2.83	780.27
2.835	766.56
2.84	748.61
2.845	726.72
2.85	701.23
2.855	672.53
2.86	641.09
2.865	607.39
2.87	571.97
2.875	535.39

TIEMPO	CARGA
2.885	461.05
2.89	424.47
2.895	389.05
2.9	355.35
2.905	323.91
2.91	295.21
2.915	269.72
2.92	247.83
2.925	229.89
2.93	216.18
2.935	206.91
2.94	202.25
2.945	202.25
2.95	206.91
2.955	216.18
2.96	229.89
2.965	247.83
2.97	269.72
2.975	295.21
2.98	323.91
2.985	355.35
2.99	389.05
2.995	424.47
3	461.05
3.005	498.22
3.01	535.39
3.015	571.97
3.02	607.39
3.025	641.09
3.03	672.53
3.035	701.23
3.04	726.72
3.045	748.61
3.05	766.56
3.055	780.27
3.06	789.53
3.065	794.2
3.07	794.2
3.075	789.53
3.08	780.27
3.085	766.56
3.09	748.61
3.095	726.72
3.1	701.23

TIEMPO	CARGA
3.11	641.09
3.115	607.39
3.12	571.97
3.125	535.39
3.13	498.22
3.135	461.05
3.14	424.47
3.145	389.05
3.15	355.35
3.155	323.91
3.16	295.21
3.165	269.72
3.17	247.83
3.175	229.89
3.18	216.18
3.185	206.91
3.19	202.25
3.195	202.25
3.2	206.91
3.205	216.18
3.21	229.89
3.215	247.83
3.22	269.72
3.225	295.21
3.23	323.91
3.235	355.35
3.24	389.05
3.245	424.47
3.25	461.05
3.255	498.22
3.26	535.39
3.265	571.97
3.27	607.39
3.275	641.09
3.28	672.53
3.285	701.23
3.29	726.72
3.295	748.61
3.3	766.56
3.305	780.27
3.31	789.53
3.315	794.2
3.32	794.2
3.325	789.53

TIEMPO	CARGA
3.335	766.56
3.34	748.61
3.345	726.72
3.35	701.23
3.355	672.53
3.36	641.09
3.365	607.39
3.37	571.97
3.375	535.39
3.38	498.22
3.385	461.05
3.39	424.47
3.395	389.05
3.4	355.35
3.405	323.91
3.41	295.21
3.415	269.72
3.42	247.83
3.425	229.89
3.43	216.18
3.435	206.91
3.44	202.25
3.445	202.25
3.45	206.91
3.455	216.18
3.46	229.89
3.465	247.83
3.47	269.72
3.475	295.21
3.48	323.91
3.485	355.35
3.49	389.05
3.495	424.47
3.5	461.05
3.505	498.22
3.51	535.39
3.515	571.97
3.52	607.39
3.525	641.09
3.53	672.53
3.535	701.23
3.54	726.72
3.545	748.61
3.55	766.56

TIEMPO	CARGA
3.56	789.53
3.565	794.2
3.57	794.2
3.575	789.53
3.58	780.27
3.585	766.56
3.59	748.61
3.595	726.72
3.6	701.23
3.605	672.53
3.61	641.09
3.615	607.39
3.62	571.97
3.625	535.39
3.63	498.22
3.635	461.05
3.64	424.47
3.645	389.05
3.65	355.35
3.655	323.91
3.66	295.21
3.665	269.72
3.67	247.83
3.675	229.89
3.68	216.18
3.685	206.91
3.69	202.25
3.695	202.25
3.7	206.91
3.705	216.18
3.71	229.89
3.715	247.83
3.72	269.72
3.725	295.21
3.73	323.91
3.735	355.35
3.74	389.05
3.745	424.47
3.75	461.05
3.755	498.22
3.76	535.39
3.765	571.97
3.77	607.39
3.775	641.09

TIEMPO	CARGA
3.785	701.23
3.79	726.72
3.795	748.61
3.8	766.56
3.805	780.27
3.81	789.53
3.815	794.2
3.82	794.2
3.825	789.53
3.83	780.27
3.835	766.56
3.84	748.61
3.845	726.72
3.85	701.23
3.855	672.53
3.86	641.09
3.865	607.39
3.87	571.97
3.875	535.39
3.88	498.22
3.885	461.05
3.89	424.47
3.895	389.05
3.9	355.35
3.905	323.91
3.91	295.21
3.915	269.72
3.92	247.83
3.925	229.89
3.93	216.18
3.935	206.91
3.94	202.25
3.945	202.25
3.95	206.91
3.955	216.18
3.96	229.89
3.965	247.83
3.97	269.72
3.975	295.21
3.98	323.91
3.985	355.35
3.99	389.05
3.995	424.47
4	461.05

