



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

AUTORES:

BUSTAMANTE DÍAZ, LESLIE VANESSA

JUMBO RAMÍREZ, OSMANY MANUEL

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO-
INFORMÁTICO PARA LA MÁQUINA DE ENSAYO TRIAXIAL**

DIRECTOR: ING. PÉREZ, JOSÉ

CODIRECTOR: ING. PROAÑO, VICTOR

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO

ING. JOSÉ PEREZ (DIRECTOR)

ING. VICTOR PROAÑO (CODIRECTOR)

CERTIFICAN: Que el trabajo titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO-INFORMÁTICO PARA LA MÁQUINA DE ENSAYO TRIAXIAL”, realizado Leslie Vanessa Bustamante Díaz y Osmany Manuel Jumbo Ramírez, ha sido realizado en su totalidad y cumple normas estatutarias establecidas por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, Octubre del 2014

ING. JOSÉ PEREZ

DIRECTOR

ING. VICTOR PROAÑO

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

LESLIE VANESSA BUSTAMANTE DÍAZ

OSMANY MANUEL JUMBO RAMÍREZ

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO-INFORMÁTICO PARA LA MÁQUINA DE ENSAYO TRIAXIAL”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando el derecho intelectual de terceros, conforme se encuentra en las citas que constan en las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Octubre del 2014

LESLIE BUSTAMANTE DÍAZ

OSMANY JUMBO RAMÍREZ

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **LESLIE VANESSA BUSTAMANTE DÍAZ**

OSMANY MANUEL JUMBO RAMÍREZ

DECLARAMOS QUE:

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO-INFORMÁTICO PARA LA MÁQUINA DE ENSAYO TRIAXIAL”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre del 2014

LESLIE BUSTAMANTE DÍAZ

OSMANY JUMBO RAMÍREZ

DEDICATORIA

El presente proyecto de tesis está dedicado a mis padres y hermanos que siempre me han brindado su apoyo y me han dado la confianza para poder cumplir con todas las metas que me he propuesto.

Leslie Bustamante D.

DEDICATORIA

Dedico con mucho cariño a mis padres, **Carlos Jumbo y Dalila Ramírez** quienes han sido mi fuente de inspiración, el motivo que mantiene de pie para seguirme formando y preparando como profesional; ya que con amor y sacrificio, supieron motivarme moral y materialmente para culminar mis estudios, obtener un título y así asegurarme una vida digna y clara en el futuro para el servir con la verdad, y la justicia.

A mis hermanas **Carlita y Naomi** porque aunque existía días difíciles en mi formación profesional sus consejos iluminaban mi caminar, y a mi sobrina **Emireth** porque con sus ojos que irradian ternura me permite ver al mundo con alegría.

Osmany Jumbo R.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y hermanos ya que muchas cosas no hubieran sido posibles sin su apoyo y confianza. Gracias a ellos he podido culminar esta etapa y con su ayuda he trazado mi camino para el futuro.

Leslie Bustamante D.

AGRADECIMIENTOS

Dejo constancia de mis sinceros agradecimientos de admiración y pleitesía a mis queridos padres **Carlos y Dalila** por la confianza puesta en mí.

Mi gratitud para mis directores de tesis Ing. José Pérez e Ing. Víctor Proaño que con su alegría y transparencia de cristal me entregaron sus sabias enseñanzas y que con nobleza y entusiasmo depositaron en mí, sus vastos conocimientos facilitando de esta manera el desarrollo del presente trabajo investigativo.

De igual manera el presente trabajo va dirigido con gratitud para mis distinguidos **docentes**, quienes con amor y sabiduría, depositaron en mí, todo su apostolado.

Osmany Jumbo R.

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>CERTIFICADO</i>	<i>ii</i>
<i>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</i>	<i>iii</i>
<i>AUTORIZACIÓN</i>	<i>iv</i>
<i>DEDICATORIA</i>	<i>v</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>vii</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>xix</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xx</i>
<i>CAPÍTULO I</i>	<i>1</i>
<i>1.1 GENERALIDADES</i>	<i>1</i>
1.1.1 Introducción	<i>1</i>
1.1.2 Planteamiento del problema	<i>2</i>
1.1.3 Justificación del problema	<i>3</i>
1.1.4 Objetivos	<i>5</i>
1.1.4.1 Objetivo general	<i>5</i>
1.1.4.2 Objetivos específicos	<i>5</i>
1.1.5 Metodología	<i>6</i>
1.1.5.1 Método empírico	<i>6</i>
1.1.5.2 Método científico	<i>6</i>
1.1.5.3 Metodología de diseño	<i>8</i>
<i>CAPÍTULO II</i>	<i>9</i>
<i>2.1 FUNDAMENTOS</i>	<i>9</i>

	x
2.1.1	Introducción 9
2.1.2	Calibración de la instrumentación..... 10
2.1.2.1	Mediciones 10
2.1.2.2	Calibración 12
2.1.2.3	Norma ISO 9000 13
2.1.2.4	Normas: ensayos triaxiales..... 14
2.1.2.4.1	Ensayo triaxial..... 14
2.1.2.4.2	Normas de los ensayos triaxiales 18
2.1.3	Adquisición de datos 19
2.1.3.1	Sensor 20
2.1.3.2	DAQ 21
2.1.3.3	PC y software 22
CAPÍTULO III 25
3.1	ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA..... 25
3.1.1	Sistema eléctrico 25
3.1.2	Sistema mecánico..... 26
3.1.3	Sistema hidráulico y neumático 29
3.1.4	Sistema electrónico 31
3.1.5	Diagnóstico del equipo..... 31
CAPITULO IV 36
4.1	DISEÑO DEL SISTEMA 36
4.1.1	Descripción del modelo de diseño 36
4.1.1.1	Sistema mecánico..... 36
4.1.1.2	Sistema hidráulico-neumático..... 37

4.1.1.3	Sistema electrónico – eléctrico.....	37
4.1.1.4	Sistema de control.....	38
4.2	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	39
4.2.1	Construcción de partes mecánicas	39
4.2.2	Selección de tarjeta de adquisición de datos	40
4.2.2.1	Selección del módulo ni CompactDAQ.....	41
4.2.2.2	Selección del chasis ni CompactDAQ	41
4.2.3	Selección de transductores digitales.....	43
4.2.3.1	Selección de transductores de deformación	44
4.2.3.2	Selección de transductor celda de carga.....	47
4.2.3.3	Selección de transductor de presión.....	50
4.2.4	Definición de las señales y su interpretación	52
4.2.5	Diagrama de conexión al conector DIN.....	53
4.2.6	Estructura del sistema de adquisición de datos	56
4.2.7	Diagrama de conexión de transductores a tarjeta DAQ.....	66
4.2.8	Diseño de fuentes de alimentación.....	69
4.2.9	Calibración de los transductores del sistema	72
4.2.10	Circuito de acondicionamiento de señales.	80
4.2.10.1	Diseño del circuito de amplificación para celda de carga.....	80
4.2.11	Diseño de la interfaz HMI.....	82
4.2.11.1	Etapas de ingreso de datos.....	84
4.2.11.2	Etapas de botones e indicador.....	85
4.2.11.3	Etapas del estado del ensayo.....	87
4.2.12	Obtención de la hoja de reporte	89

4.2.13	Programación hoja de cálculo	90
<i>CAPÍTULO V</i>		94
5.1	PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL EQUIPO INSTALADO	94
5.1.1	Evaluación y calibración por software de programación del equipo instalado.	94
5.1.2	Pruebas y resultados de los ensayos.....	96
<i>CAPÍTULO VI</i>		98
6.1	OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	98
6.1.1	Manual del usuario.....	98
6.1.2	Manual de mantenimiento del sistema informático-electrónico	98
<i>CAPÍTULO VII</i>		99
7.1	ANÁLISIS DE COSTOS	99
7.1.1	Costos directos	99
7.1.1.1	Costos de materiales directos	99
7.1.1.2	Costos de elementos mecánicos	100
7.1.1.3	Costos de elementos eléctricos/electrónicos	100
7.1.1.4	Costos de elementos de instrumentación y control	100
7.1.1.5	Mano de obra directa.....	101
7.1.2	Costos indirectos	101
7.1.2.1	Materiales fungibles	102
7.1.2.2	Gastos imprevistos	102
7.1.3	Costo total de la implementación del sistema.	102
<i>CAPÍTULO VIII</i>		104

8.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
8.1.1	Conclusiones	104
8.1.2	Recomendaciones.....	105
	<i>REFERENCIAS.....</i>	<i>107</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de elementos en ensayo triaxial según norma ASTM.	18
Tabla 2 Sensores Comunes	20
Tabla 3 Datos procesados del ensayo UU	33
Tabla 4 Elementos de Diseño del Sistema Mecánico	36
Tabla 5 Elementos de Diseño del Sistema Hidráulico-Neumático	37
Tabla 6 Elementos de Diseño del Sistema Electrónico – Eléctrico	38
Tabla 7 Elementos de Diseño del Sistema de Control	38
Tabla 8 Resumen de Selección de Instrumentación.....	52
Tabla 9 Elementos, señales y su interpretación	52
Tabla 10 Conexiones del transductor de deformación a conector DIN	54
Tabla 11 Conexiones del transductor celda de carga a conector DIN	54
Tabla 12 Conexiones del transductor de presión a conector DIN.....	55
Tabla 14 Distribución elementos en canales de entrada de Compact DAQ	66
Tabla 15 Asignación de terminales y señales de la NI Compact DAQ 9219	68
Tabla 16 Configuración de señales en terminales del módulo 9219.....	68
Tabla 17 Voltaje de excitación para los transductores.....	70
Tabla 18 Elementos Panel Eléctrico	71
Tabla 19 Características importantes del transductor de deformación	73
Tabla 20 Calibración por programación del transductor de deformación.....	74
Tabla 21 Características importantes del transductor de presión.....	75
Tabla 22 Calibración por programación del transductor de presión	76
Tabla 23 Características importantes del transductor celda de carga	77
Tabla 24 Amplificación de la señal mV de la celda de carga	78

Tabla 25 Calibración por programación del transductor celda de carga.....	79
Tabla 26 Calibración del transductor de deformación	94
Tabla 27 Calibración del transductor de presión.....	95
Tabla 28 Calibración transductor celda de carga	96
Tabla 29 Costo de materiales directos	99
Tabla 30 Costo de elementos mecánicos	100
Tabla 31 Costo de elementos eléctricos/electrónicos.....	100
Tabla 32 Costo de elementos de instrumentación y control	100
Tabla 33 Costo de mano de obra directa.....	101
Tabla 34 Costo total directo del proyecto	101
Tabla 35 Materiales fungibles.....	102
Tabla 36 Gastos imprevistos	102
Tabla 37 Costo total del sistema	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del diseño concurrente	8
Figura 2 Sección típica equipo triaxial.....	15
Figura 3 Envolvente de Mohr.	17
Figura 4 Esquema de DAQ [NI]	19
Figura 5 Esquema general de Adquisición de datos NI.	23
Figura 6 Motor eléctrico de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.	25
Figura 7 Compresor de aire de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.	26
Figura 8 Estructura metálica de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	27
Figura 9 Transmisión mecánica de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	28
Figura 10 Instrumentación de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	29
Figura 11 Red de tuberías de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	30
Figura 12 Válvulas tipo mariposa de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	30
Figura 13 Manómetro instalado en la máquina Triaxial Chicago Soiltest.....	31
Figura 14 Gráfica Esfuerzo-Deformación del ensayo UU.....	34
Figura 15 Gráfica Envolvente de Mohr del ensayo UU.....	35
Figura 16 Módulo NI 9219 con Chasis NI CompactDAQ.....	43
Figura 17 Principio de Funcionamiento de transductores tipo LVDT.....	45
Figura 18 Omega LVDT LD621-30	47
Figura 19 Arreglo del puente de Wheatstone.....	48
Figura 20 Omega LCM101-1.5k.....	49
Figura 21 Omega PXM209-016.....	51
Figura 22 Diagrama de conexión DIN 240° para los transductores.	53
Figura 23 Conexiones del transductor de deformación a conector DIN	54

Figura 24 Conexiones del transductor de celda de carga a conector DIN	55
Figura 25 Conexiones del transductor de presión a conector DIN	56
Figura 26 Esquema del Acondicionamiento de señales CompactDAQ 9219	57
Figura 27 Diagrama de bloques de un convertidor A/D tipo Delta-Sigma.....	59
Figura 28 Procesado de señal por bloques del convertidor Delta-Sigma.....	61
Figura 29 Sistema Electrónico-Informático de la máquina triaxial	65
Figura 30 Canales y terminales de la NI Compact DAQ 9219	67
Figura 31 Conexión interna de transductores a NI Compact DAQ 9219	69
Figura 32 Diseño fuente de alimentación de $\pm 12\text{Vdc}$	70
Figura 33 Panel eléctrico.....	71
Figura 34 Panel eléctrico detalles	72
Figura 35 Calibración por programación del transductor de deformación	74
Figura 36 Calibración por programación del transductor de presión.....	76
Figura 37 Calibración por programación del transductor celda de carga	80
Figura 38 Puente de Wheatstone.....	81
Figura 39 Amplificador instrumental AD620.....	82
Figura 40 HMI Ensayo Triaxial No Consolidado No drenado	83
Figura 41 Ingreso de datos de la muestra.....	84
Figura 42 Programación para el ingreso de datos	85
Figura 43 Botones e indicador	85
Figura 44 Programación para encerrar las variables	86
Figura 45 Botón de comenzar ensayo	86
Figura 46 Botón STOP.....	87
Figura 47 Indicador de estados	87

Figura 48 Estado del ensayo	88
Figura 49 Etapa de gráfica y tabla.....	88
Figura 50 Guardar datos de la muestra de suelo	89
Figura 51 Guardar la adquisición de datos.....	89
Figura 52 Configuración de Write to Measurement File	90
Figura 53 Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria	92
Figura 54 Circulo de Mohr.....	93
Figura 55 Calibración del transductor de desplazamiento	95
Figura 56 Calibración del transductor de presión	95

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Error absoluto	11
Ecuación 2 Error relativo	11
Ecuación 3 Esfuerzo vertical.....	16
Ecuación 4 Ganancia de amplificación instrumental.....	82
Ecuación 5 Deformación unitaria.....	91
Ecuación 6 Área corregida.....	91
Ecuación 7 Esfuerzo desviador	91

RESUMEN

El proyecto consistió en la automatización del equipo TRIAXIAL CHICAGO SOILTEST, donde se consideró la implementación de equipos electrónicos como transductores y tarjeta de adquisición de datos para el registro de datos. Con la implementación de estos equipos, se puede realizar la adquisición de datos para el ensayo no consolidado no drenado en el aparato triaxial, sin la intervención del usuario cuando se está realizando el ensayo, presentando así un procesamiento de datos innovador, y disminuyendo problemas presentados en los diferentes ensayos que son realizados de manera manual. El sistema de adquisición se realiza por etapas, en primer lugar permite recolectar datos primarios de entrada, en este caso, los equipos electrónicos como sensores captan las señales físicas, estas señales son acondicionadas y mediante un convertor análogo/digital son convertidas en señales discretas, que luego son analizadas y ordenadas en un bloque central, de esta manera los datos son clasificados para disponer de un proceso más fácil y eficiente. Una vez que la información está completa se procede a ejecutar la operación de salida en la que se prepara un reporte que sirve como base para la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVE: AUTOMATIZACIÓN, EQUIPOS ELECTRÓNICOS, ADQUISICIÓN DE DATOS, REGISTRO DE DATOS, ENSAYO NO CONSOLIDADO NO DRENADO.

ABSTRACT

The project consisted in the automation of TRIAXIAL CHICAGO SOILTEST machine, where was considered the implementation of electronic devices such as transducers and a data acquisition card to the data record. With the implementation of these devices, you can perform data acquisition for unconsolidated undrained test in the triaxial machine, without user intervention when the practice is developing, showing an innovative data processing for the machine, thus reducing problems in various manual tests. The acquisition system is achieved in stages, first lets collect primary data input, in this case, electronic equipment such as sensors capture the physical signals, these signals are conditioned and through an analog / digital converter are converted into discrete signals, which are then analyzed and sorted on a central block, in this way, the data are classified to have an easy and efficient process. Once the information is complete it is come to execute the output operation that consist in a report that serves as a basis for making decisions.

KEYWORDS: AUTOMATION, ELECTRONIC DEVICES, DATA ACQUISITION, DATA RECORD, UNCONSOLIDATED UNDRAINED TEST.

CAPÍTULO I

1.1 GENERALIDADES

En el presente capítulo se muestran los aspectos considerados para la comprensión de las actividades desarrolladas en el proyecto de tesis, detallando así también la metodología utilizada en la construcción del Sistema Electrónico-Informático para la máquina triaxial.

1.1.1 Introducción

La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE es una institución de educación superior comprometida con el desarrollo de la sociedad ecuatoriana, a través de la formación de profesionales de alto nivel, acorde con las exigencias del país.

La amplia trayectoria y el involucramiento directo en el desarrollo del Ecuador han hecho que los profesionales graduados de esta institución contribuyan a la mejora continua sobre todo del sector industrial basada en el talento humano y en la optimización de procesos a través del uso de herramientas tecnológicas de último nivel.

Es así como el término automatización de procesos, caracterizado por períodos de constantes innovaciones tecnológicas, es una herramienta fundamental en una amplia variedad de sistemas y procesos industriales.

La automatización en los Procesos Industriales, se basa en la capacidad para controlar la información necesaria en el proceso productivo, mediante la aplicación de mecanismos de medición y evaluación de las normas de producción. A través de

diversos instrumentos inteligentes que son controlados por la información suministrada por el computador, se regula el funcionamiento de las máquinas u otros elementos que operan el proceso productivo. Es decir, se reduce al mínimo la intervención humana en el proceso industrial.

De esta manera la automatización de sistemas o procesos nos permitirá, el control de las máquinas, mediante un software de ingeniería, gracias a sensores de control que le permiten percibir cambios en sus alrededores de ciertas condiciones tales como temperatura, volumen, color, etc. y actuar dependiendo de su aplicación.

1.1.2 Planteamiento del problema

El laboratorio de Ciencias de la Tierra y Construcción cuenta con la máquina Triaxial Chicago Soiltest de operación manual, lo que ha dificultado el uso apropiado y la obtención de resultados fiables en los ensayos realizados en esta máquina, además algunos sistemas que lo conforman necesitan mejoras o reparaciones.

Con el fin de encontrar soluciones tecnológicas de última generación, brindar a sus estudiantes y a la comunidad politécnica dentro y fuera de la institución laboratorios equipados con tecnología moderna donde se pueda concatenar y complementar la parte teórica con la práctica pero siempre apegada al entorno industrial en el que se van a desenvolver los nuevos profesionales, se ha manifestado la necesidad de automatizar la máquina de ensayo Triaxial Chicago Soiltest.

De esta manera como estudiantes de Ingeniería Mecatrónica se ha analizado y propuesto la adecuación y automatización de dicho equipo diseñando un sistema electrónico-informático.

1.1.3 Justificación del problema

Las tendencias de globalización y segmentación internacional de los mercados son cada vez más acentuadas. Y como estrategia para enfrentar este nuevo escenario, la automatización representa una alternativa que es necesario considerar.

En un proceso industrial existen numerosas razones para automatizar, entre las principales tenemos:

- Reducción de Costos.
- Cantidad y Calidad considerable de las Piezas realizadas.
- Seguridad.
- Administración de almacenamiento

La carrera de Ingeniería Mecatrónica forma profesionales con la visión de brindar un aporte a la industria ecuatoriana poniendo en práctica conocimientos tecnológicos adquiridos es su formación profesional para diseñar y construir maquinaria y equipos automatizados, modernizando y repotenciando equipos obsoletos; todo esto con el fin de aumentar la producción, mejorar la calidad, aumentar la eficiencia, disminuir importaciones, elevar el valor agregado nacional, así como también aportar a la problemática social con soluciones innovadoras por parte de profesionales con una nueva visión del mundo actual.

Existen diferentes alternativas de equipos industriales en el mercado que podrían satisfacer las necesidades y requerimientos para el ensayo de Esfuerzo-Deformación, pero factores como el costo son la motivación para buscar alternativas como la automatización de un equipo ya existente.

Puesto que la máquina Triaxial Chicago Soiltest no ha tenido un uso frecuente, por las limitaciones que tiene, se ha considerado adecuar el equipo, implementar elementos electrónicos y un sistema de adquisición de datos y registro de los mismos, así mejorar su funcionalidad y uso.

Al ser una máquina de funcionamiento totalmente manual el sistema a implementar permitirá tener a los estudiantes de la Carrera, empresas que solicitan dichos ensayos y demás usuarios de la máquina de Ensayos Triaxiales Chicago Soiltest, datos y gráficas precisos en tiempo real, eficiencia al realizar la práctica y resultados confiables e inmediatos.

De esta manera se podrá contar con un equipo moderno, óptimo y que está más apegado al entorno industrial actual.

