



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

AUTOR: CIFUENTES MUÑOZ, PAMELA CRISTINA

COPPO RUBIO, ANDRÉI WLADIMIR

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO
– INFORMÁTICO PARA LA MÁQUINA TRIAX 50**

DIRECTOR: ING. ALEJANDRO CHACÓN

CODIRECTOR: ING. BONIFAZ, HUGO

SANGOLQUÍ, ABRIL 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO

ING. ALEJANDRO CHACÓN

ING. HUGO BONIFAZ

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado: “Diseño y Construcción de un sistema electrónico – informático para la Máquina TRIAX 50” realizado por Cifuentes Pamela y Coppo Andréi, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE, en el Reglamento de Estudiantes.

Debido a la trascendencia del proyecto en la Ingeniería Civil, especialmente en cálculos de estructuras, sí se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto, el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a Cifuentes Pamela y Coppo Andréi que lo entregue al Ing. Francisco Terneus, en su calidad de Director de la Carrera.

Ing. Alejandro Chacón
DIRECTOR

Ing. Hugo Bonifaz
CODIRECTOR

Autoría de Responsabilidad

Nosotros, Cifuentes Muñoz Pamela Cristina y Coppo Rubio Andréi Wladimir con CC. 1723422992 y CC. 1713643912 como corresponde, declaramos haber realizado el proyecto de tesis titulado "*Diseño y Construcción de un sistema electrónico-informático para la Máquina TRIAX 50'*" y cumplido con los objetivos establecidos.

PAMELA CIFUENTES
CC. 1723422992

ANDRÉI COPPO
CC. 1713643912

Autorización

Nosotros, Cifuentes Muñoz Pamela Cristina y Coppo Rubio Andréi Wladimir con CC. 1723422992 y CC. 1713643912 como corresponde, autorizamos que el proyecto de tesis titulado “*Diseño y Construcción de un sistema electrónico-informático para la Máquina TRIAX 50*” sea publicado en la Biblioteca Virtual.

PAMELA CIFUENTES
CC. 1723422992

ANDRÉI COPPO
CC. 1713643912

Dedicatoria

A Dios por darme la fortaleza y guiar mi camino, a mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional y a todos los que contribuyeron a que se realice este proyecto.

Pamela Cifuentes M.

Dedicatoria

Para Dios, toda mi familia y todos aquellos que hicieron posible el desarrollo y culminación de este proyecto.

Andréi Coppo

Agradecimiento

A mi familia que siempre me apoyo frente a toda adversidad y me ayudo a salir adelante.

A mis profesores que estuvieron siempre presionando para que me esfuerce y de siempre lo mejor de mí en cada una de las asignaturas que impartían.

Y a mis verdaderos amigos con los que siempre pude contar y nunca me negaron un consejo.

Andréi Coppo

Agradecimiento

A Dios, por guiar e iluminar mi camino, permitiéndome alcanzar este peldaño más en mi vida con fortaleza y dedicación.

A mis padres, por el apoyo, consejos, y paciencia que siempre tuvieron para que llegue a alcanzar este logro; que más que mío es suyo.

A mis hermanos, Mishell y Alexis, por brindarme ánimos y llenarme de alegría cuando más lo necesitaba y acompañarme en mi camino.

A Ing. Alejandro Chacón y Ing. Hugo Bonifaz por compartir su experiencia y darnos consejos útiles que hicieron posible la culminación de este proyecto. Y porque no, al Ing. Juan Haro que siempre nos brindó su mano amiga en el laboratorio.

A mis amigos verdaderos, que hicieron más fáciles las horas de estudio con su compañía, ocurrencias y consejos; a Andréi que acompañó y siguió mi camino en la culminación de este proyecto.

Pamela Cifuentes

Índice

Capítulo 0 Índice.....	viii
Capítulo 1 GENERALIDADES	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Justificación del Problema	3
1.3. Objetivo General.....	3
1.4. Específicos	4
1.5. Metodología.....	4
1.6. Marco Teórico	7
1.6.1. Calidad	7
1.6.2. Prensa Triaxial Digital de 50kN - TRIAX 50	8
1.6.3. Esfuerzos Principales en tres ejes	9
1.6.4. Resistencia cortante del suelo	10
1.6.5. Criterios de falla de Mohr- Coulomb.....	11
1.6.6. Prueba triaxial de corte.....	13
1.6.7. Prueba consolidada – drenada	16
1.6.8. Prueba consolidada –No drenada	22
1.6.9. Prueba No consolidada –No drenada.....	29
1.6.10. Cálculos	31
1.6.10.1. Ensayo No Consolidad No Drenado (UU).....	31
1.6.10.2. Ensayo Consolidado No Drenado (CU).....	34
1.6.10.3. Ensayo Consolidado Drenado (CD)	36
Capítulo 2 Descripción y diagnóstico de la Máquina.....	37
2.1 Sistema Mecánico	38
a) <i>Marco de Carga</i>	38
b) <i>Pistón de Carga</i>	38
c) <i>Celda Triaxial</i>	38
d) <i>Barras de acoplamiento</i>	39
e) <i>Motor de carga</i>	39
2.2 Sistema Neumático e Hidráulico.....	39
2.2.1 El Sistema Neumático	39
2.2.2 El sistema Hidráulico	40
2.2.3 Sistema Hidráulico/Neumático	41

2.3	Sistema Electrónico	42
2.3.1	Sensores y Transductores	43
2.3.2.	Función de Movimiento para la Carga	46
2.4	Diagnóstico del Equipo	48
2.4.1	Funcionamiento Actual del Equipo	48
2.4.2	Identificación de los inconvenientes de funcionamiento	48
2.4.2.1.	Fiabilidad	48
2.4.2.2.	Fallas Funcionales	55
2.4.3	Procesos a Automatizar	61
Capítulo 3	Automatización del Proceso	62
3.1.	Descripción de los Procesos para Ensayos Triaxiales	62
3.2.	Consideraciones	66
3.3.	Adquisición de datos	68
3.4.	Adecuación de los Transductores para el Sistema de Adquisición de Datos	69
3.4.1.	Calibración de Transductores	69
3.4.1.1.	Calibración del Transductor de Desplazamiento	69
3.4.1.2.	Calibración del Transductor de Deformación de Carga	75
3.4.1.3.	Calibración del Transductor Volumétrico	80
3.4.1.4.	Calibración del Transductor de Presión	84
3.4.2.	Etapas de Acondicionamiento de Señal	88
3.5.	Diseño de la interfaz gráfica	97
3.5.1.	Arquitectura	97
3.5.2	Distribución de las pantallas	100
3.5.3.	Navegación	102
3.5.4.	Uso de Color	102
3.5.5.	Información Textual	104
3.5.6.	Formato de datos de salida e ingreso	105
Capítulo 4	Pruebas y Evaluación del Equipo Instalado	106
4.1.	Análisis de Datos	106
Capítulo 5	Análisis de Costos	109
5.1.	Inversión Inicial	109
	Materiales	109
	Mano de Obra	111

Transporte	111
Costos Indirectos.....	112
5.2. Capital de Trabajo	112
5.3. Activos.....	115
5.3.1. Activos Diferidos.....	115
5.3.2. Activos Fijos	116
5.4. Ingresos	117
5.5. Depreciación	118
5.6. Utilidad de Operación	119
5.8. Flujo de Caja	121
5.9. Análisis de Riesgo y Sensibilidad	122
5.9.1. TEMAR, TIR y VAN	122
5.9.2. Relación Costo – Beneficio.....	124
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones.....	126
6.1. Conclusiones.....	126
6.2. Recomendaciones	127
Referencias Bibliográficas	129
Capítulo 7 Anexos.....	130
ANEXO A. Plano Hidráulico	130
ANEXO B. Plano ISA.....	130
ANEXO C. Análisis de Fallas, efectos y criticidad	130
ANEXO D. Guía de Procedimientos	130
ANEXO D1. Guía de Procedimientos - TABLA	130
ANEXO E. Diseño PCB.....	130
ANEXO F. Facturas	130
ANEXO G. Ensayos.....	130
ANEXO H. Manual de Mantenimiento	130
ANEXO I. Manual del Usuario.....	130

Índice de Figuras

Figura 1. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb	12
Figura 2. Prueba triaxial consolidada-drenada: a) espécimen bajo presión de confinamiento en la cámara; b) aplicación del esfuerzo desviador	15
Figura 3. Prueba triaxial consolidada-drenada	19
Figura 4. Envolvente de falla por esfuerzo efectivo de pruebas drenadas en arena y arcilla normalmente consolidada	21
Figura 5. Envolvente de falla por esfuerzo efectivo para arcilla pre-consolidada.....	22
Figura 6. Prueba consolidada-no drenada:(a) espécimen bajo presión de confinamiento en la cámara; (b) cambio de volumen en el espécimen causado por la presión de confinamiento; (c) aplicación del esfuerzo desviador; (d) esfuerzo desviador versus deformación unitaria axial para arena suelta y arcilla normalmente consolidada; (e) esfuerzo desviador versus deformación unitaria axial para arena densa y arcilla preconsolidada; (f) variación de la presión del agua de poro con la deformación unitaria axial para arena suelta y arcilla normalmente consolidada; (g) variación de la presión de poro del agua con la deformación unitaria axial para arena densa y arcilla preconsolidada.	24
Figura 7. Envoltentes de falla del esfuerzo total y efectivo para pruebas triaxiales consolidadas- no drenadas. (Nota: la figura supone que no se aplica presión de regreso.)	26

Figura 8. Envolvente de falla del esfuerzo total obtenida en pruebas consolidadas-no drenadas en arcilla preconsolidada	28
Figura 9. Círculos de Mohr del esfuerzo total y envolvente de fallas ($\phi=0$) obtenidos en pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas.....	31
Figura 10. Diagrama General del Equipo	37
Figura 11. Diagrama de Entrada y Salidas del Sistema Electrónico.....	42
Figura 12. Bloque de Función Global para un Transductor de Volumen – Nivel 0.....	44
Figura 13. Bloque Funcional Transductor de Volumen - Nivel 1.....	44
Figura 14. Bloque Funcional Global de Transductor de Presión.....	45
Figura 15. Bloque Funcional Global de Transductor de Desplazamiento	45
Figura 16. Bloque Funcional Global de un Transductor de Deformación de Carga	46
Figura 17. Bloque Funcional Global del Movimiento para la Carga	46
Figura 18. Diagrama de Control del Motor	47
Figura 19. Diagrama de Sub-funciones.....	47
Figura 20. Distribución del Sistema para Ensayos UU	49
Figura 21. Distribución del Sistema para Ensayos CU y CD	50
Figura 22. Variación MTBF por Día.....	51
Figura 23. t hasta la Avería	53
Figura 24. Funciones de Fiabilidad	55
Figura 25. Diagrama Causa y Efecto - Ishikawa	57
Figura 26. Árbol de Falla - Presión de Confinamiento	58
Figura 27. Árbol de Falla - Cambio de Volumen.....	59
Figura 28. Árbol de Falla - Agua en Sistema Aire.....	60
Figura 29. Proceso Ensayo UU.....	63
Figura 30. Proceso Ensayo CU.....	64

Figura 31. Proceso Ensayo CD.....	65
Figura 32. Alternativas Unidad de Adquisición de Datos.....	66
Figura 33. Curva de Calibración – Deformímetro 1	73
Figura 34. Curva de Calibración - Deformímetro 2.....	74
Figura 35. Curva de Calibración Anillo de Carga.....	79
Figura 36. Curva de Calibración - Cambio Volumétrico.....	83
Figura 37. Curva de Calibración – Transductor de Presión	87
Figura 38. Procesamiento de Señal	88
Figura 39. Etapas de Procesamiento de Señal	89
Figura 40. Banda de Interés.....	95
Figura 41. Filtro Sallen-key	95
Figura 42. Diseño Filtro Anti-aliasing.....	96
Figura 43. Respuesta en Frecuencia Filtro Anti-aliasing	97
Figura 44. Mapa General de Navegación del Sistema	98
Figura 45. Distribución de las Pantallas - Nivel 1	100
Figura 46. Distribución de Pantallas - Subnivel 1	101
Figura 47. Distribución de Pantalla - Subnivel 2.....	102

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Metodología	5
Tabla 1.2. Especificaciones Prensa Triaxial digital de 50kN	9
Tabla 1.3. Valores teóricos de B con saturación completa	17
Tabla 2.1. Características Sistema de Producción y Distribución de Aire ...	39
Tabla 2.2. Características Sistema Hidráulico/Neumático	41
Tabla 2.3. Transductores	43
Tabla 2.4. MTBF por Día	51
Tabla 2.5. MTBF por Semana Completa	52
Tabla 2.6. MTTF	53
Tabla 3.1. Selección de Alternativas	67
Tabla 3.2. Características Banco de Calibración - Transductor de Desplazamiento	70
Tabla 3.3. Resultados calibración Transductor de Deformación	71
Tabla 3.4. Características Banco de Calibración - Transductor de Deformación de Carga	75
Tabla 3.5. Resultados Calibración Anillo Dinamométrico	77
Tabla 3.6. Características Banco de Calibración - Transductor Cambio de Volumen	80
Tabla 3.7. Resultados Calibración Transductor Volumétrico	82
Tabla 3.8. Características Banco de Calibración - Transductor de Presión	84
Tabla 3.9. Resultados Calibración Transductor de Presión	86
Tabla 3.10. Constantes para Diseño de Protección de Sobrecargas	91
Tabla 3.11. Clasificación de Filtros	92

Tabla 3.12. Datos Diseño Filtro Anti-aliasing.....	93
Tabla 3.13. Uso del Color - Fondos de Pantallas	103
Tabla 3.14. Uso del Color - Estatus de Equipos de Proceso	103
Tabla 3.15. Uso del Color - Alarmas.....	103
Tabla 3.16. Uso del Color - Señales Analógicas	103
Tabla 3.17. Uso del Color - Ítems Varios	104
Tabla 3.18. Unidades	105
Tabla 4.1. Valores Característicos UU, CU	106
Tabla 4.2. Resultados Ensayos Triaxiales.....	107
Tabla 5.1. Inversión Inicial.....	109
Tabla 5.2. Materiales	109
Tabla 5.3. Insumos y Repuestos	110
Tabla 5.4. Cerrajería.....	110
Tabla 5.5. Material Electrónico	110
Tabla 5.6. Mano de obra	111
Tabla 5.7. Transporte	111
Tabla 5.8. Costos Indirectos	112
Tabla 5.9. Capital de Trabajo	112
Tabla 5.10. Costos Variables Unitarios por Ensayo	113
Tabla 5.11. Capacidad para Realizar Ensayos Triaxiales	114
Tabla 5.12. Costos Variables Totales Ensayos Triaxiales.....	114
Tabla 5.13. Costos Fijos.....	115
Tabla 5.14. Activos Diferidos.....	115
Tabla 5.15. Activos Fijos	116

Tabla 5.16. Activos	117
Tabla 5.17. Presupuesto de Ingresos	117
Tabla 5.18. Depreciación.....	118
Tabla 5.19. Venta de Activos.....	119
Tabla 5.20. Utilidad de Operación	119
Tabla 5.21. Amortización Intangible	120
Tabla 5.22. Flujo de Caja	121
Tabla 5.23. Valor Actual Neto [VAN]	123
Tabla 5.24. Relación Costo - Beneficio [B/C]	124
Tabla 5.25. Resumen Análisis de Riesgo y Sensibilidad.....	125

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.1. Esfuerzo cortante sobre el plano de falla	11
Ecuación 1.2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb	11
Ecuación 1.3. Parámetro de la presión de poro de Skempton	16
Ecuación 1.4. Resistencia cortante.....	20
Ecuación 1.5. Parámetro de la presión de poro de Skempton	23
Ecuación 1.6. Envolvente del esfuerzo total de falla para arena y arcillas .	27
Ecuación 1.7. Línea recta a' b'	27
Ecuación 1.8. Parámetro \bar{A} de presión de poro de Skempton	28
Ecuación 1.9. Presión de poro del agua total	29
Ecuación 1.10. Presión de poro de agua total	30
Ecuación 1.11. Esfuerzo total	30
Ecuación 1.12. Área Promedio Inicial de la Muestra UU	31
Ecuación 1.13. Deformación Unitaria UU	32
Ecuación 1.14. Área Corregida.....	32
Ecuación 1.15. Esfuerzo Desviador.....	32
Ecuación 1.16. Diferencia de Esfuerzos Principales.....	33
Ecuación 1.17. Esfuerzo Principal Normal.....	33
Ecuación 1.18. Centro Círculo de Mohr	33
Ecuación 1.19. Radio Círculo de Mohr	33
Ecuación 1.20. Altura de la Muestra CU	34
Ecuación 1.21. Área de Muestra CU	34
Ecuación 1.22. Deformación Unitaria CU	35
Ecuación 1.23. Esfuerzo Principal Menor Efectivo	35

Ecuación 1.24. Esfuerzo Principal Normal Efectivo	35
Ecuación 3.1. Mínima variación de tensión analógica	68
Ecuación 3.2. Relación de señal a ruido SNR	93
Ecuación 3.3. Función de Transferencia - Respuesta en frecuencia.....	93
Ecuación 3.4. Frecuencia de Corte.....	94
Ecuación 3.5. Frecuencia de corte corregida.....	94
Ecuación 3.6. Factor de Corte	95
Ecuación 3.7. Factor Q	96
Ecuación 3.8. Diseño Filtro Anti-aliasing	96

Resumen

Se realizó una evaluación y mantenimiento completo de la prensa triaxial TRIAX 50, que realiza ensayos convencionales triaxiales para la determinación de características de esfuerzo-deformación y de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, encontrando dos parámetros importantes que son la cohesión y el ángulo de fricción. Los ensayos triaxiales se clasifican en ensayos No Consolidados No Drenados (UU), Consolidados No Drenados (CU) y Consolidados Drenados (CD), que simulan el comportamiento de los suelos cuando se proyecta construir una estructura sobre estos. En efecto, se determinó la función de fiabilidad del equipo e identificaron fallas funcionales y sus causas; así como también, el procedimiento adecuado para cada tipo de ensayo. Se adecuó un sistema de adquisición de datos y transductores de deformación, carga, presión de poros y cambio de volumen para la recolección de datos necesarios en el cálculo según el tipo de ensayo. Por consiguiente, cada señal tuvo su respectivo acondicionamiento y calibración. Además, se diseñó una interfaz gráfica amigable con el usuario según normas estandarizadas, que le permite navegar de forma rápida y sencilla. De esta manera, se visualizan los datos recolectados y los respectivos resultados en tiempo real. Los mismos que son reportados en informes (.xls), para su posterior análisis.

PALABRAS CLAVES: Ensayos Triaxiales, Círculos de Mohr, Acondicionamiento de Señal, Automatización, Fiabilidad.

Abstract

A full evaluation and maintenance of triaxial press TRIAX 50 have been done; Conventional triaxial tests are performed to determine important characteristics of load- strain and shear resistance of soil and two relevant parameters are calculated, which are cohesion and friction angle. Triaxial test are classified in Unconsolidated Undrained (UU), Consolidated Undrained (CU) and Consolidated Drained (CD), these tests simulate the behavior of soils when is needed to build a structure on them. In fact, Equipment reliability was estimated, also functional failures, their causes and appropriate processes for each test type were identified. A data acquisition system has been implemented with Strain, load, pore pressure and volume change transducers for the storage of the required data in the estimation of parameters, according to test type. Therefore, conditioning and calibration have been performed for each signal. In Addition, a friendly graphical user interface was designed according to a standardized rule that allows the user to navigate quickly and easily. In this manner, it allows visualization of the tests with real information and at the same time this data is recorded in reports (.xls) for subsequent analysis.

Capítulo 1

GENERALIDADES

Los ensayos triaxiales convencionales son usados para determinar las características de esfuerzo-deformación y de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Dónde el ensayo de compresión triaxial es el más usado y consiste en aplicar esfuerzos laterales y verticales diferentes, a probetas cilíndricas de suelo, permitiendo de esta manera estudiar su comportamiento. Es decir, la muestra es recortada o reconstruida en forma cilíndrica, revestida por una membrana impermeable, confinada mediante presión hidráulica dentro de una célula y finalmente sometida a una carga axial capaz de producir su rotura.

Es un ensayo complejo, pero la información que entrega es la más representativa del esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al ser cargada.

El ensayo se realiza en una cámara de pared transparente (cámara triaxial) llena de líquido, en la que se coloca la probeta cilíndrica de suelo que, salvo que se adopten precauciones especiales, tiene una altura igual a dos veces su diámetro, forrada con una membrana de caucho. Esta membrana va sujeta a un pedestal y a un cabezal sobre los que se apoyan los extremos de la probeta.

La Prensa Triaxial Digital de 50kN - TRIAX 50 posee un sistema que permite la realización de los ensayos triaxiales, a la cual, se adecuará un sistema de procesamiento de datos que permitirá la visualización de los ensayos realizados con datos verídicos y que a su vez se puedan guardar en un historial, este sistema estará conformado por: un conjunto de sensores de desplazamiento, presión y cambio volumétrico, una tarjeta DAQ, la cual se encargará de la adquisición de datos enviados por los sensores, y una computadora equipada con el software Labview, necesario para realizar el procesamiento de los datos obtenidos de los ensayos.

1.1. Planteamiento del Problema

El principal inconveniente que presenta el laboratorio de ensayo de materiales es la adquisición y procesamiento de datos por lo que se pretende mejorar la máquina TRIAX 50, en la cual la unidad de procesamiento de datos constantemente se avería o descalibra con cualquier leve variación de voltaje o corriente y, su reparación y calibración es altamente costosa ya que alcanza un valor de \$2500 y el reemplazo de esta unidad por una nueva cuesta \$6000 y el presupuesto del laboratorio es de apenas \$1800. Estos costos elevados se deben a que existe un único proveedor de este tipo de equipos aquí en el Ecuador, por esta razón se debe reemplazar por un sistema distinto que pueda presentar un procesamiento de datos más completo y disminuya los problemas que conlleva realizar los ensayos.

Es decir, el sistema debe permitir la visualización de los ensayos realizados con datos verídicos y que a su vez se puedan guardar en un historial.

1.2. Justificación del Problema

Debido a la gran importancia de los ensayos triaxiales y su complejidad es necesario hacer más fiable, rápido y preciso el proceso con el fin de evitar errores que podrían causar grandes pérdidas.

Con este proyecto se pretende facilitar el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos y abaratar los costos de calibración y mantenimiento que se realiza en la maquina TRIAX 50 .

El laboratorio de Ensayo de Materiales realiza trabajos externos para empresas privadas y públicas por lo que necesita realizar estas pruebas en menos tiempo pero con un nivel de fiabilidad aceptable.

1.3. Objetivo General

Desarrollar un sistema electrónico-informático para una Máquina de Pruebas Triaxiales que permita la adquisición de datos en aplicaciones de ensayos realizados, que se ajuste a los procedimientos del Laboratorio de

suelos, hormigones y asfalto, del Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción – ESPE.

1.4. Específicos

- Reducir el tiempo del ensayo en un 5% evitando el vaciado completo del reservorio de la máquina por medio de alertas que adviertan al usuario del nivel del mismo.
- Disminuir el consumo de agua en un 30% reutilizando el agua eliminada por los bladders por medio de una válvula hacia el reservorio.

1.5. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos se seguirá el ciclo de mejora continua de Deming o Ciclo PDCA. En donde las siglas **PDCA** son el acrónimo de las palabras inglesas *Plan, Do, Check, Act*, equivalentes en español a ***Planificar, Hacer, Verificar, y Actuar***.



Tabla 1.1. Metodología

PLANIFICAR	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación del proceso de la Máquina de Pruebas Triaxiales - Se Identificarán objetivos y procesos necesarios a ejecutar para el resultado final. - Planteamiento del problema. - Identificación de los Recursos con los que se cuenta, estudio de sensores y tipo de señal. - Recopilar datos para profundizar en el conocimiento del proceso y detallar las especificaciones de los resultados esperados. - Diseño de un sistema electrónico- informático que ofrezca ventajas, como: la recolección y procesamiento de gran cantidad de datos, obteniéndose mayor fiabilidad y precisión en los resultados.
HACER	<ul style="list-style-type: none"> - Implementación de los nuevos procesos y ejecución de las tareas programadas. - Diseño y selección del circuito de acondicionamiento de señal logrando en este punto la transformación de las señales analógicas a digitales. - Construcción del software que permitirá la captación, almacenamiento y visualización de los datos, procedentes de los ensayos realizados en la máquina de Pruebas Triaxiales.

CONTINÚA... 

	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar estrategias para la solución de problemas que se presenten.
VERIFICAR	<ul style="list-style-type: none"> - Pasado cierto tiempo, se volverá a recolectar datos de control para analizarlos y compararlos con los objetivos y especificaciones iniciales. - Durante todo el proceso, se monitoreará la implementación y se evaluará el plan de ejecución.
ACTUAR	<ul style="list-style-type: none"> - Se documentará todo el ciclo, y con base a los resultados arrojados se aplicarán nuevas mejoras. - Se estandarizarán las soluciones, con ello lograremos prevenir y reducir las incidencias futuras. - Se detallará un manual de usuario que permitirá un correcto funcionamiento del software.

Además se seguirán las reglas básicas para la Mejora Continua, las cuales son:

- No se puede mejorar nada que no se haya CONTROLADO
- No se puede controlar nada que no se haya MEDIDO
- No se puede medir nada que no se haya DEFINIDO
- No se puede definir nada que no se haya IDENTIFICADO

1.6. Marco Teórico

1.6.1. Calidad

La calidad es un término muy relativo; se pueden hacer muchas definiciones, y cada persona puede entenderla de una forma diferente.

