



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO UTILIZANDO INTERPOLACIÓN DE LAGRANGE PARA EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE SENSORES DE PRESIÓN LVDT

MARCOS ANTONIO JÁCOME TORRES

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba - Ecuador

Junio 2017

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “Desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de Lagrange para el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT”, de responsabilidad del Sr Ing. Marcos Antonio Jácome Torres, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Dr. Juan Vargas Guambo; MSc.
PRESIDENTE

FIRMA

Ing. Lozada Yanez Pablo; MSc.
DIRECTOR

FIRMA

Ing. Jiménez Granizo Cristhy; Msc.
MIEMBRO

FIRMA

Ing. Chavez Vasquez Freddy; Msc.
MIEMBRO

FIRMA

Riobamba, Junio 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, MARCOS ANTONIO JÁCOME TORRES, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

MARCOS ANTONIO JÁCOME TORRES
No. Cédula: 060397940-2

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, MARCOS ANTONIO JÁCOME TORRES, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, Junio de 2017

Marcos Antonio Jácome Torres
CI: 0603979402

DEDICATORIA

A Jehová Dios, mi familia y amigos. Aquellos que saben que los amo y están continuamente en mi memoria.

AGRADECIMIENTO

A Jehová Dios, mi familia y amigos. Que en todo momento estuvieron conmigo.

Marcos

CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	xiii
SUMARY	xiv
CAPITULO I	
1. INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.1.1 <i>Situación Problemática</i>	1
1.1.2 <i>Formulación del problema</i>	2
1.1.3 <i>Preguntas directrices o específicas de la investigación</i>	2
1.1.4 <i>Justificación de la investigación</i>	2
1.1.5 <i>Objetivo General</i>	3
1.1.6 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.1.7 <i>Hipótesis</i>	3
CAPITULO II	
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Antecedentes del problema	4
2.2 Bases Teóricas	6
2.2.1 <i>Ensayo de compresión</i>	6
2.2.2 <i>Sensores de desplazamiento inductivos LVDT</i>	7
2.2.3 <i>Interpolación polinómica de Lagrange</i>	7

CAPITULO III

3.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	9
3.1	Características y uso sensor de precisión LVDT	9
3.2	Obtención de curvas del sensor	14
3.3	Uso de Matlab para obtener los modelos matemáticos	16
3.3.1	<i>Experimento 1</i>	17
3.3.2	<i>Experimento 2</i>	19
3.3.3	<i>Experimento 3</i>	20
3.3.4	<i>Experimento 4</i>	22
3.3.5	<i>Experimento 5</i>	24
3.3.6	<i>Experimento 6</i>	25
3.4	Dimensionamiento tarjeta Arduino	27
3.4.1	<i>Conexión Hardware y dimensionamiento</i>	27
3.4.2	<i>Comunicación software</i>	29
3.5	Desarrollo del HMI en Labview	31

CAPITULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1	Ensayos	38
4.1.1	<i>Ensayo 1</i>	38
4.1.2	<i>Ensayo 2</i>	38
4.1.3	<i>Ensayo 3</i>	39
4.2	Demostración hipótesis: Comparación de medidores	40
4.2.1	<i>Resultados de análisis de Precisión</i>	40
4.2.2	<i>Resultados de análisis de Error</i>	41

4.2.3 <i>Resultados de Tiempo de Ensayo</i>	42
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-3	Datos obtenidos de voltaje y deformación en el ensayo	12
Tabla 2-3	Nodos utilizados para la aproximación de Lagrange	15
Tabla 3-3	Nodos utilizados para la segunda aproximación de Lagrange	21
Tabla 4-3	Errores obtenidos de la función de Lagrange	22
Tabla 5-3	Errores obtenidos con la cuarta aproximación de Lagrange	25
Tabla 6-3	Errores obtenidos con la quinta aproximación de Lagrange	26
Tabla 1-4	Valores obtenidos primer ensayo	38
Tabla 2-4	Pruebas y errores obtenidos primer ensayo	38
Tabla 3-4	Valores obtenidos segundo ensayo	38
Tabla 4-4	Pruebas y errores obtenidos segundo ensayo	39
Tabla 5-4	Valores obtenidos tercer ensayo	39
Tabla 6-4	Pruebas y errores obtenidos tercer ensayo	39
Tabla 7-4	Precisión entre Compresómetro Analógico y Consola para LVDT	40
Tabla 8-4	Error entre Compresómetro Analógico y Consola Para LVDT	41
Tabla 9-4	Tiempo de Ensayo Compresómetro Analógico y Consola LVDT	42
Tabla 10-4	Resumen de ensayos de Precisión, Error y Tiempo de Ensayo	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-2	Aspecto físico y componentes sensor LVDT.....	7
Figura 1-3	Equipo de ensayo de materiales	9
Figura 2-3	Sensor LVDT	9
Figura 3-3	Disposición de pines sensor LVDT	10
Figura 4-3	Conexiones eléctricas en el equipo de ensayos	10
Figura 5-3	Datos tomados de voltaje en el equipo	11
Figura 6-3	Disposición física del sensor para la toma de datos	11
Figura 7-3	Visualización en el osciloscopio de la señal del sensor	12
Figura 8-3	Gráfica de todos los nodos obtenidos en el ensayo	17
Figura 9-3	Script realizado en Matlab para el cálculo por mínimos cuadrados	18
Figura 10-3	Ingreso de nodos en el script de mínimos cuadrados	18
Figura 11-3	Valor de m y b mediante mínimos cuadrados	18
Figura 12-3	Gráfica de todos los nodos junto con la recta obtenida	19
Figura 13-3	Gráfica de los nodos junto con la segunda recta obtenida	19
Figura 14-3	Ejecución script Matlab cálculo de interpolación de Lagrange	20
Figura 15-3	Grafica de los nodos y de la función de Lagrange	20
Figura 16-3	Ejecución de Matlab segunda aproximación de Lagrange	21
Figura 17-3	Aproximación del nodo x80 en $f(x80)$ y $\ln(x80)$	21
Figura 18-3	Ejecución código para cálculo de error	22
Figura 19-3	Ejecución de Matlab tercera aproximación de Lagrange	23

Figura 20-3	Gráfica de los nodos y la tercera aproximación de Lagrange	23
Figura 21-3	Ejecución de Matlab cuarta aproximación de Lagrange	24
Figura 22-3	Gráfica de los nodos y la cuarta aproximación de Lagrange	24
Figura 23-3	Ejecución de Matlab quinta aproximación de Lagrange	25
Figura 24-3	Gráfica de los nodos y la quinta aproximación de Lagrange	25
Figura 25-3	Función de Lagrange del menor error obtenido	26
Figura 26-3	Modelo común de equipo de ensayo de materiales	26
Figura 27-3	Modelo reemplazo del equipo de ensayos de materiales	27
Figura 28-3	Esquema final del proyecto	28
Figura 29-3	Conexión Arduino con el sensor LVDT	29
Figura 30-3	Instalación LabVIEW Interface for Arduino	30
Figura 31-3	Configuración Puerto Com Arduino	30
Figura 32-3	Instalación LabVIEW Interface for Arduino	30
Figura 33-3	Programa diseñado en Labview para el proyecto	31
Figura 34-3	Código en labview para la adquisición de señales	31
Figura 35-3	Presentación final HMI desarrollado en Labview	32
Figura 1-4	Esquema físico general del proyecto	33
Figura 2-4	Cámara de ensayos con el sensor LVDT	34
Figura 3-4	Computador conectado la consola LVDT	34
Figura 4-4	Placas normalizadas de 1mm hasta 25mm	35
Figura 5-4	Prueba de datos con placa de 1mm	35
Figura 6-4	Resultado prueba con placa de 1mm	35
Figura 7-4	Prueba de datos con placa de 25mm	36
Figura 8-4	Resultado prueba con placa de 25mm	36

Figura 9-4	Toma de datos con el medidor analógico	37
Figura 10-4	Toma de datos con el sensor LVDT	37
Figura 11-4	Precisión Compresómetro Análogo y Consola LVDT.....	41
Figura 12-4	Error Compresómetro Análogo y Consola LVDT	42
Figura 13-4	Resumen de Precisión, Error y Tiempo de Ensayo	43

RESUMEN

El objetivo fue implementar un adecuado sistema de adquisición e interpretación de datos de la señal de un sensor de presión Transformador Diferencial Variable Lineal Transformador Diferencial Variable Lineal (LDVT) que se ubica dentro de una cámara de ensayos de materiales de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo para independizarla del equipo de interpretación de datos debido a su ineficiente movilidad al campo de pruebas fuera de los laboratorios. Para determinar el modelo matemático del comportamiento dinámico del sensor: voltaje vs deformación se toman datos de un ensayo realizado en laboratorio, se grafican y busca mediante interpolación y experimentación la curva que más se iguale a este comportamiento. Se mencionan los seis resultados más sobresalientes y el utilizado es la curva $Ln(x)=-0.016714859437751x+0.000012$ con un error máximo de 1.39%. Se verifican los resultados al medir placas normalizadas de 1mm pero se tiene el valor de -10.7049 mm con un error de 970.49% que es muy lejano al calculado. Este modelo en base a los datos del equipo no es el correcto y por ende se encuentra funcionando mal. Se modela nuevamente el sensor LVDT con las placas normalizadas, el menor error 0.84% nos dio la curva $y=15.3214x-8.1080$ y se logra verificar los resultados con el resto de placas. Se demuestra que satisface la hipótesis comparando nuestro sistema con medidores analógicos. Los valores del analógico y nuestro sistema respectivamente son Variación de resultados o Precisión= 3.09% y 0.141%, Dispersión de datos = 0.01mm y 0.0005mm y Tiempo de ensayo = 34.33min y 2.141min. Se concluye que nuestro sistema es más eficiente que un analógico, permite verificar la hipótesis de conocer el comportamiento dinámico del sensor LVDT y reemplazar al equipo de ensayos de materiales del laboratorio de Ingeniería Civil.

Palabras claves: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, < TRANSFORMADOR DIFERENCIAL VARIABLE LINEAL (LDVT)>, <LAGRANGE (MÉTODO)>, < ADQUISICIÓN >, <EXPERIMENTACIÓN>, <ENSAYOS DE MATERIALES>, <MODELAMIENTO>

ABSTRACT

The main objective was to implement an adequate system of acquisition and interpretation of signal data from a pressure sensor Linear Variable Differential Transformer (LVDT) that is located inside of a test chamber for materials of Civil Engineering at Universidad Nacional de Chimborazo to be independent of the data interpretation equipment, due to its inefficient mobility toward the field trials outside the laboratories. To determine the mathematical model about dynamic behavior of the sensor voltage vs deformation, takes data from a laboratory test that are plotted and sought through interpolation and experimentation the curve that most equals this behavior. It mentions the six most outstanding results, and the curve used is $Ln(x) = -0.016714859437751x + 0.000012$ with a maximum error of 1.39%. On the other hand, it verifies the results when measuring standard plates of 1mm, but obtains a value of -10.7049mm with an error of 970.49% which does not have to do with the calculated one; taking into account that the model based on the data of the equipment is not correct and therefore is working wrongly. The LVDT sensor is again modeled with the standardized plates, then the curve $y = 15.3214x - 8.1080$ showed the smallest error of 0.84% and verify the results with the other plates. Finally, it demonstrates that it satisfies the hypothesis by comparing our system with analog meters. The values of the analog and the new system respectively are a variation of results or Accuracy = 3.09% and 0.141%, Data dispersion = 0.01mm and 0.0005mm, test Time = 34.33min and 2.141min. It concludes that our system is more efficient than an analogue and allows verifying the hypothesis of knowing the dynamic behavior of the LVDT sensor to replace the material testing equipment at the laboratory of Civil Engineering.

Key words: ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES, AUTOMATIC CONTROL, LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER (LVDT), LAGRANGE (METHOD), ACQUISITION, EXPERIMENTATION, MATERIALS TESTING, MODELING.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1 Situación Problemática:

El desplazamiento de los equipos de ensayos de materiales al campo de pruebas, en la carrera de Ingeniería Civil UNACH, tiene limitaciones por sus tamaños y pesos. Los fabricantes presentan escasa información de la construcción de los equipos de tal manera que duplicarlos por los métodos convencionales usando hojas de datos es prácticamente imposible. Lo deseable es que la cámara de ensayo de materiales se pueda independizar del equipo que recibe la información de este ensayo y la visualice en un computador. Según la ingeniería tradicional lo que se puede hacer es obtener la curva de la respuesta dinámica de este tipo de instrumentos mediante consultas de la información del fabricante y utilizarla para el diseño de un interfaz hombre máquina o HMI. La circunstancia actual es que tal información es inexistente debido a la misma razón explicada de evitar la copia y plagio de los prototipos de este tipo de maquinarias.

Dado que los temas de tesis de pregrado que se han propuesto y se referencian en el estado del arte del presente trabajo de investigación, no han logrado resolver tal problemática, el presente toma un punto de vista más investigativo con la aplicación de matemáticas, instrumentación y metodología experimental para hallar una solución viable con el menor error posible y la aplicación de los criterios de modelación de un sistema que es una de las bases primordiales de los sistemas de control y automatización, conocimientos que se pueden ver en estudios de maestría y doctorados.

1.1.2 Formulación del problema:

El desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de LaGrange servirá para conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal).

1.1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación:

¿Cuál es la información teórica técnica científica para nuestro tema de investigación?

¿Cuál es el diagnóstico de la situación actual?

¿Cuál es el desarrollo teórico-práctico del modelo matemático del comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT?

¿Cuáles son las pruebas y resultados obtenidos?

1.1.4 Justificación de la investigación:

¿Para qué sirve la investigación?

Sirve para determinar el modelo matemático del comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT con el menor error posible e independizar el sensor LVDT de los equipos de ensayos de materiales de Ingeniería Civil de la UNACH

¿Qué resultados se esperan obtener o que propuesta se desea plantear?

La obtención del modelo matemático que caracterice el comportamiento del sensor de presión LVDT e independizar el sensor del equipo que interpreta la información de la cámara de ensayos de materiales de Ingeniería Civil de la UNACH

¿Quién o quiénes son los beneficiarios?

Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Carrera de ingeniería civil de la UNACH, estudiantes de ingeniería civil, practicantes y personas que ocupen estos equipos, proyectos afines sobre independencia de equipos con instrumentos.

¿Por qué es importante la investigación?

Logrará la independencia del sensor LVDT de los equipos de ensayos de materiales de Ingeniería Civil de la UNACH y permitirá realizar el ensayo de materiales de campo en cualquier lugar fuera del laboratorio de ingeniería civil.

¿Cuáles son los aportes de trascendencia que dejará?

Generalizará el proceso de modelación de instrumentos a partir del muestreo de datos tomados en campo de su comportamiento y facilitará la movilidad de equipos de los laboratorios de ingeniería para pruebas y ensayos de materiales en cualquier lugar fuera de los laboratorios.

1.1.5 Objetivo General:

Desarrollar un modelo matemático utilizando interpolación de Lagrange para el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT.