El proyecto pretende retomar la funcionalidad del Equipo Triaxial con bomba de vacío, cambiando de un funcionamiento manual a uno automático y la adecuación de un sistema informático para la adquisición y registro digital de datos.

Con lo mencionado la institución contará con un moderno y mejor equipo y podrá brindar a sus estudiantes un mejor aprendizaje y un mejor entorno para la realización de dichos ensayos.

1.1.4 Objetivos

1.1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema electrónico-informático para la Máquina de Pruebas Triaxiales Chicago Soiltest para que de manera automática se adquieran y registren los datos de los ensayos realizados, ajustándose a los procedimientos y normas empleados en el Laboratorio de suelos, hormigones y asfalto, del Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción – ESPE.

1.1.4.2 Objetivos específicos

- Aplicar ingeniería inversa en realización de prácticas en la máquina de pruebas Triaxiales Chicago Soiltest, rediseñando y adecuando, los sistemas que lo componen.
- Automatizar el modo de funcionamiento de la máquina, la adquisición y registro de datos, usando un sistema electrónico basado en instrumentación electrónica y tarjeta de adquisición de datos.
- Mejorar la precisión de los datos adquiridos cumpliendo las normas ecuatorianas de la construcción en base a las prácticas para la buena calibración de los sensores utilizados y así lograr una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos.
- Optimizar el tiempo de realización de las prácticas y la obtención de resultados usando un sistema que adquisición de datos en tiempo real.
- Crear un sistema flexible, compatible y adaptable a otras máquinas o aplicaciones.
- Implementar un sistema robusto, fácil, agradable para el usuario y el desarrollo de la práctica.

1.1.5 Metodología

En este punto se describe las metodologías a emplear en el presente proyecto, teniendo como finalidad establecer facilidades de comprensión para realizar ensayos de laboratorio.

1.1.5.1 Método empírico

Posibilita revelar las relaciones esenciales y las características fundamentales del objeto de estudio, accesible a la detección de la percepción, a través de procedimientos prácticos con el objeto y diversos medios de estudio.

Los métodos de investigación empírica conlleva al investigador a una serie de procedimientos prácticos con el objeto y los medios de investigación que permiten revelar las características fundamentales y relaciones esenciales; que son accesible a la contemplación sensorial.

Este método se usará principalmente en la familiarización con el equipo, conocimientos teóricos y ensayos que se realizan.

1.1.5.2 Método científico

Al método científico se lo puede definir como un proceso que da respuesta a las interrogantes, es decir, la secuencia de procedimientos que usa para confirmar como regla o conocimiento lo que en origen es una hipótesis.

Dicho método científico utiliza 5 pasos fundamentales, que se menciona a continuación.

La observación que consiste en la recopilación de hechos acerca de un problema o fenómeno natural que despierta nuestra curiosidad. Las observaciones deben ser lo

más claras y numerosas posibles, porque han de servir como base de partida para la solución.

Mientras que *la hipótesis* es la explicación que nos damos ante el hecho observado. Su utilidad consiste en que proporciona una interpretación de los hechos del que se dispone, interpretación que debe ser puesta por observaciones y experimentos posteriores.

La hipótesis no debe ser tomada nunca como verdadera, ya que en un mismo hecho observado puede explicarse mediante numerosas hipótesis. Es por eso que el objeto de una buena hipótesis consiste en dar una explicación para estimular a hacer más experimentos y observaciones.

También se tiene a *la experimentación* que consiste en la verificación o comprobación de la hipótesis. La experimentación determina la validez de las posibles explicaciones que nos hemos dado y decide el que una hipótesis se acepte o se deseche.

La teoría es una hipótesis en el cual se ha relacionado una gran cantidad de hechos acerca del mismo fenómeno que nos intriga. Es decir, la teoría no es otra cosa más que la hipótesis en donde se consideran mayor número de hechos y en la cual la explicación que nos hemos forjado tiene mayor probabilidad de ser comprobada positivamente.

Finalmente *la ley*, están dentro de un conjunto de hechos derivados de observaciones y experimentos debidamente reunidos, clasificados e interpretados que se consideran demostrados. La ley nos permite predecir el desarrollo y evolución de cualquier fenómeno natural.

1.1.5.3 Metodología de diseño

La metodología a emplear está basada en la ingeniería concurrente, el método más usado en la actualidad para el diseño en ingeniería mecatrónica.

Ingeniería Concurrente: Filosofía de trabajo, basada en sistemas de información y fundamentada en la idea de convergencia, simultaneidad o concurrencia de la información sobre el diseño de un producto.

El proceso de diseño comienza con la identificación de la necesidad, luego entra a la fase de identificación del problema que es más específica y debe incluir todas las especificaciones del objeto a ser diseñado; después sigue el diseño conceptual donde se genera las alternativas de solución y se selecciona la mejor opción para que de esta manera se continúe al diseño preliminar donde se evalúan los resultados, generándose la documentación para el diseño. Y así llegar al diseño de detalle donde se construye y optimiza el sistema o producto.

Mediante la siguiente Figura 1.1 se presenta un esquema de las fases del diseño.

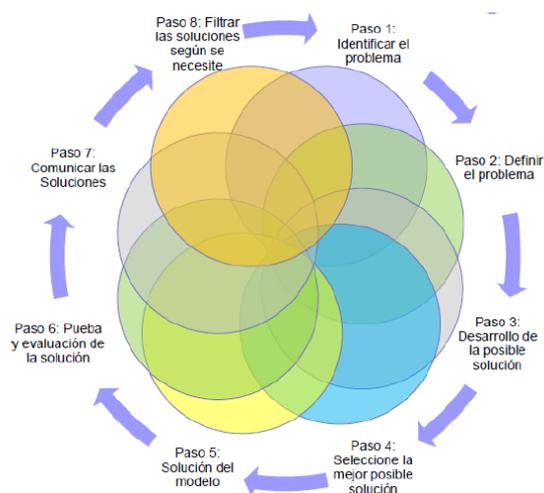


Figura 1 Esquema del diseño concurrente

Fuente: (Singaña, 2014)

CAPÍTULO II

2.1 FUNDAMENTOS

En el presente capítulo se detallan todos los aspectos teóricos necesarios para comprender las actividades realizadas en este proyecto de tesis, en el que se describe conceptos básicos de los ensayos realizados en la máquina, conceptos mecánicos y electrónicos para el desarrollo del proyecto y normas con las que se trabajó.

Mediante la automatización se puede realizar variedad de entornos y/o aplicaciones industriales que tiene como finalidad incrementar la eficiencia de sistemas inteligentes.

Con estas prestaciones y mediante la instrumentación se puede realizar un sistema de adquisición y análisis de datos para el laboratorio de suelos mediante el uso de equipos inteligentes como transductores, módulo de adquisición de datos y plataformas de instrumentación virtual.

2.1.1 Introducción

El avance de la ciencia y la tecnología ha permitido automatizar un sinnúmero de procesos en entornos y/o aplicaciones con el fin de incrementar la eficiencia de dichos procesos o sistemas. Además nos da una alternativa de mejorar un proceso sin la necesidad de comprar una máquina nueva.

Considerando este hecho, la automatización de un proceso mecánico con la ayuda de la instrumentación electrónica ayudaría a mejorar las prestaciones del laboratorio de Ciencias de la Tierra y Construcción; diseñando un sistema de

adquisición y análisis de datos, instalando la instrumentación necesaria y realizando el respectivo registro de datos.

Los sistemas de adquisición de datos basados en el uso del computador se han convertido en una de las alternativas más prometedoras debido a su costo y versatilidad, y aprovechan la capacidad de cálculo, almacenamiento y visualización de un computador para la realización automática de medidas.

2.1.2 Calibración de la instrumentación

La calibración de instrumentos es definida como la relación de los valores y sus incertidumbres de medida que se obtienen de los *patrones de medida*, con una precisión de al menos 4 veces la del instrumento a calibrarse.

El objetivo de la calibración de los equipos es mantener a las mediciones en un rango de incertidumbre aceptable para el tipo de aplicación que se lo use.

Los procedimientos de calibración del instrumento y el desempeño del sistema de medición usado en el presente proyecto de tesis se basan en las exigencias establecidas en la norma ISO 9001 y 17025, donde se establece que para asegurar que un sistema se administre bajo procedimientos de gestión de calidad, debe tener en cuenta relacionados con la calibración

2.1.2.1 Mediciones

La metrología es la ciencia que estudia las mediciones y sus aplicaciones, incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualquiera que sea su campo de aplicación.

La importancia que se le debe dar al momento de calibrar un determinado instrumento o sistema de medida, se procede a describir algunos conceptos relacionados a la calibración dentro de la metrología.

Incertidumbre: es el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando; es decir, es el nivel de error que equivale a un intervalo dentro del cual se encuentra el valor verdadero de la medición.

Error absoluto (e_{abs}): es la diferencia entre el valor medido (v_m) y el valor exacto (v_e), en valor absoluto. Es decir:

Ecuación 1 Error absoluto

$$e_{abs} = |v_m - v_e|$$

Error relativo (e_{rel}): es el valor porcentual del error absoluto (e_{abs}) dividido entre el valor verdadero.

Ecuación 2 Error relativo

$$\%e_{rel} = \frac{e_{abs}}{V_v} \cdot 100$$

Es imposible realizar una medición sin modificar en mayor o menor grado aquello que se mide, siempre va a existir un grado de incertidumbre. Así, se definen entonces:

Veracidad: es el grado de concordancia entre el valor medio obtenido de las repeticiones y el valor verdadero. Se relaciona de forma inversa con el error de medida.

Precisión: es el grado de concordancia entre los resultados repetidos. Los resultados de muchas medidas pueden ser muy similares pero, sin embargo, pueden

ser muy diferentes del valor verdadero se relaciona más bien con la existencia de errores de tipo aleatorio.

Exactitud: es el grado de concordancia entre a la veracidad y el valor medio de las repeticiones, se relaciona con la presencia de errores de tipo sistemático.

2.1.2.2 Calibración

Se considera que un instrumento está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento dados por el fabricante.

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas, BIPM dice que:

La calibración se define como la operación que bajo condiciones especificadas establece que:

En una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas, obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas.

En una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación. Una calibración puede expresarse mediante: una declaración, una función, un diagrama, una curva o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

En sistemas con curvas de calibración lineales, las diferencias se suelen centrar en dos aspectos: el nivel (offset) y la sensibilidad. Estas diferencias conducen a errores

sistemáticos que pueden ser minimizados siempre que exista posibilidad de calibrar el equipo.

Los métodos de calibración dependen del tipo de instrumento y su aplicación, en el presente proyecto se presentará la calibración correspondiente al equipo adquirido.

2.1.2.3 Norma ISO 9000

ISO 9000 es un conjunto de normas sobre calidad y gestión de calidad, establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Estas normas de pueden aplicar en cualquier tipo de organización o actividad orientada a la producción de bienes o servicios. El ISO 9000 especifica la manera en que una organización opera sus estándares de calidad, tiempos de entrega y niveles de servicio.

Nuestro país, como miembro, ha adoptado estas normas de la organización con la denominación NTE INEN – ISO 9000, en lo que respecta a la gestión de calidad. Algunas exigencias para un proceso de calibración según la norma [C. Liu y J. B. Evett, Soil properties: testing, measurement, and evaluation, Cuarta ed., New Jersey: Prentice Hall, 2000.]:

- **Calibrarse o verificarse**, o ambos, a intervalos especificados o antes de su utilización, comparando con patrones de medición internacionales o nacionales, cuando no existan tales patrones debe registrarse la base utilizada para la calibración o la verificación;
- **Ajustarse o reajustarse**, cuando sea necesario;
- **Estar identificado**, para poder determinar su estado de calibración;

- **Protegerse contra ajustes** que pudieran invalidar el resultado de la medición;
- **Protegerse contra los daños** y el deterioro durante la manipulación, el mantenimiento y el almacenamiento.

2.1.2.4 Normas: ensayos triaxiales.

2.1.2.4.1 Ensayo triaxial

La investigación experimental utilizada para determinar la relación tensión-deformación se realiza normalmente mediante un ensayo de compresión triaxial. Durante el ensayo, las muestras de suelo no perturbadas se someten gradualmente a tensiones hasta que se fracturan, lo que corresponde a la resistencia máxima al corte.

El ensayo se realiza colocando una muestra de suelo cilíndrica, encerrada en una membrana de goma, en una célula triaxial y sometiéndola a presión mediante un fluido isotrópico.

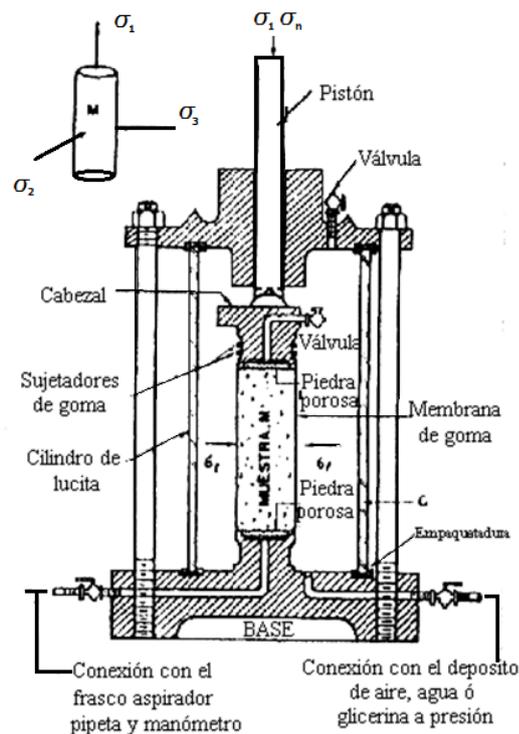


Figura 2 Sección típica equipo triaxial

Fuente: (Valle Rodas R., 1982)

En términos generales, los ensayos triaxiales se ejecutan para simular los diferentes tipos de tensiones y condiciones de drenaje que pueden producirse en el subsuelo por efecto de la construcción de edificios, túneles, excavaciones, etc.

El ensayo triaxial UU (no consolidado no drenado) tiene como objetivo determinar la resistencia al corte de especímenes cilíndricos en suelos cohesivos en condiciones inalteradas, remoldeadas o compactadas, utilizando la aplicación de deformaciones controladas o esfuerzos controlados de la carga de compresión axial, donde el espécimen está sujeto a la presión de confinamiento de un fluido dentro de una cámara Triaxial. Este ensayo proporciona datos para la determinación de las propiedades de resistencia y las relaciones esfuerzo-deformación de los suelos ensayados.

Al ensayo UU se lo denomina también ensayo rápido (Q) donde no se permite en ningún momento el drenaje. La probeta no es consolidada, por lo tanto no se disipa la presión de poros durante la aplicación de la presión isotrópica de cámara s_3 en la etapa de saturación.

Se debe determinar los esfuerzos principales menor y mayor con el fin de generar el diagrama de corte (la envolvente o círculo de Mohr), del cual se pueden obtener valores de los parámetros de resistencia al corte (parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna). Obteniendo la tensión principal mayor en la falla o valor máximo del esfuerzo vertical, σ_1 :

Ecuación 3 Esfuerzo vertical

$$\sigma_1 = \Delta p - \sigma_3$$

Dónde: σ_3 = Esfuerzo principal menor, y es igual a la presión de la cámara (Presión ejercida lateralmente sobre la muestra).

Δp = Carga unitaria axial en la falla. (Denominado también Esfuerzo desviador máximo, σ)

Después de haber determinado para cada muestra, las tensiones principales menores, mayores y cargas unitarias axiales en la falla, se puede trazar el diagrama de fuerza cortante requerida, trazando los esfuerzos cortantes a lo largo de la ordenada y las tensiones normales en la abscisa.

Del diagrama obtenido, un punto situado a lo largo de la abscisa a una distancia σ_3 desde el origen. Este punto se denota por A en la Figura 2.2. Y está indicado a lo largo de la abscisa, a una distancia $(\sigma_3)_1$ desde el origen. Es necesario localizar otro

punto a lo largo de la abscisa a una distancia σ_1 desde el origen, ya sea mediante la medición de la distancia σ_1 desde el origen, o la distancia Δp desde el punto A (El punto situado a una distancia σ_3 desde el origen). Este punto se denota por B en la Figura 2.2, se caracteriza por estar situado a lo largo del eje de las abscisas a una distancia $(\Delta p)_1$ desde el punto A. Con el segmento AB como diámetro y el semicírculo, se construye la envolvente o círculo de Mohr.

Este procedimiento se repite en cada uno de los especímenes a ensayar utilizando una presión lateral diferente (σ_3). De tal manera, el punto C se encuentra a lo largo del eje de abscisas a una distancia $(\sigma_3)_2$ desde el origen y el punto D, a una distancia $(\Delta p)_2$, desde el punto C. Con CD como diámetro, se construye otro semicírculo. Una vez obtenidos los tres semicírculos, el siguiente paso es dibujar una recta tangente a los tres semicírculos, como se muestra en la Figura 2.2. El ángulo entre esta línea recta y una línea horizontal (Φ en la figura) da el ángulo de fricción interna, y el valor de la tensión donde la línea recta interseca el eje de las ordenadas (distancia c en la figura) es la cohesión. Se debe usar la misma escala en los ejes de las abscisas y las ordenadas.

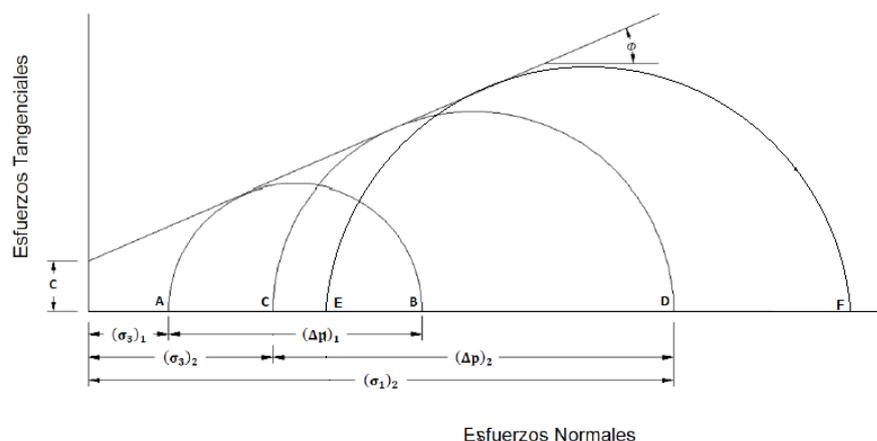


Figura 3 Envolvente de Mohr.

2.1.2.4.2 Normas de los ensayos triaxiales

En el presente proyecto de tesis se realiza el sistema de adquisición de datos para el ensayo de compresión Triaxial UU.

El procedimiento y las metodologías tomadas en cuenta para el proyecto están basados en las normas ASTM que rigen dichos ensayos, las cuales son:

- Norma ASTM D2850
- Norma AASHITO T234

En la siguiente tabla se detalla algunas de las características más importantes que los componentes deben cumplir en la realización del ensayo Triaxial según la norma ASTM.

Tabla 1

Características de elementos en ensayo triaxial según norma ASTM.

INSTRUMENTO	CARACTERÍSTICA	OBSERVACIONES
Deformímetro	Precisión de 0,0254 mm	Recorrido mínimo del 20% de la altura de la muestra.
Carga	Precisión de 0,0107 Kg/cm ² (1KPa)	Para falla de menos de 1,07 Kg/cm ² (100KPa)
	Precisión del 1% de la carga axial en la falla	Para falla de 1,07 Kg/cm ² o más
Presión	± 0,0107 Kg/cm ² (1KPa)	Precisiones de celda <2,15 Kg/cm ² (200KPa)
	Precisión de ±1% de la falla	Precisiones de celda >2,15 Kg/cm ² (200KPa)

2.1.3 Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso que consiste en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o un controlador programable.

Se requirió una etapa de acondicionamiento de señal, que adecue esta señal de voltaje o corriente a niveles compatibles con el elemento que convierte a señal digital; donde éste elemento es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).



Figura 4 Esquema de DAQ [NI]

Fuente: (National Instruments, 2011)

Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC's estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

Dentro de los conceptos básicos de los elementos que componen un sistema de adquisición de datos tenemos:

2.1.3.1 Sensor

Un sensor o llamado también transductor, convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ.

Tabla 2
Sensores Comunes

SENSOR	FENOMENO FISICO
Termocupla, Termistor	RTD, Temperatura
Fotosensor	Luz
Micrófono	Sonido
Acelerómetro	Aceleración
Galgas extensiométricas, transductores pizeoeléctricos	Fuerza y Presión
Electrodo pH	pH
Potenciómetro, LVDT, Codificador Óptico	Posición y Desplazamiento

Los transductores digitales ofrecen varias ventajas como:

- Alta Precisión
- Alta resolución
- Larga vida

- Insensible a interferencias
- Resistencia a ambientes difíciles
- Robusto
- Amplio rango de funcionamiento
- Velocidad de respuesta instantánea
- Fácil instalación y calibración
- Alta fiabilidad

2.1.3.2 DAQ

El hardware DAQ es la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Este dispositivo digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los componentes de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

Acondicionamiento de Señales

El circuito de acondicionamiento de señales manipula la señal producida de tal forma que sea apropiada para entrada a un convertidor analógico/digital ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento.