(Miguel, 2010)

- Definiciones de Calidad por los grandes autores:
 - a) “Calidad total es el cumplimiento de los requerimientos, donde el sistema es la prevención, es estándar, es cero defectos”. (Philip B. Crosby)
 - b) “Calidad es ausencia de defectos de adecuarse al uso”. (Joseph M. Juran)
 - c) “Calidad es el grado predecible de uniformidad y fiabilidad a bajo costo y adecuado a las necesidades de los clientes”. (Edward Deming)
 - d) “Calidad es diseñar, producir y ofrecer un producto o servicio que sea útil, al mejor precio posible, y que siempre satisfaga las necesidades del cliente”. (Kaoro Ishikawa)

- La Mejora Continua

Consiste en la creación de un sistema organizado para conseguir cambios continuos para la solución de cualquier problema que den lugar a un aumento de la Calidad Total.

Existe gran cantidad de herramientas y técnicas que pueden ser utilizadas. Entre estas técnicas de mejora de la Calidad se encuentran los equipos de mejora y el ciclo de mejora continua. Deming establece que para mejorar la calidad, se tiene que utilizar el conocido como ciclo PDCA. Una vez finalizado el ciclo, este volverá a repetirse nuevamente partiendo del conocimiento acumulado en el anterior ciclo.

1.6.2. Prensa Triaxial Digital de 50kN - TRIAX 50

Descripción general

Este bastidor de carga digital incorpora un sistema de accionamiento controlado por microprocesador con un avanzado motor de velocidad gradual que permite al operador fijar fácilmente cualquier velocidad de ensayo mediante el teclado. Los límites superior e inferior de desplazamiento del plato se fijan utilizando disyuntores automáticos, con alarma sonora de sobrecarrera. Otras importantes características son la pausa y la puesta a cero de la velocidad durante el ensayo y el autodiagnóstico automático.

Especificaciones

Tabla 1.2. Especificaciones Prensa Triaxial digital de 50kN

Capacidad de carga	50 kN
Tamaño máx. de la muestra	100 mm de diámetro
Velocidad de tensión	De 0.00001 a 9.9999 mm/min
Velocidad de aprox. Rápida	25 mm/min
Distancia horizontal	380 mm
Distancia vertical máxima	850 mm
Diámetro del plato	160 mm
Recorrido máximo del plato	100 mm
Potencia del motor en W	250
Dimensiones totales	1.266 x 500 x 273 mm
Peso aproximado	95 kg

1.6.3. Esfuerzos Principales en tres ejes

Los esfuerzos principales corresponden a una orientación particular llamada dirección principal, de modo que los esfuerzos principales y la matriz original de esfuerzos corresponden al mismo contenido de esfuerzos en un cuerpo, ya que sólo cambia la orientación. (González, 2003)

Componente hidrostática y cortante del tensor de esfuerzo

En diferentes casos se consideran sólo las componentes de corte del tensor de esfuerzos. Para obtener estas componentes es necesario restar la componente hidrostática que está implícita en el tensor de esfuerzos. Es

decir, todo estado de esfuerzos puede descomponerse en un estado hidrostático y un estado donde todos los esfuerzos actuantes son cortantes, es decir:

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_C$$

Dónde: $\sigma_H =$ *Componente del esfuerzo hidrostático*

$\sigma_C =$ *Componente del esfuerzo cortante*

El componente hidrostático se calcula por:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$$

1.6.4. Resistencia cortante del suelo

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Se debe comprender la naturaleza de la resistencia cortante para analizar los problemas de la estabilidad del suelo, tales como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

1.6.5. Criterios de falla de Mohr- Coulomb

Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante. Así entonces, la relación funcional entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla se expresa en la forma:

Ecuación 1.1. Esfuerzo cortante sobre el plano de falla

$$\tau_f = f(\sigma)$$

Dónde: T_f = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

= esfuerzo normal sobre el plano de falla

La envolvente de falla definida por la Ecuación 1.1 es una línea curva, como muestra la Figura 1. Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal. (Coulomb, 1776) Esta relación se escribe como

Ecuación 1.2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

Dónde: c = cohesión

= ángulo de fricción interna

La ecuación precedente se llama criterio de falla de Mohr-Coulomb.

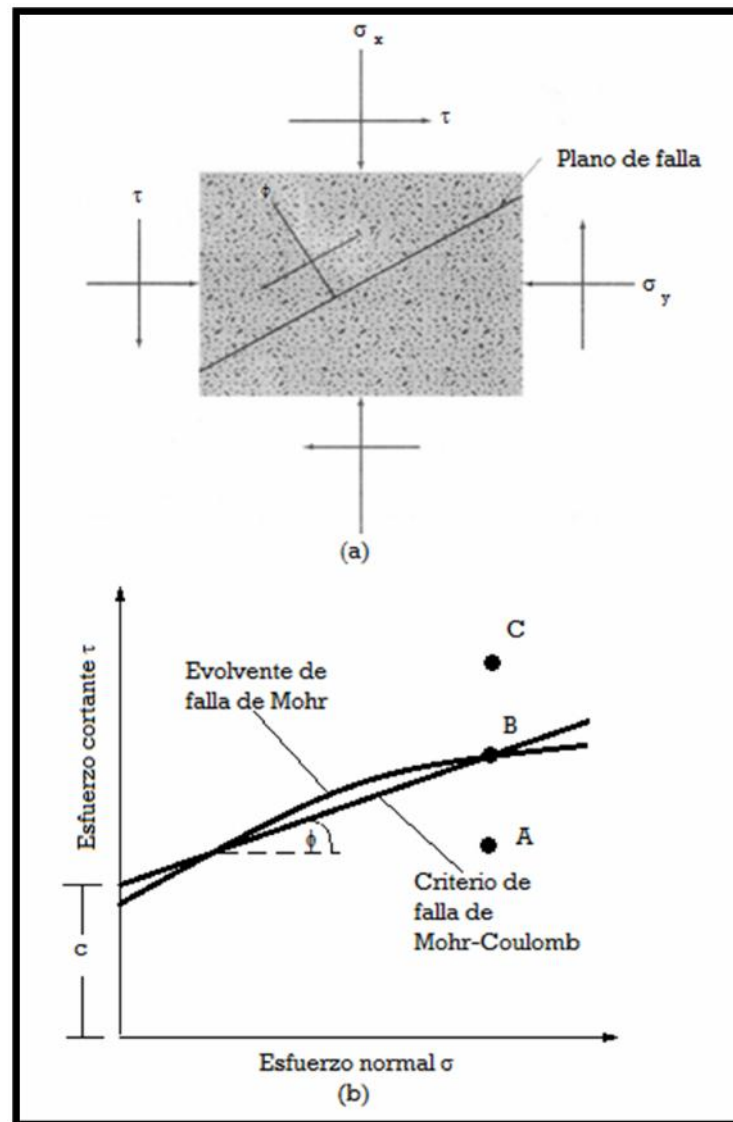


Figura 1. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb

FUENTE: (Peck, 1973)

El significado de la envolvente de falla se explica como sigue: si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A en la Figura 1, entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el

esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto B (que se encuentra sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Un estado de esfuerzo sobre un plano representado por el punto C no existe porque éste queda por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habría ocurrido en el suelo.

1.6.6. Prueba triaxial de corte

Las pruebas de Compresión Triaxial tienen el propósito de determinar las características de esfuerzo-deformación y resistencia de los suelos sujetos a esfuerzos cortantes, producidos cuando varían los esfuerzos principales que actúan sobre un espécimen cilíndrico del suelo de que se trate, la medición de las propiedades de resistencia del suelo en un ensayo triaxial fue investigada en detalla por Bishop y Henkel (1962). En los tipos más usuales del aparato de prueba, dos de los esfuerzos principales se producen por presión de un líquido que rodea el espécimen y, por lo tanto, son iguales.

La prueba triaxial de corte es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia cortante. Se usa ampliamente tanto para investigaciones como para pruebas convencionales.

La prueba se considera confiable por las siguientes razones:

- Proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación unitario del suelo, cosa que no hace la prueba de corte directo.

- Proporciona condiciones más uniformes de esfuerzo que la prueba de corte directo con sus concentraciones de esfuerzos a lo largo del plano de falla.
- Proporciona más flexibilidad en términos de trayectoria de carga.

El espécimen queda encerrado por una membrana delgada de hule y se coloca dentro de una cámara cilíndrica de plástico que se llena usualmente con agua o glicerina. El espécimen queda sometido a una presión de confinamiento por compresión del fluido en la cámara. (El aire es a veces usado como medio de compresión.) Para generar la falla cortante en el espécimen, se aplica un esfuerzo axial a través de un émbolo vertical de carga (llamado a veces esfuerzo desviador). El esfuerzo se suma en una de dos maneras:

- Aplicación de pesos muertos o presión hidráulica en incrementos iguales hasta que el espécimen falla. (La deformación axial del espécimen que resulta de la carga aplicada por medio del émbolo se mide con un micrómetro.)
- Aplicación de deformación axial a razón constante por medio de una prensa de carga con engranes o hidráulica. Ésta es una prueba por deformación unitaria controlada. La carga axial aplicada por el émbolo de carga correspondiente a una deformación axial dada es medida por un anillo de prueba o celda de carga unida al émbolo.

Se proporcionan también conexiones para medir el drenaje hacia dentro o hacia afuera del espécimen, o para medir la presión de poro del agua (según las condiciones de la prueba). Tres tipos estándar de pruebas triaxiales son generalmente llevadas a cabo:

- Prueba consolidada-drenada o prueba drenada (prueba CD)
- Prueba consolidada-no drenada (prueba CU)
- Prueba no consolidada-no drenada o prueba no drenada (prueba UU)

Los procedimientos e implicaciones generales para cada una de las pruebas en suelos saturados son descritos en las secciones siguientes.

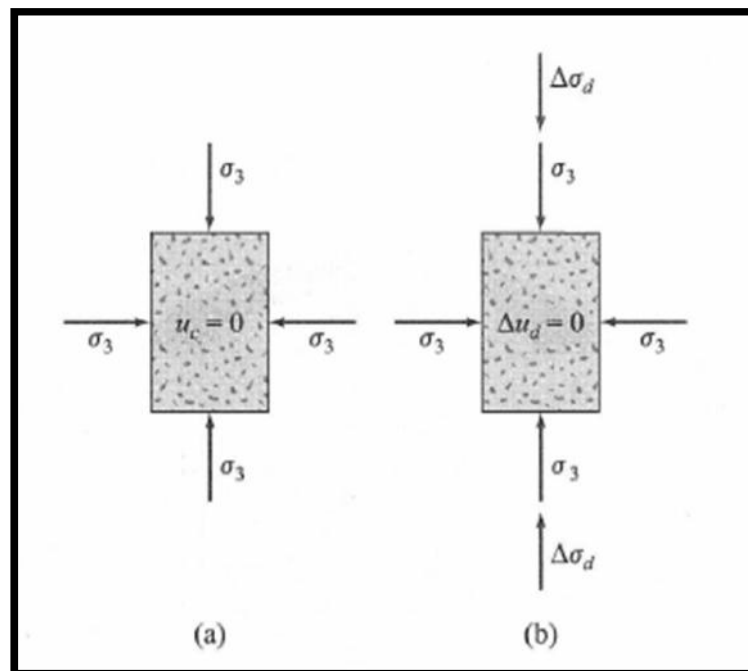


Figura 2. Prueba triaxial consolidada-drenada: a) espécimen bajo presión de confinamiento en la cámara; b) aplicación del esfuerzo desviador

FUENTE: (Peck, 1973)

1.6.7. Prueba consolidada – drenada

Cuando la construcción en el campo reposa sobre un depósito de arena o grava, la falla potencial se producirá en condiciones drenadas. Es posible que se presenten fallas en cortes medios en arcilla, varios años después de su construcción. Estas condiciones pueden simularse en un ensayo drenado. (Mecánica de suelos, pág. 195)

En la prueba consolidada-drenada regida por la norma ASTM D 7181-11, el espécimen se somete primero a una presión de confinamiento σ_3 a todo su alrededor mediante compresión del fluido de la cámara (Figura 2).

Conforme se aplica la presión de confinamiento, la presión de poro del agua del espécimen se incrementa en la cantidad u_c ; dicho aumento de la presión de poro del agua se expresa en forma de un parámetro adimensional:

Ecuación 1.3. Parámetro de la presión de poro de Skempton

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3}$$

Dónde: B = parámetro de la presión de poro de Skempton (Skempton, 1954).

Para suelos blandos saturados, B es aproximadamente igual a 1; sin embargo, para suelos firmes saturados, la magnitud de B es menor que 1. Black y Lee (1973) dieron valores teóricos de B para varios suelos completamente saturados, los cuales se dan en Tabla 1.3. Valores teóricos de B con saturación completa Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Valores teóricos de B con saturación completa

Tipo de Suelo	Valor teórico
Arcilla blanda normalmente consolidada	0.9998
Arcillas blandas ligeramente consolidadas y limos	0.9988
Arcillas firmes pre-consolidadas y arenas	0.9877
Arenas muy densas y arcillas muy firmes bajo altas presiones de confinamiento	0.9130

Cuando la conexión al drenaje se mantiene abierta, tiene lugar la disipación del exceso de presión de poro del agua, y por consiguiente la consolidación. Con el tiempo, u_c se volverá igual a 0. En suelo saturado, el cambio en el volumen del espécimen (V_c) que tiene lugar durante la consolidación se obtiene del volumen de agua de poro drenada.

(Figura 3). El esfuerzo desviador σ_d sobre el espécimen entonces es incrementado a una velocidad muy pequeña (Figura 2). La conexión al drenaje se mantiene abierta y la lenta velocidad de aplicación del esfuerzo desviador permite la completa disipación de cualquier presión de poro del agua que se desarrolle como consecuencia ($u_d = 0$).

Una gráfica típica de la variación del esfuerzo desviador versus la deformación unitaria en arena suelta y arcilla normalmente consolidada se muestra en la Figura 3 (b). La Figura 3 (c) muestra una gráfica similar para arena densa y arcilla preconsolidada. El cambio de volumen V_d en especímenes que ocurre debido a la aplicación del esfuerzo desviador en varios suelos se muestra también en la Figura 3 (d) y (e). Como la presión de poro del agua desarrollada durante la prueba es completamente disipada, tenemos:

$$\text{Esfuerzo de confinamiento total y efectivo} = \sigma_3 = \sigma'_3$$

Y,

$$\text{Esfuerzo axial total y efectivo en la falla} = \sigma_1 + (\sigma_d)_f = \sigma'_1$$

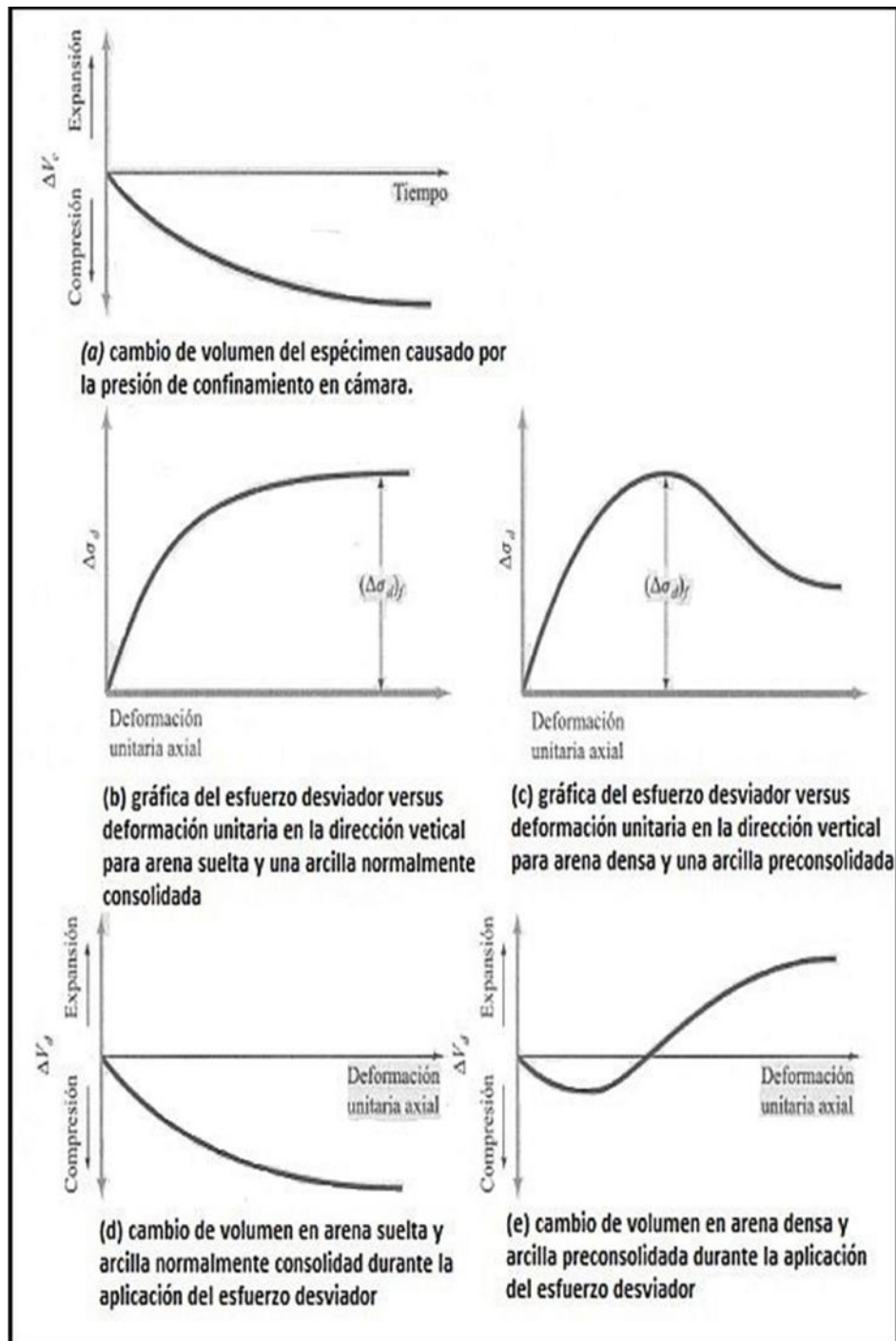


Figura 3. Prueba triaxial consolidada-drenada

FUENTE: (Peck, 1973)

En una prueba triaxial, σ'_1 es el esfuerzo efectivo principal mayor en la falla y σ'_3 es el esfuerzo efectivo principal menor en la falla.

Varias pruebas sobre especímenes similares se conducen variando la presión de confinamiento. Con los esfuerzos principales mayor y menor en la falla para cada prueba, se dibujan los círculos de Mohr y se obtienen las envolventes de falla. La Figura 4 muestra el tipo de envolvente de falla del esfuerzo efectivo obtenida para pruebas en arena y arcilla normalmente consolidada. Las coordenadas del punto de tangencia de la envolvente de falla con un círculo de Mohr (es decir, el punto A) da los esfuerzos (normal y cortante) sobre el plano de falla de ese espécimen de prueba.

La pre-consolidación resulta cuando una arcilla es inicialmente consolidada bajo una presión a todo su alrededor en la cámara de $\sigma'_c (= \sigma'_c)$ y se permite que se expanda cuando la presión de la cámara es reducida a $\sigma'_3 (= \sigma'_3)$. La envolvente de falla obtenida de pruebas triaxiales drenadas en tales especímenes de arcilla preconsolidada muestra dos ramas distintas (*ab* y *bc* en la Figura 5). La porción *ab* tiene una pendiente más plana con un valor de cohesión, y la ecuación de la resistencia cortante para esta rama se escribe como:

Ecuación 1.4. Resistencia cortante

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi_1$$

La porción bc de la envolvente de falla representa una etapa normalmente consolidada del suelo y obedece a la ecuación $\tau_f = \sigma' \tan \phi$.

Una prueba triaxial consolidada-drenada (CD) sobre un suelo arcilloso lleva varios días en terminarse; tiempo necesario para aplicar un esfuerzo desviador a muy poca velocidad y garantizar un drenaje completo del espécimen de suelo. Por esta razón, el tipo CD de prueba triaxial no es usada comúnmente.

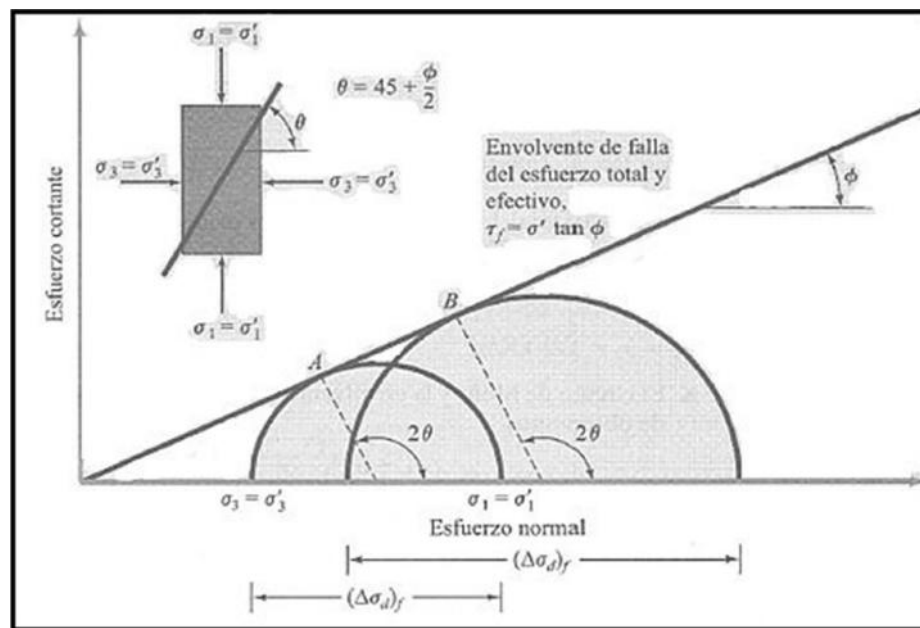


Figura 4. Envolvente de falla por esfuerzo efectivo de pruebas drenadas en arena y arcilla normalmente consolidada

FUENTE: (Peck, 1973)

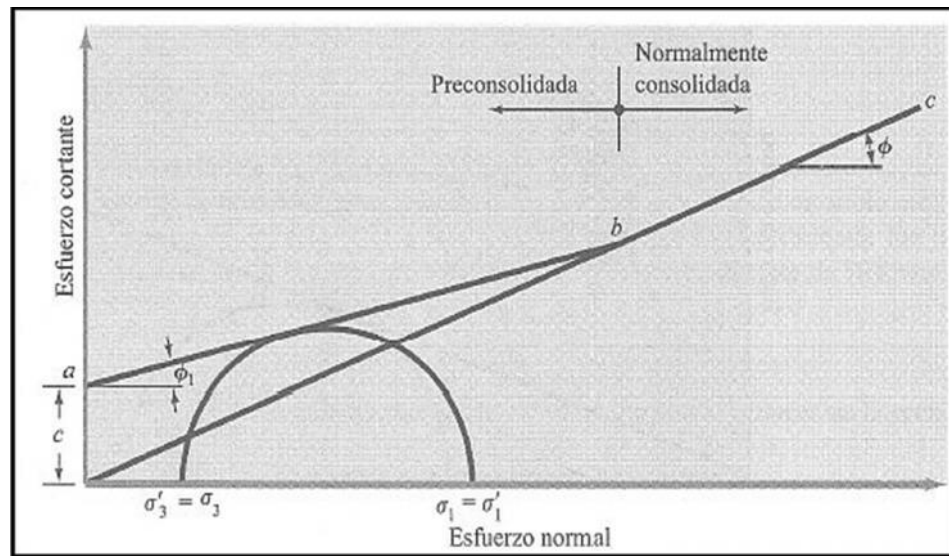


Figura 5. Envolvente de falla por esfuerzo efectivo para arcilla preconsolidada

FUENTE: (Peck, 1973)

1.6.8. Prueba consolidada –No drenada

La prueba consolidada-no drenada es el tipo más común de prueba triaxial y está regida por la norma ASTM D 4767-95. Se modela con el ensayo consolidado-no drenado cuando el tiempo de construcción es muy por largo, al final de la construcción ya se habrá producido algún grado de consolidación. Si en este momento los esfuerzos cortantes que se generan en el suelo tienen la magnitud suficiente para producir la falla, ésta se producirá rápidamente sin drenaje adicional.

En ésta, el espécimen de suelo saturado es primero consolidado por una presión en todo su alrededor σ_3 del fluido en la cámara, que resulta en drenaje. Después que la presión de poro del agua generada por la aplicación de la presión de confinamiento es completamente disipada (es decir, $U_c =$

B $\sigma_3 = 0$), el esfuerzo desviador $\Delta\sigma_d$ sobre el espécimen se incrementa para causar la falla cortante. Durante esta fase, la línea de drenaje desde el espécimen se mantiene cerrada. Como el drenaje no se permite, la presión de poro del agua σ_d y u_d crecerá.

Durante la prueba se hacen mediciones de σ_d y u_d . El incremento en la presión de poro del agua u_d se expresa en una forma adimensional como:

Ecuación 1.5. Parámetro de la presión de poro de Skempton

$$\bar{A} = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d}$$

Dónde: \bar{A} = parámetro de la presión de poro de Skempton (Skempton, 1954).

Los patrones generales de la variación de σ_d y u_d con la deformación unitaria axial para arenas y arcillas se muestran en la Figura 6 d, e, f y g.