1.1.6 Objetivos Específicos:

- Estudiar las características y uso de los sensores de precisión LVDT.
- Utilizar la metodología experimental para utilizar diferentes números de nodos para obtener diferentes curvas o modelos matemáticos del sensor.
- Utilizar software Matlab en la manipulación matemática de la interpolación de Lagrange, para obtener los diferentes modelos matemáticos.
- Analizar las respuestas y los márgenes de error de cada modelo encontrado para utilizar el que contenga el menor error.
- Diseñar un dispositivo que en base a una tarjeta de adquisición de señales Arduino, pueda acondicionar la señal del sensor hacia el computador, estableciendo las condiciones de comunicación entre la tarjeta el sensor y el software de comunicación.
- Desarrollar una aplicación en Labview que permita la independencia del sensor con la máquina y establecer la dependencia con el computador en un HMI.

1.1.7 Hipótesis

El desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de LaGrange sirve para conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

Trabajos de investigación han tratado de dar solución al presente problema de tesis en la UNACH, sin embargo debido a la necesidad de altos conocimientos del área de control y sobre el desarrollo investigativo experimental que envuelve no se los ha podido realizar. De entre los trabajos investigativos relacionados con el problema del modelamiento de instrumentos o de sistemas de control para maquinarias se resalta el aporte de Ismael Minchala, et al. Donde presenta un estudio comparativo de técnicas de modelación utilizando datos de variables de calidad como son: superficie específica o Blaine y el porcentaje de retenido del material en el tamiz, para la predicción de la fineza del cemento usando mediciones de señales de entrada y salida del circuito cerrado de molienda en una planta de cemento. En semejanza con el presente trabajo de investigación, el modelo de Minchala propone la generación de los modelos de predicción de un conjunto de datos de una base de datos de operación de la planta de cemento UCEM-Guapán. Así también las pruebas que realiza en línea de todos los modelos obtenidos demuestran la validez de los métodos de modelación y permiten la selección de los mejores modelos de predicción de fineza del cemento. Se utiliza el error residual de cada modelo para comparar la exactitud y precisión de cada enfoque (L. I. Minchala, 2016). En similitud a tal modelamiento en el presente trabajo, se propone el desarrollo de diferentes modelos de respuesta del sensor en base a la variación de los nodos de interpolación matemática de Lagrange. Los que serán evaluados en base a su error residual hasta alcanzar el modelo más aceptable de menor error.

Sandra Milena Merchan y J. A. Duarte en su trabajo de investigación “la construcción de un modelo predictivo para el Rendimiento Académico”, establece una gran cantidad de datos o de muestras para el modelo predictivo de rendimiento académico. Menciona que la minería de datos requiere una cantidad significativa de datos para proveer resultados significativos. Para su estudio obtuvo los registros anónimos de 932 estudiantes de las bases de datos institucionales, lo cual se hace debido a la diversidad de cualidades de la variable. Algo que no es muy necesario si la variable no representa mayor variación en su comportamiento (S.M. Merchán, 2016).

A. Valencia, G. González y M. Castañeda en su modelo de ecuaciones estructurales examina los factores y variables críticas en los procesos de aceptación de los resultados del modelo estimado de Ecuación Estructural para Estudiar la Aceptación de Aprendizaje Móvil (A. Valencia, 2016). Cuando la cantidad de datos necesarios para el procesamiento adecuado de la información es alta algunos autores para reducir la carga computacional proponen usar morfología matemática, como es el caso de M. V. Rodríguez quien señala que si se selecciona un modelo sencillo los resultados serán poco exactos, pero si la complejidad del modelo se incrementa para dar mayor exactitud a los resultados, la carga computacional también incrementará. Desde este punto de vista, el desarrollo de nuevas técnicas o metodologías que ofrezcan resultados eficientes y confiables en términos de funcionamiento y complejidad computacional sigue siendo un tema de bastante interés, aún más considerando el rápido crecimiento de la cantidad de datos en los sistemas eléctricos (M.V. Rodríguez, 2016), lo cual es otra opción pero los resultados obtenidos en este trabajo de investigación muestran una curva que presenta mayor variación y excesiva cantidad de datos. Es por ello que nos remitimos al diseño de un sistema de captación e interpretación adecuado para necesidades específicas, otros autores para ello utilizan un software adecuado en entorno distribuido (C. Lozoya, 2016), en nuestro caso Labview como lo es para el análisis de la variable de deformación lineal. El modelo autorregresivo para la estimación de la ecuación matemática del sensor y para predecir el error que se utiliza en predicción de errores y mejoramientos de modelos matemáticos (K. Miranda, 2016) es un método semejante al que estamos utilizando ya que al tomar medidas en subida y bajada de voltajes, donde se registra diferencias notables, es donde de manera regresiva volvemos a tomar datos e interpolar con ellos y así reducir el error significativamente. En semejanza a Lagrange (J. A. Esquivel, 2016) se han hecho también aproximaciones de un sistema con retardo en el estado de un segundo utilizando la aproximación de Pade (J. A. Esquivel, 2016) de tercer grado, manteniendo una estructura en el álgebra de Lie (J. A. Esquivel, 2016) que permita que la aproximación al sistema promediado se mantenga dentro de un cierto grado dado por el parámetro de incertidumbre, este grado es el mismo que utilizamos para calcular el error de nuestro sistema (J. A. Esquivel, 2016). Utilizamos la misma metodología para determinar la eficiencia de nuestro modelo. Hinojosa utiliza una formulación del problema de asignación de unidades con restricciones de transmisión empleando el método de Relajación Lagrangiana (V. Hinojosa, 2016). Con condiciones de desempeño similares a la nuestra. Kaschel para verificar los resultados de su sistema utiliza el potencial en los puntos de una grilla con el método de diferencias finitas (H. Kaschel, 2016), el mismo método utilizamos para reducir el intervalo de valores de los nodos en el proceso del modelamiento. Echeverría plantea la presentación de un HMI junto con la visualización de la caracterización de un sistema mecánico para validar los resultados (M. V. T. Echeverría, 2016), lo mismo que haremos en la presente tesis. Es importante señalar que por ser un instrumento de medida la variable puede tomar valores diferentes bajo

circunstancias diferentes, una solución factible es utilizar el criterio de solución de problemas multi-objeto. El proceso de tomar una decisión reside en que planteado un problema, debe formarse el conjunto de puntos factibles, o de otro modo, el correspondiente conjunto determina las restricciones del problema para asociarle a cada alternativa, criterio u objetivo, un grado de deseabilidad (M. B. Bernábe, 2016). Los puntos factibles son los valores que más se aproximen a un valor real y además al de la máquina modelo. Finalmente Apablaza utiliza un modelo genérico para la adquisición de las señales y además de su filtraje con las placas Arduino para su posterior interpretación en un lenguaje de sistemas de control y automatización industrial (D. Apablaza, 2016) para nuestro caso es Labview. Con los resultados que obtengamos haremos un aporte a la investigación de estos temas por ahora muy poco estudiados y podrá ser un punto de partida para posteriores sistemas más sofisticados de control en base a esta técnica.

2.2 Bases Teóricas

En todas las especialidades de la ingeniería civil en particular en el diseño de mecánica de suelos el ingeniero debe asegurarse que sus propiedades estén en relación con su cimentación o estructura. Utilizando procedimientos de extracción, examen y ensayo el ingeniero debe hallar un modelo cercano a la realidad con la ayuda de los instrumentos en el laboratorio. Si bien es importante tener una clasificación adecuada de suelos más aún es el Análisis Granulométrico y Método Mecánico de Suelos para aceptar su comportamiento en trabajos de ingeniería bajo las normas técnicas INEN 1573 y ASTM C 469 (Rubén Jácome T., 2017).

1.2.1 Ensayo de compresión.

Es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y sobre cualquier material (sobre todo aceros) incluyendo los frágiles. La resistencia en compresión siempre es mayor o igual que en tracción la que se realiza probetas normalizadas en una máquina universal.

La máquina para ensayos de compresión se compone por un equipo principal, fuente hidráulica y un sistema de control computarizado. Se caracteriza por sus funciones de carga automática a velocidad constante, visualización de valores de fuerza en su pantalla digital, procesamiento automático de los datos e impresión del reporte y curva del ensayo.

2.2.2 Sensores de desplazamiento inductivos LVDT.

Los sensores de desplazamiento tipo inductivo, también conocidos como sensores de desplazamiento LVDT (de las siglas en inglés Linear Variable Differential Transformer), basan su funcionamiento en el movimiento de un núcleo dentro del cuerpo del sensor que tiene arrollados los bobinados, de ahí que sea un transformador de núcleo móvil.

Es un sensor sin rozamiento ya que al ser inductivo la variación es por campo magnético. Este desplazamiento proporciona una relación entre la inducción y la distancia recorrida. Son habituales para rangos desde pocos milímetros hasta los 500mm y cuentan con múltiples opciones de montaje como muelle de retorno, rótulas, etc. Con salida analógica 0-100mV o 4-20mA. Los formatos son variados, pueden soportar altas temperaturas y altas presiones como el modelo tipo palpador que se aprecia en la figura 1-2.

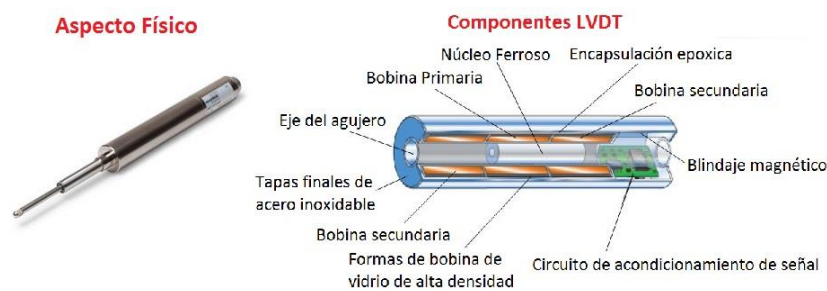


Figura 1-2. Aspecto físico y componentes sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T. 2017

2.2.3 Interpolación polinómica de LaGrange.

Se denomina interpolación a la obtención de funciones partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos. En ingeniería y algunas ciencias es frecuente disponer de un cierto número de puntos obtenidos por muestreo o de un experimento y pretender construir una función que los ajuste. Otro problema estrechamente ligado con el de la interpolación es la aproximación de una función complicada por una más simple. Si tenemos una función cuyo cálculo resulta costoso podemos partir de un cierto número de sus valores e interpolar dichos datos construyendo una función más simple. En general no obtendremos exactamente los mismos valores evaluando la función obtenida que si evaluamos la función original si bien dependiendo de las características del problema y del método de interpolación usado la ganancia

en eficiencia puede compensar el error cometido. En todo caso a partir de n parejas de puntos (x_k, y_k) , buscamos una función f que verifique:

$$f(x_k) = y_k, k = 1, 2 \dots n$$

A la que se denomina función interpolante de dichos puntos y los puntos x_k se llaman nodos. El objetivo es encontrar un polinomio que cumpla lo antes mencionado y permita hallar aproximaciones de otros valores desconocidos para la función con una precisión fijada. Cada polinomio interpolador dispone de una fórmula de error que permitirá ajustar la precisión del polinomio, generalmente se calcula mediante el error relativo porcentual (M. Lovay, 15).

$$er\% = \frac{|valor\ real - valor\ aproximado|}{|valor\ real|} \times 100\%$$

En análisis numérico, el polinomio de LaGrange, llamado así en honor a Joseph-Louis de LaGrange, es una forma de presentar el polinomio que interpola un conjunto de puntos dado.

Empezamos con un conjunto de $n+1$ puntos en el plano con diferentes coordenadas (x, y) : (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) . Nuestro objetivo es encontrar una función polinómica de interpolación que pase por esos $n+1$ puntos con el menor grado. La fórmula del polinomio de interpolación de LaGrange es:

$$P(x) \Rightarrow L_n(x) = \sum_{i=0}^n l_i(x) * f(x_i);$$

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}; i \neq j$$

$$l_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_1 - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

CAPITULO III

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Características y uso sensor de precisión LVDT

La figura 1-3 muestra todo el equipo de ensayo de materiales



Figura 1-3. Equipo de ensayo de materiales

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

En la figura 2-3 se aprecia físicamente el sensor LVDT.



Figura 2-3. Sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El sensor cuenta con 6 pines en su conector. De los cuales 3 de ellos son útiles. 2 se utilizan para alimentación: positiva (cable café) y negativa (cable azul). 2 para señal, señal de mayor potencial (cable amarillo) y menor potencial (cable azul, funciona como común tanto en alimentación como en la señal). A continuación la figura 3-3 ilustra la disposición de los pines del conector junto con sus respectivos colores de cables.



Figura 3-3. Disposición de pines sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Con el desplazamiento del núcleo móvil del sensor variamos la inductancia de los devanados y el voltaje entre los pines de señal para con ellos obtener la curva de respuesta mediante interpolación matemática. El instrumento tiene un rango de voltaje acondicionado de 0 a 3.3V (generalmente es entre 0 – 100mV). En la figura 4-3 se observa las conexiones eléctricas en el equipo de ensayos para medir y muestrear los voltajes. Todos los pines del sensor están en conexión directa al equipo de ensayos y únicamente los pines de señal en paralelo al multímetro.

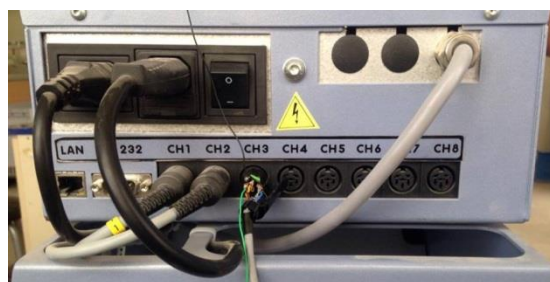


Figura 4-3. Conexiones eléctricas en el equipo de ensayos

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

En el ensayo del material se obtienen, registran y muestrean los datos de Voltaje y Deformación. En la figura 5-3 el multímetro detecta los valores de voltaje recibidos y en la pantalla del equipo en la fila “Alargamiento” el valor de sus respectivas deformaciones:

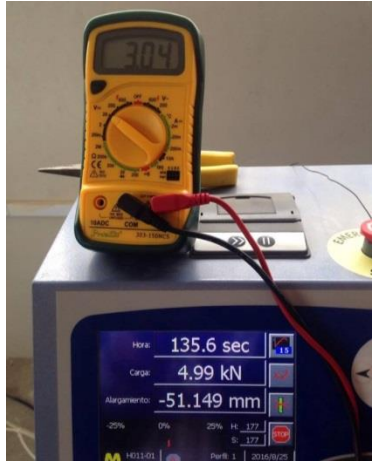


Figura 5-3. Datos tomados de voltaje en el equipo

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se desea obtener la curva de respuesta Voltaje [mV] vs Deformación en milímetros [mm]. Para ello inicialmente se deforma físicamente el sensor y así se generan datos de voltaje (lo cual se mide con un multímetro conectando los puntos positivo y negativo del voltímetro con los puntos de señal positiva y negativa, mayor y menor potencial con los colores amarillo y azul respectivamente) y su respectiva deformación o desplazamiento que lo visualiza el equipo de interpretación de datos. Se observa en la figura 6-3 el trabajo que realiza el sensor LVDT:



Figura 6-3. Disposición física del sensor para la toma de datos

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Con las pruebas realizadas obtenemos 114 datos, que fueron todos los posibles registrar con la menor velocidad de ensayo que tiene el equipo. Matemáticamente cada uno de los pares de valores de Voltaje [mV] y Deformación [mm] equivale a un nodo de interpolación. Los instrumentos industriales de este tipo poseen curvas de respuesta lineal, logarítmica y exponencial así que aproximaremos nuestro polinomio mediante LaGrange a la forma que tome

la gráfica de los nodos. En la figura 7-3 se observa con un osciloscopio la forma de la señal que se recibe del sensor para saber si es necesario agregar una etapa adicional de filtrado.