Existen algunos dispositivos DAQ integrados que incluyen acondicionamiento de señales diseñados para medir tipos de sensores específicos.

Convertidor Analógico Digital (ADC)

En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza "muestras" periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras

son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software. Por tanto, un ADC es un dispositivo que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo.

Bus de la PC

El bus de la PC permite la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los dispositivos DAQ ofrecen buses de PC más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet. Recientemente, los dispositivos DAQ han llegado a estar disponibles para 802.11 Wi-Fi para comunicación inalámbrica.

2.1.3.3 PC y software

Una PC con software programable es la encargada de controlar la operación del dispositivo DAQ y es usada para procesar, visualizar y almacenar datos adquiridos. Una PC de escritorio se puede utilizar para el procesamiento por su robustez.

Software Controlador

El software controlador de acuerdo al software de aplicación ofrece la habilidad de interactuar con un dispositivo DAQ, facilitando la comunicación de comandos de hardware de bajo nivel y programación a nivel de registro.

Software de Aplicación

El software de aplicación permite la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. Este puede ser una aplicación pre-construida con funcionalidad predefinida o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada que en general son usadas para

automatizar múltiples funciones de un dispositivo DAQ, realizar algoritmos de procesamiento de señales y mostrar interfaces de usuario personalizadas como es el caso de LabVIEW de NI (National Instruments).

En el mercado existe varias alternativas para la tarea de adquisición de datos, una amplia gama de plataformas (tecnologías software y hardware), con las que podemos desarrollar e integrar sistemas que satisfagan las necesidades de adquisición, registro y visualización de las variables dentro de un proceso determinado.

Una de las soluciones más confiables y rentables es la que ofrece NI con sus módulos de acondicionamiento de señales, software de programación y visualización; y la empresa Omega, que ofrece amplia gama en transductores.

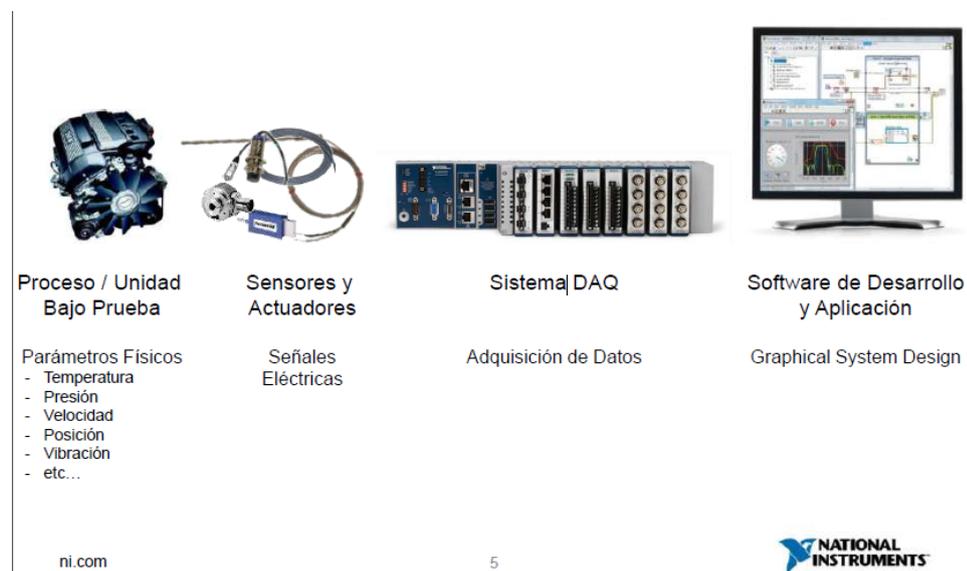


Figura 5 Esquema general de Adquisición de datos NI.

Fuente: (National Instruments, 2011)

Sistemas NI CompactDAQ

NI CompactDAQ es una plataforma de adquisición de datos robusta y portátil que integra conectividad y acondicionamiento de señales en E/S modular para conectar directamente a cualquier sensor o señal que cumple con las necesidades. El software NI LabVIEW permite personalizar la adquisición, analizar, presentar y administrar datos de medidas, además ofrece software programable y medidas de alta precisión.

CAPÍTULO III

3.1 ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA

En este capítulo se hará una breve descripción técnica de la máquina Triaxial Chicago Soiltest en su estado original, es decir, en modo de operación manual donde se describirá los sistemas que lo componen y se finalizará con una evaluación y se establecerán algunas especificaciones técnicas de diseño del sistema electrónico-informático a implementarse.

3.1.1 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico consta de los siguientes equipos:

- Un motor eléctrico AC, 1 ½ HP, 220V, accionado por un interruptor de dos posiciones, control de velocidad manual.

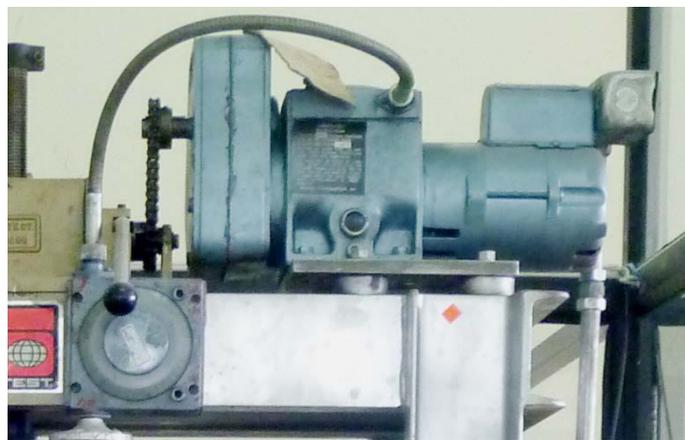


Figura 6 Motor eléctrico de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

Representa la potencia de la máquina y su función es de transmisión de movimiento vertical que representa el esfuerzo axial hacia la muestra de suelo dentro de la cámara triaxial.

- Un compresor eléctrico AC, 1/2HP, 115V, 9A, 1725 rpm, accionamiento manual.



Figura 7 Compresor de aire de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

El compresor permite ingresar aire a presión a un tanque de almacenamiento de agua y de esta manera ejercer presión de agua negativa y deformación sobre las muestras de suelo utilizadas, dicho funcionamiento tiene como finalidad realizar el ensayo de compresión Triaxial no consolidada no drenada (UU).

3.1.2 Sistema mecánico

El sistema mecánico consta de:

- Una estructura metálica de 2,5m x 1,50m x 0,50m de volumen total.



Figura 8 Estructura metálica de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

Sirve de soporte de todos los elementos necesarios para el ensayo Triaxial, diseñado para realizar muestra de suelos cilíndricos de un máximo de alto de 20 cm por 10 cm de diámetro.

- Una transmisión mecánica, de cadena, engranes y tornillo sin fin.

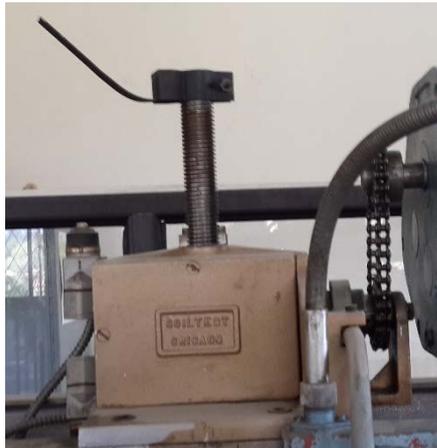


Figura 9 Transmisión mecánica de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

La energía eléctrica del motor se convierte en energía mecánica mediante ésta transmisión, el movimiento del eje se da mediante una cadena y mediante un conjunto de engranes que es llevada al tornillo sin fin obteniendo un desplazamiento vertical que depende de la velocidad giro del motor especificada y de la norma de ensayos triaxiales en suelos.

- En la transmisión de la carga se incluye instrumentación tal como una celda de carga y un deformímetro analógico de tipo mecánico.



Figura 10 Instrumentación de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

La instrumentación en esta sección de la máquina es necesaria para la toma de datos manual. El anillo de carga permite conocer el valor de esfuerzo axial aplicado a la muestra de suelo y el deformímetro nos da los valores de deformación vertical de la probeta. Ambos sensores son analógicos.

3.1.3 Sistema hidráulico y neumático

Posee un sistema neumático-hidráulico que consta de:

- Una red de tuberías de cobre de 0.5mm y 0.9mm.



Figura 11 Red de tuberías de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

Las tuberías sirven para la circulación de aire o agua, dependiendo del ensayo a realizar estas conducirán el fluido.

- Un conjunto de 15 válvulas tipo mariposa.



Figura 12 Válvulas tipo mariposa de la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

Usadas para el control manual de apertura o cierre de agua o aire para ensayo de suelos.

- Dos manómetros analógicos.



Figura 13 Manómetro instalado en la máquina Triaxial Chicago Soiltest.

Se incluye la instrumentación para medición de presión del aire y agua instalada en los puntos donde se desea conocer el valor de la presión.

3.1.4 Sistema electrónico

El sistema no contaba con ningún dispositivo o equipo electrónico ya que su funcionamiento era totalmente manual y es por esto que se ve la necesidad de instalación de instrumentación para un mejor funcionamiento y desempeño.

3.1.5 Diagnóstico del equipo

Luego de un seguimiento y estudio de la operación de la máquina Triaxial Chicago Soiltest, se analizó el funcionamiento de varios componentes, encontrando fallas y claramente un problema en la manera de adquirir datos.

Primero se evaluó el sistema eléctrico donde se presentaron inconvenientes en el funcionamiento del motor y conexiones sueltas debido a que había dejado de ser operada por un corto periodo.

El compresor no presentaba problemas en su funcionamiento pero sí daños y escape de aire en la manguera de presión de aire.

Aquí se considera que para el motor entre en operación es necesario dar un rebobinado y revisión de conexiones de las tres fases debido a que se trata de un motor trifásico de inducción jaula de ardilla.

También el levantamiento de un plano eléctrico para que el usuario tenga en consideración tensiones con las que se trabaja y el diagrama de conexiones.

El sistema mecánico básicamente presenta problemas de falta de mantenimiento y lubricación de la transmisión mecánica.

En la parte de instrumentación se considera cambiar el anillo de carga por un transductor celda de carga y el remplazo del deformímetro análogo por un transductor LVDT para medir la deformación y así obtener datos de manera digital.

Se cree necesario realizar también planos mecánicos y de todos los componentes para que consten en el manual de la máquina en caso de necesitar repuestos de algún elemento. Además se tendrá que diseñar acoples para la instalación de los transductores a ser instalados.

En el sistema hidráulico-neumático después de darle un mantenimiento a todo el sistema de tuberías se observaron problemas, las cuales estaban en mal estado en ciertos tramos, se presentaba escape de agua o aire o taponamientos debido a la tierra que a veces penetra a las tuberías debido al rompimiento de la membrana en las muestras de suelo.

Las válvulas tipo mariposa también presentaban fugas y taponamientos.

Los manómetros presentaban desajuste y descalibración, de esta manera las medidas también se veían alteradas.

En este sistema se prevé el remplazo de tuberías en ciertos tramos, mantenimiento y ajuste de las válvulas y remplazo de los manómetros, para la medición de presión de poros el reemplazo por un transductor de presión ya que es una medida variable que requiere ser adquirida en forma digital.

Se ha determinado los planos de toda la red de tuberías hidráulicas y neumáticas para que el usuario pueda saber dónde se encuentra el fluido y mediante el diagrama se pueda abrir y cerrar válvulas correctamente.

De esta manera, se realizó un ensayo de suelo para probar el funcionamiento y presentamos los resultados obtenidos en el ensayo triaxial UU, no consolidado-no drenado, donde podemos observar muchas fallas en los datos obtenidos. Los datos adquiridos de manera manual se muestran a continuación:

Tabla 3

Datos procesados del ensayo UU

Deformación de la muestra (mm)	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (%)	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (%)	Esfuerzo unitario (kg/cm ²)	Deformación unitaria (%)
0,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,02	0,087	0,000	0,029	0,000	0,030	0,000
0,03	0,175	0,000	0,029	0,000	0,030	0,000
0,04	0,204	0,000	0,058	0,000	0,030	0,000
0,05	0,262	0,000	0,072	0,000	0,030	0,000
0,06	0,291	0,000	0,116	0,000	0,045	0,000
0,07	0,349	0,000	0,173	0,000	0,091	0,000
0,08	0,378	0,001	0,231	0,001	0,121	0,001
0,09	0,407	0,001	0,260	0,001	0,166	0,001
0,10	0,436	0,001	0,318	0,001	0,212	0,001
0,12	0,465	0,001	0,347	0,001	0,242	0,001
0,14	0,524	0,001	0,433	0,001	0,302	0,001

Continúa 

0,16	0,582	0,001	0,505	0,001	0,378	0,001
0,18	0,611	0,001	0,563	0,001	0,453	0,001
0,20	0,669	0,001	0,635	0,001	0,514	0,001
0,25	0,713	0,002	0,693	0,002	0,604	0,002
0,30	0,814	0,002	0,837	0,002	0,801	0,002
0,35	0,902	0,002	0,982	0,002	0,967	0,002
0,40	0,989	0,003	1,097	0,003	1,088	0,003
0,45	1,076	0,003	1,213	0,003	1,224	0,003
0,50	1,134	0,003	1,299	0,004	1,345	0,003
0,55	1,192	0,004	1,386	0,004	1,420	0,004
0,60	1,236	0,004	1,443	0,004	1,526	0,004
0,65	1,250	0,004	1,487	0,005	1,601	0,005
0,70	1,265	0,005	1,530	0,005	1,662	0,005
0,75	1,279	0,005	1,573	0,005	1,722	0,005
0,80	1,308	0,005	1,616	0,006	1,782	0,006
0,85	1,308	0,006	1,645	0,006	1,843	0,006
0,90	1,352	0,006	1,674	0,006	1,873	0,006
0,95	1,395	0,007	1,688	0,007	1,918	0,007
1,00	1,424	0,007	1,702	0,007	1,963	0,007

Gráfica Esfuerzo-Deformación:

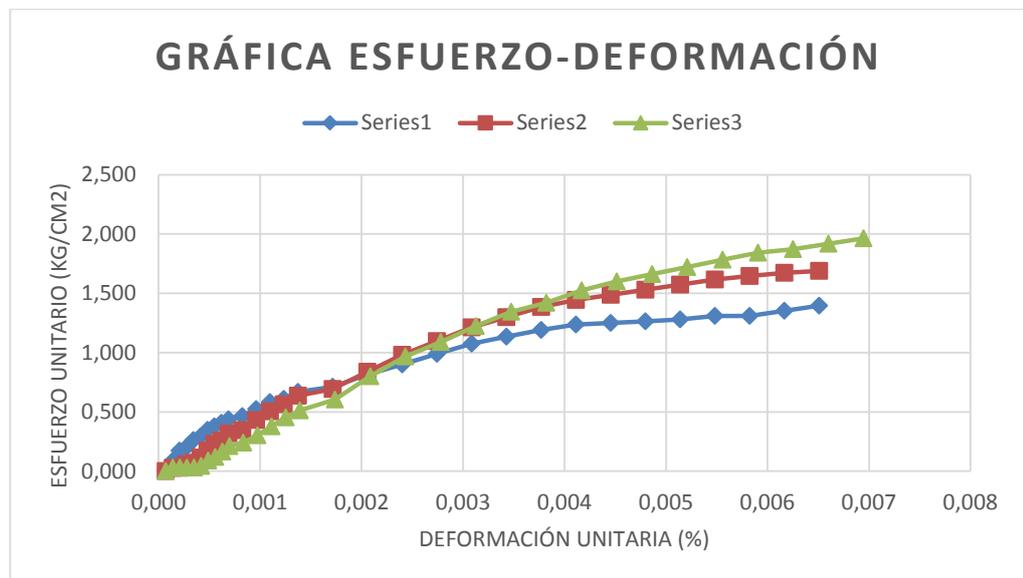


Figura 14 Gráfica Esfuerzo-Deformación del ensayo UU.

Círculos de Mohr:

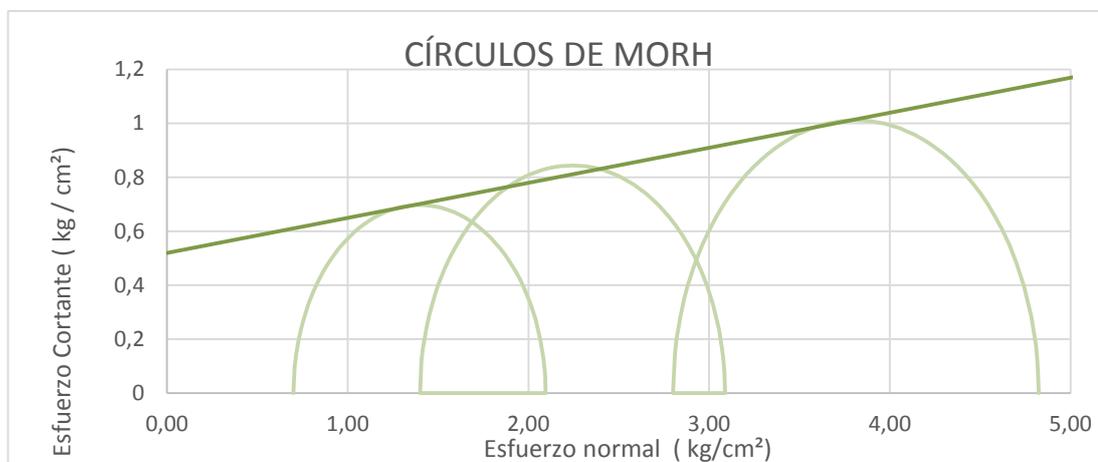


Figura 15 Gráfica Envolvente de Mohr del ensayo UU.

Por medio de los resultados obtenidos se pudo verificar la imprecisión en la toma de datos, la limitación que ésta tiene al tomar los datos manualmente, lo que hace que la curva no se reconstruya totalmente bien, debido a la falta de datos. Con la instrumentación electrónica no solo se tiene mayor precisión y eficiencia, también la toma de datos permite una mejor reconstrucción de la curva. De esta manera, se cumplirá con la precisión de 0.01% [NORMA ASTM D2850] que data en las normas que rigen los ensayos triaxiales ASTM en muestras de suelos.

CAPITULO IV

4.1 DISEÑO DEL SISTEMA

Este capítulo describe detalladamente el proceso de diseño, selección de dispositivos y la implementación del diseño propuesto para la construcción del sistema electrónico-informático para la máquina triaxial.

4.1.1 Descripción del modelo de diseño

Según el diseño seleccionado se tiene el siguiente modelo, dividido en: sistema mecánico, sistema eléctrico-electrónico, sistema neumático-hidráulico y sistema de control.

4.1.1.1 Sistema mecánico

La parte mecánica del modelo consta del diseño de los soportes para la instalación de los transductores en la máquina triaxial, diseño del acople para la celda de carga al tornillo sin fin y la optimización de la transmisión mecánica del motor cadena-tornillo sin fin. Ver ANEXO A de planos que incluye plano general mecánico. También se consideró mediante el análisis presentado anteriormente, del estado en el que se encontraba el equipo, los daños y se hicieron las reparaciones, reemplazo o mantenimiento respectivo según el caso.

Tabla 4

Elementos de Diseño del Sistema Mecánico

N°	Elemento	Tarea Realizada	Material	Función
1	Acople deformímetro	Diseño y construcción	Acero de transmisión	Acoples para soporte del transductor de deformación sobre la estructura de transmisión de movimiento vertical para medir la deformación de la muestra. El material de acero es para evitar corrosión.

Continúa 

N°	Elemento	Tarea Realizada	Material	Función
2	Acople celda de carga	Diseño y construcción	Acero de transmisión	Acople entre la celda de carga (en lugar del anillo de carga que se empleaba anteriormente) y el tornillo sin fin (transmisor del desplazamiento vertical) sobre el vástago que transmite la carga a la muestra. El material de acero es para evitar corrosión.
3	Transmisión mecánica	Reparación y Mantenimiento	-	Transmisión mecánica del movimiento rotacional del motor eléctrico a desplazamiento vertical por medio del anillo.
4	Panel eléctrico	Adquirido	Metal	Panel donde se instalará todo el circuito eléctrico y electrónico de adquisición.
5	Abrazaderas	Adquirido	Plástico	Para agrupar y ordenar cables dentro del panel eléctrico.
6	Puntas de transductores	Diseño y construcción	Acero Inoxidable	Puntas redondas para transductores

4.1.1.2 Sistema hidráulico-neumático

En el sistema Hidráulico-Neumático no se realizó ningún rediseño del circuito de tuberías, sin embargo, se hicieron reemplazos en algunos tramos y el mantenimiento general de válvulas y el circuito además de algunas reparaciones.

