



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“Identificación del Módulo de Elasticidad de Aluminio 6061 por Medio de la Medición de Deformación con Galgas Extensiométricas”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

Jesús Villegas Guzmán

DIRECTOR:

Dr. Alberto Antonio García

ASESOR:

M. C. Fermín Hugo Ramírez Leyva

Huajuapán de León, Oaxaca. Septiembre 2011

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a la persona que con su esfuerzo me ha ayudado a alcanzar mis metas y ha sido mi principal fuente de inspiración. Con todo mi amor:

A MI MADRE:

Ricarda Guzmán Morales

Un gran ejemplo de fuerza y valor

Jesús

Agradecimientos

A lo largo de mi vida han influido en mi formación un gran número de personas, que con sus consejos, tiempo o palabras de aliento me han ayudado en demasía en los momentos que más lo he necesitado. A todas esas personas les agradezco su inconmensurable apoyo y les guardo un gran cariño.

A DIOS, por estar presente en todo lo que hago, brindarme tantas bendiciones y ayudarme a alcanzar mis mayores deseos.

A mi madre, por el simple hecho de serlo. Su fuerza de voluntad y valor han sido mi mayor motivación para luchar por todo lo que quiero.

A mi hermana Alicia, por apoyarme siempre y creer en mí. Por todos los momentos que hemos pasado juntos. Sabes cuánto te quiero y te agradezco todo lo que has hecho por mí.

A mi cuñado Gil, por ayudarme de muy diversas formas en los momentos que más lo requerí y por estar siempre dispuesto a apoyarme.

A mis sobrinos Sandra y Gil, por brindarme tantas alegrías y momentos inolvidables. Los quiero demasiado y espero compartir con ustedes muchos momentos más juntos.

A don Rogelio Arias Ramírez, por tantos consejos que me ha brindado en momentos tan difíciles para mí, los cuales me han ayudado a ser una mejor persona y superar muchos obstáculos.

A mis tíos Imelda y Manuel, por ofrecerme su cariño y apoyo constantemente así como por brindarme consejos que me ayudan a mejorar frecuentemente.

A mis tías Zenaida, Rosario y Patricia, por las palabras de aliento que me brindaron en momentos que lo necesité. Muchas gracias.

A mis primos Catalina, Alejandra y José Luis, por ser para mí además de eso, grandes amigos y por haber compartido conmigo tantos momentos de alegrías. Los quiero mucho.

A mis compañeros de la Universidad, especialmente a Víctor, Norberto, Amando y Jorge, por brindarme su amistad y haber compartido conmigo todos los momentos difíciles que nos permitieron alcanzar nuestro objetivo. Nunca dejen de luchar por lo que quieren.

A José Manuel, por tu amistad y el tiempo que pudimos trabajar juntos en la Universidad.

A los profesores Alberto Antonio García y Fermín Hugo Ramírez Leyva por su tiempo y dedicación al desarrollo de este trabajo de tesis. Muchas gracias por su asesoría y disposición.

A los profesores Jesús Linares Flores, Carlos García Rodríguez y Manuel Arias Montiel por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y las sugerencias proporcionadas para mejorarlo.

A los profesores que contribuyeron en mi formación como profesionista y que estuvieron dispuestos a apoyarme en la adquisición de nuevos conocimientos.

A los profesores de Ingeniería Industrial que me permitieron utilizar la máquina de tensión, parte fundamental en el desarrollo de este trabajo.

A Fredy, Alberto y Ever, por la amistad que me han brindado a través de todo este tiempo, gracias por ayudar a conservar esta amistad sin importar tiempos y distancias.

A Tania Díaz, por brindarme su amistad y darme la oportunidad de conocerla. Espero que nuestra amistad dure por siempre.

Muchísimas gracias a todos.

Con cariño.

Jesús

Resumen

En este documento de tesis se desarrolla un sistema que permite obtener el Módulo de Elasticidad por medio de la medición de deformaciones en probetas de aluminio 6061, para medir estas deformaciones se emplean galgas extensiométricas, las cuales son medidores de deformación por resistencia eléctrica. El cambio de resistencia eléctrica producido en las galgas es interpretado por un sistema electrónico que acondiciona dicha señal. Esta señal es enviada a la computadora en donde es interpretada por medio de un programa desarrollado con la ayuda del software LabVIEW. Este programa permite que el usuario del sistema pueda visualizar como se va efectuando la experimentación así como los resultados obtenidos al final de esta.

Índice

Resumen	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas.....	vi
Introducción.....	vii
Objetivo	x
Justificación	xi
Organización de la tesis	xii

Capítulo 1 Fundamentos para la medición de deformación usando galgas extensiométricas

1.1 Conceptos de mecánica de materiales	1
1.2 Sistemas comerciales de medición con galgas extensiométricas	8
1.3 Galga extensiométrica	10
1.4 Acondicionamiento de señales analógicas	14
1.4.1 Amplificación de la señal	15
1.4.2 Filtrado de la señal.....	19
1.4.3 Adquisición de la señal	22

Capítulo 2 Diseño del hardware del sistema de medición

2.1 Sistema de medición para galgas extensiométricas.....	27
2.2 Circuito puente de Wheatstone.....	29
2.3 Amplificador de instrumentación	30
2.4 Filtro paso-bajas	31
2.5 Amplificador opcional y sumador	33
2.6 Microcontrolador y RS-232.....	36
2.7 Alimentación del sistema	38

Capítulo 3 Diseño del software del sistema de medición

3.1 Metodología de desarrollo	44
3.2 Programación del microcontrolador	46
3.2.1 Análisis de los requerimientos.....	47

3.2.2 Diseño del programa.....	48
3.2.3 Codificación del programa	50
3.2.4 Pruebas del programa	53
3.3 Programación en LabVIEW	54
3.3.1 Análisis de los requerimientos	55
3.3.2 Diseño del programa.....	56
3.3.3 Codificación del programa	58
3.3.4 Pruebas del programa	63

Capítulo 4 Pruebas del sistema de medición y obtención del módulo de Young

4.1 Circuito puente de Wheatstone y amplificador de instrumentación.....	66
4.2 Variaciones por temperatura.....	69
4.3 Mediciones analógicas.....	70
4.4 Obtención experimental del módulo de Young.....	73

Capítulo 5 Comparación de la deformación unitaria por medio de elementos finitos y galgas extensiométricas

5.1 Energía de deformación de una barra bajo carga axial.....	82
5.2 Construcción del modelo del elemento finito.....	83
5.3 El principio del mínimo potencial de energía.....	87
5.4 Análisis en SolidWorks	90

Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones.....	95
6.2 Trabajos futuros.....	97

Bibliografía.....	99
Internet.....	101
Apéndice A. Costos del material empleado para la elaboración del sistema	A-1
Apéndice B. Problemas observados en el acondicionamiento de la señal	B-1
Apéndice C. Diagrama electrónico de conexiones del sistema de medición	C-1

Índice de Figuras

Figura 1.1. Barra bajo carga axial.....	2
Figura 1.2. Deformación en una barra sometida a tensión	3
Figura 1.3. Probeta para pruebas de tensión.....	4
Figura 1.4. Máquina para pruebas a tensión.....	4
Figura 1.5. Galga extensiométrica.....	5
Figura 1.6. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.....	6
Figura 1.7. Diagrama a bloques de los elementos a utilizar	9
Figura 1.8. Módulos de acondicionamiento para mediciones con galgas extensiométricas	10
Figura 1.9. Circuito Puente de Wheatstone	11
Figura 1.10. Sistema para tratamiento de la señal	14
Figura 1.11. Amplificador Diferencial	16
Figura 1.12. Amplificador diferencial de instrumentación AD624.....	17
Figura 1.13. Filtro paso-bajas Butterworth de segundo orden	20
Figura 1.14. Respuesta en frecuencia del filtro paso-bajas Butterworth de segundo orden.....	21
Figura 1.15. Microcontrolador ATmega8	24
Figura 1.16. Panel frontal en LabVIEW	25
Figura 1.17. Diagrama a bloques en LabVIEW	25
Figura 1.18. A) Paleta de controles, B) Paleta de funciones	26
Figura 2.1. Diagrama a bloques general del sistema de medición	28
Figura 2.2. Circuito Puente de Wheatstone implementado	29
Figura 2.3. Implementación del amplificador diferencial de instrumentación AD624	30
Figura 2.4. Filtro Butterworth de segundo orden implementado	32
Figura 2.5. Señal de salida del filtro paso-bajas.....	32
Figura 2.6. Amplificador operacional TL084.....	34
Figura 2.7. Amplificador no inversor	35
Figura 2.8. Circuito sumador no inversor.....	35
Figura 2.9. Circuito seguidor de voltaje	36
Figura 2.10. Microcontrolador ATmega8	37
Figura 2.11. Dispositivo Max-232.....	37
Figura 2.12. Sistema de adquisición de datos.....	38
Figura 2.13. Etapa de alimentación del sistema	39
Figura 2.14. Convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ.....	39
Figura 2.15. Diagrama de implementación para el convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ.....	39
Figura 2.16. Implementación del AM2D-0512D-NZ.....	40
Figura 2.17. Implementación del regulador LM317	41
Figura 2.18. Referencia de voltaje LM336.....	42

Figura 2.19. Circuito para la implementación de la referencia de voltaje LM336.....	42
Figura 3.1. Metodología aplicada para el desarrollo de software.....	45
Figura 3.2. Fases del desarrollo de software	46
Figura 3.3. Estructuración general del software	47
Figura 3.4. Bloques principales del programa.....	49
Figura 3.5. Diagrama de flujo del programa implementado en el microcontrolador ATmega8	52
Figura 3.6. Simulación del código para el ATmega8 en Proteus.....	54
Figura 3.7. Bloques principales del programa desarrollado en LabVIEW.....	57
Figura 3.8. Diagrama de flujo para el programa desarrollado en LabVIEW	58
Figura 3.9. Bloques que componen la sección de mediciones	60
Figura 3.10. Clasificación de las acciones del diagrama de flujo en las pestañas del programa.....	63
Figura 3.11. Portada del programa desarrollado en LabVIEW	64
Figura 3.12. Apariencia cuando se selecciona la opción mediciones.....	64
Figura 3.13. Diagrama a bloques para la opción mediciones.....	65
Figura 4.1. Respuesta teórica y real del sistema puente de Wheatstone-amplificador de instrumentación.....	67
Figura 4.2. Variación de temperatura a lo largo del día	70
Figura 4.3. Variación de voltaje debido a la temperatura a lo largo del día.....	71
Figura 4.4. Sistema electrónico de medición.....	75
Figura 4.5. Galga fijada en la máquina de tensión	75
Figura 4.6. Establecimiento de la fuerza de tensión límite en el programa TRAPEZIUM	76
Figura 4.7. Establecimiento de los parámetros de la experimentación	76
Figura 4.8. Panel donde se realiza la prueba en el programa TRAPEZIUM	77
Figura 4.9. Pestaña donde se muestran los resultados proporcionados por el programa en LabVIEW	77
Figura 4.10. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación.....	78
Figura 4.11. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación.....	79
Figura 4.12. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación.....	79
Figura 4.13. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación.....	80
Figura 5.1. Barra sometida a una carga axial	82
Figura 5.2. Modelo por elementos finitos de una barra bajo carga axial	84
Figura 5.3. Vectores globales U y P	84
Figura 5.4. Desplazamientos U_i y U_j para un elemento (e)	85
Figura 5.5. Probeta dibujada en SolidWorks.....	91
Figura 5.6. Elección de las sujeciones para la simulación.....	92
Figura 5.7. Establecimiento de la fuerza de tensión en la probeta	92
Figura 5.8. Mallado de la probeta en SolidWorks	93
Figura 5.9. Resultados para la simulación en SolidWorks	93
Figura 5.10. Deformaciones unitarias obtenidas por medio de SolidWorks	94
Figura 5.10. Deformaciones unitarias obtenidas por medio de SolidWorks	94
Figura B.1. Circuito puente de Wheatstone implementado inicialmente	B-1
Figura C.1. Etapa de alimentación del sistema.....	C-3
Figura C.2. Etapa de acondicionamiento de la señal.....	C-3
Figura C.3. Etapa de adquisición de datos.....	C-4

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Módulos comerciales para el acondicionamiento de señales de galgas extensiométricas	9
Tabla 2.1. Resultados obtenidos al probar el puente de Wheatstone y el amplificador AD624.....	31
Tabla 2.2. Resultados obtenidos del sistema: puente de Wheatstone, amplificador de instrumentación y filtro paso-bajas	33
Tabla 2.3. Valores de los capacitores para configurar el convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ.....	40
Tabla 3.1. Configuración de los registros para el ATMEega8	51
Tabla 4.1. Valores de resistencia para las galgas extensiométricas	68
Tabla 4.2. Valores de resistencia empleadas al probar el circuito puente de Wheatstone	68
Tabla 4.3. Resultados obtenidos al realizar las primeras pruebas del sistema.....	72
Tabla 4.4. Resultados obtenidos al implementar por completo el sistema de medición	78
Tabla 5.1. Nodos i y j para los elementos (e) según la figura 5.3.....	86
Tabla A.1. Costos del material empleado para elaborar la etapa de alimentación del sistema.	A-1
Tabla A.2. Costos del material empleado para elaborar la etapa de acondicionamiento de la señal	A-1
Tabla A.3. Costos del material empleado para elaborar la etapa de adquisición de datos	A-2
Tabla A.4. Costos del material extra empleado para el desarrollo del hardware.....	A-2

Introducción

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica aplicada que trata del comportamiento de los cuerpos sólidos y tiene como objetivo principal, determinar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en elementos mecánicos cuando estos están sujetos a diferentes tipos de cargas. Para determinar los esfuerzos y las deformaciones es necesario conocer las *propiedades físicas* de los materiales así como numerosas leyes y conceptos teóricos.

Los análisis teóricos y los resultados experimentales desempeñan papeles igualmente importantes en la mecánica de materiales. Es a través de estudios teóricos que se obtienen fórmulas y ecuaciones para predecir el comportamiento mecánico, pero no es posible utilizar esas fórmulas y ecuaciones a menos que se conozcan las propiedades físicas de los materiales. Las propiedades físicas que se usan en mecánica de materiales son: El *módulo de Young E*, el *módulo de Rigidez G* y la *razón de Poisson ν* . Estas propiedades se determinan de forma *experimental* y *son únicas* para determinado material y de aquí su importancia.

Uno de los primeros personajes famosos que realizó contribuciones en la mecánica de materiales fue *Arquímedes de Siracusa* (287-212 A. C.) [1]. El escritor griego Ateneo de Náucratis relata que Hierón II le encargó a Arquímedes el diseño de un enorme barco, el *Siracusia*, que construyó Arquias de Corinto. Según Ateneo, este barco era capaz de cargar 600 personas e incluía entre sus instalaciones jardines decorativos, un gimnasio y un templo dedicado a Afrodita. Fue durante el renacimiento que surgen las aportaciones de *Leonardo da Vinci* (1452-1519) y de *Galileo Galilei* (1564-1642) llevando a cabo experimentos para determinar la resistencia en alambres, barras y vigas, aunque no desarrollaron teorías adecuadas para explicar los resultados de sus pruebas. El libro publicado por Galileo "*Dialogues Concerning Two New Sciences*" en 1638, representa la culminación de su trabajo sobre dinámica y mecánica de materiales. Puede decirse que estos dos temas, como los conocemos ahora, se iniciaron con Galileo y la publicación de este famoso libro.

Entre las aportaciones más importantes a la mecánica de materiales se tienen los trabajos del científico inglés *Robert Hooke* (1635-1703) [1] quien realizó diversos experimentos con resortes. Hooke fue la primera persona en investigar científicamente las propiedades elásticas de diversos materiales como metales, madera, piedra, hueso y tendones. En 1678 desarrolló una publicación en donde daba a conocer los resultados de sus experimentos con cuerpos elásticos, esta es la primera publicación en donde son discutidas las propiedades elásticas de los materiales. De sus estudios obtiene la relación lineal entre la fuerza y la deformación que es conocida como la *ley de Hooke*, actualmente muy importante en estudios de mecánica. Por otra parte, *Thomas Young* (1773-1829) [1,2] aplicó la Ley de Hooke para estudiar el comportamiento de los materiales sometidos a carga axial. Fue capaz de identificar una constante de proporcionalidad entre la tensión y la deformación axial mostrando que todos los metales tienen un valor diferente. El *módulo de elasticidad*, que actualmente recibe el nombre de *Módulo de Young E*, es una medida de la rigidez del material. Otra extensión a la Ley de Hooke es realizada por el matemático francés *Sieméon Denis Poisson* (1781-1840) [1,2], incluyendo la contracción elástica natural que ocurre cuando una barra se expande bajo carga axial. La razón entre la deformación unitaria lateral a la deformación unitaria axial se conoce como *razón de Poisson* y se denota por la letra griega ν (nu). Poisson intentó calcular esta razón por medio de una teoría molecular de los materiales, encontrando $\nu = 1/4$ para materiales isótropos. Ciertos cálculos más recientes basados en mejores modelos de la estructura atómica dan $\nu = 1/3$. Ambos valores son cercanos a los valores medidos, que varían entre 0.25 y 0.35 para la mayoría de los metales y muchos otros materiales.

Se suele reconocer como el estudioso de la elasticidad más sobresaliente de todos los tiempos a *Barré de Saint-Venant* (1797-1886), algunas de sus contribuciones más conocidas son la formulación de las ecuaciones fundamentales de la elasticidad y el desarrollo de las teorías exactas de la flexión y la torsión. Una de sus contribuciones más importantes son sus trabajos sobre la concentración de esfuerzos alrededor de una discontinuidad que en la literatura se conoce como "*principio de Saint-Venant*". Por otra parte, para conocer el comportamiento de los materiales se requiere además de los desarrollos teóricos anteriores, de relaciones constitutivas. Es el matemático francés *Gabriel Lamé* (1795-1870) quien desarrolla las ecuaciones constitutivas de la mecánica de materiales. Sus ecuaciones se conocen como ecuaciones de Lamé-Hooke ó ecuaciones de Hooke generalizadas. Lamé demuestra que para un material isótropo solo se requieren tres propiedades para describir su comportamiento y que sólo se necesita determinar 2

de estas propiedades experimentalmente. Por supuesto estas propiedades son: El *modulo de Young E*, el *módulo de Rigidez G* y la *razón de Poisson ν* .

Por lo general, la única manera de establecer el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a cargas, es llevar experimentos en el laboratorio. El procedimiento usual es colocar pequeños especímenes de material en máquinas de prueba, aplicar las cargas y medir las deformaciones resultantes (cambio de longitud y diámetro). En una publicación de 1856 en los *Proceedings of the Royal Society* en Inglaterra, el físico *Lord Kelvin (William Thomson)* [3] estableció las bases para explicar los cambios en la resistencia eléctrica que experimentan los metales cuando se someten a cargas, los cuales finalmente conducen al concepto de medidor de deformación. *Edward E. Simmons* en el Instituto de Tecnología de California y *Arthur C Ruge* en el Instituto de Tecnología de Massachusetts iniciaron el desarrollo moderno de la medición de deformación al final de la década de 1930. Los trabajos de Edward Simmons y de Arthur Ruge concluyeron en 1938 con la creación de un dispositivo que se conoce actualmente como *Galga de deformación*, la cual consiste de una lamina flexible que contiene un patrón de hoja metálica. El medidor se adjunta al objeto con un adhesivo adecuado, como Cianocrilato. Cuando el objeto se deforma, la lámina se deforma, lo que hace que su resistencia eléctrica cambie. Este cambio de la resistencia, generalmente se mide mediante un puente de Wheatstone, el cual está relacionado con la deformación a través de una cantidad conocida como el *Factor de Galga*. El desarrollo del medidor de deformación de alambre metálico adherible originó los medidores de deformación disponibles a nivel comercial. Los medidores de deformación por resistencia también son la base de gran variedad de transductores, como las celdas de carga, los transductores de presión y los medidores de par.

Para convertir a voltaje las variaciones de resistencia de la galga se necesita una etapa de acondicionamiento. En el mercado existen módulos de acondicionamiento de señales para galgas extensiométricas, los cuales son elaborados por empresas como *National Instruments®*, por ejemplo el módulo SCC-SG03, del cual se tienen antecedentes sobre su manejo; pues en el año 2005 en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) se realizó una tesis en la cual se usaron galgas extensiométricas [4]. Dicho trabajo consistió en la medición de cargas a tensión aplicadas a probetas de Aluminio de aleación 6061 utilizando galgas extensiométricas EA-13-125AC-350 de la firma *Vishay®*. El acondicionamiento se hizo con el módulo SCC-SG03 y se digitalizó con una tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E y un programa en LabVIEW, ya que este software

es compatible con la tarjeta de adquisición de datos. Se fabricaron 5 probetas las cuales se caracterizaron con variaciones de carga de hasta 20kg, sin embargo las mediciones no tenían mucha repetibilidad. En dicho trabajo de tesis se concluye que la temperatura influye de manera importante en las mediciones, además se propone la implementación de la parte electrónica para el acondicionamiento de señales de galgas extensiométricas.

En el presente trabajo se utilizan las mediciones de la deformación obtenida por medio de una galga extensiométrica implementada en una probeta de prueba, sometida a cargas de tensión, y se determina el *módulo de Young E* del material. Las probetas de prueba empleadas son de aluminio aleación 6061, las cuales fueron elaboradas para la tesis desarrollada en el 2005. Para la obtención de las mediciones se desarrolló una etapa de acondicionamiento de la señal, cuyos elementos se pueden listar como sigue: Circuito Puente de Wheatstone, amplificador, filtro y sistema de adquisición de datos.

Utilizando el módulo de Young obtenido de las mediciones y un diseño de la probeta en algún programa de diseño CAD, se hará un análisis de deformación por medio del método del elemento finito y se hará una comparación entre las deformaciones experimentales y las obtenidas numéricamente. Actualmente existe software para aplicaciones mecánicas como ANSYS o SolidWorks que utilizan el método de elementos finitos para modelar piezas con geometrías complicadas.

Objetivo

Objetivo Principal

Obtener el módulo de elasticidad de Aluminio 6061 por medio de la medición de su deformación con galgas extensiométricas.

Objetivos Secundarios

- Acondicionar las señales provenientes de la galga extensiométrica para su correcta interpretación.

- Realizar una interfaz, utilizando el software LabVIEW, por medio de la cual el usuario observe los resultados obtenidos.
- Someter las probetas de prueba a cargas de tensión uniforme.
- Realizar una validación de los valores obtenidos en las pruebas experimentales por medio de ANSYS o SolidWorks.

Justificación

Entender el comportamiento mecánico es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de estructuras, ya sean aeroplanos, antenas, edificios, puentes, etc., pues el conocer las propiedades de los materiales hace posible establecer parámetros como el factor de seguridad, esfuerzos y deformaciones, los cuales son indispensables al momento de diseñar componentes mecánicos.

A menudo se usan teorías para obtener fórmulas y ecuaciones que predicen el comportamiento mecánico, pero esas expresiones no pueden usarse en el diseño práctico a menos que se conozcan las propiedades físicas de los materiales. Se dispone de tales propiedades solo después de llevar a cabo cuidadosos experimentos en los laboratorios. Es por esto que surge el interés de trabajar en la realización de mediciones mecánicas que permitan caracterizar a los materiales.

El uso de galgas extensiométricas tiene ciertas ventajas como el hecho de que su costo no es alto y presentan una buena respuesta lineal. Esto último es útil al momento de caracterizar la señal de respuesta brindada por las galgas, con lo cual es posible obtener los parámetros deseados, ya sean, fuerzas, esfuerzos y/o deformaciones.

El uso del software para análisis mecánico es útil por el hecho de que en aplicaciones industriales, cuando ya se cuenta con las características del material producto de la investigación, se recurre frecuentemente al uso de estos programas para diseñar elementos y estructuras.

Organización de la tesis

El presente documento de tesis se divide en 6 capítulos, el contenido de los cuales se expone a continuación, indicando a grandes rasgos lo que se trata en cada uno de ellos:

Capítulo 1. En este capítulo se tratan los conceptos teóricos que fundamentan el trabajo de tesis. Se inicia por hablar de los conceptos de mecánica de materiales como lo son: Esfuerzo, deformación unitaria y Módulo de Elasticidad. También se habla de las ecuaciones características de las galgas extensiométricas y por lo tanto el modo de emplearlas e interpretarlas. Se expone la teoría del circuito puente de Wheatstone, el cual permite convertir los cambios de resistencia a cambios de voltaje. Se explica la teoría del amplificador de instrumentación y el filtro paso-bajas que permiten el acondicionamiento de la señal de voltaje, así también se habla del microcontrolador ATmega8 y el programa LabVIEW, los cuales son los recursos principales empleados en la adquisición de la señal en la computadora, de tal manera que el usuario manipule un entorno amigable al realizar mediciones con este sistema.

Capítulo 2. Habla del desarrollo del hardware para el sistema de medición. Se indica qué dispositivos electrónicos se emplearon así como sus principales características técnicas y sus respectivos circuitos de caracterización. Se expone la configuración empleada para el puente de Wheatstone. También se dice qué amplificador de instrumentación se utiliza y la forma de caracterizarlo, así como qué configuración de filtro paso-bajas se emplea. Se explican las respuestas del amplificador de instrumentación y el filtro paso-bajas al emplear distintas ganancias y valores de señal de entrada. Se muestra cómo se realizó la etapa de alimentación del sistema, qué dispositivos se utilizan y los circuitos bajo los que se implementan; de la misma manera, se exponen algunos circuitos complementarios que se utilizan como el seguidor de voltaje y el sumador de voltaje. Finalmente se habla de cómo se implementa el microcontrolador para lograr la comunicación vía serial con la computadora.

Capítulo 3. En este capítulo se explica cómo se lleva a cabo el desarrollo del software para el sistema de medición. Se inicia por exponiendo la metodología a seguir para la elaboración de los programas. Este capítulo puede dividirse en dos partes, pues se explica primero el programa empleado para el microcontrolador ATmega8, el cual se encarga de convertir la señal de voltaje analógica en una señal digital y posteriormente enviar esta señal a la computadora. Después se

explica el desarrollo del programa en LabVIEW, el cual se encarga de interpretar las señales enviadas por el microcontrolador y manipular estos datos de tal manera que el usuario del sistema vea qué nivel de voltaje se está obteniendo de la medición y a su vez que valor de deformación unitaria está sufriendo la probeta de prueba. Los programas se exponen basándose en la metodología de desarrollado empleada, de esta manera se empieza por definir los requerimientos de cada programa y se finaliza con las pruebas aplicadas al programa para comprobar su correcto funcionamiento.

Capítulo 4. En el capítulo 4 se exponen las pruebas que se llevaron a cabo una vez que ya se contaba con todo el sistema de medición. Se muestra cómo se prueba que el puente de Wheatstone en unión con el amplificador de instrumentación funcione, según el modelo matemático. La fuerza de tensión se aplica con la ayuda de una máquina que se encuentra en el Taller Avanzado de Manufactura de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. En esta máquina se colocan las probetas de aluminio 6061 y se le indica la magnitud de la fuerza de tensión a aplicarse así como la velocidad con que se va incrementando la fuerza. Se trata como la temperatura influye de forma notoria en las mediciones. Se muestran las gráficas obtenidas mediante el programa desarrollado en LabVIEW al llevar a cabo la experimentación. Se expone como se llevan a cabo las mediciones paso a paso empleando la máquina de tensión y el sistema de medición elaborado.

Capítulo 5. En este capítulo se expone la teoría básica del método de elementos finitos, se dan a conocer las ecuaciones fundamentales de este método, pues estas ecuaciones se encuentran implementadas en los algoritmos de los programas comerciales que llevan a cabo el análisis por elementos finitos. Posteriormente, utilizando el Módulo de Elasticidad obtenido por experimentación y haciendo uso del software SolidWorks, se obtienen de forma numérica las deformaciones en la probeta al aplicarse una fuerza de tensión igual a la de la experimentación. Se comparan las deformaciones obtenidas numéricamente con las obtenidas experimentalmente para valorar qué tanto coinciden ambos resultados.

Capítulo 6. Aquí se establecen las conclusiones obtenidas a través del desarrollo del trabajo. Estas conclusiones tienen por objeto resaltar los puntos más importantes del trabajo, pues se basan en las observaciones que se realizaron en cada etapa de este. También se exponen los principales problemas que se enfrentaron durante la elaboración de este trabajo, con la finalidad de que se informe en donde se encuentran las mayores dificultades y en caso de que se dese

realizar un trabajo similar se tenga conocimiento de cómo superar estos problemas. Finalmente se proponen algunos trabajos futuros que pueden ayudar a mejorar lo realizado, ya sea complementándolo o al realizar modificaciones que repercuten de manera importante en el comportamiento del sistema de medición presente.

Capítulo 1.

Fundamentos para la Medición de Deformación Usando Galgas Extensiométricas

En este capítulo se expondrán los conceptos básicos de mecánica de materiales que fundamentan el presente trabajo de tesis, se menciona como se realiza generalmente una prueba de tensión y se expone el diagrama resultante de esta prueba. También se explica el uso de los medidores de deformación por resistencia, así como las partes que conforman un sistema de medición utilizando galgas extensiométricas, además se muestran algunos sistemas existentes en el mercado y sus características. Se exponen las ecuaciones que caracterizan a las galgas y permiten realizar mediciones, asimismo se explica qué dispositivos es necesario emplear para el desarrollo de cada componente del acondicionamiento de señales, a la vez que se especifican las características de cada uno de estos dispositivos. Finalmente se explican cuales son los elementos necesarios para implementar el sistema de adquisición de datos y se citan algunas características del software que se utiliza en el desarrollo de la interfaz sistema-usuario.

1.1 Conceptos de mecánica de materiales

La *mecánica de materiales* es una rama de la mecánica aplicada que trata del comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a varios tipos de carga, estudia las fuerzas internas y las deformaciones que se producen en el cuerpo sometido a dichas cargas. Para la mecánica de materiales lo esencial son las propiedades de los cuerpos deformables y tiene como finalidad elaborar métodos simples de cálculo, aceptables desde el punto de vista práctico [5,6].

Al aplicar una fuerza P en una barra prismática a través de su eje axial, esta se distribuye uniformemente sobre la sección transversal A , como se muestra en la figura 1.1. La intensidad de la fuerza o fuerza por unidad de área se llama *esfuerzo* y se denota con la letra griega σ (sigma) [5,6].

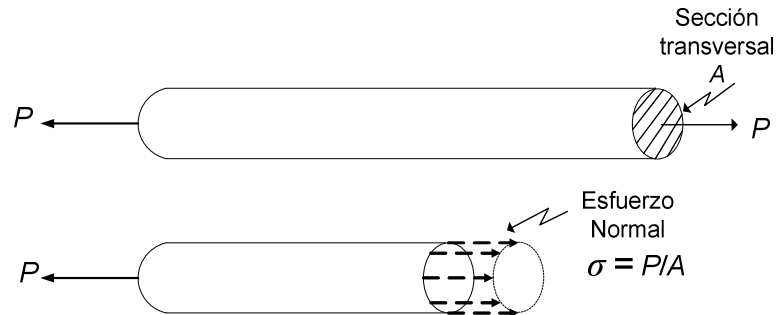


Figura. 1.1. Barra bajo carga axial

El esfuerzo se obtiene al dividir la magnitud P de la carga entre el área A y se representa matemáticamente como:

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

Cuando la barra es estirada por la fuerza P el esfuerzo se llama *esfuerzos de tensión*; si las fuerzas son invertidas en sentido, ocasionando que la barra quede comprimida, obtenemos *esfuerzos de compresión*. Al establecer una convención de signos para los esfuerzos normales, es costumbre definir los esfuerzos de tensión como positivos y los esfuerzos de compresión como negativos.

Por otra parte, esta fuerza axial causa una deformación longitudinal como se muestra en la figura 1.2. El *alargamiento* ó *deformación* δ es el resultado acumulativo del alargamiento de todos los elementos del material en todo el volumen de la barra. Suponiendo que el material es el mismo en toda la barra, si se considera la mitad de la barra (longitud $L/2$), esta sufrirá un alargamiento de $\delta/2$, y si se considera una cuarta parte de la barra (longitud $L/4$), esta presentará un alargamiento de $\delta/4$. De modo similar, una longitud unitaria de barra tendrá un alargamiento de $1/L$ veces el alargamiento total δ . Haciendo uso de este razonamiento se llega al concepto de

alargamiento por unidad de longitud, o *deformación unitaria*, la cual se representa con ε (épsilon) [5,6].

La deformación unitaria de una barra de longitud L se expresa como:

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

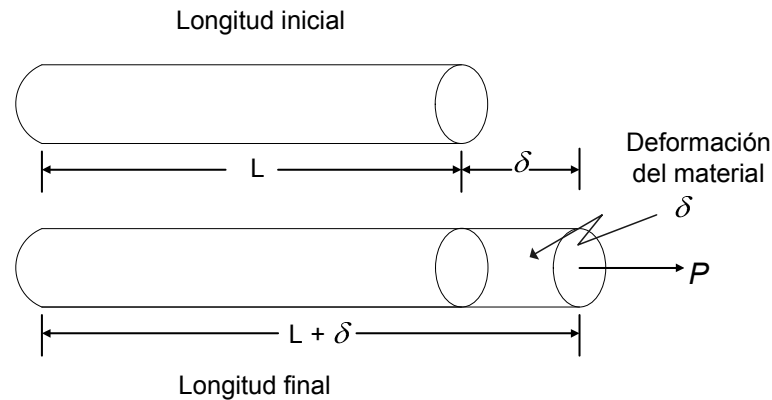


Figura 1.2. Deformación en una barra sometida a tensión

Como puede verse, la deformación unitaria ε es adimensional. Si la barra está en tensión, la deformación unitaria se llama deformación unitaria a tensión y representa un alargamiento. Si la barra está en compresión, se trata de una deformación unitaria a compresión y la barra se acorta. Generalmente, la deformación unitaria a tensión se considera positiva y la deformación unitaria a compresión, negativa. Al estar asociada con los esfuerzos normales, la deformación unitaria ε es llamada *deformación unitaria normal*.

Para determinar el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a cargas es necesario realizar experimentos de laboratorio. Entre las pruebas más importantes están las *pruebas de tensión o compresión*. Estas pruebas se utilizan principalmente para determinar la relación entre el esfuerzo normal promedio σ y la deformación normal unitaria ε en los materiales utilizados en ingeniería. Para llevar a cabo estas pruebas se prepara un espécimen o probeta de forma y tamaño estándar como se muestra en la figura 1.3. Una de las principales organizaciones normativas es la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (Sociedad Americana de

Pruebas y Materiales), sociedad técnica que publica especificaciones y normas para materiales y pruebas.

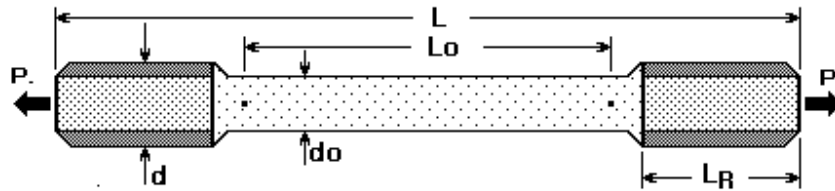


Figura 1.3. Probeta para pruebas de tensión.

