



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría

TESIS

Para obtener el título de:
Ingeniero en Electrónica

Presenta:
Guillermo Amando Ruiz Rojas

Directores de Tesis:
M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva
M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez

Huajuapán de León, Oaxaca. Julio de 2005.

Tesis presentada el 29 de Julio de 2005 ante los siguientes sinodales:

M.C. Felipe Santiago Espinosa

M.C. Alejandro Ruiz Figueroa

M.C. Arturo Pablo Sandoval García

Bajo la dirección de:

M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva

M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a las personas que han estado conmigo incondicionalmente en los momentos más difíciles de mi vida y que han hecho de mí lo que hoy soy.

Con todo mi amor y cariño:

A MIS PADRES:

Dr. Guillermo Amando Ruiz González y Lucía Rojas García

A MIS HERMANOS:

José Angel, Edrey Damian y Jair Alejandro Ruiz Rojas

A MIS ABUELOS:

Mauricio Jacinto Morales y Maria Luisa García Ruiz

Las personas que amo y por las que existo.

Amando

Agradecimiento especial

Al Profesor Fermín Hugo Ramírez Leyva, por su dedicación y empeño en la elaboración de este trabajo de tesis. Por brindarme su amistad y confianza mil gracias, espero no defraudarlo.

Amando

Agradecimientos

En mi vida existen tantas personas a las que tengo que agradecer el haber compartido tiempo y espacio conmigo y que han contribuido a mi crecimiento como hijo, hermano, amigo, compañero y el día de hoy como profesionalista. Por siempre los llevaré en mi corazón.

A Dios, por brindarme la oportunidad de existir y por enseñarme que por muy difícil que sea el camino; si se tiene fe, voluntad y perseverancia se puede llegar a la meta.

A mi padre, por su lucha, entrega, amor y dedicación en lograr el profesionalista que hoy, gracias a su apoyo soy. No lo defraudare padre, lo amo.

A mi madre, por darme la vida y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante y me da fortaleza para no dejarme vencer ante la adversidad, por muy difícil que ésta sea. Por su confianza en mí, mil gracias, usted es mi vida y la amo.

A mis hermanos José, Edrey y Jair por apoyarme cuando más lo necesito, por compartir alegrías, sufrimientos, privaciones y por estar ahí cuando yo no estoy, muchas gracias. Los amo.

A mis abuelos Mauricio, María Luisa y mi tío Jorge por estar conmigo en cada momento de mi vida. Son parte de mi corazón y motivo de mi lucha. Muchas gracias por todo su apoyo.

A Ruth Gómez González, por su incansable apoyo; por estar ahí cuando más lo necesité y cuando nadie estuvo. Por tu comprensión, paciencia y cariño, mil gracias. Nunca te olvidaré.

A mis amigos de la Universidad: Aparicio, Canseco, Fox, Julio y Noé. Gracias por su apoyo a lo largo de la carrera y su aportación a este trabajo de tesis; cada uno de ustedes está presente y contribuyó en gran parte para su culminación.

A la familia Ramos Oledo por todo su apoyo durante mi estancia en la ciudad de Huajuapán de León, por su paciencia, muchas gracias.

A todos los profesores que contribuyeron en mi educación y formación como profesionalista, siempre se los agradeceré.

A Rodolfo Palma Martínez encargado del taller de metales de la UTM, por su gran apoyo en la elaboración de las estructuras metálicas. Muchas gracias maestro.

A una persona muy especial que quiero mucho y sabe que siempre estará en mi corazón. Por estar a mi lado y compartir de lejos este triunfo, mil gracias.

A todas las personas que me brindaron alientos de esperanza, por su apoyo, comprensión y cariño, no me resta más que decirles, gracias.

Con cariño

Amando

Índice general

Índice general	xi
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
Resumen	xxi
Introducción	xxiii
Objetivo General	xxvi
Objetivos Específicos	xxvi
Contenido de este documento de tesis	xxvi
1. Galgas extensiométricas	1
1.1. Construcción de la galga	2
1.1.1. Rejilla de la galga extensiométrica	3
1.1.2. Materiales de la base	3
1.1.2.1. Polyimide	3
1.1.2.2. Epoxy-Phenolic	3
1.1.3. Etiquetas de cobre	3
1.1.4. Triángulos de orientación	4
1.1.5. Lámina de la galga extensiométrica	4
1.2. Parámetros de selección de la galga extensiométrica	5
1.2.1. Sensibilidad a la tensión de la rejilla	5
1.2.1.1. Constantan (aleación A)	7
1.2.1.2. Isoelastic (aleación D)	7
1.2.1.3. Karma (aleación K)	7
1.2.2. Longitud de la galga	8
1.2.3. Modelo de la galga	8
1.2.4. Resistencia de la galga	9
1.3. Característica de desempeño	10
1.3.1. Variación del factor de galga por la temperatura	10
1.3.2. Resistencia y tolerancia	10
1.3.3. Efectos de la temperatura en la resistencia	10
1.3.4. Capacidad de elongación	11
1.3.5. Vida de fatiga	11
1.3.6. Rango de temperatura de operación de las galgas	11
1.4. Adhesivos	11

2. Mediciones con galgas	13
2.1. Sensor de tensión.....	14
2.1.1. Principio básico de operación de la galga.....	14
2.1.2. Modelado mecánico de la galga.....	16
2.1.3. Modelado eléctrico de la galga.....	17
2.1.4. Factor de la galga.....	18
2.1.5. Alargamiento de las barras prismáticas.....	19
2.1.6. Estructura tipo columna.....	20
2.1.7. Compensación de efectos térmicos.....	21
2.2. Acondicionamiento de señales.....	22
2.2.1. Acondicionamiento de señales para galgas extensiométricas.....	22
2.2.2. Puente de Wheatstone.....	23
2.2.3. Módulo de galgas SCC-SG03.....	24
2.2.4. Bloque conector SC-2345.....	25
2.3. Adquisición de datos.....	26
2.3.1. Tarjetas de adquisición de datos.....	26
2.3.2. Tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E.....	27
2.3.3. Cable y conector de E/S.....	28
2.4. Despliegue de las mediciones.....	29
2.4.1. Adquisición de datos en LabVIEW.....	29
3. Diseño y análisis de un sensor de tensión	31
3.1. Fases del diseño.....	32
3.1.1. Identificación de la necesidad y definición del problema.....	32
3.1.2. Evaluación y presentación.....	32
3.1.3. Fases del diseño aplicadas a la medición del alargamiento.....	32
3.2. Metodología.....	33
3.2.1. Diseño y Análisis de la estructura circular.....	34
3.2.1.1. Selección de la galga.....	35
3.2.1.2. Especificaciones de la columna.....	35
3.2.1.3. Cálculos para determinar la geometría del sensor.....	36
3.3. Manufactura de la columna.....	37
3.3.1. Centrado de la barra.....	38
3.3.2. Cilindrado de los soportes.....	38
3.3.3. Perforado de la barra.....	39
3.3.4. Conicidad de 45°.....	39
3.3.5. Cilindrado del centro.....	39
3.3.6. Formación de las roscas.....	40
3.4. Pegado de la galga extensiométrica.....	41
3.4.1. M-Bond 200.....	41
3.4.2. Preparación de la superficie.....	42
3.4.2.1. Desengrasado.....	42
3.4.2.2. Lijado de la superficie.....	43
3.4.2.3. Líneas de orientación.....	43
3.4.2.4. Acondicionado de la superficie.....	43
3.4.2.5. Neutralizado.....	43
3.4.3. Preparación de la galga para el pegado.....	44
3.4.3.1. Retiro de la galga del forro portador.....	44
3.4.3.2. Transportación de la galga a la superficie de pegado.....	44
3.4.3.3. Colocación de la galga en la superficie.....	45
3.4.3.4. Preparado de la galga para la aplicación del adhesivo.....	45
3.4.4. Pegado con el adhesivo M-Bond 200.....	46
3.4.4.1. Aplicado del catalizador M-Bond 200.....	46

3.4.4.2. Aplicado del adhesivo M-Bond 200	46
3.5. Soldado de la galga	47
3.5.1. Soldadura suave.....	48
3.5.2. Punto de soldadura	48
3.5.3. Soldado con plata	48
3.6. Protección de la galga.....	49
3.7. Verificación de la instalación	49
4. Pruebas y resultados experimentales	51
4.1. Integración y conexión del banco de pruebas.....	51
4.1.1. Estructura metálica con canastilla y sensor de cargas.....	52
4.1.2. Módulo de acondicionamiento de galgas SCC-SG03 y bloque SC-2345	53
4.1.3. PC con tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E.....	54
4.2. Caracterización de los sensores	54
4.2.1. Determinar el voltaje sin carga (V_{cero})	55
4.2.2. Someter los sensores a cargas conocidas	56
4.2.3. Cálculo de la pendiente y abscisa utilizando mínimos cuadrados.....	56
4.2.4. Cálculo del voltaje de ajuste.....	57
4.3. Resultados de las caracterizaciones	58
4.3.1. Resultados experimentales	58
4.3.2. Sensibilidad de los sensores	62
4.3.3. Gráficas del voltaje de las galgas	62
4.3.4. Cálculo experimental del error en los sensores	63
5. Conclusiones	65
5.1. Perspectivas de trabajos a futuro	67
Referencias.....	69
Internet	70
Apéndice A. Datos técnicos de la serie de galgas EA	A-1
A.1. Descripción y especificaciones de desempeño de la serie EA.....	A-1
A.2. Compensación de temperatura para galgas.....	A-1
A.3. Temperatura de operación de galgas de la serie EA.....	A-2
A.4. Hoja de especificación de la galga EA-13-125AC-350.....	A-3
Apéndice B. Manual de usuario del software	B-1
B.1. Descripción del software.....	B-1
B.2. Ventanas del software para el estudio de galgas	B-1
B.2.1. Acerca de.....	B-2
B.2.2. Análisis Teórico.....	B-3
B.2.2.1. Cálculo del alargamiento.....	B-3
B.2.2.2. Cálculo de la variación de resistencia	B-3
B.2.2.3. Cálculo del Voltaje _{ab}	B-3
B.2.3. Configuración y Resultados.....	B-4
B.2.3.1. Elección del sensor.....	B-4
B.2.3.2. Captura del voltaje cero (V_{cero})	B-4
B.2.3.3. Peso Detectado	B-4
B.2.3.4. Voltaje medido	B-4
B.2.3.5. Voltaje sin peso	B-5
B.2.4. Medición de Peso.....	B-5
B.3. Ayuda para la solución de problemas comunes	B-6

Índice de figuras

Figura i.1. Técnica de extensometría.	xxiv
Figura i.2. Galga extensiométrica.	xxv
Figura i.3. Diagrama a bloques del sensor de tensión.	xxv
Figura 1.1. Galga extensiométrica.	1
Figura 1.2. Partes que componen la galga.	2
Figura 1.3. Modelos típicos de galgas extensiométricas.	4
Figura 1.4. Medición del factor de galga y sensibilidad transversal.	6
Figura 1.5. Curva de temperatura contra salida térmica en $\mu\epsilon$	8
Figura 1.6. Longitud de la galga.	9
Figura 1.7. Ejemplos de galgas tipo roseta.	9
Figura 2.1. Diagrama a bloques para mediciones de tensión con galgas extensiométricas.	13
Figura 2.2. Ley de Hooke.	15
Figura 2.3. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria del acero.	16
Figura 2.4. Contracción en dirección transversal.	17
Figura 2.5. Tensión y compresión de la galga.	18
Figura 2.6. Modelado eléctrico de la galga.	18
Figura 2.7. Diversos tipos de galgas extensiométricas.	19
Figura 2.8. Alargamiento de una barra en tensión.	19
Figura 2.9. Estructura tipo columna con soportes.	20
Figura 2.10. Estructura de aluminio con líneas de fuerza.	21
Figura 2.11. Sensor de tensión con galgas extensiométricas.	21
Figura 2.12. Diagrama a bloques conceptual de conexión.	23
Figura 2.13. Puente de Wheatstone.	23
Figura 2.14. Gráfica de la pendiente del puente de Wheatstone.	24
Figura 2.15. Módulo SCC-SG03 acondicionador de medio puente de Wheatstone.	25
Figura 2.16. Diagrama a bloques del módulo SCC-SG03.	25
Figura 2.17. Acondicionamiento de señales para galgas.	25
Figura 2.18. Fotografía de la tarjeta PCI-6024E.	27
Figura 2.19. Conector de Entrada/Salida de la tarjeta PCI-6024E.	28
Figura 2.20. Cable conector de la tarjeta PCI-6024E.	28
Figura 3.1. Fases del diseño.	31