Tabla 5

Elementos de Diseño del Sistema Hidráulico-Neumático

N°	Elemento	Tarea Realizada	Material	Función
1	Válvulas tipo Mariposa	Mantenimiento	Acero Inoxidable	Válvulas de accionamiento On/Off para cierre o apertura de circulación de fluido en esa línea.
2	Tuberías	Reemplazo y mantenimiento	Cobre/ Plástico	Circulación de fluidos neumático o hidráulico en todo el sistema.
3	Manguera de presión	Reparación	Plástico reforzado con malla de metal	Para circulación del aire a presión proveniente del compresor.

4.1.1.3 Sistema electrónico – eléctrico

El sistema electrónico y eléctrico es fundamental en el presente proyecto, según el modelo que se propuso se reemplazará sensores analógicos de baja precisión por

transductores electrónicos con varias prestaciones. También se implementará una estructura de adquisición de datos, acondicionamiento de señales y la visualización de datos adquiridos. ANEXO B

Tabla 6

Elementos de Diseño del Sistema Electrónico – Eléctrico

N°	Elemento	Tarea Realizada	Material	Función
1	Transductor de deformación	Adquirido	Acero Inoxidable	Medición de la deformación de la muestra de suelo.
2	Transductor celda de carga	Adquirido	Acero Inoxidable	Medición de la carga sobre la muestra de suelo.
3	Transductor de presión	Adquirido	Acero Inoxidable	Medición de la presión dentro de la cámara de presión.
4	Tarjeta DAQ NI	Adquirido	Varios	Acondicionamiento y adquisición de señales provenientes de los transductores a valores de voltaje estándar.
5	Conectores DIN	Adquirido	Metal recubierto con plástico	Conector del transductor al panel eléctrico.
7	Fuente 12V	Diseño y construcción	Varios	Alimentación de transductores y demás dispositivos.
8	Cable	Adquirido	Cobre/Aislante	Para conexiones en el panel eléctrico.
9	Dispositivos electrónicos	Adquirido	Varios	Para circuitos de acondicionamiento necesarios.
10	Motor Eléctrico	Reparación, rebobinado		Generador de movimiento en la máquina triaxial.

4.1.1.4 Sistema de control

Según el modelo de diseño el sistema de adquisición de datos estará controlado por el software Labview de National Instruments debido a la tarjeta DAQ que se empleará.

Tabla 7

Elementos de Diseño del Sistema de Control

Elemento	Tarea Realizada	Función
----------	-----------------	---------

1	Labview NI	Programación	Software de control para el sistema de adquisición
2	Microsoft Office Excel	Programación	Software de control de almacenamiento de datos

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

4.2.1 Construcción de partes mecánicas

Según las necesidades del sistema se diseñó y construyó las partes mecánicas especificadas en el punto anterior.

Para diseñar los acoples necesarios en cada uno de los transductores, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- El requerimiento principal en este sistema mecánico era el material de construcción, en el cual se seleccionó acero inoxidable por sus propiedades anticorrosivas.
- Reconocimiento del área de trabajo de cada uno de los transductores
- Analizar el rango y ubicación de trabajo de cada uno de los transductores para determinar los acondicionamientos o acoples necesarios para el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.
- Optar por la mejor solución para diseñar cada uno de los acoples correspondientes en los sensores.

Una vez hechos los acoples, se procedió a unirlos a cada uno de los sensores y realizar pruebas en la cámara triaxial, para observar el correcto funcionamiento de los transductores con los acoples.

Acople deformímetro, acople celda de carga, puntas redondas para transductores, fueron construidas de acuerdo a los planos especificados. ANEXO A

4.2.2 Selección de tarjeta de adquisición de datos

Como se había propuesto en el diseño, el sistema de adquisición de datos estará compuesto principalmente por una tarjeta CompactDAQ NI.

CompactDAQ es una plataforma DAQ robusta y portátil que integra conectividad y acondicionamiento de señales de E/S modulares para conectar directamente a cualquier sensor o señal. La variedad de opciones para bus, chasis y acondicionamiento de E/S combinada con la naturaleza adaptable del software LabVIEW, logran la mejor solución para cumplir con las necesidades de la aplicación con una cantidad medida de canales.

Las principales ventajas de integrar este dispositivo CompactDAQ, son las siguientes:

- E/S de Alto Rendimiento.
- Acondicionamiento de señales integrado, amplificación, filtros, excitación y aislamiento para medidas precisas de sensores.
- Conexión directa a acelerómetros, termopares, galgas extensiométricas, codificadores de cuadratura y más.
- Transmisión de datos en el mismo bus con NI Signal Streaming y formato binario de Transferencia y Administración Técnica de Datos (TDMS).
- Control de E/S analógica, E/S digital y E/S de contador en un solo sistema modular.
- Adquisición y registro medidas más rápido con la ayuda de DAQ Assistant.
- Automatización de medidas, análisis datos en paralelo con adquisición y creación de reportes personalizados con el software NI LabVIEW.

4.2.2.1 Selección del módulo ni CompactDAQ

Los módulos NI ofrecen medidas de alta precisión para aplicaciones avanzadas de adquisición de datos. Cada módulo contiene acondicionamiento de señales específico para medidas para conectar a un arreglo de sensores y señales, opciones de aislamiento entre bancos y entre canales y soporte para amplios rangos de temperatura y cumplir con una variedad de necesidades de aplicación y ambientales, todo en un solo paquete robusto.

Para la selección se tomó en cuenta los siguientes requisitos:

- Construcción robusta
- Resolución no menor a 16bits.
- Resistente al impacto y vibraciones.
- Soporte integrado para cuarto de puente, medio puente y puente completo
- Excitación por voltaje y corriente.
- Medidas de termopares, RTD, resistencia, voltaje y corriente. (Módulo Universal)
- Número de canales diferenciales no menor a 3
- Acondicionamiento de señales

4.2.2.2 Selección del chasis ni CompactDAQ

El chasis NI CompactDAQ controla la temporización, la sincronización y la transferencia de datos entre ocho módulos de E/S de la Serie C una PC externa o integrada. Un solo chasis NI CompactDAQ puede administrar múltiples motores de temporización para ejecutar hasta siete diferentes tareas de E/S temporizadas por hardware a distintas velocidades de muestreo en el mismo sistema.

Para la selección se tomó en cuenta los siguientes requisitos:

- Construcción robusta
- Interfaz USB 2.0
- Resolución no menor a 16bits.
- Tipo de medida: voltaje, corriente y resistencia.
- Resistente al impacto y vibraciones.
- Escritura de datos bidireccional de alta velocidad hacia y desde el sistema NI CompactDAQ.

Se seleccionó el módulo universal con chasis de una ranura, que cumple los requerimientos antes mencionados, el modelo es Módulo NI 9219 con Chasis NI CompactDAQ de 1 Ranura.

El NI 9219 es un módulo universal de la Serie C de 4 canales diseñado para pruebas de usos múltiples en cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO. Con el NI 9219 se puede medir varias señales desde sensores como galgas extensiométricas, detectores de resistencia de temperatura (RTDs), termopares, celdas de carga y otros sensores. Los canales son seleccionados individualmente, así se puede realizar un tipo de medida diferente en cada uno de los cuatro canales. Los rangos de medida difieren para cada tipo de medida e incluyen hasta ± 60 V para voltaje y ± 25 mA para corriente.

Debido al diseño del controlador, el NI 9219 no limita la velocidad total de un sistema NI CompactDAQ cuando se usa con módulos de muestreo más rápidos.

Con aislamiento entre canales de 250 Vrms, el NI 9219 protege no solo los módulos alrededor, chasis y sistemas de cómputo conectados sino también los otros

canales en el mismo módulo. Además para aumentar la seguridad, el aislamiento entre canales elimina los problemas asociados con lazos a tierra.

El NI 9219 usa conectores de terminal de resorte de 6 posiciones en cada canal para conectividad directa de la señal.



Figura 16 Módulo NI 9219 con Chasis NI CompactDAQ

Fuente: (National Instruments, 2011)

4.2.3 Selección de transductores digitales

Para garantizar el correcto desenvolvimiento de los ensayos triaxiales de suelos, están considerados todos los parámetros que debe tener cada uno de los sensores y transductores, y de esta manera mantener un óptimo aprovechamiento de los recursos concernientes a la operación adecuada de este tipo de ensayos. Con un nivel de calidad que garantiza a los profesionales involucrados en el análisis de suelos, operaciones seguras de la máquina.

Con la ayuda de la automatización de procesos, se consigue un sistema de adquisición de datos precisos y rápidos en tiempo de ejecución.

La instrumentación utilizada se la ha clasificado de acuerdo a la variable a ser medida del sistema que forma parte.

Los transductores digitales son dispositivos que transforman un tipo de variable física en señales digitales que representan el valor de la variable medida. Los transductores digitales ofrecen varias ventajas como:

- Alta Precisión
- Alta resolución
- Larga vida
- Insensible a interferencias
- Resistencia a ambientes difíciles
- Robusto
- Amplio rango de funcionamiento
- Velocidad de respuesta instantánea
- Fácil instalación y calibración
- Alta fiabilidad

Para el diseño del sistema electrónico de instrumentación, se analizaron los transductores a utilizar en el sistema que replazarían a los sensores analógicos que utilizaba anteriormente la máquina triaxial, estos corresponde a: un transductor de deformación, transductor celda de carga y transductor de presión. El análisis mencionado se presenta a continuación.

4.2.3.1 Selección de transductores de deformación

Se seleccionó un transductor de deformación tipo LVDT ya que son ideales para este tipo de aplicaciones donde se trabaja con pequeños rangos de deformación y se requiere mucha precisión.

Los transductores de deformación tipo LVDT (Transductor diferencia de variación lineal) es un transformador de tensión proporcional al desplazamiento de un núcleo ferromagnético (núcleo móvil separado). Este tipo de transductor consiste en un bobinado primario alimentado por una señal alterna y dos bobinados secundarios.

El núcleo es de aleación de hierro y níquel y está laminado longitudinalmente para reducir las corrientes Foucault (corrientes parásitas). El vástago no debe ser magnético y todo el conjunto debe aislarse magnéticamente para hacerlo inmune a campos externos.

Cuando el núcleo se desplaza al interior de estas bobinas genera voltajes inductivos (V_1) y (V_2) en cada bobina secundaria, proporcionales a su desplazamiento.

Los dos bobinados secundarios están conectados en serie y en fases opuestas, de modo que la señal de salida es la diferencia de estos dos voltajes. A medida que el núcleo se desplaza hasta las extremidades del captador la diferencia aumenta más. La señal de salida se rectifica con el fin de obtener una tensión continua, representativa de la posición del núcleo.

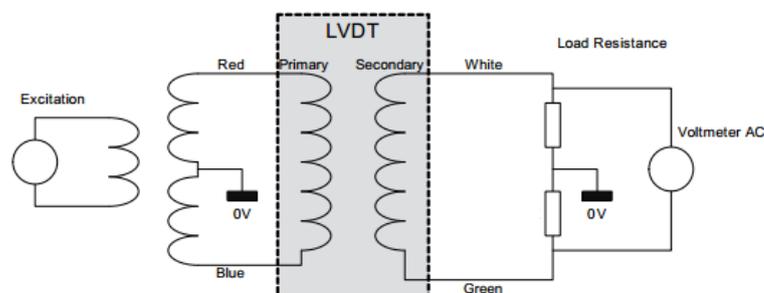


Figura 17 Principio de Funcionamiento de transductores tipo LVDT

Fuente: (Omega, 2013)

Se tomaron en cuenta ciertos requisitos para la selección del transductor de deformación tipo LVDT, los cuales son:

- Precisión de 0,0254 mm debido a que según la norma para realizar ensayos triaxiales se debe trabajar con
- Material de construcción de acero inoxidable para evitar corrosión
- Tipo de señal por voltaje con salida de 0 a 10VCC
- Longitud de recorrido de mínimo 20mm
- Linealidad menor a 0.25%
- Compatibilidad con la tarjeta de adquisición DAQ NI
- Fuente de alimentación 12V (común para la alimentación de todos los transductores).

Los transductores LVDT de la marca Omega serie LD621, ofrecen una amplia gama de características que se ajustan a las requeridas. Estos transductores ofrecen alta precisión y fiabilidad, en especial en condiciones corrosivas y de humedad. Ideales para aplicaciones en medición de deformación en Ingeniería Civil. Con salida de corriente continua este transductor es fiable aún en condiciones corrosivas y humedad.

Según lo requerido se escogió el transductor de deformación Omega LVDT LD621-30.

Algunas características de éste transductor son:

- Modelo: LVDT LD-621-30 (30 mm)
- Tensión de excitación: De 10 a 30 Vdc
- Salida de voltaje: 0 a 10 Vdc

- Linealidad: <0.2% escala completa (FS)
- Ancho de banda: 500 Hz (-3dB)
- Material de la carcasa: Acero inoxidable 300
- Cable: PFA, 2 m de largo (4 hilos)
- Material del núcleo: Níquel-Hierro



Figura 18 Omega LVDT LD621-30

Fuente: (Omega, 2013)

4.2.3.2 Selección de transductor celda de carga

El transductor celda de carga seleccionada es tipo S que puede ser operada en compresión o tensión ideal para esta aplicación.

Una celda de carga es un transductor que es utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión es indirecta y se realiza en dos etapas. Mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma una galga extensiométrica. La galga extensiométrica convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas. Una celda de carga por lo general se compone de cuatro galgas extensiométricas conectadas en una configuración tipo puente de Wheatstone.

La señal eléctrica de salida es típicamente del orden de unos pocos milivoltios y debe ser amplificada mediante un amplificador de instrumentación antes de que pueda ser utilizada. La deformación mecánica de la celda de carga generará un variación en milivoltios proporcional al voltaje aplicado y a la carga.

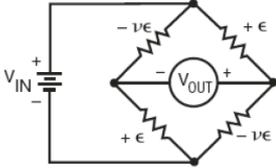
Puede de Wheatstone	Formula de Deformación
	$\varepsilon = \frac{-2 \cdot V_r}{GF \cdot [(v + 1) - V_r \cdot (v + 1)]}$

Figura 19 Arreglo del puente de Wheatstone

Fuente: (Omega Handbook, 2000)

Para seleccionar el transductor celda de carga tipo S se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Precisión de 0,0107 kg/cm² debido a que según la norma para realizar ensayos triaxiales se debe trabajar con
- Material de construcción de acero inoxidable para evitar corrosión
- Tipo de señal por voltaje
- Sistema Métrico
- Capacidad mínima 1Kgf
- Linealidad menor a 0.05%
- Compatibilidad con la tarjeta de adquisición DAQ NI
- Fuente de alimentación 12V (común para la alimentación de todos los transductores).

Omega nos ofrece los transductores celda de carga de la serie LCM101 garantizando una gran precisión, cuenta con modelos estándar y métricos además es adecuado para ser instalado en la máquina triaxial. Por lo cual, se seleccionó el modelo Omega LCM101-1.5k.

Algunas características de éste transductor son:

- Modelo: LCM101-1.5K (1500kgf)
- Tensión de excitación: 10Vdc (15Vdc máx.)
- Salida de Voltaje: 3mV/V
- Linealidad: $\pm 0,3\%$ FS
- Resistencia de entrada/salida: $350\Omega \pm 10\Omega$
- Cable: blindado de 4 conductores
- Material de construcción: Acero inoxidable 17-4 PH



Figura 20 Omega LCM101-1.5k

Fuente: (Omega, 2013)

4.2.3.3 Selección de transductor de presión

Un transductor de presión de tipo extensométrico, convierte la presión en una señal eléctrica, mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al transductor de presión produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión.

Para seleccionar el transductor de presión se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Precisión de $0,0107 \text{ kg/cm}^2$ debido a que según la norma para realizar ensayos triaxiales se debe trabajar con
- Material de construcción de acero inoxidable para evitar corrosión
- Tipo de señal por voltaje con salida de 0 a 10VCC
- Sistema Métrico
- Rango de presión 0 a 16 Bares
- Compatibilidad con la tarjeta de adquisición DAQ NI
- Fuente de alimentación no menor a 12V (común para la alimentación de todos los transductores).

Los transductores de presión de la marca Omega basados en la tecnología de transductores de presión de silicio micro-mecanizados garantizan alta precisión y fiabilidad además de barreras de aislamiento dieléctrico.

Incluye varios tipos de acondicionamiento de señal y la capacidad de sobrevivir a condiciones extremas de choque y la vibración.

Los transductores de la serie Omega PXM209 satisfacen los requerimientos para el diseño, por lo tanto se seleccionó el transductor de presión Omega PXM209-016.

Este transductor incluye un acondicionamiento de señal integral proporcionando una salida alta, por tanto no son tan susceptibles al ruido eléctrico.

Algunas características de éste transductor son:

- Modelo: PXM219-016G10V (16bares)
- Tensión de excitación: 12 a 35Vdc
- Salida de Voltaje: 0 a 10Vdc
- Precisión: 0.25% FS
- Conector DIN 40050 PLUG
- Material: Fijación y cuerpo de acero inoxidable



Figura 21 Omega PXM209-016

De esta manera condesamos en la siguiente tabla los elementos seleccionados.

Tabla 8

Resumen de Selección de Instrumentación

N°	Elemento	Modelo	Características Generales	Conector	#Hilos
1	Compact DAQ NI	Módulo NI 9219 con Chasis NI Compact DAQ	Tipo de medida: Corriente, RTD, Resistencia, Strain / Bridge, Temperature, Termopares, voltaje Canales Diferenciales: 4 Resolución de Entrada Analógica: 24bits Acondicionamiento de Señales: Excitación de voltaje y corriente integrados	USB	
2	Transductor de deformación LVDT	Omega LVDT LD621-30	Tensión de excitación: De 10 a 30 Vcc Salida: 0 A 10 Vcc Material de la carcasa: Acero inoxidable 300 Rango de medida: 30mm	DIN Pines	5 4
3	Transductor celda de carga	Omega LCM101-1.5k	Excitación: 10 Vcc, 15 Vcc máx. Salida: 3 mV/V $\pm 0,0075$ mV/V Capacidad: 1.5Kgf Material: Acero inoxidable 300	DIN Pines	5 4
4	Transductor de presión	Omega PXM209-016	Excitación: 24 Vdc @ 15 mA 10 Vdc Salida: 12 to 35 Vdc Salida: 0 to 10 Vdc Material del cuerpo y montaje: Acero inoxidable	DIN Pines	5 3

4.2.4 Definición de las señales y su interpretación

Tabla 9

Elementos, señales y su interpretación

Elemento	Modelo	Tipo de señal	Interpretación
1 Transductor de deformación LVDT	Omega LVDT LD621-30	Voltaje	Voltaje 0-10V
2 Transductor celda de carga	Omega LCM101-1.5k	Resistencia	Voltaje 0-5V (con circuito de amplificación)
3 Transductor de presión	Omega PXM209-016	Voltaje	Voltaje 0-10V

4.2.5 Diagrama de conexión al conector DIN

Conector DIN, es un conector que fue originariamente estandarizado por el Deutsches Institut für Normung (DIN), la organización de estandarización alemana.

Los conectores consisten en una camisa metálica circular para proteger los pines que sobresalen. La camisa metálica está dentada para que sea insertada con la orientación correcta en su enchufe y prevenir de esta forma el daño en los aparatos eléctricos.

Se adaptó los hilos de los transductores usando conectores DIN 240° macho, que posteriormente se conectan en el panel eléctrico por medio del conector hembra. Por este motivo se estandarizó el mismo tipo de conexión para todos los transductores al conector DIN como se muestra en la siguiente figura.

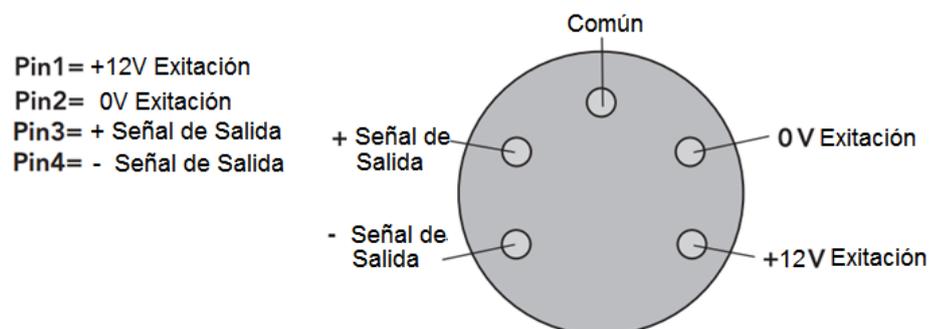


Figura 22 Diagrama de conexión DIN 240° para los transductores.

Para cuestiones de mantenimiento, se presenta la descripción de las conexiones entre los elementos que conforman el chasis del sistema DAQ.

La descripción de los pines para los conectores DIN machos, que son los que están en el extremo del cable de cada transductor, se describe en las siguientes tablas.