Antes de la prueba, se imprimen con un punzón a la probeta dos marcas pequeñas a lo largo de ésta y se mide la longitud inicial L_0 . Estas marcas se colocan lejos de los extremos del espécimen, porque la distribución del esfuerzo en los extremos no es uniforme y un tanto compleja debido al agarre de las conexiones. Cuando se aplica una carga se toman mediciones tanto del área de la sección transversal como de la distancia de la longitud calibrada entre las marcas del punzón. La probeta de tensión estándar de la ASTM tienen un diámetro d_0 de 0.505 in y una longitud calibrada L_0 de 2.0 in. Luego se sujeta el espécimen en la máquina de pruebas como la que se muestra en la figura 1.4.



Figura 1.4. Máquina para pruebas a tensión

Durante la prueba y a intervalos frecuentes se registra la carga aplicada P . También se mide el alargamiento δ entre las marcas que se hicieron en el espécimen, usando ya sea una galga o un dispositivo óptico o mecánico llamado extensómetro. Es posible leer la deformación unitaria directamente usando una **galga extensiométrica de resistencia eléctrica** como la que se muestra en la figura 1.5, la cual debe estar cementada o pegada al espécimen en una dirección específica. Este sensor de deformación tiene buena resolución espacial, lo cual le permite medir la deformación en un punto, tiene amplio rango de operación respecto a condiciones ambientales como la temperatura y posee alta respuesta a la frecuencia para mediciones de deformación dinámicas; no obstante es necesario implementar un buen sistema para el tratamiento de la señal proporcionada por la galga, pues esta señal es muy pequeña y puede perturbarse fácilmente.

En una prueba estática, la carga se aplica despacio y la velocidad precisa de carga no es de interés porque no afecta el comportamiento de la probeta. En cambio, en una prueba dinámica la carga se aplica rápidamente y a veces de manera cíclica, en este caso la velocidad de carga si debe medirse, cuando se aplica carga de manera cíclica, las mediciones pueden realizarse a frecuencias de 40 Hz a 10 KN y de 10 Hz a 10 KN. Tanto en las pruebas estáticas como dinámicas, las deformaciones se pueden medir con distintos sensores. En el presente trabajo se realizará una prueba estática utilizando galgas extensiométricas, pues la calidad de los resultados obtenidos en la literatura arrojan mediciones confiables [7].

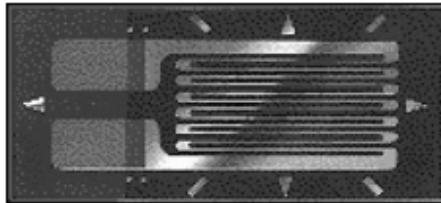


Figura 1.5. Galga extensiométrica

Las pruebas de compresión de metales suelen efectuarse sobre pequeñas probetas en forma de cubos o cilindros circulares. Es posible medir tanto la carga aplicada por la máquina como el acortamiento de la probeta. El acortamiento debe medirse sobre una longitud calibrada que sea menor que la longitud total de la probeta para eliminar los efectos de sus bordes.

Después de efectuar una prueba de tensión o compresión y determinar el esfuerzo σ así como la deformación unitaria ε para diferentes magnitudes de carga P , es posible trazar un diagrama de esfuerzo contra deformación ε , como el que se muestra en la figura 1.6.

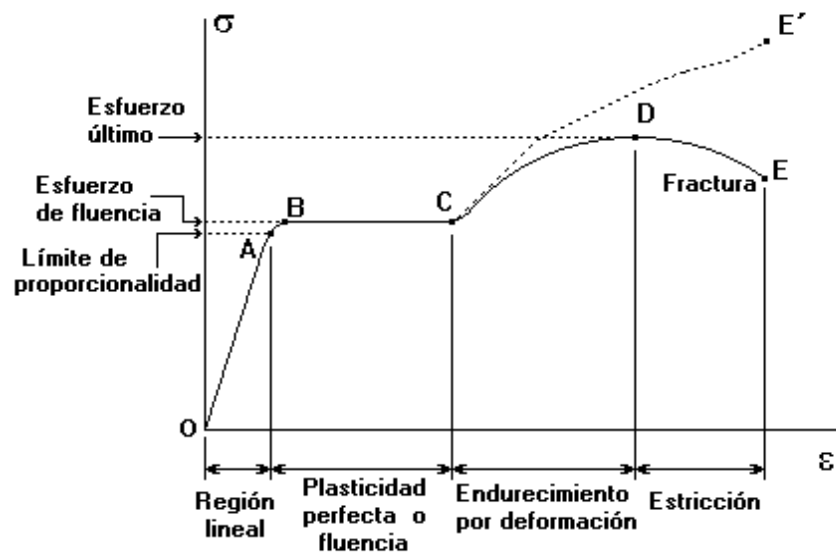


Figura 1.6. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria

Este **diagrama esfuerzo-deformación unitaria** es una característica del material particular que se está probando y contiene información importante sobre las propiedades mecánicas y tipo de material [5,6]. Este diagrama es muy importante en la ingeniería ya que proporciona los medios para obtener datos sobre la resistencia a tensión o compresión de un material sin considerar el tamaño o forma geométrica del mismo.

El esfuerzo axial σ en una probeta de prueba se calcula dividiendo la carga axial P entre el área A_0 de la sección transversal. Cuando se usa el área inicial de la probeta en los cálculos, el esfuerzo se llama *esfuerzo nominal*. Un valor más exacto del esfuerzo axial es el *esfuerzo verdadero* y este se calcula usando el área real de la barra en la sección transversal en que ocurre la falla. Para pruebas de tensión el área real es menor a la inicial, por lo tanto el esfuerzo verdadero es mayor que el esfuerzo nominal. La deformación unitaria axial promedio ε se encuentra dividiendo el alargamiento medido δ entre las marcas de calibración, entre la longitud calibrada L_0 . Si se usa la longitud calibrada inicial, se obtiene la deformación unitaria nominal. Puesto que en pruebas de tensión la distancia entre las marcas de calibración crece conforme se aplica la carga, es posible calcular la *deformación unitaria verdadera* usando la distancia real

entre las marcas de calibración. A continuación se explica el diagrama esfuerzo σ deformación unitaria ε que se muestra en la figura 1.6.

El diagrama comienza con una línea recta que va del origen O al punto A, lo que significa que la relación entre el esfuerzo y la deformación en esta región es lineal y proporcional. Al comportamiento del material en esta región se le conoce como *comportamiento elástico*. El límite superior del esfuerzo en esta relación lineal se llama *límite de proporcionalidad*. Si el esfuerzo excede un poco el límite de proporcionalidad, el material puede todavía responder elásticamente; sin embargo, la curva tiende a aplanarse causando un incremento mayor de la deformación unitaria con el correspondiente incremento del esfuerzo. Esto continúa hasta que el esfuerzo llega al *límite elástico*. No obstante, en el acero rara vez se determina el límite elástico, puesto que se encuentra muy cerca del límite de proporcionalidad y su detección es muy difícil. A la pendiente de la línea recta de O a A se llama *módulo de elasticidad E* del material [5,6].

Con un incremento en el esfuerzo, la curva esfuerzo-deformación tiene una pendiente cada vez menor, hasta que en el punto B se vuelve horizontal. Después de este punto ocurre un alargamiento de la probeta sin un incremento perceptible en la fuerza de tensión (de B a C). Este fenómeno se conoce como *fluencia* del material y el punto B se llama *punto de fluencia*. El esfuerzo correspondiente es el *esfuerzo de fluencia*. En la región de B a C, el material se vuelve *perfectamente plástico*, lo que significa que se deforma sin un incremento de la carga aplicada.

Cuando la fluencia ha terminado, puede aplicarse más carga a la probeta, resultando una curva que se eleva continuamente pero se va aplanando hasta llegar a un esfuerzo máximo, llamado *esfuerzo último* (punto D). La elevación de la curva de esta manera se llama *endurecimiento por deformación* (de C a D).

En el *esfuerzo último*, el área de la sección transversal comienza a disminuir en una zona de la probeta. Como resultado, tiende a desarrollarse un “cuello” en esta zona a medida que el espécimen se alarga más. Puesto que el área de la sección transversal decrece, esta área más pequeña puede soportar solo una carga siempre decreciente; sin embargo esta carga se divide entre el área inicial, es por esto que el diagrama se curva hacia abajo hasta que la probeta se rompe en el punto de *esfuerzo de fractura* (punto E), a esta zona del diagrama (de D a E) se le conoce como *formación del cuello o estricción*.

Si en vez de utilizar el esfuerzo y deformación nominales se utilizan el esfuerzo y deformación verdaderos se obtiene un *diagrama real esfuerzo-deformación unitaria*. El diagrama real coincide con el nominal cuando la deformación unitaria es pequeña, las diferencias comienzan a aparecer en la zona de endurecimiento por deformación, especialmente en la zona de estricción. Según el diagrama real, el área dentro de la región de formación del cuello esta siempre decreciendo hasta que ocurre la falla, y por lo tanto el material soporta realmente un esfuerzo creciente (línea punteada hasta E'). A pesar de que el diagrama real es distinto del convencional esto no provoca ningún problema, ya que en el diseño mecánico solo interesa la región elástica.

Cuando un material se comporta elásticamente y exhibe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria, se dice que es **elástico lineal**. Este tipo de comportamiento es de gran importancia debido a que mediante el diseño de estructuras y máquinas que funcionen en esa región se evita deformaciones permanentes debido al flujo plástico. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a tensión o compresión simple se expresa por la ecuación [5,6]:

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

Esta relación se conoce como *ley de Hooke*. El módulo de elasticidad tiene valores grandes para materiales muy rígidos, como los metales estructurales. El acero, por ejemplo, tiene un módulo de unos 210 GPa. Los materiales más flexibles tienen un módulo menor, los valores de los plásticos varían entre 0.7 y 14 GPa.

1.2 Sistemas comerciales de medición con galgas extensiométricas

Realizar mediciones utilizando galgas extensiométricas implica todo un proceso, pues después de someter a cargas de tensión la probeta de prueba, es necesario acondicionar la señal obtenida de la galga, digitalizar esta señal y finalmente enviarla a la PC por medio de un sistema de comunicación; este proceso se ilustra de manera general en la figura 1.7, donde se muestran los bloques que lo integran, los cuales son: La galga extensiométrica montada en la probeta, el

puente de Wheatstone, el acondicionamiento de la señal, la digitalización de la señal y la comunicación con la PC. En las siguientes secciones se explicará cada etapa.

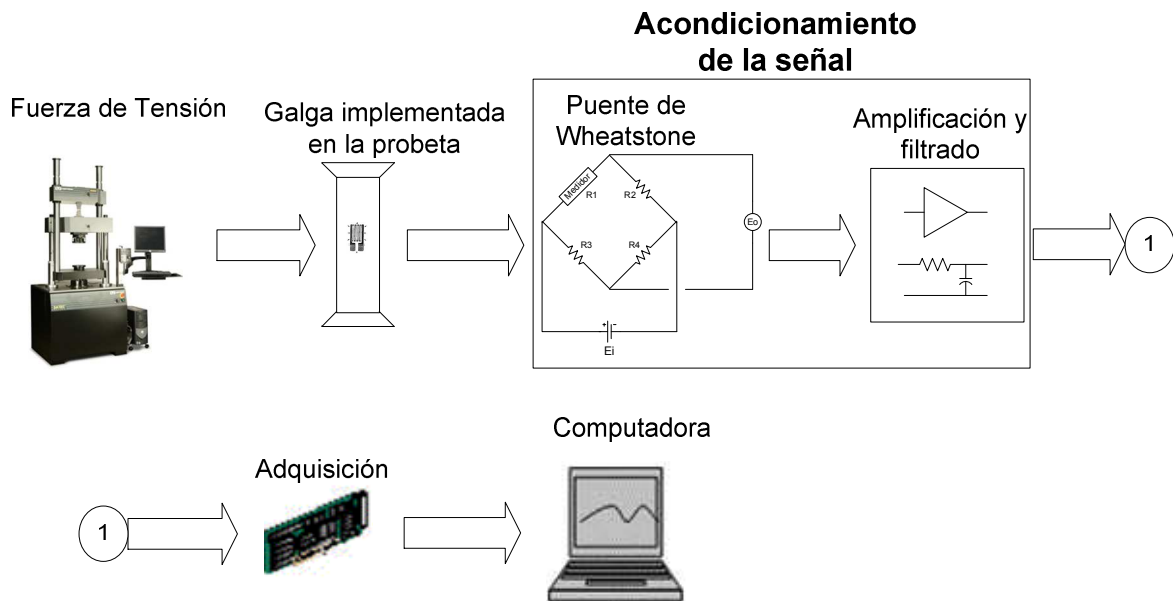


Figura 1.7. Diagrama a bloques de los elementos a utilizar

Para el acondicionamiento de la señal proporcionada por una galga extensiométrica existen módulos de acondicionamiento comerciales como los que se exponen en la tabla 1.1 y se muestran en la figura 1.8:

Tabla 1.1. Módulos comerciales para el acondicionamiento de señales de galgas extensiométricas

Módulo	Fabricante	Características	Costo
USB-9237	<i>National Instruments</i>	4 Canales de entrada Terminación programable de medio puente o puente completo Excitación integrada de hasta 10 V para los sensores integrados	\$21,080.00
SCC-SG03	<i>National Instruments</i>	2 Canales de entrada Posee internamente medio puente con resistencias de 350 Ω Cuenta con una referencia de voltaje de 2.5 V *Es necesario contar con el bloque conector SC-2345 para enlazarlo a la tarjeta de adquisición de datos	\$10,740.00

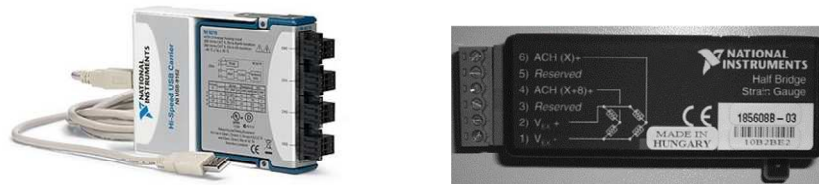


Figura 1.8. Módulos de acondicionamiento para mediciones con galgas extensiométricas

En este trabajo de tesis se construirá la etapa de acondicionamiento de la señal (Puente de Wheatstone, Amplificador y Filtro), debido a que se desea demostrar que es posible implementar un sistema para la medición de deformación sin tener la necesidad de comprar un módulo de acondicionamiento comercial, pues como se observa en la tabla 1.1 estos módulos son costosos.

1.3 Galga extensiométrica

Las galgas extensiométricas como la que se muestra en la figura 1.5, son sensores del tipo *medidores de deformación por resistencia*. Este principio se basa en el hecho de que los materiales metálicos y semiconductores experimentan un cambio en su resistencia eléctrica cuando sufren una deformación. Con la finalidad de ilustrar lo anterior se define un material conductor con área de sección transversal A , una longitud L y resistividad ρ . Para este conductor eléctrico, la resistencia R está dada por [8]:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.4)$$

Si el conductor es sometido a un esfuerzo normal, el área de la sección transversal y la longitud cambiarán, resultando en un cambio en la resistencia eléctrica R . Para la medición de deformación con resolución significativa no es práctico un solo conductor recto, por lo que se distribuye el material conductor de manera que varias longitudes de alambre se orienten a lo largo del eje del medidor de deformación como se muestra en la figura 1.5.

Este medidor de deformación consta de un patrón de hoja metálica, este patrón a su vez se monta sobre un material de soporte de plástico. El soporte tiene diversas funciones importantes, aísla eléctricamente al medidor metálico del espécimen de prueba y transmite la deformación aplicada al sensor. El cambio en la resistencia de un medidor de deformación por lo general se expresa en términos de un parámetro proporcionado por el fabricante llamado **factor de galga**, el cual se define como [8]:

$$GF = \frac{\delta R / R}{\delta L / L} = \frac{\delta R / R}{\epsilon} \quad (1.5)$$

Para detectar los cambios de resistencia que produce la galga es necesario emplear un circuito *punte de Wheatstone*, el puente de Wheatstone posee una alta sensibilidad, lo cual es importante ya que en una instalación típica para medir la deformación del acero una galga tiene, por ejemplo, una sensibilidad de $10^{-6} \Omega / (\text{kN m}^2)$. En la figura 1.9 se puede observar un circuito puente de Wheatstone con medidor de deformación:

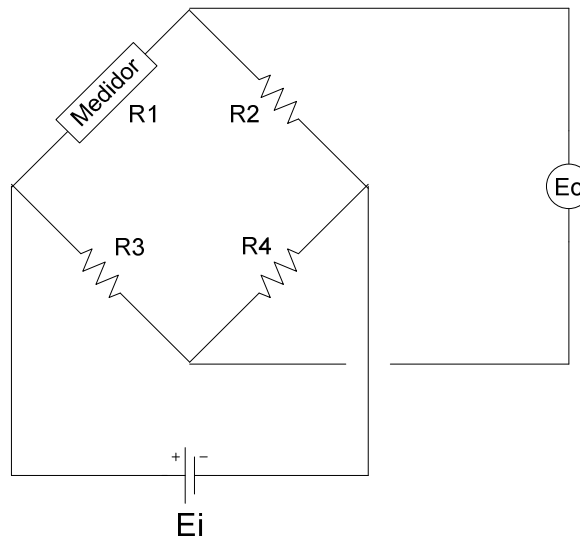


Figura 1.9. Circuito puente de Wheatstone

La salida del puente en estas condiciones está dada por [8]:

$$E_0 + \delta E_0 = E_i \frac{(R_1 + \delta R)R_4 - R_3R_2}{(R_1 + \delta R + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1.6)$$

Considerando el caso donde los resistores fijos R_2 , R_3 , y R_4 y la resistencia del medidor de deformación son inicialmente iguales y el puente está balanceado tal que $E_0=0$ [9]. Si el medidor de deformación se somete a un estado de deformación, el cambio en el voltaje de salida δE_0 , se reduce a:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{\delta R / R}{4 + 2(\delta R / R)} \approx \frac{\delta R / R}{4} \quad (1.7)$$

Esto bajo la suposición de que $\delta R/R \ll 1$. Más aún, usando la ecuación (1.5) es posible obtener [8]:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{GF\varepsilon}{4 + 2GF\varepsilon} \approx \frac{GF\varepsilon}{4} \quad (1.8)$$

El puente de Wheatstone tiene ciertas ventajas como el hecho de que puede balancearse cambiando la resistencia de un brazo, por lo tanto, una vez que el medidor se monta en el lugar del espécimen de prueba en condición de cero carga, la salida del puente puede ajustarse a cero. Además, la salida de un circuito puente puede incrementarse mediante el uso adecuado de más de un medidor de deformación activo, también los múltiples medidores pueden utilizarse para compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura o deformaciones específicas. Si las cuatro resistencias en el circuito puente representan medidores de deformación activos, la salida del puente será [8]:

$$E_0 = E_i \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (1.9)$$

Se supone que inicialmente los medidores $R_{1...4}$ están en estado de cero deformación, si estos medidores se someten a deformaciones de manera que las resistencias cambian a dR_i , para $i=1, 2, 3$ y 4 , se obtiene el cambio del voltaje de salida:

$$dE_0 = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial E_0}{\partial R_i} dR_i \quad (1.10)$$

Evaluando las derivadas parciales de la ecuación (1.9):

$$dE_0 = E_i \left[\frac{R_2 dR_1 - R_1 dR_2}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{R_3 dR_4 - R_4 dR_3}{(R_3 + R_4)^2} \right] \quad (1.11)$$

Ahora tomando en cuenta las ecuaciones (1.2) y (1.5):

$$dR_i = \delta R_i = R_i \varepsilon_i GF_i \quad (1.12)$$

Entonces puede determinarse el valor de dE_0 . Suponiendo que $dR_i \ll R_i$, el cambio resultante en el voltaje de salida δE_0 puede expresarse como:

$$\delta E_0 = E_i \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (\varepsilon_1 GF_1 - \varepsilon_2 GF_2) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} (\varepsilon_4 GF_4 - \varepsilon_3 GF_3) \right] \quad (1.13)$$

Si $R_1=R_2=R_3=R_4$, entonces:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{1}{4} (\varepsilon_1 GF_1 - \varepsilon_2 GF_2 + \varepsilon_4 GF_4 - \varepsilon_3 GF_3) \quad (1.14)$$

Si ahora se supone que los medidores son iguales en cuanto a su factor de galga, esto es $GF_1=GF_2=GF_3=GF_4$, se tiene [8]:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{GF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \quad (1.15)$$

La ecuación (1.15) es la ecuación de trabajo fundamental para un circuito puente con medidor de deformación que utiliza múltiples medidores. Se observa que las deformaciones en los brazos opuestos del puente se suman mientras que las deformaciones en sus lados adyacentes se cancelan.

Para decidir la configuración del circuito puente de Wheatstone a utilizar, se deben de tomar en cuenta aspectos como la alta sensibilidad que debe de tener, pues tiene que identificar los

pequeños cambios en la resistencia eléctrica de la galga, provocados por la deformación sufrida al aplicarle una fuerza de tensión. Es posible tener una referencia de la magnitud de los cambios de voltaje provocados por estos cambios de resistencia eléctrica, deduciendo de la ecuación (1.7) la fórmula que caracteriza a la salida de un circuito puente de Wheatstone:

$$\delta E_0 = E_i \frac{\delta R}{4R} \quad (1.16)$$

Por ejemplo: $\delta R = 0.001 \Omega$, $E_i = 5 \text{ V}$ y $R = 350 \Omega$. Se tendrá un $\delta E_0 = 3.57 \mu\text{V}$. Entonces será necesario amplificar esta señal alrededor de 1000 veces para obtener un $\delta E_0 = 3.57 \text{ mV}$ por cada miliohm ($\text{m}\Omega$) en el cambio de resistencia eléctrica de la galga extensiométrica.

Las galgas pueden clasificarse de acuerdo a factores como: Rango de operación de temperatura, material de que están hechas o el pegamento utilizado para implementarlas. Por ejemplo, la galga EA-13-125AC-350 utilizada en este trabajo, está hecha de aleación Constantan, combinada con una base polyimide, su rango de temperatura para uso continuo en mediciones estáticas es de $-75 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+175 \text{ }^\circ\text{C}$, su factor de galga es de 2.115 y tiene una resistencia de 350Ω .

1.4 Acondicionamiento de señales analógicas

La mayoría de sensores y transductores generan señales que es necesario acondicionar antes de que un sistema de adquisición de datos pueda adquirir con precisión la señal. Este procesamiento, conocido como acondicionamiento de señal incluye funciones como amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y multiplexado. Para el sistema que se desea implementar en este trabajo es necesario llevar a cabo un procesamiento como el mostrado en la figura 1.10:

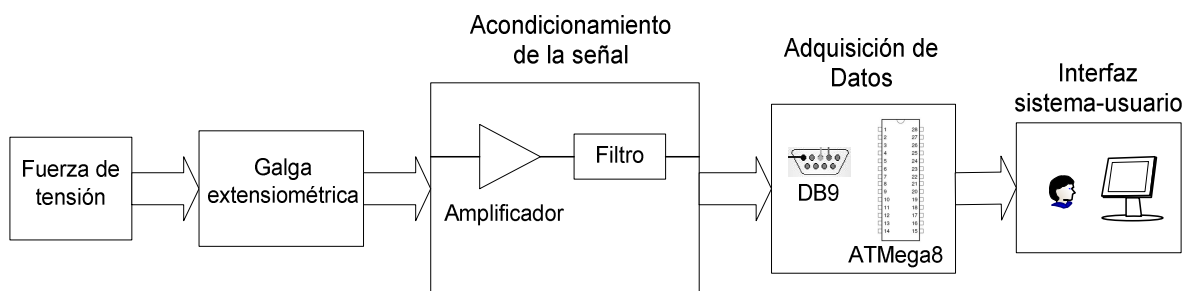


Figura 1.10. Sistema para tratamiento de la señal

1.4.1 Amplificación de la señal

La forma más común de acondicionamiento de señal en circuitos puente de medidores de deformación es amplificar la señal, debido a que la señal arrojada por la galga suele ser muy pequeña. El amplificador es un dispositivo que escala la magnitud de una señal de entrada analógica, el amplificador más simple es el amplificador lineal de escalamiento en el cual:

$$E_0(t) = GE_i(t) \quad (1.17)$$

Donde la ganancia G es una constante que puede ser cualquier valor positivo o negativo. El tipo de amplificador utilizado frecuentemente para el acondicionamiento de señales es el amplificador diferencial de instrumentación [10] como el mostrado en la figura 1.11, este amplificador tiene la ventaja de permitir controlar su ganancia al variar solamente una resistencia (aR). La salida de este amplificador está dada por la ecuación (1.18). Donde E_1 es la Entrada (+) y E_2 es la Entrada (-) según la figura 1.11.

$$V_0 = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(E_1 - E_2) \quad (1.18)$$

Si el puente está balanceado, las dos terminales de salida del puente están al mismo potencial; por lo tanto no hay diferencia de potencial de salida. Esta señal común a las dos entradas se conoce como *voltaje en modo común*, V_{MC} . Para que el amplificador sólo amplifique la diferencia entre las dos señales, se supone que los dos canales de entrada están acoplados con perfección y que la alta ganancia del amplificador operacional es la misma en ambos. En la práctica, esto no se logra de manera perfecta, por lo que la salida no es del todo proporcional a la diferencia entre los dos voltajes de entrada. Por lo tanto, la salida es:

$$V_O = G_d \Delta V + G_{MC} V_{MC} \quad (1.19)$$

Donde G_d es la ganancia de la diferencia en voltaje ΔV , G_{MC} la ganancia del voltaje en modo común, V_{MC} . Cuanto menor sea el valor de G_{MC} menor será el efecto del voltaje en modo común de la salida. El grado de desviación de un amplificador operacional respecto de una situación ideal se define mediante la *relación de rechazo de modo común* (RRMC).

$$RRMC = \frac{G_d}{G_{MC}} \quad (1.20)$$

Para reducir al mínimo el efecto del voltaje en modo común a la salida es necesario utilizar una RRMC grande. El valor de las relaciones de rechazo en modo común en general se especifica en decibeles (dB). Por lo tanto, en una escala de decibeles una RRMC, digamos de 10 000 sería igual a $20 \log 10\,000 = 80$ dB. Un amplificador operacional típico tiene una RRMC de entre 80 y 100 dB. Un amplificador diferencial de instrumentación regularmente tiene una RRMC muy buena, de más de 100 dB.

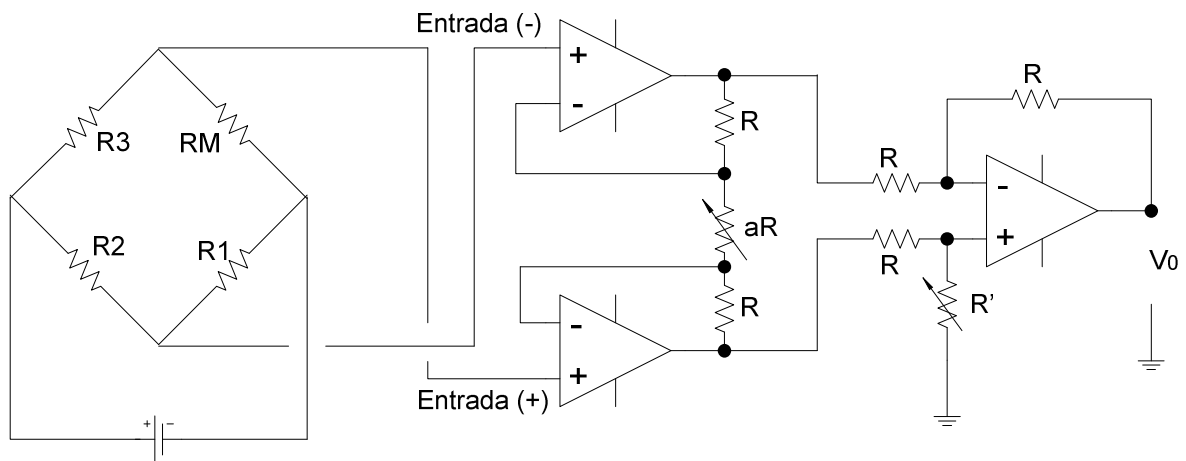


Figura 1.11. Amplificador Diferencial

Un factor importante a considerar es el voltaje de offset, las especificaciones para el voltaje de offset son consideradas con frecuencia una señal de calidad en los amplificadores de instrumentación. Mientras el offset inicial puede ser ajustado a cero, los cambios en el voltaje de offset debidos a las variaciones de temperatura pueden causar errores.

El voltaje de offset tiene dos componentes: de entrada y de salida. El voltaje de offset de entrada se define como el voltaje que es necesario aplicar entre las dos terminales de entrada del amplificador para obtener un voltaje de cero en la salida. El offset de entrada es directamente proporcional a la ganancia, por ejemplo, el offset de entrada que se mide para una ganancia de 100 es 100 veces más grande que para una ganancia de 1. El voltaje de offset de salida es el voltaje medido en la salida cuando se aplica un voltaje de 0 en las terminales de entrada. El

voltaje de offset de salida es independiente de la ganancia. Para ganancias bajas, el offset de salida es dominante, mientras que para ganancias altas el offset de entrada domina.

Para realizar este trabajo se buscan varios amplificadores de instrumentación existentes en el mercado; sin embargo, es necesario tomar en cuenta el hecho de que la diferencia de voltajes a medir es muy pequeña, por lo cual deberá tener un voltaje de offset pequeño así como un valor de RRMC alto. Tomando en cuenta estos aspectos se decide emplear el amplificador de instrumentación AD624, cuyo diagrama interno se muestra en la figura 1.12. Este amplificador es de alta precisión y bajo ruido ($0.2 \mu\text{V}$ p-p de 0.1 Hz a 10 Hz), es utilizado para diversos sensores, incluyendo celdas de carga, galgas extensiométricas y transductores de presión. Su voltaje de offset de entrada es de $25 \mu\text{V}$ máximo y su valor de CMRR es de 130 dB mínimo para un valor de ganancia desde 500 hasta 1000.

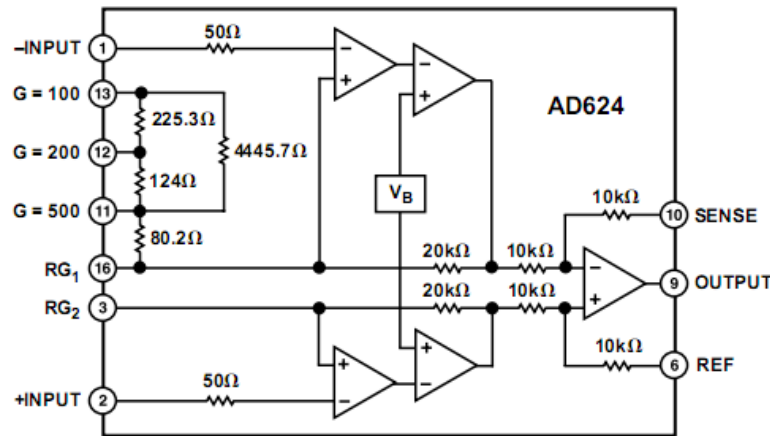


Figura 1.12. Amplificador diferencial de instrumentación AD624

El amplificador de instrumentación AD624 contiene resistencias internas por lo cual solo es necesario hacer la conexión de ciertos pines para obtener un valor de ganancia estándar. Por ejemplo, para obtener una ganancia de 100 se conecta el pin 3 con el pin 13 y para obtener una ganancia de 1000 se conectan el pin 11 con el pin 3 y el pin 13, así como el pin 12 con el pin 16. También es posible alcanzar otros valores de ganancias al colocar una resistencia externa entre los pines 3 y 16, esta resistencia, R_G se relaciona con la ganancia por medio de la siguiente fórmula:

$$G = \frac{40k}{R_G} + 1 \quad (1.21)$$

De esta manera, se tiene que la ecuación característica del amplificador diferencial de instrumentación AD624, que relaciona la salida V_o de la figura 1.11 con los voltajes E_1 y E_2 obtenidos del circuito puente de Wheatstone es:

$$V_o = G(E_1 - E_2) \quad (1.22)$$

Donde G puede ser definida mediante un arreglo en las conexiones de pines o por medio de una resistencia externa como ya se dijo anteriormente.

El fabricante proporciona una ecuación para calcular el voltaje de offset que se presentará en este amplificador de instrumentación:

$$V_{offset} = 250 \mu V + G(-50 \mu V) \quad (1.23)$$

Donde los $250 \mu V$ corresponden al voltaje de offset de salida y los $50 \mu V$ pertenecen al voltaje de offset de entrada, el cual es proporcional a la ganancia G . Ahora se desarrolla por completo el modelo matemático para el sistema de la figura 1.11.

Basándose en la ley de ohm se tiene:

$$E_1 = I_1 R_M = \frac{E_i R_M}{R_3 + R_M} \quad (1.24)$$

$$E_2 = I_2 R_1 = \frac{E_i R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.25)$$

Donde E_1 y E_2 son los voltajes que entran al amplificador de instrumentación, E_i es el voltaje de alimentación del puente de Wheatstone, I_1 la corriente que circula a través de R_3 y la galga que mide la deformación, I_2 la corriente que circula a través de R_1 y R_2 , y R_M es la resistencia de la galga que mide la deformación. Desarrollando la ecuación (1.24) al utilizar la variación de resistencia en el medidor de deformación:

$$R_M = R + \Delta R \quad (1.26)$$

$$E_1 = \frac{E_i (R + \Delta R)}{R_3 + (R + \Delta R)} \quad (1.27)$$

Ahora se obtiene la diferencia de voltajes:

$$E_1 - E_2 = \frac{E_i (R + \Delta R)}{R_3 + R + \Delta R} - \frac{E_i R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.28)$$

Desarrollando la ecuación (1.28) se obtiene:

$$E_1 - E_2 = \frac{E_i [R_2 (R + \Delta R) - R_1 R_3]}{(R_3 + R + \Delta R) (R_1 + R_2)} \quad (1.29)$$

Por lo que la salida queda definida como:

$$V_o = G \left(\frac{E_i [R_2 (R + \Delta R) - R_1 R_3]}{(R_3 + R + \Delta R) (R_1 + R_2)} \right) + V_{offset} \quad (1.30)$$

1.4.2 Filtrado de la señal

El filtro elimina información de frecuencia indeseable de una señal dinámica. El rango de frecuencias que pasa un filtro se conoce como banda de paso, y el que no pasa como banda de supresión; la frontera entre lo que se suprime y lo que pasa se conoce como frecuencia de corte. Esto es útil para obtener una señal lo más libre posible de perturbaciones. Los filtros se clasifican como paso-bajas, paso-altas, paso-banda y de muesca [8], de acuerdo con los rangos de frecuencia que transmiten o rechazan. En todos los casos, la frecuencia de corte se define como aquella para la cual el voltaje de salida es 70.7 % del de la banda de paso.