Figura 3.2. Metodología para el diseño del sensor.	34
Figura 3.3. Designación estándar para las galgas extensiométricas de la firma Vishay®	35
Figura 3.4. Plano con dimensiones de la estructura tipo columna circular.	36
Figura 3.5. Torno convencional ILSA TR,1000-EX.	37
Figura 3.6. Centrado de la barra en el torno.	38
Figura 3.7. Rebajado de la barra de aluminio.	38
Figura 3.8. Utilización del micrómetro.	39
Figura 3.9. Perforaciones a la columna.	39
Figura 3.10. Formación de la parte cónica y rebajado de la parte central.	40
Figura 3.11. Utilización del machuelo para la formación de las roscas.	40
Figura 3.12. Columna circular manufacturada.	40
Figura 3.13. Rosca en uno de los extremos.	40
Figura 3.14. Adhesivo M-Bond 200.	42
Figura 3.15. Desengrasado con solvente CMS-1.	43
Figura 3.16. Lijado de la superficie.	43
Figura 3.17. Acondicionado de la superficie.	44
Figura 3.18. Neutralizado de la superficie.	44
Figura 3.19. Colocación de la galga en cinta celofán.	45
Figura 3.20. Alineado de la galga.	45
Figura 3.21. Posición de la galga antes del pegado.	45
Figura 3.22. Aplicado del catalizador M-Bond 200.	46
Figura 3.23. Aplicado del adhesivo M-Bond 200.	46
Figura 3.24. Pegado de la galga.	47
Figura 3.25. Presionando la galga.	47
Figura 3.26. Despegando la cinta celofán de la galga.	47
Figura 3.27. Soldado suave de los cables.	48
Figura 3.28. Soldado por punto de soldadura.	48
Figura 3.29. Protección con el químico M-COAT A.	49
Figura 3.30. Galga adherida, soldada y protegida.	50
Figura 4.1. Integración general del banco de pruebas.	52
Figura 4.2. Base metálica con la canastilla y el sensor de carga.	52
Figura 4.3. Sensor con sujetadores.	52
Figura 4.4. Módulo de acondicionamiento SCC-SG03.	52
Figura 4.5. Circuito impreso con terminales de rosca.	53
Figura 4.6. Conexión de galgas al módulo SCC-SG03.	53
Figura 4.7. Diagrama del bloque conector SC-2345.	53
Figura 4.8. Conexiones del bloque conector SC-2345.	53
Figura 4.9. Conexión de la TAD PCI-6024E a la PC Compaq Presario.	54
Figura 4.10. TAD en el bus PCI de la PC Compaq Presario.	54
Figura 4.11. Algoritmo para caracterizar un sensor.	55
Figura 4.12. Canastilla sin carga.	55
Figura 4.13. Pesas en forma de disco.	55
Figura 4.14. Canastilla con tres pesas.	56
Figura 4.15. Diagrama de flujo para calcular la constante de ajuste.	57
Figura 4.16. Sensores manufacturados.	58
Figura 4.17. Respuesta ajustada del sensor 1 y mediana de la caracterización.	60
Figura 4.18. Respuesta ajustada del sensor 2 y mediana de la caracterización.	60
Figura 4.19. Respuesta ajustada del sensor 3 y mediana de la caracterización.	61

Figura 4.20. Respuesta ajustada del sensor 4 y mediana de la caracterización.	61
Figura 4.21. Respuesta correcta de una galga.	63
Figura 4.22. Respuesta errónea de una galga.	63
Figura 4.23. Error de los sensores en la medición de cargas.	64
Figura A.1. Compensación STC y del coeficiente de expansión térmica.	A-2
Figura A.2. Rango de operación de temperatura para galgas de la serie EA.	A-2
Figura A.3. Hoja de especificación para la designación EA-13-125AC-350.	A-3
Figura B.1. Datos sobre el programa.	B-2
Figura B.2. Salida del programa.	B-2
Figura B.3. Parámetros para la estimación ideal.	B-3
Figura B.4. Elección del sensor y captura del voltaje cero.	B-5
Figura B.5. Voltaje _{ab} sin amplificación y medición de peso.	B-5

Índice de tablas

Tabla 1.1. Ejemplo de valores de factores de galga y sensibilidad transversal [2].	6
Tabla 1.2. Sensibilidad a la tensión de varias aleaciones.	6
Tabla 1.3. Rango típico de temperatura para varias combinaciones de rejilla/base.	11
Tabla 2.1. Ganancia configurable por software y resolución de la tarjeta PCI-6024E [5].	27
Tabla 3.1. Cálculo de la carga a compresión y tensión utilizando la ecuación 13.	37
Tabla 4.1. Pendientes y abscisas de los cuatro sensores caracterizados.	59
Tabla 4.2. Sensibilidad de cada uno de los sensores, en voltaje y en kilogramos.	62
Tabla 4.3. Error experimental observado en los sensores.	63
Tabla B.1. Problemas comunes observados, causas y solución de los mismos.	B-6

Resumen

Este documento de tesis muestra el diseño y manufactura de un sensor para medir cargas mecánicas a tensión. Además, se muestra la integración y los componentes de un banco de pruebas para hacer mediciones de tensión con galgas extensiométricas; mediante el uso de un módulo de acondicionamiento de señal, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora personal.

En la parte de manufactura del sensor, se muestran los materiales y equipo utilizados; así como el procedimiento para la elaboración de una columna circular. Para la creación del sensor es necesaria adherirle una galga extensiométrica a la columna, ésta se encarga de medir la deformación de la columna circular. Por lo cual se describe el proceso de pegado, soldado y protección de las galgas.

Para realizar las mediciones de la deformación se desarrolló un programa en el lenguaje de programación LabVIEW, el cual permite observar la medición de la deformación que sufre la columna circular en voltaje, tanto en forma digital como analógica. Este programa brinda una ventana para el cálculo ideal de alargamiento y variaciones de resistencia de la galga adherida a la columna circular; también realiza el cálculo de las variaciones de voltaje teóricas esperadas con cierta variación de resistencia de la galga.

Introducción

El control de los procesos industriales depende de la capacidad de medir con exactitud y rapidez el valor de las variables que intervienen en su funcionamiento. La mejor manera de realizarlo es teniendo mediciones precisas de cada una de estas variables, lo cual se logra mediante la utilización de sensores y transductores. Para el caso de mediciones mecánicas, es preferible convertir las señales mecánicas a eléctricas porque:

- Las señales eléctricas pueden transmitirse de un lugar a otro de manera más fácil que las señales mecánicas.
- Las señales eléctricas son más sencillas de amplificar y filtrar que las señales mecánicas.
- Las señales eléctricas son sencillas de manipular para encontrar parámetros importantes como: la razón de cambio de una variable, integral de tiempo y determinar si la variable ha excedido algún límite, etc.

Se denomina transductor eléctrico al dispositivo que transforma cualquier parámetro físico, químico o biológico en una magnitud eléctrica. Actualmente, existen transductores eléctricos para medir casi cualquier variable física, sin importar lo confusa que sea. En la industria, las variables físicas más importantes son: Posición, velocidad, aceleración, fuerza, potencia, presión, tensión, razón de flujo, temperatura, intensidad de la luz y humedad [1].

Cualquier señal que ha sido captada por un elemento sensor, independientemente de su naturaleza, aporta una determinada información. Dependiendo de la aplicación, se requiere de un sistema de adquisición de datos adecuado, el cual está determinado por las condiciones específicas de la aplicación. Una técnica usada para la medición de tensión y presión es la extensometría.

A través de la extensometría se puede medir el esfuerzo que hay en un punto cualquiera de una pieza, que está sometida a una determinada carga. La medida no se efectúa de una forma directa, esto es, no se mide el esfuerzo directamente; lo que se mide es el alargamiento que sufre la pieza a la que se le aplica la carga. Si se conoce el alargamiento en un punto, se puede conocer entonces el esfuerzo que actúa en el, ya que ambas son directamente proporcionales y están relacionadas mediante el módulo elástico del material, según la ley de Hooke [URL1].



Figura i.1. Técnica de extensometría.

La técnica de extensometría es muy poderosa, ya que la medida que se obtiene es una información real de lo que está pasando en un objeto de estudio hecho de cualquier tipo de material (acero, aluminio, plástico, madera, materiales compuestos, etc.), en un momento determinado; además, de que se pueden hacer estudios tanto de fenómenos estáticos como dinámicos [URL1]. La *figura i.1* muestra el montaje para hacer un estudio de tensión mecánica estática en un armazón de bicicleta. En esta figura se muestra el montaje de las galgas en el armazón, así como el equipo de medición requerido. El estudio de los esfuerzos en el armazón permite mejorar su diseño, fiabilidad, estructura, rigidez, etc.

Para medir un parámetro físico y obtener datos para procesarlos y analizarlos es necesario:

- Conocer el parámetro físico a estudiar o analizar (compresión, tensión, torsión, flexión, etc.).
- Seleccionar el transductor que se va a colocar en el objeto de estudio. En la extensometría el sensor es una galga extensiométrica y el objeto de estudio en el cual se coloca, habitualmente es una pared, barra o viga de alguna estructura, considerando su material. Por ejemplo en la *figura i.1* el objeto de estudio es el armazón de bicicleta.
- Acondicionar la señal del sensor, para convertirla en una señal eléctrica de corriente o voltaje, lo suficientemente grande para ser procesada. Normalmente se utiliza un amplificador y un sistema de filtros para eliminar el ruido de la señal.
- Tener algún equipo para el despliegue y lectura de la información, puede ser un osciloscopio. Si se desea procesar o almacenar la señal, es mejor usar una computadora con una tarjeta de adquisición de datos.

Las galgas extensiométricas (*figura i.2*) son pequeños sensores capaces de detectar variaciones longitudinales extremadamente pequeñas y convertirlas en variaciones de resistencia medibles. Éstas se usan en la industria para medir con precisión fuerzas o pesos muy grandes [URL2]. Existen galgas para medir fuerzas pequeñas, pero no son comunes.

La galga extensiométrica es un alambre de resistencia, la cual es pegada de manera firme en la superficie del objeto que se desea estudiar. Cuando al objeto se le aplica una fuerza de tensión o compresión, ésta provoca que el objeto se estire o se comprima ligeramente [2].

Una galga adherida a una superficie se distorsiona ligeramente. La distorsión del alambre cambia su resistencia, la cual es función del valor de la fuerza. Lo que mide en realidad una galga es la deformación, que se define como el cambio en la longitud de un objeto [1].

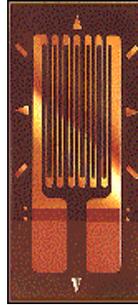


Figura i.2. Galga extensiométrica.

Las galgas permiten la medición de diferentes parámetros entre los cuales se encuentran: la vibración, esfuerzo de torsión, flexión, compresión y tensión entre otros. Algunos campos en los cuales se desarrollan aplicaciones con galgas extensiométricas son:

- Aplicaciones aeroespaciales.
- Sensores de impacto.
- Sensores dentales.
- Aplicaciones en el deporte.
- Sensores de tensión y compresión.

En el mercado existen compañías como: HBM, Omega y Vishay Measurements Group entre otras, que se dedican a la construcción de una gran variedad de galgas extensiométricas [URL3, URL4, URL5]. Cada una especifica sus propios parámetros; tomando como referencia la construcción de la galga los parámetros más importantes son:

- Dimensión de la rejilla.
- Resistencia.
- Limite de la galga.
- Rango de temperatura.
- Tipo de pegamento y protección.

En una aplicación con galgas extensiométricas, se pueden tener variaciones de resistencia pequeñas o grandes. Para detectarlas, es necesario colocarlas en un circuito en configuración de puente de Wheatstone [1]. El cual proporciona un voltaje en función de la variación de resistencia. Cuando todas las resistencias que lo conforman tienen el mismo valor, se dice que el puente está en equilibrio y el voltaje de salida es cero.

En este estudio la galga se coloca en una estructura metálica, la cual al experimentar una tensión provoca una variación de resistencia en la galga, ésta se convierte en un cambio de voltaje, que puede ser positivo o negativo. Como este voltaje es muy pequeño, se usa un amplificador de instrumentación y un filtro pasa bajas para acondicionar la señal. De manera general la mayoría de las aplicaciones con galgas extensiométricas involucran las partes que se muestran en el diagrama a bloques de la *figura i.3*.

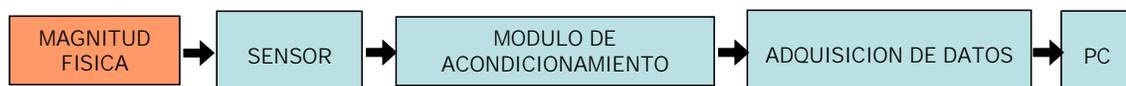


Figura i.3. Diagrama a bloques del sensor de tensión.

Objetivo General

Estudio de las características de las galgas extensiométricas y su aplicación en el diseño, manufactura y caracterización de un sensor de carga a tensión.

Objetivos Específicos

- Investigar los tipos de galgas extensiométricas existentes en el mercado, parámetros de selección y técnicas de manejo para la medición de cargas a tensión.
- Diseñar y manufacturar seis estructuras tipo columna de aluminio (aleación 6061) con diámetros de 12.7 mm y 6.35 mm. Para estudiar la influencia del diámetro en la medición de tensión.
- Integrar un sensor de tensión compuesto por: una estructura tipo columna y una galga extensiométrica adherida a ella.
- Integrar un banco de pruebas para la caracterización del sensor de tensión compuesto por: Módulo de acondicionamiento de señales y tarjeta de adquisición de datos de la firma *National Instruments*®.
- Caracterizar estáticamente la sensibilidad a la deformación de las estructuras y verificar la repetibilidad de las mediciones de cada uno de los sensores.
- Desarrollar un software para la caracterización del sensor de tensión. En éste se obtendrá y mostrará la carga que experimenta el sensor en kilogramos y las variaciones de voltaje en el puente de Wheatstone. Contará con una ventana para realizar análisis teóricos.