Para el transductor de deformación, el detalle de la conexión de los pines en el conector DIN macho se indica mediante la Tabla siguiente:

Tabla 10

Conexiones del transductor de deformación a conector DIN

No. de pin (conector)	Color (conductor)	Función
1	Rojo	Voltaje de excitación: 12V
2	Azul	Voltaje de excitación: 0V
3	Amarillo	Señal + DC salida
4	Verde	Señal - DC salida
5	-	Tierra flotante

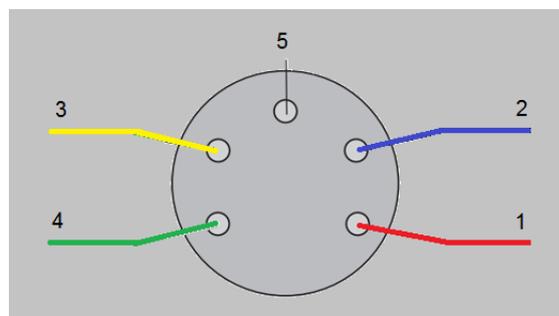


Figura 23 Conexiones del transductor de deformación a conector DIN

Para el transductor celda de carga, el detalle de la conexión de los pines en el conector DIN macho se indica mediante la Tabla siguiente:

Tabla 11

Conexiones del transductor celda de carga a conector DIN

No. de pin (conector)	Color (conductor)	Función
1	Rojo	Voltaje de excitación: 12V
2	Negro	Voltaje de excitación: 0V
3	Verde	Señal + DC salida

4	Blanco	Señal – DC salida
5	-	Tierra flotante

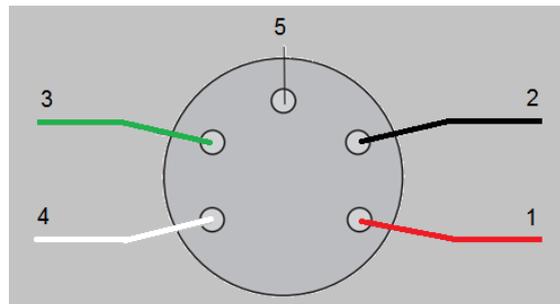


Figura 24 Conexiones del transductor de celda de carga a conector DIN

Para el transductor de presión, el detalle de la conexión de los pines en el conector DIN macho se indica mediante la Tabla siguiente:

Tabla 12

Conexiones del transductor de presión a conector DIN

No. de pin (conector)	Color (conductor)	Función
1	Rojo	Voltaje de excitación: 12V
2	-	Voltaje de excitación: 0V
3	Blanco	Señal + DC salida
4	-	Señal – DC salida
5	Negro	Tierra flotante

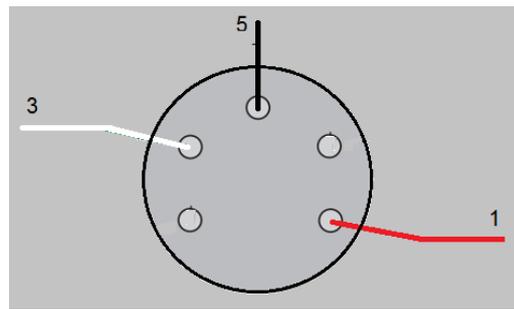


Figura 25 Conexiones del transductor de presión a conector DIN

4.2.6 Estructura del sistema de adquisición de datos

Como se explicó anteriormente el sistema de adquisición de datos está compuesto principalmente por la tarjeta compact DAQ 9219 NI basada en PC.

NI 9219 es un módulo universal de la serie C, de la compañía Nacional Instruments.

Posee 4 canales analógicos con una resolución de 24 bits, pudiendo ser capaz de medir entre los rangos de $\pm 60V$ y $\pm 25 mA$. Son rangos estándar que no delimitan en la elección de los transductores para medir las señales.

La arquitectura del sistema de adquisición se inicia al captar por medio de sensores algún parámetro físico, para ello usamos transductores que al sensar estos parámetros emiten una señal eléctrica.

En nuestro caso se usa un transductor de deformación para captar el cambio de longitud de una muestra de suelo al ser comprimida en la cámara de presión de la máquina triaxial. Un transductor celda de carga para medir el esfuerzo que se aplica a dicha muestra y un transductor de presión para medir la presión dentro de la cámara donde se encuentra la muestra.

Estos transductores de presión y celda de carga al captar variación en los parámetros físicos los transforman a una señal eléctrica con la ayuda de puente de Wheatstone donde se obtiene una salida de voltaje y resistencia respectivamente.

El transductor de deformación capta la deformación y la transforma en señal eléctrica de voltaje basado en el principio de inducción al ser un dispositivo LVDT.

Estas señales eléctricas entran al dispositivo compact DAQ que cumple con dos funciones principales, acondiciona y convierte la señal eléctrica analógica en señal digital.

El objetivo del acondicionador de señal es generar, a partir de lo obtenido por los transductores, una señal que sea aceptable por las tarjetas de adquisición de datos DAQ.

Las funciones principales que lleva integrado el dispositivo compact DAQ para acondicionar señales son las siguientes:

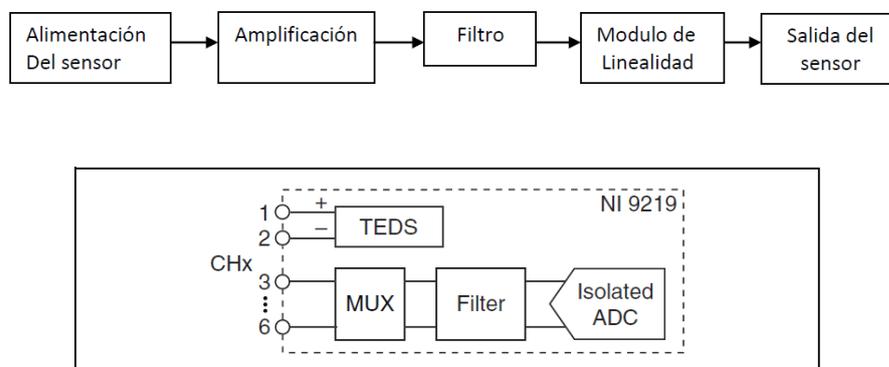


Figura 26 Esquema del Acondicionamiento de señales CompactDAQ 9219

Fuente: (National Instruments, 2011)

- Transformación
- Amplificación
- Filtrado
- Excitación
- Linealización

Transformación: cuando el transductor proporciona una variación de intensidad, esta debe ser convertida en una diferencia de potencial proporcional.

Amplificación: La señal proporcionada por los transductores es amplificada con el fin de que pueda ser detectada correctamente por la tarjeta CompactDAQ. La amplificación de las señales, en su origen, reduce el ruido que les puede afectar en su transmisión hasta el computador mejorando la precisión y resolución de la medición.

Conversión por medio de opto acopladores: Consiste en la conversión de una señal eléctrica en una señal óptica, de luz con el objetivo de aislar los sistemas eléctricos de los sensores de los sistemas eléctricos de la tarjeta.

Filtrado: Con el filtrado electrónico se pretende eliminar ruidos de alta frecuencia modificando su amplitud y fase.

Los ruidos pueden hacer perder exactitud al sistema de adquisición de datos.

Excitación: Proporciona una excitación de corriente o voltaje al transductor para producir una variación proporcional a la magnitud a medir.

Después de pasar por la etapa de acondicionamiento, la señal acondicionada analógica es convertida a señal digital por el ADC.

Algunos de los parámetros del ADC más importantes que posee la tarjeta de adquisición de Datos compact DAQ es analizada a continuación.

Tipo de ADC: Delta-sigma (con pre-filtrado analógico)

El uso de modulación de alta frecuencia permite suavizar los requerimientos de filtro “antialiasing”, donde se puede usar un filtro pasivo de primer orden. Las operaciones críticas de filtrado se trasladan al plano digital donde éstas resultan más robustas e inmunes a las imperfecciones de la circuitería además de brindar mayor velocidad.

La combinación del sobremuestreo y técnicas de modulación Delta-Sigma, brindan convertidores de A/D de muy alta resolución, robustos y relativamente insensibles a ruidos.

La siguiente fig. nos muestra el diagrama de bloques de un convertidor A/D tipo Delta-Sigma.

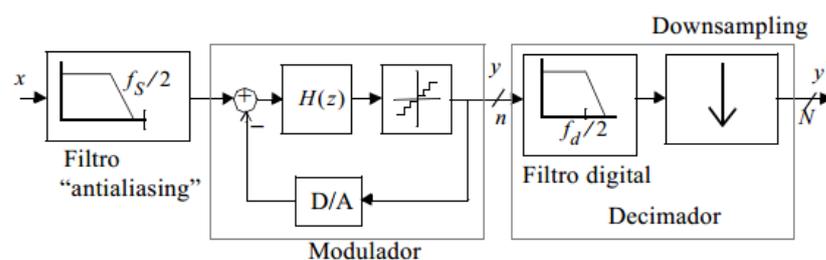


Figura 27 Diagrama de bloques de un convertidor A/D tipo Delta-Sigma

Fuente: (Guerra Oscar, 2008)

Consta de los siguientes elementos:

1. Filtro analógico “antialiasing”. Se encarga de eliminar de la señal de entrada todas las componentes espectrales por encima de la mitad de la frecuencia de

muestreo (señales por encima de la frecuencia de Nyquist). La operación de sobremuestreo permite flexibilizar los requerimientos de este filtro de forma que incluso filtros pasivos de primer orden son suficientes para implementar el primer bloque del convertidor.

2. Modulador. En este bloque se muestra y cuantiza la señal. Adicionalmente, es posible filtrar el error inherente a la cuantización, conformando su densidad espectral de potencias de modo que la mayor parte de ésta quede fuera de la banda de la señal, de donde es eliminado mediante filtrado digital. Este hecho ha dado origen al término “noise-shaping”, que se usa también para denominar a los moduladores delta-sigma “noise-shaping coders”. La salida del modulador consiste en un número reducido de bits (usualmente mas “1” que “0”) a la frecuencia de muestreo.
3. Decimador. Este bloque digital, tras un filtrado que elimina todas las componentes fuera de la banda de la señal, incluido gran parte del error de cuantización, se reduce la frecuencia de muestreo mediante un proceso de decimación. Como resultado se obtiene una señal de entrada, codificada con un elevado número de bits, a la frecuencia de Nyquist.

Esta operación no supone pérdida de información dado que solo se elimina la información redundante resultado del sobremuestreo.

La Figura 4.13 muestra el procesado de la señal realizado por los distintos bloques del convertidor.

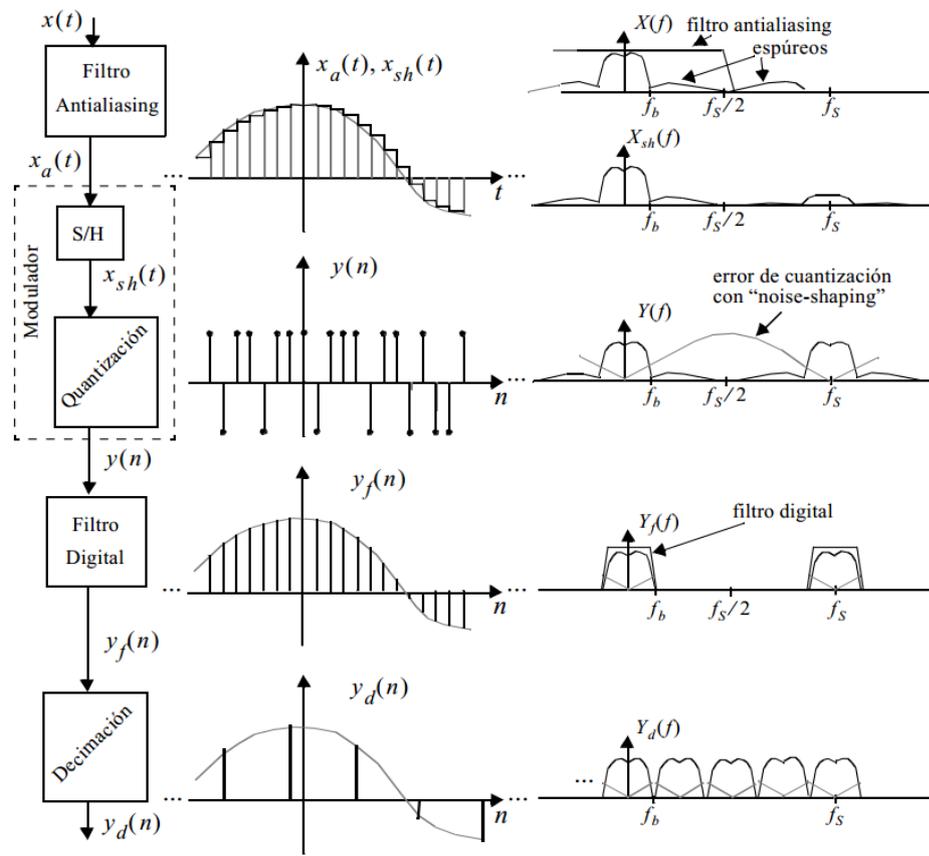


Figura 28 Procesado de señal por bloques del convertidor Delta-Sigma

Fuente: (Guerra Oscar, 2008)

f_d frecuencia de Nyquist de la señal.

Velocidades de muestreo: 50 ks/s/ch

La frecuencia de muestreo de 50000 muestras por segundo que la tarjeta compact DAQ brinda por cada canal simultáneamente.

Además:

$$1 \text{ muestra} = \frac{1s}{50000 \text{ muestras}} = 20\mu s$$

Resolución de las muestras: 24 bits

La tarjeta compact DAQ tiene una resolución de 24 bits, que trabajando con un voltaje RMS de 300V la resolución será:

$$\Delta V = \frac{300}{2^{24}} = 10\mu V$$

Lo que significa que la tarjeta percibe una variación de $10\mu V$ en el valor de la onda de voltaje.

Finalmente la señal digital que se obtiene después de la conversión A/D pasa por medio de Plug and play USB al controlador que es este caso es la PC donde a través del software de control LabVIEW NI que procesará esta señal digital y por medio de la interfaz mostrará y almacenará los datos adquiridos.

CompactDAQ entrega una medición rápida y exacta en un sistema pequeño, simple y económico, además avalado por las normas ISO 9001, ISO/IEC 17025.

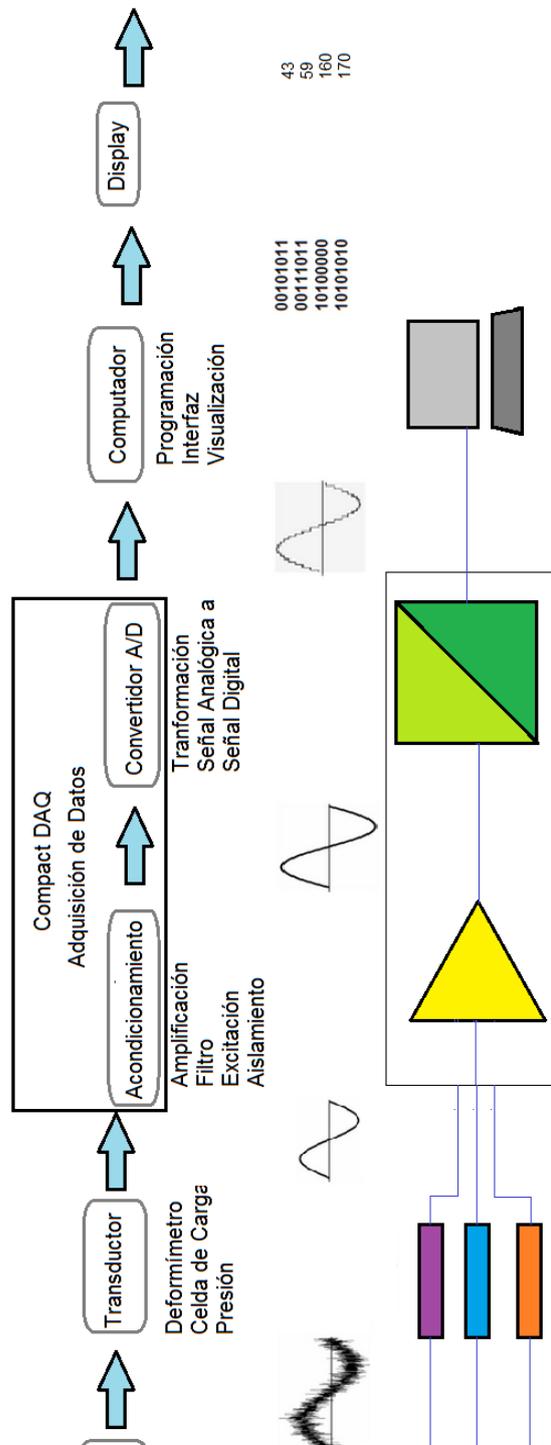


Figura 29 Sistema Electrónico-Informático de la máquina triaxial

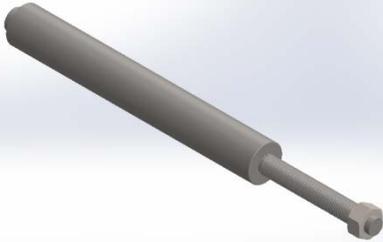
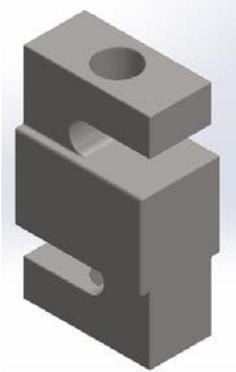
4.2.7 Diagrama de conexión de transductores a tarjeta DAQ

Como se había mencionado los transductores de deformación, presión y celda de carga son los instrumentos electrónicos que se encuentran conectados a la tarjeta de adquisición de datos compact DAQ, que por medio de esta acondiciona la señal emitida por los transductores.

La tarjeta compact DAQ posee 4 canales de entrada analógica universales donde está conectada de la siguiente manera:

Tabla 13

Distribución elementos en canales de entrada de Compact DAQ

Canal DAQ	Elemento		#Hilos
1	Transductor de deformación		4
2	Transductor celda de carga		4
3	Transductor de presión		3

Cada canal de la NI Compact DAQ 9219 tiene seis terminales para las diferentes señales y dispositivos que son conectados.

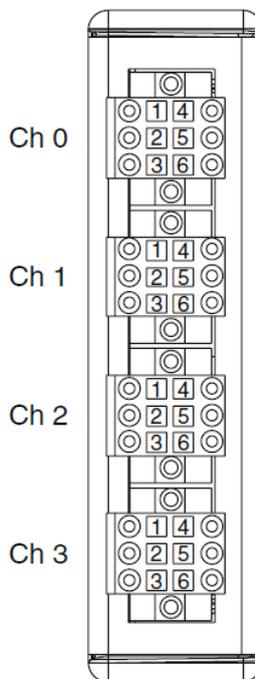


Figura 30 Canales y terminales de la NI Compact DAQ 9219

Fuente: (National Instruments, 2011)

Según el tipo de señal que entra por el canal, sea voltaje, corriente, resistencia etc. La configuración en los terminales variará. En este proyecto, la señal de entrada es por voltaje ya que se ha diseñado para ese fin. En el caso de la celda de carga, se requirió un circuito de amplificación extra para lograr tener una señal de voltaje aceptable para la tarjeta compact DAQ y poder trabajar con la señal de voltaje y la configuración respectiva.

Es así como todos los terminales están conectados con la configuración de entrada de voltaje que según la tabla tiene la siguiente conexión hacia los terminales.

Tabla 14

Asignación de terminales y señales de la NI Compact DAQ 9219

Terminal	Nombre de la señal	Descripción de la señal
1	T+	TEDS Dato
2	T-	TEDS COM
3	EX+/HI	Excitación positiva o señal de entrada +
4	HI	Señal de entrada +
5	EX-LO	Excitación negativa o señal de entrada -
6	LO	Señal de entrada -

Fuente: (National Instruments)

Tabla 15

Configuración de señales en terminales del módulo 9219

Mode	Terminal					
	1	2	3	4	5	6
Voltage	T+	T-	—	HI	LO	—
Current	T+	T-	HI	—	LO	—
4-Wire Resistance	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO
2-Wire Resistance	T+	T-	HI	—	LO	—
Thermocouple	T+	T-	—	HI	LO	—
4-Wire RTD	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO
3-Wire RTD	T+	T-	EX+	—	EX-	LO
Quarter-Bridge	T+	T-	HI	—	LO	—
Half-Bridge	T+	T-	EX+	HI	EX-	—
Full-Bridge	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO
Digital In	T+	T-	—	HI	LO	—
Open Contact	T+	T-	HI	—	LO	—

El siguiente diagrama nos muestra la conexión de los transductores que al ser conectados en el panel eléctrico, se toma la vista frontal del conector hembra para mostrar la conexión de la alimentación para la excitación de los transductores y las señales hacia los terminales de los canales correspondientes de la tarjeta compact DAQ.