El término atenuación se aplica a la relación entre las potencias de entrada y de salida, expresada como la relación del logaritmo de la relación, por lo que la atenuación se expresa en unidades de belios. Debido a que esta es una unidad bastante grande, se utilizan los decibeles (dB), de ahí que la atenuación es expresada en $\text{dB} = 10 \log (\text{potencia de entrada}/\text{potencia de salida})$. Puesto que la potencia en una impedancia es igual al cuadrado del voltaje, la atenuación

en $\text{dB} = 20 \log (\text{voltaje de entrada/voltaje de salida})$. El voltaje de salida correspondiente al 70.7 % del de la banda paso-bajas corresponde a una atenuación de 3 dB.

El filtro que se utilizará en este trabajo es el filtro paso-bajas, este filtro permite que las frecuencias pasen por debajo de una frecuencia de corte prescrita, mientras bloquea el paso de la información de frecuencias por arriba de la frecuencia de corte, f_c [11, 12]. Estas características son deseables debido a que el ruido de la señal proveniente de la galga es de altas frecuencias, mientras que la verdadera señal es de CD, por lo que se debe definir una frecuencia de corte baja, aproximadamente de 100 Hz.

Otro punto a considerar es que la ganancia en lazo cerrado del amplificador debe ser lo más próxima a 1. Basándose en las consideraciones anteriormente citadas se decide emplear un filtro Butterworth paso-bajas de segundo orden, ya que este filtro cubre dichos requerimientos de forma eficiente [10], este filtro presenta una ganancia prácticamente unitaria además de atenuar adecuadamente la salida, pues después de la frecuencia de corte la magnitud de las señales decrece rápidamente. El circuito para este filtro se muestra en la figura 1.13. El amplificador operacional se conecta para una ganancia unitaria en CD.

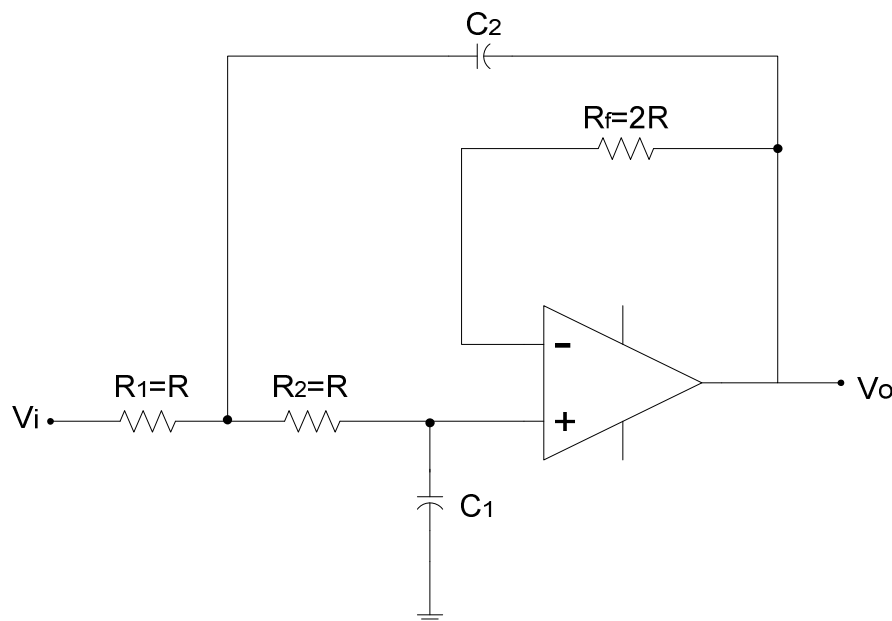


Figura 1.13. Filtro paso-bajas Butterworth de segundo orden

En la figura 1.14 se observa la gráfica de la respuesta en frecuencia de este filtro, se aprecia que para frecuencias con valor en la frecuencia de corte, la magnitud de la salida es 0.707 veces

el valor de la señal para frecuencias por debajo de la frecuencia de corte. Posteriormente la salida decrece con una pendiente de -40 dB por década; esto es, después de la frecuencia de corte, la magnitud de la señal decrece 40 dB cuando ω aumenta a $10 \omega_c$.

El procedimiento para diseñar este filtro paso-bajas se describe a continuación:

- 1.- Se selecciona la frecuencia de corte ω_c ($2\pi f_c$).
- 2.- Se escoge C_1 , debe ser un valor entre 100 pF y 0.1 μ F.
- 3.- Se hace $C_2 = 2C_1$.
- 4.- Calcule: $R = \frac{0.707}{\omega_c C_1}$
- 5.- Seleccione $R_f = 2R$.

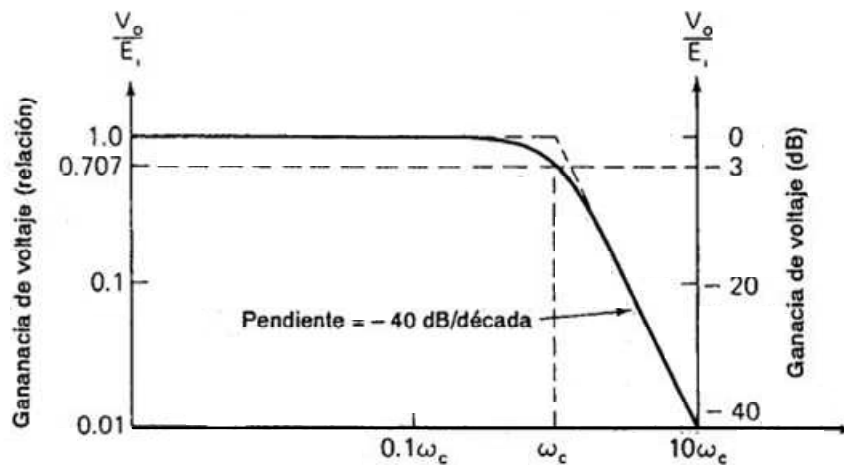


Figura 1.14. Respuesta en frecuencia del filtro paso bajas Butterworth de segundo orden

Basándose en los pasos descritos anteriormente para el diseño de un filtro paso-bajas Butterworth de segundo orden, se seleccionó una frecuencia de corte de 10 Hz y un valor $C_1 = 0.1 \mu$ F, por lo cual se obtuvo un $C_2 = 0.2 \mu$ F. Al calcular R se obtuvo:

$$R = \frac{0.707}{(6.28)(10)(0.1 \times 10^{-6})} = 112579.61$$

Se eligió el valor comercial más cercano quedando una $R = 120 \text{ K}\Omega$, posteriormente se obtuvo una $R_f = 240 \text{ K}\Omega$, buscando nuevamente un valor comercial se utilizó una $R_f = 220 \text{ K}\Omega$. En el caso de C_2 se colocaron 2 capacitores de $0.1 \mu\text{F}$ en paralelo para obtener los $0.2 \mu\text{F}$ requeridos.

Los circuitos de filtro pueden ser activos o pasivos. Los circuitos de filtro pasivos contienen sólo resistores, inductores y capacitores. Los filtros activos, emplean transistores o amplificadores operacionales más resistores, inductores y capacitores. Los inductores no se utilizan a menudo en los filtros activos, debido a que son voluminosos, costosos y pueden tener componentes resistivos grandes.

1.4.3 Adquisición de la señal

Una vez que se ha acondicionado la señal producida por la galga extensiométrica es necesario convertirla en una señal digital y enviarla a la computadora donde será procesada, para esto es preciso utilizar un sistema de adquisición de datos. Un sistema de adquisición de datos es la parte de un sistema de medición que cuantifica y almacena datos. Los sistemas de adquisición de datos basados en computadoras son sistemas híbridos que combinan un paquete de adquisición de datos con el microprocesador y la capacidad de interacción de la PC con el ser humano. Comúnmente se utiliza una computadora porque ofrece todos los componentes necesarios para una medición efectiva, colección de datos, lógica de programa y control de retroalimentación.

Lo primero a realizar es convertir la señal acondicionada proveniente de la galga en una señal digital. Para esto es necesario el uso de un convertidor analógico a digital (A/D), este convierte un valor de voltaje analógico en un número binario mediante un proceso de digitalización. La conversión es discreta, teniendo lugar un número a la vez. Entre las características a tomar en cuenta al seleccionar un convertidor A/D se encuentran la resolución, el rango de voltaje y la velocidad de conversión.

Después de haber convertido la señal de la galga en una señal digital se procede a enviarla a la PC. Existen ciertos estándares para la forma en que la información digital se comunica entre dispositivos digitales. Los métodos de comunicación en serie transfieren los datos de bit en bit.

Los métodos de comunicación en paralelo transmiten datos en grupos de bits simultáneos. La comunicación digital en este trabajo se planea llevar a cabo mediante el protocolo RS-232C.

Para realizar la etapa de adquisición de la señal en este trabajo se utilizará un microcontrolador ATmega8 [13]. Este microcontrolador se alimenta con un voltaje de entre 2.7 V y 5.5 V. Cuenta con dos puertos de 8 bits y uno de 7 bits, los cuales se pueden configurar como entradas o salidas. Posee una arquitectura Harvard con memorias y buses separados para instrucciones y datos; la ALU (Unidad Aritmética Lógica) soporta operaciones aritméticas y lógicas entre registros o entre un registro y una constante, después de una operación aritmética, el registro de Estado es actualizado, para reflejar información acerca de la operación. La memoria de programa que posee es un espacio continuo de memoria Flash cuyo tamaño es de 8 Kilobytes, la cual soporta hasta 10,000 ciclos de escritura/borrado. El microcontrolador ATmega8 cuenta con un convertidor Analógico-Digital de aproximaciones sucesivas de 10 bits. Como se observa en la figura 1.15, es posible seleccionar 1 de 6 canales externos (ADC0...ADC5). De esta manera, solo es necesario conectar la señal al pin correspondiente (pin 23 a pin 28), y programar el microcontrolador para realizar la conversión. El ATmega8 incluye una USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transceiver) Transmisor/Receptor Universal Síncrono/Asíncrono, la cual permite establecer una comunicación vía puerto serial con la computadora. La información se envía a la computadora por el pin 3 (TXD) y se recibe a través del pin 2 (RXD).

Para programar este dispositivo se hace uso del software AVR Studio, el cual permite programar en lenguaje C o en lenguaje ensamblador. Posteriormente se utilizará el software Pony Prog para grabar el programa en la memoria del microcontrolador.

Finalmente se hará uso del programa LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) para manejar los datos obtenidos y realizar la interfaz con el usuario. LabVIEW es un paquete de software de programación gráfica diseñado para la adquisición de datos y el control de instrumentos. LabVIEW está integrado completamente en las comunicaciones con el hardware tal como GPIB, RS-232 y DAQ.

Los archivos básicos que se pueden crear con LabVIEW son llamados Instrumentos Virtuales o VIs por sus siglas en inglés, debido a que su apariencia y operación imita a los instrumentos físicos, tales como osciloscopios y multímetros. Cada VI consiste de dos partes principales, el

panel frontal y el diagrama de bloques, un ejemplo de ellos se muestran en las figuras 1.16 y 1.17.

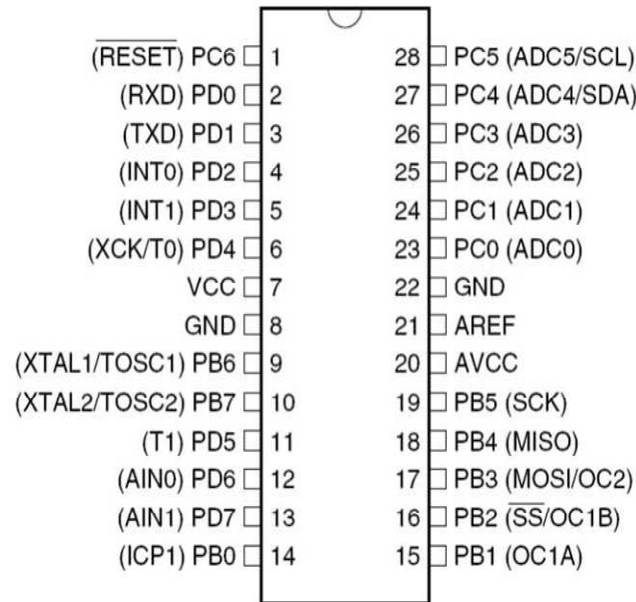


Figura 1.15. Microcontrolador ATmega8

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario o panel frontal con controles e indicadores. Los controles son texto, botones de acción, perillas y otros dispositivos de entrada. Los indicadores son gráficas, LED y otros despliegues. Después de que se ha construido la interfaz, se le agrega código utilizando los VI y estructuras para controlar los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques contiene este código. LabVIEW cuenta con una paleta de controles así como una paleta de funciones, las cuales se utilizan tanto en el panel frontal como en el diagrama a bloques respectivamente. Estas paletas se muestran en la figura 1.18.

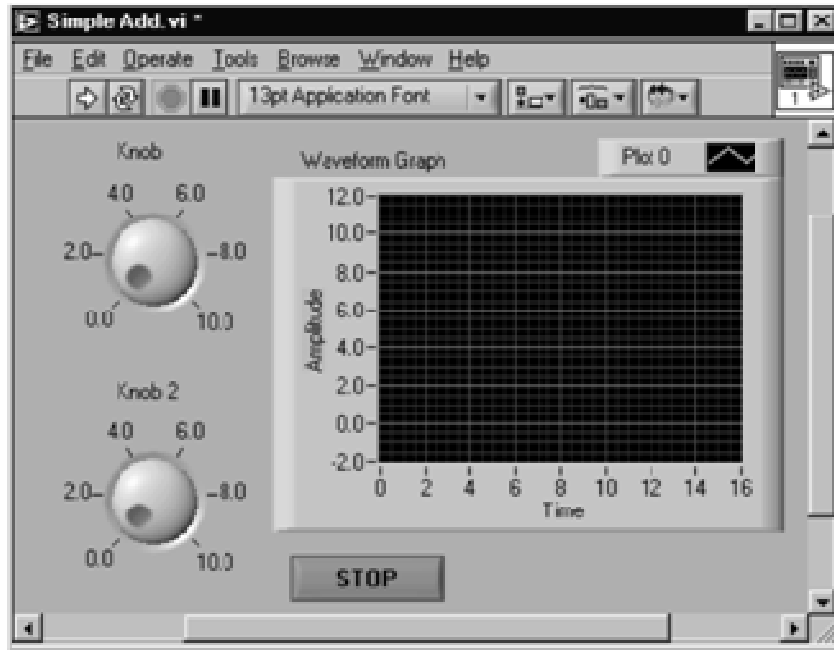


Figura 1.16. Panel frontal en LabVIEW

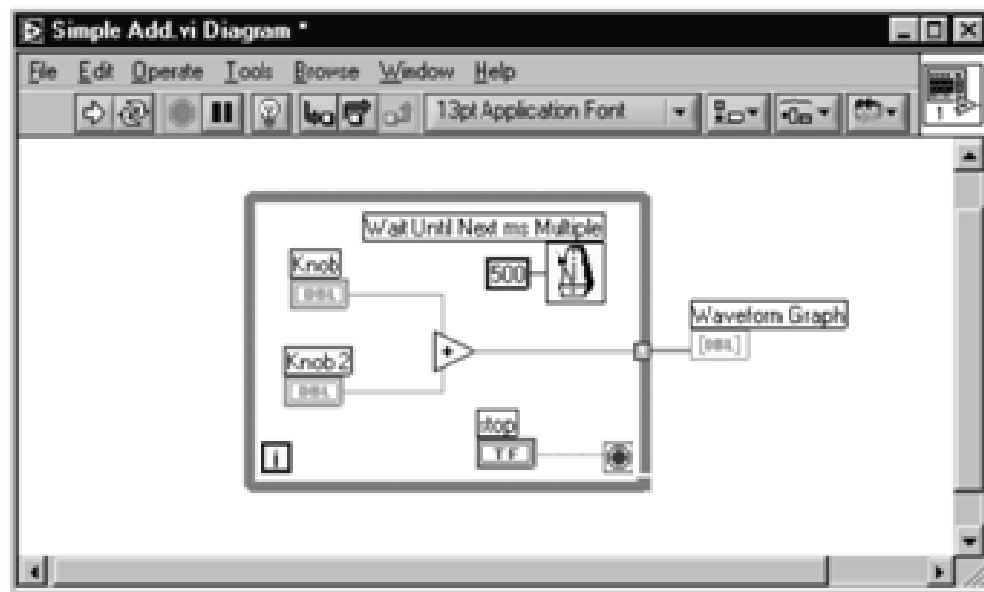


Figura 1.17. Diagrama a bloques en LabVIEW

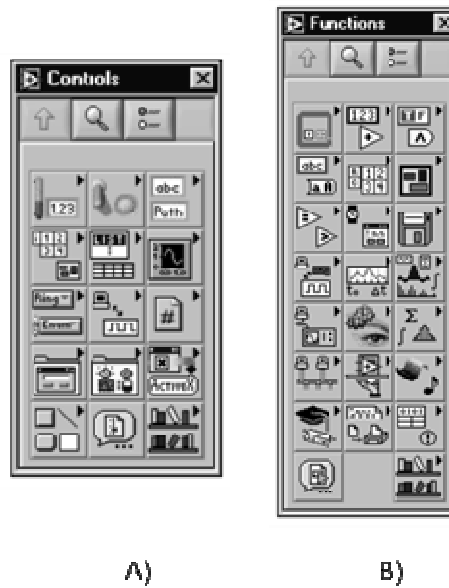


Figura 1.18. A) Paleta de controles, B) Paleta de funciones

De esta manera se estructurará el programa a emplearse con los recursos necesarios para establecer una comunicación vía serial, así como para poder mostrar, manipular y guardar la información obtenida de las mediciones realizadas. El desarrollo del programa utilizado en este trabajo se expone por completo en el capítulo dedicado al Desarrollo de Software.

Capítulo 2.

Diseño del Hardware del Sistema de Medición

En el presente capítulo se explican los dispositivos empleados, así como los circuitos elaborados que hacen posible la implementación del sistema que realiza el acondicionamiento de la señal. Se menciona el amplificador de instrumentación utilizado, definiéndose las características bajo las que fue implementado. Igualmente se habla del filtro paso-bajas, sus especificaciones y que elementos se utilizan para implementarlo. Se exponen los dispositivos empleados en los circuitos que permiten construir el sistema de adquisición de datos, basándose en el uso del microcontrolador ATmega8 y una comunicación serial con la computadora. Finalmente se habla de la etapa de alimentación de los circuitos, se explican los dispositivos utilizados y como se acondiciona por completo el sistema de medición.

2.1 Sistema de medición para galgas extensiométricas

El sistema que se utiliza en este trabajo para realizar las mediciones de deformación se puede dividir en distintos segmentos, en este caso el sistema se desarrolla basándose en los distintos elementos mostrados en la figura 2.1. Es necesario dar una breve explicación del sistema, para posteriormente exponer cada bloque con mayor detalle en las distintas secciones que conforman el capítulo.

Se inicia con la **alimentación del sistema**, donde se acondicionan los voltajes que son necesarios para alimentar los distintos dispositivos empleados en el sistema de medición. La base

del sistema es el circuito **punto de Wheatstone**, el cual convierte las variaciones de resistencia eléctrica de las galgas a cambios de voltaje, estos cambios de voltaje son identificados por el **amplificador de instrumentación**, el cual convierte la señal proveniente del puente en una señal más significativa; posteriormente la señal se envía al **filtro paso-bajas**, para eliminar el ruido que pueda tener la señal; después se llega al **amplificador opcional**, este elemento es un amplificador que puede ser usado o no, según los requerimientos que se tengan, aunque en este trabajo no se utiliza, se deja la opción de usarlo en un futuro. Posteriormente se encuentra la **referencia y divisor de voltaje**, donde se tiene un voltaje de referencia y por medio de un divisor de voltaje se obtiene una señal que se suma a la proveniente del filtro paso-bajas, con la intención de aproximar la señal de voltaje inicial a un valor de cero. De aquí la señal se envía al **microcontrolador**, donde se digitalizará y posteriormente se enviará, utilizando la comunicación vía serial, a la computadora. Finalmente se encuentra el **RS-232**, aquí se lleva a cabo la implementación de la comunicación serial con la computadora y los dispositivos empleados para ello.

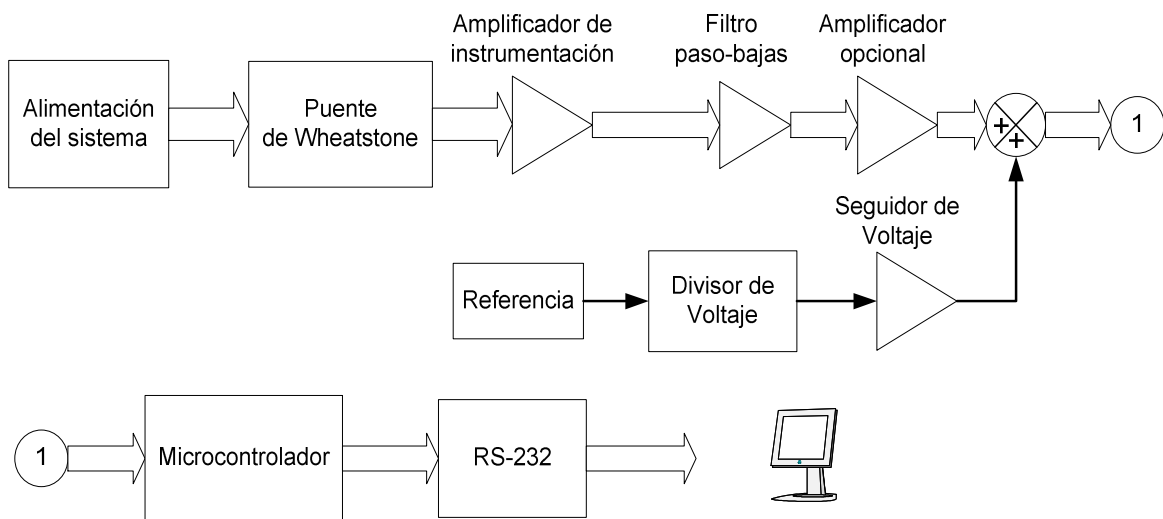


Figura 1.1. Diagrama a bloques general del sistema de medición

2.2 Circuito Puentes de Wheatstone

Inicialmente se implementa un circuito puente de Wheatstone sugerido en la literatura cuando se trabaja con galgas extensiométricas; sin embargo, el rendimiento de este circuito no es satisfactorio (ver Apéndice B). Debido a esto, se decide utilizar el circuito puente de Wheatstone que se muestra en la figura 2.2. Se decide armar el circuito de la figura 2.2 utilizando 2 potenciómetros de precisión, los cuales serán R_2 y R_3 , puesto que solo se armará medio puente con resistencias, ya que R_1 será una galga pasiva, la cual no sufrirá deformación; esto porque el valor de resistencia se aproxima más a 350Ω empleando una galga que utilizando un potenciómetro de precisión, ya que es muy difícil calibrarlo para que dé un valor exacto. Así, tanto E_1 como E_2 dependerán de un potenciómetro de precisión y una galga extensiométrica. Se busca que exista la mayor exactitud posible en los valores de resistencia porque esto ayudará a que el circuito puente de Wheatstone se encuentre balanceado, esto es, que V_0 inicialmente se aproxime a cero volts; sin embargo, al no ser posible ajustar la señal exactamente a cero, el ajuste a cero se realiza después del filtro por medio de un circuito sumador no inversor, pues se suma a la señal principal V_0 un voltaje proveniente de un divisor de voltaje, por lo cual se tiene control de la magnitud de este voltaje y esto hace posible regular la señal principal.

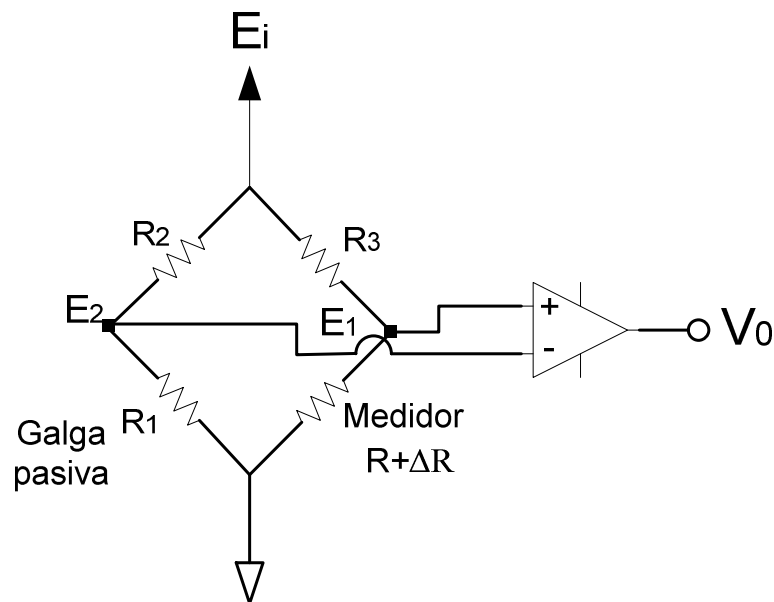


Figura 2.2. Circuito puente de Wheatstone implementado

2.3 Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación utilizado es el AD624, cuyo diagrama a bloques se muestra en la figura 1.12. La forma de implementar este amplificador es la siguiente: El pin 9 se conecta con el pin 10 y brinda la salida, mientras que el pin 6 se conecta a tierra; como se observa en la figura 2.3, las señales provenientes del circuito puente de Wheatstone se conectan a los pines 1 y 2, según la figura 2.2. Las resistencias de $100\text{ k}\Omega$ se implementan con la finalidad de darle mayor estabilidad a los voltajes de entrada E_1 y E_2 .

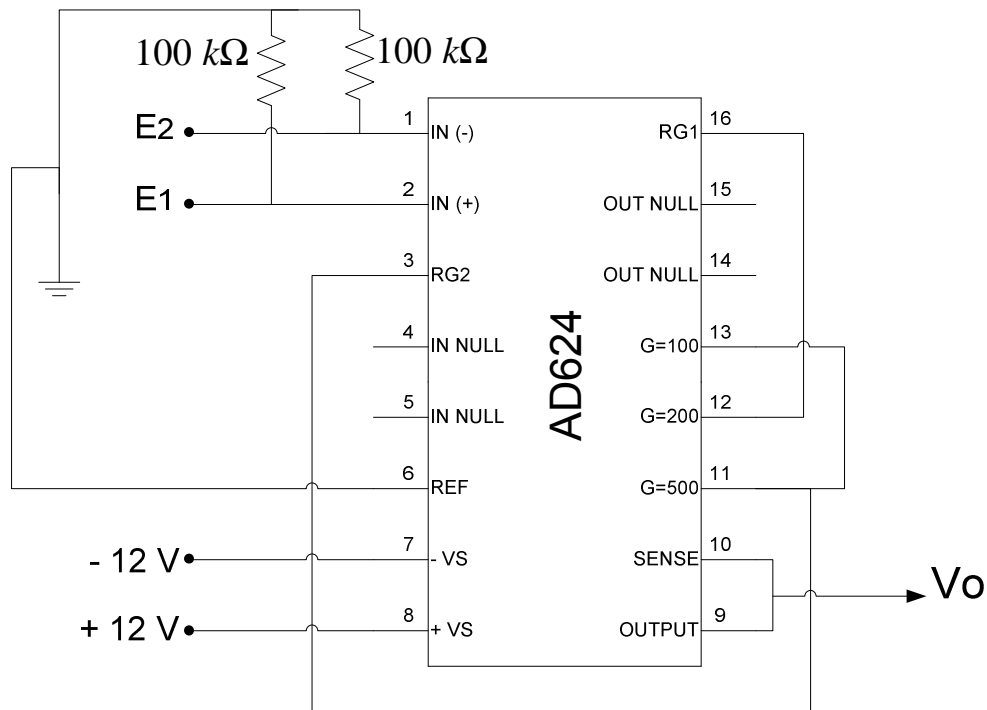


Figura 2.3. Implementación del amplificador diferencial de instrumentación AD624

Se prueba el amplificador con diferentes ganancias según la configuración mostrada en la figura 2.2, con la intención de observar su comportamiento. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.1, se toman en cuenta también los resultados teóricos según la ecuación (1.23), pues en teoría el circuito puente de Wheatstone debería estar balanceado y en la ecuación (1.30) solo influye el voltaje de offset:

Tabla 1.1. Resultados obtenidos al probar el puente de Wheatstone y el amplificador AD624

V_i (V)	R (Ω)	Ganancia	V_o (mV) Real	V_o (mV) Teórico
2.5	$330 \pm 5\%$	5	90	0
2.5	$330 \pm 5\%$	100	168	-4.7

En estos resultados se observa la influencia de la ganancia del amplificador de instrumentación, pues según la ecuación (1.23) el voltaje de offset aumenta a la par de la ganancia y esto se ve reflejado en como el V_0 real aumenta cuando la ganancia es mayor. También se observa que el V_0 real varía bastante respecto al V_0 teórico, lo cual se puede deber a la inexactitud de las resistencias empleadas.

2.4 Filtro paso-bajas

El filtro paso-bajas Butterworth de segundo orden implementado se muestra en la figura 2.4. Se procede a comprobar el funcionamiento de este filtro haciendo uso de un generador de señales y un osciloscopio. Ingresando al filtro una señal senoidal con amplitud de 1 V y una frecuencia de 1 Hz, la salida del filtro se observa en el osciloscopio; posteriormente se incrementa gradualmente la frecuencia en el generador de señales, con lo que se observa en el osciloscopio como disminuye la amplitud de la señal de salida al aumentar la frecuencia. Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 2.5. De esta forma se identifica una frecuencia de corte de aproximadamente 8 Hz, pues a esta frecuencia la amplitud de la señal es de 719 mV, un valor aproximadamente de 0.707 la amplitud de la señal original, que es como se define teóricamente la frecuencia de corte.

Ahora se implementa el sistema por completo, esto es: El puente de Wheatstone, el amplificador de instrumentación y el filtro paso-bajas. Se prueba el sistema bajo las mismas condiciones que en la Tabla 2.1, los resultados de estas pruebas se reportan en la Tabla 2.2. Nuevamente se toman en cuenta el V_0 teórico del sistema. Por lo tanto se emplea otra vez la ecuación (1.23), pues en teoría el puente debe estar balanceado y el filtro paso-bajas al tener ganancia unitaria no modifica la señal V_0 .

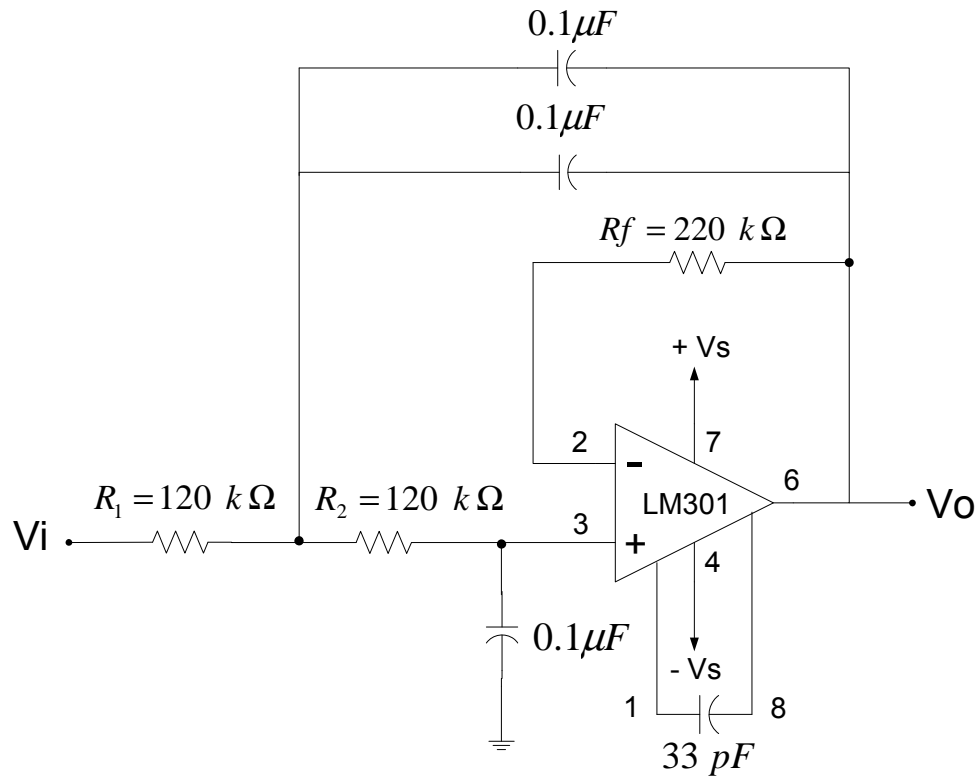


Figura 2.4. Filtro Butterworth de segundo orden implementado

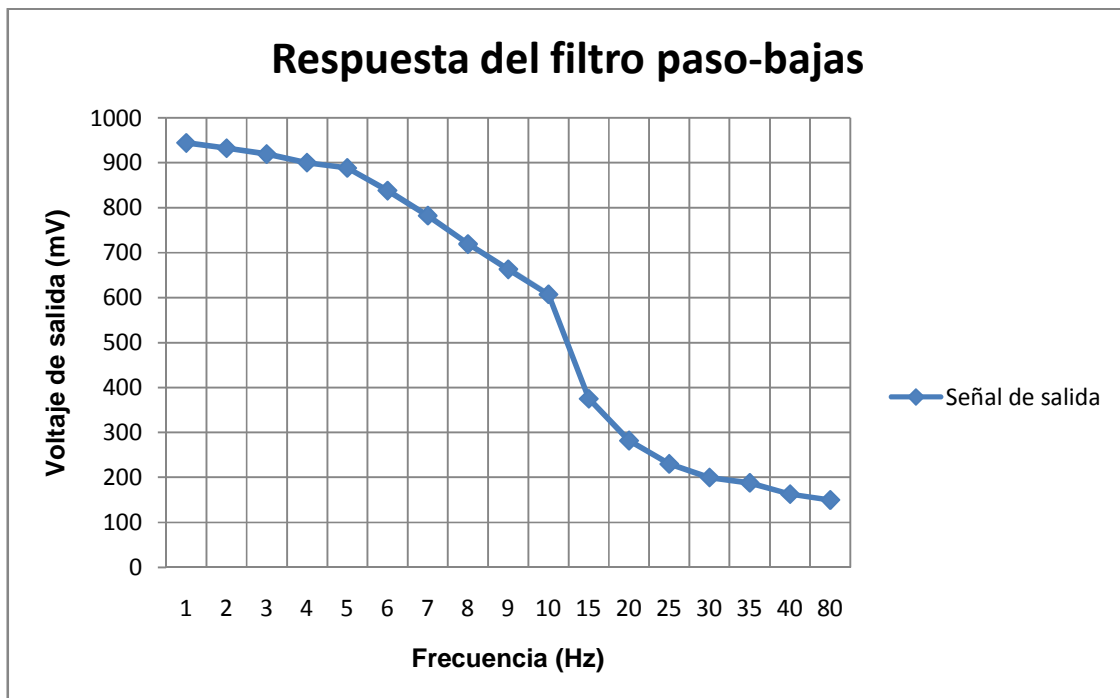


Figura 2.5. Señal de salida del filtro paso-bajas

Tabla 2.2. Resultados obtenidos del sistema: Puente de Wheatstone, amplificador de instrumentación y filtro paso-bajas

Vi (V)	R (Ω)	Ganancia	Vo (mV) Amplificador de instrumentación	Vo (mV) Filtro paso- bajas	Vo (Teórico)
2.5	330 \pm 5%	5	90	100	0
2.5	330 \pm 5%	100	168	140	-4.7

De estos resultados se observa que para una ganancia de 5 el voltaje a la salida del filtro es mayor que a la salida del amplificador, en cambio, para una ganancia de 100 el voltaje a la salida del filtro es menor que a la salida del amplificador.