Contenido de este documento de tesis

El presente documento de tesis está formado por cinco capítulos, estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describen las características y parámetros de selección de las galgas extensiométricas. Esta teoría básica es necesaria para entender el funcionamiento y operación de la misma.

El capítulo 2 muestra las características de los módulos de acondicionamiento de señales, la tarjeta de adquisición de datos y el programa LabVIEW, éstos de la firma *National Instruments*®.

En el capítulo 3 se describe el proceso de diseño y manufactura de los sensores. Mencionando la técnica y procedimiento de pegado, soldado y protección de galgas extensiométricas de la firma *Vishay Measurements Group*®.

El capítulo 4 describe el proceso de caracterización y se presentan los resultados obtenidos con el banco de pruebas.

En el capítulo 5 se mencionarán las conclusiones del trabajo, observaciones y perspectivas de trabajos a futuro.

1. Galgas extensiométricas

La galga extensiométrica es un transductor que varía su resistencia en función de la deformación que sufre la superficie sobre la cual está pegada [3]. La galga está constituida por una base muy delgada de un material aislante, sobre la cual se adhiere un patrón metálico en forma de hilo muy fino. La resistencia eléctrica del hilo es directamente proporcional a su longitud, de tal manera que la resistencia aumenta cuando se alarga y disminuye cuando se comprime el hilo. Para realizar mediciones, este transductor se pega sobre la superficie del objeto bajo estudio (metal, madera, concreto, plástico, etc.), cuando el objeto se comprime o expande, la longitud del hilo metálico cambia en la misma proporción y con ello la resistencia de la galga. Este efecto se usa para hacer la medición de diferentes parámetros, como son: Vibración, torsión, flexión, compresión, tensión, pesos, etc.

Debido a su bajo costo, linealidad, amplio rango de temperatura y condiciones de operación, las galgas se emplean en los sectores industrial y comercial. En este capítulo se explicarán los principales parámetros de selección de las galgas, características de desempeño, materiales y pegamentos. El contenido del capítulo corresponde a las características de galgas de la firma *Vishay*® (figura 1.1), debido a que es la empresa líder en el mercado, además de que proporciona toda la información técnica sobre sus productos [4].

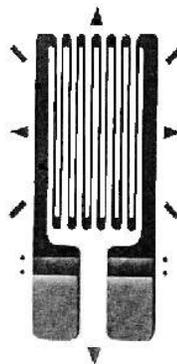


Figura 1.1. Galga extensiométrica.

1.1. Construcción de la galga

La construcción de una galga extensiométrica involucra la unión de sus tres partes principales, las cuales son: la rejilla, la base y las etiquetas (mostradas en la *figura 1.2*). La rejilla de la galga es la parte metálica que cambia su resistencia en función de la compresión o tensión, la base es el soporte portador de la rejilla y es fabricada de diferentes materiales aislantes, por último, las etiquetas de la galga sirven para conectar la galga extensiométrica con el circuito acondicionador de señal.

El proceso de fabricación de la galga comienza con la unión de una aleación metálica sobre una base aislante, similar a una placa de baquelita, la cual se llama lámina. Posteriormente se procede a colocar sobre la lámina un patrón maestro de galgas. El patrón maestro es un negativo fotográfico con el cual se define la forma que tendrá la galga (mascarilla). Este patrón es fotografiado y reproducido como negativos del tamaño y forma correcta de la galga.

Posteriormente, con una técnica similar a la usada en la fabricación de circuitos impresos, se produce la rejilla. La lámina que ha sido definida con una resina fotosensible es atacada químicamente para remover el exceso de metal, obteniendo con esto la rejilla de la galga. Se usan técnicas ópticas y eléctricas para verificar que la rejilla cumpla con las especificaciones requeridas.

La rejilla requiere una protección contra el medio ambiente, debido a esto se utiliza un encapsulado de la galga. El encapsulado consiste en cubrir con cemento nitrocelulosa a la rejilla y su base. La rejilla se cubre con varias capas de nitrocelulosa para dar firmeza y flexibilidad a la galga. Para proporcionarle características especiales a la rejilla y mejorar el rango de temperatura de operación de la galga, se reemplaza el encapsulado de nitrocelulosa por fibra de vidrio y resina térmica.

Las etiquetas de la galga son los soportes usados para fijar (soldar) los alambres usados para conectar la galga con la instrumentación requerida para acondicionar la señal. La base de la galga sirve para aislar la rejilla de la superficie de pegado. En la galga se observan cuatro triángulos que sirven para orientar la galga en la superficie de estudio.

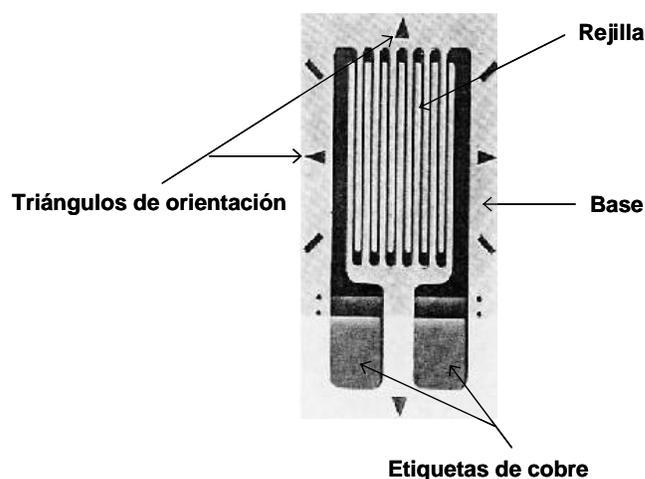


Figura 1.2. Partes que componen la galga.

1.1.1. Rejilla de la galga extensiométrica

Las galgas extensiométricas tienen un alambrado en forma de rejilla. Para cumplir con los requerimientos de resistencia, se varía su longitud. El ancho de los alambres es de 0.02 mm y cuando son de una aleación cobre-níquel su espesor es de 0.1 mm en el área de la rejilla.

Según la aplicación existen varios tipos de alambres para galgas con diferentes características (la más usada es cobre-níquel). Sin embargo, los alambres de la rejilla pueden ser de varios tipos de aleaciones para: Mejorar el desempeño a muy altas o muy bajas temperaturas, aumentar la sensibilidad a la tensión (apartado 1.2.1) o para tener una mejor vida a la fatiga (apartado 1.3.5).

1.1.2. Materiales de la base

La base o portadora de la rejilla, es el material que se encuentra entre la superficie del objeto de estudio y la rejilla. Provee las siguientes funciones:

- Proporciona firmeza y soporte a la rejilla para el soldado de cables a las etiquetas.
- Provee una superficie manejable para el pegado de la galga en el objeto de estudio.
- Proporciona un aislamiento eléctrico entre la rejilla de la galga y el objeto de estudio.

Los materiales de la base también llamados forros son de dos tipos: Polyimide y fibra de vidrio reforzada con epoxy-phenolic. Cada forro debe tener características térmicas similares a las de la aleación usada y la superficie sobre la cual va a ser adherida. Por esta razón las galgas se dividen en series, debido a que cada serie tiene sus propias características y áreas de aplicación.

1.1.2.1. Polyimide

Es un tipo de plástico (resina sintética) muy durable, fácil de fabricar, manejable, resistente a altas temperaturas y a la corrosión. Se usa como revestimiento o membrana. La base con polyimide es un portador resistente y extremadamente flexible. Se puede usar en superficies circulares, anguladas y de tamaños pequeños. Tiene una alta resistencia a la vibración y puede operar en ambientes con temperaturas entre -95°C a 175°C . Bases de polyimide reforzadas con fibra de vidrio, tienen la capacidad de operar en ambientes con temperaturas de hasta 400°C .

1.1.2.2. Epoxy-Phenolic

Esta base es una combinación de epoxy con phenolic. Epoxy es una resina sintética característica muy cara, usada para hacer plásticos y adhesivos. Su uso principal se da en el encapsulado de componentes eléctricos y electrónicos. Phenolic se deriva de phenol, el cual es una resina sintética usada para moldear productos, como capa de revestimiento o adhesivo.

Esta base, a diferencia de la base polyimide, puede ser utilizada en ambientes con temperaturas entre -269°C a 290°C . Si es reforzada con fibra de vidrio el límite de operación se puede ampliar a 300°C .

1.1.3. Etiquetas de cobre

Las etiquetas de cobre se utilizan para conectar la galga extensiométrica con el circuito acondicionador de señal. Dependiendo la aplicación se integra un sistema acondicionador de señal para cubrir los requerimientos de ésta. Los cables que conectan el circuito acondicionador

con la galga extensiométrica deben de ser soldados sobre las etiquetas de cobre para garantizar una buena conducción de las variaciones de resistencia de la galga.

1.1.4. Triángulos de orientación

La galga debe alinearse con las líneas de fuerza que presenta el objeto de estudio al aplicarse una carga sobre él. Una ubicación incorrecta de la galga implica tener errores en la medición del parámetro de estudio. Las galgas poseen cuatro pequeños triángulos (ver *figura 1.2*), para orientarlas correctamente sobre el objeto de estudio.

1.1.5. Lámina de la galga extensiométrica

La lámina de la galga es la forma final que toma la rejilla. La mayoría de las láminas de galgas extensiométricas son producidas por la técnica ya descrita, de circuito impreso. El proceso de manufactura de la lámina permite producir simultáneamente galgas idénticas, mejorando la repetibilidad de desempeño entre galgas. Este proceso permite tener una gran flexibilidad para producir diferentes geometrías en dos dimensiones, así como tener múltiples elementos del mismo tamaño y grosor. La *figura 1.3* ilustra algunos tipos de la amplia variedad de láminas de galgas disponibles. Típicamente la longitud más usada está en el rango de 3 a 6 mm, con espesor de 0.03 a 0.07 mm.

La galga modelo 40CBY, se usa para medir la tensión en superficies de concreto, ya que tiene la capacidad de medir cualquier fluctuación que ocurre en las partículas del cemento. Como esta superficie es no homogénea, se requiere que la longitud de la galga sea grande con el propósito de tener un promedio de la tensión [URL6]. La galga modelo 125RE se utiliza para determinar tensiones residuales [URL7]. La deformación se define como el cambio en la longitud de un objeto como un porcentaje de su longitud original [1].

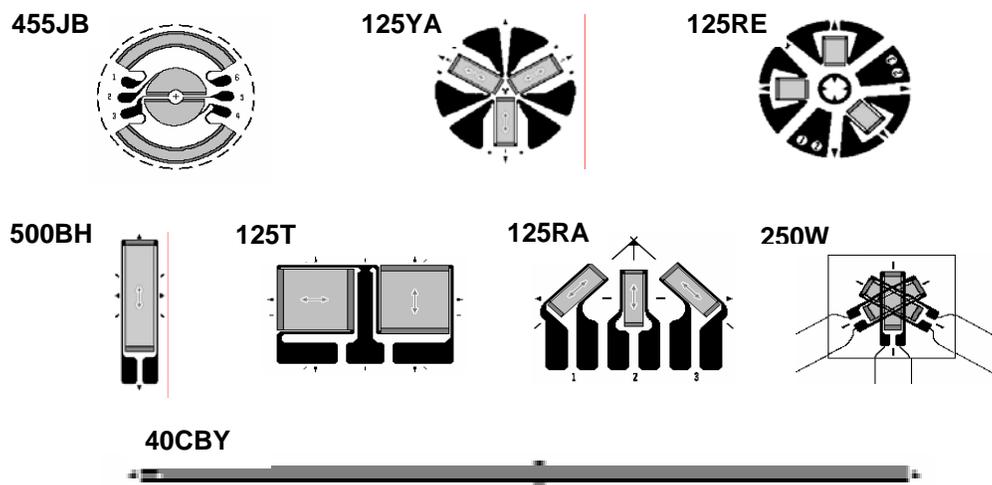


Figura 1.3. Modelos típicos de galgas extensiométricas.

1.2. Parámetros de selección de la galga extensiométrica

Los criterios de selección de la galga extensiométrica involucran evaluar diferentes parámetros como son: Variable física a estudiar (tensión, aceleración, desplazamiento, etc.); superficie sobre la cual se va a pegar (metal, concreto, madera, plástico, etc.) y la temperatura de operación (medio ambiente o ambientes industriales).

La correcta selección del sensor garantiza el óptimo funcionamiento de la galga, para las condiciones ambientales de operación, medidas exactas y confiables, además de reducir al mínimo el costo total de la instalación de la galga.

Para mediciones de tensión, las características de funcionamiento e instalación de una galga son afectadas por los siguientes parámetros:

- Sensibilidad a la tensión de la rejilla.
- Longitud de la galga.
- Modelo de la galga.
- Resistencia de la galga.

Es necesario tener conocimiento de los efectos de estos parámetros sobre la galga y la medición, para poder cumplir con los requisitos de la instalación y operación. En los apartados siguientes se describirán con más detalle cada uno de estos parámetros.

1.2.1. Sensibilidad a la tensión de la rejilla

La galga posee una relación entre tensión aplicada al objeto de estudio y las variaciones de resistencia, la cual se llama sensibilidad a la tensión o factor de galga; se define como la razón de cambio de la resistencia eléctrica del conductor al cambiar la longitud relativa. Este parámetro es adimensional y es de suma importancia; ya que a medida que su valor es más grande, ante la misma tensión mecánica, se producen variaciones de resistencia mayores. El factor de la galga es función de la sensibilidad a la tensión de la aleación de los metales con la que fue fabricada la rejilla de la galga y de otros factores como son: Temperatura, tamaño, configuración de la rejilla y la forma de medirlo.