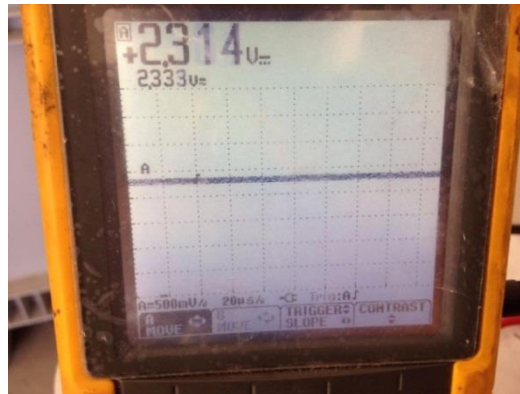


Figura 7-3. Visualización en el osciloscopio de la señal del sensor

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Existe un ruido insignificante respecto a la señal pura que sube y baja consecutivamente. Por ello se utiliza un filtro de primer orden con un capacitor que almacena voltaje mientras sube la señal y se descarga cuando baja haciéndola más lineal. El capacitor que dio los mejores resultados fue el de 33uF, el positivo del capacitor va al pin de señal positiva del sensor y análogamente el pin negativo. Con menores valores de capacitancia continúan los picos de ruido y con valores mayores disminuye la tasa de respuesta del sensor respecto al tiempo.

En cierto punto que no se varía la deformación del material el equipo continuó enviando datos de deformación. Esto implica que el equipo está operando mal y esto se lo examinará en el capítulo de “Pruebas y resultados”. Se muestra en la tabla 1-3 los datos obtenidos:

Tabla 1-3. Datos obtenidos de voltaje y deformación en el ensayo

DEFORMIMETRO								
Nodo Xn	Voltaje (mV)	Deformación (mm)	Nodo Xn	Voltaje (mV)	Deformación (mm)	Nodo Xn	Voltaje (mV)	Deformación (mm)
0	0	0,012	38	696	-11,612	76	1405	-23,516
1	1,2	0,012	39	699	-11,663	77	1444	-24,311
2	18,8	-0,261	40	737	-12,295	78	1549	-25,948
3	31,6	-0,413	41	738	-12,337	79	1566	-26,223
4	72,8	-1,13	42	750	-12,513	80	1604	-26,877
5	89,8	-1,408	43	750	-12,578	81	1656	-27,739
6	93,6	-1,47	44	762	-12,711	82	1713	-27,922

7	96,1	-1,521	45	797	-13,302	83	1756	-29,440
8	117,5	-1,902	46	797	-13,309	84	1854	-30,716
9	131,9	-2,123	47	822	-13,738	85	1894	-31,978
10	135,7	-2,191	48	835	-13,933	86	1920	-32,400
11	135,7	-2,21	49	866	-14,459	87	1950	-32,779
12	147,6	-2,39	50	901	-15,058	88	1980	-33,191
13	154,5	-2,507	51	908	-15,171	89	1990	-33,507
14	162,9	-2,773	52	942	-15,738	90	1990	-33,531
15	168,9	-2,773	53	946	-15,805	91	2080	-35,052
16	190,2	-3,132	54	952	-15,458	92	2080	-34,962
17	196	-3,027	55	992	-16,576	93	2170	-36,583
18	196,2	-3,209	56	996	-16,636	94	2190	-36,334
19	227	-3,760	57	1031	-17,229	95	2240	-37,647
20	231	-3,808	58	1038	-17,349	96	2250	-37,868
21	270	-4,461	59	1053	-17,587	97	2280	-38,395
22	318	-5,256	60	1091	-18,226	98	2320	-39,121
23	320	-3,145	61	1092	-18,258	99	2360	-39,720
24	368	-6,099	62	1103	-18,450	100	2390	-40,252
25	371	-6,166	63	1130	-18,884	101	2400	-40,415
26	396	-6,577	64	1148	-19,190	102	2590	-43,695
27	457	-7,584	65	1179	-19,704	103	2630	-44,258
28	486	-8,079	66	1188	-19,302	104	2700	-45,487
29	504	-8,379	67	1205	-20,144	105	2750	-46,247
30	519	-8,653	68	1215	-20,303	106	2810	-47,280
31	528	-8,788	69	1249	-21,164	107	2840	-47,824
32	563	-9,368	70	1254	-20,992	108	2890	-48,675
33	584	-9,722	71	1258	-21,044	109	2950	-49,698
34	632	-10,533	72	1270	-21,816	110	2970	-50,089
35	653	-10,885	73	1298	-21,698	111	3040	-51,175
36	678	-11,300	74	1386	-23,160	112	3040	-51,204
37	684	-11,400	75	1393	-23,293	113	3040	-51,226

Fuente: Conjuntos de datos obtenidos en el ensayo de materiales en el laboratorio de Ingeniería Civil UNACH

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

3.2 Obtención de curvas del sensor

Una manera de graficar una función consiste en obtener pares ordenados de ella evaluando para diferentes valores la variable independiente obteniendo los valores respectivos de la variable dependiente (G. Gutierrez, 2016). Se los almacena en una tabla, los localizamos en un plano de ejes coordenados y mediante un trazo hallamos la curva de la función deseada. Para nuestro caso, el proceso tiene un sentido inverso porque implica a partir de un conjunto de pares ordenados (que son los valores de Voltaje vs Deformación) obtener la función de donde supuestamente proviene. Este proceso se lo puede realizar mediante algunas metodologías numéricas como las interpolaciones. La que utilizamos por el uso común y porque no se parte de una función conocida es la Interpolación de LaGrange (G. Gutierrez, 2016), donde cada uno de los pares ordenados se los llama nodos y el polinomio obligatoriamente atraviesa cada uno de ellos. Una de las características de LaGrange es que el grado de la función polinomio obtenida será el número de nodos utilizados menos uno, si utilizamos 10 nodos la función obtenida será de grado 9. El cálculo de sus coeficientes y el proceso para obtener el polinomio requiere mucho esfuerzo, precisión y se debe recordar que tenemos como máximo 114 nodos. Estas razones obligan al uso de herramientas informáticas como Matlab.

Por experimentación científica se modifica el número de nodos y sus valores hasta encontrar un polinomio que se aproxime su gráfica a la gráfica de los puntos obtenidos en la Tabla 1-3. Explicándolo analíticamente, si hubieran solo 20 pares ordenados de datos $[(x_0, y_0), \dots, (x_{19}, y_{19})]$ y se utiliza 5 para calcular el polinomio $[(x_0, y_0), \dots, (x_4, y_4)]$, los restantes 15 $[(x_5, y_5), \dots, (x_{19}, y_{19})]$ se utiliza para evaluar la función resultante $Ln(x)$. Al evaluar con x_5 el valor de $Ln(x)$ debe ser aproximado a y_5 . Se espera que esta diferencia o error sea cercano a cero, caso contrario se repite este proceso variando el valor o el número de nodos hasta lograrlo. En el capítulo final se prueba la eficiencia del sistema electrónico y se lo ajusta hasta que iguale o mejore al equipo de ensayos. La siguiente es la forma del polinomio de LaGrange:

$$P(x) \Rightarrow Ln(x) = \sum_{i=0}^n li(x) * f(x_i)$$

De donde

$$li(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$

$i \neq j$

$$li(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

Para el cálculo de este polinomio se utilizan los 3 primeros nodos de Voltaje vs Deformación de la tabla 1-3. El primer nodo se llama x_0 y no x_1 por reglas de la fórmula de LaGrange. Los nodos que se utilizan se observan en la tabla 2-3.

Tabla 2-3. Nodos utilizados para la aproximación de LaGrange

DEFORMÍMETRO	
Voltaje (mV)	Deformacion (in)
$x_0 = 0$	$f(x_0) = 0,012$
$x_1 = 1,2$	$f(x_1) = 0,012$
$x_2 = 18,8$	$f(x_2) = -0,261$

Fuente: Tabla 1-3

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n l_i(x) * f(x_i)$$

$$L_n(x) = l_0(x) * f(x_0) + l_1(x) * f(x_1) + l_2(x) * f(x_2)$$

$$l_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} = \frac{(x - 1.2)(x - 18.8)}{(0 - 1.2)(0 - 18.8)} = 0.044x^2 - 0.887x + 1$$

$$l_1(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} = \frac{(x - 0)(x - 18.8)}{(1.2 - 0)(1.2 - 18.8)} = -0.047x^2 + 0.890x$$

$$l_2(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} = \frac{(x - 0)(x - 1.2)}{(18.8 - 0)(18.8 - 1.2)} = 0.0030x^2 - 0.0036x$$

$$L_n(x) = l_0(x) * f(x_0) + l_1(x) * f(x_1) + l_2(x) * f(x_2)$$

$$L_n(x) = (0.044x^2 - 0.887x + 1)0.012 + (-0.047x^2 + 0.890x)0.012 + (0.0030x^2 - 0.0036x)(-0.261)$$

$$L_n(x) = -0.000819x^2 + 0.0009396x$$

Se verifica que la función calculada es correcta respecto a los nodos utilizados. Si se evalúa para: $x_2 = 18.8$ debería resultar $L_n(x_2) = f(x_2) = -0,261$:

$$L_n(x_2) = -0.000819x_2^2 + 0.0009396x_2 = -0.000819(18.8)^2 + 0.0009396(18.8)$$

$$L_n(x_1) = -0.2717$$

Tenemos que $f(x_2) = -0.261$, calculamos su error relativo porcentual (M. Lovay, 2015), $f(x_2)$ respecto a $L_n(x_2)$:

$$er\% = \frac{|valor\ real - valor\ aproximado|}{|valor\ real|} \times 100\%$$

$$er\% = \frac{|f(x_2) - Ln(x_2)|}{|f(x_2)|} \times 100\% = \frac{|-0.261 - 0.2717|}{|-0.261|} \times 100\%$$

$$er\% = 4.099\%$$

El error relativo porcentual en los nodos donde se hizo el diseño siempre es bajo generalmente tiende a cero. El análisis de error se debe concentrar en los restantes nodos, si es bajo se asume que la función obtenida representa la curva del comportamiento del sensor.

Escogemos un nodo al azar de los restantes. $V = x_{70} = 1254\text{mV}$ y $\text{Deformación} = f(x_{70}) = -20.992$ mm según la tabla 1-3. Lo que debería dar el valor de $Ln(x_{70})$ o aproximado. Evaluando tenemos $Ln(x_{70}) = Ln(1254) = -1286.74$:

$$Ln(x_{70}) = -0.000819x_{70}^2 + 0.0009396x_{70} = -0.000819(1254)^2 + 0.0009396(1254)$$

$$Ln(x_{70}) = -1286.71$$

$$er\% = \frac{|f(x_{70}) - Ln(x_{70})|}{|f(x_{70})|} \times 100\% = \frac{|-20.992 + 1286.71|}{|-20.992|} \times 100\%$$

$$er\% = 6229\%$$

Por el alto error esta primera aproximación no es satisfactoria y se rediseña la función variando el número de nodos. Cuando se tenga una función donde la trayectoria de su gráfica sea igual o semejante a la trayectoria de los nodos obtenidos en el ensayo del laboratorio realizaremos una sintonía fina para reducir aún más la diferencia o el error analítico entre los puntos de ambas gráficas. Esto se logra variando los valores de los nodos con los que se obtiene el polinomio. Por ello es conveniente graficar primero todos los nodos de la tabla en un plano coordenado para localizar y utilizar los nodos representativos de la curva (número de nodos). Debido al trabajo manual necesario y las probabilidades de error de cálculo hacemos el estudio y análisis de resultados con la ayuda del software Matlab hasta encontrar la curva de menor error relativo porcentual en todos los nodos.

3.3 Uso de Matlab para obtener los modelos matemáticos

Con Matlab graficamos en la figura 8-3 todos los nodos o pares ordenados de la tabla 1-3.

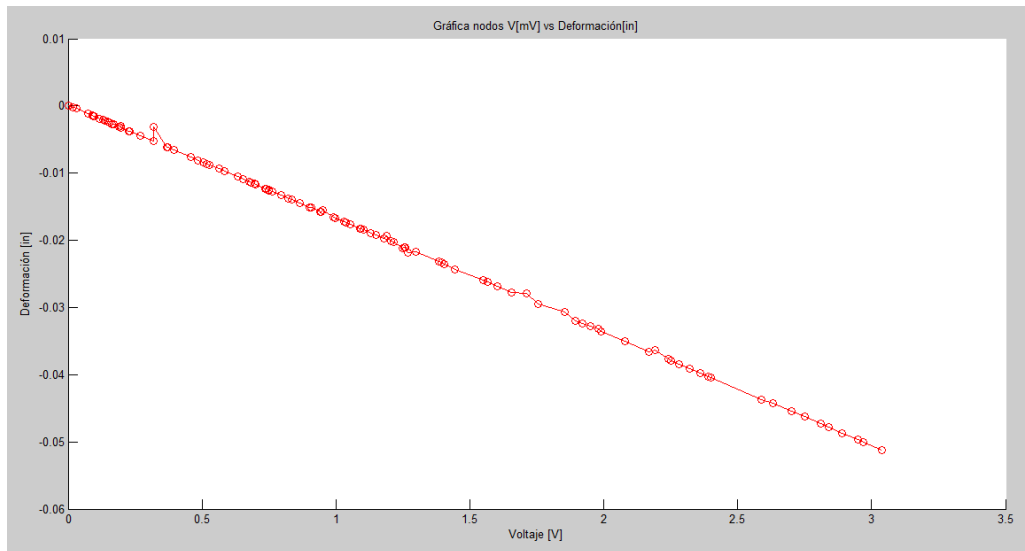


Figura 8-3. Gráfica de todos los nodos obtenidos en el ensayo

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se puede utilizar LaGrange con el punto inicial y final porque los nodos adquieren la forma de recta sin embargo los datos están dispersos incluso en los extremos por la Histéresis del sensor (Rubén Jácome T., 2017) definida como la capacidad de repetir mediciones en subida y bajada de la variable medida. La aproximación lineal mediante mínimos cuadrados permite tratar información de este tipo calculando la recta que cruza por la media de sus mediciones dispersas.