TIEMPO	CARGA
4.01	535.39
4.015	571.97
4.02	607.39
4.025	641.09
4.03	672.53
4.035	701.23
4.04	726.72
4.045	748.61
4.05	766.56
4.055	780.27
4.06	789.53
4.065	794.2
4.07	794.2
4.075	789.53
4.08	780.27
4.085	766.56
4.09	748.61
4.095	726.72
4.1	701.23
4.105	672.53
4.11	641.09
4.115	607.39
4.12	571.97
4.125	535.39
4.13	498.22
4.135	461.05
4.14	424.47
4.145	389.05
4.15	355.35
4.155	323.91
4.16	295.21
4.165	269.72
4.17	247.83
4.175	229.89
4.18	216.18
4.185	206.91
4.19	202.25
4.195	202.25
4.2	206.91
4.205	216.18
4.21	229.89
4.215	247.83
4.22	269.72
4.225	295.21

TIEMPO	CARGA
4.235	355.35
4.24	389.05
4.245	424.47
4.25	461.05
4.255	498.22
4.26	535.39
4.265	571.97
4.27	607.39
4.275	641.09
4.28	672.53
4.285	701.23
4.29	726.72
4.295	748.61
4.3	766.56
4.305	780.27
4.31	789.53
4.315	794.2
4.32	794.2
4.325	789.53
4.33	780.27
4.335	766.56
4.34	748.61
4.345	726.72
4.35	701.23
4.355	672.53
4.36	641.09
4.365	607.39
4.37	571.97
4.375	535.39
4.38	498.22
4.385	461.05
4.39	424.47
4.395	389.05
4.4	355.35
4.405	323.91
4.41	295.21
4.415	269.72
4.42	247.83
4.425	229.89
4.43	216.18
4.435	206.91
4.44	202.25
4.445	202.25
4.45	206.91

TIEMPO	CARGA
4.46	229.89
4.465	247.83
4.47	269.72
4.475	295.21
4.48	323.91
4.485	355.35
4.49	389.05
4.495	424.47
4.5	461.05
4.505	498.22
4.51	535.39
4.515	571.97
4.52	607.39
4.525	641.09
4.53	672.53
4.535	701.23
4.54	726.72
4.545	748.61
4.55	766.56
4.555	780.27
4.56	789.53
4.565	794.2
4.57	794.2
4.575	789.53
4.58	780.27
4.585	766.56
4.59	748.61
4.595	726.72
4.6	701.23
4.605	672.53
4.61	641.09
4.615	607.39
4.62	571.97
4.625	535.39
4.63	498.22
4.635	461.05
4.64	424.47
4.645	389.05
4.65	355.35
4.655	323.91
4.66	295.21
4.665	269.72
4.67	247.83
4.675	229.89