2.5 Amplificador Opcional y Sumador

Para implementar un amplificador opcional a la salida del filtro, se decide emplear un amplificador operacional TL084, este amplificador en realidad posee 4 amplificadores operacionales, como se muestra en la figura 2.6, por lo tanto en este mismo dispositivo se puede implementar el amplificador opcional y el sumador. En este caso no es necesario buscar un amplificador con características de bajo ruido, bajo voltaje de offset y alto valor de RRMC, debido a que la señal de entrada es una señal ya amplificada, por lo cual no es una señal demasiado pequeña como en el caso de la señal que entra al amplificador de instrumentación. Así pues, se emplea el amplificador operacional TL084, en la configuración de amplificador no inversor como se muestra en la figura 2.7.

De donde se tiene que el voltaje de salida V_o se determina de la siguiente manera:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) E_i \quad (2.1)$$

Se observa que la ganancia de salida está determinada por la relación R_f/R_1 . Como este amplificador no se emplea en este trabajo, en el circuito se deja la opción de configurar la ganancia en un futuro, por lo que no se definen las resistencias R_f y R_1 . La razón de no utilizar

este amplificador se debe a que la resolución de la señal obtenida a la salida del filtro paso-bajas es suficiente para llevar a cabo la conversión analógica/digital y por lo tanto cubrir los requerimientos planteados en el presente trabajo; sin embargo, contar con este amplificador será de gran utilidad si se desea utilizar otro dispositivo para convertir y enviar la señal a la PC, por ejemplo, una tarjeta de adquisición de datos que identifique cambios de voltaje más significativos y por lo tanto requiera una mayor resolución.

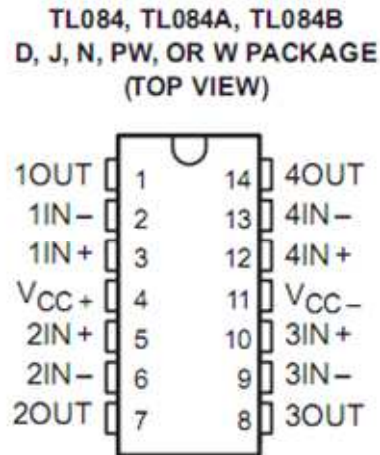


Figura 2.6. Amplificador operacional TL084

El circuito sumador también se implementa en el dispositivo TL084. El sumador se emplea para regular el voltaje a la salida del sistema cuando el circuito puente de Wheatstone se encuentra balanceado. Se establece el voltaje a sumarse en +1 V, pues en ocasiones se tienen voltajes negativos del orden de mV a la salida del amplificador de instrumentación y dichos voltajes no son interpretados por la etapa de conversión analógica/digital, donde solo se aceptan voltajes mayores a cero. El circuito sumador se implementa en una configuración de sumador no inversor según se muestra en la figura 2.8.

El voltaje proveniente del filtro paso-bajas se conecta al nodo E_1 , según la figura 2.8; a su vez, el nodo E_2 se alimenta con +1 V proveniente de un circuito divisor de voltaje, este divisor se implementa utilizando un potenciómetro de precisión, con la finalidad de poder modificar el voltaje del nodo E_2 si fuera necesario. Se agrega un circuito seguidor de voltaje (Figura 2.9) entre el potenciómetro y el nodo E_2 , pues es necesario para lograr que el voltaje proporcionado por el potenciómetro se mantenga sin modificaciones. Los valores de las resistencias R_A se deciden de forma libre, en este trabajo se utilizaron resistencias de 100 Ω .

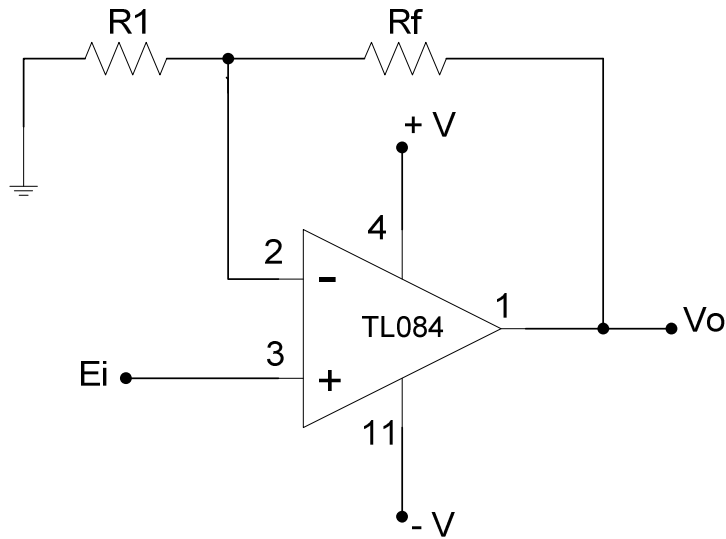


Figura 2.7. Amplificador no inversor

El valor de la resistencia R_f se determina en base al valor de la resistencia R según la siguiente ecuación:

$$R_f = R(n - 1) \tag{2.2}$$

Donde n es el número de voltajes a sumar, siendo en este caso $n=2$, por lo que según la ecuación (2.2), $R_f = R$. Para este trabajo R_f y R son resistencias de 100Ω .

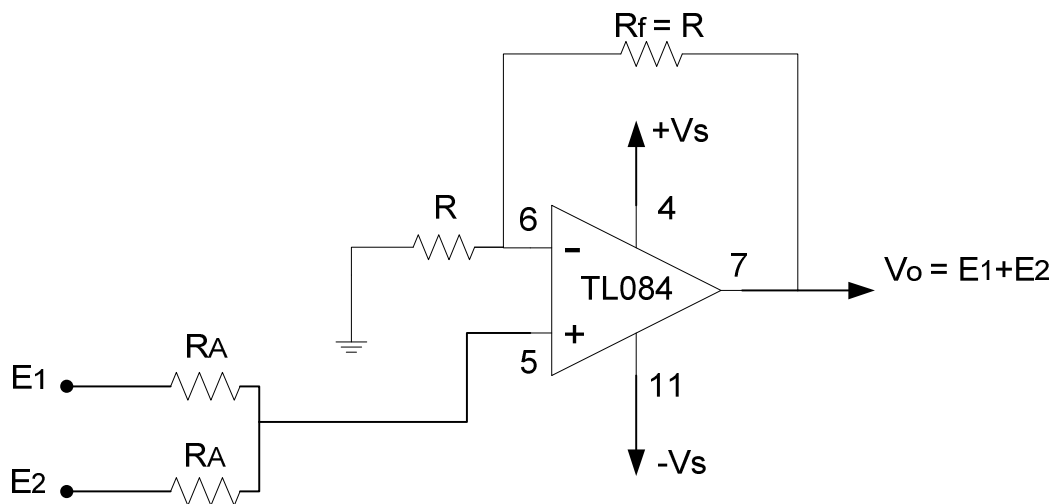


Figura 2.8. Circuito sumador no inversor

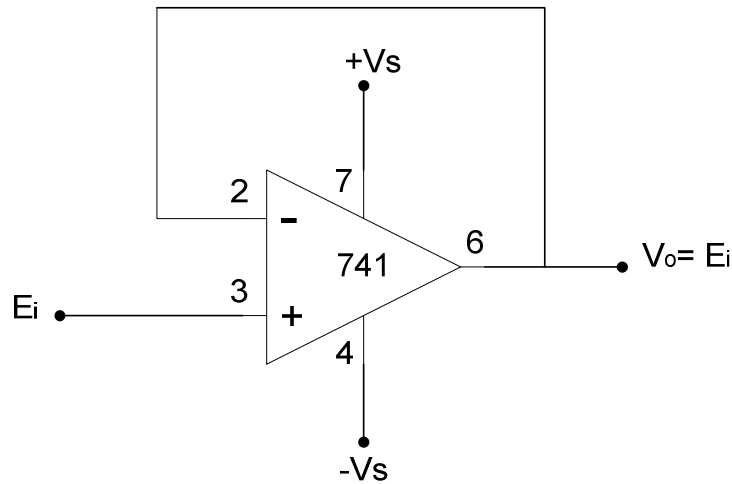


Figura 2.9. Circuito seguidor de voltaje

2.6 Microcontrolador y RS-232

Para poder obtener los datos de las mediciones en la computadora, es necesario procesar la señal obtenida de la etapa de acondicionamiento. Se desea mostrar esta señal en la computadora para que un usuario pueda tener fácil acceso y visualización de la información obtenida.

Se inicia por digitalizar la señal, esto es, convertirla de una señal analógica a una señal digital, pues la computadora trabaja con información en formato digital. Para digitalizar la señal y posteriormente enviarla a la PC vía comunicación serial, se emplea el microcontrolador ATmega8, el cual se muestra en la figura 2.10.

Para realizar la conversión de la señal analógica a digital se emplea el canal ADC1 (pin 24), el canal empleado se decide de forma aleatoria. Por lo tanto, la señal analógica proveniente del filtro paso-bajas se conecta al pin 24. Los parámetros para la conversión analógica-digital se especifican por software, esto se explica completamente en el capítulo 3 dedicado al desarrollo de software.

Para transmitir a la computadora la información ya digitalizada se emplea la terminal TXD (pin 3), las características de la transmisión se especifican por programación. Los detalles de la programación y el protocolo que permiten la comunicación vía puerto serial con la computadora serán tratados en el apartado correspondiente al desarrollo de software.

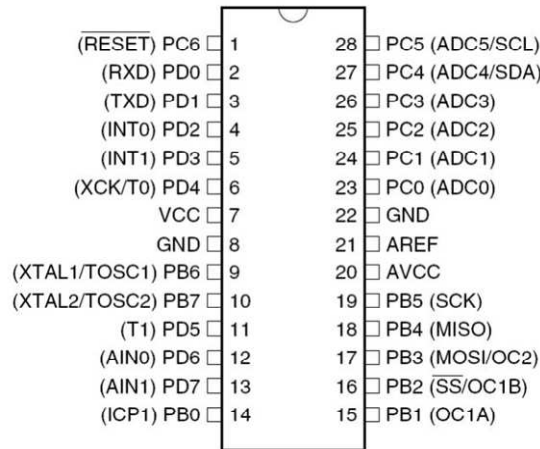


Figura 2.10. Microcontrolador ATmega8

Para desarrollar una interfaz serial, es necesario el uso de un dispositivo MAX-232 o MAX-233 para la conversión de los niveles de voltaje TTL (del microcontrolador) a RS-232 (de la P.C.). La diferencia entre el MAX-233 y el MAX-232 es que el primero ya tiene integrados internamente los capacitores requeridos para su implementación. En este trabajo se emplea el dispositivo MAX-232, el cual se muestra en la figura 2.11.

Según la figura 2.11, el MAX-232 debe alimentarse con 5 V (V_{cc}) en el pin 16 y con voltajes de ± 12 V (Vs) en los pines 2 y 6 respectivamente. El diagrama completo de conexiones para el MAX-232 se muestra en la figura 2.12. Se puede observar como conectar el MAX-232 al microcontrolador y al conector DB9 Hembra. También se observa que se alimenta con 5 V el pin 21, pues a este pin se conecta el voltaje de referencia deseado. La etapa que incluye al MAX-232 y el microcontrolador se implementa en un circuito impreso individual, de tal manera que se cuente con la etapa de adquisición de la señal por separado.

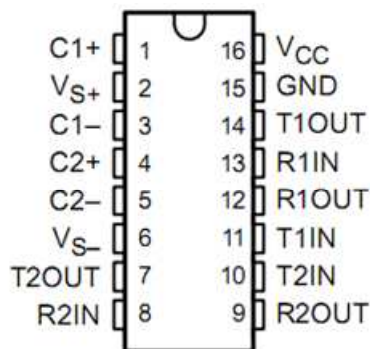


Figura 2.11. Dispositivo MAX-232

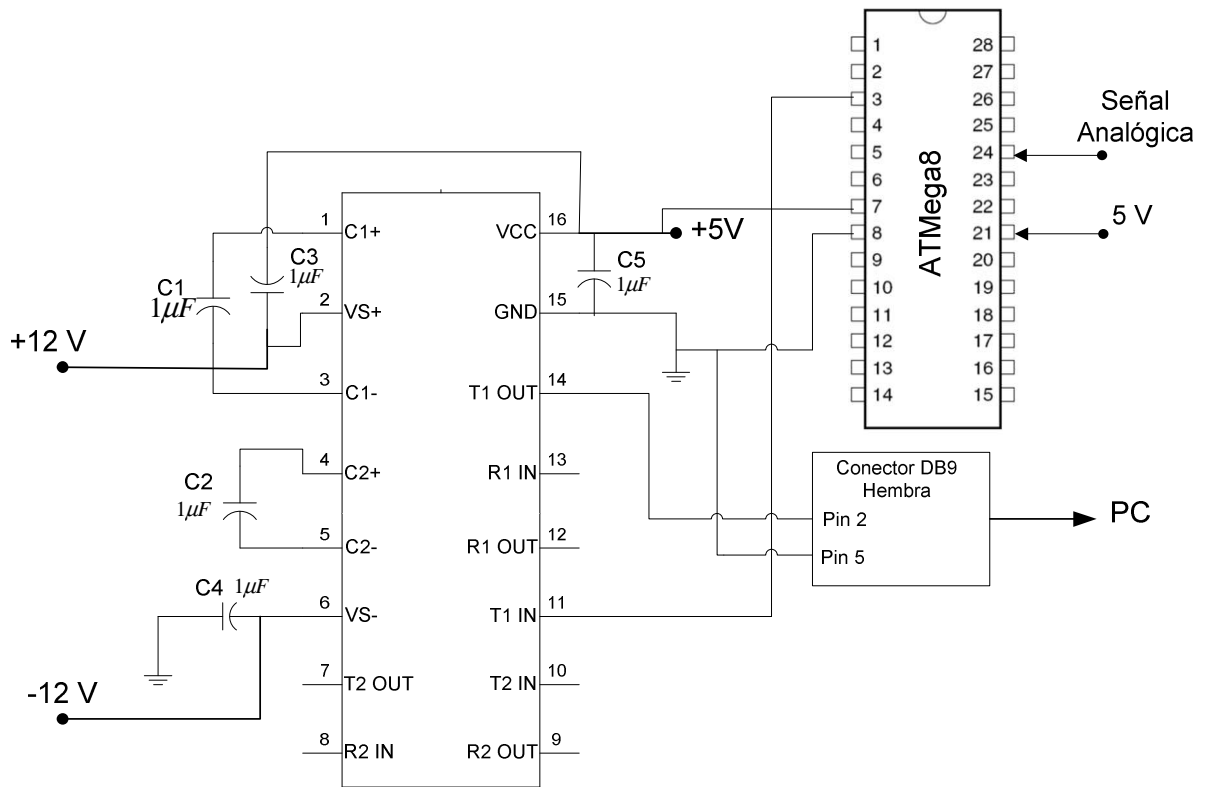


Figura 2.12. Sistema de adquisición de datos

2.7 Alimentación del sistema

El bloque correspondiente a la alimentación del sistema queda completamente ilustrado en la figura 2.13. Como puede observarse, se requieren 2 fuentes de alimentación de DC. A la salida de la etapa de alimentación se tienen 2 voltajes de 5 V, uno para la etapa analógica y uno para el microcontrolador, pues si el microcontrolador no se alimenta de manera independiente, arroja errores al momento de realizar la conversión analógica/digital. Los 2.5 V son para alimentar el circuito puente de Wheatstone. Los ± 12 V son para alimentar al amplificador de instrumentación, el amplificador operacional del filtro paso-bajas, el TL084 y el MAX-232.

Se opta por utilizar un convertidor CD/CD de tal manera que se puedan obtener los ± 12 V. Se decide utilizar el convertidor AM2D-0512D-NZ, en la figura 2.14 se muestra una imagen de un convertidor CD/CD de la serie AM2D y el diagrama del AM2D-0512D-NZ se muestra en la figura 2.15, posteriormente en la tabla 2.3 se indica como configurarlo.

Etapa de Alimentación

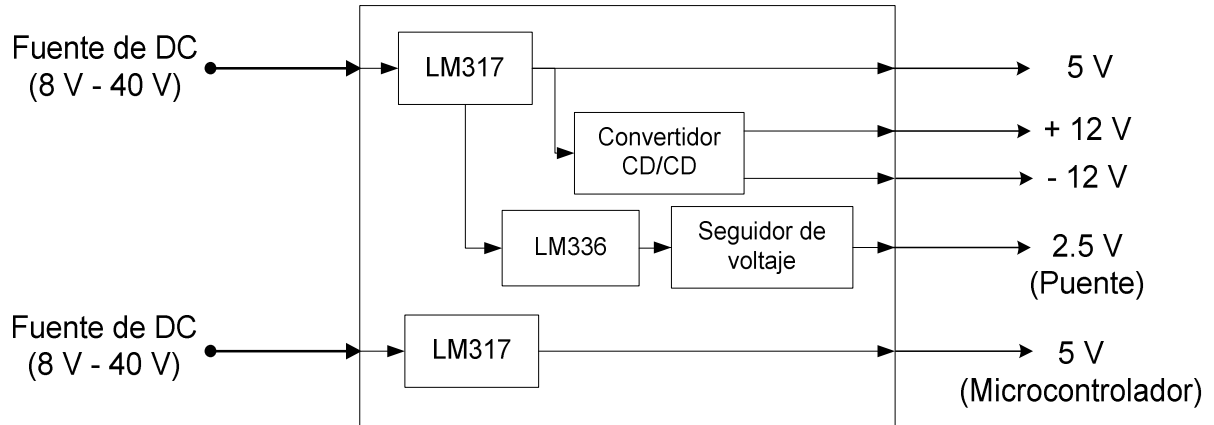


Figura 2.13. Etapa de alimentación del sistema



Figura 2.14. Convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ

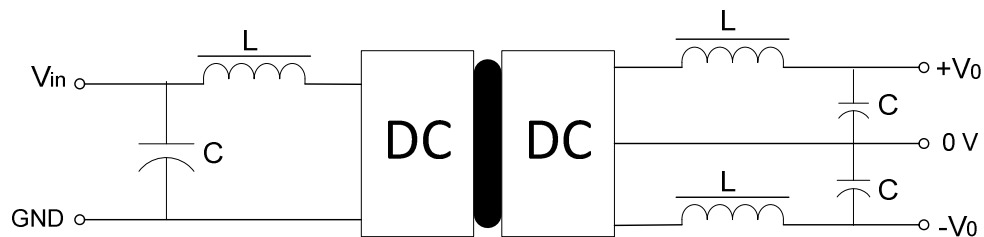


Figura 2.15. Diagrama de implementación para el convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ

Este convertidor CD/CD proporciona una salida doble, es decir $\pm 5V$, $\pm 9V$, $\pm 12V$ o $\pm 15V$. Como se observa en la tabla 2.3, se configura por medio de capacitores dependiendo del voltaje con que se vaya a alimentar así como del voltaje que se desea obtener en la salida. En este caso se

alimentará con 5 V y se obtendrán ± 12 V, para este voltaje se puede obtener una corriente máxima de ± 83 mA [14]. Así pues, para un voltaje de entrada de 5 V y una salida de ± 12 V se necesita un capacitor de $4.7 \mu\text{F}$ y dos capacitores de $1 \mu\text{F}$, los cuales se conectarán según la figura 2.16.

Tabla 2.3. Valores de los capacitores para configurar el convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ

Vin	Capacitor Externo	Vout	Capacitor Externo
5 VDC	$4.7 \mu\text{F}$	5 VDC	$4.7 \mu\text{F}$
12 VDC	$2.2 \mu\text{F}$	9 VDC	$2.2 \mu\text{F}$
24 VDC	$1 \mu\text{F}$	12 VDC	$1 \mu\text{F}$
---	---	15 VDC	$0.47 \mu\text{F}$

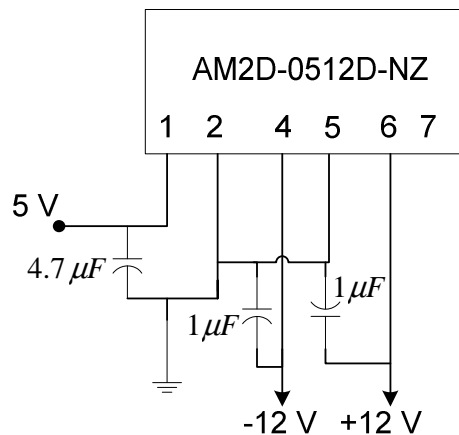


Figura 2.16. Implementación del AM2D-0512D-NZ

Como se planea que las fuentes de CD, de la figura 2.13, proporcionen voltajes mayores a 5 V, por ejemplo 9 V o 12 V, procedentes de un eliminador o alguna otra fuente, será necesario utilizar un componente por medio del cual sea posible obtener los 5 V que alimentarán al convertidor CD/CD y al microcontrolador. De esta manera se decide emplear el regulador de voltaje LM317, el cual se implementa como se muestra en la figura 2.17. El LM317 puede

proporcionar voltajes en su salida desde 1.2 V hasta 37 V, una condición necesaria es que V_{in} sea mínimo 3V mayor que V_{out} [15].

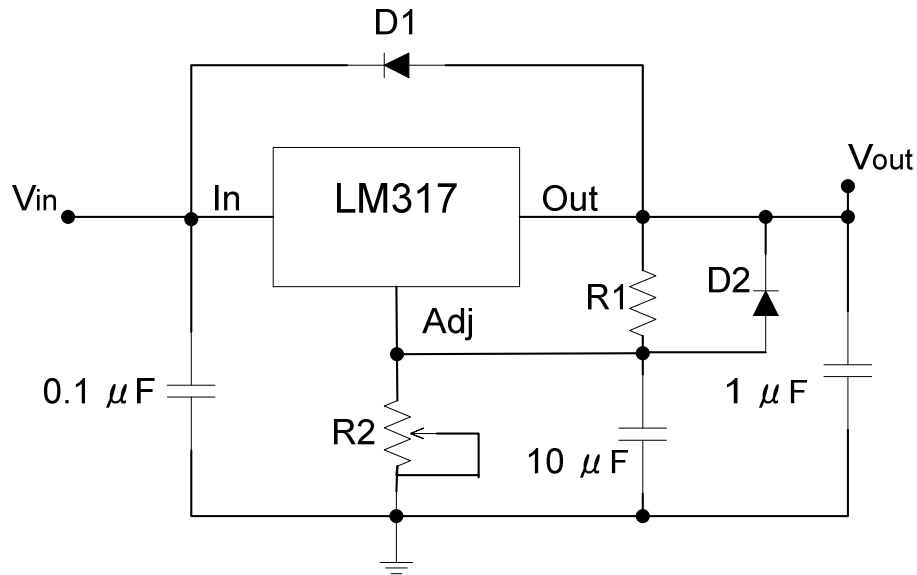


Figura 2.17. Implementación del regulador LM317

El voltaje de salida para este regulador se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{out} = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.3)$$

Donde V_{out} = Voltaje de salida, R_2 es un potenciómetro y R_1 una resistencia fija. Como se puede observar, el voltaje de salida es independiente del voltaje de entrada y se configura solo con la relación entre R_1 y R_2 , esto es deseable, pues siempre se obtendrá un voltaje de 5 V al aplicarle en la entrada cualquier voltaje mayor a 8 V. Es así como según la ecuación (2.3), para obtener un V_{out} = 5 V, la relación R_2/R_1 debe ser 3, por lo tanto R_1 se establece como una resistencia de 100Ω y el potenciómetro R_2 se configura para tener una resistencia de 300Ω.

Es necesario encontrar la forma de obtener un voltaje de 2.5 V para alimentar el circuito puente de Wheatstone. Para esto se decide emplear la referencia de voltaje LM336, esta referencia es a 2.5 V, la cual es en realidad un diodo zener, como se muestra en la figura 2.18. Como se observa en la figura 2.19, solo se necesita una resistencia de 2.5 kΩ y alimentar este

arreglo con 5 V para obtener un voltaje de 2.5 V [16]. Una vez considerado lo anterior, se procedió a armar el circuito para el regulador LM317 y para la referencia LM336.

Después de haber armado los correspondientes circuitos en el protoboard, al probar su funcionamiento, se notó que el voltaje proporcionado por la referencia LM336 experimentaba una caída al momento de alimentar al circuito puente de Wheatstone. Ante esto fue necesario implementar un circuito seguidor de voltaje, para lograr que el voltaje proporcionado por la referencia se mantuviera al momento de conectarlo al circuito puente de Wheatstone, el circuito seguidor de voltaje implementado se muestra en la figura 2.9.

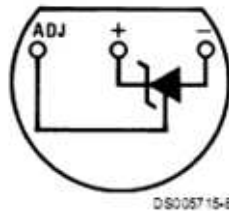


Figura 2.18. Referencia de voltaje LM336

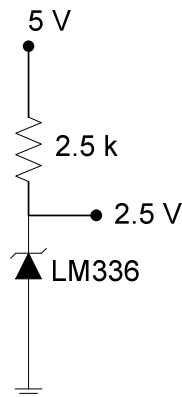


Figura 2.19. Circuito para la implementación de la referencia de voltaje LM336

Se decide realizar en una placa la etapa de alimentación del sistema y en otra placa se implementa la etapa de acondicionamiento de la señal. En la primera placa se coloca el regulador de voltaje LM317, la referencia de voltaje LM336 y el seguidor de voltaje. En la segunda placa se implementa el convertidor CD/CD, el circuito puente de Wheatstone, el amplificador de instrumentación, el filtro paso-bajas y el amplificador al final con la posibilidad de activarlo si se necesita.

Finalmente se tienen 3 circuitos impresos concernientes a las 3 distintas etapas en que se divide el sistema: La etapa de alimentación del sistema, la etapa de acondicionamiento de la señal y la etapa de adquisición de la señal. El diagrama de conexiones completo se muestra en el apéndice C.

Capítulo 3.

Diseño del Software del Sistema de Medición

En este capítulo se expone el desarrollo del código implementado en el microcontrolador para digitalizar la señal y posteriormente enviar la información de esta señal a la computadora. Se explica cómo se caracterizó cada registro empleado en el microcontrolador, por lo cual se definen los parámetros de la conversión analógica/digital así como las características de la comunicación con la computadora. También se explica el programa implementado en la computadora por medio de LabVIEW, para obtener la información enviada por el microcontrolador e interpretarla de manera que el usuario pueda observar lo que está sucediendo y posteriormente pueda tener acceso a los datos obtenidos de las mediciones realizadas.

3.1 Metodología de Desarrollo

El desarrollo tanto del código del microcontrolador ATmega8 como del programa elaborado en LabVIEW se basa en un modelo incremental, es decir, se lleva a cabo a través de incrementos de programa reutilizables que sirven como base para construir las partes faltantes del sistema. En cada incremento se sigue la secuencia de pasos que establece este modelo del ciclo de vida del desarrollo de software: Definición y análisis de requerimientos, diseño, codificación y pruebas del software de manera repetitiva hasta su culminación [17]. Las fases se realizan cíclicamente hasta obtener el programa final, como se observa en la figura 3.1. Cada fase consiste en lo siguiente:

- Análisis de requerimientos: Consiste en comprender la naturaleza de los programas que se construirán, la función requerida, comportamiento, rendimiento e interconexión.
- Diseño: Se centra en proporcionar la funcionalidad del sistema a través de sus diferentes componentes.
- Codificación: Consiste en llevar el diseño a un lenguaje que pueda ser interpretado por una computadora o un microcontrolador.
- Pruebas: Se realizan con la intención de verificar que se cumplan los requerimientos del usuario. De no ser así se obtienen los nuevos requerimientos para comenzar otra vez el ciclo hasta alcanzar un programa que satisfaga las necesidades del usuario.

Sin importar el modelo o la metodología empleada, el software se crea aplicando tres etapas distintas [17], como se muestra en la figura 3.2. Considerando el modelo incremental, la definición y análisis de los requerimientos constituyen la etapa de definición; el diseño y codificación del software conforman la etapa de desarrollo; y las pruebas, la de mantenimiento.

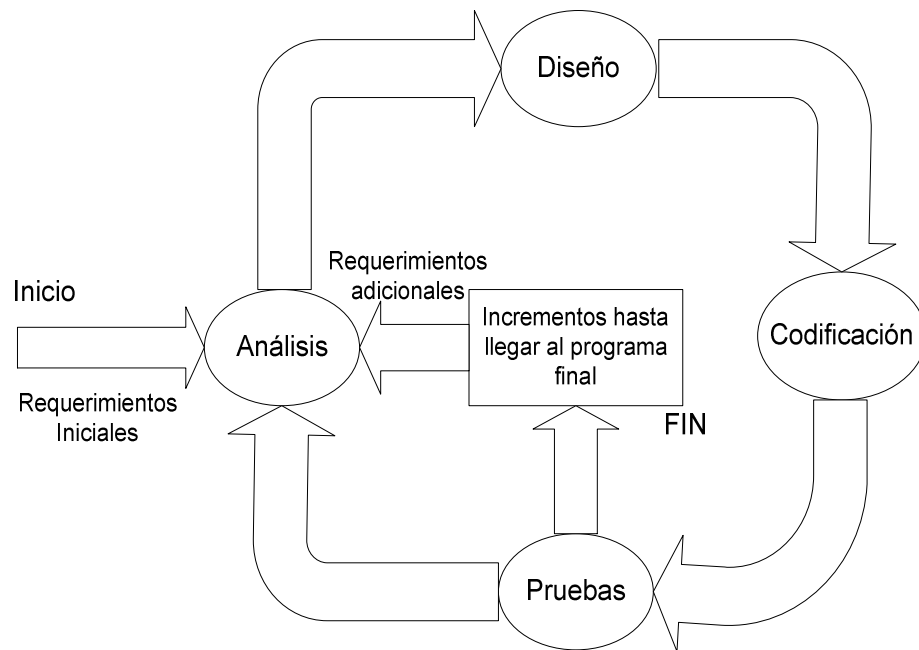


Figura 1.1. Metodología aplicada para el desarrollo de software

La estructuración del software requerido para este trabajo se plantea como se muestra en la figura 3.3. Se observa cada bloque correspondiente al microcontrolador ATmega8 y a la PC, a la

vez que se aprecia como deberán relacionarse para cumplir con su función dentro del sistema de medición. En cada caso se aplicará la metodología expuesta a través de la figura 3.1. El desarrollo detallado de ambos programas se expone detalladamente en las siguientes secciones.

3.2 Programación del Microcontrolador

Para realizar la programación del microcontrolador es necesario tomar en cuenta las necesidades que deberá cubrir este programa, pues es necesario que lleve a cabo la conversión analógica/digital de la señal y posteriormente envíe esta señal a la computadora, de esta manera, se definen los requerimientos del programa para el microcontrolador ATmega8.

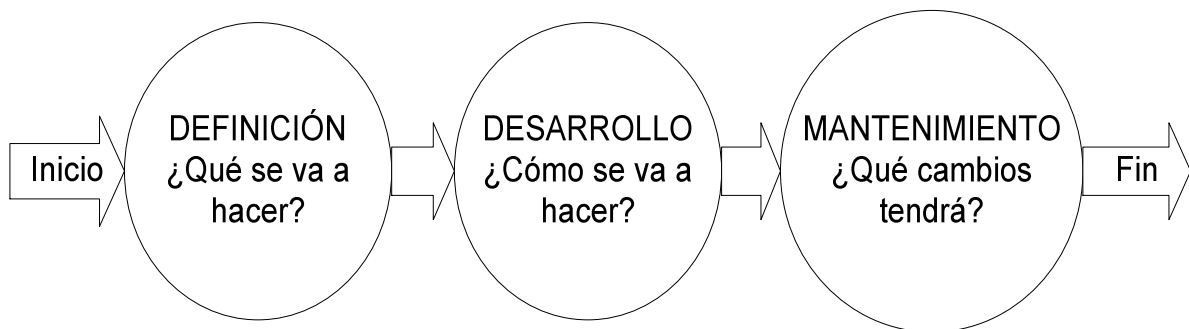


Figura 3.2. Fases del desarrollo de software

La función principal del sistema es convertir la señal analógica proveniente de la etapa de acondicionamiento en una señal digital y enviar esta señal a la computadora vía comunicación serial, utilizando el protocolo RS-232. Para realizar esto se necesita hacer lo siguiente:

1. Configurar el convertidor analógico/digital de 10 bits con el que cuenta el microcontrolador ATmega8.
2. Definir una conversión analógica/digital en el modo de Carrera Libre, tal que la conversión se esté llevando a cabo en todo momento automáticamente.
3. Realizar la conversión analógica/digital basándose en un voltaje de referencia externo.
4. Configurar la USART que posee el microcontrolador ATmega8 para implementar el protocolo de comunicación RS-232.
5. Enviar a la computadora la señal digitalizada vía comunicación serial, basándose en el protocolo RS-232.

3.2.1 Análisis de los requerimientos

Es necesario analizar cada uno de los requerimientos definidos anteriormente, con el objetivo de establecer de una manera más completa, que es lo que se está buscando que cubra el programa del microcontrolador ATmega8.

El primer requerimiento plantea el hecho de utilizar el convertidor analógico/digital de aproximaciones sucesivas que posee el microcontrolador ATmega8. Para poder utilizar este convertidor es necesario configurar los registros ADMUX y ADCSRA [URL1]. El ADMUX es el registro de selección del multiplexor del ADC. El ADCSRA es el registro A de control y estado del ADC. La forma en cómo se configuran se expone en las siguientes secciones.