El factor de galga se mide en los alambres que se encuentran alineados con la tensión; es decir, ubicados en la misma dirección que las líneas de tensión. En los bordes de la rejilla (curvas finales), se manifiesta una sensibilidad transversal. Esta sensibilidad se observa cuando se aplica una tensión excesiva a la galga, lo cual provoca el ensanchamiento (compresión) o estiramiento (tensión) de la galga, haciendo que los bordes de la rejilla aumenten o disminuyan su longitud y con esto la galga varíe su resistencia. En la *figura 1.4* se puede observar una galga sometida a tensión.

El factor de galga se determina experimentalmente, mediante la instalación de galgas de un mismo lote sobre el mismo objeto de estudio, al cual, se le aplica una tensión mecánica conocida. El factor de galga del lote, es el promedio de las variaciones de resistencia detectadas en cada una de las galgas, el cual fue provocado por los cambios de tensión aplicada [4].

Usualmente la sensibilidad transversal es medida con un equipo calibrador especial, el cual está diseñado para generar un campo de tensión uniaxial (en un solo eje). Algunos valores típicos de factor de galga y sensibilidad transversal para galgas comerciales son mostrados en la *tabla 1.1*.

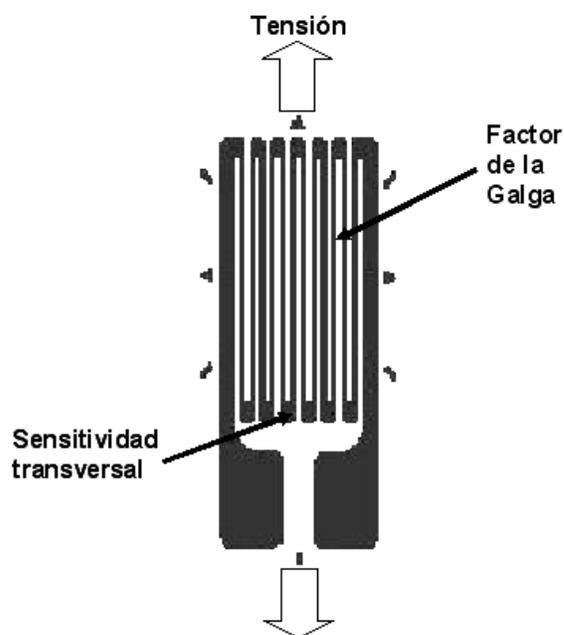


Figura 1.4. Medición del factor de galga y sensitividad transversal.

Los materiales básicos usados en la construcción de la rejilla de las galgas extensiométricas, son aquellos que muestran sensibilidad a la tensión y aspectos importantes como: Amplio rango de operación de temperatura, buen ciclo de trabajo¹, coeficiente de temperatura bajo y controlable. La *tabla 1.2* muestra la sensibilidad a la tensión de algunos de los materiales utilizados para la construcción de galgas.

Tabla 1.1. Ejemplo de valores de factores de galga y sensitividad transversal [2].

<i>Tipo de galga</i>	<i>Factor de galga</i>	<i>Sensibilidad transversal %</i>
EA-06-250BG-120	2.11	+0.4
EA-50-250BG-120	2.125	+0.9
WK-06-250BG-350	2.05	-3.4
WK-06-500AF-350	2.04	-9.2
WK-15-125AD-350	2.16	-1.9

Tabla 1.2. Sensibilidad a la tensión de varias aleaciones.

<i>Material</i>	<i>Nombre comercial</i>	<i>Sensibilidad a la tensión</i>
Cobre-níquel (55-45)	Constantan	+2.1
Níquel-cromo (80-20)	Nichrome V	+2.2
Níquel-cromo (75-20) mas hierro y aluminio	Karma	2.1
Hierro-cromo-aluminio	Armour D	+2.2
Níquel-cromo-hierro-molibdeno (36-8-55.5-0.5)	Isoelastic	+3.5
Platino-tungsteno (92-8)	-	+4.0
Cobre-níquel-manganeso (84-4-12)	Manganin	+0.6
Níquel	-	-12.0
Hierro	-	+4.0

¹ Un ciclo de trabajo es el proceso de estirar o comprimir la aleación y dejar que retorne a su estado original.

Vishay® proporciona los datos de la mayoría de aleaciones usadas en la construcción de galgas extensiométricas, algunas de ellas son: Aleación Constantan, Isoelastic y Karma. A continuación se describen sus principales características.

1.2.1.1. Constantan (aleación A)

Es una aleación compuesta por 55% de cobre y 45% de níquel. Tiene buena sensibilidad a la tensión (2.1), bajo coeficiente de temperatura, buena vida de fatiga (resiste miles ciclos de trabajo). El rango de temperatura de operación óptimo se encuentra entre -50°C y 70°C . Si se excede este límite, la aleación puede presentar pequeños cambios de resistencia debido a las variaciones de temperatura y con el tiempo conducir a cambios permanentes.

1.2.1.2. Isoelastic (aleación D)

Esta es una aleación de níquel, cromo, hierro y molibdeno. Su principal ventaja es que tiene una vida superior a la fatiga que la aleación Constantan, con un alto factor de galga (aproximadamente 3.5).

Esta aleación puede trabajar en ambientes con presencia de interferencia magnética. Se recomienda su uso cuando la medida de la tensión es dinámica, es decir, las variaciones de la tensión son permanentes y no se tiene un estado de reposo o de referencia. Su principal desventaja es que la respuesta a la tensión es no lineal.

1.2.1.3. Karma (aleación K)

Esta es una aleación de níquel, cromo, hierro y aluminio. Se caracteriza por tener una buena vida de fatiga y excelente estabilidad (no es afectada por las variaciones de temperatura). Es excelente para aplicaciones estáticas, las cuales involucran medir tensiones por largos periodos de tiempo sin variaciones, es decir, la tensión permanece constante. Es excelente para medir largos períodos de tensión (meses o años) a temperatura ambiente, o cortos períodos de tiempo a temperaturas elevadas.

Su rango de temperatura es de -269°C a 260°C . Para períodos cortos, las galgas encapsuladas con la aleación K pueden exponerse a temperaturas de 400°C .

En la *figura 1.5* se observa el comportamiento típico de las aleaciones D, A y K con respecto a las variaciones de la temperatura. Estos materiales presentan variaciones de tensión sin tener la presencia de una tensión externa. Los cambios de temperatura del medio ambiente en el cual trabajan, influyen en las mediciones de tensión realizadas por las mismas. Estos cambios de tensión de las aleaciones se miden en microtensiones ($\mu\epsilon$). Las microtensiones son la unidad para expresar las variaciones de la tensión.

En la *figura 1.5* se observa que la salida térmica de la aleación K ofrece una curva más plana que la salida de la aleación A. Esto permite tener una corrección más exacta para los errores introducidos por efectos térmicos. La aleación D muestra más variación en la medida de la tensión (en $\mu\epsilon$) que las aleaciones A y K.

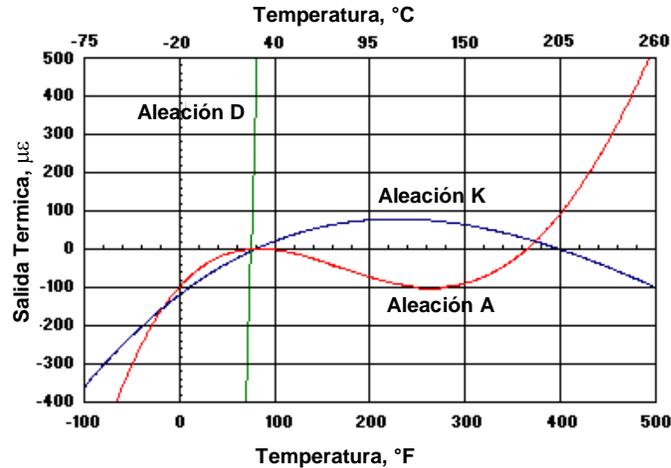


Figura 1.5. Curva de temperatura contra salida térmica en $\mu\epsilon$.

Una característica importante de las aleaciones Constantan y Karma es su capacidad para la compensación de la temperatura por sí mismas. Las galgas que miden tensión se diseñan para producir una salida térmica mínima, de esta manera compensan por sí mismas el efecto de la temperatura. Cuando se selecciona una aleación de galga se debe tomar en cuenta el número de compensación de la temperatura de la aleación, con sus siglas en inglés (STC, *self temperatura compesation*), el cual es un parámetro que el fabricante especifica.

1.2.2. Longitud de la galga

La longitud de la galga es una consideración importante en la selección de la misma. A menudo es el primer parámetro que se define. Debido a que las mediciones de tensión usualmente se realizan en máquinas o estructuras con dimensiones pequeñas; las galgas con longitudes superiores a los 13 mm se consideran largas, ofrecen ventajas comparadas con las galgas pequeñas (con longitud de 5 mm), debido a que son fáciles de manejar y a que poseen buena disipación de calor. Esta última consideración es muy importante cuando la galga es instalada sobre plástico u otro material con propiedad de baja transferencia de calor. La longitud de la galga es el promedio de la longitud de la rejilla entre el número de líneas que tiene ésta. En la definición de la longitud de galga no se toma en cuenta la longitud de las etiquetas, tal como se muestra en la *figura 1.6*.

1.2.3. Modelo de la galga

El modelo de la galga es la forma, figura o patrón que se observa en la galga. En la *figura 1.3* se observan ocho modelos diferentes de galgas. Debido a la variedad de aplicaciones y usos, existen diferentes modelos de galgas. El modelo incluye: la forma de la rejilla, el número de rejillas y orientación de las mismas (en galgas con múltiples rejillas) y la configuración de las etiquetas de soldado.

Cuando la dirección de la tensión es uniaxial y conocida con precisión, se usa una sola galga con una rejilla alineada en la dirección de la tensión. Para estados de tensión de dos ejes (biaxial) son requeridas de dos a tres galgas en forma de rosa para poder determinar la tensión principal. Cuando la dirección del eje principal es conocida, se pueden ocupar dos elementos “Roseta tee” a 90° , con la galga alineada para coincidir con el eje principal.

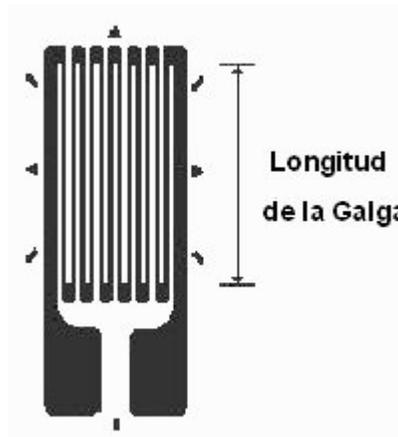


Figura 1.6. Longitud de la galga.

Cuando no se conoce la dirección del eje principal de la tensión de estados biaxiales, se usa una galga con tres elementos en forma de rosa, con este arreglo se obtienen: la dirección y magnitud de las tensiones principales. La rosa puede ser instalada en cualquier orientación, usualmente una de las rejillas es alineada con alguno de los ejes significativos del objeto de estudio. Hay galgas con tres elementos en configuración rectangular a 45° o configuración delta a 60°. La configuración rectangular simplifica el análisis. Existe una gran variedad de galgas con más de dos rejillas, dependiendo la aplicación se elige las más adecuada. La *figura 1.7* muestra algunos de los tipos de rosetas.

1.2.4. Resistencia de la galga

La resistencia de la galga tiene valores típicos de 120 ohms o 350 ohms. Es preferible usar una galga con resistencia grande para reducir el calentamiento de la misma y de esta forma reducir el efecto de los cables. La relación señal-ruido puede mejorarse con galgas de resistencia alta cuando el circuito acondicionador de señal incluye interruptores u otras fuentes que provoquen cambios en la resistencia.

Valores de resistencia de 1000 ohms son usados cuando el objeto en estudio tiene bajas características de conducción de calor (plástico) o de 5000 ohms en equipos de medición que funcionan con baterías y que requieren de un bajo consumo de energía.

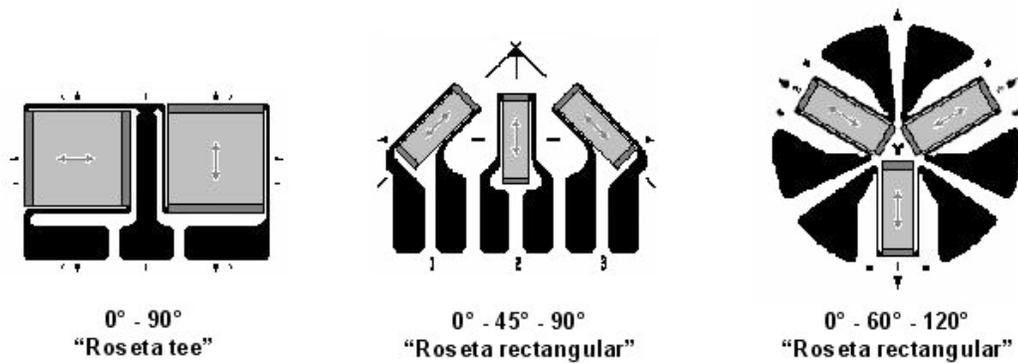


Figura 1.7. Ejemplos de galgas tipo roseta.