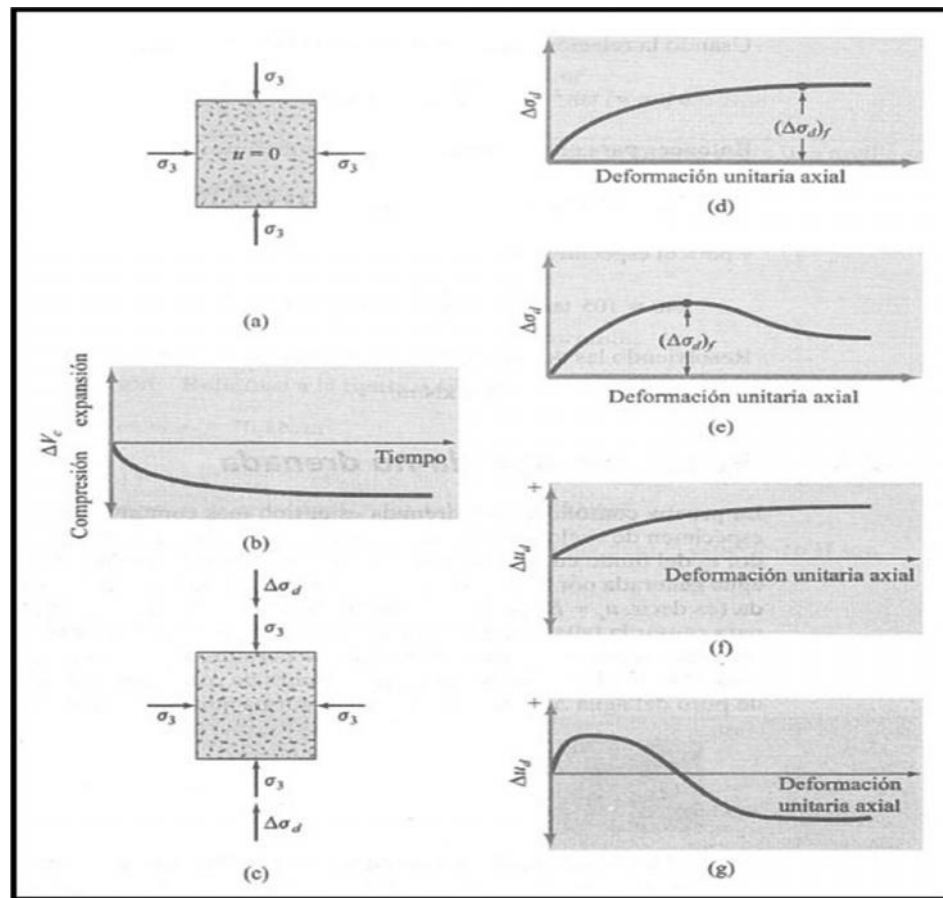


Figura 6. Prueba consolidada-no drenada:(a) espécimen bajo presión de confinamiento en la cámara; (b) cambio de volumen en el espécimen causado por la presión de confinamiento; (c) aplicación del esfuerzo desviador; (d) esfuerzo desviador versus deformación unitaria axial para arena suelta y arcilla normalmente consolidada; (e) esfuerzo desviador versus deformación unitaria axial para arena densa y arcilla preconsolidada; (f) variación de la presión del agua de poro con la deformación unitaria axial para arena suelta y arcilla normalmente consolidada; (g) variación de la presión de poro del agua con la deformación unitaria axial para arena densa y arcilla preconsolidada.

FUENTE: (Peck, 1973)

En arena suelta y arcilla normalmente consolidada, la presión de poro del agua se incrementa con la deformación unitaria. En arena densa y arcilla preconsolidada, la presión de poro del agua aumenta con la deformación unitaria hasta cierto límite, más allá del cual decrece y se vuelve negativa

(con respecto a la presión atmosférica), este comportamiento se debe a que el suelo tiene una tendencia a dilatarse.

A diferencia de la prueba consolidación-drenada, los esfuerzos: total y efectivo principal no son iguales en la prueba consolidada-no drenada. Como en esta prueba se mide la presión de poro en la falla, los esfuerzos principales se analizan como sigue:

- Esfuerzo principal mayor en la falla (total):

$$\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1$$

- Esfuerzo principal mayor en la falla (efectivo):

$$\sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_1$$

- Esfuerzo principal menor en la falla (total):

$$\sigma_3$$

- Esfuerzo principal menor en la falla (efectivo):

$$\sigma_3 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_3$$

Donde $(\Delta u_d)_f$ = presión de poro del agua en la falla. Las derivaciones precedentes muestran que

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

Pruebas sobre varios especímenes similares con diferentes presiones de confinamiento se efectúan para determinar los parámetros de resistencia cortante. La Figura 7 muestra los círculos de Mohr de los esfuerzos total y

efectivo en la falla obtenidos en pruebas triaxiales consolidadas-no drenadas en arena y arcilla normalmente consolidada. Note que A y B son dos círculos de Mohr de esfuerzo total obtenidos de dos pruebas.

C y D son los círculos de Mohr de esfuerzo efectivo correspondientes a los círculos A y B de esfuerzo total, respectivamente. Los diámetros de los círculos A y C son los mismos; similarmente, los diámetros de los B y D son iguales.

En la Figura 7, la envolvente del esfuerzo total de falla se obtiene dibujando la tangente a todos los círculos de Mohr del esfuerzo total.

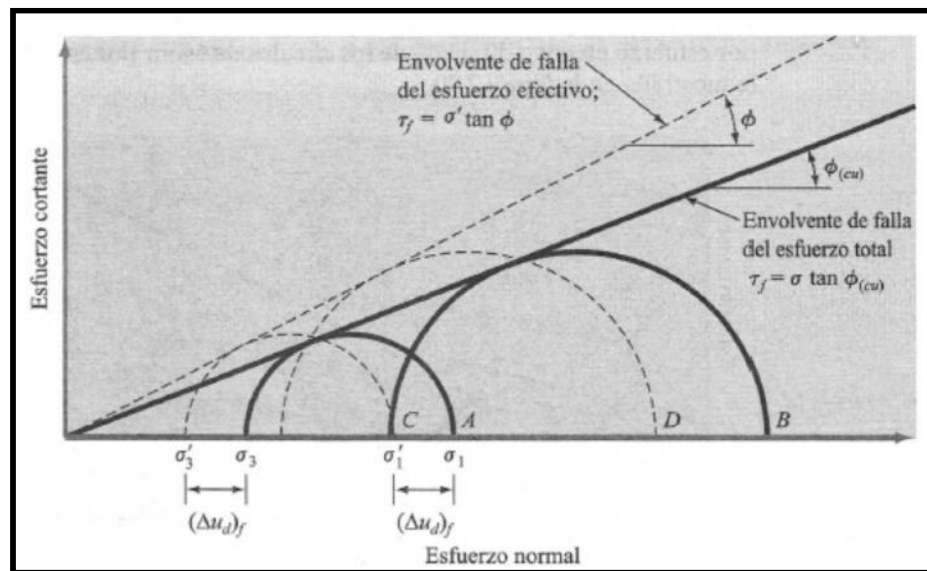


Figura 7. Envolventes de falla del esfuerzo total y efectivo para pruebas triaxiales consolidadas- no drenadas. (Nota: la figura supone que no se aplica presión de regreso.)

FUENTE: (Peck, 1973)

Para arena y arcillas normalmente consolidadas, esta línea será aproximada por una línea recta que pase por el origen y se expresa por la ecuación

Ecuación 1.6. Envolvente del esfuerzo total de falla para arena y arcillas

$$\tau_f = \sigma \tan \phi_{(cu)}$$

Donde σ = esfuerzo total

$\phi_{(cu)}$ = ángulo que forma la envolvente de falla del esfuerzo total con el eje del esfuerzo normal, también conocido como ángulo de resistencia cortante consolidada-no drenada

La Ecuación 1.6 es rara vez usada para consideraciones prácticas.

En arcillas pre-consolidadas, la envolvente de falla del esfuerzo total, obtenido en pruebas consolidadas-no drenadas, toma la forma mostrada en la Figura 8. La línea recta a' b' es representada por la ecuación

Ecuación 1.7. Línea recta a' b'

$$\tau_f = c_{(cu)} + \sigma \tan \phi_{(cu)}$$

y la línea recta b'c' sigue la relación dada por la Ecuación 1.6. La envolvente de falla por esfuerzo efectivo dibujada de los círculos de Mohr por esfuerzo efectivo es similar a la mostrada en la Figura 8.

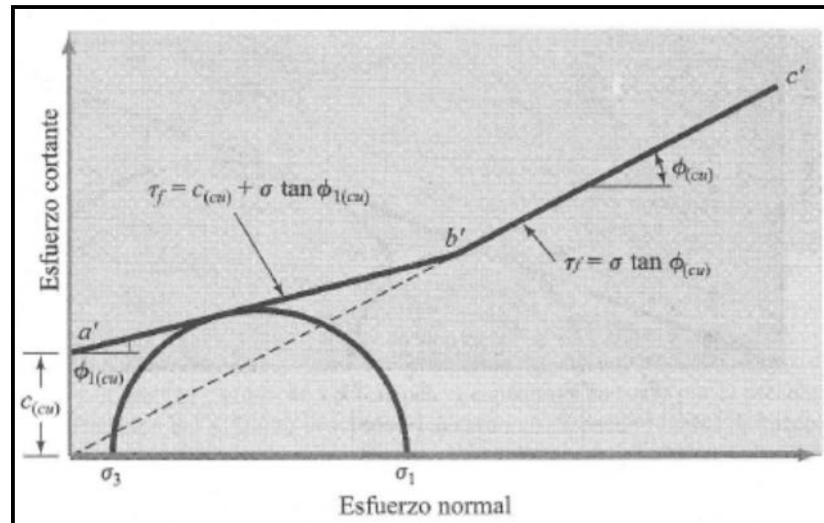


Figura 8. Envolvente de falla del esfuerzo total obtenida en pruebas consolidadas-no drenadas en arcilla preconsolidada

FUENTE: (Peck, 1973)

Las pruebas consolidadas-drenadas en suelos arcillosos toman un tiempo considerable. Por eso, las pruebas consolidadas-no drenadas deben realizarse en tales suelos con medición de la presión de poro para obtener los parámetros de resistencia cortante drenada. Como el drenaje no se permite en esas pruebas durante la aplicación del esfuerzo desviador, las pruebas deben efectuarse rápidamente.

El parámetro \bar{A} de presión de poro de Skempton fue definido en la Ecuación 1.5. En la falla, el parámetro \bar{A} se escribe como

Ecuación 1.8. Parámetro \bar{A} de presión de poro de Skempton

$$\bar{A} = \bar{A}_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f}$$

El rango general de valores de \bar{A}_f en la mayoría de los suelos de arcilla es como sigue:

- Arcillas normalmente consolidadas: 0.5 a 1
- Arcillas preconsolidadas: -0.5 a 0

1.6.9. Prueba No consolidada –No drenada

Este ensayo regido por la norma ASTM D 2850-03a, tiene aplicación en los análisis de estabilidad a corto plazo de obras construidas con o sobre depósitos de arcilla en los que se considera que el tiempo transcurrido hasta el final de la construcción es insuficiente para la disipación del exceso de presión intersticial. (*Mecánica de Suelos, pág 188*)

En las pruebas no consolidadas-no drenadas, el drenaje del espécimen de suelo no se permite durante la aplicación de la presión de la cámara σ_3 . El espécimen de prueba es cortado a la falla por la aplicación del esfuerzo desviador $\Delta\sigma$ sin permitirse el drenaje.

Como el drenaje no se permite en ninguna etapa, la prueba se lleva a cabo muy rápidamente. Debido a la aplicación de la presión de confinamiento en la cámara σ_3 , la presión de poro del agua en el espécimen de suelo se incrementará una cantidad u_c . Habrá un aumento adicional en la presión de poro Δu , debido a la aplicación del esfuerzo desviador. Por consiguiente, la presión de poro del agua total u en el espécimen en cualquier etapa de la aplicación del esfuerzo desviador se da como

Ecuación 1.9. Presión de poro del agua total

$$u = u_c + \Delta u_d$$

De las Ecuación 1.3 y Ecuación 1.5, tenemos $u_c = B\sigma_3$ y $\Delta u_d = \bar{A} \Delta\sigma_d$, por lo que

Ecuación 1.10. Presión de poro de agua total

$$u = B * \sigma_3 + \bar{A} * \Delta\sigma_d = B * \sigma_3 + \bar{A} * (\sigma_1 - \sigma_3) = \bar{A} * \sigma_1 + \sigma_3 * (B - \bar{A})$$

La prueba no consolidada-no drenada es usualmente llevada a cabo sobre especímenes de arcilla y depende de un concepto de resistencia muy importante para los suelos cohesivos saturados. El esfuerzo axial agregado en la falla $(\Delta\sigma_d)_f$ es prácticamente el mismo independientemente de la presión de confinamiento en la cámara, como muestra la Figura 9. La envolvente de falla para los círculos de Mohr del esfuerzo total se vuelve una línea horizontal y por consiguiente se llama una condición de $\phi = 0$ y

Ecuación 1.11. Esfuerzo total

$$\tau_f = c_u$$

Dónde: C_u es la resistencia cortante no drenada y es igual al radio de los círculos de Mohr.

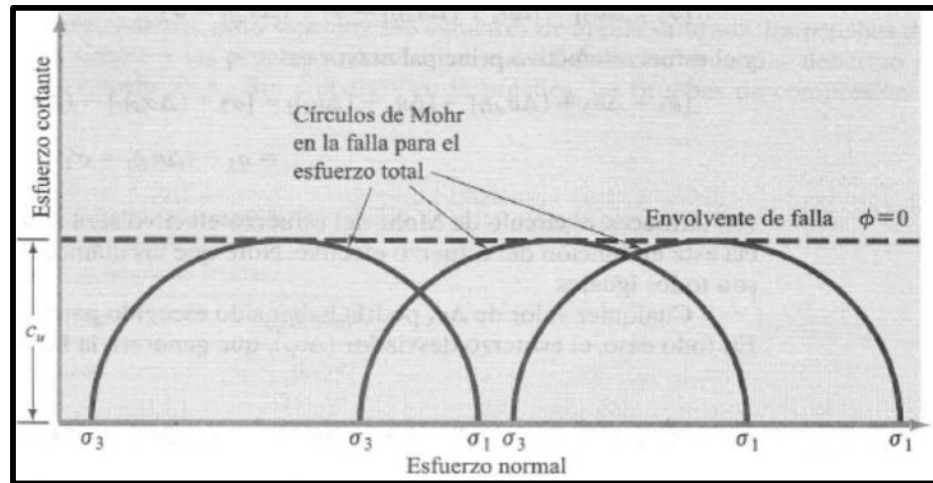


Figura 9. Círculos de Mohr del esfuerzo total y envolvente de fallas ($\phi=0$) obtenidos en pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas.

FUENTE: (Peck, 1973)

1.6.10. Cálculos

Los datos iniciales que tenemos para los cálculos son las características físicas de la muestra que son: altura, diámetro superior, diámetro inferior, diámetro medio y su peso.

1.6.10.1. Ensayo No Consolidación No Drenado (UU)

- Área promedio inicial de la muestra

Ecuación 1.12. Área Promedio Inicial de la Muestra UU

$$A_0 = \frac{A_S + 4 * A_m + A_i}{6}$$

Dónde, A_S = Área superior, A_m = Área medio, A_i =Área inferior.

$$A = \pi * \frac{D^2}{4}$$

- Deformación Unitaria

Ecuación 1.13. Deformación Unitaria UU

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon}{H_0} * 100$$

Dónde, ε = deformación (medida transductor de deformación mm),
 H_0 = altura inicial.

- Área Corregida, es el área promedio de la sección transversal para una carga dada.

Ecuación 1.14. Área Corregida

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\varepsilon_u}{100}\right)}$$

Dónde, A_0 =área promedio inicial, ε_u = deformación unitaria.

- Esfuerzo Desviador

Ecuación 1.15. Esfuerzo Desviador

$$\Delta\sigma = \frac{F}{A}$$

Dónde, F = Es la carga desviadora aplicada en Kg (Medida Transductor de Carga), A = área corregida.

- Esfuerzos Principales

Ecuación 1.16. Diferencia de Esfuerzos Principales

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$$

El esfuerzo principal normal, se calcula a partir del esfuerzo desviador y del esfuerzo principal hidrostático o esfuerzo principal menor

$$\sigma_3 = \text{Presión de Confinamiento [Kg,Kg/cm}^2\text{]}$$

Por tanto,

Ecuación 1.17. Esfuerzo Principal Normal

$$\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_3$$

- Centro y Radio del Círculo de Mohr

Se calcula a partir de los esfuerzos principales, de esta manera, se representa:

Ecuación 1.18. Centro Círculo de Mohr

$$\text{Centro} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Ecuación 1.19. Radio Círculo de Mohr

$$\text{Radio} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

- Ángulo de Fricción y Cohesión

Estos parámetros se obtienen al trazar una recta tangente a los círculos de Mohr de tres ensayos distintos. Siendo la cohesión la ordenada al origen de la recta (esfuerzo cortante) y el ángulo de fricción la pendiente de la misma. Ecuación 1.4

1.6.10.2. Ensayo Consolidado No Drenado (CU)

Las características físicas para el cálculo en la etapa de corte, se dan a partir de la etapa de saturación y consolidación.

- Altura

Ecuación 1.20. Altura de la Muestra CU

$$h_c = h_0 - \Delta h_c - \Delta h_s$$

Dónde, h_c = altura después de la consolidación, Δh_c =variación de altura en la consolidación, Δh_s = variación de altura en la saturación, h_0 = altura inicial.

- Área de la Muestra

Ecuación 1.21. Área de Muestra CU

$$A_c = \frac{V_0 - \Delta V_{SAT} - \Delta V_C}{h_c}$$

Dónde, V_0 = Volumen inicial, ΔV_{SAT} = variación volumen de la saturación, ΔV_C = variación volumen de consolidación, h_c = altura después de la consolidación

- Deformación Unitaria

Ecuación 1.22. Deformación Unitaria CU

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon}{h_c} * 100$$

- Área Corregida

Se calcula igual a la Ecuación 1.14

- Esfuerzo Desviador

Se calcula igual a la Ecuación 1.15

- Esfuerzo Principal Menor Efectivo

Ecuación 1.23. Esfuerzo Principal Menor Efectivo

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Dónde: σ_3 = esfuerzo principal menor total, u = presión de poros inducida, menos la presión de contrapresión.

- Esfuerzo Principal Normal

Se calcula igual a la Ecuación 1.17

- Esfuerzo Principal Normal Efectivo

Ecuación 1.24. Esfuerzo Principal Normal Efectivo

$$\sigma'_1 = \Delta\sigma + \sigma'_3$$

- Ángulo de Fricción y Cohesión

Se realiza el mismo método que en el Ensayo No Consolidado No Drenado, pero tomando en cuenta también los esfuerzos principales efectivos.

1.6.10.3. Ensayo Consolidado Drenado (CD)

Se realiza los mismos cálculos que en el CU, pero asumiendo una presión de poros igual a cero. ($u=0$)

Capítulo 2

Descripción y diagnóstico de la Máquina

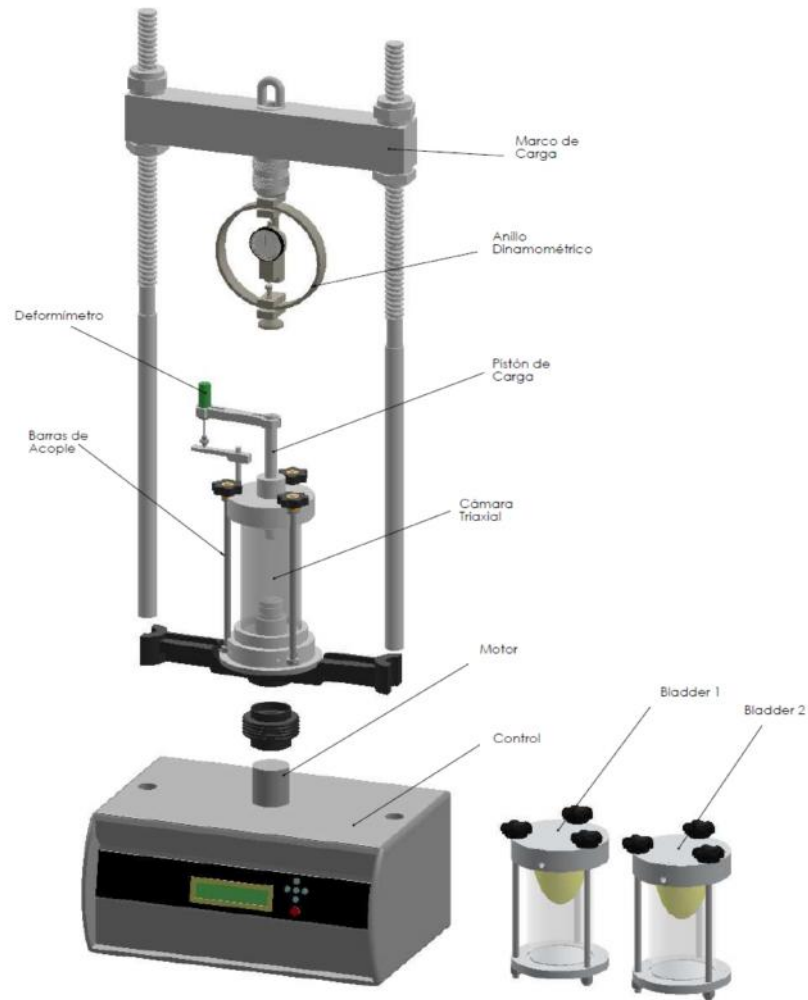


Figura 10 Diagrama General del Equipo

En el presente capítulo se pretende detallar las características de los sistemas tanto de la máquina como de los que se van a implementar. Esto permitirá tener claro el funcionamiento de toda la máquina así como sus limitaciones y deficiencias. Además se analizará las posibles causas de errores en los ensayos.

2.1 Sistema Mecánico

El funcionamiento principal de este sistema es equivalente al de una prensa mecánica ejerciendo una fuerza normal a la superficie de contacto.

En la Máquina TRIAX 50 este sistema está conformado por:

VER Figura 10 Diagrama General del Equipo

a) *Marco de Carga*

Consta de dos columnas paralelas con una viga transversal que puede desplazarse y una base fija.

b) *Pistón de Carga*

Es el encargado de ejercer la fuerza sobre un extremo de la muestra de suelo.

c) *Celda Triaxial*

Es una cámara cilíndrica hecha a base de policarbonato transparente en la cual se coloca la muestra. Esta celda se llena con agua para dar una presión de confinamiento a la muestra.

La base de la celda tiene cuatro puntos de entrada para la contrapresión/drenaje superior, presión de la celda y presión de agua intersticial /drenaje inferior.

d) *Barras de acoplamiento*

Sirven para asegurar la Celda Triaxial a la base del marco de carga.

e) *Motor de carga*

Se encarga de ejercer la fuerza sobre la muestra en el extremo opuesto al pistón de carga. Especificaciones Tabla 2.1

2.2 Sistema Neumático e Hidráulico

El Equipo Triaxial posee un sistema neumático e hidráulico que se encarga de generar las presiones necesarias para los distintos ensayos triaxiales.

2.2.1 El Sistema Neumático

VER ANEXO A – Sección C

a) Sistema de Producción y Distribución de Aire

En este sistema encontramos una unidad compresora.

Tabla 2.1. Características Sistema de Producción y Distribución de Aire

Capacidad Unidad Compresora	10 bar
Caudal máximo	255 l/min
Potencia del motor	2 HP
Reservorio	50 l
Peso aproximado	44 kg
Alimentación	110 v

b) Sistema de Consumo de Aire o Utilización

En el sistema de consumo de aire o utilización consta de un regulador de presión y un manómetro de 4 entradas/salidas

c) Sistemas de desaireación de agua

Tanque de desaireación, bomba de vacío adaptada y colector de agua para recoger el vapor de agua condensado.

2.2.2 El sistema Hidráulico

VER ANEXO A – Sección A

a) Depósito hidráulico de metacrilato

El cual también permite la desaireación del agua, está equipado por una entrada/salida de agua y una salida de aire. El tanque de agua se coloca elevado para que el sistema se llene por gravedad.

b) Elementos de control

Se utiliza válvulas de compuerta para regular la puesta en marcha y el paro.

c) Dos líneas independientes

Para mantener la presión constante deseada en el interior de la celda triaxial (sistema de presión de la célula) y la línea de drenaje de muestras (sistema de contrapresión).

d) Paneles de medición

Específicamente diseñados para la medición de la presión de confinamiento o la contrapresión

e) Panel de distribución

Compuesto por 5 válvulas de entrada y salida de cambio no volumétrico, instaladas en un panel montado en la pared.

2.2.3 Sistema Hidráulico/Neumático

También llamado “Bladder”, este permite la regulación de la presión de confinamiento ejercida sobre la muestra. La presión es generada por el sistema neumático y aquí es donde se trasmite la misma por el sistema hidráulico hacia la Celda Triaxial, para suministros de agua presurizada a células triaxiales.

Al inflarse el bladder este presiona el agua ejerciendo una carga sobre la misma y esta carga es transmitida por el agua hacia la cámara triaxial.