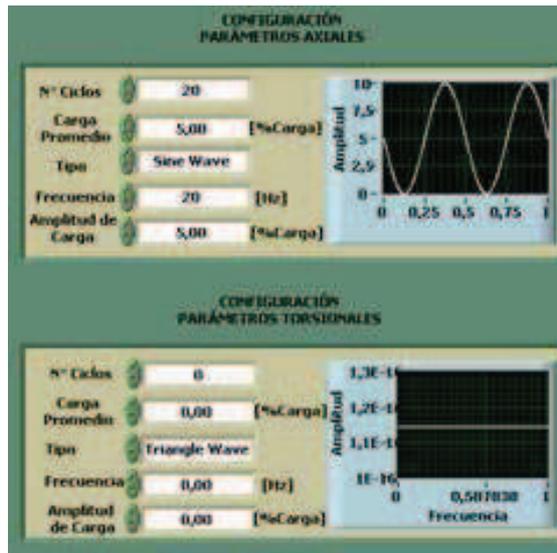


Figura 1. Parámetros de configuración

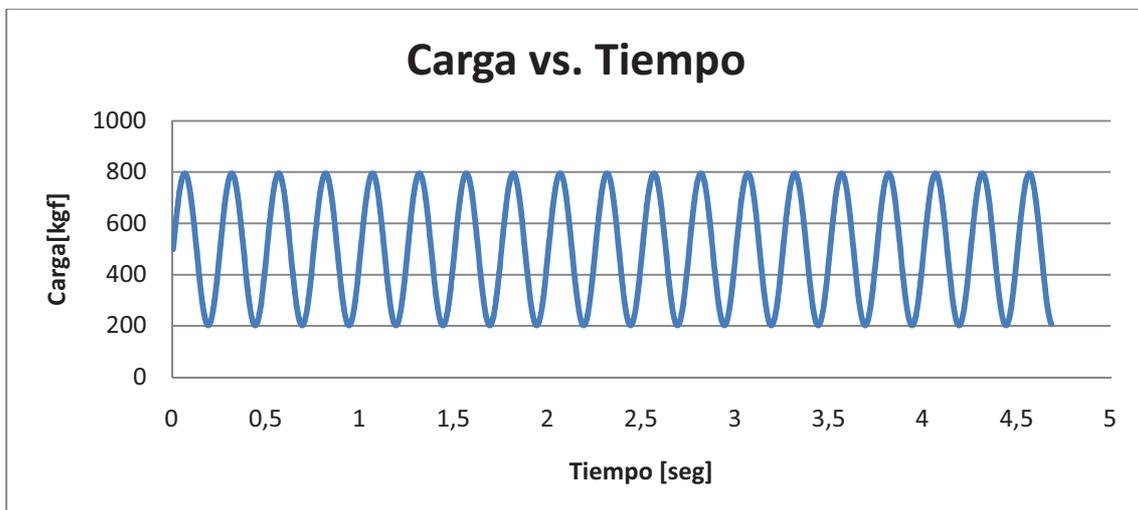


Figura 2. Diagrama Carga – Tiempo

CONCLUSIONES DEL ENSAYO

- Con la realización de este ensayo se demuestra que el equipo MTS puede efectuar ensayos de fatiga a una frecuencia de 20 Hz, y que el equipo MTS está en capacidad de operar bajo estas condiciones.
- El diagrama carga vs. tiempo que se tuvo durante el ensayo, mostrado en la Figura 2, refleja que la respuesta de la celda de carga en ensayos dinámicos es satisfactoria.

ANEXO J

CONTRASTACIÓN DE CURVAS



INFORME TÉCNICO

ENSAYO AXIAL

Fecha de ensayo: 2010-07-23

Realizado por: Ricardo Araguillin, Andrés Mejía.

OBJETIVO.

Comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control del Equipo MTS, mediante la realización de un ensayo axial de una probeta de madera realizada en el equipo MTS y la máquina TINIUS OLSEN del LAEV.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Material: Madera

DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA

$L_0 = 100,05 \text{ mm}$

$A_0 = 1434 \text{ mm}^2$

RESULTADOS OBTENIDOS

$L_f = 86,034 \text{ mm}$

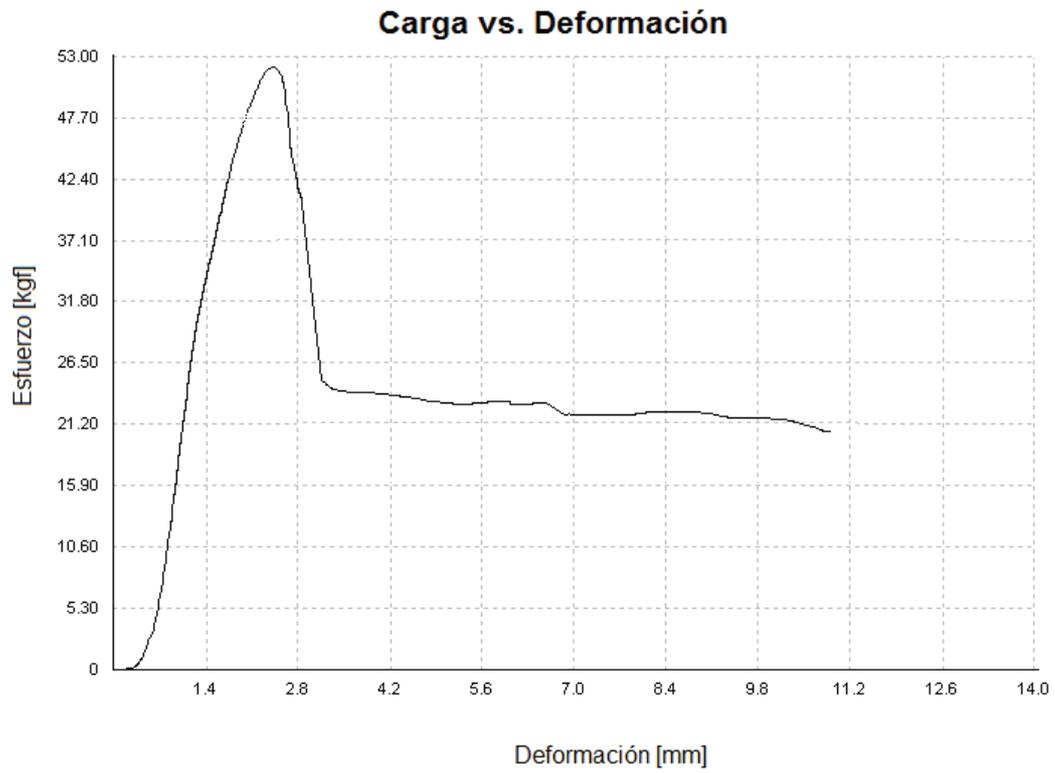


Figura 1. Diagrama carga vs. Deformación (Máquina MTS)

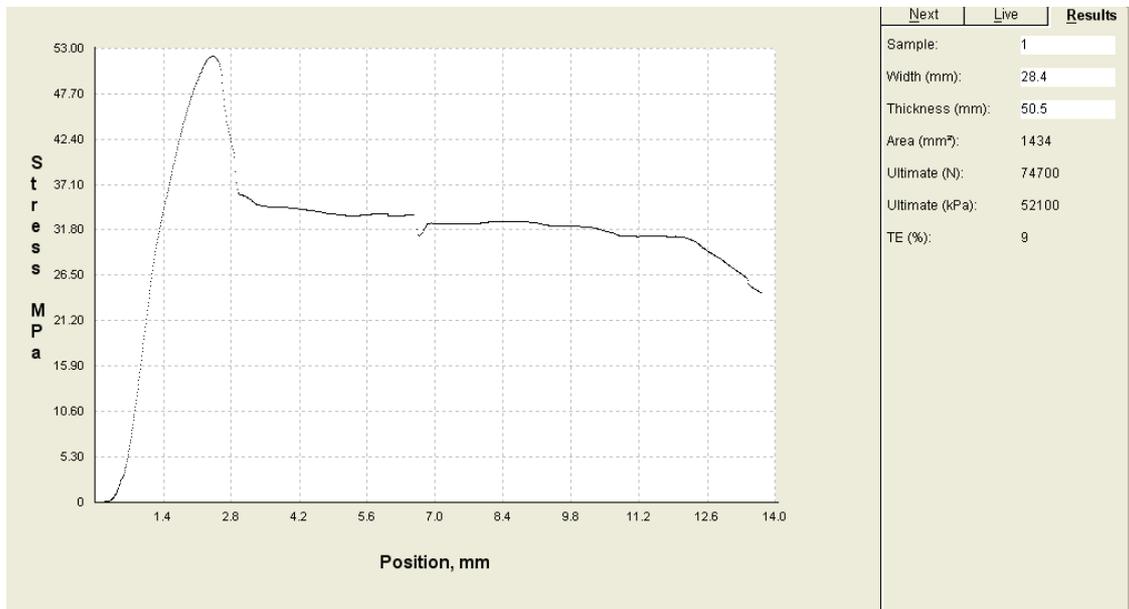


Figura 2. Diagrama carga vs. Deformación (Máquina TINIUS OLSEN)

CONCLUSIONES DEL ENSAYO

- Con la realización de este ensayo se demuestra que los datos del equipo MTS son fiables, los mismos que pueden ser usados para aplicaciones pertinentes.
- Se pudo comprobar que los valores obtenidos del ensayo son muy cercanos a los valores de las propiedades físicas del material del elemento de prueba.
- El material ensayado presentó las características esperadas y al ser comparado con otros materiales ensayados, por personal del LAEV con otros métodos, no existió ninguna diferencia.