1.3. Característica de desempeño

El funcionamiento de la galga extensiométrica depende de los parámetros explicados en la sección anterior. El procedimiento de instalación y pegado depende de la experiencia que tenga el instalador de la galga. En la actualidad, las técnicas de instalación y pegado permiten alcanzar resultados confiables después de pequeñas prácticas. Las características de desempeño proporcionadas por el fabricante son:

- Variación del factor de galga por la temperatura.
- Resistencia y tolerancia.
- Efectos de la temperatura en la resistencia.
- Capacidad de elongación.
- Vida de fatiga.
- Rango de temperatura de operación de las galgas.

1.3.1. Variación del factor de galga por la temperatura

Las aleaciones de metal usadas típicamente en las galgas muestran un cambio de factor de la galga con la temperatura. En algunas aplicaciones el error debido a estos efectos es tan pequeño que es ignorado. En otras, dependiendo de la aleación, la temperatura y los requerimientos de precisión, puede ser necesaria la corrección de la variación por temperatura. Para corregir esta variación en aplicaciones que requieren alta precisión se utiliza un módulo compensador.

1.3.2. Resistencia y tolerancia

La resistencia de la galga no es una característica de desempeño, pero la tolerancia que proporciona el fabricante del valor estándar es importante para el buen funcionamiento del sistema de acondicionamiento. Para una galga de 120 ohm y 6 mm de longitud, la tolerancia típica es de 0.15% en circuito abierto. Para galgas encapsuladas, muy pequeñas, resistencia alta o de diferentes aleaciones, la tolerancia de la resistencia puede incrementar a 0.3% o más.

1.3.3. Efectos de la temperatura en la resistencia

Las cargas externas no son las únicas fuentes de esfuerzos y deformaciones en una estructura. Los cambios de temperatura producen dilatación o contracción del material, con lo cual se generan deformaciones térmicas o esfuerzos térmicos. En la mayoría de los materiales estructurales la deformación térmica es proporcional al cambio de temperatura. Todos los conductores eléctricos tienen una propiedad llamada coeficiente de temperatura o coeficiente de dilatación térmica [5]. La galga extensiométrica está hecha de un material conductor lo cual significa que sufre cambios de resistencia con la temperatura.

En una galga extensiométrica hay un efecto adicional cuando la galga está adherida al objeto bajo estudio. Si éste tiene un coeficiente de temperatura diferente al coeficiente de la aleación de la galga; un cambio en la temperatura producirá un cambio de resistencia y con ello una medida de tensión debido a la diferencia de coeficientes de temperatura. En el área de mecánica de materiales la combinación de estos cambios de resistencia que ocurren, son interpretados y referidos como resultados térmicos. Para corregir este efecto, la mayoría de galgas extensiométricas se fabrican con un coeficiente de expansión térmica igual al metal del objeto bajo estudio y de esta forma se compensan los efectos térmicos (ver *figura 1.5*).

1.3.4. Capacidad de elongación

Las galgas extensiométricas tienen un límite de elongación (compresión o estiramiento), es decir, un nivel máximo de tensión que puede ser aplicado sobre ellas antes de dañarse. Normalmente esto se especifica como un porcentaje de la variación de la longitud de la galga. En galgas de alto desempeño, fabricadas con fibra de vidrio, su límite de variación es del 1% o 2% de la longitud de la rejilla. Las galgas con rejilla de cobre-níquel miden tensiones que provocan variaciones mayores al 5% de la longitud de la rejilla [4].

1.3.5. Vida de fatiga

Es común que todos los metales fallen eventualmente por la fatiga, debido a que son sometidos a ciclos de tensión a altos niveles. La rejilla de la galga llega a estar en circuito abierto en menos ciclos que la estructura metálica donde esta adherida, teniendo un límite de fatiga menor. La vida de fatiga depende del material de la rejilla de la galga, los niveles de tensión, tiempo de uso del sensor, la uniformidad con la que se aplique la tensión sobre el área de la galga, tamaño y colocación de la misma. Este parámetro es proporcionado por el fabricante.

1.3.6. Rango de temperatura de operación de las galgas

El rango de temperatura de operación de la galga está en función de la aleación de la rejilla de la galga, base, adhesivo y otras limitaciones asociadas con la temperatura. El rango típico para varias combinaciones comerciales de rejilla/base disponibles para galgas es mostrado en la *tabla 3*.

Tabla 1.3. Rango típico de temperatura para varias combinaciones de rejilla/base.

<i>Lámina</i>	<i>Base</i>	<i>Estático</i>	<i>Dinámico</i>
Cobre-níquel	Polyimide	-75 a +175°C	-195 a +205°C
Cobre-níquel	Epoxy	-45 a +99°C	-195 a +175°C
Isoelastic	Polyimide	-	-195 a +205°C
Karma	Fibra de vidrio reforzada	-269 a +290°C	-269 a +400°C
Níquel-cromo	strippable	-260 a +425°C	-260 a +425°C

1.4. Adhesivos

La teoría de operación de las galgas, asume que la tensión en la rejilla de la galga es idéntica a la tensión que sufre la superficie donde la galga es adherida. Para lograrlo, es necesaria la selección de un adhesivo apropiado para la aplicación a desarrollar, además de una cuidadosa instalación de la galga. Existen una variedad de adhesivos disponibles para la industria y usos comerciales, pocos de ellos poseen las características necesarias para lograr una exitosa instalación de galga. Debido a esto, los fabricantes de galgas han formulado sus propios adhesivos con las características y control de calidad adecuado para asegurar un desempeño aceptable.

Los adhesivos ideales tienen las siguientes características: Forman una capa delgada, muestran linealidad, corto tiempo de secado, soportan altas elongaciones y son compatibles con todas las bases de galgas, materiales y superficies sobre las cuales se van a aplicar. Los principales tipos de adhesivos usados con galgas son:

- Cyanoacrylate.

- Epoxies y Epoxy-Phenolic.
- Polyesters.
- Polyimide.
- Nitrocellulose.
- Cemento cerámico.

El cyanoacrylate es un adhesivo de propósito general usado particularmente en aplicaciones para mediciones de presión, por su secado rápido y simplicidad de uso. Los adhesivos Epoxies y epoxy-phenolic son utilizados para la instalación de galgas de tensión. El adhesivo polyesters es usado en conjunto con bases de galgas de poliéster y también puede ser utilizado con las bases de galga epoxy y polyimide. El adhesivo polyimide proporciona buen trabajo en aplicaciones con altas temperaturas y es utilizado con la base de galga polyimide. El adhesivo nitrocellulose se coloca en la galga por evaporación y requiere que la base de la galga tenga poros para que el adhesivo se adhiera a ella. El cemento cerámico es usado en instalaciones de galga con base strippable [4].

2. Mediciones con galgas

La mayoría de los sensores y transductores generan señales muy pequeñas que deben acondicionarse para que puedan ser procesadas por un sistema de adquisición de datos. Este procesamiento es conocido como acondicionamiento de señal, incluye funciones como: Amplificación, filtrado y aislamiento eléctrico. La mayoría de los sistemas de adquisición de datos basados en PC incluyen algún tipo de acondicionamiento de señal, una tarjeta de adquisición de datos (TAD) y una PC.

De manera general, la mayoría de las aplicaciones para mediciones con galgas extensiométricas involucran un sensor, el módulo de acondicionamiento, la tarjeta de adquisición de datos y una computadora o un sistema para el procesamiento (*figura 2.1*). El módulo de acondicionamiento toma las variaciones de resistencia de la galga y las convierte a variaciones de voltaje. Para ello utiliza un circuito en configuración de puente de Wheatstone, amplificadores para aumentar el nivel de la señal y filtros pasa bajas para eliminar el ruido. En el mercado existen varios fabricantes que producen estos módulos, sin embargo el módulo de acondicionamiento utilizado en este trabajo es de la firma *National Instruments®*.



Figura 2.1. Diagrama a bloques para mediciones de tensión con galgas extensiométricas.

La tarjeta de adquisición de datos toma la señal del módulo de acondicionamiento y la digitaliza (la convierte a cierto número de bits), para que pueda ser procesada por una computadora o un microprocesador. La tarjeta usada es la PCI-6024E de la firma *National Instruments*®. La computadora toma los datos de la TAD y con base en ellos hace los cálculos para desplegar la medición de la tensión.

2.1. Sensor de tensión

Existen diferentes tipos de estructuras mecánicas para medir tensión, compresión, torsión y flexión. Las estructuras tipo viga son ideales para medir parámetros como torsión y flexión, mientras que las estructuras tipo columna, son utilizadas preferentemente para la medición de tensión y compresión [6]. Como el objetivo de la tesis es diseñar y construir un sensor de tensión, éste se forma de la unión de una estructura tipo columna con una galga adherida a ella.

La extensometría es una técnica usada para el estudio de la tensión en estructuras metálicas con galgas extensiométricas. En los siguientes apartados se explicaran los principales parámetros y relaciones matemáticas que modelan la unión de la columna con la galga.

2.1.1. Principio básico de operación de la galga

La galga extensiométrica es un transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Este dispositivo se adhiere a una variedad de materiales con el fin de medir la carga mecánica aplicada al material. La estructura sobre la cual se pega la galga cambia su longitud en función de la fuerza de tensión que experimenta, lo cual hace que la resistencia de la galga cambie. Para medir este cambio, la galga se conecta a un puente de Wheatstone en configuración de medio puente o puente completo [apartado 2.2.2]. Antes de que se modele el comportamiento de la galga, es necesario explicar los principales parámetros que afectan a una estructura mecánica cuando se le somete a una fuerza axial.

Los conceptos fundamentales de mecánica de materiales son el esfuerzo y la deformación unitaria. Una barra prismática es un miembro estructural recto con sección transversal constante en toda su longitud. Una fuerza axial es una carga dirigida a lo largo del eje de una barra que se somete a tensión. La intensidad de una fuerza se llama esfuerzo y se denota con la letra griega σ (sigma), la ecuación 1 expresa la intensidad del esfuerzo uniforme en una barra prismática cargada axialmente.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo aplicado al objeto [N/ m²].

P = Tensión, Fuerza, Peso, Carga [N].

A = Área transversal de la estructura [m²].

Cuando la barra es estirada por las fuerzas P , el esfuerzo es de tensión; si las fuerzas son invertidas en sentido, ocasionando que la barra quede comprimida, se obtiene un esfuerzo de compresión. Una barra recta cambia de longitud al cargarla axialmente, volviéndose más larga en tensión y más corta en compresión, este concepto adimensional se llama alargamiento por unidad de longitud o deformación unitaria, se denota por la letra griega ε (épsilon) y está dado por la ecuación 2 [5]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2)$$

Donde:

ε = Deformación unitaria.

ΔL = Cambio en la longitud del objeto [m].

L_o = Longitud inicial del objeto [m].

Si la barra está bajo tensión, la deformación unitaria se llama deformación unitaria a tensión, que representa un alargamiento o estiramiento de un material. Si la barra está bajo compresión, la deformación unitaria es una deformación unitaria a compresión y la barra se acorta. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a tensión o compresión la modela la ley de Hooke [1], la cual está expresada en la ecuación 3.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Donde:

σ = Esfuerzo aplicado al objeto [N/ m²].

E = Módulo de elasticidad del material [N/ m²].

ε = Deformación unitaria.

Lo importante de la ley de Hooke es que predice el cambio que tendrá la longitud de un objeto en función de la tensión aplicada. De esta manera, si por algún medio se mide la variación de longitud, se puede medir en forma directa la tensión aplicada. En la *figura 2.2* se observa una barra que es sometida a una tensión (P), esta tensión provoca un cambio de longitud (ΔL) en la barra. Conociendo el módulo de elasticidad de la barra y la tensión aplicada a la misma, se puede conocer el cambio de longitud que sufrió la barra aplicando la ley de Hooke.

Muchos materiales estructurales (metales, madera, plásticos y cerámicos) se comportan elásticamente y linealmente en las primeras etapas de carga (región lineal y plasticidad), un ejemplo de esto se observa en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero estructural en tensión mostrado en la *figura 2.3*, en la cual se observa que el diagrama comienza con una línea recta que pasa por el origen, lo que significa que la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en esta región es tanto lineal como elástica y proporcional². La pendiente de esta línea recta se llama módulo de elasticidad. Como la pendiente tiene unidades de esfuerzo dividido entre deformación unitaria (adimensional), el módulo de elasticidad posee las mismas unidades que el esfuerzo (N/ m²) [5].

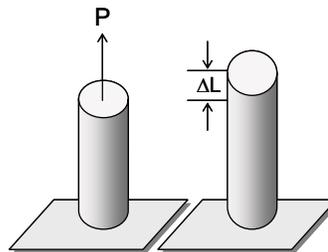


Figura 2.2. Ley de Hooke.

² Dos variables son *proporcionales* si su razón permanece constante; una relación proporcional puede representarse por una línea recta que pase por el origen. Sin embargo, una relación proporcional no es lo mismo que una relación *lineal*. Una relación representada por una línea recta que no pasa por el origen es lineal pero no proporcional.