Especificaciones Tabla 2.2

Tabla 2.2. Características Sistema Hidráulico/Neumático

Presión máxima	600 kPa
Reservorio	7 l

2.3 Sistema Electrónico

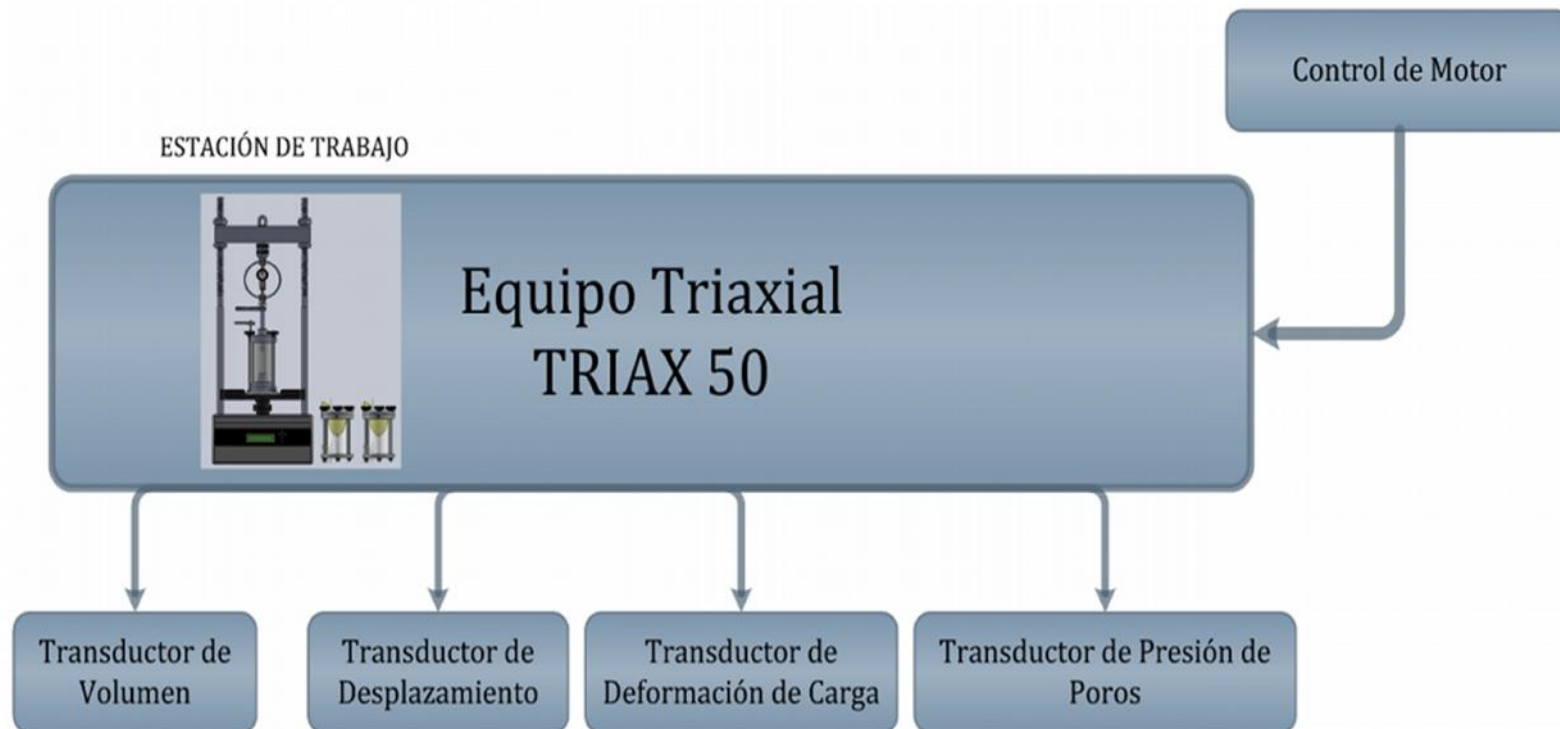
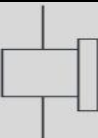
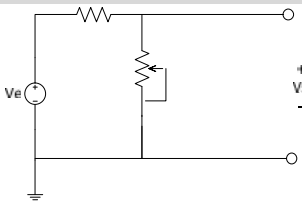
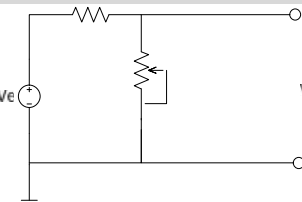
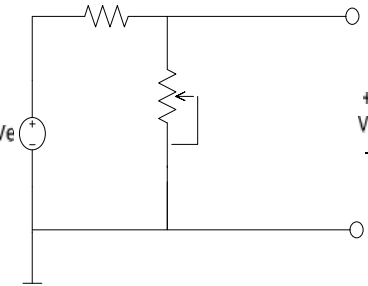
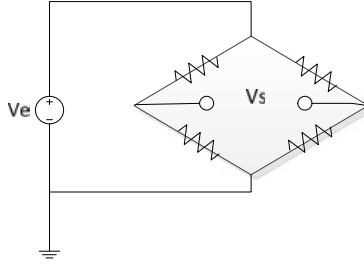


Figura 11. Diagrama de Entrada y Salidas del Sistema Electrónico

2.3.1 Sensores y Transductores

La máquina TRIAX 50 cuenta ya con varios transductores incorporados.

Tabla 2.3 Transductores

Transductores		
		
Modelo	82-P0332	
Marca	CONTROLS	
Magnitud a medir	Deformación	
Alimentación	10V dc	
Recorrido	25mm	
Modelo	T-1002/E	
Marca	CONTROLS	
Magnitud a medir	Carga	
Alimentación	10V dc	
Carga Máxima	2 kN	
Modelo	T484-110	
Marca	CONTROLS	
Magnitud a medir	Variación de volumen	
Alimentación	10V dc	
Volumen máximo	100 cm ³	
Modelo	625F	
Marca	BCM	
Magnitud a medir	Presión	
Alimentación	10V dc	
Presión máxima	10 bar	

a) Transductor de cambio de volumen T484-110

Consta de un deformímetro acoplado al émbolo de un cilindro de doble efecto.

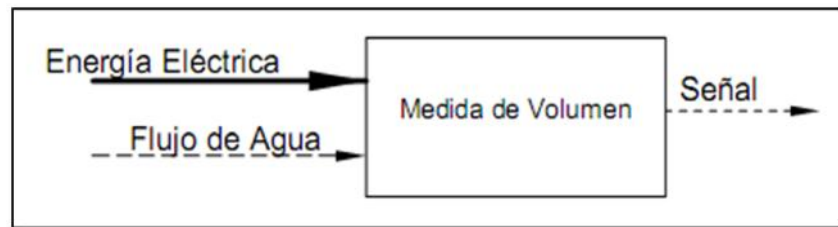


Figura 12. Bloque de Función Global para un Transductor de Volumen – Nivel 0

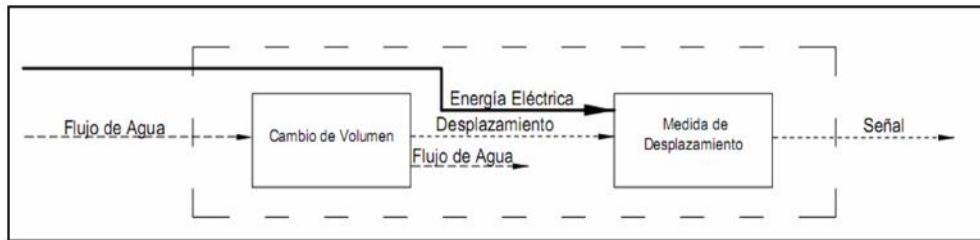


Figura 13. Bloque Funcional Transductor de Volumen - Nivel 1

b) Transductor de Presión BCM 625F

Convierte la presión intersticial de la muestra en un valor de voltaje.

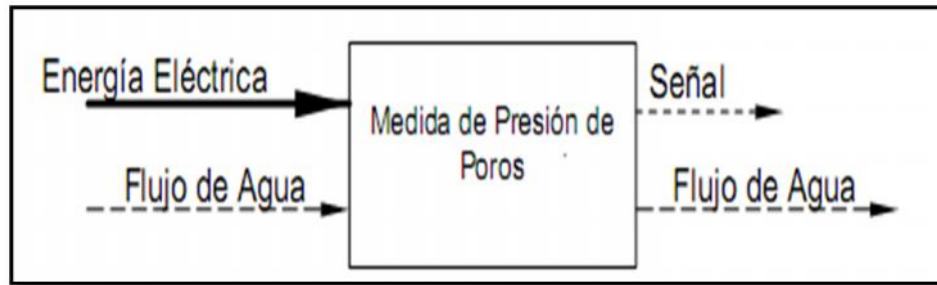


Figura 14. Bloque Funcional Global de Transductor de Presión

- c) Transductor de Deformación Controls 82-P0332

Convierte la deformación en un valor de voltaje.

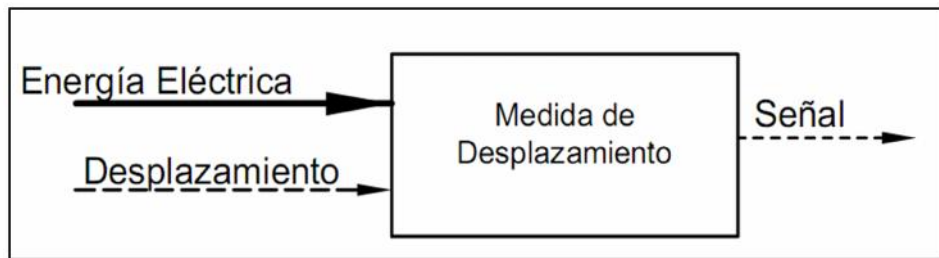


Figura 15. Bloque Funcional Global de Transductor de Desplazamiento

- d) Transductor de Deformación de Carga Controls 82-T1001

Convierte la carga en un valor de voltaje.

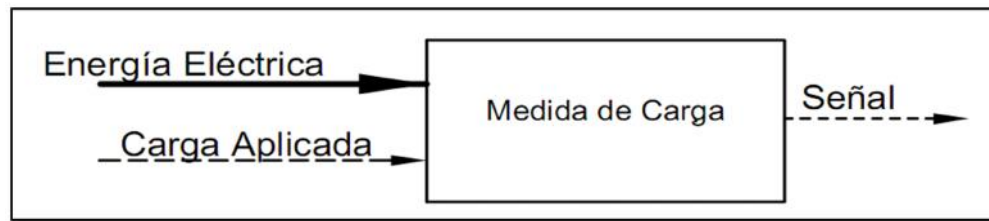


Figura 16. Bloque Funcional Global de un Transductor de Deformación de Carga

2.3.2. Función de Movimiento para la Carga

Para someter la muestra a esfuerzos axiales se requiere un motor, cuyo control está enfocado a mantener una velocidad constante durante todo el ensayo.

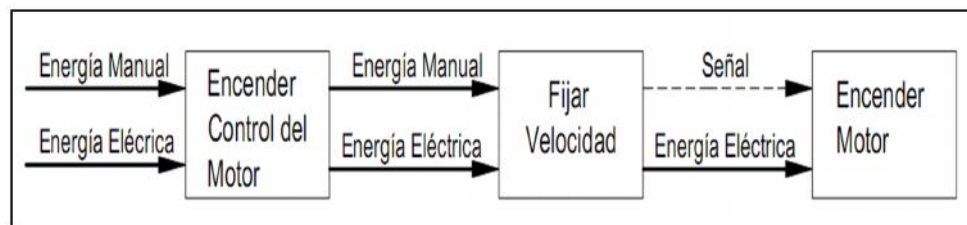


Figura 17. Bloque Funcional Global del Movimiento para la Carga

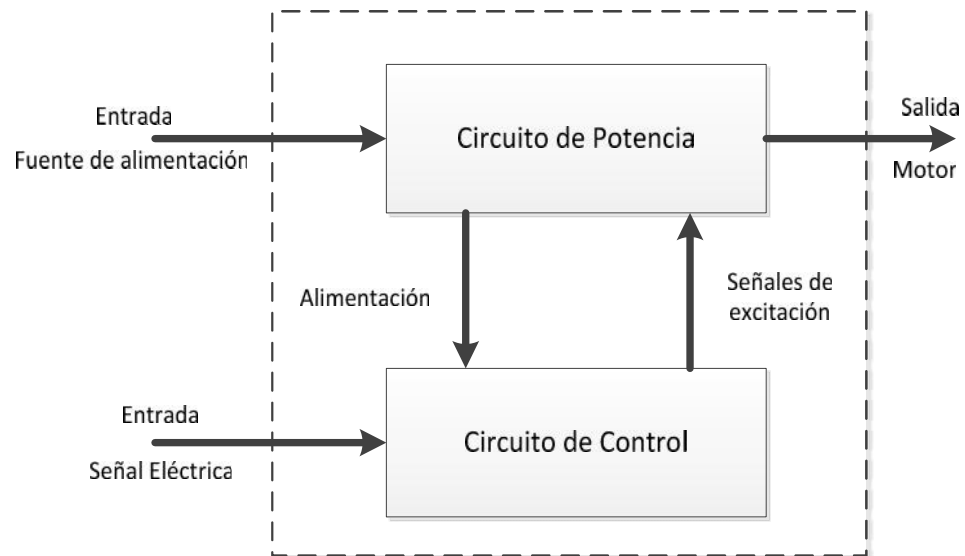


Figura 18. Diagrama de Control del Motor

Para el control del motor se tienen las siguientes sub-funciones.

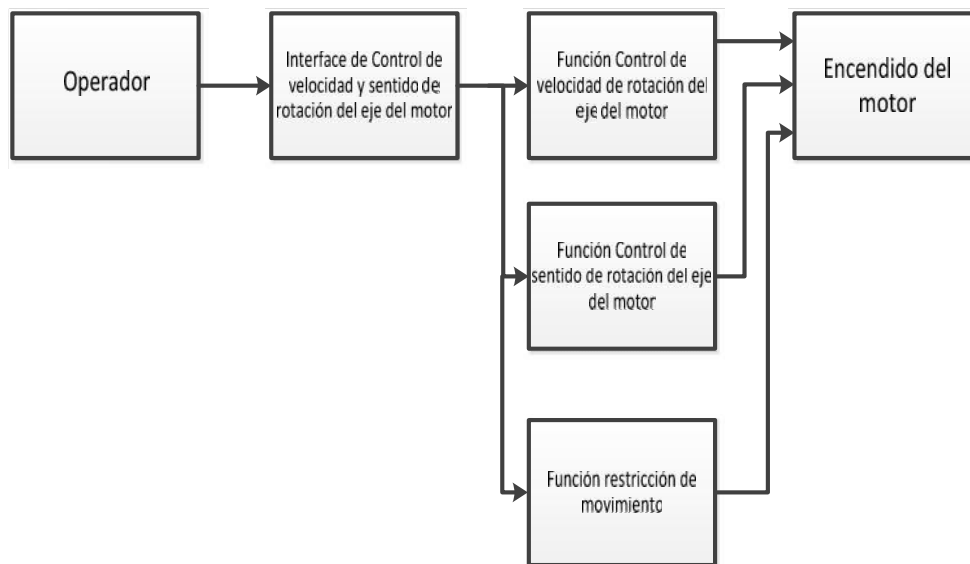


Figura 19. Diagrama de Sub-funciones

2.4 Diagnóstico del Equipo

2.4.1 Funcionamiento Actual del Equipo

La adquisición de datos se la realizaba inicialmente con un aparato electrónico (Universal Datalogger), el cual mostraba averías que no podían recibir un mantenimiento oportuno a las necesidades del laboratorio, razón por la cual quedó en desuso. De esta manera, los ensayos se los realizaba manualmente, donde un operario anota los datos obtenidos según el formato.

2.4.2 Identificación de los inconvenientes de funcionamiento

2.4.2.1. Fiabilidad

El concepto de Fiabilidad o también llamada probabilidad de supervivencia, se entiende como la probabilidad de que un sistema, elemento o dispositivo cumpla su función dentro de determinado tiempo y bajo condiciones establecidas. Así, para determinar la fiabilidad de un sistema, elemento o dispositivo se parte de la probabilidad de ocurrencia de una falla en el mismo.

Para determinar fallas en el Sistema, el equipo se divide en los siguientes elementos sujetos a carga de trabajo.

Elementos:

1. Compresor
2. Sistema Aire/Agua "Bladder"
3. Cámara Triaxial
4. Motor

La fiabilidad del sistema se calcula a partir de las fiabilidades de sus componentes, por ello, de acuerdo a las características del sistema para cada ensayo se los ha distribuido como se muestra a continuación:

Ensayos UU: Para los ensayos UU, los componentes tienen una distribución en serie (Sistema que funciona sí, y solo sí, todos los componentes funcionan correctamente), y una distribución en paralelo (Existe más de un componente para cumplir con la función dada) en el sistema aire/agua.

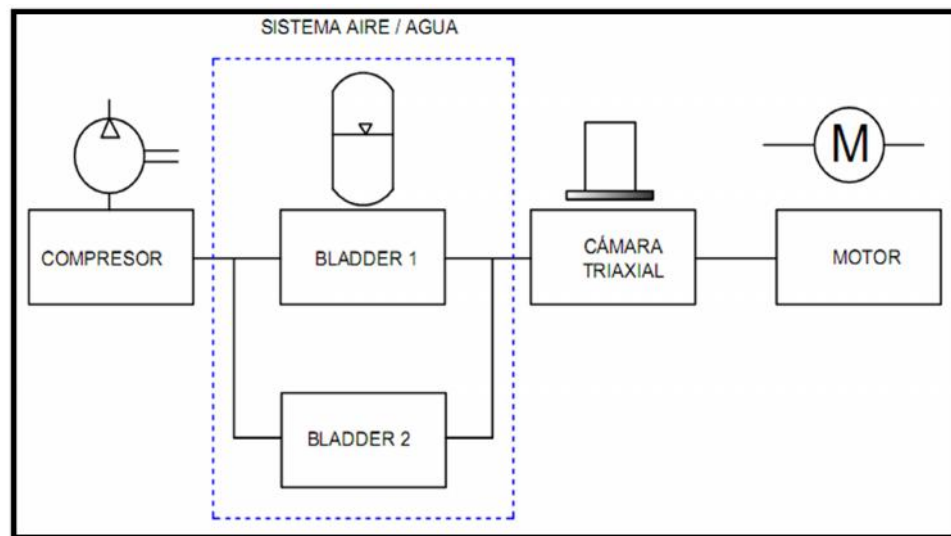


Figura 20. Distribución del Sistema para Ensayos UU

Ensayos CU y CD: para los ensayos CU y CD, los componentes están distribuidos en serie.

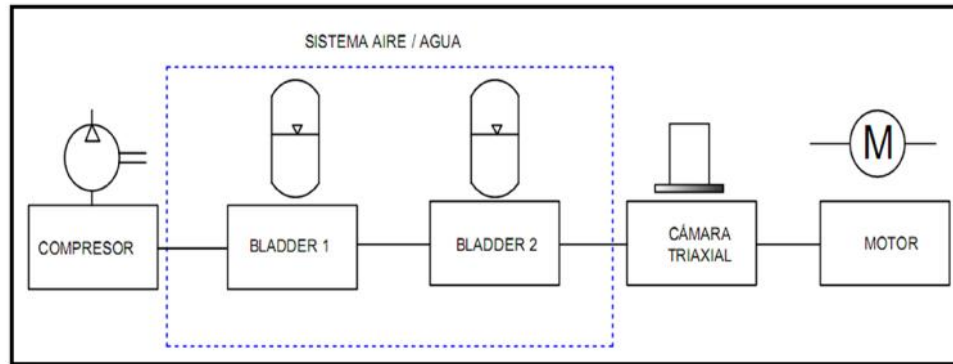


Figura 21. Distribución del Sistema para Ensayos CU y CD

La fiabilidad del equipo parte de la fiabilidad de sus componentes y depende de la distribución de los mismos.

Tiempo medio entre fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas se considera como el tiempo medio transcurrido entre dos fallas consecutivas y está dado por:

$$MTBF = \frac{T}{\bar{n}}$$

Dónde:

T = tiempo de operación

\bar{n} = número medio de averías

$$\bar{n} = \sum_{i=0}^N \frac{ni}{N}, ni = \text{averías}, N = \text{\#elementos}$$

De esta manera, se analizó la variación del MTBF considerando los 4 elementos del sistema y la carga de trabajo por día y por semana completa.

Tabla 2.4. MTBF por Día

Día	MTBF	
	Min	h
1	1920	32
2	2040	34
3	1800	30
4	560	9.33
5	360	6

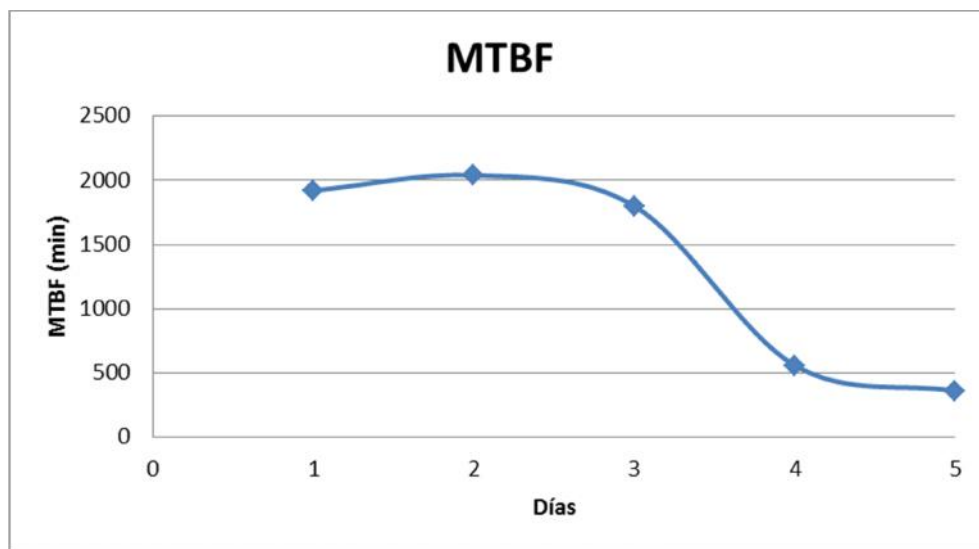


Figura 22. Variación MTBF por Día

Tabla 2.5. MTBF por Semana Completa

N	4		
Día	T	Averías	n/N
	min	N	
1	480.00	1.00	0.25
2	510.00	1.00	0.25
3	450.00	1.00	0.25
4	420.00	3.00	0.75
5	180.00	2.00	0.5
Total	2040.0	8.00	2.00
	0		
MTBF (min)			1020

Tiempo medio hasta la avería (MTTF)

Parámetro que también permite especificar la calidad de un componente o sistema, y esta expresado por:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

Para determinar el valor de MTTF se somete N veces al elemento a carga de trabajo y se mide el tiempo hasta que se produzca una avería. Logrando de esta manera un valor igual a 93.86 minutos.

Tabla 2.6. MTTF

N°	t
	Min
1	78
2	50
3	45
4	40
5	243
6	21
7	180
Total	657
MTTF	93.86

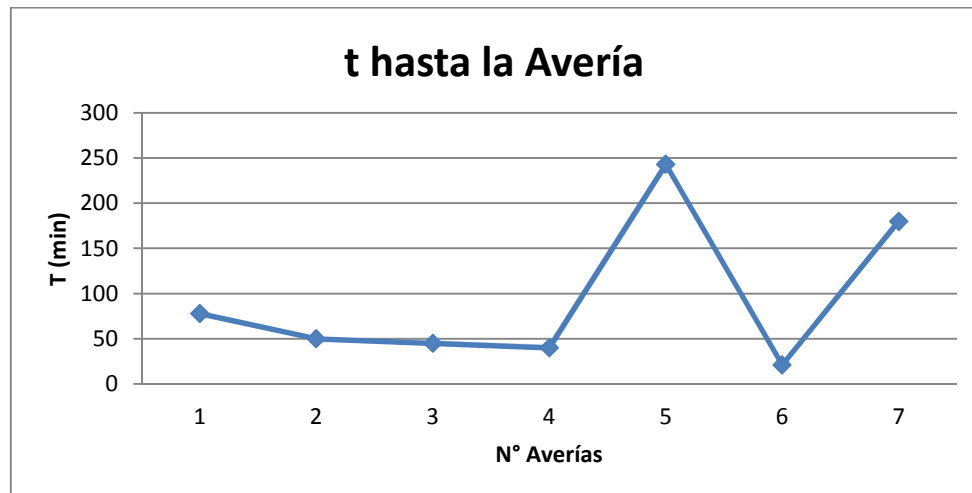


Figura 23. t hasta la Avería

Se comprobó que el sistema tiene averías aleatorias no controlables durante el periodo total de prueba, demostrando así, que el equipo se encuentra en la zona de vida útil dónde la tasa de fallos es constante.

La zona de vida útil se entiende como la zona dónde se producen fallos de carácter aleatorio y se considera la zona de mayor duración, para el estudio de los sistemas antes de alcanzar la zona de envejecimiento

Función de Fiabilidad

La función de fiabilidad o función de supervivencia indica la probabilidad de que un componente sobreviva o no, más de un tiempo t . Esta función viene expresada por:

Probabilidad de que sobreviva más tiempo: $R(t) = e^{-\lambda t}$

Probabilidad de que no sobreviva más tiempo: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

Densidad: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$

Dónde: $\lambda(t) = E(t) = Var(t) = \lambda$, *tasa de falla*

Adquiriendo un valor igual a 0.034 años, se tiene una función igual a:

$$R(t) = e^{-0.034 t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-0.034 t}$$

$$f(t) = 0.034 * e^{-0.034 t}$$

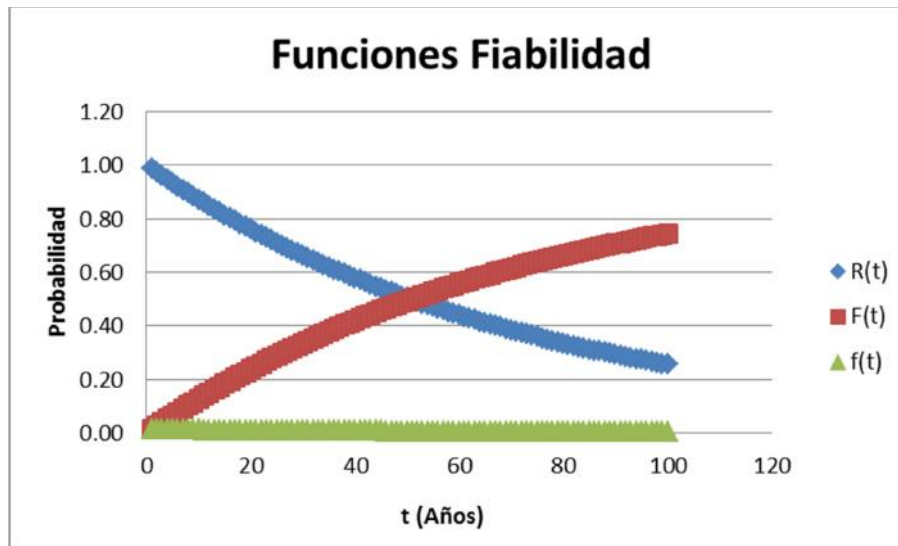


Figura 24. Funciones de Fiabilidad

2.4.2.2. Fallas Funcionales

Para detectar anomalías en el funcionamiento del equipo, se realizaron métodos como el diagrama de espina de pescado, análisis del árbol de fallas; análisis de modo de fallas, efectos y criticidad.

a) Diagrama de Causa y Efecto – Ishikawa

Para la efectuar este diagrama, se realizaron ensayos siguiendo los procedimientos ya establecidos según la NORMAS ASTM: D 2850-03a (UU), D 4767-11 (CU), D 7181-11 (CD) para cada tipo de ensayo y las especificaciones técnicas propias del equipo; mediante la interpretación de los datos previamente obtenidos, se analizaron conjuntamente los problemas, posibles causas y sus respectivas soluciones. Esto se puede observar en la Figura 25. Diagrama Causa y Efecto - Ishikawa

El número de ensayos se determinó como una muestra aleatoria simple, que se ajuste a la disponibilidad del laboratorio. Se analizaron parámetros específicos cómo:

- Presión de Confinamiento (KPa)
- Características físicas de la muestra: diámetro, altura, humedad
- Condiciones para el ensayo
- Esfuerzo (kg/cm²)
- Cohesión
- Ángulo de fricción

El factor crítico encontrado es la facultad de mantener una presión de confinamiento constante sobre la muestra. Por lo que se requiere un cambio en el sistema aire/agua, "bladder", y una revisión minuciosa de las válvulas y mangueras directas al proceso.