3.3.1 Experimento 1

Cálculo de la función a partir de métodos lineales que promedian datos dispersos como Mínimos cuadrados.

Se ha diseñado un script en Matlab, figura 9-3, que nos permite calcular los coeficientes m y b de la ecuación de la recta $Y = mX + b$ que cruza por la media de sus mediciones mediante la aproximación lineal de mínimos cuadrados ingresando los nodos como pares ordenados. El código se detalla en el **ANEXO A**. En la figura 10-3 se ingresan todos los nodos en el script, la figura 11-3 muestra el valor de la pendiente m y de la constante b de la ecuación de la recta. Se grafica la recta calculada, de color azul, junto con todos los nodos en color rojo figura 12-3.


```

Deber_2.m x matrices_lm x coef.m x Taller_lm x metodos_lm x Prueba_principal.m x
1 function [m,b]=mincuadlin(X)
2 n=length(X(1,:));
3 A=0;
4 B=0;
5 C=0;
6 D=0;
7 for i=1:n;
8 A=A+X(1,i);
9 B=B+X(2,i);
10 C=C+(X(1,i))^2;
11 D=D+X(1,i)*X(2,i);
12 end
13 m=(n*D-A*B)/(n*C-A^2);
14 b=(C*B-D*A)/(n*C-A^2);
15 for i=1:n;
16 hold on;
17 plot(X(1,i),X(2,i),'r','MarkerEdgeColor','r','LineWidth',1);
18 end
19
20 x=X(1,1):1:X(1,n);
21 y=m*x+b; plot(x,y,'b');
22 title('Aproximación lineal por mínimos cuadrados.');
```

Figura 9-3. Script realizado en Matlab para el cálculo por mínimos cuadrados

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
x X=0.001*[0,1.2,18.8,31.6,72.8,89.8,93.6,96.1,117.5,131.9,135.7,135.7,147.6,...
154.5,162.9,168.9,190.2,196,196.2,227,...
231,270,318,320,368,371,396,457,486,504,...
519,528,563,584,632,653,678,684,696,699,737,...
738,750,750,762,797,797,822,835,866,901,...
908,942,946,952,992,996,1031,1038,1053,1091,...
1092,1103,1130,1148,1179,1188,1205,1215,1249,...
1254,1258,1270,1298,1386,1393,1405,1444,1549,...
1566,1604,1656,1713,1756,1854,1894,1920,1950,...
1980,1990,1990,2080,2080,2170,2190,2240,2250,...
2280,2320,2360,2390,2400,2590,2630,2700,2750,...
2810,2840,2890,2950,2970,3040,3040,3040;...
.012,.012,-.261,-.413,-1.13,-1.408,-1.47,-1.521,-1.902,-2.123,...
-2.191,-2.21,-2.39,-2.507,-2.773,-2.773,-3.132,-3.027,-3.209,-3.76,...
-3.808,-4.461,-5.256,-3.145,-6.099,-6.166,-6.577,-7.584,-8.079,-8.379,...
-8.653,-8.788,-9.368,-9.722,-10.533,-10.885,-11.3,-11.4,-11.612,-11.663,-12.295,...
-12.337,-12.513,-12.578,-12.711,-13.302,-13.309,-13.738,-13.933,-14.459,-15.058,...
-15.171,-15.738,-15.805,-15.458,-16.576,-16.636,-17.229,-17.349,-17.587,-18.226,...
-18.258,-18.450,-18.884,-19.190,-19.704,-19.302,-20.144,-20.303,-21.164,...
-20.992,-21.044,-21.816,-21.698,-23.16,-23.293,-23.516,-24.311,-25.948,...
-26.233,-26.877,-27.739,-27.922,-29.44,-30.716,-31.978,-32.4,-32.779,...
-33.191,-33.507,-33.531,-35.052,-34.962,-36.583,-36.334,-37.647,-37.868,...
-38.395,-39.121,-39.720,-40.252,-40.415,-43.695,-44.258,-45.487,-46.247,...
-47.280,-47.824,-48.675,-49.698,-50.089,-51.175,-51.204,-51.226];
```

Figura 10-3. Ingreso de nodos en el script de mínimos cuadrados

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

```

-47.280,-47.824,-48.675,-49.698,-50.089,-51.175,-51.204,-51.226];
>> [m,b]=mincuadlin(X)

m =

    -0.0169

b =

    1.7529e-04
```

Figura 11-3. Valor de m y b mediante mínimos cuadrados

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

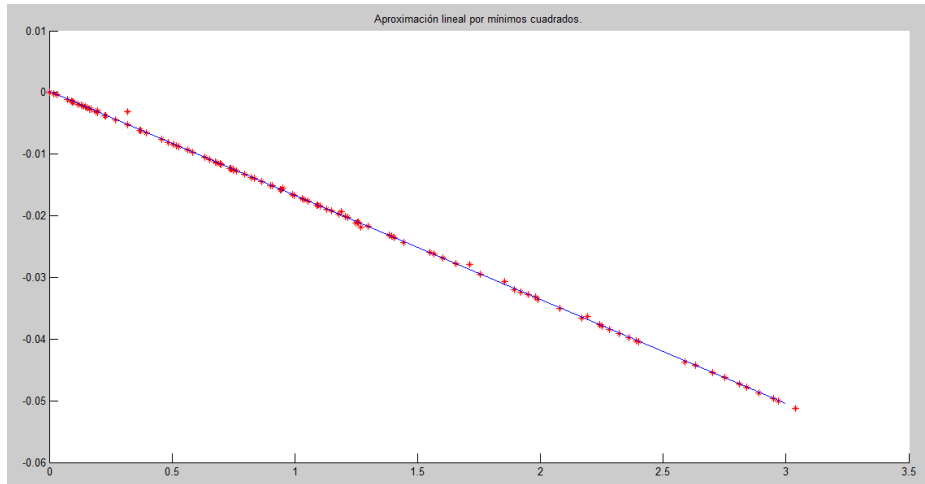


Figura 12-3. Gráfica de todos los nodos junto con la recta obtenida

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Siendo $m = -0.0169$; $b = 1.7529e-4 = 0.00017529$; reemplazando en $y = mx+b$ resultando la aproximación por mínimos cuadrados $y = -0.0169x+0.00017529$ y su gráfica en la figura 13-3.

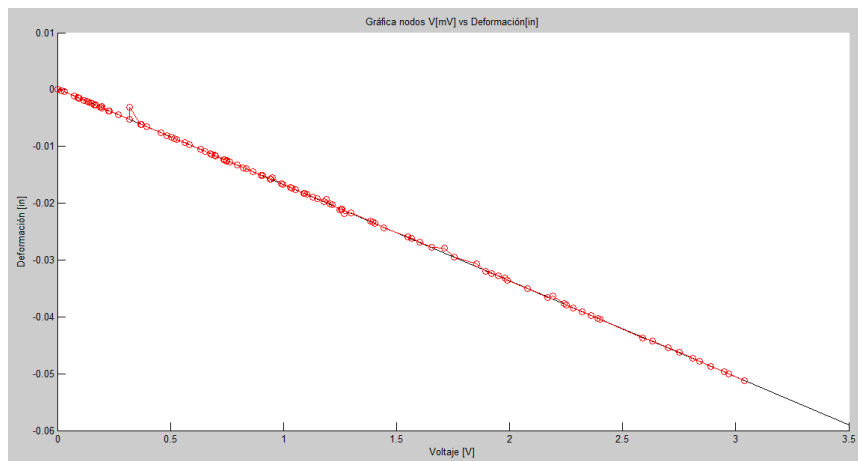


Figura 13-3. Gráfica de los nodos junto con la segunda recta obtenida

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Este tipo de aproximación busca una recta promedio de los valores dispersos; un punto alejado del resto por error en la toma de datos, desplazaría a la curva en su dirección lo que incrementa el error total, lo que es conveniente es que siga la tendencia de la mayoría de los nodos por ello este método no se lo utiliza. Los nodos son los puntos rojos con una traza de línea negra.

3.3.2 Experimento 2

Cálculo de la función en Matlab con LaGrange de los 3 primeros nodos x_0 , x_1 y x_2 tabla 1-3.

Se refiere al estudio ya realizado con la tabla 2-3 en el punto 3.2. En la figura 14-3 se ejecuta el script realizado para este fin en Matlab. La figura 15-3 muestra la gráfica de todos los nodos y de la función calculada con LaGrange.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

INTERPOLACION "POLINIMIO DE LAGRANGE"

Ingrese los puntos pertenecientes a las x, [x0 x1 ... xn]:
0.001*[0 1.2 18.8]
Ingrese los puntos pertenecientes a las y, [y0 y1 ... yn]:
0.001*[0.012 0.012 -0.261]

Desea ver los coeficientes de lagrange (si/no): |
  
```

Figura 14-3. Ejecución script Matlab cálculo de interpolación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

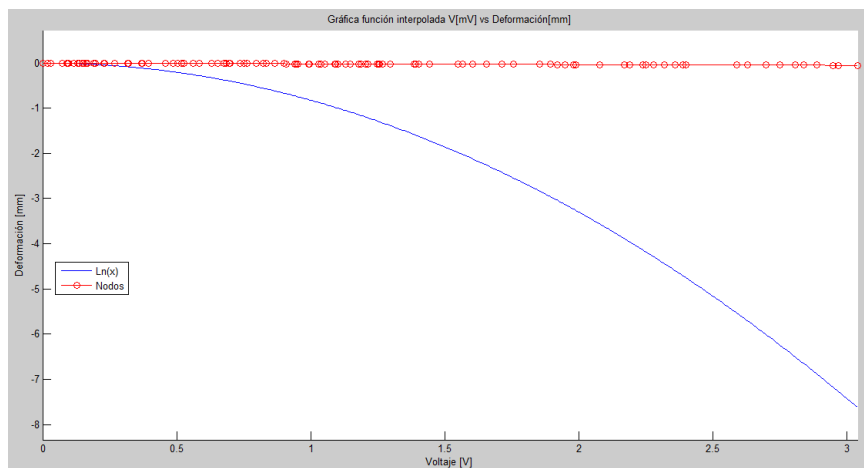


Figura 15-3. Grafica de los nodos y de la función de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El error de esta aproximación crece mientras se aleja de los 3 primeros nodos. Para encontrar la curva del sensor se debe tener presente su tendencia lineal descartando otras formas de interpolación. La cuadrática forma parábolas entre cada conjunto de 3 nodos, la cúbica forma 2 parábolas con cada 4 nodos: una parábola por cada 2 nodos. La interpolación de Newton requiere un mayor costo y procesamiento computacional y sus polinomios son de grado mayor a uno. Hermite parte de conocer la función, lo cual en nuestro caso obviamente no se tiene. Por ello se utiliza LaGrange con 2 nodos para obtener un polinomio de grado 1.

3.3.3 Experimento 3

Cálculo del polinomio o función de LaGrange con nodos: inicial x_0 y final x_{113}

Se observa el error utilizando los nodos inicial x_0 y final x_{113} de nuestra tabla. Después se aproxima a un nodo al azar como $x_{80}=1604\text{mV}$ $f(x_{80})=-26.877$. La figura 16-3 muestra la ejecución del script de matlab. Para $x_{80}=1604\text{mV}$; $f(x_{80})=-26.877$ con nuestro polinomio $Ln(x_{80})=-27.034$ se ve esta aproximación figura 17-3.

Tabla 3-3. Nodos utilizados para la segunda aproximación de LaGrange

DEFORMÍMETRO	
Voltaje (mV)	Deformacion (in)
$X_0 = 0$	$f(x_0) = 0,012$
$X_{113} = 3040$	$f(x_{113}) = -51.226$

Fuente: Tabla 1-3

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
INTERPOLACION "POLINIMIO DE LAGRAGE"

Ingrese los puntos pertenecientes a las x, [x0 x1 ... xn]:
0.001*[0 3040]
Ingrese los puntos pertenecientes a las y, [y0 y1 ... yn]:
0.001*[0.012 -51.226]

Desea ver los coeficientes de lagrange (si/no): no

POLINOMIO INTERPOLANTE:
Warning: simple will be removed in a future release. Use simplify instead.
> In sym.simple at 41
   In lagrange_2 at 49
1770887431076117/147573952589676412928 - (189034854569746003725*x)/11215620396815407382528

Desea aproximar un valor (si/no): si

Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 1604
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-27.034774842105261
    
```

Figura 16-3. Ejecución de Matlab segunda aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

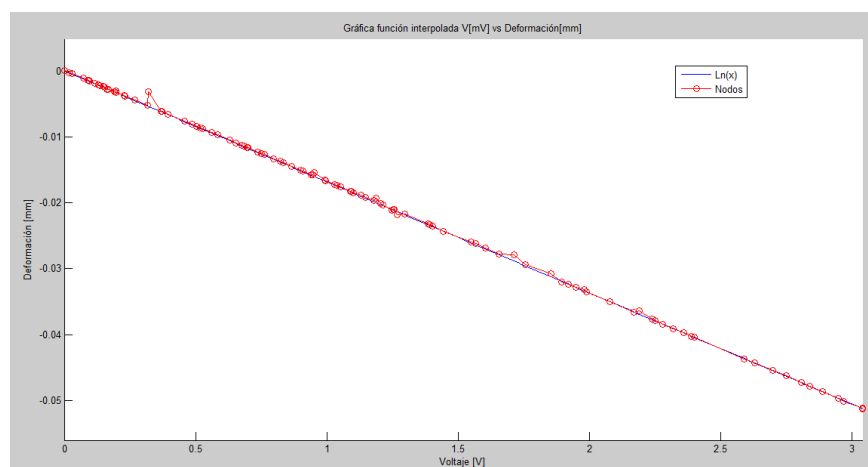


Figura 17-3. Aproximación del nodo x_{80} en $f(x_{80})$ y $Ln(x_{80})$

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El error respecto al nodo escogido x80:

$$er_{x80} - \% = \frac{|f(x80) - Ln(x80)|}{|f(x80)|} \times 100\% = \frac{|-26.877 + 27.034|}{|-26.877|} \times 100\%$$

$$er_{x80} \% = 0.584\%$$

Lo cual es una buena aproximación. Aleatoriamente se hace el cálculo del error en nodos que dividen simétricamente la tabla de datos: x20, x40, x60, x80 y x100 a menos que la gráfica no aporte información de otros puntos donde haya un mayor error. Se diseñó un código en Matlab, figura 18-3, que calcula el polinomio de LaGrange ingresando los nodos como 2 vectores, un vector con sus coordenadas en las abcisas y el otro con sus valores de ordenadas correspondientes. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4-3.