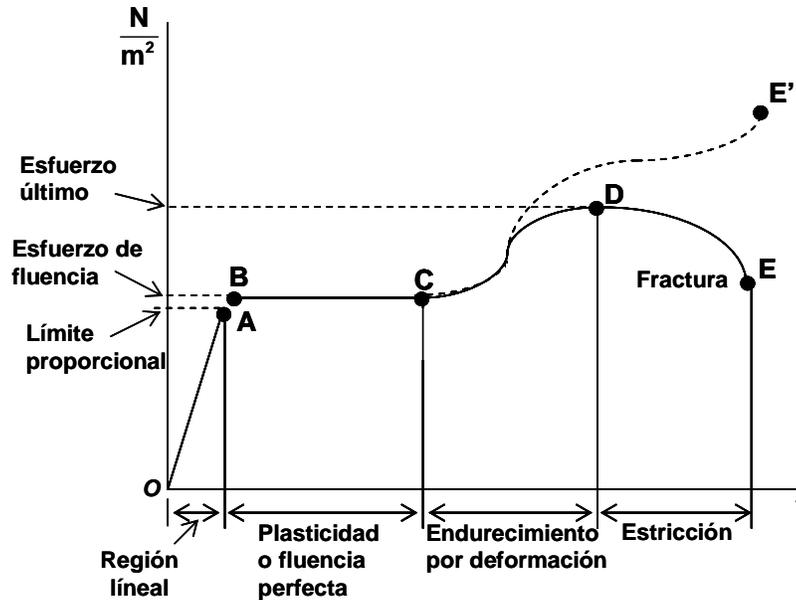


Figura 2.3. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria del acero.

El módulo de elasticidad tiene valores grandes para materiales muy rígidos como el acero (210 GP) y aluminio (70 GP), los materiales más flexibles como: Plástico y madera; tienen un módulo de elasticidad menor (0.7 y 14 GP). Un Pascal (P) tiene unidades de esfuerzo, de tal forma que $P = N/m^2$.

2.1.2. Modelado mecánico de la galga

En todos los materiales el alargamiento producido por una fuerza axial P (en la dirección de la fuerza), va acompañado por una contracción en la dirección transversal. En la figura 2.4 se observa una barra sometida a fuerzas de tensión en el eje ε_x , esta fuerza de tensión provoca un estiramiento de la barra en el eje ε_x y contracciones (reducciones) en los ejes ε_y y ε_z .

Esta afirmación es válida si el material es homogéneo e isotrópico, es decir, que sus propiedades mecánicas son iguales en todo el material y que sus propiedades son independientes del eje (dirección) considerado. Con esta hipótesis, la deformación (ε) debe tener el mismo valor para cualquier dirección transversal: $\varepsilon_y = \varepsilon_z$. Este efecto se conoce como deformación lateral. El valor absoluto de la relación entre la deformación lateral y la axial se conoce como relación de Poisson [6], se le designa con la letra griega ν (nu) y está expresada en la ecuación 4.

$$\nu = \left| \frac{\text{deformación} \cdot \text{lateral}}{\text{deformación} \cdot \text{axial}} \right| \quad (4)$$

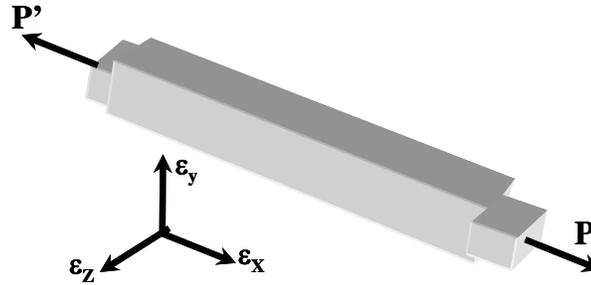


Figura 2.4. Contracción en dirección transversal.

2.1.3. Modelado eléctrico de la galga

La resistencia eléctrica de un conductor de longitud (l), sección transversal (A) y resistividad (ρ), está dada por la ecuación 5 [1].

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (5)$$

Donde:

R = Resistencia del conductor [Ω].

l = Longitud del conductor [m].

A = Área de la sección transversal [m^2].

ρ = Resistividad [Ωm].

Una galga se puede considerar como un alambre metálico, cuya resistencia es modelada con la ecuación 5. Por esta razón, cuando el alambre de la galga se estira ligeramente, la resistencia (R) se incrementará debido a que la longitud (l) aumenta y el área (A) disminuye. Por otra parte; si el alambre se comprime ligeramente, (R) disminuye por que la longitud (l) se decrementa y el área (A) de la sección transversal aumenta. Cuando una galga se pega en una superficie de una columna o viga, los cambios de longitud que experimenta el objeto, son transmitidos directamente a la galga. Por tal motivo se puede tener una relación entre tensión mecánica aplicada y resistencia [1].

En la *figura 2.5* se muestra una galga sometida a fuerzas de tensión y compresión. Cuando se aplica una fuerza de compresión, la longitud de la galga disminuye causando un decremento de la resistencia entre las terminales. Cuando se aplica una fuerza de tensión, la longitud de la galga se incrementa causando un aumento de la resistencia eléctrica de la galga en sus terminales.

Por la forma en que está construida la galga y lo expuesto anteriormente, puede concluirse que la galga de la *figura 1.1* puede modelarse como un trozo de alambre con longitud L (*figura 2.6*). La galga por superposición es la suma de n alambres de longitud L enrollados de tal forma que producen un alambre de gran longitud, con lo cual se le proporciona la resistencia nominal. Todos los alambres poseen: Área (A), resistividad (ρ), la cual es un parámetro proporcionado por el fabricante. Con estos valores y sustituyéndolos en la ecuación 5, se puede conocer el valor de la resistencia (R) para un determinado alambre.

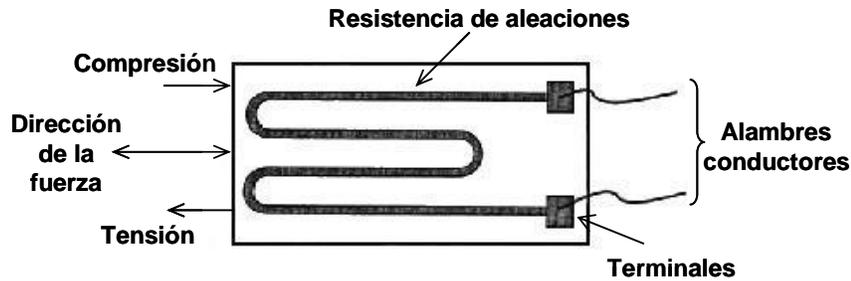


Figura 2.5. Tensión y compresión de la galga.

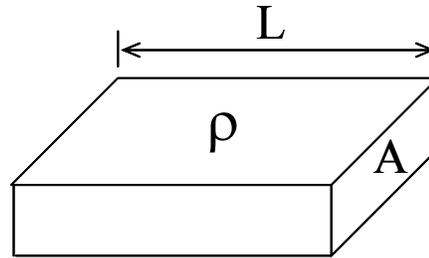


Figura 2.6. Modelado eléctrico de la galga.

En resumen, la resistencia del alambre depende de la longitud y área de la sección transversal del mismo. La longitud del objeto depende de la fuerza aplicada, por lo cual el resultado final es que la resistencia del alambre depende de la fuerza aplicada al objeto. Midiendo el cambio de resistencia se puede medir la fuerza aplicada.

2.1.4. Factor de la galga

Cuando la galga no presenta deformación, posee una resistencia nominal (R). Una figura de mérito usada para especificar la sensibilidad de la galga, es el factor de la galga (GF , *gage factor*). Es un parámetro adimensional definido como la unidad de cambio de la resistencia por unidad de cambio de longitud, mostrado en la ecuación 6:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad (6)$$

Donde:

GF = Factor de la galga.

R = Resistencia nominal de la galga [Ω].

ΔR = Cambio en la resistencia de la galga [Ω].

l = Longitud inicial del objeto [m].

Δl = Cambio en la longitud del objeto [m].

Un factor de galga alto significa un cambio mayor de resistencia, ante un cambio pequeño de longitud, el cual es más fácil de medir que un cambio pequeño de resistencia. Por tal razón, para aplicaciones en medición de tensión o cargas mecánicas es preferible una alta sensibilidad.

En el mercado existen una gran cantidad y tipos de galgas extensiométricas, esta variedad provoca que existan diferentes factores de galga. En la figura 2.7 se muestran algunos tipos de galgas, las cuales se seleccionan en función del tipo de material sobre el cual se van a colocar y la variable física a detectar.

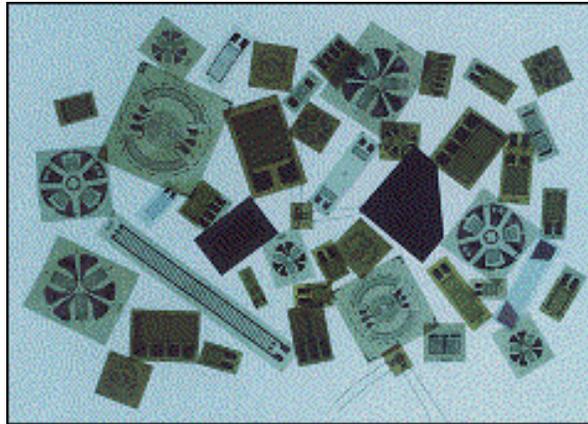


Figura 2.7. Diversos tipos de galgas extensiométricas.

2.1.5. Alargamiento de las barras prismáticas

Las barras cargadas axialmente se alargan bajo carga de tensión y se acortan bajo cargas de compresión. Una barra prismática es un miembro estructural que tiene un eje longitudinal recto y una sección transversal constante en toda su longitud. Comúnmente se usan barras prismáticas circulares (*figura 2.8*), pero también existen miembros estructurales de otras formas [1].

En la *figura 2.8* se muestra el efecto del alargamiento (Δl) que experimenta una barra prismática cuando es sometida a una tensión (P). Combinando las ecuaciones 1, 2 y 3 se obtiene que el alargamiento o compresión que experimenta una barra, tiene una relación que establece que la tensión es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al módulo de elasticidad por el área, expresado en la ecuación 7.

$$\Delta l = \frac{PL}{EA} \quad (7)$$

Donde:

- Δl = Alargamiento del metal [m].
- P = Tensión, fuerza, peso, carga [N].
- E = Módulo de elasticidad del material [N/m^2].
- A = Área transversal de la estructura [m^2].
- L = Longitud inicial sin tensión [m].

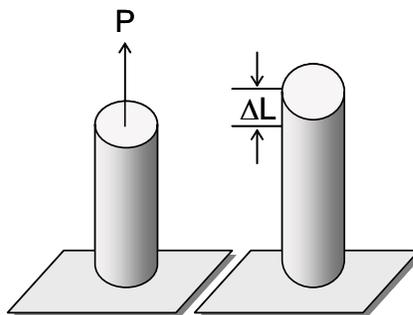


Figura 2.8. Alargamiento de una barra en tensión.

Combinando las ecuaciones 6 y 7 se obtiene la ecuación 8, la cual determina el cambio de resistencia en función de la tensión mecánica aplicada a una columna circular.

$$\Delta R = \frac{GF \cdot R \cdot P}{EA} \quad (8)$$

Donde:

ΔR = Variación de resistencia de la galga [Ω].

GF = Factor de la galga.

R = Resistencia de la galga [Ω].

P = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

E = Módulo de elasticidad del material [N/m^2].

A = Área transversal de la estructura [m^2].

2.1.6. Estructura tipo columna

La estructura tipo columna es una barra prismática circular, que para la medición de cargas, es manufacturada con dos soportes S , los cuales sirven como base para que la estructura tenga estabilidad. La estructura posee dos características principales que son: Diámetro y longitud. En la *figura 2.9* se muestra la barra prismática con sus soportes, la forma que tienen facilita que la tensión se transfiera por la columna. Desde el punto de vista funcional, la barra de la *figura 2.8* y la columna de la *figura 2.9* son similares.

Una estructura tipo columna, permite que las líneas de fuerza se propaguen por el centro de la misma. Los soportes S mostrados en la *figura 2.9* permiten que las líneas de fuerza se concentren a lo largo de la columna (*figura 2.10*).

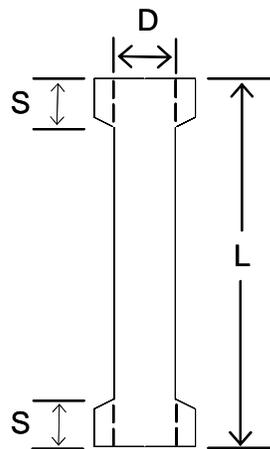


Figura 2.9. Estructura tipo columna con soportes.

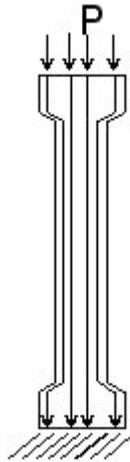


Figura 2.10. Estructura de aluminio con líneas de fuerza.

2.1.7. Compensación de efectos térmicos

Una característica de los metales es dilatarse o contraerse en la medida que se sufren variaciones de temperatura, cuando la galga se instala sobre una superficie de un objeto metálico; éste se expande o contrae en función de la temperatura, lo cual se transfiere a la galga y se pueden interpretar mediciones erróneas de tensión.