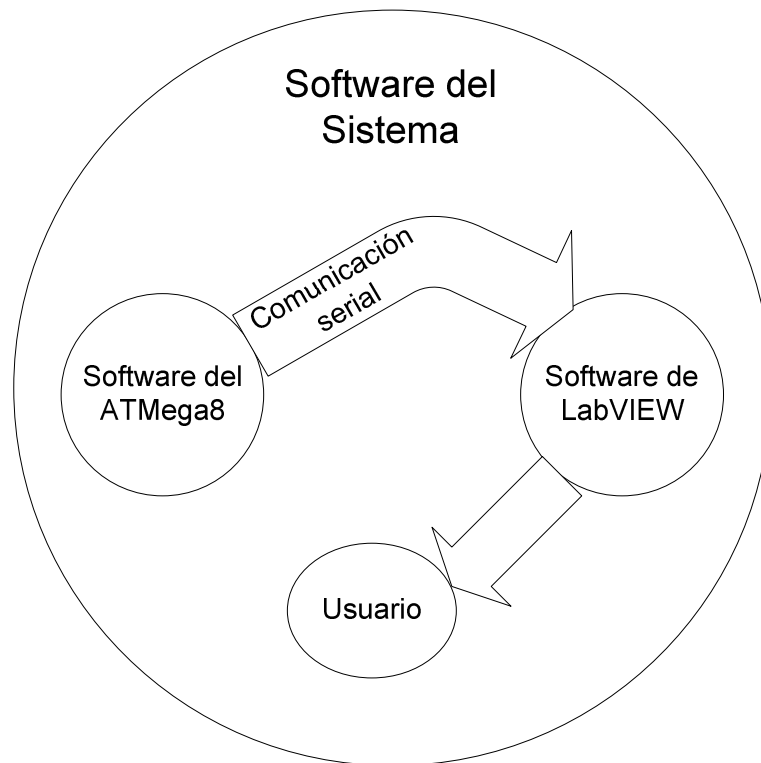


Figura 3.3. Estructuración general del software

El segundo punto se refiere al hecho de definir la conversión analógica/digital continua, lo cual es necesario para que en todo momento el sistema se encuentre leyendo la señal proveniente de las mediciones, por lo que se observará la evolución de los resultados de forma continua e incremental. Es necesario especificar el modo de conversión a utilizar debido a que en otros

microcontroladores, como el ATmega16, es posible definir otros modos de conversión como el hecho de que la conversión sea disparada por algún evento de otro recurso del microcontrolador.

El tercer objetivo se establece porque el contar con un voltaje de referencia externo permite controlar la resolución de la conversión, pues la resolución se puede calcular como:

$$Res = \frac{V_{REF}}{2^n} \quad (3.1)$$

Donde Res es la resolución del convertidor, V_{REF} es el voltaje de referencia y n es el número de bits del convertidor analógico/digital, en este caso n=10.

El cuarto requerimiento se refiere a configurar los registros pertenecientes a la USART, de tal manera que se implemente el protocolo RS-232 para establecer la comunicación serial con la computadora. Estos registros son: UBRRL, UBRRH, UCSRA, UCSRB y UCSRC [URL1].

En la quinta condición se solicita integrar todos los anteriores requerimientos y estructurar el programa que cumplirá la tarea principal, la cual se define en el requerimiento principal.

3.2.2 Diseño del programa

En este apartado se especifican las características para cada tarea en base a los recursos del microcontrolador ATmega8, de tal manera que se defina como quedará implementado el programa.

La estructura que se plantea para este programa se muestra en la figura 3.4. En ella se definen de forma general los bloques que contendrá el programa. Se puede observar que se definen 3 bloques principales, los cuales son: Configuración de recursos, Conversión Analógica/Digital y Comunicación Serial. También se observa que una vez que se configuren los recursos, la conversión analógica/digital y la comunicación serial se llevan a cabo de manera cíclica y hasta que se apaga el sistema.

Por default, la circuitería de aproximaciones sucesivas requiere una frecuencia de reloj de entrada entre 50 KHz y 200 KHz para obtener la máxima resolución. Si una resolución es menor de 10 bits la frecuencia de reloj de entrada al ADC puede ser mayor de 200 KHz para obtener una

razón de muestreo mayor [URL1]. La frecuencia para el ADC se puede generar con un preescalador, esto se hace en el registro ADCSRA, partiendo de la frecuencia base del microcontrolador.

Al configurar la USART es necesario definir si la comunicación a implementar será síncrona o asíncrona. En este trabajo se establece una comunicación asíncrona, por lo que según el protocolo se deben decidir los siguientes parámetros:

- Velocidad (Baudrate, bits/segundo)
- Número de bits de datos: 5,6,7,8 o 9
- Bit de paridad: Par o impar.
- Número de bits de paro
- Paridad

Los registros UCSRA, UCSRB y UCSRC son los registros de control, configuración y estado de la USART. El registro UBRR es un registro de 12 bits que es la base de la generación de la razón de transmisión (Baudrate).

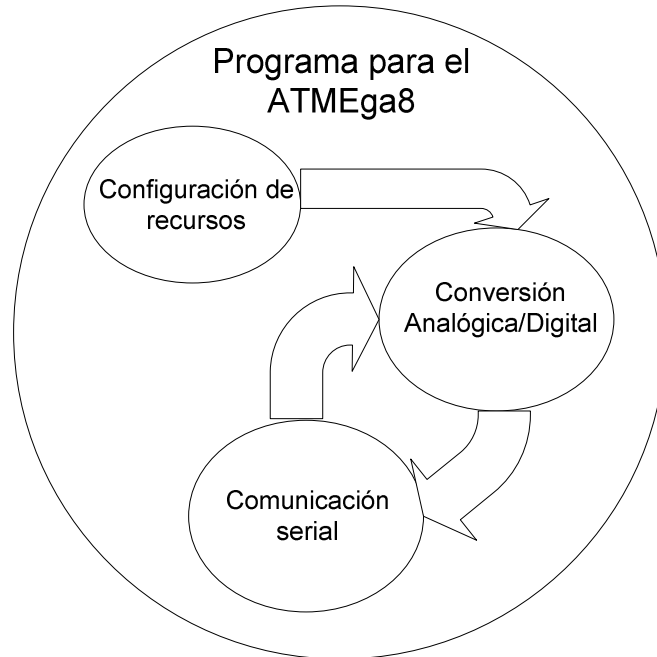


Figura 3.4. Bloques principales del programa

3.2.3 Codificación del programa

Antes de escribir el código es necesario definir un diagrama de flujo, en el cual se establece la secuencia de tareas a llevar a cabo para alcanzar el objetivo principal. El diagrama de flujo a seguir para la codificación del programa del ATmega8 se muestra en la figura 3.5. En él se observa de una manera más específica los bloques descritos para la figura 3.4. Basándose en este diagrama de flujo se explica cómo se programa el microcontrolador ATmega8.

Configuración de los registros

El programa se realiza en lenguaje C y la forma de configurar los registros es asignándole a cada uno cierto número en formato hexadecimal, de acuerdo con los requerimientos. Cada registro es de 8 bits, y cada bit indica una acción o una característica que deberá tener el recurso empleado. Para cada puerto del ATmega8 se manejan 3 registros:

- Un registro de lectura/escritura sobre un latch, conectado a la terminal del puerto (PORTx). En este se escribe, cuando el puerto está configurado como salida.
- Un registro de lectura/escritura que define la dirección del puerto (DDRx). Las direcciones pueden configurarse de manera independiente, para cada terminal: 1 para salida y 0 para entrada.
- Un registro solo de lectura, para hacer lecturas directas en las terminales de los puertos (PINx).

En este caso se configura al puerto B del ATmega8 como salida. Por lo que es necesario escribirle 0xFF. Es necesario definir los parámetros de la comunicación serial configurando los registros de la USART. En el registro UBRR se escribe el número 12, lo cual indica una **operación asíncrona a doble velocidad** y un Baudrate de 9600 bps. Se configuran los registros UCSRA, UCSRB y UCSRC como se muestra en la Tabla 3.1. Además de configurar la USART es necesario configurar los registros ADMUX y ADCSRA pertenecientes al convertidor analógico/digital, la configuración de estos registros también se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 1.1. Configuración de los registros para el ATmega8

Registro	Código (HEX)	Función
UCSRA	0x02	Duplica la velocidad de transmisión en operaciones asíncronas
UCSRB	0x08	Habilita el transmisor de la USART, para poder enviar información vía serial
UCSRC	0x86	Selecciona en 8 bits el tamaño de los datos a enviarse
ADMUX	0x01	Selecciona el ADC1 como el convertidor analógico/digital a utilizar
ADCSRA	0x83	Habilita el ADC para que pueda ser usado. Configura el preescalador del ADC.

Cuerpo del programa

En esta sección se explica el funcionamiento del programa de manera más detallada, pues se expone paso a paso su ejecución indicando las acciones que se van realizando y como se van modificando los registros de acuerdo a dichas acciones.

- El cuerpo principal del programa se encuentra dentro de un ciclo infinito. Primero, se inicia la conversión de la señal analógica en una señal digital, se le indica al ATmega8 que empiece la conversión poniendo en alto el bit ADSC del registro ADCSRA.
- Posteriormente es necesario esperar a que termine la conversión analógica/digital, esto se logra sondeando el bit ADIF del registro ADCSRA, pues esta bandera se pone en alto cuando termina la conversión.
- Una vez que termina la conversión se limpia el bit ADIF del registro ADCSRA, esto se hace escribiéndole un 1.
- Como el resultado de la conversión queda en ADCL y ADCH, ADCL se asigna al puerto B para visualizar el resultado de la conversión en caso de ser necesario, ADCH se asigna a una variable; sin embargo, como solo los dos bits menos significativos de ADCH tienen información, se asegura de que no se filtre información falsa limpiando los otros seis bits de la variable al asignarle ceros.
- Se envía primero la parte baja del resultado de la conversión analógica/digital, esto es ADCL. Simplemente se asigna el valor de ADCL a UDR.
- Es necesario esperar a que la información haya sido completamente enviada para evitar conflictos, esto se logra sondeando el bit UDRE del registro UCSRA, el cual indica cuando UDR está vacío, lo que quiere decir que ha concluido la transmisión.

- Se envía la parte alta del dato digital, es decir ADCH, asignando ahora el valor de ADCH a UDR.
- Nuevamente es necesario esperar a que la transmisión termine, verificando el bit UDRE del registro UCSRA. Finalmente se repite todo el proceso.

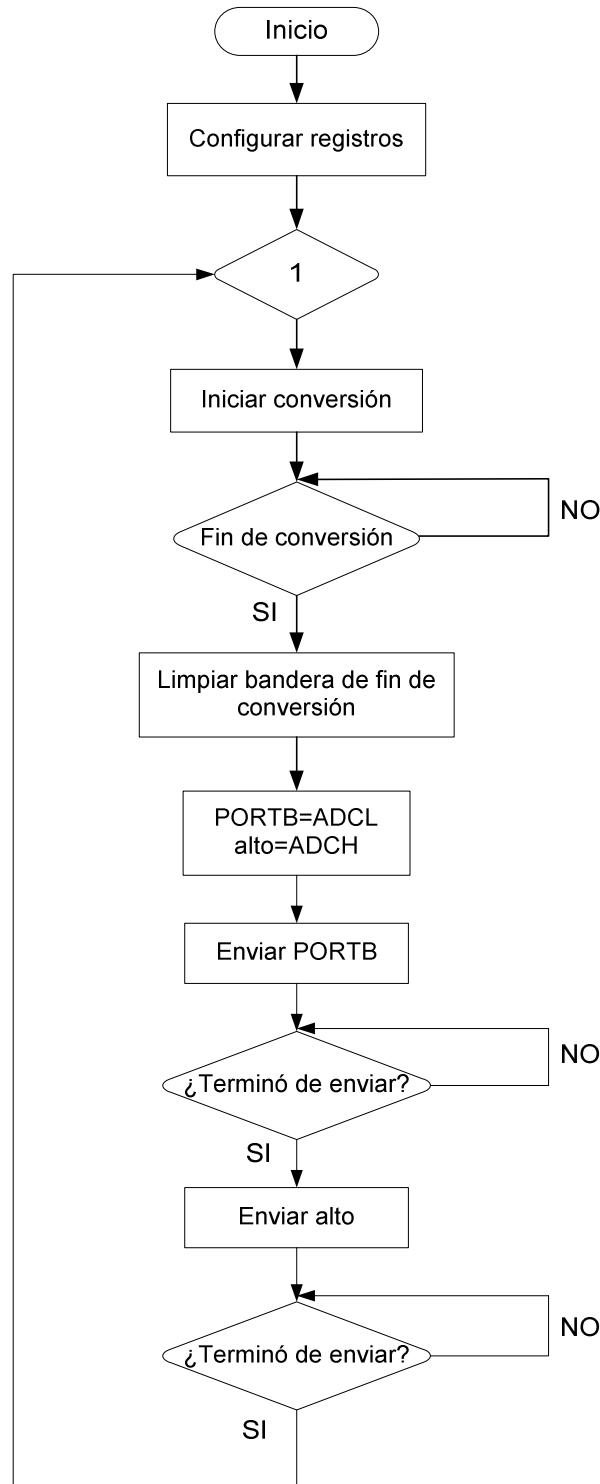


Figura 3.5. Diagrama de flujo del programa implementado en el microcontrolador ATmega8

3.2.4 Pruebas del Programa

El funcionamiento del programa se simula con la ayuda del software Proteus, este software permite ingresar el código en un microcontrolador ATmega8 y simular su comportamiento. Se comprueba que realiza correctamente la conversión analógica/digital así como la comunicación serial, pues se ingresa al ATmega8 un voltaje conocido y se calcula que el número hexadecimal enviado vía serial sea el correspondiente al voltaje dado. La implementación de la simulación se puede observar en la figura 3.6. Se puede observar una fuente de CD en AREF, la cual es el voltaje de referencia (5 V), se observa una fuente de CD conectada al ADC1, que es donde se indica el voltaje a convertir, se emplean los LOGICPROBE para observar el resultado de la conversión analógica/digital en el puerto B y también se utiliza la VIRTUAL TERMINAL para observar lo que se está enviando por el puerto serial a la PC. En el ejemplo de la figura 3.6, se observa por medio del voltímetro como ADC1 se alimenta con 140 mV. Para encontrar el número hexadecimal equivalente para este voltaje se calcula primero su equivalente en un número decimal. Tomando en cuenta que $5 \text{ V} = 1023 = 03\text{FF}_{\text{H}}$ es el máximo valor que puede interpretar el convertidor Analógico/Digital del microcontrolador ATmega8, se calcula el número decimal para 140 mV de la siguiente manera:

$$n = \frac{1023(0.14)}{5} = 28.644$$

Se redondea este número a 29 y este número en binario se representa como: 0000 0000 0001 1101, por lo tanto, en hexadecimal es: 001D_H, y 1D es el número que se observa en el puerto B así como el que se está enviando por el puerto serial, pues esto se observa en la Terminal Virtual.

Se programa el ATmega8 con ayuda del software PonyProg [URL2]. El rendimiento del programa implementado se probó inicialmente simulando la señal analógica por medio de un circuito divisor de voltaje de 0 a 5 V, pues el voltaje de referencia es de 5 V. La señal digital enviada vía serial se lee en la computadora con la ayuda del programa Serial Port Monitor. Este programa permite leer la información recibida por el puerto serial en formato hexadecimal. Aprovechando el hecho de que la parte baja de la conversión analógica/digital se puede observar en el puerto B, se colocan leds a la salida del puerto y se compara el número observado en el puerto B con el obtenido en el Serial Port Monitor, concluyendo que la información se está enviando correctamente. Posteriormente se emplea un programa que se encuentra entre los

ejemplos de LabVIEW para leer la información enviada por el puerto serial. Nuevamente se compara el número digital de 8 bits observado en el puerto B del microcontrolador ATmega8 con el número leído en el programa de LabVIEW, ratificando el correcto funcionamiento del programa.

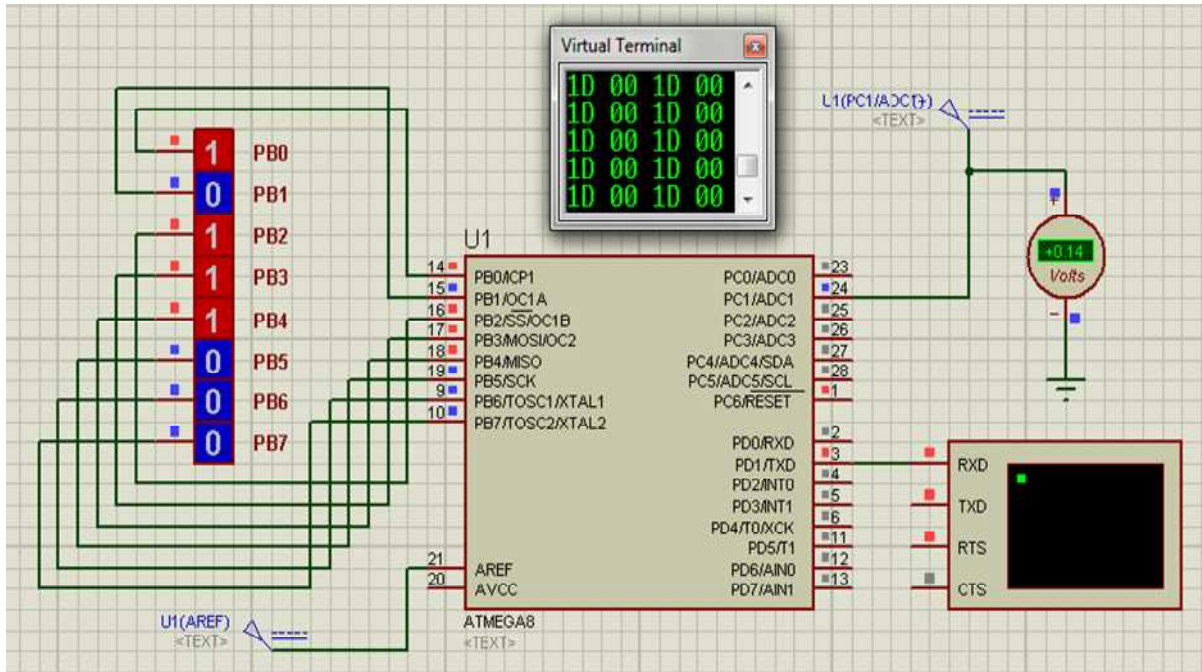


Figura 3.6. Simulación del código para el ATmega8 en Proteus

3.3 Programación en LabVIEW

Se explica cómo se desarrolla el programa para LabVIEW de acuerdo a la metodología de desarrollo incremental, por lo cual en las secciones siguientes se expone como se aplica cada paso de la metodología para el desarrollo de este programa. Iniciando nuevamente con la definición de requerimientos y finalizando con las pruebas que demuestran que el programa este cumpliendo con lo requerido.

Es necesario definir el requerimiento principal así como los requerimientos secundarios del programa a realizar en LabVIEW, puesto que será por medio de este como el usuario podrá observar las mediciones realizadas en el sistema, por lo que deberá cubrir puntos muy específicos para cubrir las necesidades del usuario.

El principal objetivo del programa a desarrollar en LabVIEW es que funcione como una interfaz que permita al usuario ingresar los parámetros de la medición, observar cómo se lleva a cabo esta y finalmente observar los resultados obtenidos de la prueba. Todo esto en un entorno fácil de entender. Los requerimientos específicos son:

1. Permitir ingresar los parámetros más importantes para la medición, como lo son: Fuerza aplicada, diámetro de la probeta, factor de galga y ganancia del circuito puente de Wheatstone.
2. Recibir e interpretar los datos enviados por el microcontrolador ATmega8 vía serial.
3. Mostrar el proceso de medición en base a los resultados obtenidos conforme se realiza la medición.
4. Obtener los valores de interés como lo son el módulo de elasticidad y la deformación unitaria que sufrió la probeta durante la prueba.
5. Guardar los datos de las mediciones en un archivo de texto para poder tener acceso a ellos en un futuro o darles otro tratamiento.

3.3.1 Análisis de los requerimientos

Se analiza cada requerimiento con la finalidad de delimitarlo y definir por completo que es lo que se busca de manera clara. Esto es importante porque el tener definido de forma concreta que es lo que se busca, permite diseñar el programa con mayor facilidad a la vez que se cubren las necesidades planteadas

Con el primer requerimiento se busca que el usuario, antes de realizar la prueba, pueda definir los parámetros de esta: Fuerza, diámetro, factor de galga y ganancia del puente, pues en base a estos parámetros se realizan los cálculos que permiten obtener los resultados finales.

En la segunda condición se establece que el programa debe recibir los datos enviados vía serial por el microcontrolador; sin embargo, como los datos se envían en dos tramas de 8 bits cada una, es necesario concatenar las dos tramas para poder contar con los 10 bits de información. Posteriormente estos datos se convertirán al valor de voltaje que se está midiendo para poder observar las variaciones y por lo tanto la deformación sufrida por la probeta.

El tercer requisito solicita que se muestre como va cambiando el voltaje proveniente del circuito puente de Wheatstone conforme se aplica la fuerza a la probeta. Esto se planea mostrar mediante una gráfica que permita observar la variación en las mediciones al momento de realizar la prueba.

Con el cuarto punto se pide que una vez que se han llevado a cabo las mediciones, se efectúen los cálculos necesarios para obtener los resultados deseados, como lo son la deformación unitaria y sobre todo el **Módulo de elasticidad**, el cual es el objetivo principal del trabajo de tesis.

Con el último requerimiento se busca ir almacenando los datos de la medición en un documento de texto conforme se realiza la prueba, con la finalidad de que después se pueda tener acceso a los datos y observar el comportamiento que presentó el sistema o utilizarlos con otro objetivo.

3.3.2 Diseño del programa

En base a los requerimientos definidos se diseña la estructura general del programa. Dentro del diseño se considera la manera en cómo se presentará al usuario esta interfaz, pues la apariencia del programa es importante debido a que debe proporcionar el ambiente mediante el cual el usuario se comunica con el sistema.

Para presentar la interfaz se empleará una herramienta de LabVIEW llamada Tab Control, esta herramienta permite visualizar el sistema en forma de pestañas, de esta manera es posible seleccionar la acción que se desee realizar de manera sencilla y clara. En la figura 3.7 se muestra un diagrama que define más claramente como está estructurado el programa.

Se observan cinco bloques principales, cada uno representando una opción del Tab Control, por lo que serán los títulos de las pestañas. El bloque correspondiente al Inicio incluirá la presentación del programa, por lo que cumplirá una función de portada.

El bloque de Conceptos incluirá las fórmulas básicas en las que se fundamenta este trabajo, como lo son: La fórmula de esfuerzo, la ley de Hooke, la fórmula para deformación unitaria y la ecuación que describe la relación entre la variación en la salida del voltaje de un circuito puente de Wheatstone y la deformación unitaria sufrida por la galga extensiométrica.

En el bloque de Parámetros se solicita ingresar los valores de las condiciones bajo las cuales se llevarán a cabo las mediciones, por ejemplo: La fuerza límite a aplicar a la probeta, el diámetro de la probeta, la ganancia del amplificador de instrumentación y el factor de galga. Estos valores son necesarios para poder calcular la deformación unitaria que sufre la probeta y por lo tanto el módulo de elasticidad del material con el que está hecha la probeta.

En la pestaña correspondiente a las Mediciones se indica al sistema que empiece a obtener los datos enviados por el microcontrolador y los muestre a través de una gráfica, que ejemplifique el comportamiento del sistema a través del tiempo. Esto con la finalidad de observar cómo se va deformando la probeta al ir incrementando la fuerza de tensión. A su vez, el programa deberá ir guardando en un archivo los datos obtenidos.

Finalmente en el bloque correspondiente a los Resultados se muestran: La deformación sufrida por la probeta, el módulo de elasticidad del material y el esfuerzo sufrido por la probeta. Además se muestra una gráfica esfuerzo-deformación de acuerdo con los resultados experimentales. Estos valores se calculan de acuerdo a los resultados de la prueba así como a los parámetros ingresados inicialmente.

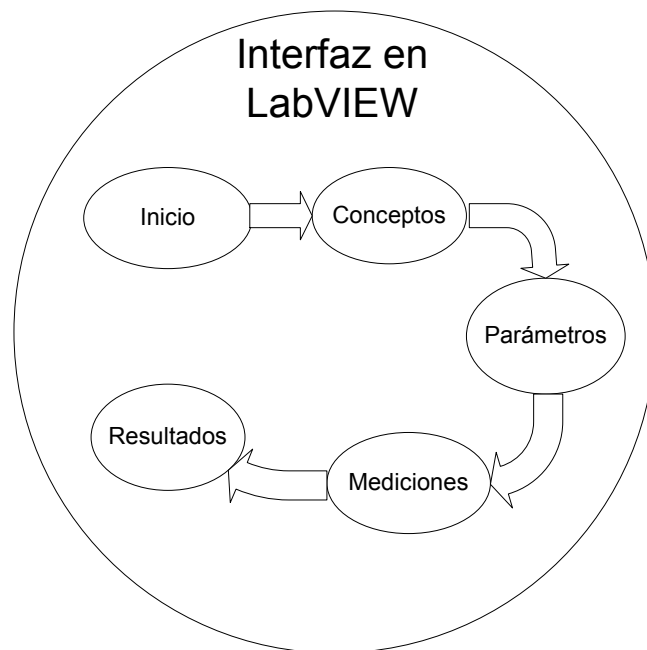


Figura 3.7. Bloques principales del programa desarrollado en LabVIEW

3.3.3 Codificación del programa

Se expondrá la codificación en LabVIEW 8.2 para cada uno de los bloques observados en la figura 3.7. En el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.8 se expone de manera concreta como se lleva a cabo la secuencia del programa. Se observa que es un programa lineal, donde se ejecuta una acción tras otra de principio a fin, sin bucles o decisiones. Cada una de las acciones mostradas en el diagrama de flujo se lleva a cabo dentro de una pestaña, como se expuso en la sección 3.3.2. A continuación se exponen las principales acciones del programa y al final se indica como quedan clasificadas dentro de las distintas pestañas.

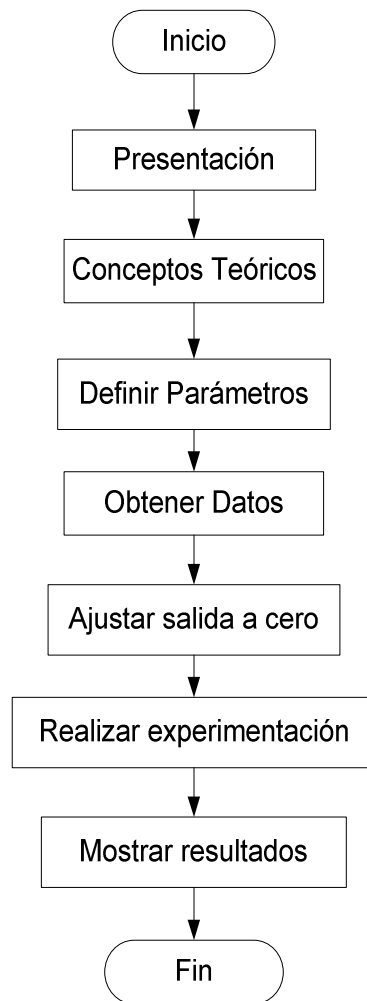


Figura 3.8. Diagrama de flujo para el programa desarrollado en LabVIEW

Presentación

La pestaña correspondiente a la presentación solo se desarrolla en el panel frontal, pues solo cumple una función de carátula para el programa. Por lo tanto, esta pestaña no tiene influencia en el diagrama a bloques del programa, por lo que no interviene de ninguna manera en el comportamiento y respuesta del programa. De esta manera, se realiza un diseño en donde se incluye el logotipo de la universidad y los datos principales del trabajo de tesis.

Conceptos Teóricos

Esta pestaña al igual que la anterior solo tiene influencia sobre el panel frontal, pues en ella se colocan las ecuaciones principales que sirven para calcular los resultados finales después de realizar las mediciones. Estas ecuaciones fundamentan y validan el trabajo, por lo tanto se considera necesario que el usuario tenga conocimiento de ellas. Se presentan cada ecuación mencionando su respectivo nombre o función.

Definir Parámetros

En esta pestaña se solicita al usuario ingresar los principales parámetros que especifican como se llevarán a cabo las mediciones. Los parámetros solicitados son: Fuerza a aplicar, factor de galga, ganancia del amplificador de instrumentación y diámetro de la probeta a utilizar. Estos valores se necesitan para que, por medio de las ecuaciones mostradas en la pestaña anterior, se obtengan los resultados finales. Esta es la primera pestaña que tiene influencia en el diagrama a bloques, aunque de manera sencilla, pues solo se muestran como controles.

Mediciones

Dentro de esta pestaña se incluyen los pasos de obtener datos, ajustar salida a cero y realizar la experimentación. Para explicar de mejor manera esta sección se ejemplifica su estructura mediante el diagrama a bloques mostrado en la figura 3.9.

Lectura del puerto serial

En este módulo se configuran los recursos necesarios para establecer la comunicación serial con el microcontrolador. Los parámetros se definen de la misma manera que para el microcontrolador:

- Baud Rate (Velocidad de transmisión): 9600
- Bits de datos: 8
- Paridad: No
- Bits de paro: 1
- Control de flujo: No

A la salida del *VISA Configure Serial Port* [URL3], que es donde se configuran estos parámetros, se obtienen los 8 bits de datos y una salida de error en caso de que se tenga algún problema al momento de leer el puerto serial.

Interpretación de los valores

Los datos que se obtienen del *VISA Configure Serial Port* se encuentran en modo *string* (cadena), por lo que es necesario convertirlos a modo entero. Los datos obtenidos deben unirse, pues como el microcontrolador envía 10 bits de información, estos se reciben en dos tramas (en una 8 bits y en otra 2 bits), así pues, la parte alta del número, representada por los dos bits, se multiplica por 256 y se suma a la parte baja para obtener el número enviado real. Finalmente, para calcular el voltaje que se esté midiendo, el número obtenido se multiplica por 5, pues 5 V es el voltaje de referencia y se divide entre 1024, dado que se tiene un convertidor analógico/digital de 10 bits y $2^{10} = 1024$.

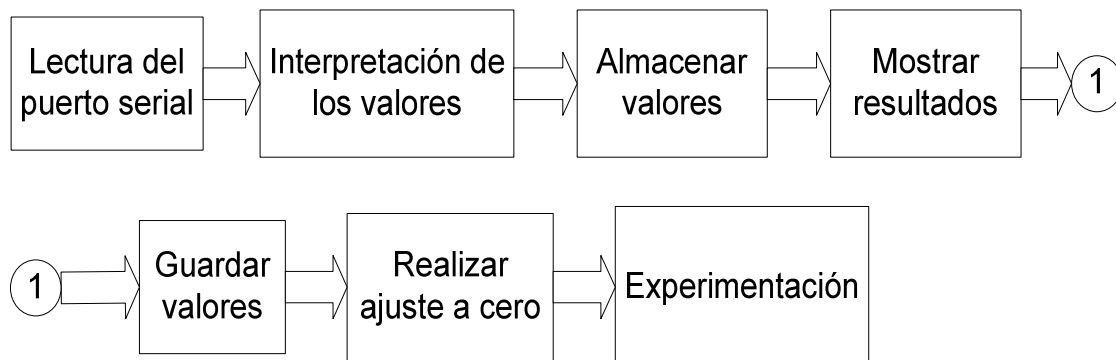


Figura 3.9. Bloques que componen la sección de mediciones

Almacenar valores

Los valores de voltaje que se van obteniendo del sistema deben irse almacenando en una arreglo, el cual se inicializa con 0 y conforme se obtiene un nuevo valor se va ingresando al

arreglo y este va creciendo. Esto tiene varios propósitos, uno de los cuales es que se utiliza para realizar el ajuste a cero, como se explicará posteriormente; además, es necesario ingresar un arreglo al módulo que grafica los valores.

Mostrar resultados

Por medio del arreglo en donde se encuentran los valores de voltaje obtenido del sistema es posible, empleando el bloque de *Waveform Graph*, visualizar en una grafica la evolución de los valores de voltaje a través del tiempo. También, mediante indicadores, se muestran el valor del voltaje en ese momento y la deformación unitaria sufrida por la probeta de acuerdo a ese valor de voltaje, la deformación unitaria se calcula de acuerdo a las ecuaciones mostradas en la pestaña de Conceptos Teóricos.

Guardar valores

A la vez que se van obteniendo y mostrando los valores de voltaje leídos del sistema es necesario ir almacenando estos valores, pues es posible que en un futuro el usuario este interesado en hacer algún otro tipo de uso distinto de estos voltajes. Los datos se almacenan en un documento de texto utilizando el bloque *Write to Measurement File*, el cual permite crear un documento de texto con el título deseado en la ruta que se le indique y almacena los valores en un formato de columnas.

Realizar ajuste a cero

El voltaje que se obtiene inicialmente del sistema difiere de cero, este voltaje puede variar de acuerdo a la temperatura ambiental, por lo tanto, para visualizar de mejor manera la experimentación es necesario ajustar mediante software el valor del voltaje a cero. Este ajuste se realiza por medio de un botón en el panel frontal, el cual el usuario debe presionar antes de iniciar la experimentación, cuando se presiona este botón, el programa obtiene el promedio de los voltajes leídos hasta ese momento, posteriormente resta el valor promedio obtenido al valor del voltaje que se esté leyendo en ese momento, con lo que se obtiene un resultado muy próximo a cero, lo cual se muestra en el indicador del voltaje. Después de esto el programa está listo para iniciar la experimentación.

Experimentación

La experimentación se inicia al indicarle a la máquina de tensión que empiece a aplicar fuerza sobre la probeta, el programa automáticamente registra como va cambiando el voltaje según el sistema de medición, se continúa aplicando la fuerza de tensión hasta llegar al límite establecido inicialmente, en ese momento se elije en el programa la pestaña de resultados, indicándole el fin de la experimentación.

Mostrar resultados

En esta pestaña se calculan los resultados de acuerdo a los obtenidos durante la experimentación. Los cálculos se realizan empleando las ecuaciones mostradas en la pestaña de Conceptos Teóricos. Se muestra en el panel frontal, el Módulo de Elasticidad del material de la probeta, en este caso el aluminio 6061, la deformación unitaria y el esfuerzo sufridos por la probeta. Estos resultados se muestran por medio de indicadores. También se muestran dos gráficas, una con ayuda del bloque *Waveform Graph*, la cual es una copia de la obtenida durante la experimentación y otra utilizando el bloque *XY Graphs*, en la cual se visualiza una gráfica esfuerzo-deformación unitaria en la región lineal de acuerdo con los resultados obtenidos de la experimentación.

En el diagrama a bloques se realizan los cálculos utilizando el voltaje obtenido al final de la experimentación y los bloques para operaciones aritméticas que proporciona LabVIEW. La gráfica esfuerzo-deformación se obtiene utilizando el arreglo de voltajes y basándose en la ecuación (1.3), ya que los voltajes representan la deformación ϵ que va sufriendo la probeta, y el módulo de elasticidad E se obtiene de forma aritmética, no es difícil obtener el correspondiente diagrama esfuerzo-deformación.

En la figura 3.10 se muestra mediante un mapa conceptual como quedan agrupadas las acciones expuestas anteriormente dentro de cada una de las cinco pestañas del programa. Las pestañas son: Inicio, Conceptos, Parámetros, Mediciones y Resultados.