```
Desea aproximar un valor (si/no): si

Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 1604
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-27.034774842105261

Desea aproximar un valor (si/no): si

Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 2390
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-40.282494578947372
```

Figura 18-3. Ejecución código para cálculo de error

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Tabla 4-3. Errores obtenidos de la función de LaGrange

x20=	231 mV	F(x20)= -3,808 mm	Ln(x20)= -3,893 mm	er%= 2.23%
x40=	737 mV	F(x40)= -12,295 mm	Ln(x40)= -12.421 mm	er%= 1.02%
x60=	1091 mV	F(x60)= -18,226 mm	Ln(x60)= -18.388 mm	er%= 0.88%
x80=	1604 mV	F(x80)= -26,877 mm	Ln(x80)= -27.034 mm	er%= 0.58%
x100=	2390 mV	F(x100)= -40,252 mm	Ln(x100)= -40,282 mm	er%= 0.07%

Fuente: Cálculos realizados manualmente

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El mayor error relativo porcentual se encuentra en el nodo x20 con un valor de 2.23%

3.3.4 Experimento 4

Cálculo de la función de LaGrange con los nodos x0, x20, x40, x60, x80, x100 y x113.

Puede parecer que la mejor aproximación es utilizando todos los nodos pero no es así, al utilizar 7 obtenemos un polinomio grado 6 lo que no se aproxima a una recta. Analicemos que sucede al utilizar los 5 nodos que dividen simétricamente esta distribución de 113: x_0 , x_{20} , x_{40} , x_{60} , x_{80} , x_{100} y x_{113} . En la figura 19-3 se aprecia este cálculo y la figura 20-3 ilustra la diferencia de los nodos en rojo con respecto a la curva obtenida con LaGrange para los 5 nodos en color azul.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
INTERPOLACION "POLINIMIO DE LAGRAGE"

Ingrese los puntos pertenecientes a las x, [x0 x1 ... xn]:
0.001*[0 231 737 1091 1604 2390 3040]
Ingrese los puntos pertenecientes a las y, [y0 y1 ... yn]:
0.001*[0.012 -3,808 -12,295 -18,226 -26,877 -40,252 -51,226]

Desea ver los coeficientes de lagrange (si/no): no

POLINOMIO INTERPOLANTE:
Warning: simple will be removed in a future release. Use simplify instead.
> In sym.simple at 41
In lagrange_2 at 49
(27021597764222976*x*(x - 76/25)*(x - 239/100)*(x - 401/250)*(x - 231/1000)*

Desea aproximar un valor (si/no): no

Desea graficar la función interpolada (si/no): si
fx >>

```

Figura 19-3. Ejecución de Matlab tercera aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

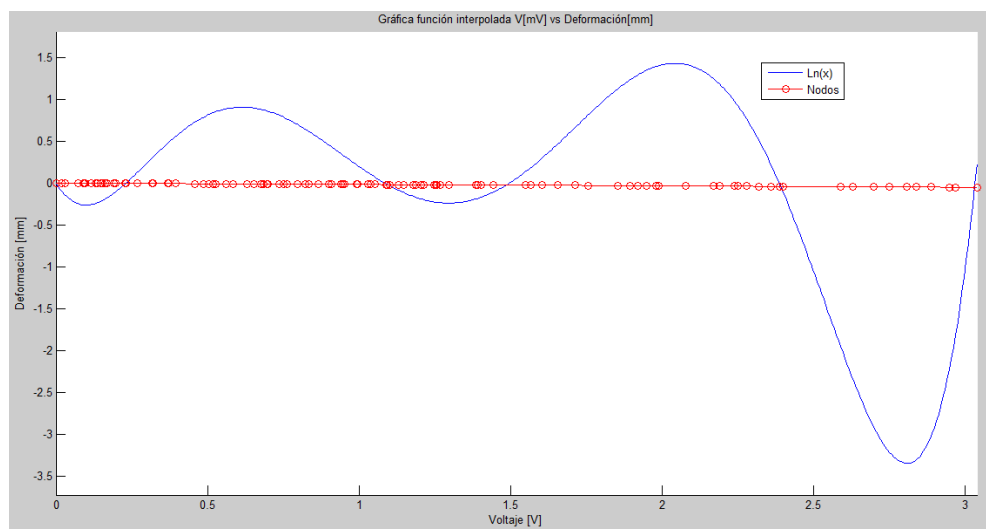


Figura 20-3. Gráfica de los nodos y la tercera aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Solamente en los nodos utilizados para el cálculo del polinomio existe semejanza en la gráfica de las funciones, en el resto la diferencia se dispara pues el grado del polinomio calculado es el número de nodos menos uno, 6 nodos obtiene un grado 5. Al aumentar los nodos aumentan las oscilaciones y el error lo que no es deseable porque el sensor tiene un comportamiento lineal. El

estudio ahora se centra en hallar un modelo con el menor error a partir de usar 2 nodos y se demostrará porque deben encontrarse en el punto inicial y final de los datos.

3.3.5 Experimento 5

Cálculo del polinomio con el nodo inicial x_0 y medio x_{56} . Cálculo de error en los nodos x_{20} , x_{40} , x_{60} , x_{80} y x_{100} . En la figura 21-3 se aprecia este proceso:

```
Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 2390
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-39.948502056224903

Desea aproximar un valor (si/no): si

Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 3040
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-50.813160690763056
```

Figura 21-3. Ejecución de Matlab cuarta aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T

La figura 22-3 grafica los nodos en rojo y la curva obtenida con LaGrange en color azul. La tabla 5-3 detalla los errores calculados con esta aproximación

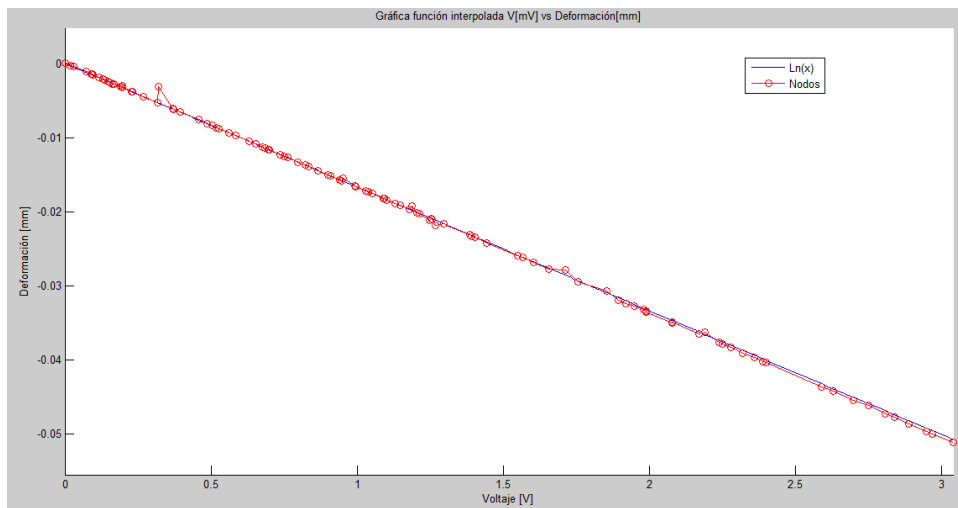


Figura 22-3. Gráfica de los nodos y la cuarta aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Tabla 5-3. Errores obtenidos con la cuarta aproximación de LaGrange

x20=	231 mV	F(x20)= -3,808 mm	Ln(x20)= -3.861mm	er%= 1.39%
x40=	737 mV	F(x40)= -12,295 mm	Ln(x40)= -12.318mm	er%= 0.18%
x60=	1091 mV	F(x60)= -18,226 mm	Ln(x60)= -18.235mm	er%= 0.05%
x80=	1604 mV	F(x80)= -26,877 mm	Ln(x80)= -26.810mm	er%= 0.25%
x100=	2390 mV	F(x100)= -40,252 mm	Ln(x100)= -39.948mm	er%= 0.76%
x113=	3040 mV	F(x113)= -51,226 mm	Ln(x113)= -50,813mm	er%= 0.80%

Fuente: Cálculos realizados manualmente

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El mayor error relativo porcentual se encuentra en el nodo x20 con un valor de 1.39%

3.3.6 Experimento 6: Nodos medio x56 y final x113

En la figura 23-3 se calcula el quinto polinomio de LaGrange. La figura 24-3 grafica los nodos en rojo y la curva obtenida en azul. La tabla 6-3 resume los resultados obtenidos:

```
Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 1604
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-27.143792731898241

Desea aproximar un valor (si/no): si

Ingrese el punto a aproximar, el nodo xi, en mili [mV]: 2390
\nLa aproximacion a Ln(xi) es equivalente en milímetros es:
-40.445035393346380
```

Figura 23-3. Ejecución de Matlab quinta aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T

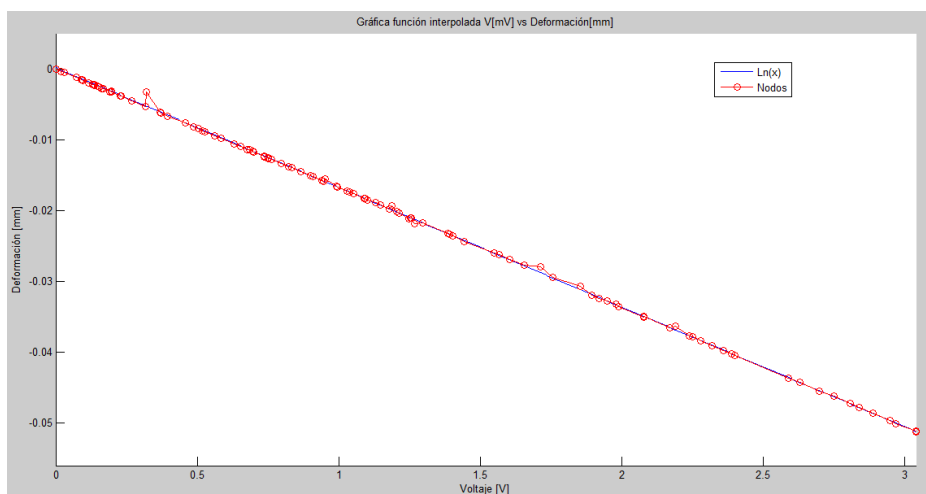


Figura 24-3. Gráfica de los nodos y la quinta aproximación de LaGrange

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Tabla 6-3. Errores obtenidos con la quinta aproximación de LaGrange

x20=	231 mV	F(x20)= -3,808 mm	Ln(x20)= -3.90mm	er%= 2.41%
x40=	737 mV	F(x40)= -12,295 mm	Ln(x40)= -12.47mm	er%= 1.42%
x60=	1091 mV	F(x60)= -18,226 mm	Ln(x60)= -18.46mm	er%= 1.28%
x80=	1604 mV	F(x80)= -26,877 mm	Ln(x80)= -27.14mm	er%= 0.98%
x100=	2390 mV	F(x100)= -40,252 mm	Ln(x100)= -40.45mm	er%= 0.49%

Fuente: Cálculos realizados manualmente

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El mayor error relativo porcentual se encuentra en el nodo x20 con un valor de 2.41%

En base a los experimentos y resultados obtenidos se concluye que la curva con menor error gráfico y analítico en los puntos que dividen simétricamente los 114 datos es la curva obtenida en el *Experimento 5* realizada con el nodo inicial x0 y medio x56. Con un máximo error porcentual de 1.39% respecto a los datos de la tabla 1-3. Su análisis en la figura 25-3:

```

INTERPOLACION "POLINIMIO DE LAGRAGE"

Ingrese los puntos pertenecientes a las x, [x0 x1 ... xn]:
0.001*[0 996]
Ingrese los puntos pertenecientes a las y, [y0 y1 ... yn]:
0.001*[0.012 -16.636]

Desea ver los coeficientes de lagrange (si/no): no

POLINOMIO INTERPOLANTE:
Warning: simple will be removed in a future release. Use simplify instead.
> In sym.simple at 41
  In lagrange_2 at 49
1770887431076117/147573952589676412928 - (307101395339116578625*x)/18372957097414713409536
    
```

Figura 25-3. Función de LaGrange del menor error obtenido

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

$$Ln(x) = \frac{1770887431076117}{1475739525896} - \frac{307101395339116578625}{18372957097414713409536}x$$

$$Ln(x) = -0.016714859437751x + 0.000012$$

$$\text{Donde } m = -0.016714859437751 \text{ y } b = 0.000012$$

3.4 Dimensionamiento tarjeta Arduino

3.4.1 Conexión Hardware y dimensionamiento

El equipo de ensayo de materiales “Compresión Marshall” y “Universal Tensile/Compression Machine” se aprecia en la figura 26-3 y operan bajo la norma de ensayos ecuatoriana INEN 1573, ACI-318 y ASTM C 469 (American Society for Testing and Materials, 2002). Consta de una cámara de ensayos, izquierda, donde deforma al sensor LVDT colocado a la misma altura del material mientras se lo comprime en sentido vertical hasta su ruptura. Esto lo detecta e interpreta el equipo de la derecha pero por su tamaño y peso no es posible movilizarlo limitando su utilización. La presente tesis consiste en reemplazarlo como en la figura 27-3.



Figura 26-3. Modelo común de equipo de ensayo de materiales

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

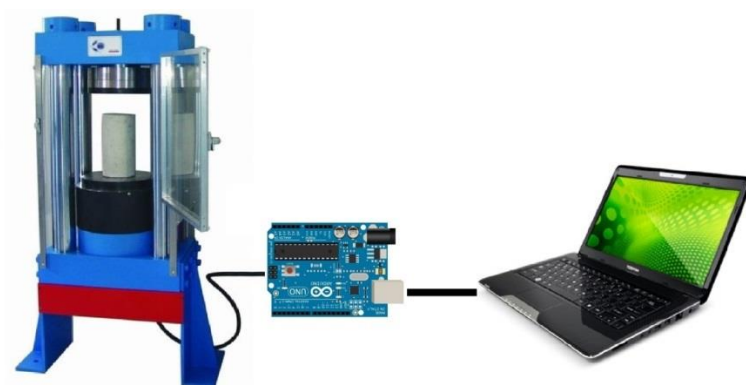


Figura 27-3. Modelo reemplazo del equipo de ensayos de materiales

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

En la cámara de ensayos el sensor se ubica a la misma altura del material. Mientras aumenta la presión al material se comprime hacia abajo, en cambio esta fuerza genera en el sensor LVDT una deformación o el desplazamiento de su parte móvil. Esta deformación varía su campo magnético interno y el voltaje entre sus pines de señal que envía al equipo de la derecha figura 26-3 que ahora lo recibirá la tarjeta Arduino Uno, figura 27-3. El Arduino trabaja como tarjeta de adquisición de señales que recibe esta información, la prepara y envía al computador. El mismo mediante un Interfaz hombre máquina (HMI) visualiza el voltaje que recibe del sensor y en el proceso inverso, evalúa los voltajes que recibe, en el polinomio de LaGrange $\ln(x)$ calculado anteriormente, obteniendo su respectiva deformación en milímetros siendo X los valores de voltaje y $\ln(X)$ la deformación. El cable de señal positivo del sensor se conecta a una entrada analógica. El cable de alimentación positivo y negativo a su propia alimentación, el negativo del sensor se conecta a la alimentación del sensor y al GND del arduino. Se puede verificar la eficiencia de los datos de nuestro proyecto siguiendo el esquema figura 28-3.