Para compensar los efectos térmicos en la galga debido a las variaciones de temperatura en el entorno de trabajo, se instala una galga adicional llamada *galga pasiva* en el sensor de tensión. Esta galga se coloca en dirección perpendicular a la dirección de la tensión. En esta forma únicamente se tienen cambios de resistencia en la galga en función de las variaciones de temperatura existentes en el medio ambiente. La galga que detecta la tensión es llamada *galga activa*, ésta también varía su resistencia con la temperatura, pero al conectarse al módulo de acondicionamiento, estas variaciones son compensadas por la galga pasiva.

En la *figura 2.11* se muestra la forma en la cual se colocan las dos galgas. La galga activa varía en función de la tensión y la temperatura y la pasiva sólo en función de la temperatura. Cuando el sensor va a operar en un ambiente controlado, no se requiere instalarle la galga pasiva por que los cambios de temperatura no son considerables.

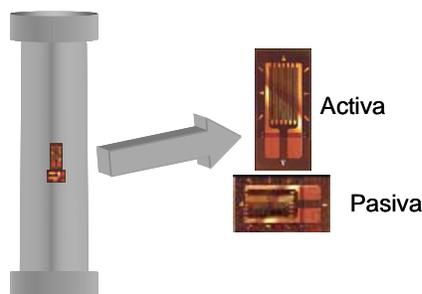


Figura 2.11. Sensor de tensión con galgas extensiométricas.

2.2. Acondicionamiento de señales

Las señales eléctricas generadas por los transductores no son adecuadas o compatibles con las características de entrada de una tarjeta de adquisición de datos. En este caso se hace necesario el uso de dispositivos de acondicionamiento de señales, que realizan un pre-tratamiento de la señal. Las funciones de acondicionamiento que se usan generalmente para cualquier tipo de señal son: Amplificación, filtrado y aislamiento. La *figura 2.1* muestra una configuración general de un sistema basado en la adquisición de datos [7].

Amplificación de la señal

Debido al bajo nivel de señal que suministran los transductores, es necesario amplificar la señal hasta un nivel que pueda ser procesado. Una amplificación de la señal proporcionada por el transductor, incrementa la resolución de la medida y reduce de una forma efectiva el efecto del ruido sobre la señal deseada.

Filtrado de la señal

Los filtros son necesarios para remover cualquier componente de frecuencia no deseada en una señal, además se usan para prevenir el *aliasing* (efecto de sierra o efecto *aliasing*) y reducir el nivel de ruido. Algunas mediciones de termopares generalmente requieren de filtros pasa bajas para remover el ruido de las líneas de alimentación. Las mediciones de vibración normalmente requieren de filtros *antialiasing* para remover componentes de señales más allá del rango de frecuencias del sistema de adquisición de datos.

Aislamiento de la señal

La incompatibilidad de *tierras* entre las tarjetas de adquisición de datos y las señales a medir, es la causa más común de los problemas de medición, en algunos casos pueden llegar a dañar el sistema de adquisición de datos. El método más usado para proporcionar el aislamiento, es la utilización de circuitos ópticos, amplificadores aislados o transformadores. Con estos dispositivos se hace posible trabajar entre dos sistemas con niveles de referencia diferentes y proporcionan voltajes de aislamiento entre la entrada y la salida de al menos 1000 volts.

2.2.1. Acondicionamiento de señales para galgas extensiométricas

Las mediciones con galgas extensiométricas involucran sensar cambios muy pequeños de resistencia y convertirlas a variaciones de voltaje. El uso de un puente Wheatstone con una adecuada amplificación y filtrado de la señal permite obtener una señal de voltaje proporcional a la variación de resistencia. Este hardware se puede diseñar y armar, aunque cuando se quiere desarrollar una aplicación en forma rápida y confiable, en el mercado existen fabricantes que suministran estos dispositivos. La firma *National Instruments®* provee módulos de acondicionamiento de señales para diferentes transductores, como son: Termopares, RTD's y galgas extensiométricas. Para que estos módulos puedan funcionar adecuadamente se tienen que colocar en un bloque conector, el cual se encarga de suministrar el voltaje de alimentación requerido para cada módulo y posee un conector compatible con tarjetas de adquisición de datos de la serie E.

El módulo de acondicionamiento para galgas es el SCC-SG03, el cual va insertado en el bloque conector SC-2345. En la *figura 2.12* se muestra un diagrama a bloques conceptual de la forma en la cual se conectan. En los siguientes apartados se explicaran cada uno de ellos.

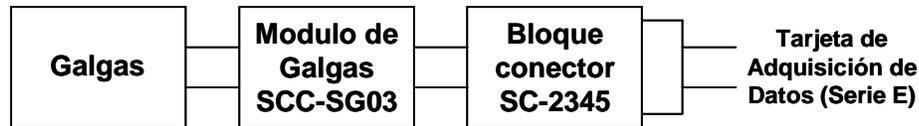


Figura 2.12. Diagrama a bloques conceptual de conexión.

2.2.2. Puento de Wheatstone

El puente de Wheatstone (*figura 2.13*) es un instrumento eléctrico de medición inventado por Samuel Hunter Christie en 1833, mejorado y popularizado por Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. En la *figura 2.13* se muestra el diagrama del puente, el cual está formado por una fuente de voltaje E , un voltímetro V y cuatro resistencias R_1 , R_3 , R_4 y R_x que es la resistencia desconocida [URL9].

El voltaje que detecta el voltímetro depende de la diferencia de potencial existente entre el punto a y b (*figura 2.13*). Se dice que el puente de Wheatstone está en equilibrio cuando la diferencia de potencial entre el punto a y b es igual a cero volts, lo cual se logra cuando la relación entre las resistencias es igual a la ecuación 9 [3]:

$$R_1 R_4 = R_x R_3 \tag{9}$$

Si el puente no está en equilibrio $V_{ab} \neq 0$. Si se supone que tres de sus resistencias son iguales ($R_1=R_3=R_4=R$) y que solo una de ellas tiene un valor diferente ($R_x \neq R$), el voltaje de V_{ab} es función de la resistencia R_x y su valor está dado por la ecuación 10.

$$V_{ab}(R_x) = V_b - V_a = E \left[\frac{R_x}{R + R_x} - \frac{1}{2} \right] \tag{10}$$

Si el valor de R_x esta cerca de R , la ecuación 10 se puede aproximar a una función lineal dada por la ecuación 11.

$$V_{ab}(R_x) = (R_x - R) \frac{E}{4R} \tag{11}$$

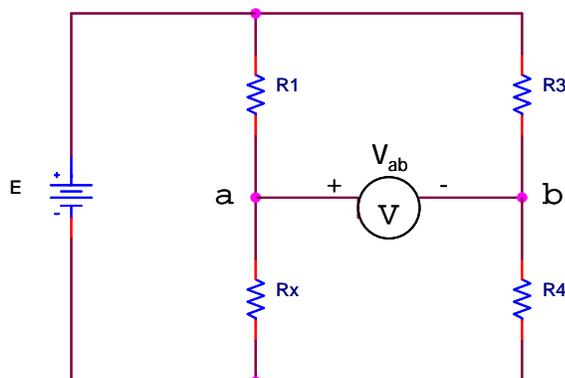


Figura 2.13. Puento de Wheatstone.

Al graficar la ecuación 11 se observa una línea recta con pendiente $\frac{E}{4R}$, como se muestra en la *figura 2.14*. En esta figura se puede observar que si $R_x > R$ el voltaje V_{ab} es positivo y si $R_x < R$ el voltaje V_{ab} es negativo. Cabe hacer notar que esta aproximación es válida sí y solo sí el valor de R_x tiene pequeñas variaciones con respecto a R . La solución completa esta dada por la ecuación 10.

2.2.3. Módulo de galgas SCC-SG03

El módulo SCC-SG03 es un componente de la familia de módulos de la serie SCC-SG de la firma *National Instruments*®. Este módulo internamente posee medio puente de Wheatstone (posee las resistencias R_3 y R_4 y su valor es de 350Ω). El otro medio puente se realiza externamente con dos galgas. Proporciona dos canales de entrada para la conexión de galgas extensiométricas, además, cuenta con una referencia de voltaje estable de 2.5 V (E). La salida de cada rama del puente de Wheatstone es amplificada 100 veces por un amplificador de instrumentación. El voltaje de salida del módulo V_{SG03} es el voltaje de salida del puente multiplicada por la ganancia del amplificador. Por esta razón V_{SG03} se calcula con la ecuación 12. Con esta ganancia se tiene que la ecuación 11 es modificada obteniéndose la ecuación 12.

$$V_{SG03} = A_v \cdot V_{ab}(R_x) = (R_x - R) \frac{25E}{R} \quad (12)$$

La salida de cada amplificador se filtra con un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 1.6 KHz . Esto se hace para limitar el ruido de alta frecuencia ya que el voltaje que mide casi es de corriente directa. Además, posee un potenciómetro a la salida para eliminar el offset del puente de Wheatstone. La fotografía del módulo SCC-SG03 es mostrada en la *figura 2.15* y su diagrama a bloques en la *figura 2.16*.

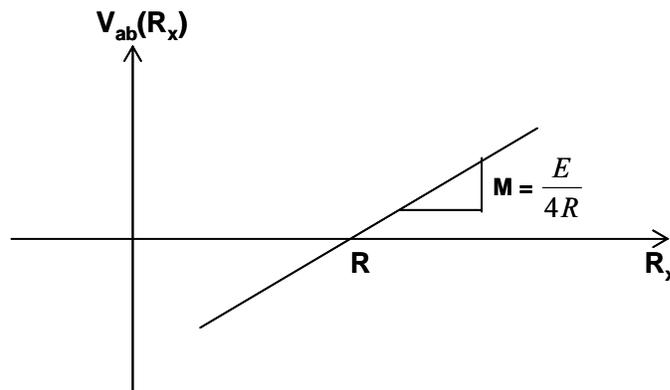


Figura 2.14. Gráfica de la pendiente del puente de Wheatstone.

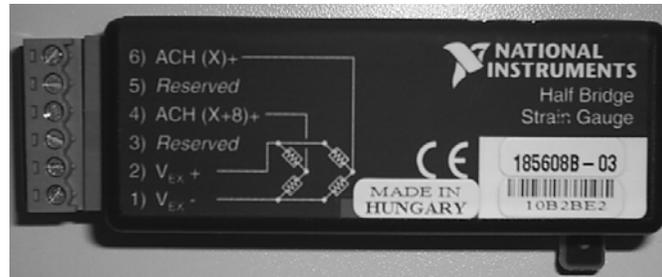


Figura 2.15. Módulo SCC-SG03 acondicionador de medio puente de Wheatstone.

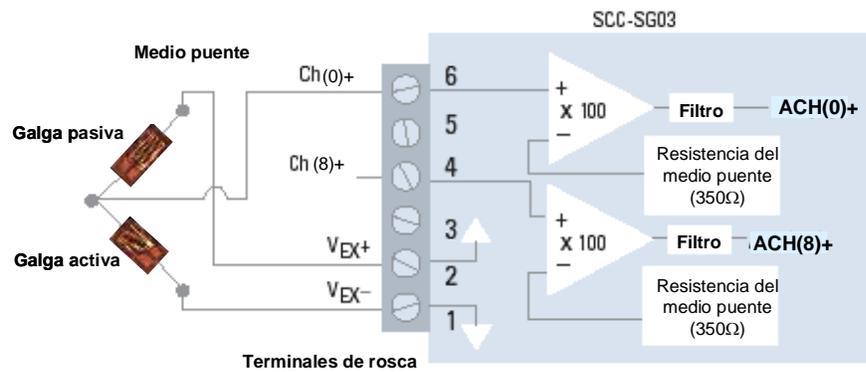


Figura 2.16. Diagrama a bloques del módulo SCC-SG03.

2.2.4. Bloque conector SC-2345

Es un sistema portable para el acondicionamiento de señales analógicas para sistemas de adquisición de datos de la firma *National Instruments®*. Sirve como soporte para acondicionar una variedad de señales analógicas y digitales de entrada-salida, sus canales son interconectados directamente a la entrada de un dispositivo de adquisición de datos. Pueden conectarse hasta 20 módulos SCC para el acondicionamiento de señales. En la *figura 2.17* se muestra una fotografía del módulo SC-2345 [9].

Existen módulos SCC disponibles para acondicionar señales de termopares, RTD's, galgas extensiométricas, sensores de fuerza/presión/torsión, acelerómetros, voltaje y corriente de entrada, aislamiento de voltaje y corriente, conversión de frecuencia a voltaje, filtros pasa bajas, etc. Los módulos pueden conectarse en cascada.



Figura 2.17. Acondicionamiento de señales para galgas.

Cuando el bloque conector SC-2345 posee todos los módulos conectados (20 módulos), tiene capacidad para manipular 16 entradas analógicas, 8 líneas digitales de entrada-salida. Tiene opciones de conectividad para: BNC, 9-pin D-Sub, Banana Jack, SMB entre otras. Las aplicaciones para adquisición de datos se pueden desarrollar de manera más rápida con la utilización del software LabVIEW [9].

Para trabajar con el módulo de galgas extensiométricas, se utiliza el bloque conector SC-2345 con el módulo de galgas SCC-SG03, el cual debe conectarse en la terminal 1 del bloque, quedando disponible las 19 terminales restantes.