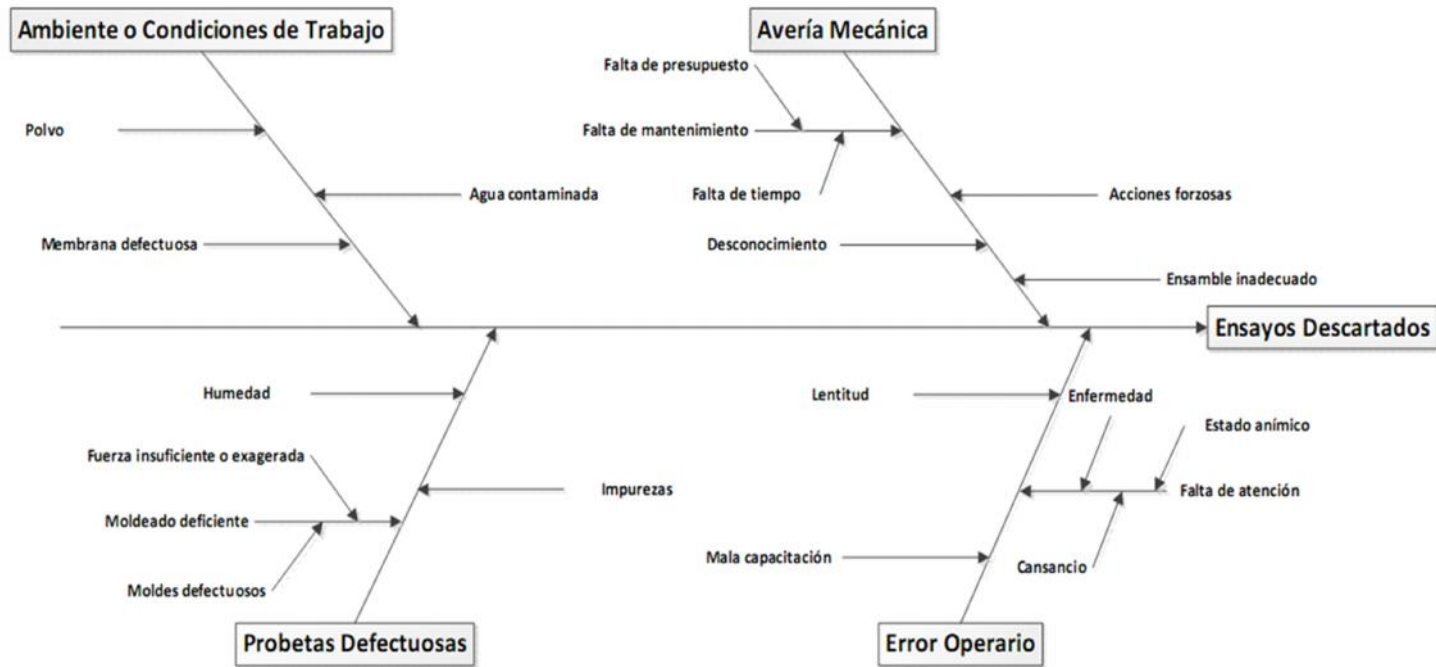


Figura 25. Diagrama Causa y Efecto - Ishikawa

Este diagrama muestra un resumen de las causas y efectos de los problemas encontrados en el Funcionamiento del Equipo Triaxial que se pueden observar en el ANEXO D.

b) Análisis de Modo de fallas, efectos y criticidad

Para realizar este análisis se revisaron las posibles fallas, consecuencias e importancia sobre cada elemento del sistema.

VER ANEXO C

c) Análisis de árbol de fallas

Permite evaluar un modo de falla a partir de sus posibles causas. Las fallas principales se muestran en la Figura 26, Figura 27, Figura 28.

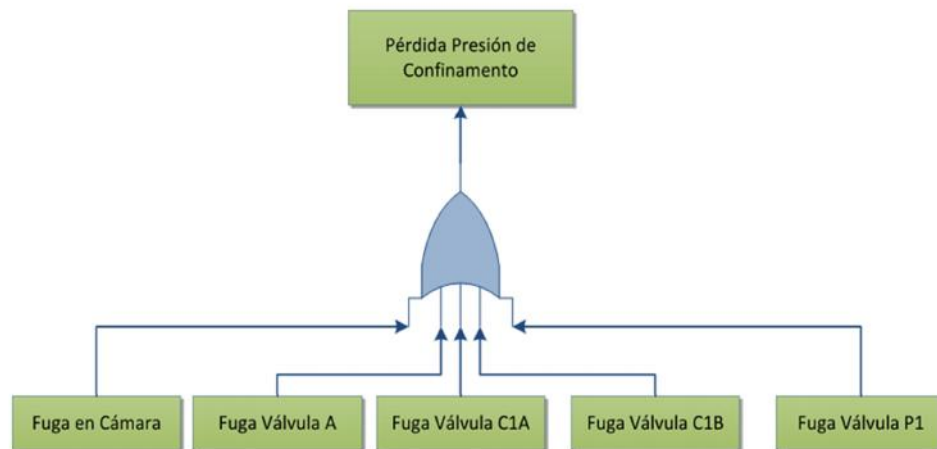


Figura 26. Árbol de Falla - Presión de Confinamiento

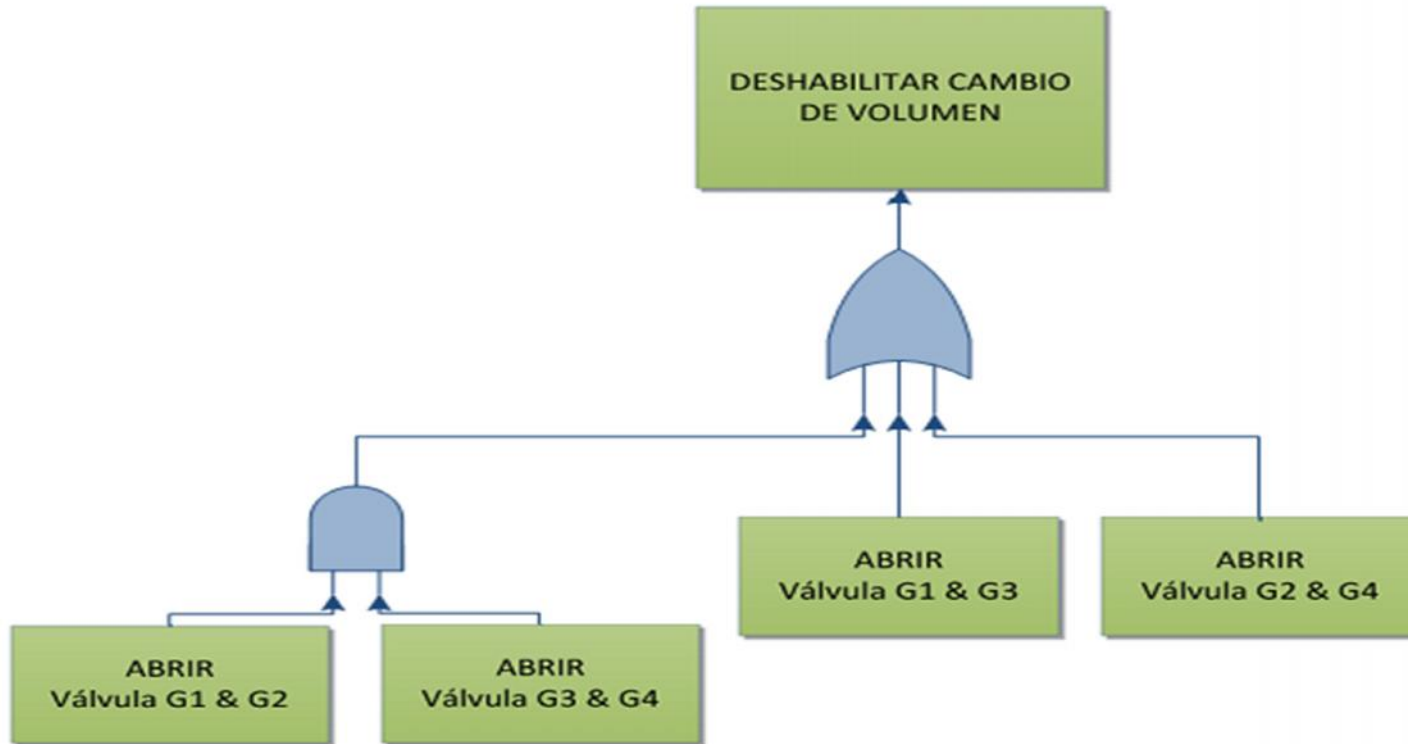


Figura 27. Árbol de Falla - Cambio de Volumen

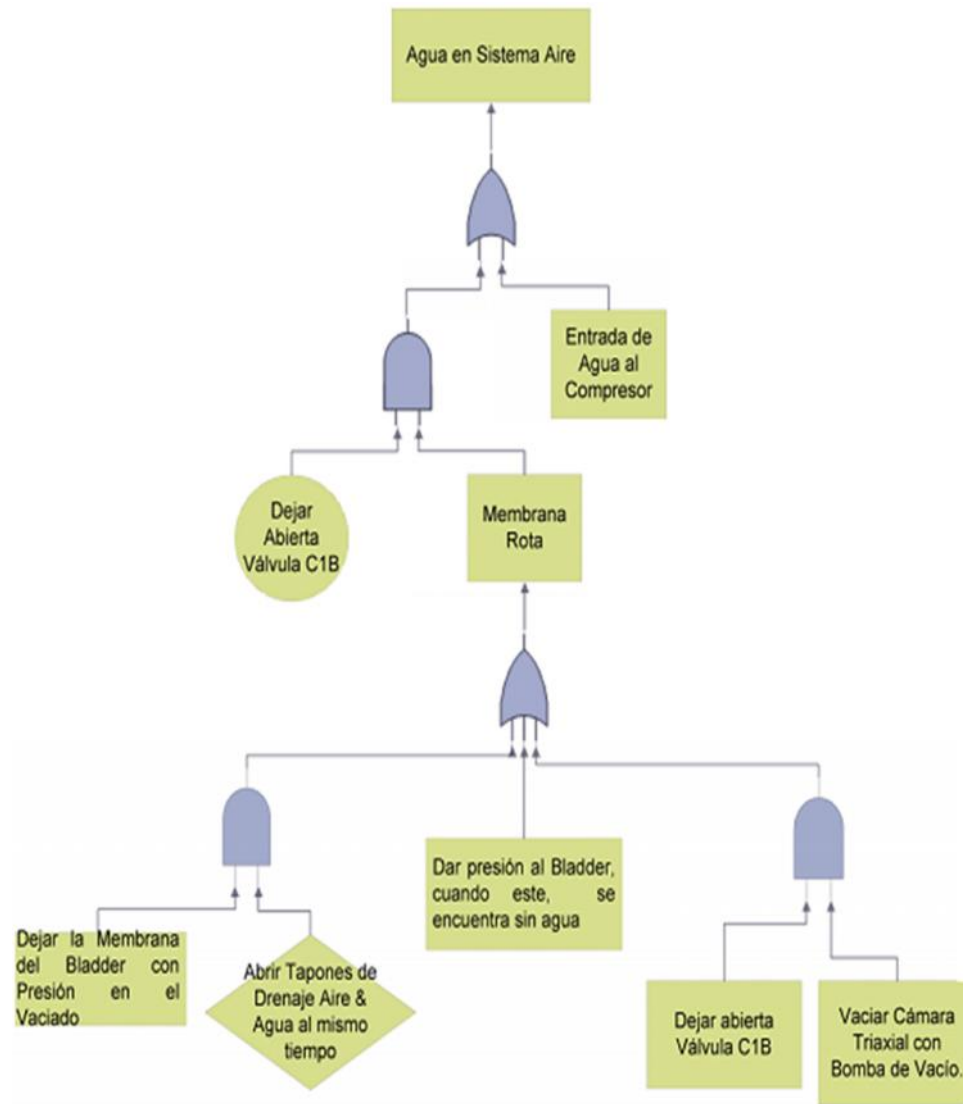


Figura 28. Árbol de Falla - Agua en Sistema Aire

2.4.3 Procesos a Automatizar

- Llenado de Cámara Triaxial

Para el control de este proceso, se utilizará una válvula con mando eléctrico para agua (12V, ½") y un par de sensores capacitivos RIKO KC1816-KP2

- Preparación del Bladder

Para controlar este proceso, se utilizara un sensor de flujo FLOW08L0 en la salida de cada bladder.

- Regular la Presión de Confinamiento (50kPa, 100kPa y 150kPa)

Para regular la presión de confinamiento se reemplazará el regulador de presión de aire (1000kPa), por un regulador de presión electrónico Festo serie MS.

- Encendido del Motor

Los procesos que se controlaran desde la interfaz del usuario, mediante programación son:

- Encerar instrumentos de medición
- Procesamiento de Datos

Capítulo 3

Automatización del Proceso

3.1. Descripción de los Procesos para Ensayos Triaxiales

Para el buen manejo del equipo se encontró necesario implementar un procedimiento a seguir. Cada procedimiento está enfocado a prevenir algún tipo de falla o avería que pueda afectar a la muestra en el transcurso del ensayo, es decir, cada proceso debe ser sistemático. A continuación detallaremos cada uno de estos.

Ensayo UU

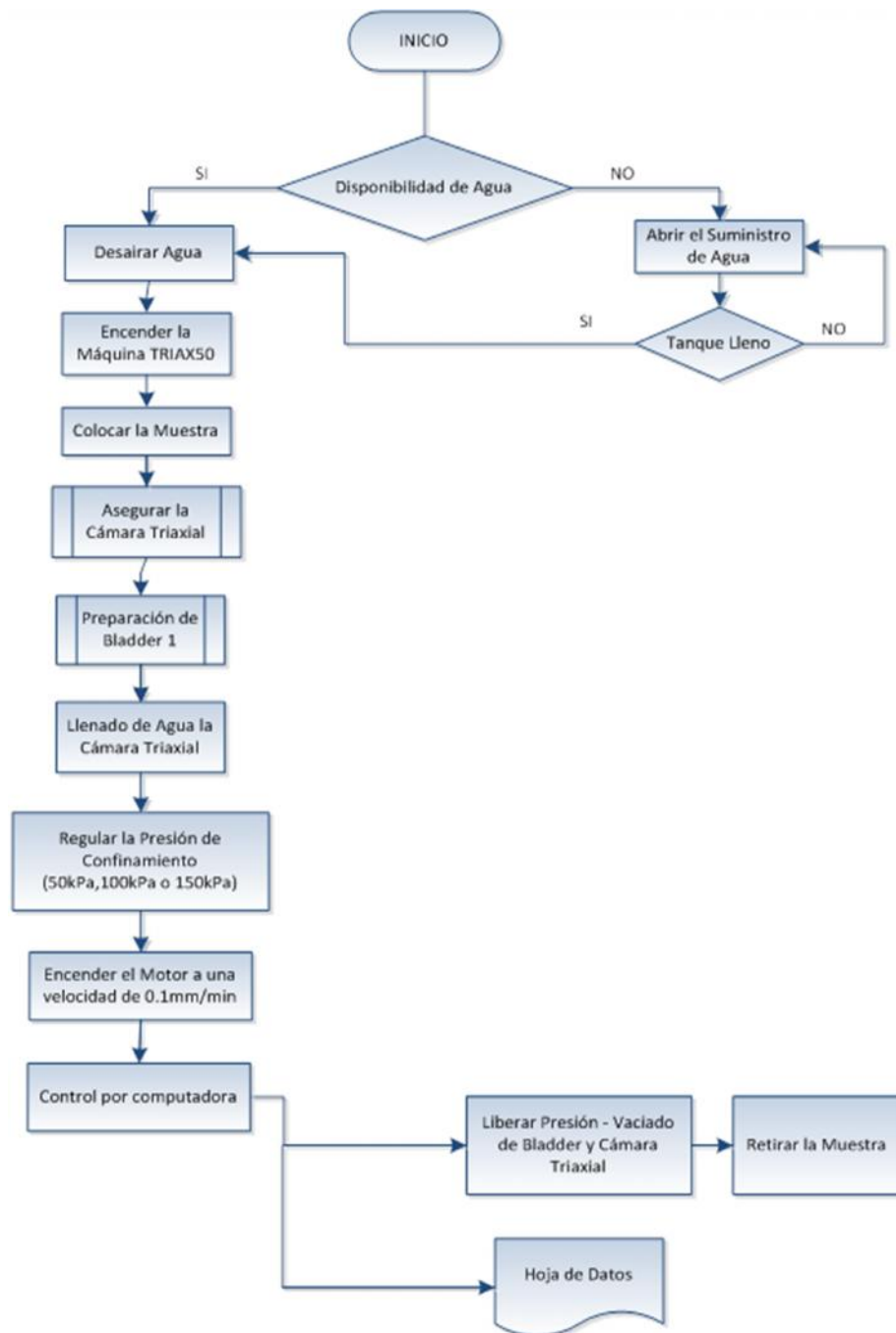


Figura 29. Proceso Ensayo UU

Ensayo CU

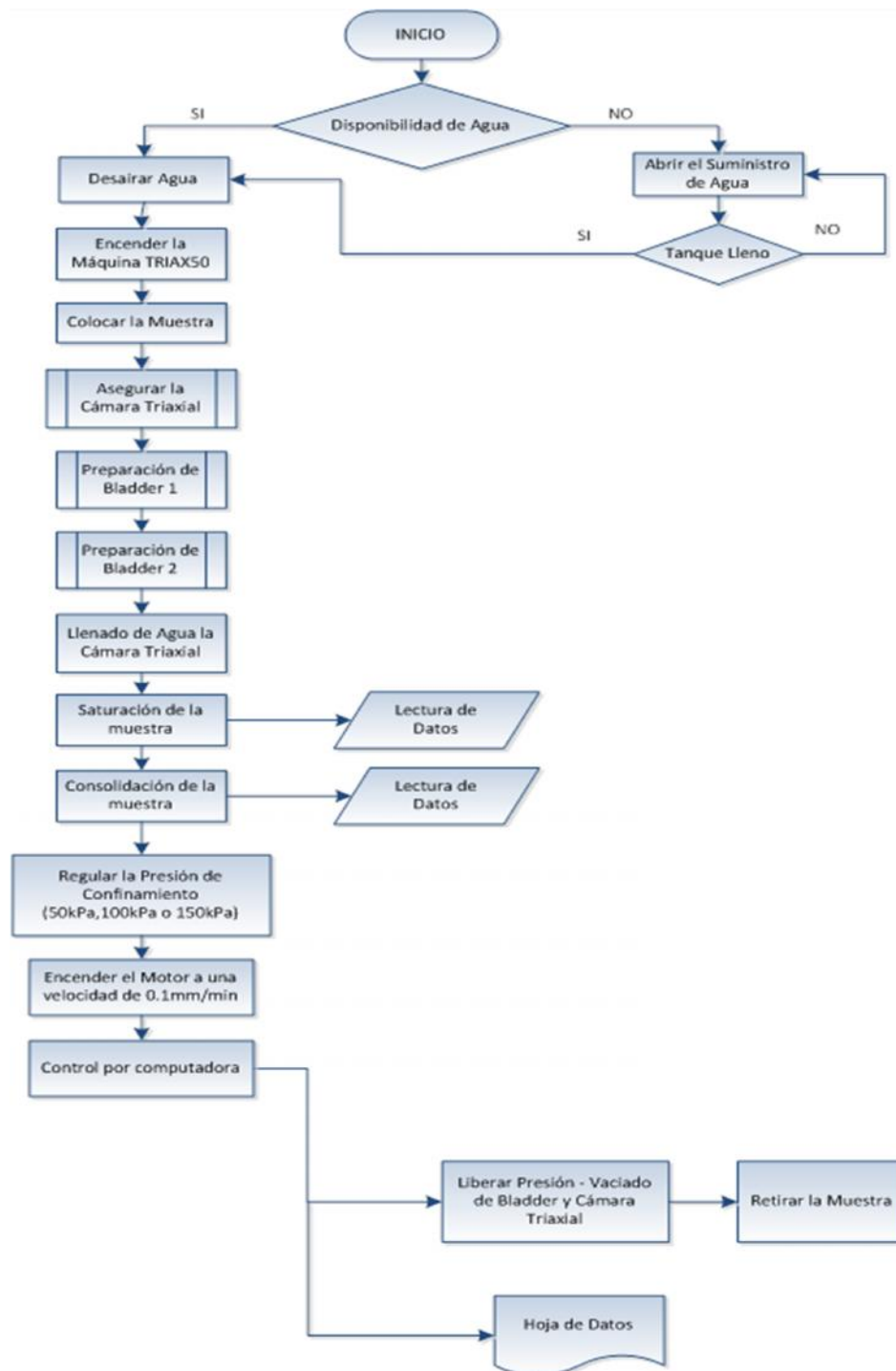


Figura 30. Proceso Ensayo CU

Ensayo CD

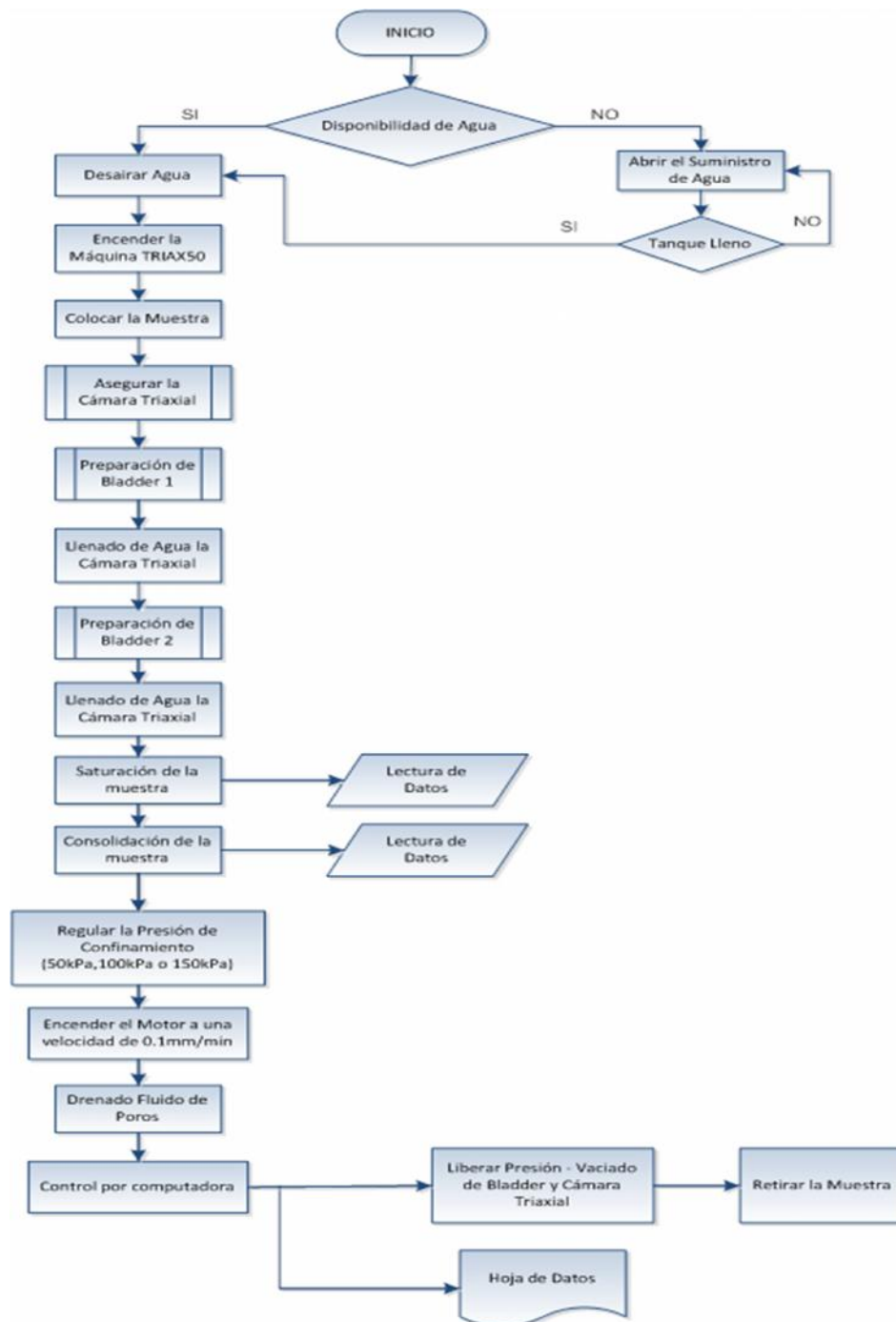


Figura 31. Proceso Ensayo CD

3.2. Consideraciones

Para este tipo de ensayos se necesita una unidad de adquisición de datos con las siguientes características:

- Mínimo 4 entradas analógicas para trabajar con los sensores que se encuentran en la maquina TRIAX 50.
- Mínimo 3 entradas digitales
- Rango de entrada de los canales análogos de $\pm 10\text{v}$

Además se usará todo lo que se encuentre disponible en el laboratorio con el fin de evitar gastos innecesarios.