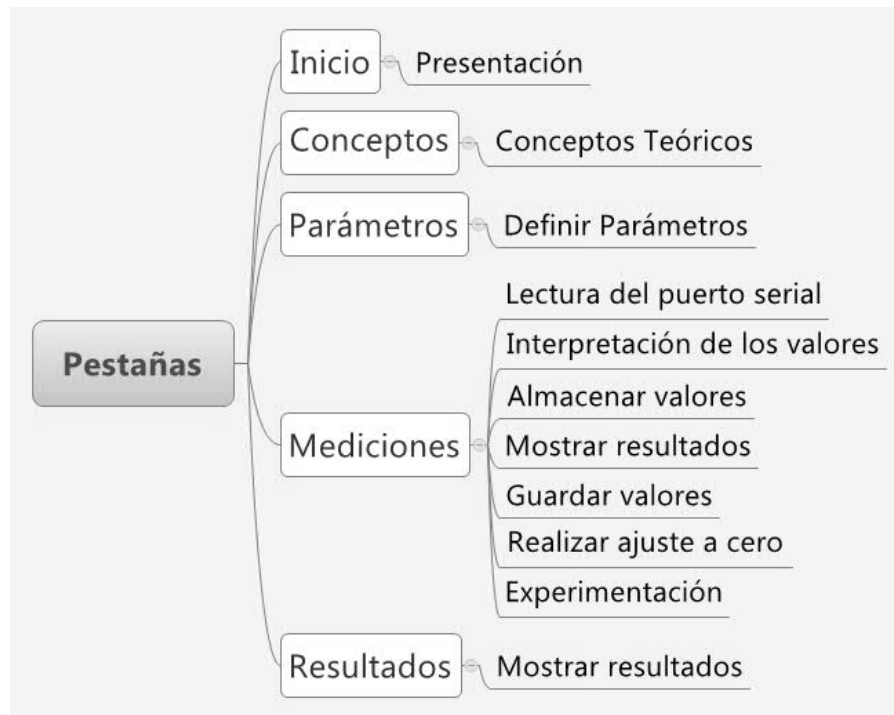


Figura 3.10. Clasificación de las acciones del diagrama de flujo en las pestañas del programa

3.3.4 Pruebas del programa

La primera prueba que se le hace al programa es verificar que esté recibiendo correctamente los valores que le está enviando el microcontrolador, esto se verifica enviando el resultado de la conversión analógica/digital a un puerto del microcontrolador y en este se colocan leds para ver el número que se envía a la PC, en el programa se verifica que el número recibido sea el mismo que el observado con los leds, lo que muestra que no hay problema en la comunicación serial.

Se comprueba que el programa este respondiendo de forma correcta al llevar a cabo algunas experimentaciones de prueba en la máquina de tensión. Se observan los resultados obtenidos por el programa y se comparan con los resultados obtenidos al realizar cálculos manuales, utilizando el cambio de voltaje medido en el sistema de acondicionamiento con la ayuda de un multímetro. De esta manera se comprueba que los cálculos en el programa se estén llevando a cabo de forma correcta, así también que las gráficas observadas ejemplifiquen de forma clara la evolución y los resultados de la experimentación. A continuación se muestran algunas figuras representativas del programa elaborado.



Figura 3.11. Portada del programa desarrollado en LabVIEW



Figura 3.12. Apariencia cuando se selecciona la opción Mediciones

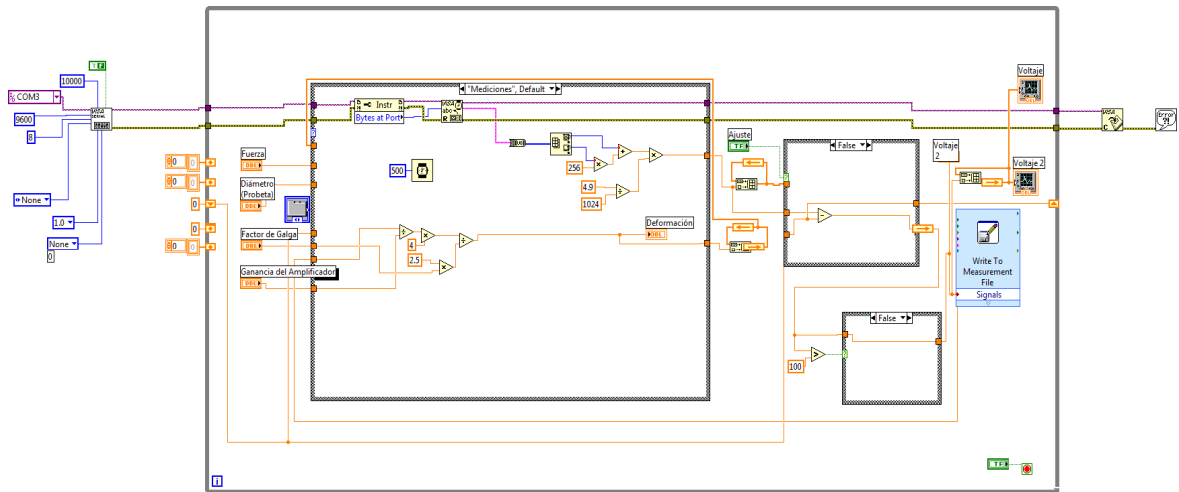


Figura 3.13. Diagrama a bloques para la opción mediciones

En la figura 3.11 se observa la portada del programa, en la figura 3.12 se muestra la opción correspondiente a las mediciones y en la figura 3.13 se observa el diagrama a bloques cuando en el programa se selecciona la opción mediciones.

Capítulo 4.

Pruebas del sistema de medición y obtención del módulo de Young

En este capítulo se exponen las pruebas que se le realizan al sistema con la finalidad de observar su comportamiento e identificar que parámetros pueden influir en las mediciones. Se reportan los resultados obtenidos en todas las pruebas planteadas, y se realiza un análisis de estos resultados con la intención de entender completamente la experimentación. Una vez que se hayan probado algunos de los diversos segmentos que componen el sistema de medición, se procede a realizar la experimentación por completo, buscando alcanzar el objetivo principal planteado al inicio de este trabajo de tesis. Los resultados experimentales que se presentan en este capítulo se compararan con los resultados numéricos obtenidos en el capítulo siguiente, tal como se planteó inicialmente, con el propósito de valorar lo obtenido de forma experimental.

4.1 Circuito Puente de Wheatstone y Amplificador de Instrumentación

Las primeras pruebas se le realizan al circuito Puente de Wheatstone en conjunto con el amplificador de instrumentación, con la finalidad de observar su rendimiento y el efecto de parámetros como el voltaje de offset presente en el amplificador de instrumentación. En este trabajo se dispone de cuatro probetas de prueba con sus respectivas galgas. Se sabe que la temperatura tiene efectos en la resistencia eléctrica de la galga extensiométrica, por lo que se mide la resistencia eléctrica de cada una de las cuatro galgas extensiométricas implementadas en las probetas de aluminio 6061. Esta medición se realiza a las 12:00 p. m., obteniéndose los valores de resistencia mostrados en la tabla 4.1. Se observa que solo dos galgas muestran el

mismo valor de resistencia, la número 1 y la número 4, pues las demás tienen resistencias diferentes, además de que ninguna tiene un valor de resistencia eléctrica exactamente de 350Ω . Aunque las variaciones alrededor del valor ideal de 350Ω son pequeñas, causan que el circuito Puente de Wheatstone no esté equilibrado, obteniéndose valores de voltaje distintos a 0 en la salida V_0 del amplificador de instrumentación. Empleando el modelo matemático definido en la ecuación (1.30) y utilizando el software MATLAB se obtiene la grafica de valores teóricos mostrada en la figura 4.1, donde se muestran los valores del voltaje V_0 a la salida del amplificador de instrumentación, cuando se varía el valor de la resistencia eléctrica en el brazo del circuito Puente de Wheatstone donde se colocará la galga que funcionará como medidor según la figura 2.2. En este caso se varía el valor de la resistencia desde 345Ω hasta 355Ω . La ganancia utilizada para el amplificador de instrumentación es de 1000.

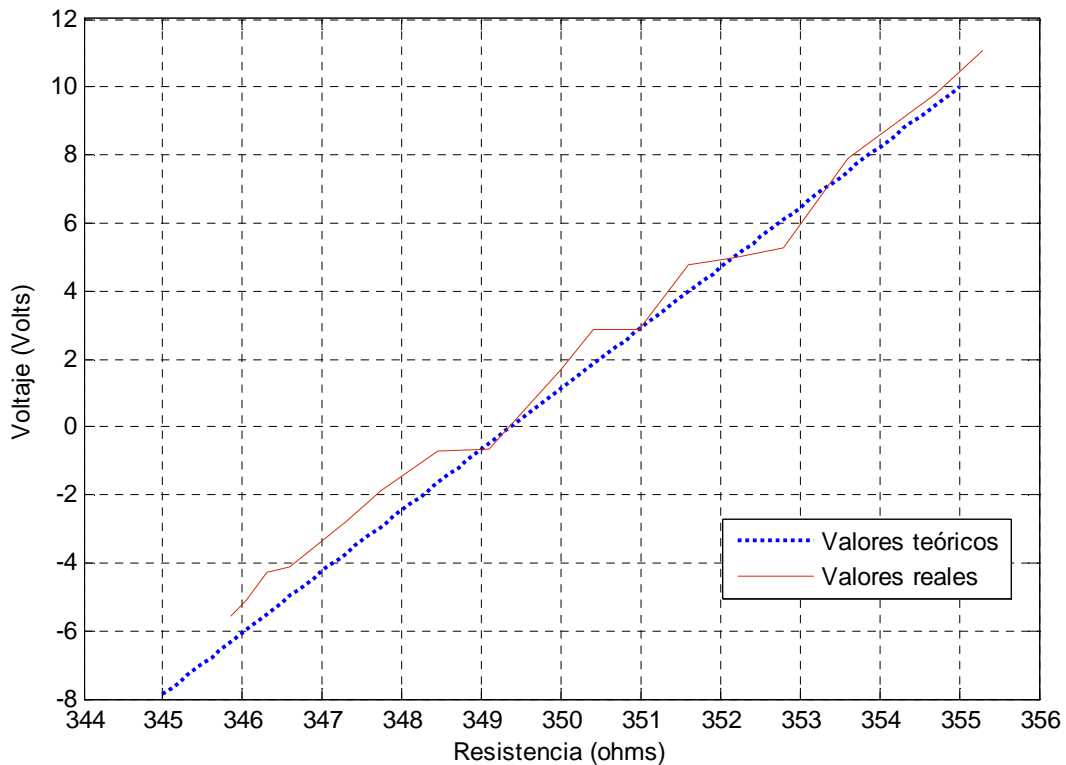


Figura 4.1. Respuesta teórica y real del sistema Puente de Wheatstone-Amplificador de Instrumentación

Como se realiza la misma prueba de forma experimental y se desea que ambas pruebas, teórica y experimental, se lleven a cabo bajo las mismas condiciones, se ingresan al programa en MATLAB los valores de resistencia reales que se miden en los potenciómetros que conforman el

medio Puente de Wheatstone así como el valor de resistencia de la galga empleada como galga pasiva, en este caso la probeta 4. Por lo que los valores de resistencia ingresados al programa se muestran en la tabla 4.2, identificados según la figura 2.2.

Los resultados obtenidos de forma experimental para esta prueba también se muestran en la figura 4.1, mediante la gráfica de valores reales, se observa que se asemejan a los valores teóricos, variando aproximadamente 0.5 V en la mayoría de los puntos. Los valores de resistencia en el eje horizontal para la figura 4.1 no son exactos, debido a que es sumamente difícil alcanzar un valor exacto por medio de un potenciómetro, aun siendo este de precisión, que fue lo que se utilizó para llevar a cabo esta prueba.

Tabla 4.1. Valores de resistencia para las galgas extensiométricas

Número de probeta	Resistencia eléctrica (Ω)
1	349.3
2	347.5
3	350.9
4	349.3

Tabla 4.2. Valores de resistencia empleadas al probar el circuito Puente de Wheatstone

Componente	Resistencia eléctrica (Ω)
R_1	349.3
R_2	348.96
R_3	349

De esta prueba se puede concluir que el circuito puente de Wheatstone y el amplificador de instrumentación están cumpliendo, dentro de un rango aceptable, con lo establecido de forma teórica mediante el modelo matemático definido mediante la ecuación (1.30). Esto ayuda a dar validez al trabajo que se está realizando, pues indica que los cálculos que se realicen para obtener los resultados finales tienen fundamento y representan de forma satisfactoria lo que está sucediendo experimentalmente.

4.2 Variaciones por temperatura

La temperatura ambiental tiene efecto sobre el factor de galga (GF) de la galga extensiométrica. En el caso de los medidores de deformación que se fabrican con materiales de densidad alta de portadores de carga ($\sim 10^{20}$ portadores/cm³) presentan poca variación en su factor de galga con la temperatura. Por otro lado, para materiales con densidad baja de portadores de carga ($< 10^{17}$ portadores/cm³), el factor de galga se aproxima a [8]:

$$GF = \frac{T_0}{T} GF_0 + C_1 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \varepsilon \quad (4.1)$$

Donde GF_0 es el factor de galga a la temperatura de referencia T_0 , en condiciones de cero deformación, y C_1 una constante para un medidor particular. En el presente trabajo no es posible utilizar la ecuación (4.1), debido a que es necesario conocer C_1 , el cual es un dato que se ignora, también se debe conocer la deformación ε que esté sufriendo la galga en ese momento producto de la temperatura, lo cual no se sabe, al no contar con algún instrumento de medición que proporcione esta información.

Debido a esto es necesario tratar de relacionar los cambios de temperatura con el comportamiento del sistema, con la intención de determinar el grado de influencia de este factor ambiental. Como ya se cuenta con todo el sistema de medición, se decide probar el efecto de la temperatura ambiental de la siguiente manera: Se fija en la máquina de tensión la probeta utilizada usualmente para las experimentaciones, sin aplicarle ningún tipo de carga, solamente se sujeta en ambos extremos, posteriormente se enciende el sistema de medición y se deja funcionando libremente una parte del día, se le indica al programa de LabVIEW que vaya adquiriendo y guardando cada 5 minutos el voltaje entregado por el sistema. También se mide la temperatura ambiente utilizando un sensor LM35, estas mediciones se toman manualmente a la par del sistema cada 5 minutos. La prueba da inicio aproximadamente a las 12:09 p. m. y finaliza a las 6:14 p. m. La variación de temperatura a lo largo del día se muestra en la figura 4.2 y la correspondiente variación de voltaje se observa en la figura 4.3.

Se observa en la figura 4.2 como la temperatura va ascendiendo y descendiendo debido a las condiciones ambientales de ese día. A la par, la señal del sistema oscila presentando en algunos casos impulsos momentáneos de corta duración, ya sean en ascenso o descenso. El rango de

voltajes en el cual varía es amplio; sin embargo, no es posible asegurar que estas variaciones se deban totalmente a los cambios de temperatura. No obstante si se puede decir que la temperatura tiene cierta influencia en las mediciones, la cual no es posible cuantificar. Por lo tanto, si se presenta un cambio brusco de temperatura durante la prueba, esto puede afectar los resultados y lo recomendable es repetir la medición.

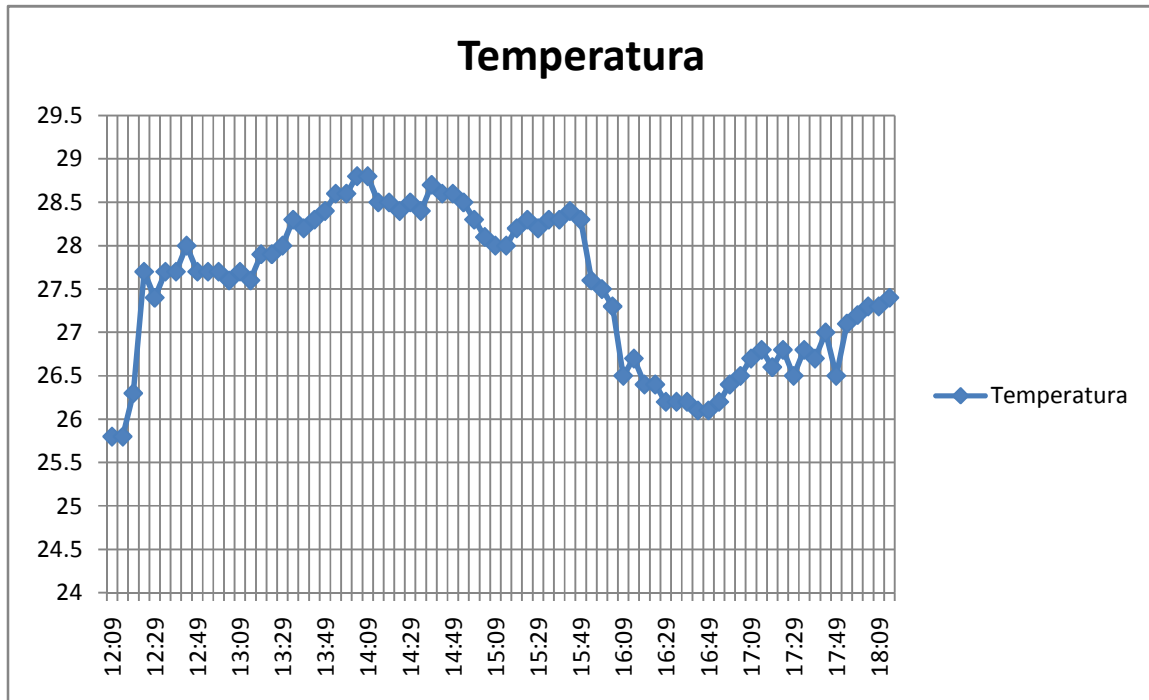


Figura 4.2. Variación de temperatura a lo largo del día

4.3 Mediciones Analógicas

Las primeras mediciones se realizan solo empleando lo elaborado durante el desarrollo de Hardware. Los cambios de voltaje se miden con la ayuda de un multímetro digital, estas mediciones de voltaje se realizan a la salida del filtro paso-bajas. El procedimiento para realizar estas mediciones es el siguiente:

- Se enciende el sistema.
- Se espera algunos minutos a que se estabilice el sistema
- Se mide el voltaje a la salida del filtro paso-bajas y se establece este voltaje como V_i

- Se lleva a cabo la experimentación al someter gradualmente la probeta a una fuerza de tensión conocida
- Al llegar al valor de la fuerza final indicado a la máquina se mide nuevamente el voltaje a la salida del filtro paso-bajas. Si la prueba fue exitosa valor del voltaje debió haberse incrementado.
- Tomando el valor del cambio de voltaje y realizando algunos cálculos se obtiene el módulo de elasticidad del aluminio 6061.

Las ecuaciones empleadas para realizar el cálculo del módulo de elasticidad E en base al cambio de voltaje registrado son las siguientes:

$$\Delta VP = \frac{\Delta VA}{G} \quad (4.2)$$

Donde ΔVP es el cambio de voltaje en el circuito Puente de Wheatstone, ΔVA es el cambio de voltaje obtenido del amplificador de instrumentación y G es la ganancia del amplificador de instrumentación.

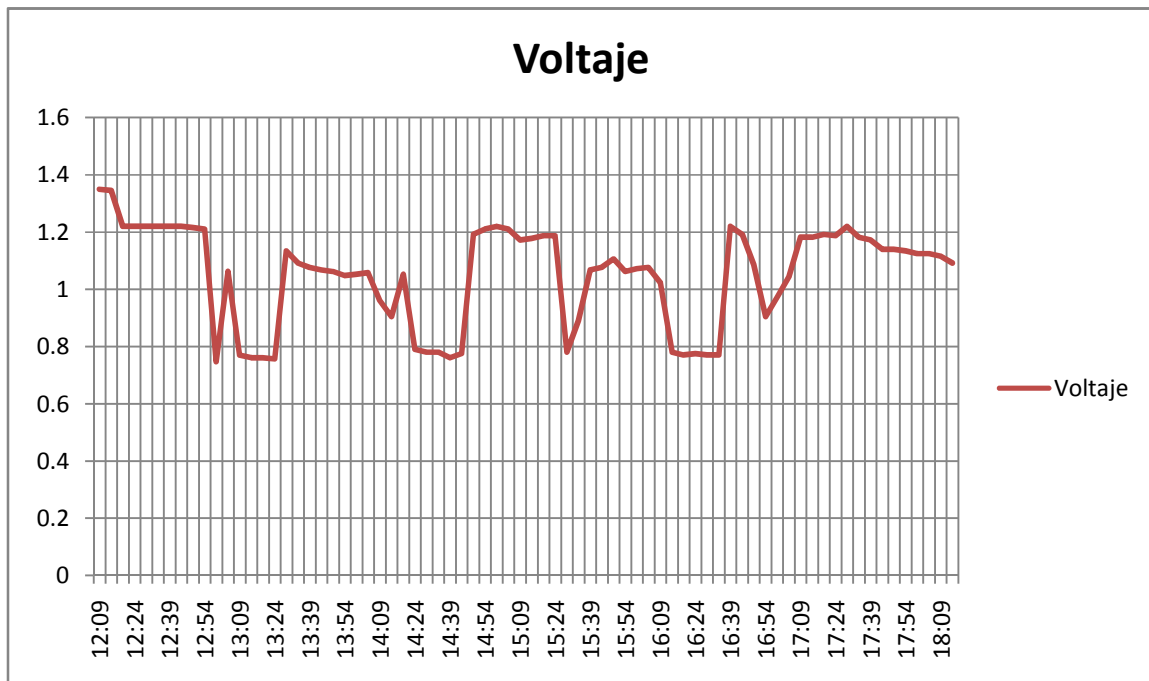


Figura 4.3. Variación de voltaje debido a la temperatura a lo largo del día

De la ecuación (1.8) se obtiene la deformación unitaria al conocerse el cambio de voltaje en el Puente de Wheatstone:

$$\varepsilon = \frac{4\delta E_0}{E_i GF} \quad (4.3)$$

Donde δE_0 es el cambio de voltaje en el Puente de Wheatstone, E_i es el voltaje de alimentación del Puente de Wheatstone y GF es el factor de galga. También se utiliza la ecuación para obtener el área de un círculo:

$$A = \pi r^2 \quad (4.4)$$

Donde A es el área de la sección transversal de la probeta y r es el radio de la misma. Como se conoce la fuerza de tensión que se aplica durante la prueba y también se conoce el área, se emplea la ecuación (1.1) para calcular el esfuerzo σ . Finalmente despejando la ecuación (1.3) para obtener el módulo de elasticidad E y empleando el resultado de la ecuación (4.3) se tiene:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de esta prueba, F es la fuerza de tensión aplicada, V_i es el voltaje inicial del sistema, V_f es el voltaje final del sistema, ΔV es el cambio de voltaje observado y E es el módulo de elasticidad calculado en base a las ecuaciones expuestas.

Tabla 4.3. Resultados obtenidos al realizar las primeras pruebas del sistema

F (N)	V_i (V)	V_f (V)	ΔV (V)	E (GPa)
2300	0.59	0.82	0.23	100
2300	0.95	1.2	0.25	96
2800	0.5	0.83	0.33	88.5
1600	0.215	0.44	0.225	74.2
1500	0.225	0.44	0.215	72.8

Se observa que los valores para el módulo de elasticidad varían desde 72.8 GPa hasta 100 GPa. También es posible apreciar que el voltaje inicial V_i cambia, por lo tanto, para realizar las mediciones se parte de distintos puntos de referencia. Este fenómeno se puede explicar debido a que fue necesario encender y apagar el sistema electrónico para cada prueba, provocando diferentes puntos de estabilidad en cada experimento.

4.4 Obtención experimental del módulo de Young

Los resultados definitivos se obtienen una vez que ya se cuenta con la integración de todo el sistema. De esta forma el sistema trabaja de forma automática, sin necesidad de tomar lecturas de voltaje manualmente. Los cálculos los realiza el programa elaborado en LabVIEW y arroja los resultados deseados en forma gráfica y con indicadores numéricos. Los pasos para llevar a cabo estas mediciones son los siguientes:

- Se realizan todas las conexiones del sistema electrónico: Se conectan las galgas, las conexiones de alimentación de voltaje y se conecta el puerto serial de la computadora al sistema electrónico (Figura 4.4).
- Se enciende la computadora encargada de controlar la máquina de tensión y se ingresa al programa TRAPEZIUM (Programa de la máquina de tensión universal AGS-J).
- Se enciende la máquina de tensión y se fija la galga que se utilizará para llevar a cabo la experimentación (Figura 4.5).
- Se desarrolla un nuevo método en el programa TRAPEZIUM, donde se le indica a la máquina cual será la fuerza de tensión máxima que se le aplicará a la probeta (Figura 4.6).
- Se enciende el sistema electrónico y se espera cerca de 15 minutos a que se estabilice.
- Se ejecuta el programa desarrollado en LabVIEW y se ingresan los parámetros de la experimentación (Figura 4.7).
- Se selecciona la pestaña mediciones y se espera cerca de 30 segundos a que el sistema tome las lecturas necesarias para realizar el ajuste a cero.
- Se enciende y apaga el botón de ajuste, con lo que el sistema ajustará aproximadamente a cero el punto de partida de las mediciones.

- Se ponen en cero los parámetros **fuerza y deformación** de la máquina de tensión por medio de dos botones localizados en su panel frontal.
- Se le indica a la máquina que puede empezar a aplicar la fuerza de tensión (Figura 4.8).
- Se observa en el programa cómo va cambiando el voltaje gradualmente conforme la máquina aplica la fuerza de tensión a la probeta y también como va incrementando la deformación unitaria en base a los cambios de voltaje registrados.
- Cuando la máquina de tensión termina de aplicar la fuerza, lo indica por medio de un sonido y en el programa TRAPEZIUM, ante lo cual se selecciona en el programa de LabVIEW la pestaña de resultados.
- El programa muestra los resultados siguientes: Módulo de elasticidad E , Esfuerzo σ sufrido por la probeta y deformación unitaria ε sufrida por la probeta (Figura 4.9).
- Finalmente también se tiene un documento de texto en donde se almacenaron todas las mediciones adquiridas durante el desarrollo de la prueba.

Los resultados de este trabajo de tesis se obtienen al llevar a cabo varias pruebas, los cuales se muestran en la tabla 4.4. La probeta utilizada es la número 1, la cual tiene un diámetro de 1/2 “. En la tabla se indican la fuerza F que se aplicó, el módulo de elasticidad E obtenido, la deformación unitaria ε obtenida, el esfuerzo σ sufrido por la probeta y las gráficas que se obtuvieron para la experimentación y resultados de cada prueba.

En la tabla 4.4 se muestra que los resultados para el módulo de elasticidad E se encuentran entre 87.87 GPa y 97.03 GPa, de lo cual se puede decir que la variación es menor que en las primeras mediciones, esto puede explicarse debido a que en las primeras mediciones se tomaba el punto de partida V_i de manera manual, observando en el multímetro; sin embargo, en las presentes mediciones el voltaje inicial V_i lo obtiene el programa desarrollado en LabVIEW de manera más confiable, al tomar en cuenta varias lecturas y promediar, obteniendo un valor de V_i más representativo.



Figura 4.4. Sistema electrónico de medición



Figura 4.5. Galga fijada en la máquina de tensión

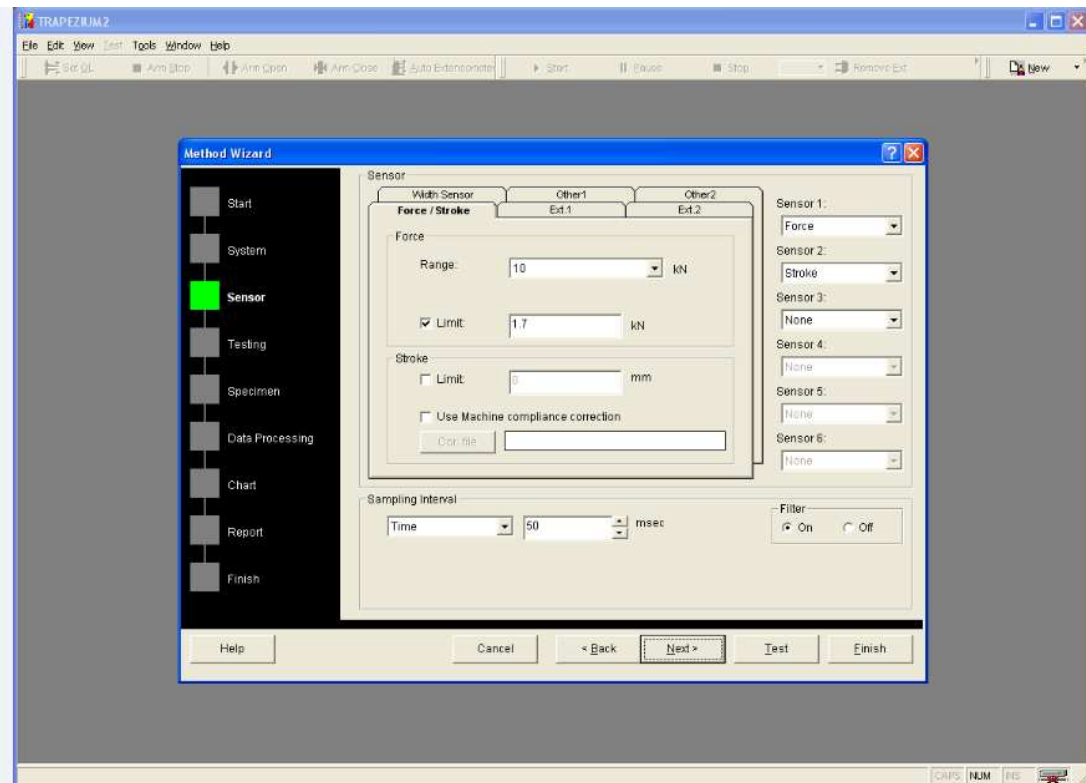


Figura 4.6. Establecimiento de la fuerza de tensión límite en el programa TRAPEZIUM

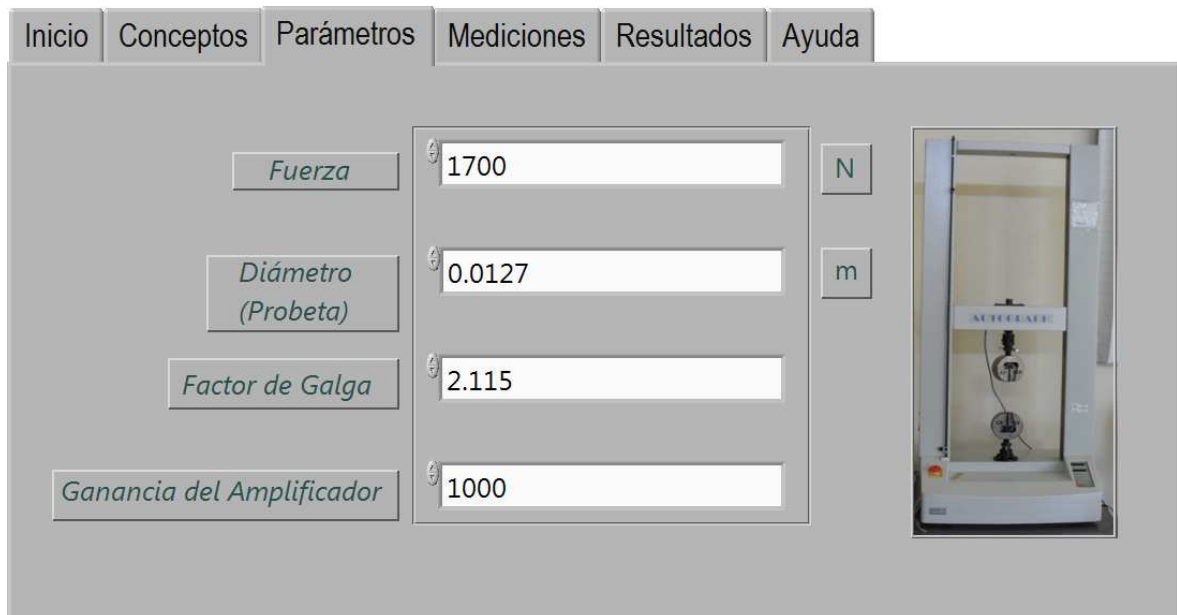


Figura 4.7. Establecimiento de los parámetros de la experimentación

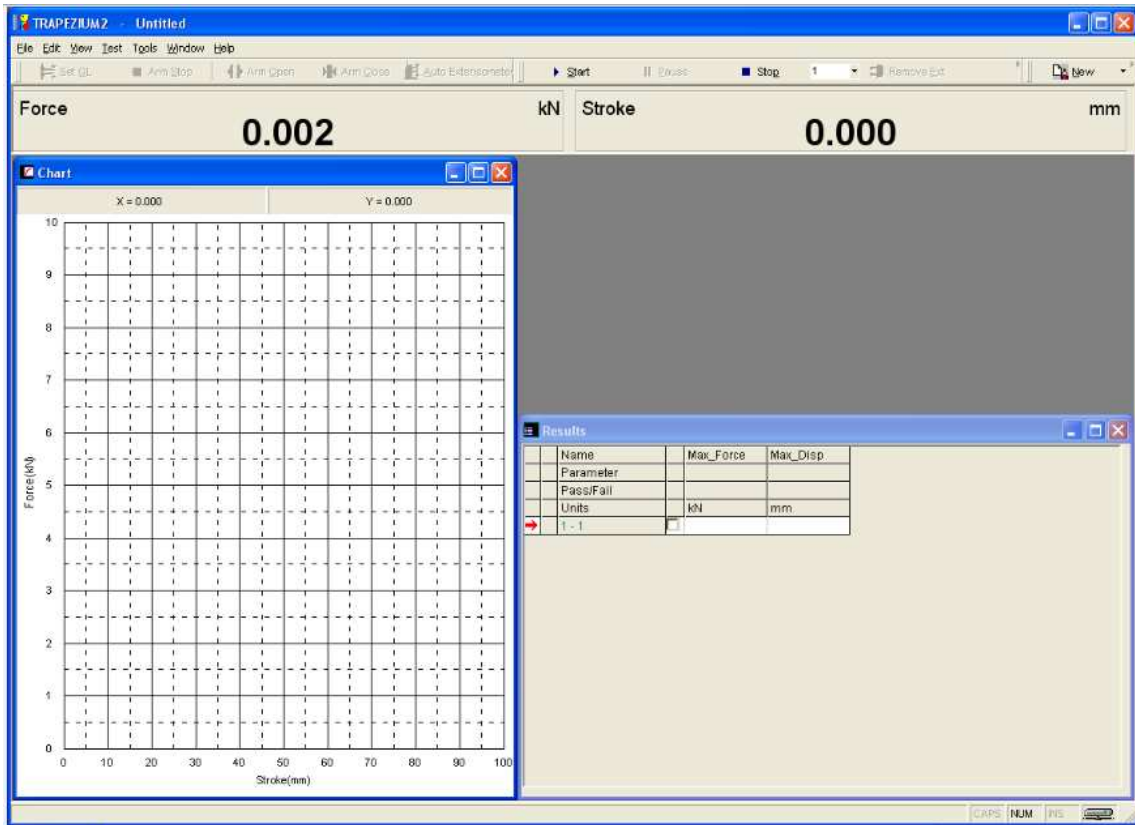


Figura 4.8. Panel donde se realiza la prueba en el programa TRAPEZIUM

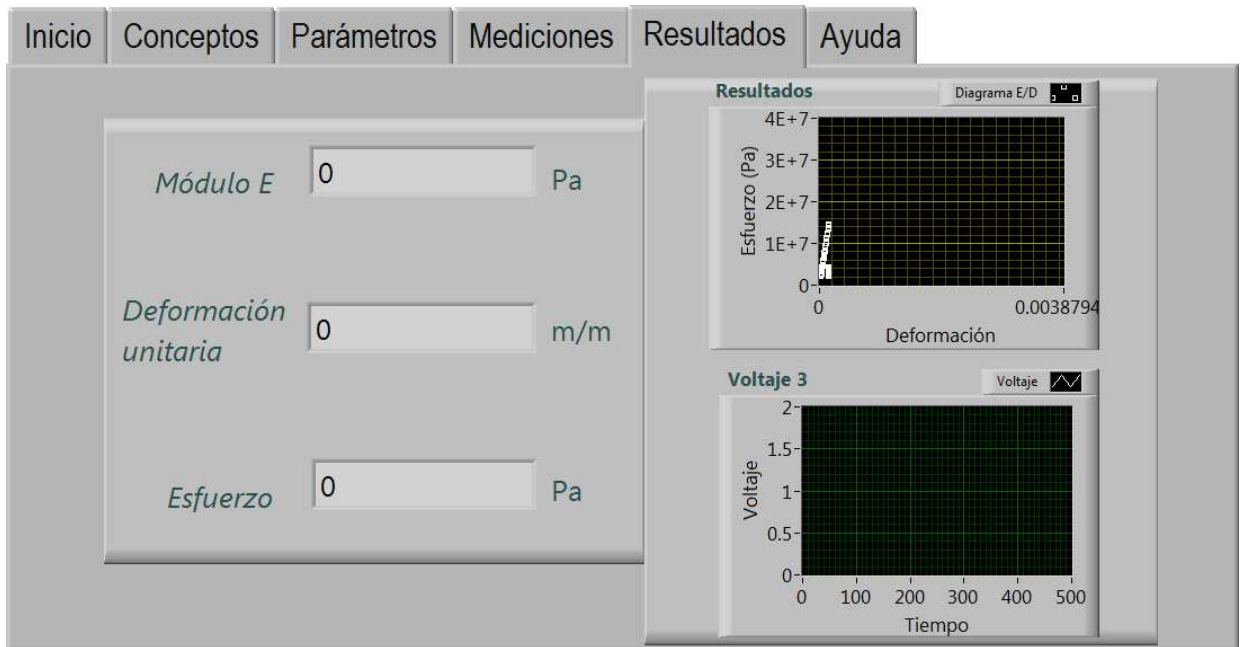
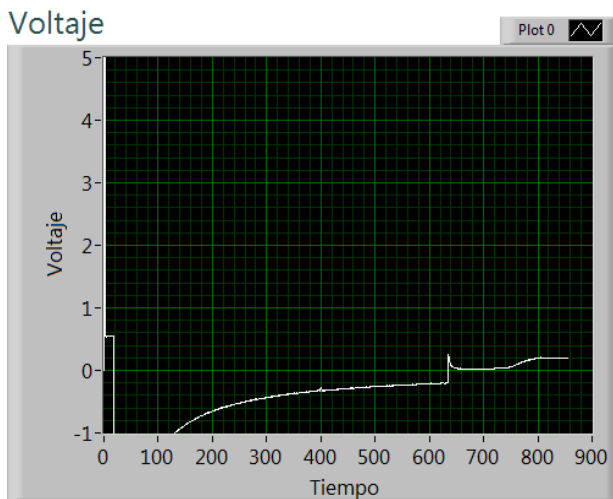