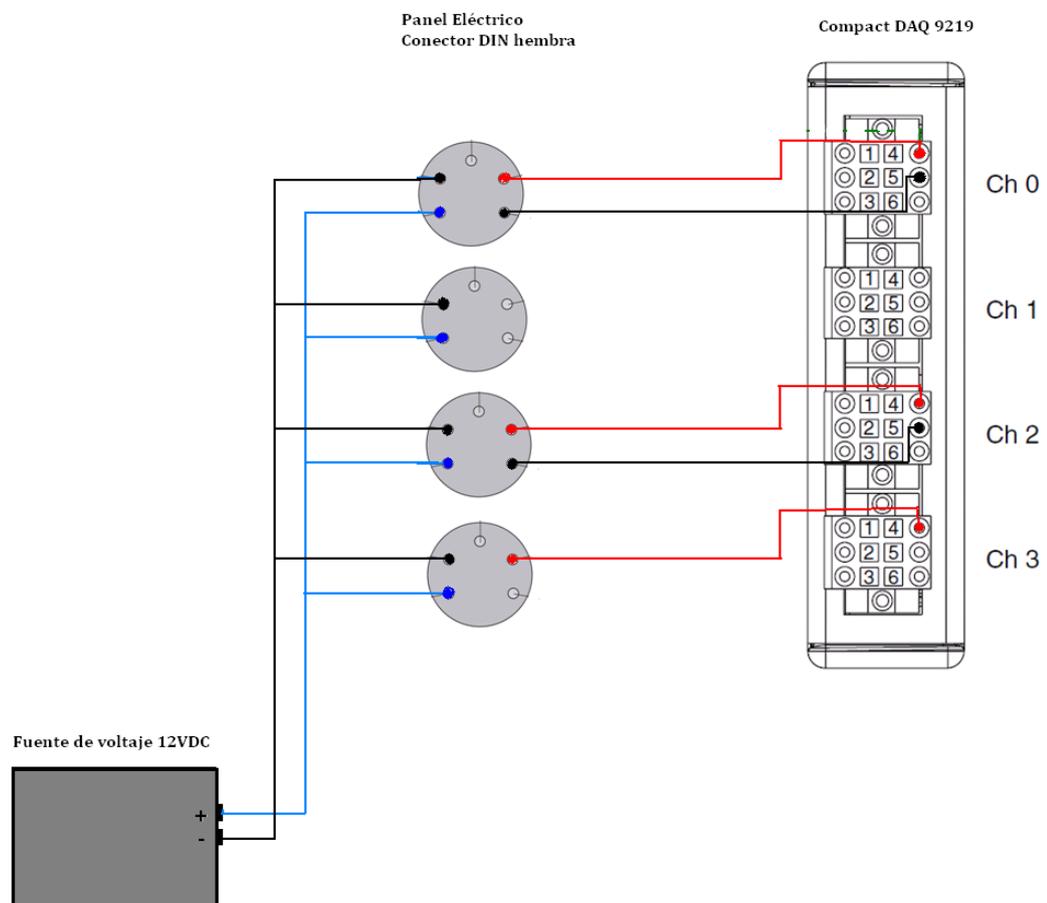


Figura 31 Conexión interna de transductores a NI Compact DAQ 9219

4.2.8 Diseño de fuentes de alimentación

La tarjeta se alimenta con los 5V del puerto USB del computador, por lo tanto requiere una fuente adicional.

Los transductores necesitan ser excitados con un voltaje DC según se muestra en la siguiente tabla para producir una salida de voltaje DC de señal, según se indica:

Tabla 16

Voltaje de excitación para los transductores

N°	Elemento	Voltaje de excitación	Salida de VDC
1	Transductor de deformación	De 10 a 30 VDC	0-10VDC
2	Transductor celda de carga	10 a 15 VDC máx.	3 mV/V \pm 0,0075 mV/V
3	Transductor de presión	De 10 a 35 VDC	0-10VDC

Por lo tanto se utilizará una fuente de $\pm 12V$, para los tres transductores. El diseño de la fuente de alimentación se muestra a continuación.

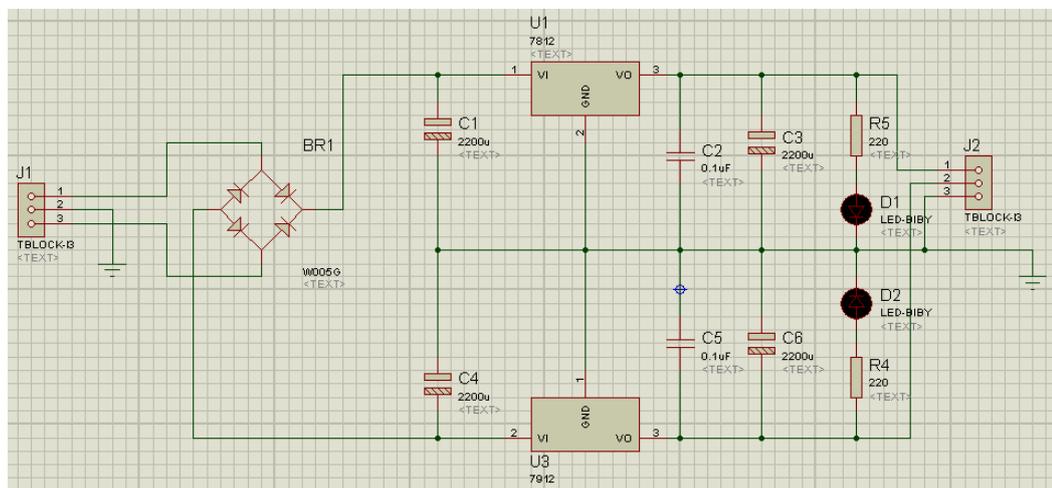


Figura 32 Diseño fuente de alimentación de $\pm 12Vdc$

PANEL ELÉCTRICO

El panel eléctrico está constituido por los siguientes elementos y circuitería:

Tabla 17

Elementos Panel Eléctrico

	Elemento	Número de elementos
1	Tarjeta CompactDAQ 9219 y Chasis	1
2	Fuente 12VDC	1
3	Circuito de amplificación	1
4	Cable USB	1
5	Conectores DIN hembra	4
6	Caja metálica 40x40cm	1



Figura 33 Panel eléctrico

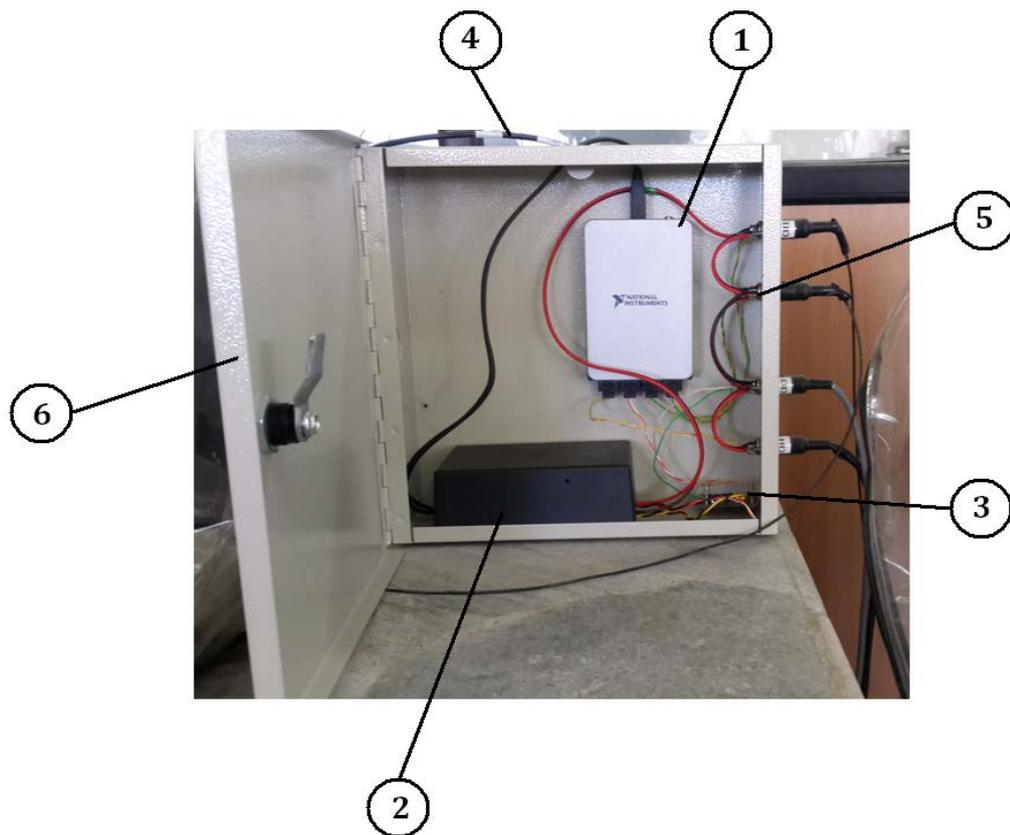


Figura 34 Panel eléctrico detalles

4.2.9 Calibración de los transductores del sistema

La calibración de los transductores utilizados en el presente proyecto se la realizó de la siguiente manera:

- Transductor de deformación

Tomamos en cuenta las siguientes características importantes para establecer la función lineal proporcional.

Tabla 18

Características importantes del transductor de deformación

Alimentación [VDC]	Señal de Salida mínima [VDC]	Señal de Salida máxima [VDC]	Rango de deformación mínima [mm]	Rango de deformación máxima [mm]
12V	0	10	0	30

Sabemos que el transductor es excitado con un voltaje de 12V que al ser convertido por el transductor, nos arroja una señal de salida de 0 a 10V.

La deformación del transductor está en el rango de 0 a 30mm. Con estos datos se establece la proporción, a determinada deformación, el transductor arroja el correspondiente valor de voltaje a la tarjeta de adquisición que está interpretado en mm de deformación.

Debido a que contamos con dispositivos lineales, es decir, “idealmente”, su relación va a ser directamente proporcional.

De esta manera, se utilizó el siguiente factor de proporción:

$$x = \frac{30y}{10}$$

$$x = 3y$$

Donde:

x = factor de proporción

y = variable de la señal de voltaje

Es decir, la señal de voltaje que adquiere la tarjeta la multiplicaremos por 3 y se obtiene la correspondiente deformación del transductor en mm.

La siguiente tabla muestra la proporción entre estas dos señales y su gráfica.

Tabla 19

Calibración por programación del transductor de deformación

Señal de Voltaje	Deformación del transductor
V	Mm
0	0
1	3
2	6
3	9
4	12
5	15
6	18
7	21
8	24
9	27
10	30

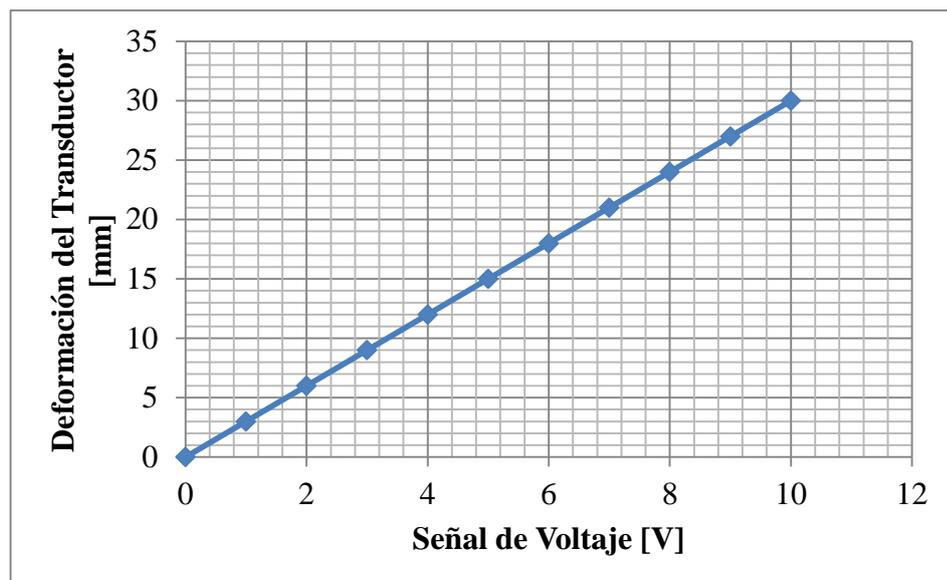


Figura 35 Calibración por programación del transductor de deformación

- Transductor de presión.

El anterior análisis es parecido para el transductor de presión, en este caso tenemos las siguientes características:

Tabla 20

Características importantes del transductor de presión

Alimentación [VDC]	Señal de Salida mínima [VDC]	Señal de Salida máxima [VDC]	Presión mínima [bar]	Presión máxima [bar]
12V	0	10	0	16

El transductor es excitado con un voltaje de 12V, que al ser convertido por el transductor, arroja una señal de salida en un rango de 0 a 10V.

El transductor mide un rango de 0 a 16 bares. Con estos datos se establece la proporción, a determinada presión, el transductor arroja el correspondiente valor de voltaje a la tarjeta de adquisición que está interpretado en bares de presión.

De esta manera, se utilizó el siguiente factor de proporción:

$$x = \frac{16y}{10}$$

$$x = \frac{8}{5}y$$

Donde:

x = factor de proporción

y = variable de la señal de voltaje

Es decir, la señal de voltaje que adquiere la tarjeta la multiplicaremos por 8/5 y se obtuvo la correspondiente presión del transductor en bares.

La siguiente tabla muestra la proporción entre estas dos señales y su gráfica.

Tabla 21

Calibración por programación del transductor de presión

Señal de Voltaje	Presión				
	V	bar	Pa	kPa	Kg/cm2
0	0	0	0	0	0
1	1,6	160000	160	0,016	
2	3,2	320000	320	0,032	
3	4,8	480000	480	0,048	
4	6,4	640000	640	0,064	
5	8	800000	800	0,08	
6	9,6	960000	960	0,096	
7	11,2	1120000	1120	0,112	
8	12,8	1280000	1280	0,128	
9	14,4	1440000	1440	0,144	
10	16	1600000	1600	0,16	

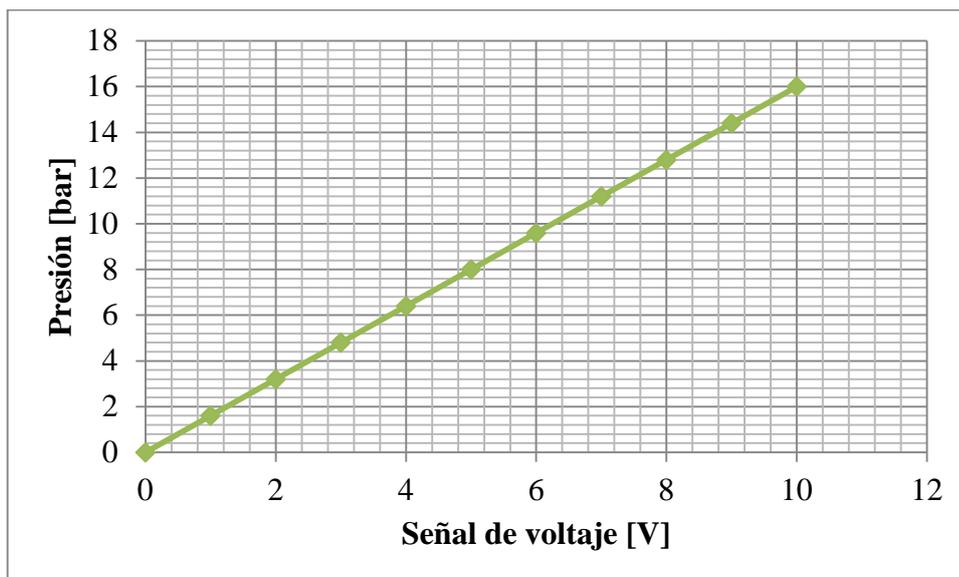


Figura 36 Calibración por programación del transductor de presión.

- Transductor celda de carga

Como se había mencionado anteriormente una celda de carga por lo general se compone de cuatro galgas extensiométricas conectadas en una configuración tipo puente de Wheatstone. La señal eléctrica de salida es típicamente del orden de unos pocos milivoltios y debe ser amplificada mediante un amplificador de instrumentación antes de que pueda ser utilizada (en este caso en un rango de 0 a 5V) obteniendo una buena resolución.

Las características requeridas de éste transductor para su calibración son:

Tabla 22

Características importantes del transductor celda de carga

Alimentación [VDC]	Salida [mV]	Señal de Salida amplificada mínima [VDC]	Señal de Salida amplificada máxima [VDC]	Presión mínima [kgf]	Presión máxima [kgf]
12V	3mV/V	0	5	0	1.5

El transductor es excitado con un voltaje de 12V, que al ser convertido por el transductor, arroja una señal de salida de 3mV/V.

El transductor mide un rango de 0 a 1.5 KgF. Con estos datos se establece la proporción, a determinada carga, el transductor arrojará el correspondiente valor de voltaje (mV) que después de ser amplificada, entra en la tarjeta de adquisición en un rango de 0 a 5V que está interpretado en KgF de carga.

Debido a que este transductor depende de la alimentación que se ponga, así, arroja 3mV por cada V de la fuente, entonces:

$$\text{Valor máximo con fuente de 12V [mV]} = \frac{3\text{mV} \cdot 12\text{V}}{1\text{V}}$$

$$\text{Valor máximo con fuente de 12V [mV]} = 36\text{mV}$$

Ahora, tomando en cuenta la amplificación realizada en un rango de 0 a 5V, se establece a qué proporción se amplifica la señal en mV.

$$x_{amp.} = \frac{36\text{mV} \cdot 1\text{V}}{5\text{V}}$$

$$x_{amp.} = 7.2$$

Donde:

$$x_{amp.} = \text{factor de proporción de la señal amplificada}$$

Por lo tanto la señal en mV se está amplificando a una razón de 7,2. Como muestra la siguiente tabla:

Tabla 23

Amplificación de la señal mV de la celda de carga

Señal de salida Celda de Carga con fuente de 12V	Amplificador
mV	V
0	0
7,2	1
14,4	2
21,6	3
28,8	4
36	5

Con una señal en un rango de 0 a 5V que capta la tarjeta de adquisición, se estableció la relación de proporcionalidad entre en voltaje y la carga correspondiente.

Es decir, la señal de voltaje que adquiere la tarjeta la multiplicaremos por 8/5 y se obtiene la correspondiente presión del transductor en bares.

$$x = \frac{1.5y}{5}$$

Donde:

$x = \text{factor de proporción}$

$y = \text{variable de la señal de voltaje}$

La siguiente tabla nos muestra la proporción entre estas dos señales y su gráfica.

Tabla 24

Calibración por programación del transductor celda de carga

Señal de Voltaje Amplificada	Carga
V	KgF
0	0
1	0,3
2	0,6
3	0,9
4	1,2
5	1,5

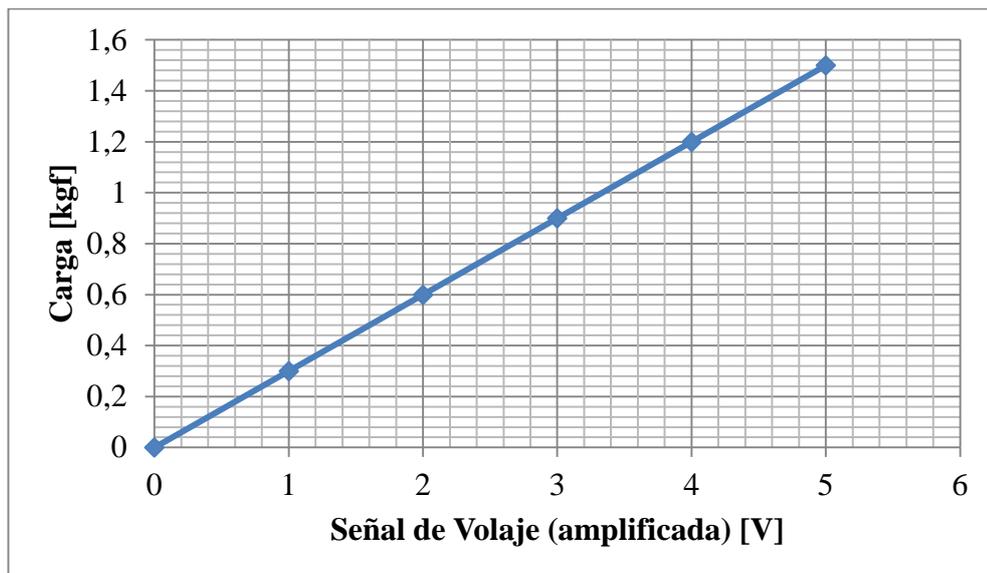


Figura 37 Calibración por programación del transductor celda de carga

4.2.10 Circuito de acondicionamiento de señales.

4.2.10.1 Diseño del circuito de amplificación para celda de carga

El amplificador operacional AD620 es un integrado instrumental que permite incrementar el voltaje dependiendo de la ganancia establecida en el circuito. Es un integrado de bajo costo y alta precisión que requiere una resistencia para obtener ganancias de entre 1 a 1000.