Figura 28-3. Esquema final del proyecto

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

La comunicación entre el Arduino y el PC es tipo USB y del sensor LVDT al Arduino como el cableado que se aprecia en la figura 29-3.

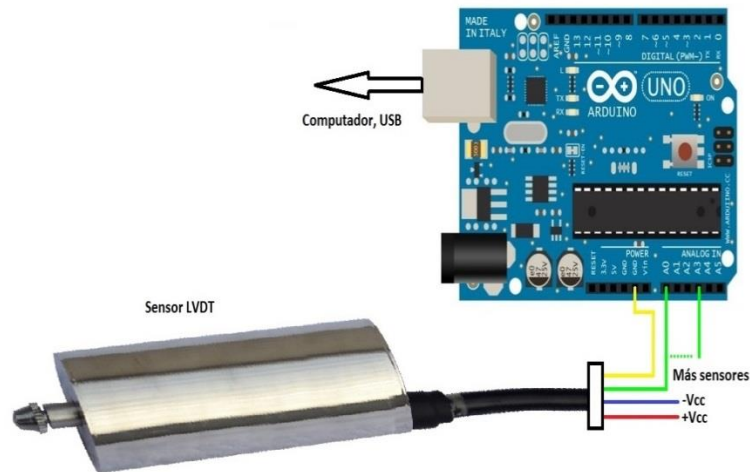


Figura 29-3. Conexión Arduino con el sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El Arduino uno posee 6 entradas analógicas: A0 a A5, podemos ocupar una entrada por sensor para medir 6 a la vez, en todos con la configuración de la Figura 29-3. La alimentación de los sensores +Vcc y –Vcc puede ser en paralelo pues no exigen mucha corriente. La conexión del cable amarillo de todos ellos puede ser también en paralelo a cualquiera de las 2 entradas GND de la placa. La diferencia radica en la conexión del cable verde de señal positiva de los sensores ya que cada uno debe ir a una entrada analógica diferente.

3.4.2 Comunicación software

Para la comunicación software del Arduino Uno con Labview necesitamos instalar:

- LabView (probado de la versión 10 en adelante)
- VI package manager (instala los toolkits de arduino en LabView)
- NI VISA de LabView (parámetros de comunicación en los datos entrantes del arduino)
- Software de Arduino (parámetros de comunicación en los datos salientes a LabView mediante librería Lifa_base.ino)

El control del proceso se hace en LabView y la adquisición de datos con la tarjeta Arduino Uno. Si ocupamos otro arduino, como el Mega, hay que identificarlo en el pin "Board Type" del vi inicial "Init.vi" para no generar errores. Se debe verificar que la versión de VI PM y NI sea compatible con nuestra versión de LabView. La versión del software Arduino es independiente de LabView pero se recomienda instalar su versión más reciente. Se abre el VI Package

Manager, se busca LabView Interface for Arduino y se lo instala, figura 30-3. Con esto se tiene las herramientas en LabView para manejar el Arduino Uno.

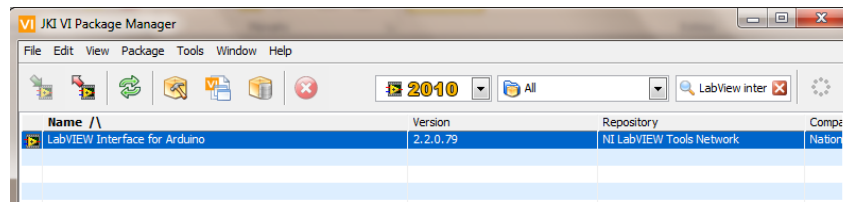


Figura 30-3. Instalación LabView Interface for Arduino

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se instala en el Arduino la librería Lifa_base.ino para que LabView maneje la información que reciba de la tarjeta. En el software Arduino se configura el puerto COM, figura 31-3.



Figura 31-3. Configuración Puerto Com Arduino

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se abre el archivo Lifa_base.ino de la ruta: C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW2010\vi.lib\LabVIEWInterfaceforArduino\Firmware\LIFA_Base\Lifa_base.ino para transferir a la placa Arduino, figura 32-3



Figura 32-3. Instalación LabView Interface for Arduino

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se sube el archivo al Arduino y se cierra el software teniendo así el control y programación en LabView. De esta manera la tarjeta solamente adquiere datos del sensor y los envía al computador. Se corre el programa diseñado en LabView con Nombre “Tesis” de la figura 33-3

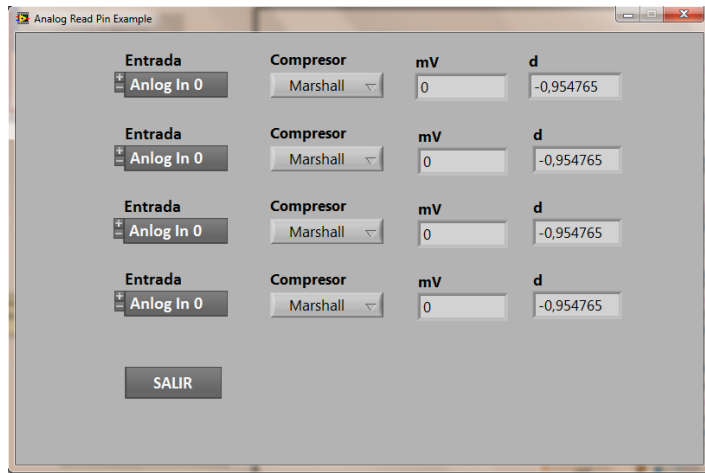


Figura 33-3. Programa diseñado en Labview para el proyecto

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

3.5 Desarrollo del HMI en Labview

Se ha diseñado el programa en LabView para conectar 4 de las 6 entradas A0 a A5 disponibles en la tarjeta. El código visual se observa en la figura 34-3.

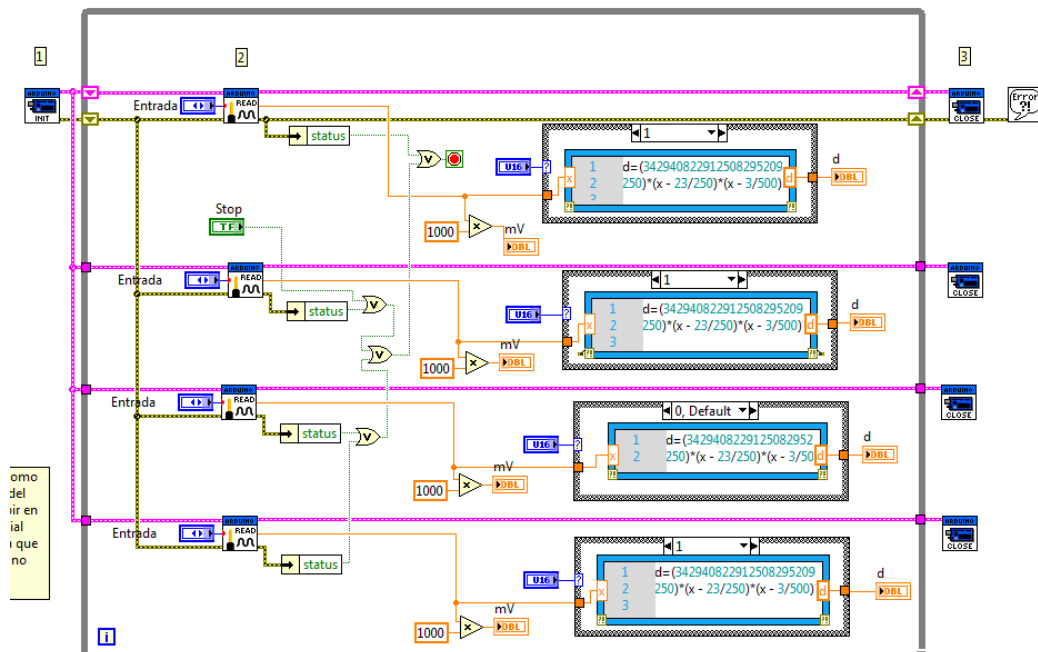


Figura 34-3. Código en labview para la adquisición de señales

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Sus etapas son: apertura del puerto Com para detectar los datos que envía el Arduino, procesamiento con matscripth de la función $\ln(x)$ calculada anteriormente donde X son los voltajes recibidos del arduino y $\ln(x)$ la deformación. Y cierre del puerto sea al detenerse el

proceso o saliendo del bucle while al pulsar el botón de paro en el panel frontal. Se tiene la entrada AI en el Arduino donde se conectó el sensor, los mili voltios mV que se recibe, su respectiva deformación d, intervalo de carga de ingreso de datos, botón para el ingreso de datos y botón para encerrar o poner a cero la deformación independiente de la posición del sensor. La presentación final de nuestro HMI se aprecia en la figura 35-3

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL CHIMBORAZO
ESCUELA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN SISTEMAS DE CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
TESIS DE POSGRADO
AUTOR: MARCOS ANTONIO JÁCOME TORRES
TEMA: Desarrollo de un modelo matemático utilizando
interpolación de Lagrange para el comportamiento dinámico
de sensores de presión LVDT.
SEPTIEMBRE 2016

Escoja puerto
COM9

Entrada AI0 mV d Carga
0 0 10 Ingresar Encerrar

Entrada AI1 mV 2 d 2 Carga 2
0 0 0 Ingresar Encerrar

DETENER

Figura 35-3. Presentación final HMI desarrollado en Labview

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se hace hincapié sobre la finalidad de la presente tesis: independizar la cámara de ensayos junto con el sensor LDVT del equipo de ensayos de materiales conectándolo a un computador, mediante una tarjeta Arduino igualando o mejorando su trabajo. La detección del desplazamiento del núcleo del sensor o llamado también deformación se mide en milímetros. A un material se le somete presión y en ese mismo punto, a la misma altura, se coloca el sensor. A medida que aumenta la presión, el material se deforma o reduce su tamaño hasta la ruptura. Como el sensor se ubica a la misma altura del material sufre la misma deformación o desplazamiento de su núcleo móvil lo que el equipo de ensayos lo interpreta como una medida longitudinal de desplazamiento.

En la figura 1-4 se observa el proyecto completo, a la izquierda la cámara de ensayos de materiales con un cilindro de concreto y el sensor LVDT el que varía su ubicación dependiendo de las dimensiones del material a ensayar. A la derecha sobre una mesa se encuentra el computador con el programa en LabView y la consola que contiene la tarjeta Arduino.

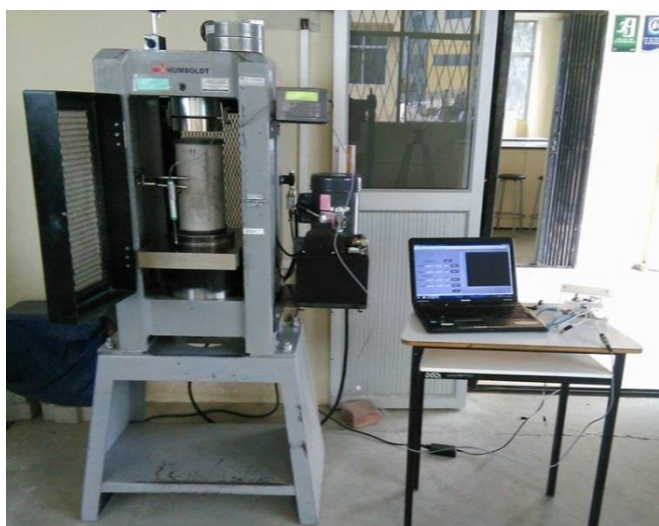


Figura 1-4. Esquema físico general del proyecto

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

En la figura 2-4 se ilustra la cámara de ensayos con el cilindro de concreto y el sensor LVDT. El sensor se sostiene sobre una base móvil magnética que puede adherirse a cualquier metal. Debe haber un espacio entre el cilindro y la máquina para que al iniciar el ensayo el equipo lo ajuste y

esté preparado para ejercer presión. Por ello el sensor no tiene una posición fija pues depende del tamaño y altura de los materiales, sean cilindros u otros. En la figura 3-4 se aprecia el computador con el programa en ejecución y la consola conectada al sensor LVDT:



Figura 2-4. Cámara de ensayos con el sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

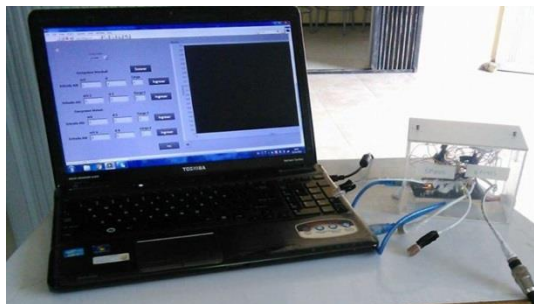


Figura 3-4. Computador conectado la consola LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se evalúa la legibilidad de los datos del programa antes de ensayar el material de dos maneras: comparando simultáneamente con los datos del equipo de interpretación de datos, figura 28-3 o midiendo placas normalizadas con tamaños definidos en milímetros. La primera opción sirve para demostrar que las medidas del programa son semejantes a las del equipo pero no para demostrar que son correctas. Esto es importante porque en el capítulo anterior se comentó que el equipo de ensayos continuaba enviando datos de deformación aún con el sensor fuera de operación, lo que demuestra su mal funcionamiento. Por ello evaluamos la legibilidad de los datos con la segunda opción, existen placas normalizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil de diferentes medidas de 1mm hasta 25mm las cuales se pueden observar en la figura 4-4.



Figura 4-4. Placas normalizadas de 1mm hasta 25mm

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Se somete a prueba la placa de menor y mayor tamaño 1mm y 25mm respectivamente. Se verá si los errores son altos para replantear el modelo matemático, polinomio de LaGrange, que relaciona la señal de entrada, voltaje que recibe el Arduino, con el valor de salida, deformación $\ln(x)$. Utilizamos la entrada AI0 para recibir los datos y placa de 1mm, figura 5-4. Deberíamos tener un valor de 1mm con un $er\%=1.39\%$. En la figura 6-4 Columna d se aprecia el resultado:



Figura 5-4. Prueba de datos con placa de 1mm

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Compresor Marshall			
	mV	d	Carga
Entrada AI0	0,1323	-10,7049	0
			Ingresar
	mV 2	d 2	Carga 2
Entrada AI1	0	-20,72	0
			Ingresar

Figura 6-4. Resultado prueba con placa de 1mm

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

En la fila “Entrada AI0” y la columna “d” vemos la deformación -10.7049mm. El valor real es 1mm con un error relativo porcentual es 970.49% lo que nos hace pensar en replantear el modelo matemático a pesar de ser fiel a los datos de la tabla 1-3 y de que el error del modelo respecto al equipo de ensayos tuvo un máximo de 1.39% del experimento 5. Se puede decir que

el error de 1.39% no tiene relación con el de 970.49%. El error de 1.39% es del modelo que se diseñó respecto al equipo, el de 970.49% es el error del modelo respecto a los valores reales ósea de las placas. En otras palabras el equipo de ensayos de materiales envía datos fuera de la realidad pues sus valores respecto a ella tienen un error total de $970.49\%+1.39\%=971.88\%$. Por ello se resalta la necesidad de reemplazar el equipo para la toma de datos de los ensayos de materiales y para la medición de deformaciones lo cual es el motivo de la presente tesis.