Para la selección de esta Unidad se evaluarán las alternativas disponibles, en base, a los parámetros requeridos.

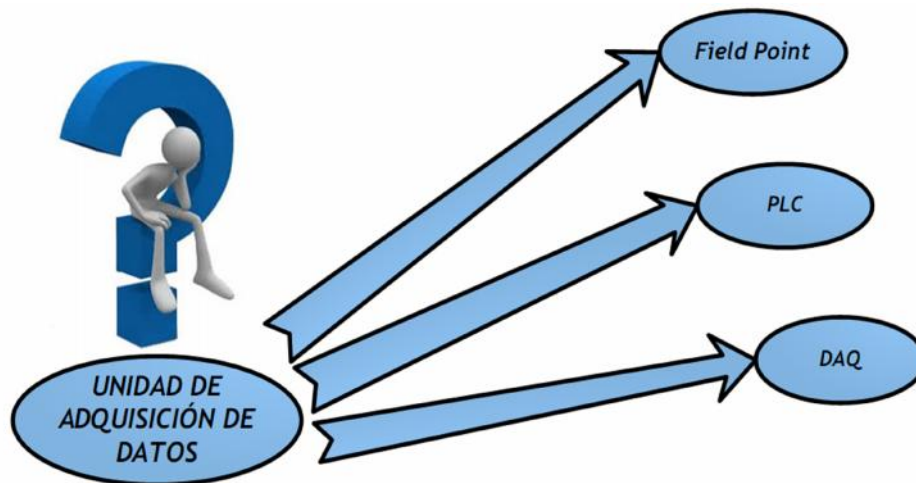





Figura 32. Alternativas Unidad de Adquisición de Datos

Tabla 3.1 Selección de Alternativas

		Alternativas					
Ponderación	Criterios						
		PLC- MicroLogix 1200		Field Point		DAQ	
		Clasificación	Calificación	Clasificación	Calificación	Clasificación	Calificación
70%	Costo	3	0.21	5	0.35	8	0.56
60%	Velocidad de Adquisición	5	0.3	3	0.18	8	0.48
40%	Entradas Análogas	3	0.12	9	0.36	9	0.36
10%	Salidas/Entradas Digitales	5	0.05	9	0.09	3	0.03
10%	Resolución	8	0.08	9	0.09	9	0.09
10%	Espacio	7	0.07	5	0.05	9	0.09
10%	Expansión	9	0.09	7	0.07	0	0
Valoración Global		0.92		1.19		1.61	
Calificación		NO		NO		SI	

3.3. Adquisición de datos

Para el dimensionamiento del sistema de adquisición de datos se utilizara la siguiente fórmula:

$$\Delta = \frac{V_{ref}}{2^N - 1}$$

Ecuación 3.1 Mínima variación de tensión analógica

Dónde:

Δ es la mínima variación de tensión analógica

V_{ref} es valor máximo de tensión analógica

N es el número de bits del convertidor

Despejando de la Ecuación 3.1 Mínima variación de tensión analógica Ecuación 3.1 se tiene:

$$N = \frac{\log\left(\frac{V_{ref}}{\Delta} + 1\right)}{\log 2}$$

Para nuestros sensores:

$$V_{ref} = 10 \text{ v}$$

$$\Delta = 0.0005$$

Entonces se obtiene:

$$N = 14.29 \text{ bits}$$

Que sería el mínimo número de bits que debe tener nuestro sistema de adquisición de datos

En el caso de la frecuencia de muestreo se requiere que la máquina pueda tomar por lo menos una muestra por segundo que es lo que demora la probeta en deformarse 0.002mm.

La DAQ 6210 posee una capacidad de muestreo de 250 000 muestras por segundo.

Según el teorema de muestreo de Nyquist

$$f_s > 2 * f_{max}$$

$$250000 \text{ kS/s} > 2 * (1 \text{ S/s})$$

Razón por la cual la DAQ 6210 cumple con nuestras necesidades.

3.4. Adecuación de los Transductores para el Sistema de Adquisición de Datos

3.4.1. Calibración de Transductores

3.4.1.1. Calibración del Transductor de Desplazamiento

3.4.1.1.1. Descripción del Banco de Calibración

La calibración del transductor fue realizada en el soporte de la máquina diseñado para el mismo, construyendo una adecuación para colocar en paralelo un deformímetro de carátula, adecuado para los ensayos a realizar.

Tabla 3.2. Características Banco de Calibración - Transductor de Desplazamiento

<i>Instrumento Patrón</i>	
Marca	Controls
Magnitud a medir	Deformación
Apreciación	0.002 mm
Rango	0 - 50 mm
Equipo adicional	Fuente de Alimentación
	Tarjeta de Acondicionamiento de Señal
	Programa de Recolección de Datos

3.4.1.1.2. Protocolo de Ensayo

- Instalar el transductor de deformación.

Nota: Tomar especial cuidado, en la colocación del sensor, que este tope el soporte de la máquina y este paralelo al deformímetro.

- Alimentar el transductor de deformación con la tensión nominal recomendada, igual a 10V.
- Accionar el motor a una velocidad igual a 0.1mm/min.
- Activar la señal para guardar los datos, para cada posición escogida. (Cada 5 divisiones en el deformímetro)
- Repetir las mediciones hasta completar 52 datos, igual a 250 divisiones necesarias para el ensayo.


- Estas mediciones se realizan aplicando tres presiones distintas a la muestra.
- Representar gráficamente los valores de deformación (X - mm) y voltaje (V) obtenidos.
- Calcular la línea de ajuste de los ensayos experimentales y el coeficiente de correlación.
- Aceptar la curva de calibración, sólo si su coeficiente de correlación es superior a 0.99. Si el coeficiente de correlación no cumple esto, realizar nuevamente el ensayo; si continúa la tendencia se debe dar de baja al sensor.

3.4.1.1.3. Resultados Experimentales

Resultados obtenidos en los ensayos de calibración del transductor de deformación aceptados, fueron los realizados a una presión de confinamiento igual a 300kPa. Ver Tabla 3.3. Resultados calibración Transductor de Deformación

Tabla 3.3. Resultados calibración Transductor de Deformación

Divisiones	Voltaje [mV]
0	146.2
5	148.9
10	153.2
15	156.2
20	159.2
25	162.6
30	165.4
35	169.2
40	171.9

45	175.0	
50	177.5	CONTINÚA... 
55	179.8	
60	183.3	
65	186.6	
70	189.6	
75	192.2	
80	196.9	
85	200.7	
90	203.8	
95	206.9	
100	210.0	
105	212.6	
110	215.8	
115	218.8	
120	222.5	
125	225.8	
130	229.4	
135	233.1	
140	235.7	
145	239.2	
150	242.7	
155	244.5	
160	249.1	
165	252.4	
170	255.6	
175	259.5	
180	262.6	
185	266.5	
190	269.0	
195	271.9	
200	276.1	
205	280.1	
210	283.2	
215	286.8	
220	289.6	
225	292.8	
230	295.2	
235	299.8	
240	302.4	
245	306.6	
250	309.6	

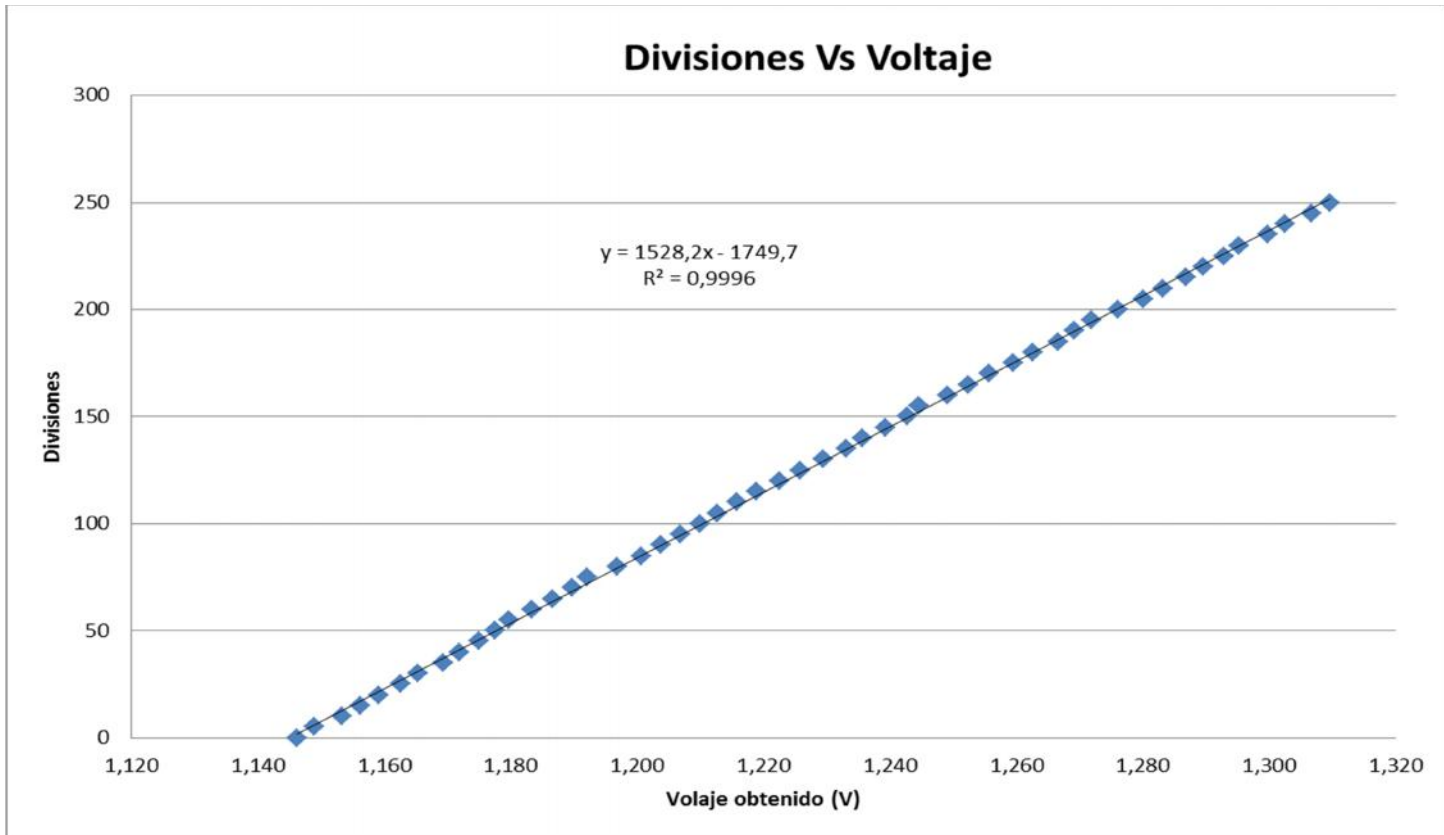


Figura 33. Curva de Calibración – Deformímetro 1

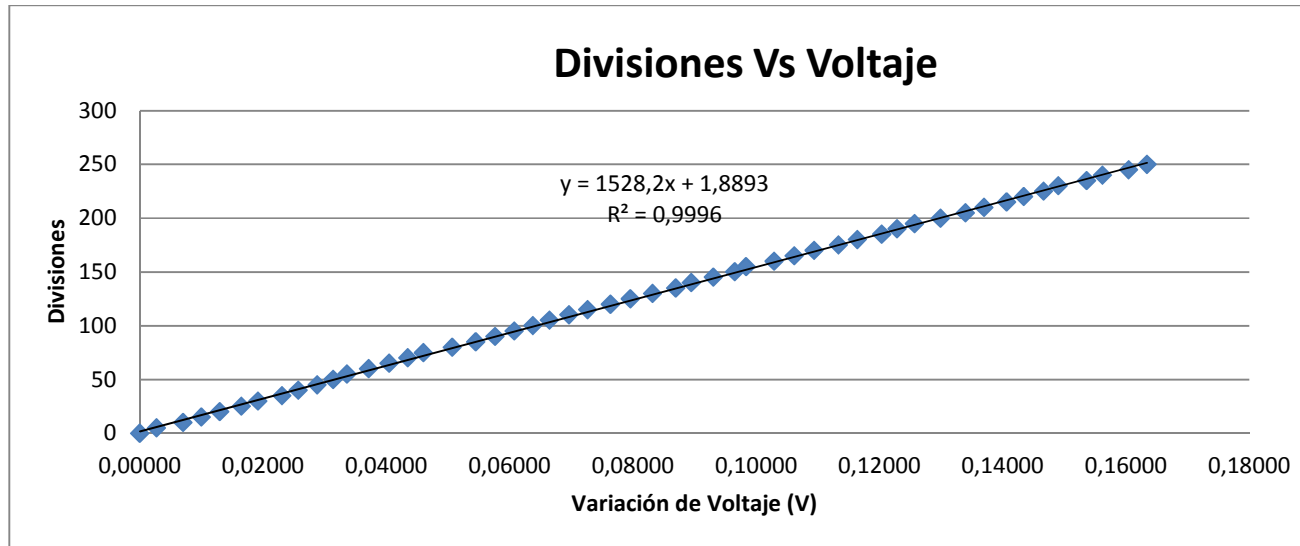


Figura 34. Curva de Calibración - Deformímetro 2

De esta manera la constante de calibración utilizada es de 1528.2 [Div/V] con un coeficiente de correlación igual a 0.9996.

Cómo:

$$R^2 \rightarrow 1 \quad \therefore \text{Es lineal}$$

1div= 0.656 mV.

3.4.1.2. Calibración del Transductor de Deformación de Carga

3.4.1.2.1. Descripción del Banco de Calibración

La calibración del transductor fue realizada en la máquina Triaxial, este anillo dinamómetro consta de una carátula de lectura, medida que fue tomada como referencia.

Tabla 3.4. Características Banco de Calibración - Transductor de Deformación de Carga

<i>Instrumento Patrón</i>	
Marca	Controls
Magnitud a medir	Deformación Axial
Apreciación	0.001 mm
Rango	0 - 30 mm
Equipo adicional	Fuente de Alimentación
	Tarjeta de Acondicionamiento de Señal
	Programa de Recolección de Datos

3.4.1.2.2. Protocolo de Ensayo

- Instalar el anillo dinamométrico, a calibrar.
- Verificar el funcionamiento de la máquina.
- Alimentar el anillo dinamométrico con la tensión nominal recomendada, igual a 10V.
- Accionar el motor a una velocidad igual a 0.1mm/min

- Activar la señal para guardar los datos, para cada posición escogida.
(Cada 5 divisiones en el anillo)
- Repetir las mediciones hasta completar 60 datos, igual a 300 divisiones necesarias para el ensayo.
- Estas mediciones se realizan aplicando tres presiones distintas a la muestra.
- Representar gráficamente los valores de deformación (X - mm) y voltaje (V) obtenidos.
- Calcular la línea de ajuste de los ensayos experimentales y el coeficiente de correlación.
- Aceptar la curva de calibración, sólo si su coeficiente de correlación es superior a 0.99. Si el coeficiente de correlación no cumple esto, realizar nuevamente el ensayo; si continúa la tendencia se debe dar de baja al sensor.

3.4.1.2.3. Resultados Experimentales

Resultados obtenidos en los ensayos de calibración del anillo dinamométrico. Ver Tabla 3.5

Tabla 3.5. Resultados Calibración Anillo Dinamométrico

Divisiones	Voltaje [mV]
0	-0.2
5	-0.1
10	5.3
15	10.1
20	14.6
25	19.3
30	23.5
35	28.5
40	33.0
45	37.6
50	42.0
55	46.5
60	50.6
65	55.1
70	59.3
75	63.8
80	68.1
85	72.4
90	77.6
95	82.0
100	85.8
105	90.2
110	94.8
115	99.2
120	103.8
125	108.1
130	112.5
135	117.8
140	121.5
145	126.0
150	130.5
155	134.9
160	139.4
165	143.8
170	147.5
175	152.2
180	157.7
185	160.8
190	165.6
195	169.4
200	174.0

CONTINÚA... 

205	177.7
210	183.0
215	186.8
220	190.4
225	196.4
230	200.7
235	205.1
240	209.8
245	214.3
250	219.5
255	223.3
260	227.7
265	232.2
270	236.9
275	241.4
280	245.3
285	249.8
290	254.3
295	259.1
300	262.9
305	267.6
310	270.3

La curva de calibración del transductor.

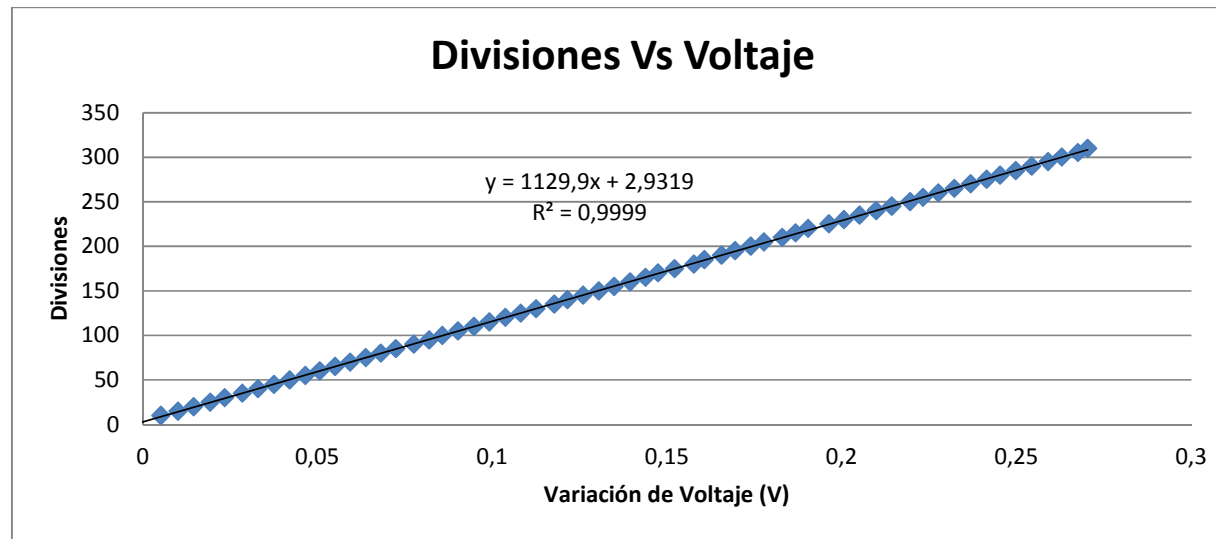


Figura 35. Curva de Calibración Anillo de Carga

De esta manera la constante de calibración utilizada es de 1129.9 [Div/ Δ V] con un coeficiente de correlación igual a 0.9999.

Cómo:

$$R^2 \rightarrow 1 \quad \therefore \text{Es lineal}$$

$$1 \text{ div} = 0.873 \text{ Mv}$$

3.4.1.3. Calibración del Transductor Volumétrico

3.4.1.3.1. Descripción del Banco de Calibración

La calibración del sensor fue realizada con el sistema de presión aire/agua “Bladder”, este transductor volumétrico consta de un indicador de volumen, dato que fue tomado como referencia. Ver Tabla 3.6

Tabla 3.6. Características Banco de Calibración - Transductor Cambio de Volumen

Instrumento Patrón	
Marca	Controls
Magnitud a medir	Cambio de Volumen
Apreciación	10 cm ³
Rango	0 - 100 cm ³
Equipo adicional	Fuente de Alimentación
	Tarjeta de Acondicionamiento de Señal
	Programa de Recolección de Datos

3.4.1.3.2. Protocolo de Ensayo

- Instalar el transductor volumétrico, a calibrar.

Nota: Tomar especial cuidado, en la colocación del sensor, que este tope el soporte del transductor que indica el cambio de volumen.

- Alimentar el transductor volumétrico con la tensión nominal recomendada, igual a 10V.
- Dar una presión menor a 5kPa en el “Bladder”, y abrir la válvula de paso.
- Activar la señal para guardar los datos, para cada posición escogida.
(Por división en el indicador volumétrico)
- Repetir las mediciones hasta completar 10 datos, igual al número de divisiones existentes en el transductor.
- Estas mediciones se realizan 5 veces.
- Representar gráficamente los valores de volumen ($X - \text{cm}^3$) y voltaje (V) obtenidos.
- Calcular la línea de ajuste de los ensayos experimentales y el coeficiente de correlación.
- Aceptar la curva de calibración, sólo si su coeficiente de correlación es superior a 0.99. Si el coeficiente de correlación no cumple esto, realizar nuevamente el ensayo; si continúa la tendencia se debe dar de baja al sensor.

3.4.1.3.3. Resultados Experimentales

Resultados obtenidos en los ensayos de calibración del transductor volumétrico. Ver Tabla 3.7

Tabla 3.7. Resultados Calibración Transductor Volumétrico

Divisiones	Voltaje [V]
1	0.00
2	0.38
3	0.67
4	1.01
5	1.22
6	1.46
7	1.65
8	1.83
9	1.96
10	2.06

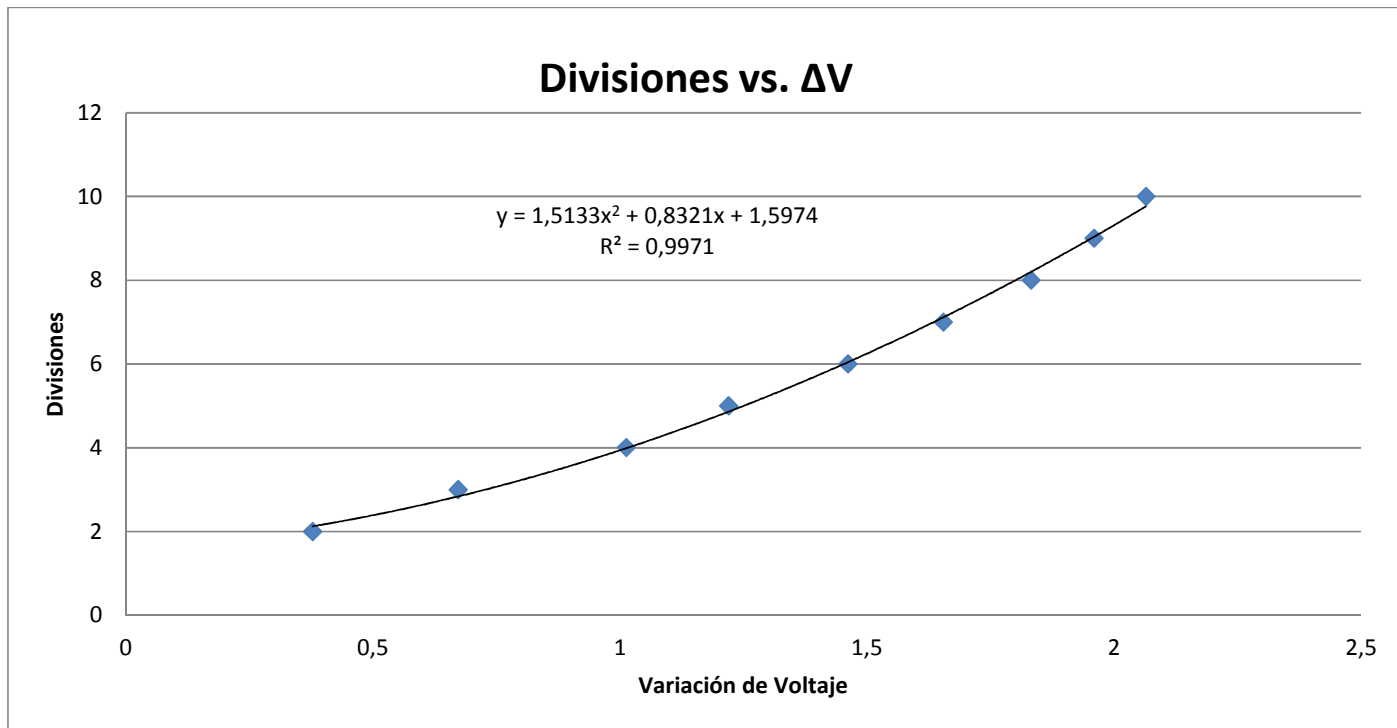


Figura 36. Curva de Calibración - Cambio Volumétrico

De esta manera el coeficiente de correlación conseguido es igual a 0.9971.

3.4.1.4. Calibración del Transductor de Presión

3.5.1.4.1. Descripción del Banco de Calibración

La calibración del sensor fue realizada con el sistema de presión aire/agua “Bladder”, el dato de referencia fue tomado del manómetro de la máquina.

Tabla 3.8. Características Banco de Calibración - Transductor de Presión

Instrumento Patrón	
Marca	Controls
Magnitud a medir	Presión
Apreciación	5 kPa
Rango	0-1100 kPa
Equipo adicional	Fuente de Alimentación
	Tarjeta de Acondicionamiento de Señal
	Programa de Recolección de Datos

3.4.1.4.2. Protocolo de Ensayo

- Instalar el transductor de presión, a calibrar.