La función principal que se ha considerado en el AD620 es de acondicionar la señal para el nivel de milivoltios que trabaja el transductor de celda de carga, y mediante la amplificación éste sea suficiente para la adquisición de datos de la tarjeta electrónica CompactDAQ.

Debido a que la celda de carga tiene una salida de 3mV/V y la tarjeta de adquisición con la configuración de puente completo capta señales de voltaje desde los $\pm 7.8\text{mV/V}$, es necesario amplificar esta señal, para que por medio de esta se puede configurar mediante Voltaje y no por Puente de Wheatstone.

Dentro de las especificaciones técnicas principales del AD620 se muestra las siguientes:

CARACTERÍSTICAS:

- Ganancia: 1 a 1000
- Rangos de voltaje de excitación: $\pm 2,3\text{V}$ a $\pm 18\text{V}$
- Bajo consumo: Corriente de 1,3mA máx.
- Ancho de banda: 120kHz con $G=100$
- Bajo ruido

El transductor de celda de carga que tiene una configuración de puente de wheatstone formado de cuatro resistencias de misma capacidad, como se muestra en la fig. . La señal de salida estará conectado al AD620.

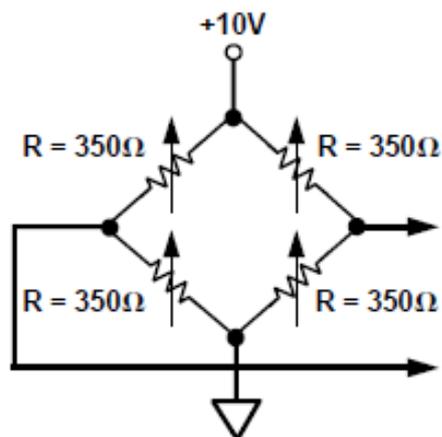


Figura 38 Puente de Wheatstone

Fuente: (Analog Devices, 2003)

Mediante la hoja de especificaciones del AD620 la salida de señal de voltaje del puente de wheatstone es ingresada para ser amplificada en el integrado y esta señal mejorada será conectada a uno de los canales del módulo 9219 (módulo universal).

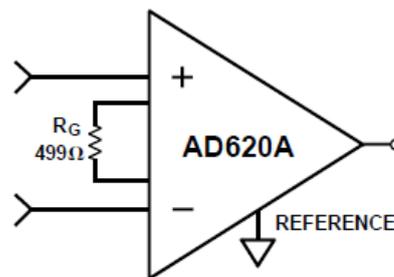


Figura 39 Amplificador instrumental AD620

Fuente: (Analog Devices, 2003)

Para el proyecto, se ha considerado dar una resistencia R_G de $1k\Omega$. Dando una ganancia de 50.4. Dada por la siguiente fórmula:

Ecuación 4 Ganancia de amplificación instrumental

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1$$

$$G = \frac{49.4k\Omega}{1k\Omega} + 1$$

$$G = 50.4$$

4.2.11 Diseño de la interfaz HMI

El ser humano está constantemente interactuando con los objetos involucrados en el, generando expectativa de comportamiento. Poniendo así el HMI (Interfaz Hombre Máquina), como el vínculo de contacto que tienen entre sí.



Figura 40 HMI Ensayo Triaxial No Consolidado No drenado

Para un correcto diseño de HMI se cuenta con los elementos principales como la arquitectura, navegación, estándares de colores, fuente, simbología.

Cada proceso tiene particularidad propia, tomando en cuenta cada elemento. Es decir que debe de contar con niveles de *procesos* que muestra el estado de operaciones, *comandos* como el arranque de procesos, y las *tendencias* que son las variables principales del proceso.

Es importante la organización de la planta, llevando un orden que debe reflejarse, con fácil y rápido acceso a cada una de las áreas. Con la finalidad de llevar a cabo entendimiento del operario.

El uso adecuado de colores es un elemento importante dentro de este contexto, primordialmente de fondo de pantalla que debe ser contrastante de los otros elementos.

La regulación del elemento textual es necesaria para el entendimiento visual hacia el operador, mediante el uso de metodologías estandarizadas.

La selección de botones de comando para la identificación del proceso a realizarse debe utilizar un estándar global, siendo concisos y claros por la familiaridad que tendrán al momento de ser usados por el operador.

El HMI de la práctica de ensayos triaxiales de suelos cuenta con tres etapas.

4.2.11.1 Etapa de ingreso de datos.

Permite ingresar los datos de las muestras cilíndricas de suelos como las medidas de diámetros, altura inicial y peso.



The image shows a screenshot of a software interface titled "DATOS DE LA MUESTRA:". It contains five input fields, each with a numerical value of "0" and a unit label to its right. The fields are: "DIÁMETRO SUPERIOR" (cm), "DIÁMETRO MEDIO" (cm), "DIÁMETRO INFERIOR" (cm), "PESO" (g), and "ALTURA INICIAL" (cm). The labels are in blue text, and the input boxes are white with a thin border.

Figura 41 Ingreso de datos de la muestra

Las muestras de suelos para ensayos triaxiales son tipo cilíndrico. Las principales ingreso de datos son:

- Diámetro superior [cm]
- Diámetro medio [cm]
- Diámetro inferior [cm]
- Altura inicial [cm]
- Peso [g]

Estos parámetros son importantes para poder observar en tiempo real la gráfica de curva de la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria, que permite analizar a los profesionales de este campo.

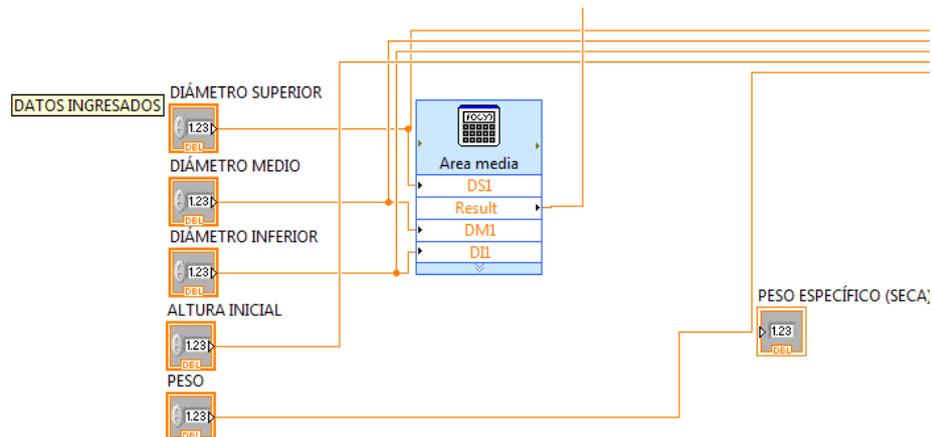


Figura 42 Programación para el ingreso de datos

4.2.11.2 Etapa de botones e indicador

Que son los botones e indicador del proceso de operación.



Figura 43 Botones e indicador

- Botón INICIO.- Tiene la función de encender el sistema. Para así poder comenzar a realizar el ensayo. Cuenta con una estructuras donde se están los bloques de programación como adquirir datos, setear variables, para el sistema, etc.
- Botón ENCERAR.- Al ser presionado dicho botón las variables de carga y deformación son puestas a cero. Para poder realizarlo se cuenta con la siguiente configuración que se muestra en la Fig 4.28. Donde Merge Signals

muestra múltiples datos en uno solo y como se desea poner a cero las variables mediante el array se pone un índice o valor numérico para iniciar, siendo enviado a una tabla.

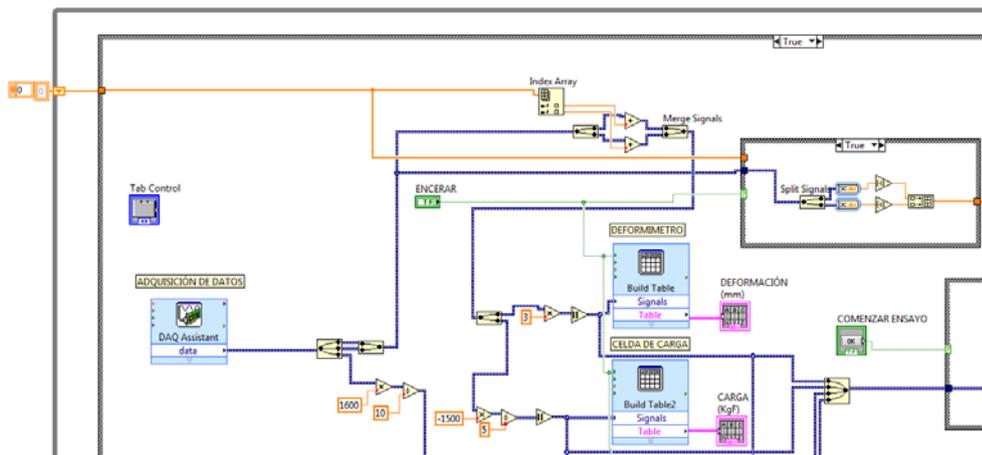


Figura 44 Programación para encerrar las variables

- Botón COMENZAR ENSAYO.- Una vez ingresado los datos de la muestra y encerrado las variables se procede a iniciar la etapa del ensayo mediante este botón.

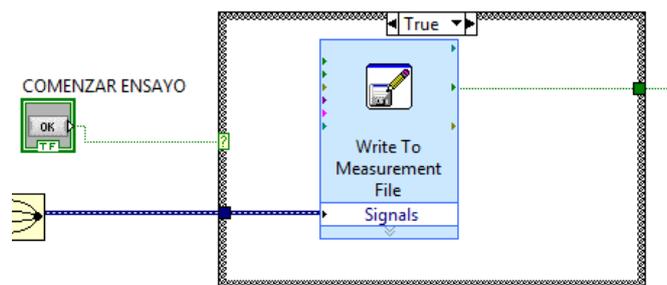


Figura 45 Botón de comenzar ensayo

Con las variables iniciadas en cero y al dar clic en dicho botón se grabarán únicamente a partir de ahí los datos, que serán enviados a una hoja de Excel, permitiendo hacer el bloque *Write To Measurement File*.

- Botón STOP.- Finaliza la toma de datos y detiene el sistema en su totalidad.
Para estar listo para una nueva muestra de suelo.

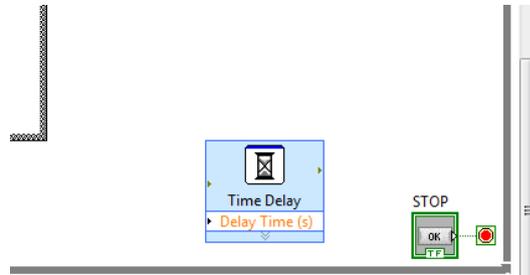


Figura 46 Botón STOP

- Indicador GRABANDO.- Visualiza el estado del procesamiento de datos.
Donde el color verde claro indica que el estado de grabando datos, mientras que el color verde oscuro es apagado.



Figura 47 Indicador de estados

4.2.11.3 Etapa del estado del ensayo

La idea principal de este tipo de adquisición de datos es que al momento de ser puesta en marcha el ensayo, los resultados se vayan adquiriendo y viendo en tiempo real, ya que permitirá una mejor apreciación de la resistencia del suelo. Es por esto que se cuenta con un gráfico y cuadro de valores.

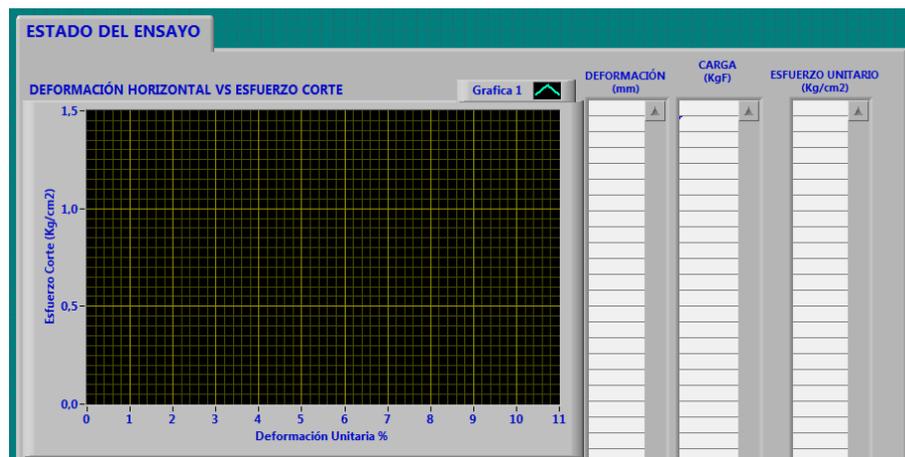


Figura 48 Estado del ensayo

La gráfica corresponderá a la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria. La tabla forma parte del reporte final del ensayo de suelos. Es necesario ver en ambos tanto gráfica como tabla ya que el profesional de esta área de la ingeniería civil irá estableciendo sus criterios, de acuerdo a los valores adquiridos por la tarjeta electrónica.

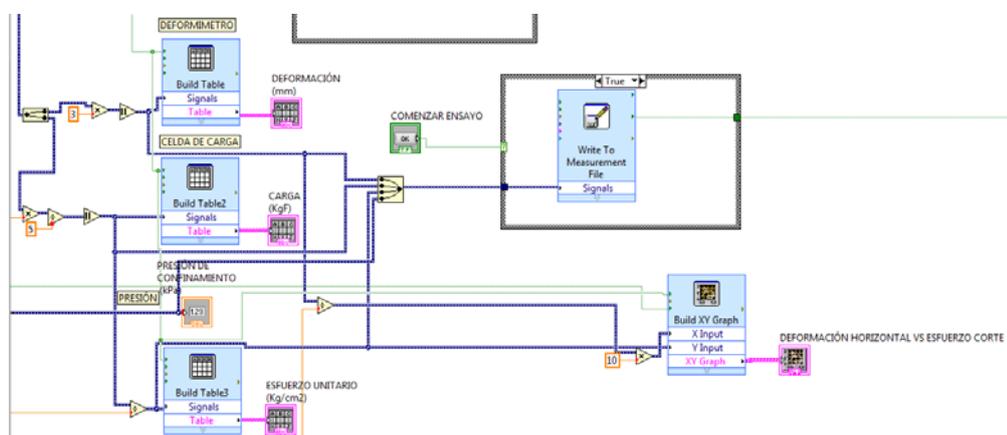


Figura 49 Etapa de gráfica y tabla

4.2.12 Obtención de la hoja de reporte

Los datos adquiridos de deformación, carga y presión de confinamiento y datos de la muestra del ensayo de suelos, son guardados y enviados a una hoja de Excel.

Proceso que se muestra mediante el bloque de programación de Set Dynamic Data y Write To Measurement File para guardar los datos de la muestra.

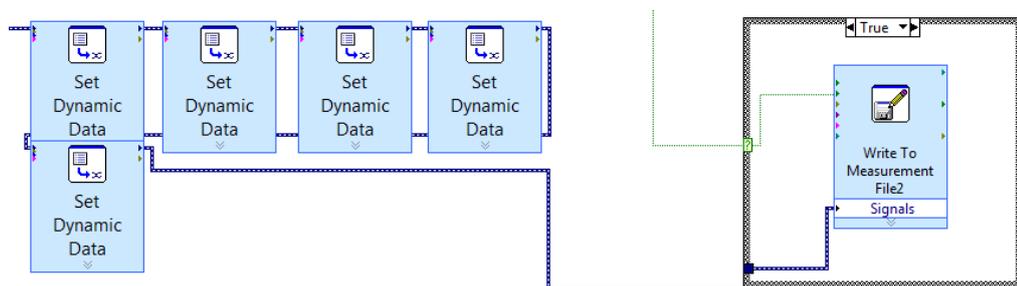


Figura 50 Guardar datos de la muestra de suelo

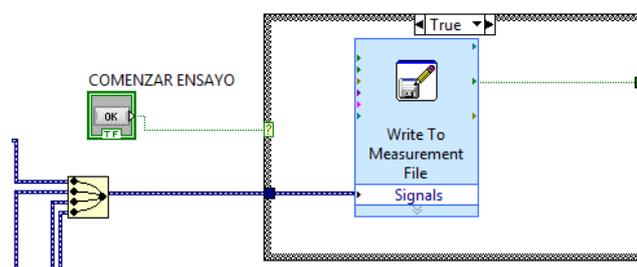


Figura 51 Guardar la adquisición de datos

La configuración se encuentra hecha de la siguiente manera.

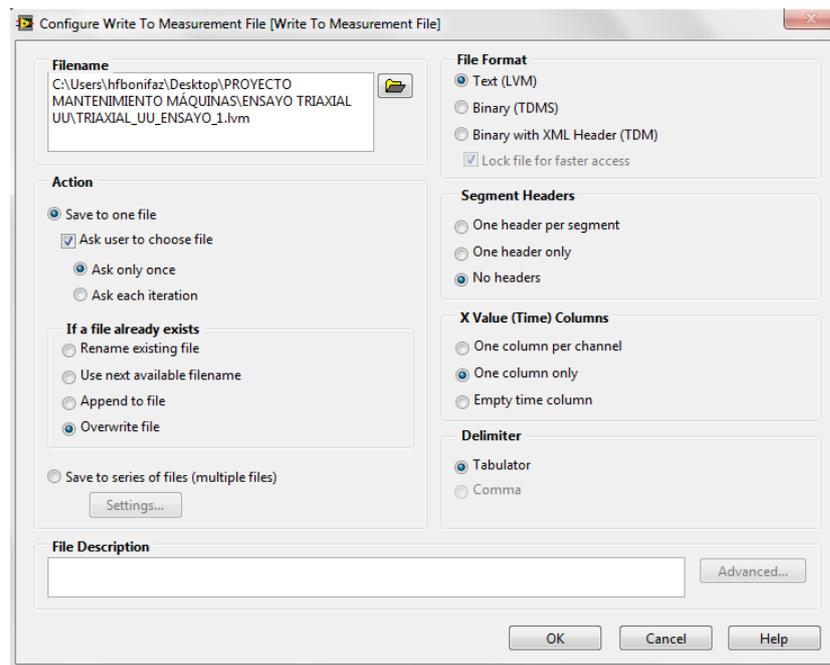


Figura 52 Configuración de Write to Measurement File

Una práctica de laboratorio realiza tres ensayos de suelos, es por eso que se han creado tres extensiones de diferentes nombres. Esta extensión permite guardar los archivos en una hoja de Excel por eso la configuración de preguntar que ruta se desea guardar los datos y sobrescribir el archivo para prácticas posteriores. El formato que se utiliza para guardar estos archivos es de TXT, para abrir en Excel y mostrar únicamente por columnas.

4.2.13 Programación hoja de cálculo

La adquisición de datos permite poder obtener resultados de las muestras de suelo cilíndricas. Para emitir un reporte del ensayo triaxial no consolidado no drenado se utiliza una hoja de cálculo como Microsoft Office Excel 2013. En donde parte desde la toma de datos de la probeta con un calibrador como:

- Diámetro superior [cm]
- Diámetro medio [cm]

- Diámetro inferior [cm]
- Altura inicial [cm]

Se encuentra el cálculo del área inicial y volumen.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad V = A_0 * H_0$$

Para la obtención de resultados, el ensayo triaxial se lo realiza con un mínimo de tres probetas con diferente carga axial aplicada. En donde el cálculo de la deformación unitaria ϵ es como sigue:

Ecuación 5 Deformación unitaria

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

Además, se calcula el área corregida para cada aplicación de carga:

Ecuación 6 Área corregida

$$A = \frac{H_0}{1 - \epsilon}$$

El cálculo del esfuerzo desviador está dado por:

Ecuación 7 Esfuerzo desviador

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_C}$$

En donde P es la carga aplicada en Kilogramos fuerza.

Con estos cálculos se puede graficar la relación que existe entre el esfuerzo (kgf/cm^2) y la deformación unitario (%).

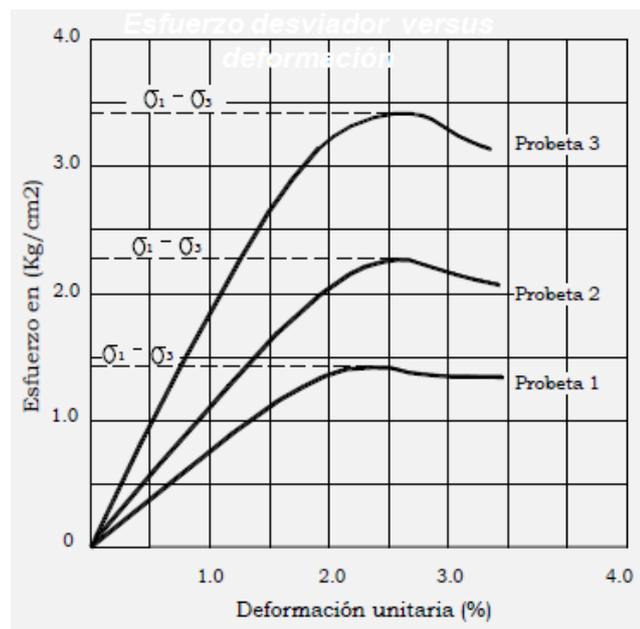


Figura 53 Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria

Fuente: (NEC, 2011)

Se realiza el cálculo de los esfuerzos principales a la falla, como sigue:

- σ_3 = presión lateral de confinamiento aplicada a la cámara.
- σ_1 = esfuerzo principal mayor = esfuerzo desviador a la falla + presión de confinamiento aplicada a la cámara.