Si el error es lineal de una con otra placa implica que la pendiente m del modelo matemático está bien formulado pero desplazado un valor b de la curva $Y=mX+b$ lo que se puede ajustar con una puesta a cero o llamada también “encerado” del ingreso de datos en el ensayo. Esta suposición es correcta si con la placa de 25mm el error es proporcional 25 veces al de 1mm. Se hace la prueba con la placa de 25mm, figura 7-4 y el resultado en la figura 8-4.



Figura 7-4. Prueba de datos con placa de 25mm

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

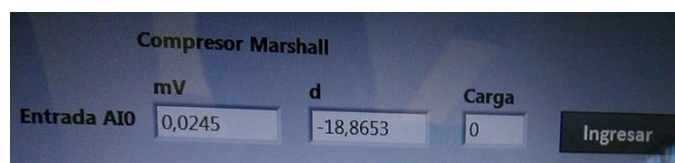


Figura 8-4. Resultado prueba con placa de 25mm

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Tenemos un valor de deformación -18.8653mm del valor real 25mm con un error del 24.54% . Si para 1mm fue 970.49% y si estuviese correcta la pendiente del modelo calculado entonces el error debería ser lineal para la placa de 25mm de 24262.25% . Esto demuestra que la ecuación $Y=mX+b$ obtenida en el capítulo anterior con la forma $\text{Ln}(x) = -0.016714859437751x + 0.000012$ su pendiente m y constante b son erróneos respecto a la realidad pero semejantes respecto al equipo de ensayos de materiales lo cual no es conveniente. Se procede a replantear el modelo matemático Voltaje vs Deformación o $\text{Ln}(x)$ del sensor pero en base a las medidas de

voltaje que se reciben de las placas normalizadas de 1mm figura, 10-4 y 25mm. Se obtienen 2 pares ordenados y se modela nuevamente con LaGrange la curva de respuesta del LVDT.

Con los resultados obtenidos la eficiencia de nuestro sistema no se debe comparar con las mediciones de deformación del equipo de ensayo de materiales porque son erróneos. Se utilizaran las placas normalizadas para remodelar el sensor y se verificará la eficiencia de todo nuestro sistema comparándolo con los medidores analógicos que posee el laboratorio que no se utilizan por el tiempo, dispersión de datos y la precisión que tienen. Nuestro proyecto debe reemplazar al equipo de ensayos y además superar a los medidores analógicos en las tres variables mencionadas. Para ello en la figura 9-4 tomamos datos con el medidor analógico.



Figura 9-4. Toma de datos con el medidor analógico

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

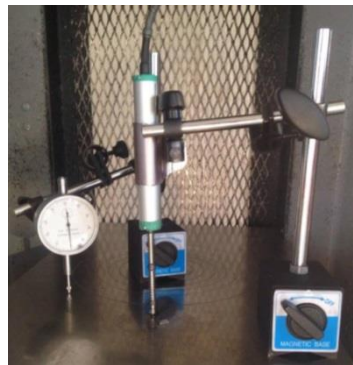


Figura 10-4. Toma de datos con el sensor LVDT

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

La posición del sensor se ubica manualmente dependiendo del espacio disponible en la cámara cuando colocamos en ella el material a someterse al ensayo, después la máquina ajusta al material variando la deformación de donde se ubicó inicialmente el sensor. Por eso los valores de voltaje X no siempre serán cero o el mismo del momento de iniciar el ensayo. Lo importante es que el programa permita inicializar en cero, o llamado también encerrar la deformación o el valor de $\ln(x)$ en ese punto a pesar de que se reciban voltajes X diferentes de cero del sensor.

De $\ln(x)=mX+b$ el valor de m es lo único que se mantiene constante en cualquier ensayo, X es el voltaje que se recibe del sensor y b es el parámetro de ajuste que se modifica de tal modo que al inicio del ensayo a pesar de que X voltaje sea diferente de cero el valor de $\ln(x)$ que representa la deformación sea cero. A continuación se resaltan los 3 ensayos más sobresalientes realizados con menor error para recalcular la curva del sensor y se señala el que se utilizó:

4.1 Ensayos

4.1.1 Ensayo 1:

Tabla 1-4. Valores obtenidos primer ensayo

Placa (mm)	Voltaje (mV)
1	0.0294
25	0.1323

Fuente: Datos obtenidos en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Curva obtenida. $y=14.832x-8$

Tabla 2-4. Pruebas y errores obtenidos primer ensayo

Placa (mm)	Valor del programa (mm)	Error relativo porcentual (%)
1	0.996	0.4%
5	4.973	0.54%
10	10.094	0.94%
20	20.203	1.01%
25	25.411	1.64%

Fuente: Datos obtenidos y calculados en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El máximo error relativo porcentual calculado es de 1.64%

4.1.2 Ensayo 2

Tabla 3-4. Valores obtenidos segundo ensayo

Placa (mm)	Voltaje (mV)
0 (sin placa)	0.5341
25	2.2197

Fuente: Datos obtenidos y calculados en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Curva obtenida. $y=14.8315x-7.9214$

Tabla 4-4. Pruebas y errores obtenidos segundo ensayo

Placa (mm)	Valor del programa (mm)	Error relativo porcentual (%)
1	1.005	0.50%
5	5.017	0.34%
10	10.084	0.84%
20	20.299	1.49%
25	25.383	1.53%

Fuente: Datos obtenidos y calculados en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El máximo error relativo porcentual calculado es 1.53%

4.1.3 Ensayo 3

Tabla 5-4. Valores obtenidos tercer ensayo

Placa (mm)	Voltaje (mV)
0 (sin placa)	0.5733
25	2.205

Fuente: Datos obtenidos y calculados en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

Curva obtenida. $y=15.3214x-8.1080$

Tabla 6-4. Pruebas y errores obtenidos tercer ensayo

Placa (mm)	Valor del programa (mm)	Error relativo porcentual (%)
1	1.002	0.2%
5	5.0011	0.11%
10	10.0049	0.49%
20	20.0084	0.84%
25	25.0071	0.71%

Fuente: Datos obtenidos y calculados en ensayos realizados en el Laboratorio

Realizado por: Marcos A. Jácome T.

El máximo error relativo porcentual calculado es 0.84%

El menor error relativo es en el *Ensayo 3*, y por eso se ocupa su curva $y=15.3214x-8.1080$ como modelo matemático del sensor LVDT.

4.2 Demostración hipótesis: Comparación de medidores

Para verificar la hipótesis general se utiliza la curva del Ensayo 3 del apartado anterior 4.1.3 que representa el modelo matemático que caracteriza el sensor LVDT.

Las hipótesis de trabajo y nula son las siguientes:

H1: El desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de LaGrange servirá para conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT.

H0: El desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de LaGrange no permitirá conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT.

Para conocer el comportamiento dinámico del sensor se consideran 3 parámetros: Precisión, Error y Tiempo de ensayo. Se realizaron ensayos utilizando Bloques de Calibración Estándar placas de 1mm para analizar los instrumentos de medición Compresómetro Análogo y Consola para LVDT's los resultados se presentan a continuación. Todas las mediciones se realizaron en las mismas condiciones para ambos equipos (Rubén Jácome T., 2017).

4.1.1 Resultados de análisis de Precisión

Los resultados se resumen en la tabla 7-4 y su ilustración en la figura 11-4

Tabla 7-4. Precisión entre Compresómetro Análogo y Consola Para LVDT

<i>Análisis de Precisión</i>			
<i>Probeta:</i>		<i>Dados de Calibración (Probeta de 1mm)</i>	
<i>h de probeta:</i>		<i>1,0 mm</i>	
<i>Fecha de Ensayo:</i>		<i>24/11/2016</i>	
		<i>Instrumentos:</i>	
		<i>Deformimetro: KEX Germani 0-10 mm</i>	
		<i>LVDT: Matest STTLX0050</i>	
Compresómetro Análogo		Consola para LVDT's	
Muestra Nº	Longitud medida (mm)	Muestra Nº	Longitud medida (mm)
1	0,99	1	1,012
2	0,98	2	1,014
3	1,02	3	1,010
4	1,02	4	1,012
5	0,99	5	1,012
6	1,01	6	1,013
7	0,99	7	1,011
8	1,09	8	1,013
9	1,00	9	1,015
10	1,00	10	1,012
Media Aritmética (mm)	1,01	Media Aritmética (mm)	1,012
Calculo de la Desviación Estándar (mm)	0,03	Calculo de la Desviación Estándar (mm)	0,001
Coeficiente de Variación (%)	3,09	Coeficiente de Variación (%)	0,141

Fuente: Análisis comparativo de los resultados entre Compresómetro análogo y LVDT's en ensayos de Compresión de cilindros de concreto (Rubén Jácome T., 2017)

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

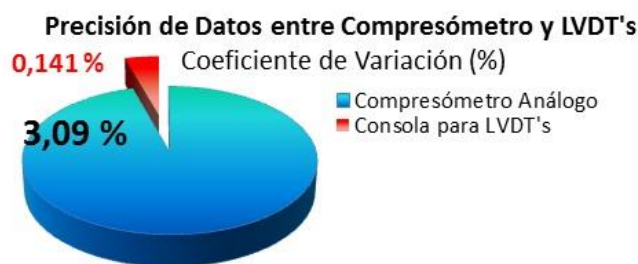


Figura 11-4. Precisión Compresómetro

Análogo y Consola LVDT

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

En la figura 11-4 se aprecia la dispersión de los datos medidos a una placa de 1mm tomando como parámetro el “Coeficiente de Variación” que expresa la Desviación Estándar en porcentaje. Como resultado de las mediciones realizadas en el ensayo de Precisión con una placa de calibración de equipos el Coeficiente de variación con el Compresómetro análogo es 3,094%, mayor al 0,141% medido con la consola para LVDT’s (Rubén Jácome T., 2017).

4.1.2 Resultados de análisis de Error

Tabla 8-4. Error entre Compresómetro Análogo y Consola Para LVDT

<i>Análisis de Error</i>			
<i>Probeta:</i>	<i>Dados de Calibración (Probeta de 1r.</i>		<i>Instrumentos:</i>
<i>h de probeta:</i>	<i>1,0 mm</i>		<i>Deformímetro: KEX Germani 0-10 mm</i>
<i>Fecha de Ensayo:</i>	<i>18/10/2016</i>		<i>LVDT: Matest STTLX0050</i>
<i>Compresómetro Análogo</i>		<i>Consola para LVDT's</i>	
Medida Nº	Longitud medida (mm)	Medida Nº	Longitud medida (mm)
1	0,99	1	1,012
2	0,98	2	1,014
3	1,02	3	1,010
4	1,02	4	1,012
5	0,99	5	1,012
6	1,01	6	1,013
7	0,99	7	1,011
8	1,09	8	1,013
9	1,00	9	1,015
10	1,00	10	1,012
Media Aritmética (mm)		Media Aritmética (mm)	
1,01		1,012	
Calculo de la Desviación Estándar (mm)		Calculo de la Desviación Estándar (mm)	
0,03		0,001	
Error Cuadrático Medio		Error Cuadrático Medio	
0,01		0,0005	
Resolución del Instrumento (±mm)		Resolución del Instrumento (±mm)	
0,01		Resolución Infinita	
ERROR TOTAL		ERROR TOTAL	
1,01 ±0,010 mm		1,01 ±0,0005 mm	

Fuente: Análisis comparativo de los resultados entre Compresómetro análogo y LVDT’s en ensayos de Compresión de cilindros de concreto (Rubén Jácome T., 2017)

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

En la figura 12-4 se aprecia el Error total de Medición con una placa de 1mm tomando el mayor entre “Error cuadrático medio” y “Resolución”. El Error de medición con el Compresómetro análogo es de ±0,01mm mayor al ±0.0005 mm con la consola para LVDT’s. Todas las mediciones se realizaron en las mismas condiciones para ambos equipos (Rubén Jácome T., 2017).

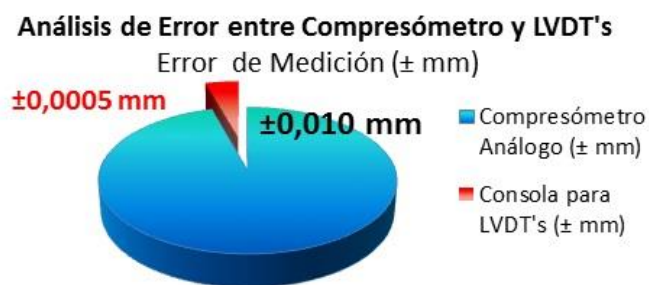


Figura 12-4. Error Compresómetro Análogo y Consola LVDT.

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

4.1.3 Resultados de Tiempo de Ensayo

Tabla 9-4. Tiempo de Ensayo Compresómetro Analógico y Consola LVDT

Resultados de Tiempo Pre y Post Ensayo				
Ensayo:		Módulo de Elasticidad		
Dimensiones de Probeta:		Cilindro 150 mm de Diámetro por 300mm de Altura		
Fecha de Ensayo:		18/10/2016		
Compresómetro Análogo				
Muestra Nº	Tiempo Pre Ensayo (min)	Tiempo Post Ensayo (min)	Total (min)	Observaciones
1	17,60	13,40	31,00	
2	32,00	14,04	46,04	<i>Tiempos de ensayo mayores por des calibración de Deformímetro análogo y reajuste de anillas de Compresómetro</i>
3	32,00	16,30	48,30	
4	15,48	15,50	30,98	
5	15,30	12,90	28,20	
6	18,30	15,30	33,60	
7	16,30	14,40	30,70	
8	18,90	14,80	33,70	
9	18,30	13,74	32,04	
10	16,20	12,50	28,70	
Tiempo Promedio (min)			34,33	
Consola para LVDT's				
Muestra Nº	Tiempo Pre Ensayo (min)	Tiempo Post Ensayo (min)	Total (min)	Observaciones
1	3,56	2	5,56	<i>El tiempo empleado es menor debido a la automatización del proceso, los valores de cero en e tiempo pre ensayo se debido a que el LVDT ya estaba dispuesto en la posición correcta desde el primer ensayo a diferencia con el proceso anterior este no se retira al finalizar el ensayo. Este tiempo es relativamente menor devino a que se obvian procesos análogos ocupados en el otro equipo como son el calibrado, instalación de Compresómetro, reajuste de anillas y filmación de dial. Este cronometrado fue realizado sin el tiempo empleado en la compresión del cilindro ya que esto varía de acuerdo al operario.</i>
2	0	1,8	1,8	
3	0	1,58	1,58	
4	0	1,65	1,65	
5	0	1,47	1,47	
6	0	1,96	1,96	
7	0	2	2	
8	0	2,17	2,17	
9	0	1,36	1,36	
10	0	1,86	1,86	
Tiempo Promedio (min)			2,141	

Fuente: Análisis comparativo de los resultados entre Compresómetro analógico y LVDT's en ensayos de Compresión de cilindros de concreto (Rubén Jácome T., 2017).