Nota: El transductor de presión, se debe conectar a la salida de agua del “bladder”, por lo cual se instalará una válvula de paso conectada a una T.

- Alimentar el transductor de presión con la tensión nominal recomendada, igual a 10V.

- Dar la presión requerida en el “Bladder”, y abrir la válvula de paso.

- Activar la señal para guardar los datos, para cada posición escogida.

Repetir las mediciones hasta completar 25 datos, igual al número de divisiones existentes en el transductor.

- Estas mediciones se realizan 5 veces.

- Representar gráficamente los valores de volumen ($X - \text{cm}^3$) y voltaje (V) obtenidos.

- Calcular la línea de ajuste de los ensayos experimentales y el coeficiente de correlación.

- Aceptar la curva de calibración, sólo si su coeficiente de correlación es superior a 0.99. Si el coeficiente de correlación no cumple esto, realizar nuevamente el ensayo; si continúa la tendencia se debe dar de baja al sensor.

3.4.1.4.3. Resultados Experimentales

Resultados obtenidos en los ensayos de calibración del transductor de presión. Ver Tabla 3.9

Tabla 3.9. Resultados Calibración Transductor de Presión

Presión [kPa]	Voltaje [mV]
0	3.3
50	3.8
100	4.3
150	4.7
200	5.2
250	5.7
300	6.1
350	6.6
400	7
450	7.5
500	8
550	8.5
600	8.9
550	8.3
500	7.8
450	7.4
400	6.9
350	6.5
300	6
250	5.5
200	5
150	4.6
100	4.1
50	3.6
0	3.2

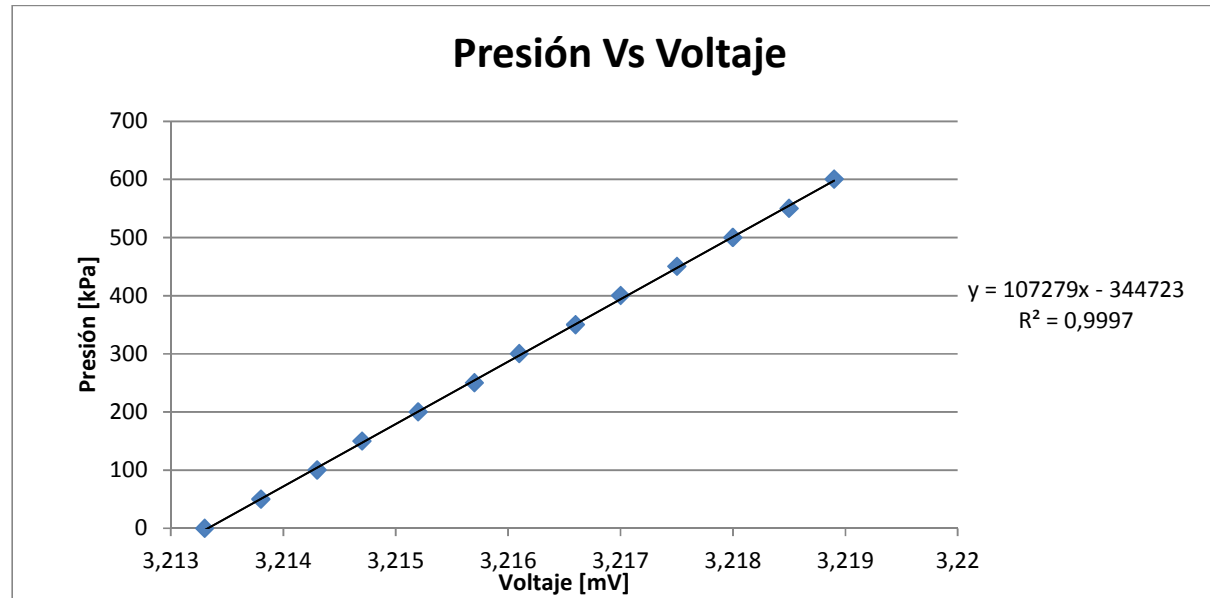


Figura 37. Curva de Calibración – Transductor de Presión

De esta manera el coeficiente de correlación conseguido es igual a 0.9997

Cómo:

$$R^2 \rightarrow 1 \quad \therefore \text{Es lineal}$$

3.4.2. Etapas de Acondicionamiento de Señal

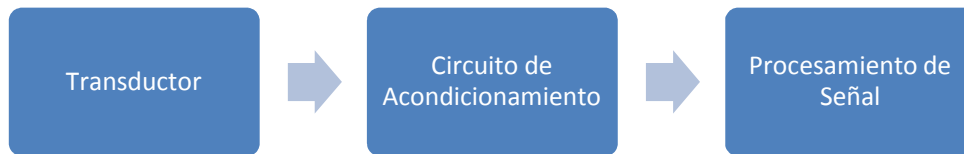


Figura 38. Procesamiento de Señal

El correcto procesamiento de la señal requiere anteriormente un circuito que la acondicione, para esto se realizan una serie de pasos:

- a) Protección: Para evitar el daño del elemento consecutivo.
- b) Convertir: necesario para conseguir un tipo de señal adecuada
- c) Obtención del nivel adecuado de la señal: se refiere a la amplificación de la señal, cuando sea necesario.
- d) Eliminación o reducción de ruido: para la eliminación de interferencias y ruido se utilizan filtros.
- e) Manipulación de la señal

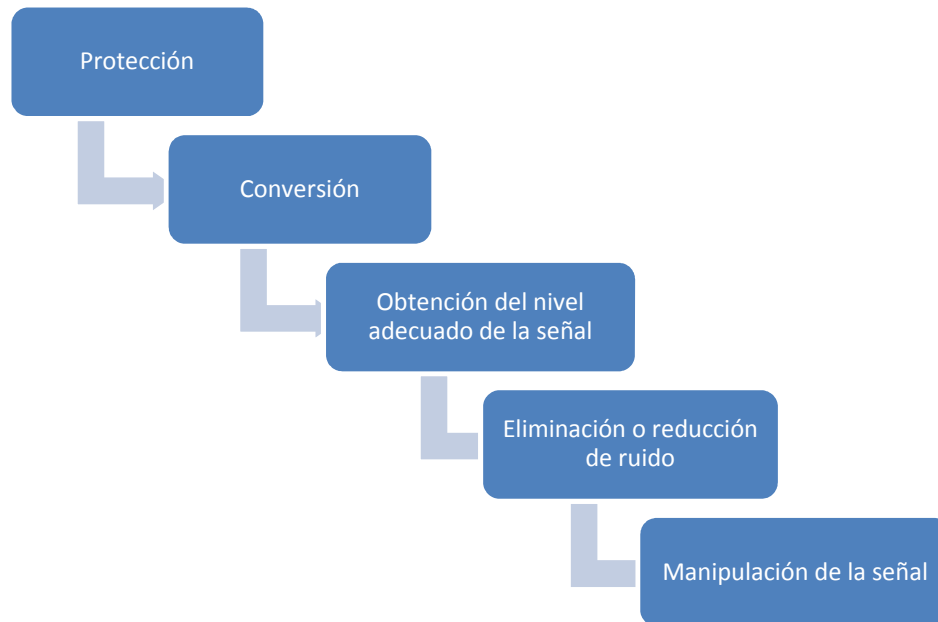


Figura 39. Etapas de Procesamiento de Señal

3.4.2.1. Protección

Se siguió el método práctico de selección de dispositivos de protección contra sobre-corrientes según la NORMA IEC. En la cual se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1) $I_b \leq I_n \leq I_z$
- 2) $I_f \leq 1.45 * I_z$ IEC 60898

I_b = corriente de diseño del circuito.

I_n = corriente nominal del fusible.

I_z = corriente máxima admisible del conductor protegido.

I_f = corriente convencional de fusión.

La corriente de diseño es de 800mA, y la corriente máxima admisible es de 1.2A, de esta manera, la corriente nominal del fusible que cumple la primera condición es 1A de los valores comerciales.

$$0.8A \leq 1A \leq 1.2A \quad (\text{Condición 1})$$

Entonces,

$$1.45 * I_z = 1.45 * (1.2) = 1.74 A$$

$$I_f \leq 1.74 A \quad (\text{Condición 2})$$

Dado que para fusibles tipo gG la Norma IEC establece las siguientes condiciones:

$$1) I_b \leq I_n \leq k_2 * I_z$$

$$2) I_f = k_1 * I_n$$

Las constantes k_1 y k_2 se establecen según la corriente nominal que se pueden encontrar en la siguiente Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Constantes para Diseño de Protección de Sobrecargas

Corriente Nominal del Fusible	K1	K2
$I_n \leq 4A$	2.1	0.69
$4A < I_n \leq 16A$	1.9	0.76
$16A < I_n$	1.6	0.90

En este caso los valores de K1 y K2 corresponden a $I_n \leq 4A$.

Entonces,

$$k_2 * I_z = 0.69 * 1.2 = 0.828 A$$

$0.8 A \leq 1 A \leq 0.828 A$ No cumple

Por tanto, cómo la corriente nominal comercial menor es 0.8 A se utilizará este valor. De esta manera:

$0.8 A \leq 0.8 A \leq 0.828 A$ Si cumple (Condición 3)

Para probar la condición 2 se procede a calcular I_f .

$$I_f = k_1 * I_n = 2.1 * 0.8 = 1.68 A$$

Entonces,

$1.68A \leq 1.74 A$ Si cumple

3.4.2.2. Eliminación o Reducción de Ruido

Los filtros son principalmente utilizados para:

- Eliminar interferencias y ruido de las señales.
- Situar en un rango útil el ancho de banda.
- Anti-aliasing, es decir, eliminación de frecuencias superiores antes de la conversión A/D.
- Sintonización.

Los filtros se clasifican de acuerdo al tipo de tecnología o por su respuesta en frecuencia.

Tabla 3.11. Clasificación de Filtros

Tipo de Tecnología	Respuesta en Frecuencia
Pasivos	Paso Bajo
Activos	Paso Alto
De capacidades conmutadas	Paso Banda
Digitales	Rechazo de Banda

Se usó un filtro paso bajo analógico ya que se comporta como un filtro anti-aliasing, es decir, limpia la señal antes de hacer una conversión A/D.

3.4.2.2.1. Diseño Filtro Anti-aliasing

La topología utilizada es de Butterworth, en células de Sallen- Key. Para el diseño de filtro se tienen como datos iniciales:

Tabla 3.12. Datos Diseño Filtro Anti-aliasing

Número de bits del Sistema de Adquisición	N=16
Frecuencia de muestreo	8kHz
Muestras por ciclo	2000
Frecuencia Fundamental	60Hz

Con el número de bits del sistema, procedemos a calcular la relación de señal a ruido SNR.

$$SNR = 6.02 * N + 1.76 \text{ dB}$$

Ecuación 3.2. Relación de señal a ruido SNR

$$SNR = 6.02 * 16 + 1.76 \text{ dB} = 98.08 \text{ dB}$$

98.08 dB es la atenuación máxima, con lo cual podemos encontrar el orden del filtro. El filtro de Butterworth disminuye a razón de 20*n dB por década, donde n es el número de polos del filtro.

Por tanto,

$$n = \frac{98.08}{20} = 4.9 \text{ polos}$$

De esta manera, se establece la función de transferencia (Respuesta en frecuencia) cómo:

$$|H(w)|^2 = \frac{1}{1 + (w/w_c)^{2N}}$$

Ecuación 3.3. Función de Transferencia - Respuesta en frecuencia

Dónde: N= orden del filtro, w_c es la frecuencia de corte, w es la frecuencia analógica compleja ($w=jw$).

A partir de la frecuencia de muestreo, podemos encontrar la frecuencia de corte; cómo se muestra a continuación:

$$f_s = 2.56 * f_{50}$$

$$f_s/2 = 1.28 * f_{50}$$

$$f_s/2 = 4kHz$$

$$f_{50} = \frac{f_s/2}{1.28} = \frac{4k}{1.28} = 3.125 kHz$$

Dónde: $f_s/2$: frecuencia de corte ; f_{50} : frecuencia de armónico 50

De esta manera, se establece la banda de interés Bin.

$$f_s = 10 * Bin$$

Ecuación 3.4. Frecuencia de Corte

$$Bin = \frac{f_s}{10} = \frac{8kHz}{10} = 800Hz$$

Para garantizar la atenuación de -3 dB, se utiliza un factor de corrección.

$$F_{seg} = 1.18 * Bin = 1.18 * 800Hz = 944 Hz$$

Ecuación 3.5. Frecuencia de corte corregida

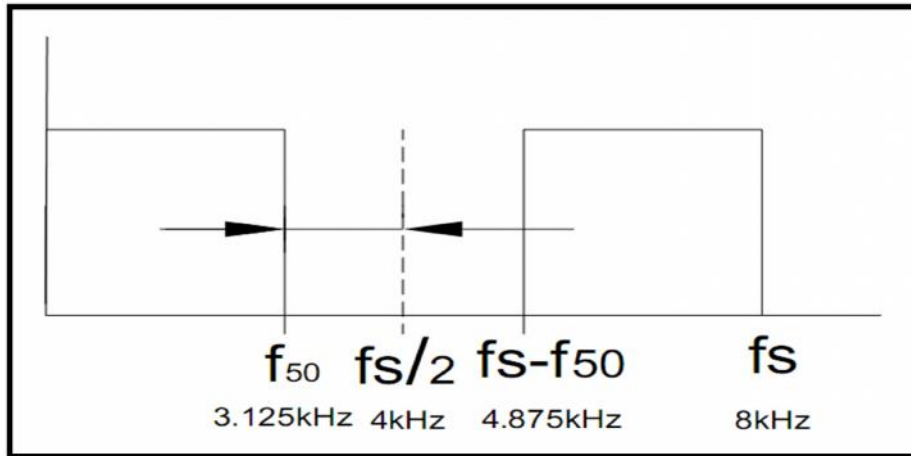


Figura 40. Banda de Interés

La configuración de las células Sallen-key es la siguiente:

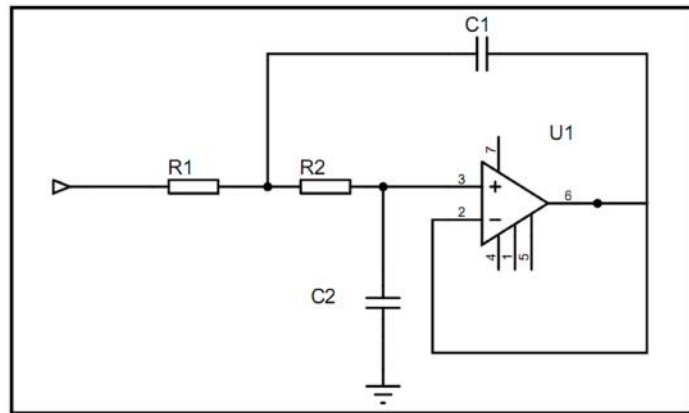


Figura 41. Filtro Sallen-key

Las cuáles se deben colocar en cascada para aumentar el orden del filtro; y la frecuencia de corte y el factor Q, viene dado por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi * \sqrt{R1 * R2 * C1 * C2}}$$

Ecuación 3.6. Factor de Corte

$$Q = \frac{\sqrt{R1 * R2 * C1 * C2}}{C2 * (R1 + R2)}$$

Ecuación 3.7. Factor Q

Por lo tanto, el filtro diseñado es:

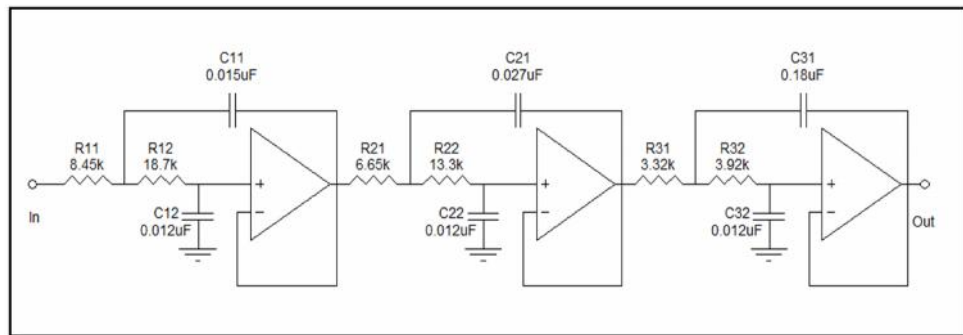


Figura 42. Diseño Filtro Anti-aliasing

Ecuación 3.8. Diseño Filtro Anti-aliasing

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{8.45 * 18.7 * 0.015 * 0.012 * 10^{-6}}} \approx \frac{1}{2 * \pi * 1.686496 * 10^{-4}} = \frac{1}{0.00106}$$

$$= 943.7 \text{ kHz}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{6.65 * 13.3 * 0.027 * 0.012 * 10^{-6}}} = \frac{1}{2 * \pi * 1.69281 * 10^{-4}} = \frac{1}{0.00106}$$

$$= 940.18 \text{ kHz}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{3.32 * 3.92 * 0.18 * 0.012 * 10^{-6}}} = \frac{1}{2 * \pi * 1.6766366 * 10^{-4}} = \frac{1}{0.00105}$$

$$= 949.2 \text{ kHz}$$

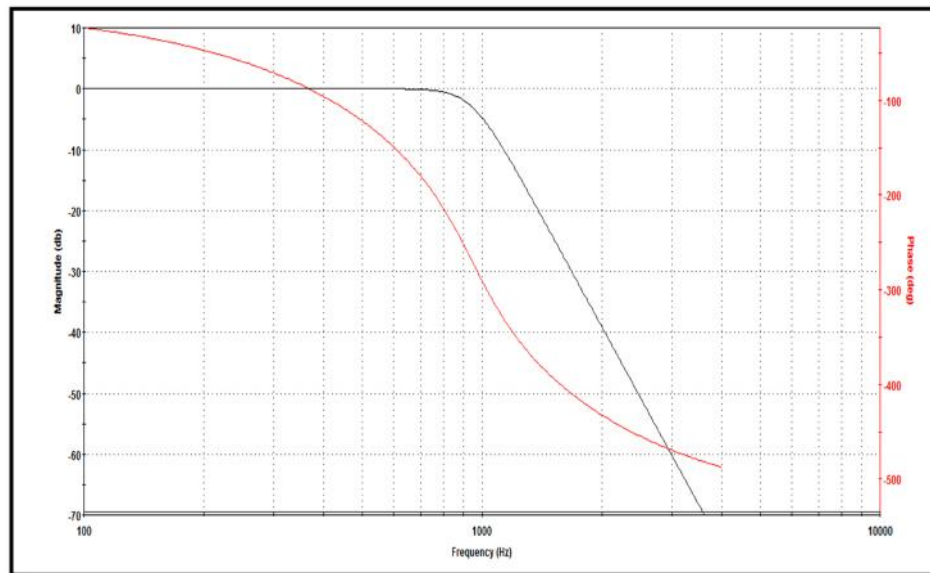


Figura 43. Respuesta en Frecuencia Filtro Anti-aliasing

3.5. Diseño de la interfaz gráfica

Para el diseño de nuestra interfaz se empleará la siguiente metodología:

3.5.1. Arquitectura

Se definieron las diferentes pantallas con las que contará el operador para interactuar con el sistema junto con las relaciones lógicas. En el siguiente mapa se indicaran de manera general las pantallas de navegación del sistema.

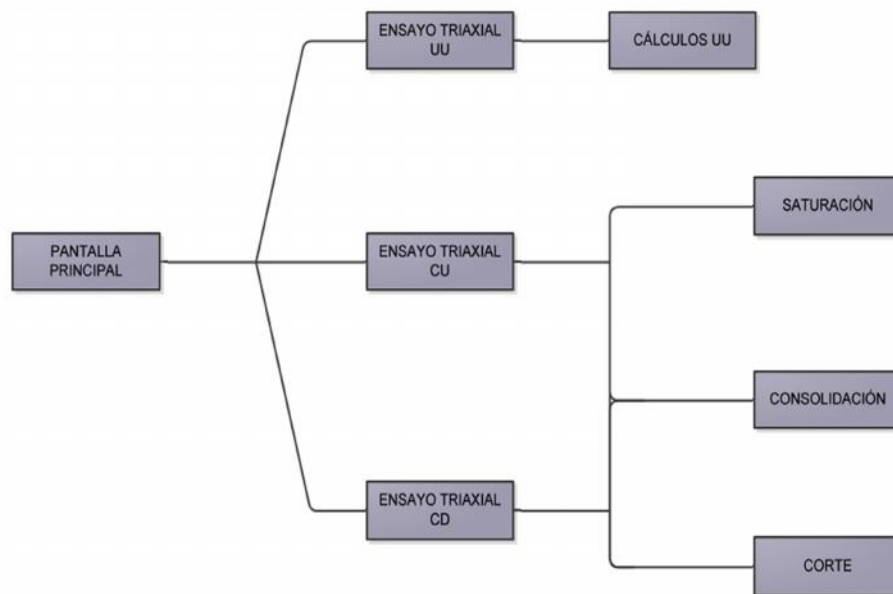


Figura 44. Mapa General de Navegación del Sistema

3.5.1.1. Descripción

- Pantalla Principal

Permite al usuario seleccionar el proceso a realizar, entre los cuales se encuentran: ensayo UU, ensayo CU, ensayo CD y diagnóstico.

- Ensayo Triaxial UU

En esta ventana se realizara el monitoreo de las variables del proceso involucradas en el ensayo triaxial UU.

- Cálculos UU

Se puede ingresar a esta ventana a través de la ventana de Ensayo Triaxial UU y en ella se procesaran los datos obtenidos del ensayo Triaxial UU.

- Ensayo Triaxial CU

En esta ventana se realizara el monitoreo de las variables del proceso involucradas en el ensayo triaxial CU.

- Cálculos CU

Se puede ingresar a esta ventana a través de la ventana de Ensayo Triaxial CU y en ella se procesaran los datos obtenidos del ensayo Triaxial CU.

- Ensayo Triaxial CD

En esta ventana se realizara el monitoreo de las variables del proceso involucradas en el ensayo triaxial CD.

- Cálculos CD

Se puede ingresar a esta ventana a través de la ventana de Ensayo Triaxial CD y en ella se procesaran los datos obtenidos del ensayo Triaxial CD.

- Diagnóstico

Permite realizar pruebas de funcionamiento con los diferentes sensores.

3.5.2 Distribución de las pantallas

- Nivel1 (Pantalla principal)

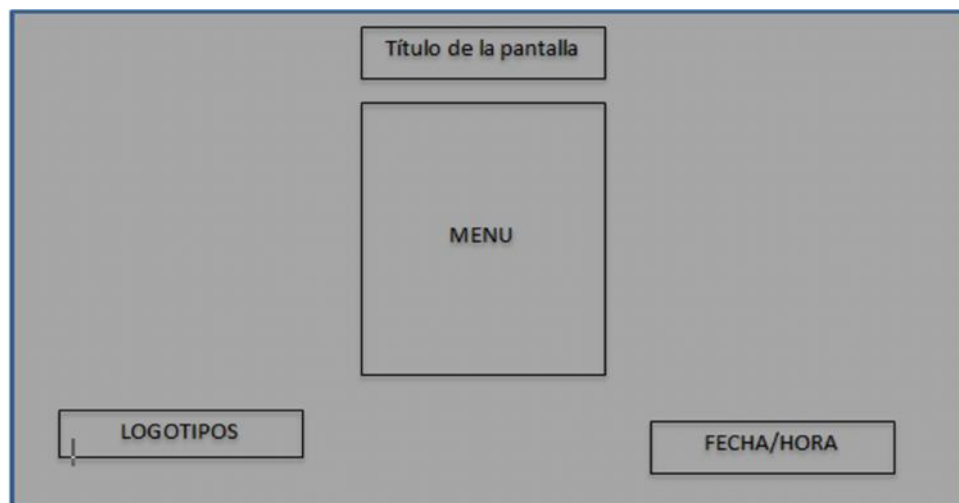


Figura 45. Distribución de las Pantallas - Nivel 1

El menú consta de 4 opciones de navegación que acceden a las pantallas de control del proceso. (Ensayo Triaxial UU, Ensayo Triaxial CU, Ensayo Triaxial CD y diagnóstico).

- Subnivel1



Figura 46. Distribución de Pantallas - Subnivel 1

Alarmas: funcionamiento del equipo, disponibilidad para cálculo y el nivel de agua del tanque.

Sinóptico: gráficos del proceso

Entrada de comandos y datos: datos de la muestra del ensayo, variables del equipo y botón ON/OFF.

Sub-menú asociado a la pantalla: datos encontrados en el ensayo.

- Subnivel 2 (Cálculos)

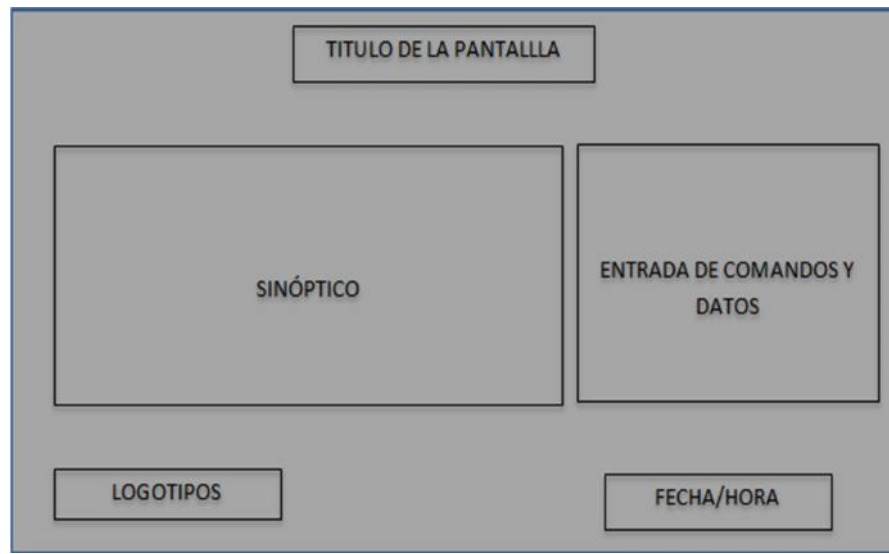


Figura 47. Distribución de Pantalla - Subnivel 2

Sinóptico: gráficos

Entrada de comandos y datos: variables de cada ensayo y botón calcular

3.5.3. Navegación

Para la navegación en la interfaz gráfica se usará una combinación de menús, submenús y barras de botones.