Para trazar los Círculos de Mohr, para ello, se requiere elegir una escala de esfuerzos. A partir del origen y sobre el eje de las abscisas, llevar el valor del esfuerzo confinante (σ_3), y desde este punto marcar el valor del esfuerzo desviador de falla ($\sigma_1 - \sigma_3$); este valor es el diámetro del círculo; por lo tanto, con centro en el punto medio del segmento así determinado, se traza el semicírculo correspondiente.

Con el trazado de los semicírculos del estado de esfuerzos de falla de todas las probetas ensayadas, se dibuja la envolvente que mejor se ajuste a ellos, esta recibe el nombre de Línea de Resistencia Intrínseca o Envolvente de Mohr y representa

aproximadamente, la variación de la resistencia al esfuerzo cortante en función de los esfuerzos normales aplicados.

El Ángulo de Fricción Interna del suelo (ϕ), es el que forma la envolvente con la horizontal (abscisas) y se determina en la gráfica por la pendiente de la envolvente. El valor de la cohesión (c), está dado por la ordenada al origen de dicha envolvente, medida a la misma escala con que se trazaron los círculos.

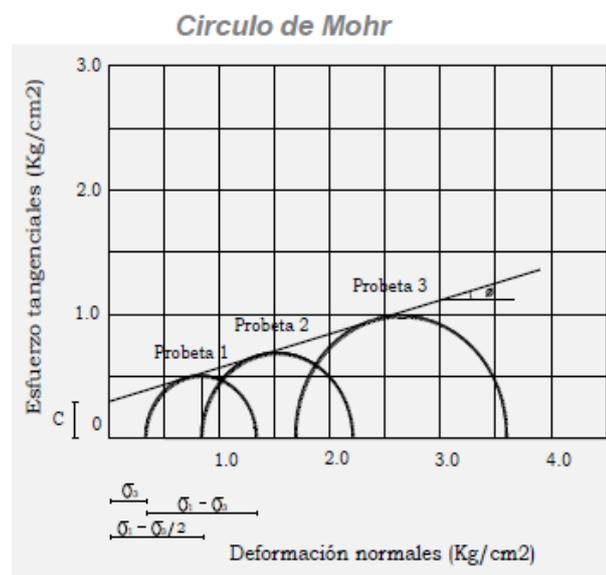


Figura 54 Circulo de Mohr

Fuente: (NEC, 2011)

La hoja de cálculos que es el reporte de los ensayos triaxial se la puede ver en el ANEXO D

CAPÍTULO V

5.1 PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL EQUIPO INSTALADO

En este capítulo se realiza las evaluaciones y pruebas del equipo instalado que garantiza la calibración de los instrumentos de medida para la validación de resultados de los ensayos de suelos triaxiales.

5.1.1 Evaluación y calibración por software de programación del equipo instalado.

La calibración de los transductores fue realizada mediante la tarjeta de adquisición de datos CompactDAQ en donde se dan los siguientes resultados para el transductor de deformación, presión y celda de carga.

- CALIBRACIÓN: TRANSDUCTOR DE DEFORMACIÓN

Tabla 25

Calibración del transductor de deformación

POSICIÓN (mm)	SALIDA (V)	ERROR (%FSO)
0	-0,0222	-0,022
3	0,9991	-0,009
6	1,9964	-0,036
9	3,0036	0,036
12	4,0035	0,035
15	5,0034	0,034
18	6,0056	0,056
21	7,0016	0,016
24	8,0058	0,058
27	8,9972	-0,028
30	9,9877	-0,123

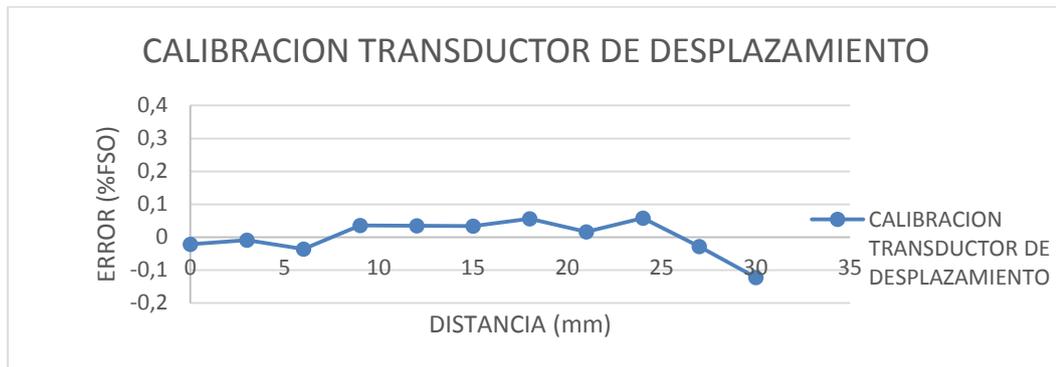


Figura 55 Calibración del transductor de desplazamiento

- CALIBRACIÓN: TRANSDUCTOR DE PRESIÓN

Tabla 26

Calibración del transductor de presión

PRESIÓN (BAR)	SALIDA (V)	ERROR
0	-0,0016	-0,0157
4	2,4897	0,0161
8	4,9199	-0,0157
12	7,5048	0,0158
16	9,9997	-0,0161

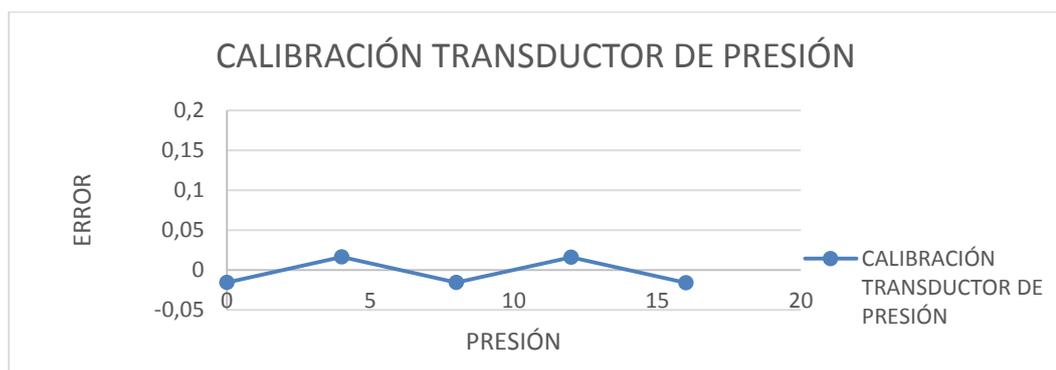


Figura 56 Calibración del transductor de presión

- CALIBRACIÓN: TRANSDUCTOR DE CELDA DE CARGA

Tabla 27

Calibración transductor celda de carga

FUERZA (KgF)	VOLTAJE (V)
0	0,038
150	0,506
300	1,011
450	1,517
600	2,022
750	2,528
900	3,034
1050	3,539
1200	4,045
1350	4,550
1500	5,056

5.1.2 Pruebas y resultados de los ensayos.

Luego de haber sometido las probetas o muestras cilíndricas de suelos alteradas a diferentes presiones de 50, 100 y 150 kPa, que es la presión de confinamiento de la cámara triaxial, datos que son mostrados en una hoja de reportes, que maneja el Laboratorio de Suelos, Asfaltos y Hormigones.

Estos datos fueron obtenidos por la lectura de los transductores de deformación, presión y carga. Y mediante esta metodología de adquisición son la referencia para la validación del proceso automatizado en su totalidad del ensayo triaxial no consolidado no drenado.

Los resultados emitidos a manera de reporte se los han obtenido matemáticamente de forma automatizada. Como podemos observar, hay una mejor calidad de los datos obtenidos, alta precisión, eficiencia y una mejor reconstrucción de la curva lo que permite una mejor valoración e interpretación de los resultados.

Se ha mejorado notablemente el tiempo de realización del ensayo y la obtención automatizada. ANEXO E

CAPÍTULO VI

6.1 OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En el presente capítulo permite comprender el uso adecuado de la máquina triaxial para ensayo de suelos como son el manual de usuario y el manual de mantenimiento del sistema.

6.1.1 Manual del usuario

El operario podrá hacer uso del manual del sistema que comprende procedimientos pertinentes al análisis de suelos en ensayos triaxiales no consolidados no drenados.

Procedimientos del manual de usuario que se encuentran en el ANEXO C

6.1.2 Manual de mantenimiento del sistema informático-electrónico

En este manual consta de la información del mantenimiento del sistema informático-electrónico para la Máquina Triaxial Soiltest de manera segura. Con fines de conservar el sistema en un estado estable y seguro para la adquisición de datos correctas, mantenimiento precisión en él. Ver ANEXO F.

CAPÍTULO VII

7.1 ANALÍISIS DE COSTOS

Para la determinación del origen y el efecto que tiene como resultado el proyecto, el presente capítulo muestra el costo total que representa el desarrollo de la automatización de la Máquina Triaxial Soiltest para ensayo de suelos cilíndricos donde se suman los agentes directos e indirectos para su ejecución.

7.1.1 Costos directos

Conforman la mano de obra directa y los materiales directos, que son los recursos que se incorporan al producto final; es decir que se encuentran constituidos por:

- Materiales directos
- Elementos mecánicos
- Elementos eléctricos/electrónicos
- Elementos de instrumentación y control
- Mano de obra directa

7.1.1.1 Costos de materiales directos

Se refiere a todos aquellos artículos que conforman diferentes sistemas, son comercializados de manera conjunta como piezas o juegos mecánicos.

Tabla 28

Costo de materiales directos

N°	Cantidad	Materiales	Precio unitario (sin IVA)	Precio total (\$)
1	9	Manguera para laboratorio	0,86	8,66

4	1	Caja con cerradura	16,74	18,75
TOTAL MATERIALES DIRECTOS				\$ 27,41

7.1.1.2 Costos de elementos mecánicos

En la siguiente tabla se detallan los elementos mecánicos utilizados

Tabla 29

Costo de elementos mecánicos

N°	Cantidad	Materiales	Precio unitario (sin IVA)	Precio total (\$)
1	2	AISI 1020 2'' 50 cm	16,50	36,96
2	5	Perno Allen 1/4x1/2	0,10	0,56
3	7	Perno Allen 1/4x3/4	0,13	1,01
4	10	Tornillo estufa 5/32x1	0,03	0,34
5	10	Rodela plana 5/32°	0,01	0,11
TOTAL ELEMENTOS MECÁNICOS				\$ 38,98

7.1.1.3 Costos de elementos eléctricos/electrónicos

Tabla 30

Costo de elementos eléctricos/electrónicos

N°	Cantidad	Materiales	Precio unitario (sin IVA)	Precio total (\$)
1	26	Cable multifilar 14 AWG	0,33	9,60
2	3	Cable concéntrico 3x18	0,63	2,11
3	4	Cable flexible #20	0,16	0,72
4	6	Plug Philips DIN 5P EXT	0,28	1,88
5	6	JAC DIN 5P Chasis AB	0,25	1,68
6	4	Cable 4 hilos	1,25	5,60
7	1	Cable 110V tipo 8	1,75	1,96
8	1	AD620	7,59	8,50
9	1	Potenciómetro 500Ω	0,45	0,50
10	4	Capacitores 100nF	0,07	0,31
TOTAL ELEMENTOS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS				\$ 32,86

7.1.1.4 Costos de elementos de instrumentación y control

Tabla 31

Costo de elementos de instrumentación y control

N°	Cantidad	Materiales	Precio unitario (sin IVA)	Precio total (\$)
1	1	Transductor de desplazamiento	1.330,56	1490,22
2	1	Transductor de presión	394,80	442,17
3	1	Transductor celda de carga tipo S	630,00	705,60
4	1	CompactDAQ Chassis 1 slot USB	384,75	430,92

5	10	Modulo Universal NI 9219	1579,50	1769,04
TOTAL ELEMENTOS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL				\$ 4837,95

7.1.1.5 Mano de obra directa

Tabla 32

Costo de mano de obra directa

N°	Tiempo	Proceso	Costo/Hora	Precio total (\$)
1	6	Torneado	10,00	67,20
2	3	Taladro	5,50	18,48
TOTAL MANO DE OBRA DIRECTA				\$ 85,68

Por lo que los costos directos dan como resultado los siguientes valores mostrados en la tabla.

Tabla 33

Costo total directo del proyecto

COSTO TOTAL DIRECTO DEL PROYECTO		
PROCESO	COSTO	PORCENTAJE
TOTAL MATERIALES DIRECTOS	\$ 27,41	0,54%
TOTAL ELEMENTOS MECÁNICOS	\$ 38,98	0,77%
TOTAL ELEMENTOS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS	\$ 32,86	0,65%
TOTAL ELEMENTOS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	\$ 4837,95	96,31%
TOTAL MANO DE OBRA DIRECTA	\$ 85,68	1,70%
TOTAL COSTO DIRECTO	\$ 5.022,88	100%

7.1.2 Costos indirectos

De acuerdo al proceso productivo, son costos de los recursos que participan en él, físicamente no incorporando al producto final. No se encuentran vinculados al producto culminado sino al periodo productivo.

7.1.2.1 Materiales fungibles

Son aquellos materiales que se gastan con el pasar del tiempo.

Tabla 34

Materiales fungibles

DETALLE	COSTO (\$)
Broca	2,62
Cinta doble faz	3,00
Otros	10,00
TOTAL MATERIALES FUNGIBLES	15,62

7.1.2.2 Gastos imprevistos

Corresponde principalmente a los gastos de transporte con un valor estimado de \$50,00.

Teniendo como total de costos indirectos en la siguiente tabla.

Tabla 35

Gastos imprevistos

COSTO TOTAL INDIRECTOS DEL PROYECTO		
PROCESO	COSTO	PORCENTAJE
TOTAL MATERIALES FUNGIBLES	\$ 15,62	23,80%
TOTAL GASTOS IMPREVISTOS	\$ 50,00	76,20%
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	\$ 65,62	100%

7.1.3 Costo total de la implementación del sistema.

El costo total del proyecto se obtiene mediante la suma de los costos directo e indirecto, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 36

Costo total del sistema

COSTO TOTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	
PROCESO	COSTO
COSTO TOTAL DIRECTO	\$ 5.022,88
COSTO TOTAL INDIRECTO	\$ 65,62
TOTAL	\$5.088,50

CAPÍTULO VIII

8.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1.1 Conclusiones

- Se implementó de manera satisfactoria el sistema electrónico informático para la máquina Triaxial el cual, en comparación con la operación manual que se realizaba anteriormente, existe mayor confiabilidad y credibilidad de los datos adquiridos de todas las variables que se usan en cada ensayo, los cuales se pudieron demostrar en la obtención de resultados de las pruebas realizadas, donde también se demuestra mayor eficiencia de los análisis debido a que los datos son adquiridos en tiempo real y por equipos que nos brindan alta fiabilidad y calidad. Todo esto con una correcta implementación.
- Al ser un sistema de adquisición y registro de datos automatizado basado en PC, obtiene un máximo desempeño al hacer uso del alto rendimiento del procesador de PC, y que en tiempo real registra y presenta datos y gráficas, que permite al usuario evaluar el comportamiento de la muestra sin tener que intervenir en el desarrollo del ensayo.
- El sistema de adquisición implementado, cumpliendo normas de los ensayos que se realizan en el laboratorio de suelos, tiene la característica de ser un sistema escalable y flexible, es decir, se puede adaptar a otras máquinas dentro del laboratorio y conectar cualquier dispositivo compatible con la tarjeta CompactDAQ, ya que al ser un módulo universal, puede adquirir diferentes tipos de señales. De esta manera, agregando al sistema un hardware y software

cuya aplicación puede ser desarrollada en el software LabVIEW, el sistema ofrece varias prestaciones al laboratorio y los estudiantes.

- Se implementó un sistema basado en instrumentación electrónica, que permite mejorar el tiempo de entrega de resultados, reduciendo el tiempo en que el sistema se toma para la realización de la práctica y de esta manera mejorar la eficiencia y reducción de costos, al cubrir o necesitar menos personal para cumplir con los ensayos.
- En la calibración del sistema es difícil llegar a una precisión exacta, esto se debe a que la característica estática de los transductores no es 100% lineal, sin embargo, trabajando idealmente las curvas de calibración de cada transductor presentan un error aceptable y casi insignificante. Teniendo en cuenta éste porcentaje de error es necesario realizar pruebas de linealidad, repetitividad e histéresis para así establecer el comportamiento de los transductores en incremento y decremento y hacer la calibración necesaria, cuando se lo requiera.
- Se desarrolló una interfaz HMI con las características requeridas para el monitoreo de los datos y con un modo de operación fácil y agradable para el usuario, donde se puede observar en tiempo real los datos numéricos y gráficas.

8.1.2 Recomendaciones

- La principal recomendación para el uso de éste sistema es estar familiarizado con la práctica a realizar, para esto se recomienda leer la opción de ayuda del programa y también recurrir a los manuales que se adjuntan.

- La manipulación de los equipos electrónicos es muy delicada por esta razón se recomienda al usuario que en caso de daño se consulte con un profesional especializado.
- El sistema está basado en PC, por lo que el computador debe cumplir con características altas para un mejor desempeño, sobre todo se recomienda contar con un buen procesador no menor a INTEL Core i5 y no menos de 4GB de memoria RAM, que se lo selecciona en base a los requerimientos a la tarjeta NI9171.
- Para evitar inconvenientes con la lectura de las magnitudes, es necesario revisar la correcta conexión de cada uno de los transductores en el panel eléctrico; para este fin se puede recurrir al manual del sistema o verificar la etiqueta de cada cable y su respectivo canal en el panel. También se puede recurrir a los diagramas eléctricos/electrónicos presentados en este trabajo.
- Proteger y mantener a los equipos lejos del contacto con agua y polvo.
- Verificar que la alimentación del sistema esté encendida y la tarjeta este siendo reconocida por la PC
- Verificar que los equipos se encuentren en la posición correcta al iniciar el ensayo, si estos son movidos durante el ensayo hay que recurrir de nuevo al botón “Calibrar” de la interfaz.
- El sistema cuenta con alarmas que se activarán cuando el sistema detecte alguna anomalía en el incremento de las variables con las cuales usualmente se trabajan, en caso de que una alarma se active, detener la máquina inmediatamente.

REFERENCIAS

- CONSTRUCCIÓN, C. E. (6 de Abril de 2011). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN*. Obtenido de GEOTECNIA Y CIMENTACIONES:
<http://www.cimeg.org.ec/normasnec/NEC2011-CAP.9-GEOTECNIA%20Y%20CIMENTACIONES-021412.pdf>
- ELECTRÓNICA, 5. (15 de Febrero de 2014). *5Hertz ELECTRÓNICA*. Obtenido de
<http://5hertz.com/tutoriales/?p=690>
- Instruments, N. (5 de Septiembre de 2013). *CompactDAQ*. Obtenido de
<http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/esa/>
- Lopez, C. (6 de Marzo de 2008). *Normas para la gestión y aseguramiento de la calidad*. Obtenido de
<http://www.ucol.mx/acerca/coordinaciones/cgv/dgee/calidad/ARTICULOS%20DE%20CALIDAD-PDF/LAS%20NORMAS%20ISO%209000.pdf>
- Obando, A. (14 de Abril de 2008). *IMPLEMENTACIÓN DE UN FLICKERMETER*. Obtenido de
http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1741/3/62132012_anexo.pdf
- Omega. (10 de Septiembre de 2013). *Omega* . Obtenido de
<http://es.omega.com/prodinfo/transductores-de-presion.html>
- OMEGA. (21 de Septiembre de 2013). *OMEGA Ingeniería inc.* . Obtenido de
<http://www.omega.com/Manuals/manualpdf/M4345.pdf>

Rodriguez, R. (4 de Febrero de 2012). *Análisis de la calidad de energía en el sistema eléctrico*. Obtenido de

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/683/1/te316.pdf>

SENSING. (17 de Marzo de 2014). *Sensores para la Medición de Parámetros*

Físicos. Obtenido de

http://www.sensing.es/Transductores_de_distancia_inductivos_lvdt_Cm.htm

Vimuesa, O. G. (20 de Mayo de 2014). *Departamento de Electrónica y Magnetismo*.

Obtenido de <http://www2.imse->

[cnm.csic.es/elec_esi/assignat/LME/pdf/temas/chapter1.pdf](http://www2.imse-cnm.csic.es/elec_esi/assignat/LME/pdf/temas/chapter1.pdf)