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

El tiempo promedio Pre y Pos ensayo con el Compresómetro es 34.33 min y es mayor respecto al tiempo Pre y Pos ensayo con la consola para LVDT's de 2.141 min (Rubén Jácome T., 2017). En la tabla 10-4 se resume los resultados de los ensayos realizados con los equipos. Se aprecia una menor precisión, mayor error y tiempo de ensayo del Compresómetro análogo respecto a la consola para LVDT's. Su gráfica ilustrativa se puede ver en la figura 13-4.

Tabla 10-4. Resumen de ensayos de Precisión, Error y Tiempo de Ensayo.

<i>Tabla de Resumen de ensayos de Precisión, Error, Módulo de Elasticidad y Tiempo de Ensayo</i>		
Compresómetro Análogo		
Ensayo	Parámetro	Resultado
Análisis de Precisión	Coefficiente de Variación (%)	3,09
Análisis de Error	Error de Medición (± mm)	0,01
Ensayo Módulo de Elasticidad	Coefficiente de Variación (%)	5,64
Resultados de Tiempo de Ensayo	Tiempo Promedio (min)	34,33
<i>Observaciones: Las pruebas se realizaron con el Compresómetro Análogo Humboldt H-2914 y el Deformímetro: KEX Germani 0-10 mm.</i>		
Consola para LVDT's		
Ensayo	Parámetro	Resultado
Análisis de Precisión	Coefficiente de Variación (%)	0,14
Análisis de Error	Error de Medición (± mm)	0,0005
Ensayo Módulo de Elasticidad	Coefficiente de Variación (%)	2,50
Resultados de Tiempo de Ensayo	Tiempo Promedio (min)	2,14
<i>Observaciones: Las medidas de deformación se lo realizaron con el LVDT Matest STTLX0050.</i>		

Fuente: Análisis comparativo de los resultados entre Compresómetro análogo y LVDT'S en ensayos de Compresión de cilindros de concreto (Rubén Jácome T., 2017).

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

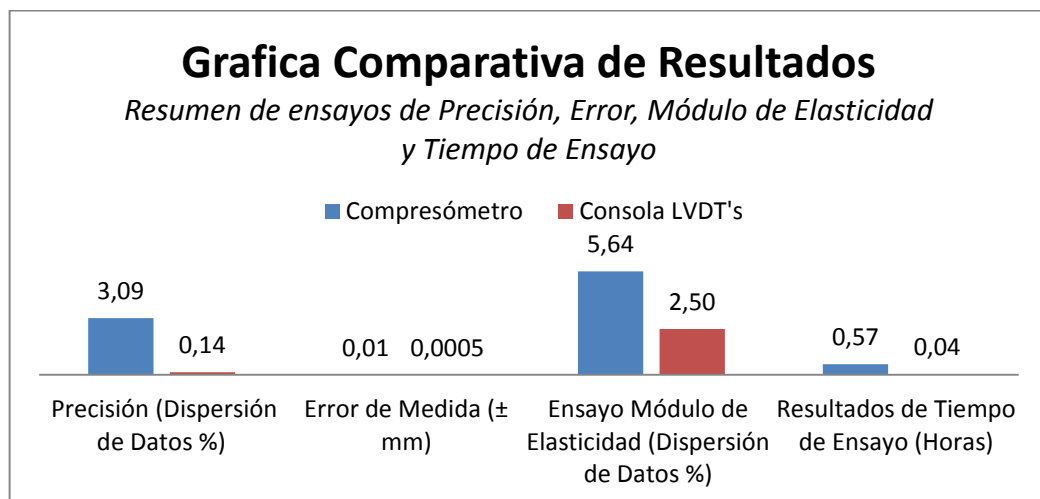


Figura 13-4. Resumen de Precisión, Error y Tiempo de Ensayo.

Realizado por: Rubén A. Jácome T.

En la gráfica 13-4 se puede apreciar mediante un gráfico de barras las diferencias de precisión, error y tiempo de ensayo entre los dos equipos. Podemos concluir que nuestro modelo matemático y electrónico para reemplazar el equipo de ensayo de materiales es el adecuado y además supera a un medidor analógico en Precisión, Dispersión de datos y tiempo de ensayo.

Con ello verificamos que entre la hipótesis de trabajo y la nula satisface la hipótesis de trabajo pues “El desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de LaGrange sirve para conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT”.

CONCLUSIONES

- Se estudió el uso y características de sensores de precisión LVDT. Su principio inductivo permite que un movimiento del núcleo genere una variación de voltaje entre sus pines de señal de 0V a 3,5V. Debe poseer un adecuado filtro y acondicionamiento de señal por su baja inmunidad al ruido. Los rangos de medida parten de unos 10mm hasta 500mm.
- Se utilizó diferente cantidad y valores de nodos para obtener varias curvas o modelos matemáticos del sensor mediante la metodología experimental. Con estos experimentos se vio necesario utilizar únicamente dos nodos y sus valores fueron cambiados hasta llegar al modelo de menor error 0.84% del Ensayo 3 apartado 4.1.3.
- Se utilizó el software Matlab y diseñó un programa o script en el que ingresamos los valores, cantidad de nodos e imágenes para facilitar la manipulación de la interpolación de LaGrange y obtener sus modelos matemáticos. Se recalcaron los ensayos más importantes.
- Se analizó las respuestas y márgenes de error de cada modelo para usar el de menor valor. La mayor diferencia de nuestro modelo midiendo las placas normalizadas fue 0,84%. Por ello nuestro sistema electrónico de reemplazo del equipo de ensayo de materiales es adecuado y supera a los medidores analógicos en Precisión, Dispersión de datos y Tiempo de ensayo. Con la función polinomio grado 1 siendo $y=Ln(x)=15.3214x-8.1080$
- Se dimensionó la adecuada tarjeta de adquisición de señales Arduino para el acondicionamiento de la señal del sensor hacia el computador, estableciendo las condiciones de comunicación entre la tarjeta, el sensor y el software de comunicación. Se utilizó una tarjeta Arduino Mega en vez del Uno con las mismas conexiones de los capítulos anteriores por su convertidor de 10 bits de resolución con valores de 0 a 1.024 y tensiones de 0 a 5V. El Arduino recibe los valores de voltajes del sensor en sus entradas análogas, no como números de 0 a 1024 gracias a la librería Lifa_Base instalada en el Arduino y VI PM. La transmisión a LabView es a 115200 bits/s.
- Se desarrolló una aplicación en LabView que permite la independencia del sensor con la máquina, establece la dependencia con el computador y se visualiza en un HMI. Se generó un ejecutable e instalador para plataformas Windows XP en adelante. Se debe conectar la consola al sensor con la cámara de ensayos y al computador de esta manera independizamos la conexión del equipo de interpretación de datos de la cámara de ensayos de materiales.

- Nuestra propuesta de modelo matemático y sistema electrónico de reemplazo del equipo de ensayo de materiales es el adecuado y también supera a los medidores de deformación analógicos en variables como Precisión, Dispersión de datos y en el tiempo de ensayo. Por ello sirve para conocer el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT el cual fue el motivo e hipótesis del presente trabajo de tesis.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda en ensayos de materiales o en la toma de datos no manipular el sensor LVDT y sostenerlo sobre una base fija para que no genere datos erróneos por su alta sensibilidad ante el ruido y pequeñas vibraciones.
- El programa diseñado en Matlab sirve para calcular la función Voltaje [V] vs Deformación [mm] y programarlo en LabView obteniéndose las Deformaciones en base a los voltajes que se recibe del sensor. Éste posee un comportamiento lineal y una baja inmunidad al ruido por su principio de funcionamiento inductivo. Lo anterior se debe tener presente al modelar su comportamiento escogiéndose los nodos en puntos idóneos que reflejen el comportamiento del resto. Se debe tomar un número de 2 nodos para que la curva no posea máximos, mínimos o cambios en el sentido de concavidad. Resulta práctico también diseñar toda la función con el criterio de funciones a tramos escogiendo 2 nodos adecuados para cada una.
- Con los 2 nodos que se escoge para hallar la curva $\text{Ln}(x)$ del sensor es necesario variar sus valores experimentalmente para reducir aún más el error hasta que tienda a cero respecto al resto de nodos aunque implique hacerlo múltiples veces pues el motivo del presente tema de tesis es modelar el equipo al punto de reemplazarlo.
- Si operamos con mediciones de variables en milímetros o micrómetros se recomienda utilizar tarjetas de adquisición de señales de alta inmunidad al ruido con más de 10 bits de resolución. En nuestra tarjeta con 10 bits de resolución y alimentación 5V de referencia se detectan variaciones de 4.88mV. Si el sensor envía una menor variación, el Arduino no la detecta y continuará dando el mismo Voltaje y consecuentemente Deformación.
- Se recomienda antes de correr el programa en Labview verificar una correcta conexión Hardware del sensor a la Consola y Consola al Computador. Verificar en el Administrador de Dispositivos el puerto COM que le asigna el computador al Arduino para el mismo asignarle en el programa. De los datos almacenados en la hoja de Excel durante el ensayo deben eliminarse los que sean exageradamente altos o bajos del resto pues son errores de mediciones producidos por infiltración de ruido. Se puede asignar el valor de una medición anterior o de una medición siguiente para reemplazarlo.

BIBLIOGRAFÍA

- APABLAZA, D., Y MUÑOZ, J.** (2016). Implementación de Laboratorio de un Convertidor Boost Interleaved para Aplicaciones Fotovoltaicas. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 6. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 4 Septiembre 2016]. Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue6June2016/14TLA6_34Apablaza.pdf
- BERNABÉ, M. B., VANOYE, J., BUSTILLO, M., GONZÁLEZ, R., OCHOA, A., MARTÍNEZ, G. [et al.]** (2016). Diseño de experimentos para un problema de particionamiento multiobjetivo. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 5. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 2 Septiembre 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue5May2016/14TLA5_47BernabeLoranca.pdf
- ECHEVERRÍA, M. V. T., ECHEVERRÍA, H. M., ANGULO, E. F., PONTIGO, F. A., MUNITA, D. S. [et al.]** (2016). Diseño de un Prototipo para Selección y Procesamiento de Señales Sismológicas. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 6. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 23 Agosto 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue6June2016/14TLA6_15TomboliniEcheverria.pdf
- ESQUIVEL, J. A., OSUNA, J. A., MARTÍNEZ, R., MALDONADO, J. J. [et al.]** (2016). Promediación, Aproximación y Control de Ecuaciones Diferenciales Funcionales por Jesús Aureliano Esquivel *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 4. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 21 Julio 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue4April2016/14TLA4_08EsquivelCardenas.pdf
- HINIJOSA, V., TICUNA, O., Y GUTIERREZ, G.** (2016). Mejora en la formulación matemática del problema de asignación de unidades con restricciones del sistema de transmisión. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 2. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 5 Agosto 2016] Disponible en:

http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue2Feb.2016/14TLA2_49Hinojosa.pdf

JÁCOME T., R. A. (2017). Análisis comparativo de los resultados entre Compresómetro analógico y LVDT'S en ensayos de Compresión de cilindros de concreto [en línea]. Riobamba: Universidad Nacional del Chimborazo [fecha de consulta: 14 febrero 2017]. Disponible en:
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/3473/1/UNACH-ING-CIVIL-2017-0002.pdf>

JIMÉNEZ, F., LARA, F. Y REDEL, M. (2014). API para la comunicación entre Labview y Arduino UNO. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 12, NO. 6. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 12 Diciembre 2016] Disponible en:
http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol12/vol12issue6Sept.2014/12TLA6_03JavierJimenez.pdf

KASCHEL, H., LANYÓN, C., Y AHUMADA, C. (2016). Método Numérico de Diferencias Finita del Campo Eléctrico para determinar el SAR generado en una antena tipo Microstrip aplicada a una WBAN. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 6. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 18 Agosto 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue6June2016/14TLA6_63KaschelCarcamo.pdf

LOVAY, M., PERETTI, G. Y ROMERO, E. (2015). Implementación de un filtro adaptivo utilizando una estrategia de hardware evolutivo. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 13, NO. 4. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 18 Diciembre 2016] Disponible en:
http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol13/vol13issue04April2015/13TLA4_06Lovay.pdf

LOZOYA, C., AGUILAR, A., Y MENDOZA, C. (2016). Diseño Orientado a Servicios de un Dispositivo de Adquisición de Datos en la Agricultura de Precisión. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 4. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 29 Junio 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue4April2016/14TLA4_21Lozoya.pdf

- MERCHÁN, S., Y DUARTE, J.** (2016). Análisis de las técnicas de minería de datos para la construcción de un modelo predictivo para el Rendimiento Académico. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 6. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 26 Mayo 2016]. Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue6June2016/14TLA6_42MerchanRubiano.pdf
- MINCHALA, L. I., SÁNCHEZ, C. E., YUNGAICELA, N. M., MORA, A., MATA, J.P. [et al.]** (2016). Estudio comparativo de modelos de caja-negra para la predicción de la fineza del cemento usando medidas de entrada y salida de un circuito de molienda. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 2. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 10 Mayo 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue2Feb.2016/14TLA2_36Minc hala.pdf
- MIRANDA, K., Y RAMOS, V.** (2016). Mejorando la recolección de datos en Redes de Sensores con estimación en series de tiempo. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 5. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 11 Julio 2016]. Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue5May2016/14TLA5_51Miranda.pdf
- RODRÍGUEZ, M. V., HERNÁNDEZ, L. A. M., RANGEL, J. P. B., GONZÁLEZ, A. D. [et al.]** (2016). Monitoreo en tiempo real de variaciones de voltaje usando morfología matemática. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 5. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 16 Junio 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue5May2016/14TLA5_16ValtierraRodriguez.pdf
- VALENCIA, A., GONZÁLEZ, G., Y CASTAÑEDA, M.** (2016). Modelo de ecuaciones estructurales para estudiar la aceptación del m-learning. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS* [en línea]. VOL. 14, NO. 4. ISSN: 1548-0992 [fecha de consulta: 2 Junio 2016] Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol14/vol14issue4April2016/14TLA4_64ValenciaArias.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Código en Matlab para el cálculo de la ecuación de la recta con el método de los mínimos cuadrados utilizando todos los nodos obtenidos en la tabla 1-3.

```
function [m,b]=mincuadlin(X)
n=length(X(1,:));
A=0;
B=0;
C=0;
D=0;
for i=1:n;
    A=A+X(1,i);
    B=B+X(2,i);
    C=C+(X(1,i))^2;
    D=D+X(1,i)*X(2,i);
end
m=(n*D-A*B)/(n*C-A^2);
b=(C*B-D*A)/(n*C-A^2);
for i=1:n;
    hold on;
    plot(X(1,i),X(2,i), '*','MarkerEdgeColor','r','LineWidth',1);
end

x=X(1,1):1:X(1,n);
y=m*x+b; plot(x,y,'b');
title('Aproximación lineal por mínimos cuadrados.');
```