3.5.4. Uso de Color

El color es uno de los elementos más importantes, por lo que se utilizarán colores consistentes, conservadores y convencionales, en los siguientes ítems:

- Texto en General
- Color del fondo de la pantalla
- Color de las alarmas

- Color para representar el estatus del equipo
- Los cuáles de detallan a continuación:

Tabla 3.13. Uso del Color - Fondos de Pantallas


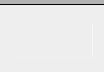
Ítem	Color	Descripción	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Sinópticos de Área y Subárea		Arena	208/204/191	31/37/188
Menús y Analógicas		Gris Plata	160/0/224	238/238/238

Tabla 3.14. Uso del Color - Estatus de Equipos de Proceso



Ítem	Color	Descripción	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Equipo Parado		Amarillo	208/204/191	31/37/188
Equipo Trabajando		Verde	80/240/53	0/113/0

Tabla 3.15. Uso del Color - Alarmas

Ítem	Color	Descripción	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Alarma Crítica		Rojo	0/240/120	255/0/0
Alarma de Advertencia		Amarillo	40/240/120	255/255/0

Tabla 3.16. Uso del Color - Señales Analógicas


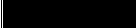
Ítem	Color	Descripción	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Presión, Depresión		Azul Rey	160/240/20	0/0/255
Otras		Negro	160/0/0	0/0/0

Tabla 3.17. Uso del Color - Ítems Varios

Ítem	Color	Descripción	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/ Azul
Código Equipos Normal		Negro	160/0/0	0/0/0
Títulos de Pantallas		Azul Marino	140/240/6 0	0/64/128
Texto General		Azul Marino	140/240/6 0	0/64/128

3.5.5. Información Textual

El diseño de las fuentes se realizó de la siguiente manera:

La fuente que se utilizó es: SansSerif

El estilo de la fuente empleada es: Bold

El tamaño de la fuente para el Título de la Pantalla es: 36 pt

El tamaño de la fuente para los subtítulos de la Pantalla es: 24 pt

El tamaño de la fuente para los Gráficos es: 20 pt

Las etiquetas tienen un tamaño de fuente número: 18pt

3.5.6. Formato de datos de salida e ingreso

Los datos serán ingresados y presentados en formato decimal con un máximo de tres cifras decimales.

Las unidades que se utilizaran son:

Tabla 3.18. Unidades

Presión	kPa
Deformación	Mm
Altura	Mm
Diámetros	Cm
Peso	G
Área	cm ²
Ángulo	°
Esfuerzo	kg/cm ²

Capítulo 4

Pruebas y Evaluación del Equipo Instalado

4.1. Análisis de Datos

Para evaluar la factibilidad de los datos, se realizaron ensayos y se compararon los valores obtenidos con los esperados según el tipo de suelo utilizado.

Según el tipo de suelo o muestras con características similares se tienen valores de cohesión y ángulo de fricción referenciales. Valores que se observan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores Característicos UU, CU

Tipos de Suelos		Ángulo de Fricción interna en grados	Cohesión C
Granulares o no Cohesivos	Arena Suelta	30	
	Arena Compacidad media	32,5	
	Arena densa	35	
	Grava	35	
	Grava arenosa heterogénea	35	
	Bloques de piedra escolleras (sin presencia de arena)	35	
Suelos Cohesivos	Arcilla semidura	15	0,25
	Arcilla firmes	16	0,1
	Arcilla Blandas	17	0
	Arcilla Arenosa firme	22,5	0,05
	Arcilla arenosa blanda	23,5	0
	Limo firme	24,5	0,002
	Limo blando	35,5	0
	Arcilla orgánica, limo y deno, no fibroso	10	0
	Turba	15	0

Debido a que las muestras tuvieron un tratamiento anterior, es decir, sometidas a diferentes tipos de ensayos para establecer propiedades y características propias. Se las clasificó dentro de un grupo de suelos.

En la Tabla 4.2 se encuentra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales.

Tabla 4.2 Resultados Ensayos Triaxiales

Nº	Muestra	Valor Calculado	
		Ángulo Fricción	Cohesión
	Descripción	ϕ	kg/cm ²
NO CONSOLIDADOS NO DRENADOS			
1	Sondeo A CA1	2,96	0,21
2	Sondeo A CA2	2,15	0,27
3	Sondeo A CA3	1,24	0,24
4	Sondeo B CB3	2,48	0,28
5	Sondeo B CB4	1,86	0,12
6	Sondeo B CB5	0,23	0,83
7	Sondeo PE4 (1a+1b)	4,08	0,1
8	Sondeo PE4 SHELBY -1(2,00-2,50m)	6,84	0,33
9	Sondeo PE4 SHELBY -2(5,00-5,50m)	7,25	0,55
10	Sondeo PE4 SHELBY -3(11,00-11,50m)	6,28	0,21
11	Sondeo PE4 SHELBY -4(22,55-23,00m)	4,86	0,16
12	ZONA PANTAVÍ CP - 1 (1,54-2,60)	24,95	0,31
13	ZONA PANTAVÍ CP - 1 (2,60-3,00)	20,94	0,48
14	ZONA PANTAVÍ CP - 1 (2,60-3,00)	9,37	0,41
15	CP-4	21,47	0,55
16	CM-4 MUESTRA N°1	19,93	0,73
CONSOLIDADOS NO DRENADOS			
18	ZONA PANTAVÍ CP - 1 (2,60-3,00) (MUESTRA RECOMPACTADA)	32,92	0,55
19	CP5	24,23	0,11

Los datos obtenidos están cerca del valor esperado, por tanto, son factibles.

El detalle de los ensayos realizados se encuentra en ANEXO G.

Capítulo 5

Análisis de Costos

5.1. Inversión Inicial

Para conseguir los recursos necesarios del proyecto se realizó una inversión inicial igual a 2077.40 dólares.

Tabla 5.1 Inversión Inicial

Costo	Valor
Materiales	1802,13
Mano de Obra	156,80
Transporte	47,04
Indirectos	71,72
Total	2077,70

El detalle de este valor se encuentra distribuido en los siguientes rubros.

Materiales

Los materiales utilizados tienen un costo de 1802.13 dólares.

Tabla 5.2. Materiales

Detalle	Valor
Insumos y Repuestos	1034,60
Cerrajería	8,04
Material Electrónico	759,49
Total	1802,13

Dentro de los cuales se detallan los insumos y repuestos, cerrajería y material electrónico utilizado para el proceso.

Tabla 5.3. Insumos y Repuestos

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total	%
6	Membrana Reforzada	126,90	761,37	852,73
2	Sensor Capacitivo	40,00	80,00	89,60
1	Reservorio	10,00	10,00	11,20
1	Manómetro	5,00	5,00	5,60
1	Parlantes	15,00	15,00	16,80
1	Caja Metálica	22,32	22,32	25,00
1	Manguera	1,42	1,42	1,59
1	Corte Acrílico 3mm	5,00	5,00	5,00
1	ETIQUETAS	7,92	7,92	8,87
1	Canaleta	0,70	0,70	0,78
1	Cinta Doble Faz	3,56	3,56	3,99
1	Malla Plástica	12,00	12,00	13,44
Total				1034,60

Tabla 5.4. Cerrajería

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total	%
1	Lámina de Tol	3	3	3,36
1	Chapa	2,6	2,6	2,91
2	Perno CAB 0.08	0,44	0,88	0,99
1	Perno CAB 0.04	0,44	0,44	0,49
1	Tuerca HE 0.02	0,26	0,26	0,29
Total				8,04

Tabla 5.5. Material Electrónico

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total	%
1	NI DAQ 6210	646,63	646,63	704,83
1	Cable Parlante Polarizado 18AWG	1,05	1,05	1,05
1	Cable Parlante Polarizado 20AWG	0,35	0,35	0,35
1	Cable Gemelo	0,26	0,26	0,29
1	Almohadilla Transparente	0,59	0,59	0,59
1	Estaño	4	4	4,48
1	Varios	47,90	47,90	47,90
Total				759,49

Mano de Obra

La mano de obra requerida para la fabricación del proyecto, tiene un costo de 156.8 dólares.

Tabla 5.6. Mano de obra

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio Unitario</i>	<i>Precio Total</i>	<i>%</i>
1	Placas Electrónicas	140	140	156,80
Total				156,80

Transporte

Para la obtención de algunos materiales, se hizo necesario pagar por transporte. El cuál está valorado en 47.04 dólares.

Tabla 5.7. Transporte

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio Unitario</i>	<i>Precio Total</i>	<i>%</i>
1	Envío Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)	42	42	47,04
Total				47,04

Costos Indirectos

Son aquellos costos que se requirieron para la realización del proyecto, pero que no son parte del mismo.

Tabla 5.8. Costos Indirectos

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total	%
15	Membrana para la muestra Paquete 5	2,5	37,5	42,00
1	Broca metálica 1.5mm	3	3	3,36
1	Broca metálica 12mm	9	9	10,08
1	Aceite 3 en 1	1,33	1,33	1,49
1	Lija de Agua	0,72	0,72	0,81
3	Teflón	0,7	2,1	2,35
1	Guante UN	1,38	1,38	1,55
1	Guante DO	2,21	2,21	2,48
1	Papel Victoria	3,2	3,2	3,58
1	Silicona RED RTV	3,6	3,6	4,03
Total			71,72	

5.2. Capital de Trabajo

Es el fondo económico que se utiliza para seguir reinvertiendo y logrando utilidades para así mantener la operación corriente del negocio. Para establecer el capital de trabajo se debe identificar los costos fijos y variables del proyecto.

Tabla 5.9. Capital de Trabajo

Especificación	Costo Año
Costos Variables	2806,79
Costos Fijos	7133,29
Total	9940,08

$$CT = CO * COPD$$

Dónde, CO es el número de días por ciclo productivo y COPD es igual al costo de operación promedio diario.

$$CT = CO * \frac{COSTO\ TOTAL\ ANUAL}{365}$$

Por tanto, el capital de trabajo se determinó a partir de la siguiente fórmula

$$Capital\ de\ Trabajo = \left(\frac{Costos\ Variables + Costos\ Fijos}{365} * 30 \right)$$

Siendo, el capital de trabajo es igual a 2485.02 dólares.

Costos Variables

Para establecer los costos variables totales, primero se establecen los costos variables unitarios, en este caso, es el costo que se requiere por cada ensayo.

Tabla 5.10. Costos Variables Unitarios por Ensayo

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Membranas para muestra de 38mm Paquete	Unidad	10	122.28	1369.54
Par de Discos Porosos 38mm	Unidad	2	41.22	92.33
Total				1461.87

Además, se debe establecer la capacidad de la máquina para realizar ensayos.

Tabla 5.11. Capacidad para Realizar Ensayos Triaxiales

TRIAXIALES	#			
	SEMANTAL	MENSUAL	ANUAL	Posibles al Año
<i>UU</i>	5	20	240	180
<i>CU</i>	1	4	48	8
<i>CD</i>	1	4	48	4
TOTAL	7	28	336	192

De esta manera, se identificó que se pueden realizar 192 ensayos triaxiales (UU, CU, CD)

Por tanto, el costo variable total para ensayos triaxiales es de 2806.79 dólares.

Tabla 5.12. Costos Variables Totales Ensayos Triaxiales

Años	Número Ensayos Triaxiales al Año	Costo Variable Unitario	Costos Variables Totales Ensayos Triaxiales
2014	192	1461.87	2806.79
2015	192	1461.87	2806.79
2016	192	1461.87	2806.79
2017	192	1461.87	2806.79
2018	192	1461.87	2806.79
Total			14033.94

Costos Fijos

Los costos fijos son los valores que se deben pagar independientemente del nivel de operación. La máquina TRIAX50 tiene 7133.29 dólares de costo fijo.

Tabla 5.13. Costos Fijos

COSTOS FIJOS					
Especificaciones	Años				
	2014	2015	2016	2017	2018
	Costo Anual				
Mano de Obra	7050	7050	7050	7050	7050
Servicios Básicos	39.29	39.29	39.29	39.29	39.29
Otros Gastos	44	44	44	44	44
Total	7133.29	7133.29	7133.29	7133.29	7133.29

5.3. Activos

Son los bienes tangibles o intangibles que se posee.

5.3.1. Activos Diferidos

Son gastos que no ocurren de manera recurrente.

Tabla 5.14. Activos Diferidos

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Capacitación	Unidad	1	200	200
Total				200

5.3.2. Activos Fijos

Son los bienes que se utilizan de manera continua en el curso normal de sus operaciones.

Tabla 5.15. Activos Fijos

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Maquinaria y Equipo				
Reservorio	Unidad	1	11.20	11.20
Tarjeta de Adquisición	Unidad	1	704.83	704.83
Placas Electrónicas	Unidad	1	156.80	156.80
Membrana Reforzada	Unidad	6	126.90	761.37
Materiales Electrónicos	Unidad	1	47.90	47.90
Membranas para muestras de 38mm	Unidad	10	122.28	1369.54
Par de Discos Porosos 38mm	Unidad	2	41.22	92.33
Sensor Capacitivo	Unidad	2	40.00	89.60
Transductor de Deformación	Unidad	2	846.72	2235.34
Transductor de Presión	Unidad	1	420.00	554.40
Equipos de Computación				
Parlantes	Unidad	1	16.80	16.80
Total				6040.11

*Activos Intangibles 0, no existen gastos de constitución ni derechos de marca

Tabla 5.16. Activos

Concepto	Monto
Activos Fijos	6040.11
Activos Diferidos	200
Activos Intangibles	0
Capital de Trabajo	2450.98
Total	8691.08

5.4. Ingresos

Los ingresos se calculan a partir del costo de cada ensayo.

Tabla 5.17. Presupuesto de Ingresos

Presupuesto de Ingresos					
Concepto	Años				
	2014	2015	2016	2017	2018
Ensayos Triaxiales UU					
Número de Ensayos	180	180	180	180	180
Precio	110	110	110	110	110
Subtotal	19800	19800	19800	19800	19800
Ensayos Triaxiales CU					
Número de Ensayos	8	8	8	8	8
Precio	350	350	350	350	350
Subtotal	2800	2800	2800	2800	2800
Ensayos Triaxiales CD					
Número de Ensayos	4	4	4	4	4
Precio	450	450	450	450	450
Subtotal	1800	1800	1800	1800	1800
TOTAL	24400	24400	24400	24400	24400

5.5. Depreciación

Es la reducción periódica del valor de un bien material o inmaterial

Tabla 5.18. Depreciación

Activos Fijos	Precio Total	Vida Útil		Valor Residual		Años
		Años	%	\$		
Maquinaria y Equipo						
Reservorio	11.20	5	30	3.36		1.57
Tarjeta de Adquisición	704.83	5	30	211.45		98.68
Placas Electrónicas	156.80	2	30	47.04		54.88
Membrana Reforzada	761.37	5	30	228.41		106.59
Materiales Electrónicos	47.90	2	30	14.37		16.76
Membranas para muestra de 38mm Paquete	1369.54	0.5	30	410.86		1917.35
Par de Discos Porosos 38mm	92.33	1	30	27.70		64.63
Sensor Capacitivo	89.60	5	30	26.88		12.54
Transductor de Deformación	2235.34	5	30	670.60		312.95
Transductor de Presión	554.40	5	30	166.32		77.62
Equipos de Computación						
Parlantes	16.80	6	30	5.04		1.96
Total						2665.53

Tabla 5.19. Venta de Activos

Activos Fijos	Precio Total	Vida Útil	Valor Residual		Año 2018
		Años	%	\$	
Maquinaria y Equipo					
Reservorio	11.20	5	6	0.67	3.36
Tarjeta de Adquisición	704.83	5	6	42.29	211.45
Placas Electrónicas	156.80	2	6	9.41	18.82
Membrana Reforzada	761.37	5	6	45.68	228.41
Materiales Electrónicos	47.90	2	6	2.87	5.75
Membranas para muestra de 38mm Paquete	1369.54	0.5	6	82.17	41.09
Par de Discos Porosos 38mm	92.33	1	7	6.46	6.46
Sensor Capacitivo	89.60	5	8	7.17	35.84
Transductor de Deformación	2235.34	5	9	201.18	1005.90
	554.40	5	10	55.44	277.20
Equipos de Computación					
Parlantes	16.80	6	6	1.01	6.05
Total					1840.32

5.6. Utilidad de Operación

La utilidad neta de los ensayos al año es de 14459.92 dólares.

Tabla 5.20. Utilidad de Operación

Utilidad de Operación	
Ingresos	24400.00
Costos Fijos	7133.29
Costos Variables	2806.79
Total	14459.92

5.7. Amortización Intangible

En la amortización de los activos intangibles no se tiene una vida útil definida, por lo que se consideró la menor de la vida útil estimada.

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Gastos Operacionales				
Capacitación	Unidad	1	200	200

Tabla 5.21. Amortización Intangible

Concepto	Costo Unitario	Amortización	Años
Gastos Operacionales	200	20	40
Total			40

5.8. Flujo de Caja

Para determinar el resultado neto de Ingresos de dinero menos giros de dinero, se requiere indicar el flujo de caja.

Tabla 5.22. Flujo de Caja

Concepto	Años				
	2014	2015	2016	2017	2018
Ingresos		24400	24400	24400	24400
Venta de Activos					1840.32
Costos Variables	2806.78	2806.78	2806.78	2806.78	2806.78
Costos Fijos	7133.29	7133.29	7133.29	7133.29	7133.29
Gastos					
Administrativos					
Depreciación	2665.53	2665.53	2665.53	2665.53	2665.53
Amortización Intangible	40	40	40	40	40
Utilidad Bruta		14459.92	14459.92	14459.92	14459.92
15% Participación Trabajadores		2168.99	2168.99	2168.99	2168.99
Utilidad Antes de Impuestos		12290.93	12290.93	12290.93	12290.93
25% Impuesto a la Renta		3072.73	3072.73	3072.73	3072.73
Utilidad Neta		9218.20	9218.20	9218.20	9218.20
Depreciación	2665.53	2665.53	2665.53	2665.53	2665.53
Amortización Intangible	40	40	40	40	40
Inversión Inicial	2077.70				
Inversión de Reemplazo					
Inversión de Ampliación					
Inversión Capital de trabajo	2450.98				
Valor de Desecho					
Recuperación de Capital de Trabajo					2450.98
Flujo de Caja	-4528.68	6512.67	6512.67	6512.67	8963.65

5.9. Análisis de Riesgo y Sensibilidad

Los parámetros usados para demostrar la viabilidad de un proyecto son el Valor Actual Neto (VAN), Tasa interna de retorno (TIR) y la Relación Costo-Beneficio.

5.9.1. TEMAR, TIR y VAN

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Dónde k es el tipo de interés, V_t representan los flujos de caja en cada período t , I_0 es el valor de desembolso inicial de la inversión y n es el número de períodos considerado.

El valor de k , se calcula a partir de:

$$k = I_I + \left[(I_S - I_I) * \frac{VAI}{VAI - VAS} \right]$$

Dónde, VAI es el valor actual de ingresos y VAS es el valor actual de egresos.

$$VAI = FSA * V_t$$

$$VAS = FSA * V_t$$

$$FSA = \frac{1}{(1+I)^t}$$

Para calcular el VAI se utilizó un interés de 20.5 % y para calcular el VAS un interés de 20.8%.

Tabla 5.23. Valor Actual Neto [VAN]

Año	Flujo	TEMAR				TIR	
		20.5%		20.8%		FSA	VAN
		FSA	VAI	FSA	VAS	FSA	VAN
0	-4528.68	1.00	-4528.68	1.00	-4528.68	1.00	-4528.68
1	6512.67	0.83	5404.70	0.83	5391.28	0.63	4110.20
2	6512.67	0.69	4485.23	0.69	4462.98	0.40	2593.99
3	6512.67	0.57	3722.18	0.57	3694.52	0.25	1637.09
4	8963.65	0.47	4251.44	0.47	4209.37	0.16	1422.01
Total			13334.89		13229.48		5234.61

$$k = 0.205 + \left[(0.208 - 0.205) * \frac{13334.89}{13334.89 - 13229.48} \right] = 0.58$$

De esta manera, el VAN es igual a 9098.78 dólares.

La TIR representa la rentabilidad del proyecto y se calcula con la siguiente fórmula.

$$I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t}$$

De esta manera, el TIR es 142%.

5.9.2. Relación Costo – Beneficio

$$B/C = \frac{\text{Valores Actuales Ingresos}}{\text{Valores Actuales de Egresos}}$$

$$\text{Valores Actuales Ingresos} = FSA * \text{Ingresos}$$

$$\text{Valores Actuales Egresos} = FSA * \text{Egresos}$$

Para el cálculo del FSA se utilizó un Interés igual al 12%

Tabla 5.24. Relación Costo - Beneficio [B/C]

Año	Ingresos	Egresos	FSA	Valores Actuales		Relación B/C
				Ingresos	Egresos	
0		4528.68	1.00	0.00	4528.68	
1	9218.20	2705.53	0.89	8230.54	2415.65	
2	9218.20	2705.53	0.80	7348.69	2156.83	
3	9218.20	2705.53	0.71	6561.33	1925.74	
4	11669.18	2705.53	0.64	7415.97	1719.41	
Total				29556.53	12746.32	2.32

Encontrando una Relación Costo – Beneficio igual a 2.32

Tabla 5.25. Resumen Análisis de Riesgo y Sensibilidad

	Valor	Significado
VAN	5234.61	La inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida
TIR	142%	Es altamente rentable
B/C	2.32	El proyecto es viable

Es decir, el proyecto es aceptable y la inversión inicial es recuperable.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se desarrolló un sistema electrónico-informático para la máquina Triax 50, mediante el cual la toma de datos no depende de la apreciación que tenga la persona que opere el sistema y no requiere de una supervisión continúa en estos ensayos, que dependiendo del tipo y características de los suelos tienen un tiempo promedio de 2 a 21 horas, evitando así posibles errores y la acumulación de los mismos.
- El desarrollo de un sistema electrónico-informático para la máquina TRIAX 50 ha servido para determinar con mayor precisión y exactitud los parámetros de resistencia al corte del suelo como son la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ), que a su vez sirven para cálculos de resistencia al corte del suelo y su aplicación está en el diseño de cimentaciones de estructuras, muros, estabilidad de taludes, etc.
- Se redujo el tiempo del ensayo en un 20% por medio de la implementación de alarmas visuales y sonoras que advierten diferentes estados del ensayo o de la máquina.
- Se disminuyó el consumo de agua en el ensayo en un 35% al emplear el agua que sale del bladder al ser inflado, para llenar parte de la cámara triaxial y al regresar el agua de la cámara triaxial al reservorio,

mediante la bomba de vacío y un conjunto de válvulas mariposa luego de finalizado el ensayo.

- Se ha demostrado que se puede repotenciar la máquina y automatizar los procesos que contribuyen el estudio en la Ingeniería Civil con los recursos de la Ingeniería Mecatrónica para el cálculo del comportamiento del suelo bajo condiciones de carga y deformación y posteriormente diseño de estructuras.

6.2. Recomendaciones

- Reemplazar el compresor actual de 2 Hp de potencia y 50 litros de capacidad que permite alcanzar los 600kPa entre presión de confinamiento y contrapresión, por uno de 5.5 Hp de potencia y 200 litros de capacidad, así se lograra alcanzar los 1100kPa tanto en confinamiento, como en contrapresión en ensayos CU y CD.
- Emplear una computadora dedicada para la ejecución del programa.
Las características mínimas que debe tener el computador son:
Procesador Intel core i3, 3MB de cache, 2.9 GHz o equivalente
4 GB de memoria Ram
Disco duro de 250 GB
Sistema operativo Windows 7 Professional o Ultimate
Monitor de 16 pulgadas
- Colocar un supresor de picos para voltaje y así, evitar no sobrepasar los voltajes de excitación (10 – 12V) en los transductores.

- Llevar a cabo los procesos para un Automatización completa de la máquina, que disminuya el trabajo del operador.
- En base a los tipos de ensayos, se puede llegar a diseñar un software inteligente que analice el comportamiento de la muestra, tome las acciones necesarias en la respectiva etapa y pronostique un tiempo de duración del ensayo.

Referencias Bibliográficas

Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Bogotá: Mc Graw Hill.

Bowles, J. E. (s.f.). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Mc Graw Hill.

González, J. L. (2003). *Metalurgia Mecánica*. LIMUSA Noriega Editores.

Miguel, P. A. (2010). *Calidad ISO9001:2008*. Paraninfo S.A.

Peck, K. T. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Barcelona: EL ATENEO S.A.

Ponsati, E. G. (2001). *Fiabilidad Industrial*. Ediciones UPC.

Solé, A. C. (s.f.). *Fiabilidad y seguridad: su aplicación en procesos industriales* (Segunda ed.).

Marcombo.

Capítulo 7

Anexos

ANEXO A. Plano Hidráulico

ANEXO B. Plano ISA

ANEXO C. Análisis de Fallas, efectos y criticidad

ANEXO D. Guía de Procedimientos

ANEXO D1. Guía de Procedimientos - TABLA

ANEXO E. Diseño PCB

ANEXO F. Facturas

ANEXO G. Ensayos

ANEXO H. Manual de Mantenimiento

ANEXO I. Manual del Usuario