Figura 4.9. Pestaña donde se muestran los resultados proporcionados por el programa en LabVIEW

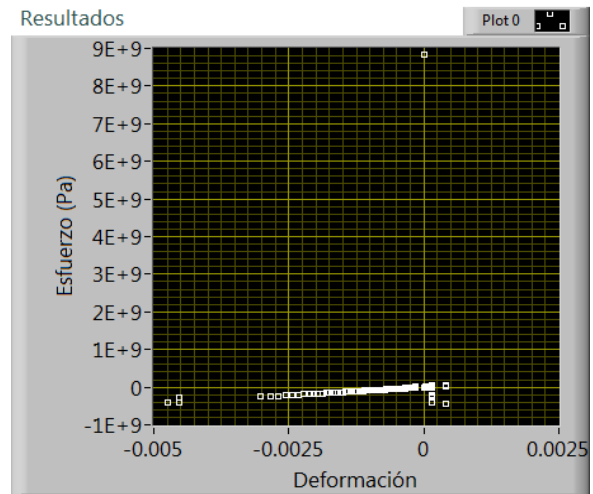
Tabla 4.4 Resultados obtenidos al implementar por completo el sistema de medición

F (N)	E (GPa)	ϵ ($\times 10^{-4}$)	σ (MPa)	Gráfica experimentación	Gráfica resultados
1700	87.87	1.527	13.42	Figura 4.10 (a)	Figura 4.10 (b)
2000	95.75	1.648	15.78	Figura 4.11 (a)	Figura 4.11 (b)
1900	97.03	1.545	14.99	Figura 4.12 (a)	Figura 4.12 (b)
1700	88.94	1.508	13.42	Figura 4.13 (a)	Figura 4.13 (b)

En las gráficas de experimentación se puede observar el comportamiento que se planteó cuando se expusieron los pasos a seguir para realizar los experimentos, pues se observan en un principio voltajes mayores a 0.5 V y que se mantienen por un momento para que luego, cuando se pulsa el botón de ajuste, estos voltajes caigan a un valor de aproximadamente 0 V (ver Figuras 4.11, 4.12 y 4.13), y posteriormente empieza a incrementarse el voltaje cuando se aplica la fuerza de tensión sobre la probeta, hasta que nuevamente alcanza estabilidad, que es cuando se alcanza la fuerza de tensión límite, siendo este valor de voltaje en donde se estabiliza la gráfica, el que se toma para llevar a cabo los cálculos y obtener los resultados finales.

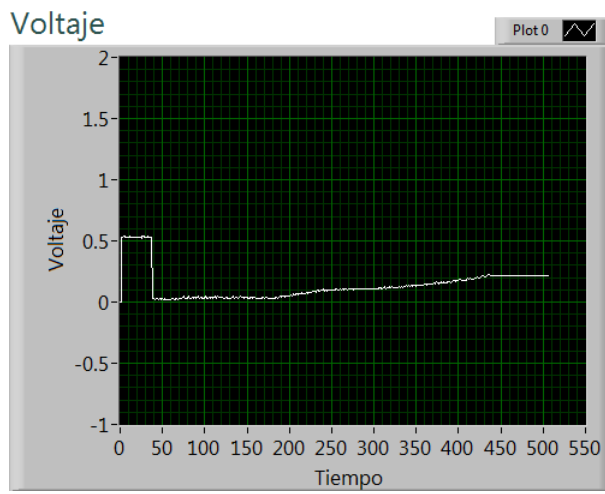


(a)

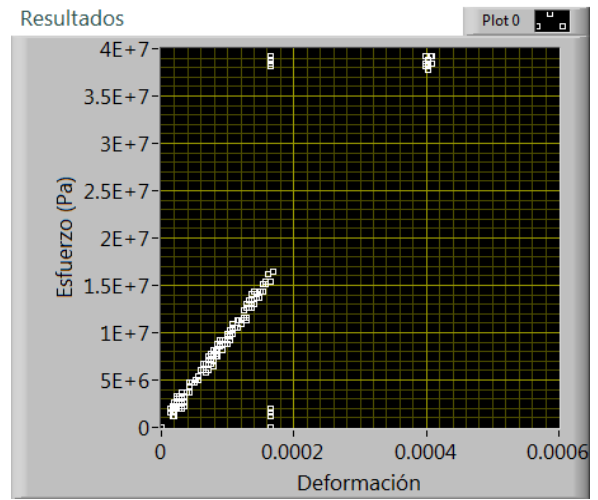


(b)

Figura 4.10. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación

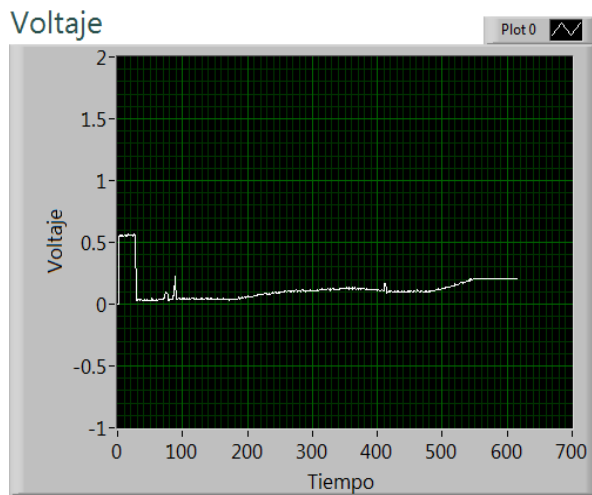


(a)

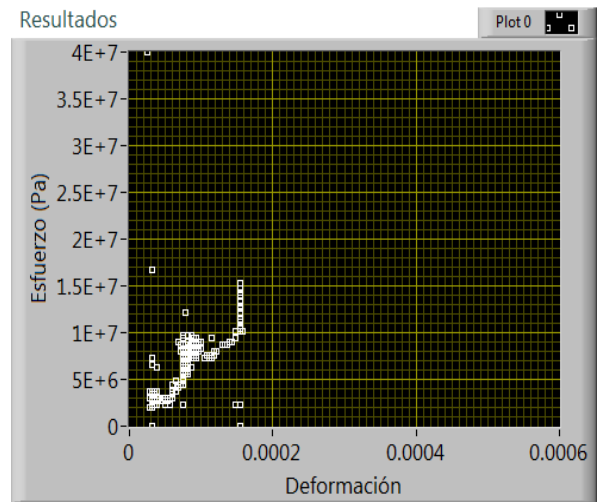


(b)

Figura 4.11. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación



(a)



(b)

Figura 4.12. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación

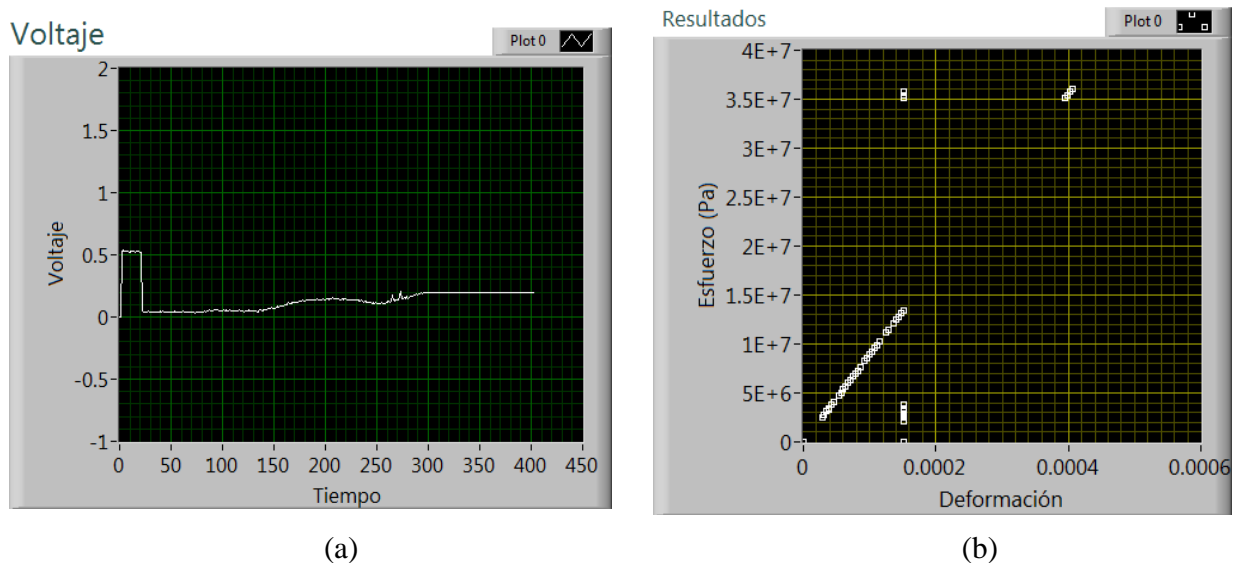


Figura 4.13. (a) Gráfica de deformación. (b) Gráfica esfuerzo-deformación

Se observa que aun para dos mediciones con el mismo valor de fuerza de tensión, en el caso de 1700 N, no se produce un resultado exactamente igual; sin embargo la diferencia entre ambos resultados es muy pequeña, por lo que se puede considerar que las mediciones son satisfactorias. En la figura 4.12 (b) se observa que la gráfica esfuerzo-deformación de resultados presenta un comportamiento extraño, esto se da debido a que en la correspondiente gráfica de experimentación se observan ciertas irregularidades, esto es, algunos picos de voltaje que afectan al momento de calcular las correspondientes deformaciones, pues estos valores no son reales y pueden ser causa del sistema electrónico o del efecto de la temperatura. A pesar de esto se observa claramente una pendiente ascendente en esta gráfica esfuerzo-deformación.

Capítulo 5.

Comparación de la deformación unitaria por medio de elementos finitos y galgas extensiométricas

El método de los elementos finitos es un método numérico el cual se puede utilizar para obtener una solución cercana a una solución exacta de complicados problemas en ingeniería. El método fue desarrollado por primera vez por Turner *et al.*, (1956) para el análisis de los esfuerzos y las deformaciones de una estructura de aeronaves. Actualmente, el método de los elementos finitos es considerado uno de los mejores métodos para resolver una gran variedad de problemas prácticos eficientemente, entre los que se pueden citar, problemas estructurales, dinámicos, de flujo de fluidos, de frecuencias naturales, del tipo magnético, etc. En mecánica de materiales es popular, debido a que se puede aplicar a estructuras con geometrías curvas, en donde utilizar el método de diferencias finitas resultaría complicado. Otra de sus ventajas es que una vez formulado el *problema en cuestión* en elementos finitos, los programas desarrollados se pueden utilizar para la solución de otros problemas de diferentes geometrías con solo cambiar las condiciones de frontera y/o los datos de entrada.

En el método de elementos finitos, el dominio en estudio es considerado como la suma de muchos pequeños subdominios interconectados, los cuales se conocen como elementos finitos. En cada una de las piezas ó elementos, se asume una solución aproximada, transformando el dominio (ecuación diferencial) en un sistema de ecuaciones algebraicas. En este capítulo se aplicará el método de los elementos finitos a una barra sometida a carga axial con la misma geometría y carga que se utilizó en las probetas de prueba. Se proporcionará el módulo de Young E obtenido en los experimentos y la deformación unitaria obtenida numéricamente se comparará con la deformación medida con la galga extensiométrica.

5.1 Energía de deformación de una barra bajo carga axial

La energía de deformación es un concepto fundamental en la mecánica aplicada, y los principios de la energía de deformación se usan ampliamente a fin de establecer las respuestas de máquinas y estructuras frente a cargas estáticas y dinámicas. En este capítulo se utiliza la energía de deformación para obtener el modelo por elementos finitos de una barra bajo carga axial. Considérese una barra BC de longitud L y sección transversal A , empotrada en B y sometida a una carga axial P que se incrementa lentamente, como se muestra en la figura 5.1. El trabajo $d\Lambda$ realizado por la carga P cuando la carga se alarga una pequeña cantidad $d\delta$ es:

$$d\Lambda = Pd\delta \quad (5.1)$$

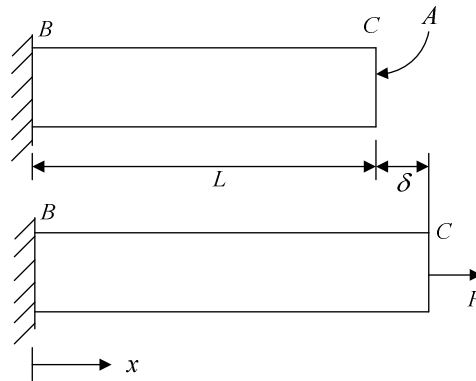


Figura 5.1: Barra sometida a una carga axial

El trabajo total Λ efectuado por la carga cuando la barra experimenta una deformación δ es:

$$\Lambda = \int_0^{\delta_1} Pd\delta \quad (5.2)$$

y es igual al área bajo el diagrama carga-deformación. El trabajo realizado por la carga P , cuando se le aplica lentamente a la barra, debe producir el incremento de alguna energía asociada con la deformación de la barra. Esta energía es la *energía de deformación* de la barra. Dividiendo la energía de deformación Λ entre el volumen $V = AL$ de la barra se tiene

$$\frac{\Lambda}{V} = \int_0^{\delta_1} \frac{P}{A} \frac{d\delta}{L} \quad (5.3)$$

Recordando que P/A es el esfuerzo normal σ en la barra y δ/L la deformación unitaria normal ϵ , la ecuación (5.3) se escribe como:

$$\frac{\Lambda}{V} = \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \quad (5.4)$$

donde ϵ_1 es la deformación unitaria correspondiente a la deformación δ_1 . La energía de deformación por unidad de volumen, Λ/V , es la *densidad de energía de deformación*. Para valores de σ que estén dentro del límite de proporcionalidad, se utiliza $\sigma = E\epsilon$ en la ecuación (5.4) y se escribe

$$\frac{\Lambda}{V} = \frac{1}{2} E \epsilon^2 = \frac{1}{2} \sigma \epsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (5.5)$$

El valor de la energía de deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos normales uniaxiales se obtiene integrando la ecuación (5.5)

$$\Lambda = \int \frac{\sigma^2}{2E} dV = \int \frac{E\epsilon^2}{2} dV \quad (5.6)$$

Esta expresión es válida sólo para deformaciones elásticas y se conoce como *energía de deformación elástica* del cuerpo.

5.2 Construcción del modelo del elemento finito

En la figura 5.2 se muestra una barra unidimensional cargada con fuerzas P en diferentes partes del cuerpo. La barra está formada por diferentes materiales de modulo E y diferentes secciones transversales A . A continuación se modela por elementos finitos tomando en cuenta las siguientes consideraciones.

- La barra consiste de tres materiales diferentes, por lo tanto, será necesario considerar un elemento finito por cada material (tres elementos en total).

- Si la barra estuviese compuesta de un solo material, también habría sido necesario utilizar tres elementos debido a que existen tres secciones transversales diferentes, como se muestra en la figura 5.2.
- Es conveniente definir un nodo en cada lugar donde se aplica una carga

El modelo resultante para la geometría y las cargas aplicadas a la barra es de cuatro elementos y cinco nodos. Los números de los elementos están encerrados entre paréntesis para distinguirlos de los números de nodos.

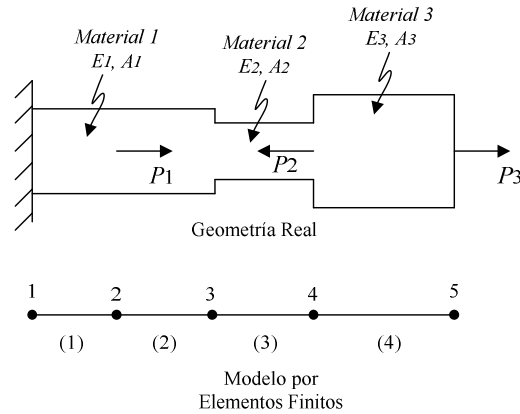


Figura 5.2: Modelo por elementos finitos de una barra bajo carga axial

En un problema unidimensional, se permite que cada nodo se desplace sólo en la dirección $\pm x$. Así cada nodo tiene un solo *grado de libertad* (gdl). El modelo del elemento finito de cinco nodos en la figura 5.2 tiene cinco grados de libertad. Los desplazamientos a lo largo de cada gdl se denotarán por U_1, U_2, \dots, U_5 . El vector columna $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_5]^T$ se llama *vector de desplazamiento global* (Nota: usamos U en lugar de δ para estar de acuerdo con la literatura). El vector de carga global se denota por $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_5]^T$. Los vectores \mathbf{U} y \mathbf{P} se muestran en la figura 5.3.

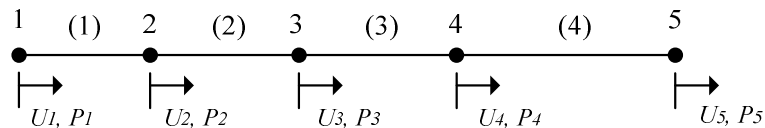


Figura 5.3: Vectores globales \mathbf{U} y \mathbf{P}

Cada elemento tiene dos nodos y en algunos casos son compartidos con otros elementos. En cada nodo existen desplazamientos U_i y U_j para un elemento (e) como se muestra en la figura 5.4.

Una regla es tener conocimiento de la forma como varían los parámetros desconocidos, en este caso los desplazamientos. Aquí es donde la experiencia de los ingenieros entra en el proceso de solución. Para el caso de la barra sujeta a cargas axiales, se propone una función de desplazamiento lineal entre nodos y la ecuación para los desplazamientos U es:

$$u = a + b x \tag{5.7}$$

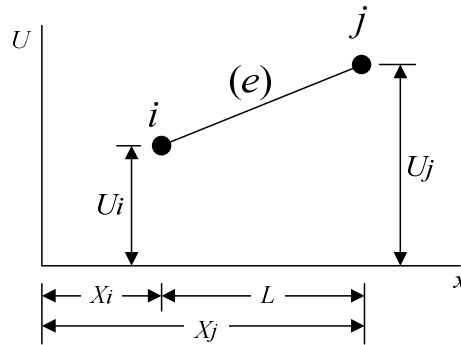


Figura 5.4. Desplazamientos U_i y U_j para un elemento (e)

Los coeficientes a y b se pueden determinar usando las condiciones nodales

$$\begin{aligned} u &= U_i && \text{en } x = X_i \\ u &= U_j && \text{en } x = X_j \end{aligned} \tag{5.8}$$

Sustituyendo (5.8) en (5.7) se obtiene la siguiente ecuación lineal:

$$u = \left(\frac{X_j - x}{L}\right) U_i + \left(\frac{x - X_i}{L}\right) U_j \tag{5.9}$$

donde $L = X_j - X_i$. La ecuación (5.9) es la ecuación de la línea recta en una forma estándar utilizada en elementos finitos. Los valores nodales están multiplicados por funciones lineales de x , las cuales se conocen como *funciones de forma* ó *funciones de interpolación*. Estas funciones de forma se denotan por la letra N con un subíndice que indica el nodo al cual están asociados. Las funciones de forma de la ecuación (5.9) se denotan por N_i y N_j :

$$N_i = \frac{X_j - x}{L} \quad \text{y} \quad N_j = \frac{x - X_i}{L} \tag{5.10}$$

La ecuación (5.9) se puede reescribir como

$$u = N_i U_i + N_j U_j = [N]\{U\} \quad (5.11)$$

donde $[N] = [N_i \quad N_j]$ es el vector fila de funciones de forma y

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix}$$

es el vector columna que contiene los valores nodales o desplazamientos. La ecuación (5.11) se puede aplicar a cada uno de los elementos de la figura 5.3 y construir una ecuación suave para la región unidimensional. Cada una de estas ecuaciones se puede escribir como:

$$u^{(e)} = N_i^{(e)} U_i + N_j^{(e)} U_j$$

donde

$$N_i^{(e)} = \frac{x_j - x}{x_j - x_i} \quad \text{y} \quad N_j^{(e)} = \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

El superíndice (e) indica el elemento. Todo lo que se requiere para completar el proceso es insertar los valores correctos de i, j y e para cada elemento. Los valores de i y j para determinado e se obtiene de la malla (ver tabla 5.1).

Tabla 5.1: Nodos i y j para los elementos (e) según la figura 5.3

e	i	j
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5

La ecuación para cada elemento es:

$$\begin{aligned} u^{(1)} &= N_1^{(1)} U_1 + N_2^{(1)} U_2 \\ u^{(2)} &= N_2^{(2)} U_2 + N_3^{(2)} U_3 \\ u^{(3)} &= N_3^{(3)} U_3 + N_4^{(3)} U_4 \\ u^{(4)} &= N_4^{(4)} U_4 + N_5^{(4)} U_5 \end{aligned}$$

5.3 El principio del mínimo potencial de energía

Las ecuaciones para obtener los desplazamientos en los nodos se pueden derivar usando el principio del mínimo potencial de energía.

El principio del mínimo potencial de energía establece que: *Entre todas las ecuaciones de desplazamiento que satisfagan las condiciones internas de la compatibilidad y las condiciones de frontera, aquellas que también satisfagan las ecuaciones de equilibrio hacen el potencial de energía un mínimo en un sistema estable* (Cook, 1982)

El principio del mínimo potencial implica lo siguiente:

- 1.- La existencia de una ecuación de desplazamiento para cada elemento. Las ecuaciones deben de ser compatibles en los nodos.
- 2.- La incorporación de las condiciones de frontera, tal que las ecuaciones de desplazamiento satisfagan físicamente las condiciones en los soportes.
- 3.- La existencia de una ecuación para el potencial de energía dentro del sistema estructural en términos de los desplazamientos desconocidos.
- 4.- La minimización del potencial de energía con respecto a los desplazamientos desconocidos.

Llevar a cabo estos cuatro requisitos conduce a un sistema de ecuaciones de equilibrio que se pueden resolver para los desplazamientos nodales. Una vez que se conocen los desplazamientos en los nodos se pueden calcular las fuerzas internas y los esfuerzos en los elementos. El proceso de minimización implica escribir la ecuación de potencial en función de los desplazamientos. La energía potencial en una estructura es la energía contenida por la deformación elástica (ver ecuación (5.6)) y la capacidad de las cargas de realizar trabajo. La capacidad de una carga concentrada para hacer trabajo es $P \cdot U$, donde P es la magnitud de la carga en el nodo y U es el desplazamiento.

La energía potencial total en una barra sometida a cargas axiales es

$$\Pi = \sum_{e=1}^n \Lambda^{(e)} - W_P$$

donde Λ representa la energía de deformación y W_P es el trabajo hecho por las fuerzas externas. La energía de deformación total es la suma de la energía de los n elementos y el trabajo desarrollado es la suma de las fuerzas en los p nodos. El signo negativo aparece en el término del trabajo, ya que, cada fuerza pierde algo de su capacidad de hacer trabajo cuando el desplazamiento es en la dirección de la fuerza. La energía de deformación elástica en función de los desplazamientos está dada por la ecuación (5.6) que a continuación se repite:

$$\Lambda^{(e)} = \int \frac{E\epsilon^2}{2} dV \quad (5.12)$$

donde

$$\epsilon = \frac{du}{dx} \quad (5.13)$$

La sustitución de la ecuación (5.13) en la ecuación (5.12) da la energía de deformación en función de los desplazamientos nodales.

$$\Lambda^{(e)} = \int \frac{E}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dV \quad (5.14)$$

De la ecuación (5.9) se obtiene $\frac{du}{dx} = \frac{-U_i + U_j}{L}$ igual a una constante, por lo tanto, la ecuación (5.14) se puede escribir como:

$$\Lambda^{(e)} = \frac{EAL}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 = \frac{EAL}{2} \left(\frac{-U_i + U_j}{L} \right)^2 \quad (5.15)$$

El sistema de ecuaciones asociado con la formulación de la energía potencial se obtiene minimizando la energía potencial total. Si asumimos que los desplazamientos son desconocidos, el mínimo valor resulta cuando

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \Pi}{\partial U_1} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial U_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Pi}{\partial U_p} \end{Bmatrix} = 0 \quad (5.16)$$

La energía potencial por elemento para una barra sujeta a cargas axiales es una función de solo dos desplazamientos, U_i y U_j . La energía potencial $\Pi^{(e)}$ estará dada por:

$$\Pi^{(e)} = \frac{EAL}{2} \left(\frac{-U_i + U_j}{L} \right)^2 - P_i U_i - P_j U_j \quad (5.17)$$

La contribución del elemento (e) a el sistema de ecuaciones se obtiene al evaluar las derivadas de $\Pi^{(e)}$ con respecto a U_i y U_j .

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \Pi^{(e)}}{\partial U_i} \\ \frac{\partial \Pi^{(e)}}{\partial U_j} \end{Bmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} P_i \\ P_j \end{Bmatrix} = 0 \quad (5.18)$$

La ecuación (5.18) en forma matricial se escribe como:

$$\frac{\partial \Pi^{(e)}}{\partial \{U^{(e)}\}} = [k^{(e)}] \{U^{(e)}\} - \{P\} = 0$$

donde

$$[k^{(e)}] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

El vector $\{U^{(e)}\}$ contiene los desplazamientos nodales $\{U^{(e)}\}^T = [U_i \quad U_j]$. Para obtener el sistema completo de ecuaciones, las ecuaciones (5.16) se reescriben como:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = [K]U - P = 0 \quad (5.19)$$

$$[K] = \sum_{e=1}^n [k^{(e)}] \quad \text{y} \quad P = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones lineales (5.19) se resuelve después de aplicar las condiciones de frontera para encontrar los desplazamientos desconocidos. Estos desplazamientos nodales se utilizan para calcular las deformaciones unitarias, como se comento en la introducción en este capítulo se compararan las deformaciones unitarias calculadas por el método del elemento finito y las obtenidas experimentalmente con galgas extensiométricas.

En este trabajo de tesis se utilizarán elementos finitos de volumen ya que la barra de prueba utilizada es un cuerpo en 3 dimensiones. Tales elementos finitos se encuentran programados en paquetes para análisis por elementos finitos como el ANSYS ó el SolidWorks. En esta tesis se empleará el Software SolidWorks.

5.4 Análisis en SolidWorks

Empleando el software SolidWorks es posible llevar a cabo un análisis por elementos finitos. Esto tiene como finalidad comparar los resultados obtenidos por SolidWorks con los resultados proporcionados por la experimentación. El punto de comparación son las deformaciones unitarias. Para llevar a cabo la comparación se simula la experimentación, pues se dibuja la probeta en SolidWorks, como se observa en la figura 5.5. Posteriormente, mediante un estudio realizado por medio de la herramienta SolidWorks Simulation incluida en el software SolidWorks, se simula la carga de tensión aplicada sobre la probeta y se obtienen como resultado las deformaciones unitarias, finalmente estas se comparan con las obtenidas mediante experimentación para poder llegar a una conclusión. El proceso mediante el cual se lleva a cabo la simulación es el siguiente:

- Una vez que ya se tiene dibujada la probeta, se selecciona la herramienta *SolidWorks Simulation* en la pestaña *Productos Office*.
- Aparece la pestaña *Simulation* y se selecciona la opción *Nuevo estudio*.
- En la ventana *Estudio* se indica el nombre y tipo de estudio, en este caso es un estudio de tipo *Estático*.
- En la pestaña *Simulation* se selecciona la opción *Aplicar material*, en la ventana que aparece se selecciona la opción *Materiales personalizados* y se ingresa el *Módulo de Elasticidad* del material, que en este caso será el obtenido mediante experimentación. Se selecciona la opción aplicar y se cierra esta ventana.
- En la pestaña *Simulation*, dentro de la opción *Asesor de sujeciones* se elige *Geometría fija* y se selecciona la base de la probeta, como se muestra en la figura 5.6.
- Dentro de la opción *Asesor de cargas externas* se elige *Fuerza* y se selecciona la cara superior de la probeta, como se observa en la figura 5.7. Además se indica la

magnitud de la fuerza de tensión y se elige la casilla *Invertir dirección* para que la dirección de la fuerza sea la correcta.

- En la opción *Ejecutar* se selecciona *Crear malla*, de tal manera que la probeta queda como se aprecia en la figura 5.8.
- Nuevamente dentro de *Ejecutar* se selecciona ahora *Ejecutar* y se espera a que realice el proceso la computadora. Cuando finaliza el proceso, la probeta se observa como en la figura 5.9. Los resultados que aparecen automáticamente son los esfuerzos de Von Mises, pero se pueden seleccionar las deformaciones unitarias como se muestra en la figura 5.10.
- Finalmente se compara la deformación unitaria obtenida mediante SolidWorks, en el punto donde se encuentra la galga, con la deformación unitaria obtenida por medio de experimentación.

Se realiza una simulación tomando la información del primer renglón de la Tabla 4.4. De esta manera al aplicar el material en la simulación, se indica que el *Módulo de Elasticidad* es de 87.87 GPa. También se indica que la fuerza de tensión es de 1700 N. Los resultados de las deformaciones unitarias se aprecian en la figura 5.10.

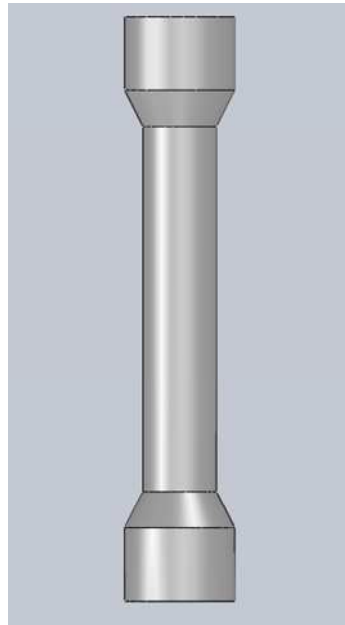


Figura 5.5. Probeta dibujada en SolidWorks

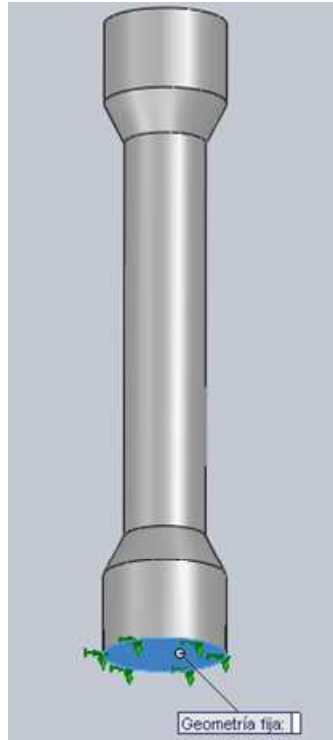


Figura 5.6. Elección de las sujeciones para la simulación

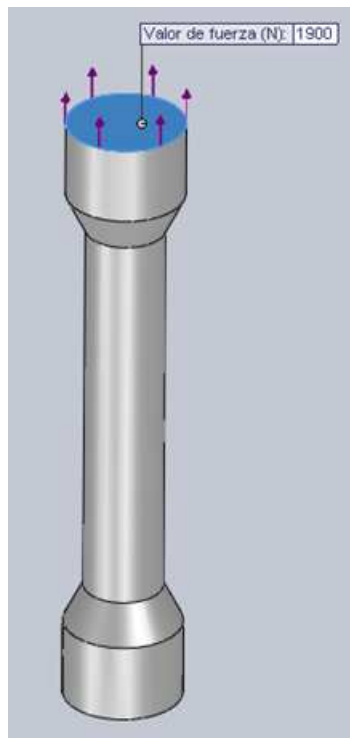


Figura 5.7. Establecimiento de la fuerza de tensión en la probeta

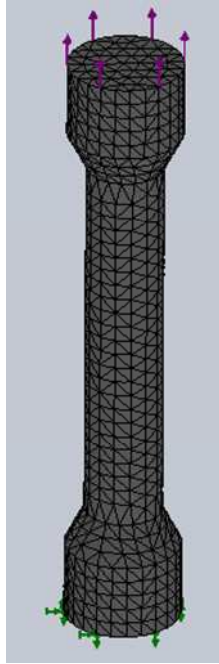


Figura 5.8. Mallado de la probeta en SolidWorks

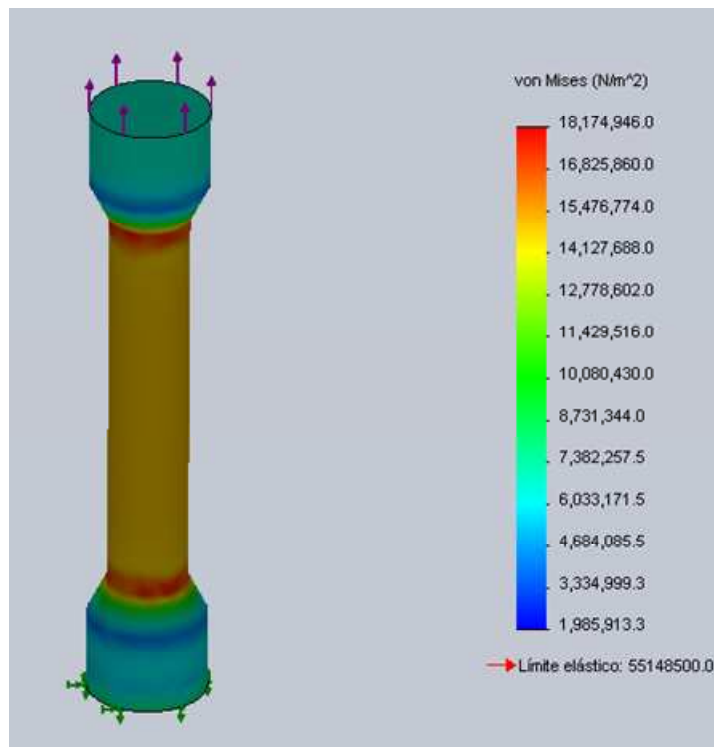


Figura 5.9. Resultados para la simulación en SolidWorks

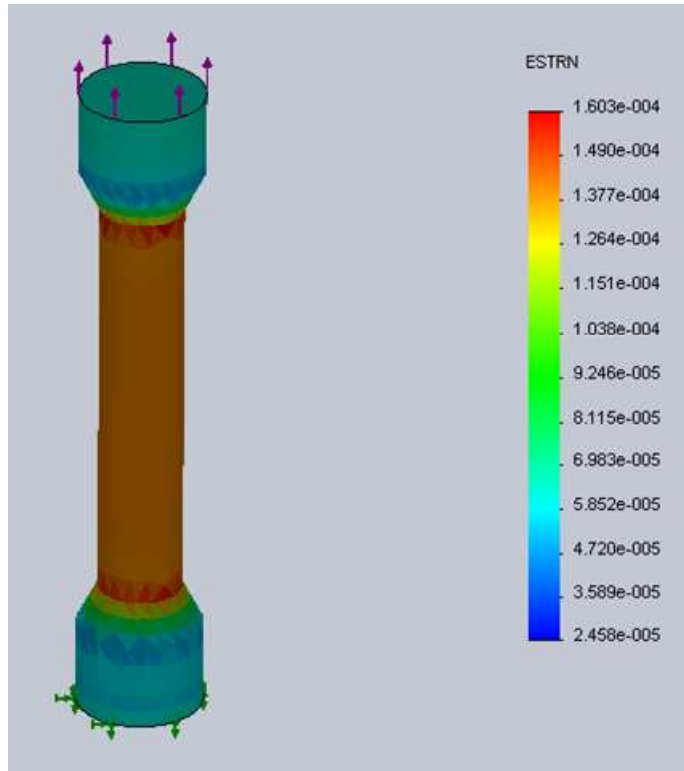


Figura 5.10. Deformaciones unitarias obtenidas por medio de SolidWorks

El valor para la deformación unitaria que resulta de este análisis es de 1.49×10^{-4} . Comparando este valor con el de la Tabla 4.5 se puede calcular un porcentaje de error de la siguiente manera:

$$\frac{1.527 - 1.49}{1.527} \times 100 = 2.423 \%$$

Con la finalidad de ratificar el resultado provisto por SolidWorks, se lleva a cabo un análisis con un mayor refinamiento de la malla, obteniendo un resultado prácticamente igual, pues este varía en el rango de 1×10^{-7} . El que la simulación produzca un valor de deformación unitaria más pequeño que el obtenido por experimentación, se presenta porque en la experimentación la probeta se sujeta en la máquina de tensión por medio de dos anillos de un material más rígido que el aluminio 6061. Esto produce que el valor del Módulo de elasticidad obtenido por experimentación sea mayor al valor real del aluminio 6061. Al momento de realizar la simulación, como se utiliza el Módulo de elasticidad obtenido por experimentación, el software SolidWorks interpreta como si toda la probeta estuviera hecha de una mezcla del material de los anillos y el aluminio 6061, pues se emplea un Módulo de elasticidad mayor al real, por lo que las deformaciones obtenidas por simulación son menores a las deformaciones reales.

Capítulo 6.

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo se establecen las conclusiones obtenidas de este trabajo. Estas conclusiones se basan en los fenómenos observados durante el desarrollo del trabajo de tesis. También se citan algunos problemas observados al elaborar las distintas etapas de este trabajo, con la finalidad de que se tenga un contexto completo de lo realizado durante esta tesis. Finalmente, en base a lo realizado, se proponen algunos trabajos de tesis futuros que buscan darle continuidad a lo desarrollado en la presente, estos trabajos futuros están enfocados a solucionar algunos problemas que se presentan al realizar la experimentación o a implementar mejoras en el sistema de medición.

6.1 Conclusiones

Las conclusiones se van citando conforme se fueron realizando las observaciones a lo largo del trabajo, por lo que se inicia con las conclusiones acerca del desarrollo de Hardware continuando con el desarrollo de Software y finalizando con lo observado durante la implementación del sistema de medición al llevar a cabo las pruebas de medición. De esta manera, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Es necesario establecer una ganancia alta, en este caso de 1000, en el amplificador de instrumentación para que los cambios de voltaje sean significativos, aunque en menor grado. Si se utiliza otro dispositivo de adquisición de datos con menor resolución se puede emplear el amplificador alternativo con el que cuenta el circuito.

- Aunque el filtro paso-bajas no posee una ganancia exactamente unitaria, esto no afecta la señal proveniente del amplificador de instrumentación y dicha señal se mantiene sin cambios significativos.
- Se suma 1 volt en el circuito sumador porque se espera que el voltaje proporcionado por el filtro paso-bajas no sobrepase el valor de -1 volt, pues se necesita tener voltajes positivos para que el convertidor Analógico/Digital pueda interpretar estos voltajes ya que el rango en el que opera este convertidor es de 0 volts a 5 volts.
- Existe una pequeña diferencia entre el voltaje medido a la salida del filtro paso-bajas con un multímetro y el voltaje interpretado por el programa desarrollado en LabVIEW; sin embargo, esta diferencia es constante en todos los niveles de voltaje y por lo tanto no afecta las mediciones.
- El que los valores de resistencia de las galgas extensiométricas sean diferentes a 350 Ω tiene como efecto que el circuito Puente de Wheatstone no se pueda equilibrar y el voltaje a la salida del amplificador de instrumentación sea distinto de 0 volts.
- La temperatura afecta de manera significativa las mediciones, pues la resistencia de las galgas extensiométricas varía conforme cambia la temperatura, por lo que dependiendo de la temperatura se tendrá un voltaje inicial distinto a la salida del amplificador de instrumentación.
- Para llevar a cabo las mediciones es recomendable encender los componentes electrónicos y esperar al menos 15 minutos para que todos estos componentes se estabilicen, pues si no se espera a que esto suceda se corre el riesgo de que al estar realizando mediciones ocurra un cambio de voltaje drástico que afecte la experimentación.
- Cuando se llevaban a cabo varias experimentaciones se observaba que si se encendía el sistema electrónico para cada medición y se apagaba al finalizar esta, los resultados no coincidían, por lo cual no existía repetitividad entre las diferentes experimentaciones. Para obtener repetitividad en los resultados se debe encender el sistema electrónico y no apagarlo hasta haber realizado todas las experimentaciones.

Es necesario dar a conocer algunos problemas que se tuvieron durante el desarrollo de este trabajo de tesis, esto en caso de que se quisieran repetir algunos de los elementos que conforman este sistema, pues el que se conozcan de antemano estos posibles problemas ayuda a ahorrar

tiempo y otros recursos. Enseguida se mencionan los problemas de mayor relevancia que se enfrentaron durante este trabajo:

- Para armar el circuito Puente de Wheatstone se implementó primero una configuración sugerida en [10], no obstante, se observó que la respuesta obtenida de este circuito no era satisfactoria, pues mostraba significativa inestabilidad, por lo que se implementó el circuito de la figura 2.3.
- El regulador de voltaje LM317 se calentaba, con lo que el voltaje que proporcionaba se caía. Este problema se corrigió colocándole un disipador, este evitó que el regulador se calentara y con ello el voltaje se mantenía sin problemas.
- Cuando se alimentaba el circuito Puente de Wheatstone con el voltaje proporcionado por la referencia LM336, este voltaje se caía. Para solucionar este problema se empleó un circuito seguidor de voltaje (Figura 2.10), con lo que se lograba mantener el voltaje.
- Si el microcontrolador se alimentaba con la misma fuente de CD que al Regulador CD/CD, la conversión analógica/digital se veía afectada, pues los valores que obtenía se diferenciaban demasiado del valor real del voltaje que se estaba convirtiendo. Por este hecho se decidió alimentar solo al microcontrolador ATmega8 con una fuente de CD independiente.
- Se tuvo conflictos con el método de sujeción de las probetas de aluminio 6061, pues las mordazas de la máquina de tensión no podían tomarlas directamente, por esto fue necesario sujetarlas a través de unos anillos de otro material, los cuales se encontraban unidos a las probetas a través de una rosca. Esto originaba que cuando se aplicaba una fuerza de tensión arriba de los 2200 N, en ocasiones, se presentaba un pequeño desplazamiento en la unión entre los anillos y la probeta. Esto se veía reflejado en la señal observada en LabVIEW, donde se notaba como se caía el voltaje de repente, dañando por completo la experimentación.

6.2 Trabajos Futuros

En base a la labor desarrollada en la presente tesis, se proponen algunos trabajos complementarios o de mejora, con la finalidad de que se obtenga un sistema de medición que

proporcione resultados más confiables tomando en cuenta que contemplará más factores, como el método de sujeción de la probeta. Los trabajos futuros que se proponen son los siguientes:

- Controlar la ganancia del amplificador de instrumentación por medio de software, ya sea utilizando el AD624 o buscando un amplificador de instrumentación que facilite esta tarea. Esto ayudará a tener un sistema de medición más flexible.
- Encontrar un sistema de sujeción más eficiente, esto puede ser mediante un mecanismo o cambiando las mordazas que actualmente utiliza la máquina de tensión por unas que permitan sujetar elementos circulares de diámetros grandes.

Bibliografía

- [1]. Timoshenko, S. P. (1983). *History of Strength of Materials*. U.S.A.: Dover Publications, Inc.
- [2]. Rees, D. W. A. (1999). "Developments in solid mechanics". *International Journal of Mechanical Engineering Education*. Vol. 27, No. 1, pp. 41-53.
- [3]. Thomson, W. (Lord Kelvin). (1856). "On the electrodynamic qualities of metals", *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Londres), 146:649-751.
- [4]. Ruiz Rojas, G. A. (2005). *Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensimetría*. Tesis de Licenciatura. México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- [5]. Gere, J., Timoshenko, S. P. (1998). *Mecánica de Materiales*. México: Ed. Internacional Thomson Editores.
- [6]. Hibbeler, R.C. (2006). *Mecánica de Materiales*. 6a Ed., México: Pearson Education, Inc.
- [7]. Huang, S., Khan, A. S. (1991). "On the Use of Electrical-resistance Metallic Foil Strain Gages for Measuring Large Dynamic Plastic Deformation". *Experimental Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 122-125.
- [8]. Figliola, R. S., Beasley, D. E. (2008). *Mediciones Mecánicas. Teoría y Diseño*. 4a Ed., México: Alfaomega Grupo Editor.
- [9]. Cooper, W. D., Helfrick, A. D. (1991). *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición*. 1a Ed., México: Pearson Education, Inc.
- [10]. Coughlin, R. F., Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- [11]. Nilsson, J. W., Riedel S. A. (2005). *Circuitos Eléctricos*. España: Pearson Educación.
- [12]. Savant, C. J., Roden M. S., Carpenter G. *Diseño Electrónico*. Prentice-Hall.
- [13]. ATMEL® (2003): AVR® ATmega16 Datasheet. U.S. A.
- [14]. AIMTEC®: Series AM2D-NZ Datasheet. U. S. A.
- [15]. National Semiconductor® (1996): LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator Datasheet. U. S. A.
- [16]. National Semiconductor® (1998): LM136-2.5/LM236-2.5/LM336-2.5V Reference Diode Datasheet U. S. A.
- [17]. Pressman, R. (2001). *Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico*. 5ª Ed., España: Mc Graw Hill Interamericana de España.

- [18]. Cook, Robert D., 1981. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 2dn ed., John Wiley, New York.
- [19]. Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. and Topp, L.J., Stiffness and deflection analysis of complex structures, *Journal of Aeronautical Sciences*, 23, 805-824 (1956).

Internet

[URL1] <http://es.scribd.com/doc/7843072/Capitulo9-Convertidor-Analogo-Digital-del-ATmega32-espanol>

[URL2] <http://www.lancos.com/ppwin95.html>

[URL3] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7907>

[URL4] <http://www.agelectronica.com/inicio.htm>

Apéndice A. Costos del material empleado para la elaboración del sistema.

Se reporta el costo de los materiales empleados para el desarrollo del Hardware. Se considera importante hacer esto en caso de que en un futuro se desee elaborar nuevamente este sistema, o se desee implementarle algunas mejoras. Los costos se reportan en las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4. Estos costos son según la empresa AGElectrónica [URL4]. Los artículos que tienen * reportan costos según otros proveedores. En cada una de las tablas A.1, A.2 y A.3 se reporta el material empleado para cada placa: Alimentación del sistema, acondicionamiento de la señal y adquisición de datos, en la tabla A.4 se reporta el material extra utilizado.

Tabla A.1. Costos del material empleado para elaborar la etapa de alimentación del sistema

Cantidad	Material	Precio u (\$)	Sub-Total (\$)
1	Placa virgen 10X10 cm	10	10
2	Potenciómetro de precisión (5K Ω)*	40	80
2	Terminal de 2 vias*	7	14
2	Capacitor 0.1 μ F	2.586	5.172
1	Base 8 pines	1.724	1.724
2	Resistencia 100 Ω 1W	1.724	3.448
1	Terminal de 3 vias*	11	11
1	Amplificador operacional UA741	4.31	4.31
2	Capacitor 1 μ F	2.586	5.172
2	Regulador de voltaje LM317	2.586	5.172
4	Diodo 1N4001	0.862	3.448
2	Capacitor 10 μ F	2.586	5.172
1	Referencia de voltaje LM336	2.586	2.586
1	Resistencia 2.2k Ω 0.5W	0.862	0.862
1	Resistencia 220 Ω 0.5W	0.862	0.862
	Total		152.928

Tabla A.2. Costos del material empleado para elaborar la etapa de acondicionamiento de la señal

Cantidad	Material	Precio u (\$)	Sub-Total (\$)
1	Placa virgen 15X15 cm	30	30
2	Potenciómetro de precisión (5K Ω)*	40	80
2	Resistencia 100k Ω 0.5W	0.862	1.724
5	Terminal de 2 vias*	7	35
1	Amplificador de instrumentación AD624	275.862	275.862

1	Dip switch	7.759	7.759
1	Base 16 pines	1.724	1.724
2	Resistencia 120k Ω 0.5W	0.862	1.724
1	Resistencia 220k Ω 0.5W	0.862	0.862
3	Capacitor 0.1 μ F	2.586	7.758
1	Capacitor 33pF	2.586	2.586
1	Amplificador operacional LM301	12.069	12.069
1	Base 8 pines	1.724	1.724
1	Amplificador operacional TL084	6.897	6.897
1	Base 14 pines	1.724	1.724
4	Resistencia 100 Ω 0.5W	0.862	3.448
1	Potenciómetro de precisión (10k Ω)*	40	40
1	Convertidor CD/CD AM2D-0512D-NZ	79.31	79.31
1	Capacitor 4.7 μ F	2.586	2.586
2	Capacitor 1 μ F	2.586	5.172
	Total		597.929

Tabla A.3. Costos del material empleado para elaborar la etapa de adquisición de datos

Cantidad	Material	Precio u (\$)	Sub-Total (\$)
1	Placa virgen 10X10 cm	10	10
2	Terminal de 2 vias*	7	14
3	Base 16 pines	1.724	5.172
1	Resistencia 100 Ω 0.5W	0.826	0.826
5	Capacitor 1 μ F	2.586	12.93
1	Max 232	10.345	10.345
1	Microcontrolador ATmega8	101.724	101.724
	Total		154.997

Tabla A.4. Costos del material extra empleado para el desarrollo del hardware

Cantidad	Material	Precio u	Sub-Total
1	Caja Plástico 11X10X16 cm	120	120
1	Cable convertidor usb-serial	165	165
3	Terminal de 2 vias*	7	21
1	Base 8 pines	1.724	1.724
1	Terminal de 3 vias*	11	11
1	Amplificador operacional UA741	4.31	4.31
1	Peine*	6	6
1	Peine doble*	9	9
1	Conector BNC	15.517	15.517

1	Puerto DB9 Hembra	2.586	2.586
	Total		356.137

Apéndice B. Problemas observados en el acondicionamiento de la señal

Consultando bibliografía así como estudios previos [10], se implementa el circuito mostrado en la Figura B.1, el cual se sugiere cuando se trabaja con galgas extensiométricas, ya que cuenta con un método de ajuste a cero para la salida inicial V_0 :

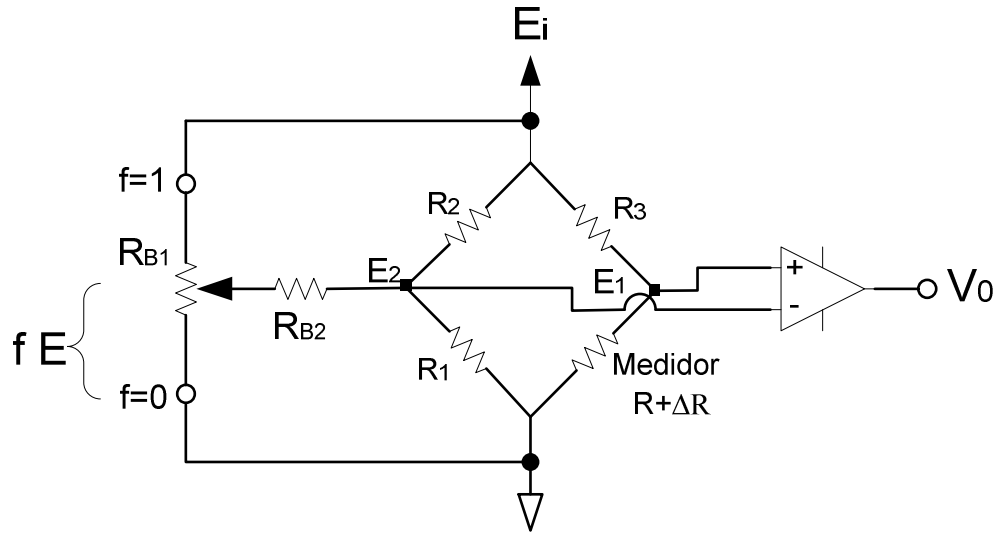


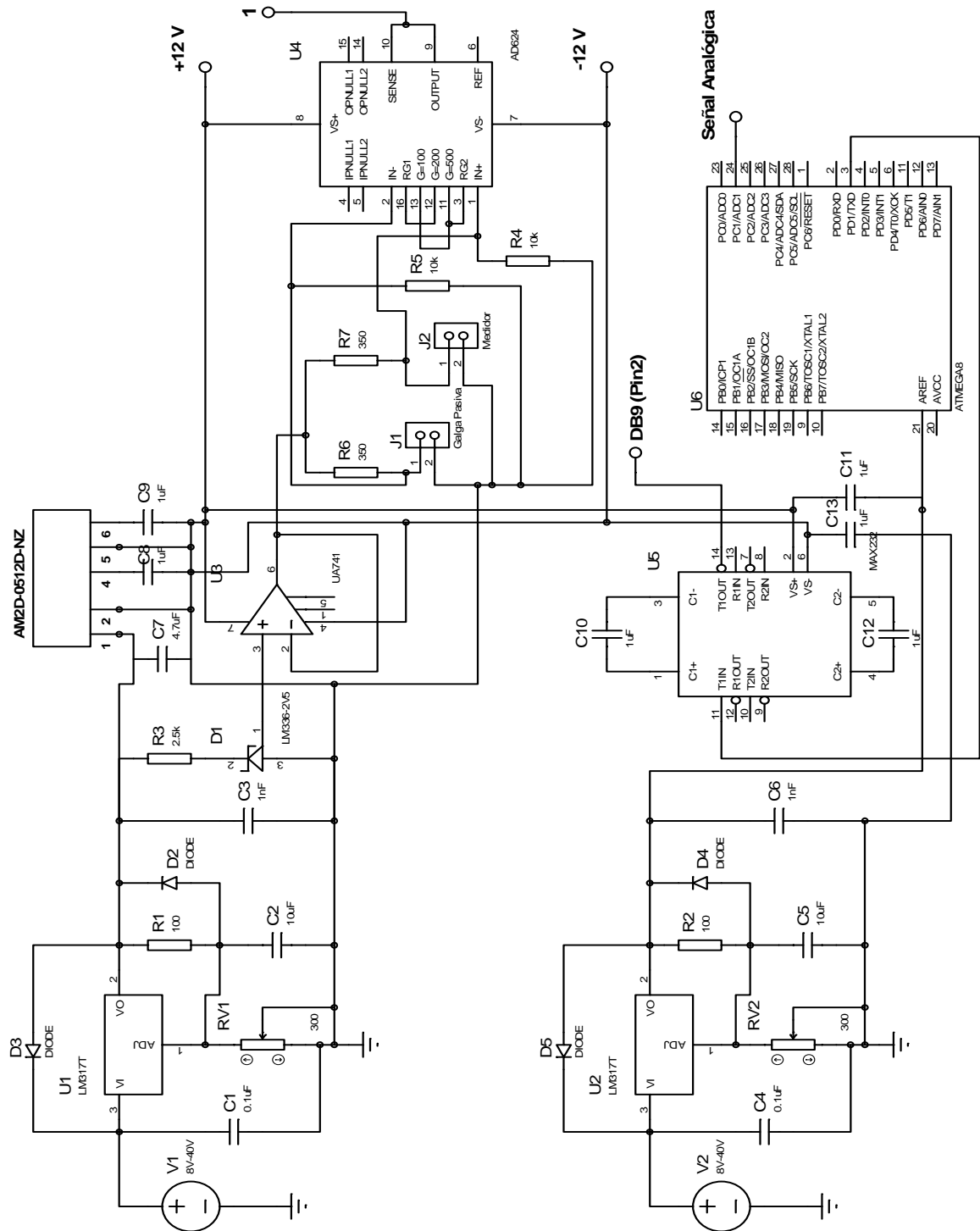
Figura B.1. Circuito puente de Wheatstone implementado inicialmente

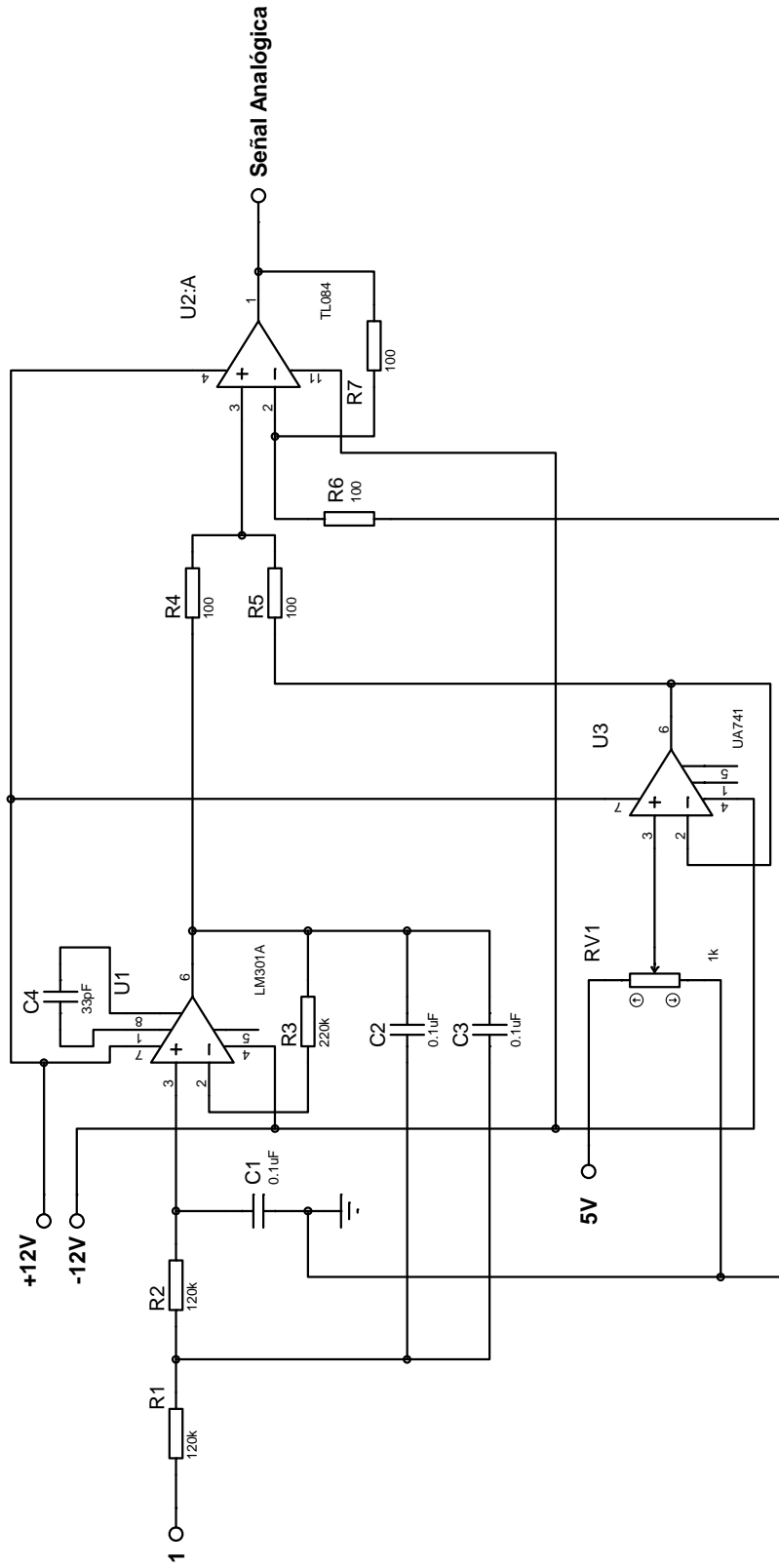
En este circuito la resistencia R_{B1} es un potenciómetro cuyo valor debe ser aproximadamente $1/10$ menos que la resistencia R_{B2} , de manera que el voltaje fE dependa sólo de E y de la fracción decimal f . Los valores de f varían de 0 a 1 conforme se ajusta el potenciómetro de un límite al otro. R_{B1} debe ser 10 o más veces mayor que la resistencia de la galga extensiométrica. El tamaño de R_{B2} determina la máxima corriente que puede inyectarse o extraerse del nodo E_2 . El ajuste de f en el potenciómetro determina qué tanto de la corriente máxima se inyecta o extrae. La acción de balanceo se resume observando que si $f > 0.5$ una corriente pequeña se inyecta en el nodo E_2 y fluye a través de la galga hacia tierra, esto hace a E_2 más positivo. Si $f < 0.5$, se extrae corriente del nodo E_2 , esto aumenta la corriente a través de R_2 para hacer E_2 menos positivo. En un puente real se inicia con $R_{B2} = 100 \text{ k}\Omega$ y $R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega$. Se observa V_0 y si varía más de lo deseado, se incrementa R_{B2} a $1000 \text{ k}\Omega$ y se vuelve a verificar V_0 . El valor final de R_{B2} se selecciona por experimentación.

El circuito se arma utilizando dos potenciómetros de precisión como R_2 y R_3 , R_1 es una galga pasiva y el medidor es la galga que se someterá a tensión. R_{B1} también será un potenciómetro de precisión y R_{B2} será una resistencia convencional, pues no es relevante que tenga un valor exacto.

Se prueba este circuito puente de Wheatstone con el amplificador de instrumentación, y se aplica el método de ajuste a 0 expuesto anteriormente; sin embargo, no fue posible alcanzar un nivel de voltaje próximo a 0 satisfactorio, esto es, dentro de un rango de ± 10 mV, pues se obtienen voltajes aproximadamente de ± 400 mV a la salida V_0 , además de que esta presenta muchas oscilaciones, dificultando la estabilidad del sistema. Esto lleva a utilizar el circuito mostrado en la figura 2.2 para implementar el puente de Wheatstone, con lo cual se obtienen mejores resultados.

Apéndice C. Diagrama electrónico de conexiones del sistema de medición





Se muestra el diseño de los circuitos impresos para cada una de las etapas del desarrollo de hardware: Alimentación del sistema, acondicionamiento de la señal y adquisición de datos.

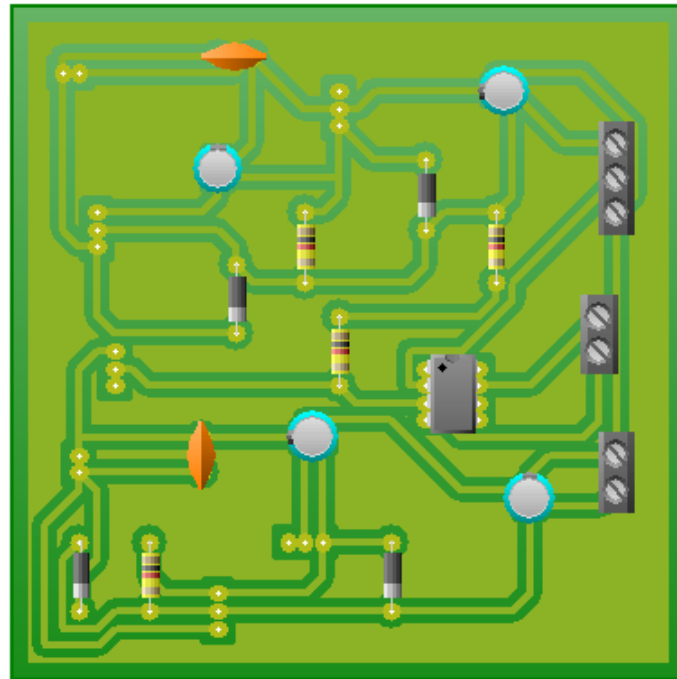


Figura C.1. Etapa de alimentación del sistema

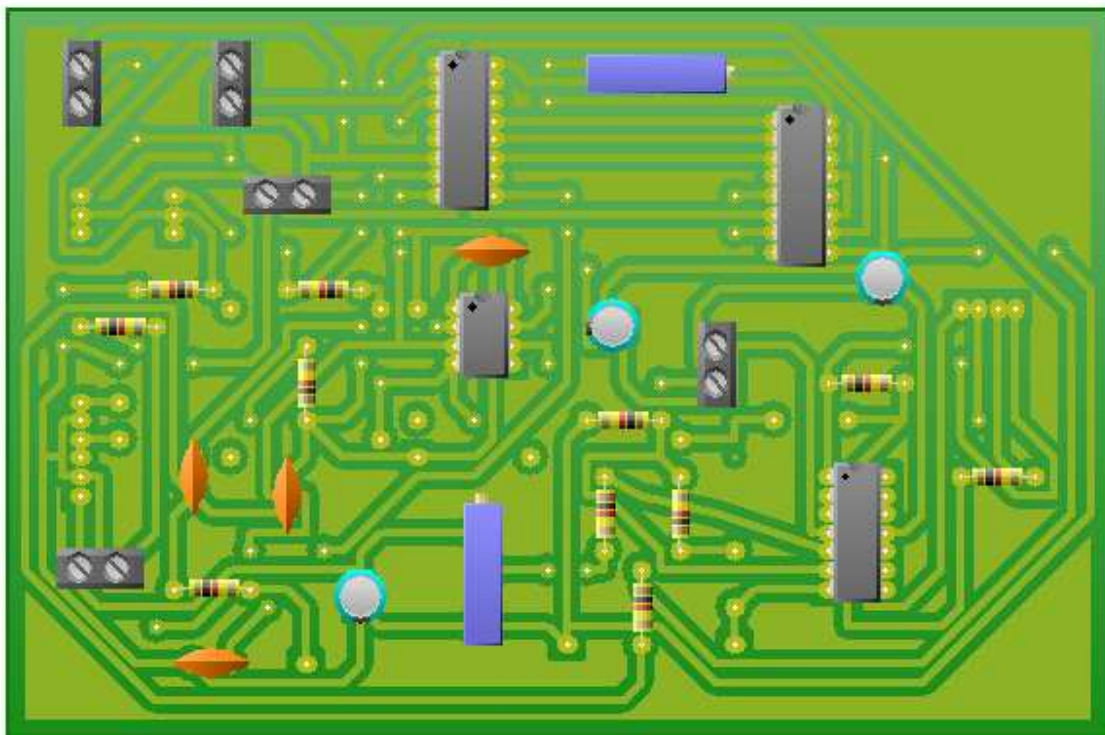


Figura C.2. Etapa de acondicionamiento de la señal

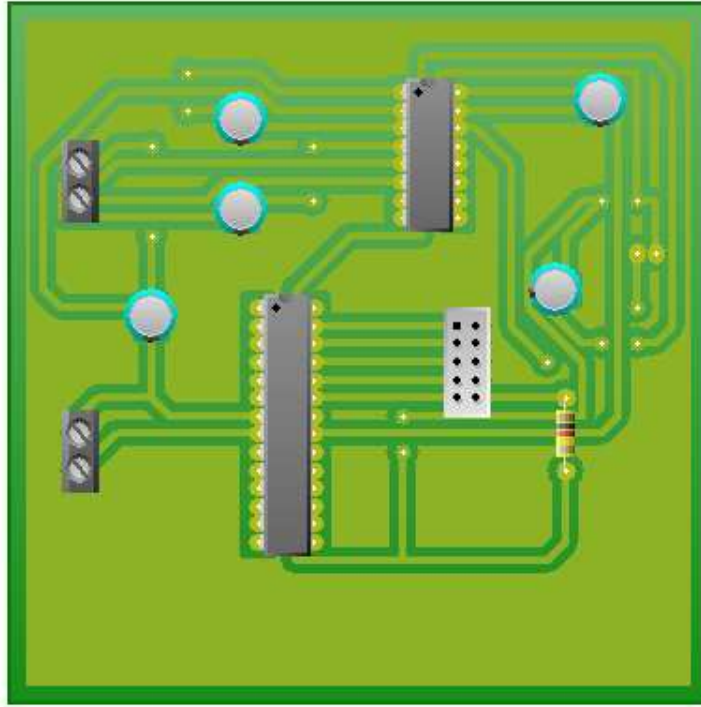


Figura C.3. Etapa de adquisición de datos