2.3. Adquisición de datos

Son muchas las aplicaciones donde se hace indispensable digitalizar la información proveniente de sensores que proporcionan información sobre fenómenos físicos. En general, a medida que tienen muchas entradas se dispone de una gran cantidad de información, la cual requiere de una elevada velocidad de procesado. Una computadora personal es una opción para realizar estas tareas, debido a su excelente velocidad de procesado sobre cantidades elevadas de información. Los dispositivos usados para digitalizar las señales analógicas son las tarjetas de adquisición de datos (TAD), las cuales le proporcionan a la computadora personal la capacidad de adquirir y generar señales analógicas o digitales [7].

2.3.1. Tarjetas de adquisición de datos

Las TAD permiten llevar a cabo aplicaciones de medición personalizadas con el uso de una computadora. Las características más importantes de una TAD para que se adapte correctamente a alguna aplicación son las siguientes:

- Las entradas y salidas analógicas. Es el número de entradas que pueden ser digitalizadas. Normalmente las TAD tienen un solo convertidor analógico digital (ADC) el cual sólo puede convertir una señal a la vez. Por esta razón, se usa un multiplexor analógico, para aumentar el número de entradas, el cual es múltiplo de 2^n . Algunas tarjetas incluyen un convertidor digital-analógico (DAC) para poder generar señales analógicas a partir de datos digitales.
- La frecuencia de muestreo determina la velocidad a la que se producen las conversiones analógico-digital (ADC). Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales con mayor capacidad de definición en tiempo; al mismo tiempo aumenta el flujo de datos hacia el procesador. Cuando se desarrolla una aplicación, es fundamental en toda adquisición respetar el teorema de Nyquist para el muestreo. Normalmente esta frecuencia de muestreo es configurable por software.
- La resolución de la TAD indica el número de bits que utiliza el convertidor ADC para cuantificar los niveles de la señal analógica. Cuando mayor sea el número de bits del ADC, mayor será el número de niveles de señal que se puede representar, pero se requiere una mayor cantidad de memoria y capacidad de procesamiento por parte de la computadora.
- Los niveles de entrada, son los límites de entrada de tensión de la tarjeta de adquisición de datos. Es común diferenciar entre señales unipolares y bipolares. Las señales unipolares admiten únicamente niveles de tensión positivos con respecto a tierra, mientras que las bipolares permiten las dos polaridades.

2.3.2. Tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E

La tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E de la firma *National Instruments®*, es una placa multifunción para entradas y salidas analógicas y digitales. Contiene un convertidor ADC y un DAC de 12 bits para las entradas y salidas analógicas, ocho entradas/salidas digitales TTL configurables como entrada o salida, así como dos contadores/temporizadores (up/down) de 24 bits cada uno. Las características principales son [9]:

- 16 Entradas analógicas configurables en modo referenciado o diferencial.
- Resolución de 12 bits.
- El margen dinámico de entrada puede configurarse como bipolar, ya sea de $\pm 10\text{V}$ o como unipolar de 0 a 20V.
- Amplificador de ganancia programable por software de 0.5, 1, 10 y 100.
- Frecuencia máxima de muestreo de 200 Kmuestras/seg.
- Dos salidas analógicas con una resolución de 12 bits. Salida unipolar 0 a 10V, bipolar de $\pm 5\text{V}$.
- Conexión para bus PCI.

La ganancia es configurable por software, con la cual se varía el rango dinámico de la tarjeta. En la *tabla 2.1* se muestra la resolución para las diferentes ganancias. Cuando la ganancia del amplificador interno es de 0.5 el rango dinámico es de $\pm 10\text{ V}$ y el mínimo voltaje que puede ser digitalizado es de 4.88 mV. Si se configura una ganancia de 100, el rango dinámico decrece a $\pm 50\text{ mV}$, pero el mínimo voltaje que puede ser detectado es de 24 μV . En la *figura 2.18* se muestra una fotografía de la tarjeta PCI-6024E.



Figura 2.18. Fotografía de la tarjeta PCI-6024E.

Tabla 2.1. Ganancia configurable por software y resolución de la tarjeta PCI-6024E [5].

<i>Ganancia de la tarjeta (Configurable por Software)</i>	<i>Rango</i>	<i>Resolución de Voltaje</i>
0.5	$\pm 10\text{ V}$	4.88 mV
1	$\pm 5\text{ V}$	2.44 mV
10	$\pm 500\text{ mV}$	244 μV
100	$\pm 50\text{ mV}$	24.42 μV

2.3.3. Cable y conector de E/S

Las TAD poseen un conector SCSI de 68 terminales, por el cual se pueden conectar las señales analógicas y digitales. En la *figura 2.19* se muestra el número de terminal y la función que realiza cada terminal.

Para interconectar a la TAD con el módulo SC-2345 se utiliza un cable de 68 hilos con conectores SCSI de 68 terminales. En la *figura 2.20* se muestra una fotografía del cable.

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT	22	56	AIGND
DAC1OUT	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PF10/TRIG1	11	45	EXTSTROBE
PF11/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PF12/CONVERT*
+5 V	8	42	PF13/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PF14/GPCTR1_GATE
PF15/UPDATE*	6	40	GPCTR1_OUT
PF16/WRTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PF17/STARSCAN
PF19/GPCTR0_GATE	3	37	PF18/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

Figura 2.19. Conector de Entrada/Salida de la tarjeta PCI-6024E.

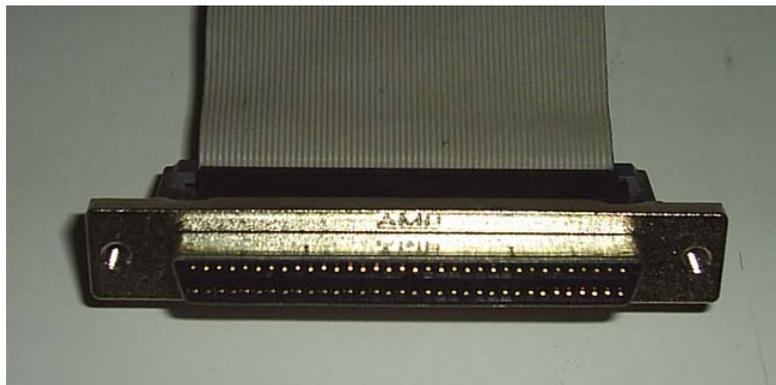


Figura 2.20. Cable conector de la tarjeta PCI-6024E.

2.4. Despliegue de las mediciones

Toda TAD necesita un software de control. Este control se puede llevar a cabo de tres formas distintas. La primera consiste en la programación directa de los registros de la tarjeta. Es el método que permite más flexibilidad en cuanto a la capacidad de control, pero también es el más costoso en cuanto a tiempo y dificultad de programación. Otro método es utilizar un *driver* o *software* de control de la tarjeta. Se trata de una serie de funciones que actúan sobre los registros de la tarjeta, pero a un nivel de programación superior que el de la programación directa de registros (normalmente es suministrado por el fabricante de la tarjeta). Proporciona la misma flexibilidad que la programación directa de los registros, pero el tiempo de desarrollo de la aplicación disminuye de forma considerable. Por último, se puede controlar la tarjeta con un nivel de programación superior a los anteriores; esto permite el desarrollo de aplicaciones potentes en cuanto a representación y análisis se refiere. Un ejemplo de este método es el control de la TAD a través de LabVIEW.

2.4.1. Adquisición de datos en LabVIEW

LabVIEW es un programa adecuado para la adquisición de datos, debido a su total compatibilidad con las tarjetas de *National Instruments*®. Su interface gráfica ofrece una gran potencia de visualización de señales y dispone de librerías de procesado para el tratamiento de las señales adquiridas. LabVIEW ofrece una librería de adquisición de datos que proporciona al usuario una herramienta de trabajo de fácil uso y permite disponer de una mayor flexibilidad en cuanto al manejo de tarjetas de adquisición de datos.

LabVIEW es el desarrollo gráfico de entornos para crear experimentos flexibles y escalables, medidas y control de aplicaciones rápidas con costos mínimos. Con LabVIEW, se pueden realizar interfaces con señales del mundo real, analizar datos y compartir resultados con aplicaciones [URL10]. Las ventajas principales que ofrece LabVIEW sobre otros lenguajes de programación visuales son [8]:

- Utiliza el paradigma de programación gráfica, el cual es un concepto para elaborar programas cuyo uso en México está aumentando.
- Es ampliamente usado en la industria para crear instrumentos virtuales orientados a la instrumentación y al monitoreo, automatización y control de procesos industriales.
- Ofrece facilidad para construir interfaces gráficas de usuario (GUI, *Graphical User Interfaces*) dirigidas al entorno industrial y científico.
- Cada módulo que se implementa en LabVIEW se puede ejecutar y probar de manera independiente del programa principal.

Con LabVIEW se pueden generar y adquirir señales rápidamente de tarjetas *plug-in*, dispositivos USB y sistemas basados en Ethernet. Esta capacidad de entrada-salida, combinada con tipos especiales de datos y funciones de análisis de medidas, son específicamente diseñadas para obtener la medición de un sensor físico de una manera rápida y fácil. Reduce el tiempo de programación con dispositivos de adquisición de datos de *National Instruments*® [URL11]. Se pueden realizar mediciones de una amplia variedad de parámetros como: Temperatura, voltaje, resistencia, presión, tensión, peso, vibración, frecuencia, período, sonido, luz, señales digitales, etc.

3. Diseño y análisis de un sensor de tensión

Los ingenieros formulan planes para la realización física de máquinas, dispositivos y sistemas. Estos procesos son comunes a todas las disciplinas en el campo del diseño en ingeniería. Diseñar es formular un plan para satisfacer una demanda humana. La necesidad particular que habrá de satisfacerse puede estar completamente bien definida desde el principio o puede ser tan confusa e indefinida, que se requiere de un esfuerzo mental y físico considerable para enunciar un problema que exige solución.

Todo proceso de diseño siempre está sujeto a determinadas restricciones para su resolución. Un diseño tiene un propósito específico: la obtención de un resultado final al que se llega mediante una acción determinada o por la creación física de algo. El diseño en ingeniería es el proceso en el que se utilizan principios científicos y métodos técnicos (matemáticos, computación, electrónica, métodos gráficos y lenguaje común) para llevar a cabo un plan que cubrirá cierta necesidad o demanda [10].

La referencia [10] propone las fases del diseño mostradas en la *figura 3.1*. En este capítulo se explica el proceso seguido para el diseño de un sensor de tensión, observándose las siguientes partes: Fases del diseño, definición de una metodología, diseño y análisis, manufactura de la columna, pegado de la galga extensiométrica en la columna, soldado y protección de la galga en la columna y por último la integración del banco de pruebas.

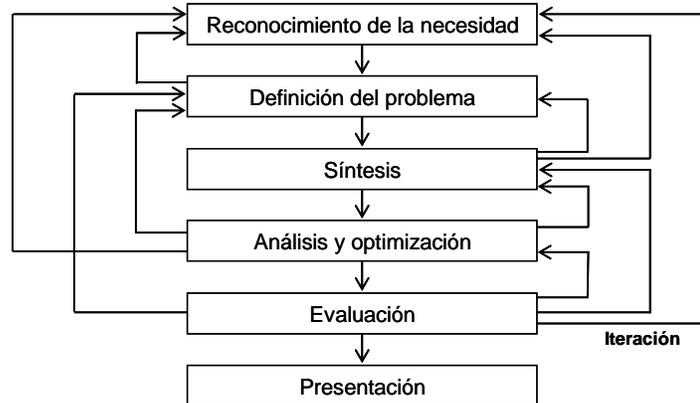


Figura 3.1. Fases del diseño.

3.1. Fases del diseño

Es común preguntarse ¿Cómo empieza un proceso de diseño? ¿Simplemente llega un ingeniero a su escritorio y se sienta ante una hoja de papel en blanco y se pone a escribir algunas ideas? El proceso de diseño mostrado en la *figura 3.1* comienza con la identificación de una necesidad y con una decisión de hacer algo al respecto. Después de muchas iteraciones, el proceso finaliza con la presentación de los planes para satisfacer tal necesidad.

3.1.1. Identificación de la necesidad y definición del problema

El *reconocimiento de la necesidad* y expresarlo con determinado número de palabras es una actividad creativa. Con frecuencia la necesidad no es del todo evidente; por lo general, se identifica a partir de una circunstancia adversa o de una serie de circunstancias fortuitas que surgen al mismo tiempo. Hay una diferencia entre el planteamiento de la necesidad y la definición del problema que sigue a dicha expresión (*figura 3.1*).

La *definición del problema* abarca todas las condiciones para el objeto que ha de ser diseñado. Las condiciones o especificaciones son las cantidades de entrada y salida, las características y dimensiones del espacio que deberá ocupar el objeto, y todas las limitaciones a estas cantidades.

Una vez que se ha definido el problema y obtenido un conjunto de especificaciones, el siguiente paso es el diseño; como se muestra en la *figura 3.1*, es la *síntesis* de una solución óptima. Esta síntesis no puede efectuarse antes de hacer el *análisis* y la *optimización* debido a que se debe analizar el sistema a diseñar, con el fin de determinar si su funcionamiento cumplirá las especificaciones. El análisis podría revelar que el sistema no es óptimo. Si el diseño no resulta satisfactorio en una prueba, el procedimiento de síntesis deberá iniciarse otra vez. El diseño es un proceso iterativo en el que se pasa por varias etapas, se evalúan los resultados y luego se vuelve a una fase anterior del proceso. En esta forma es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizarlos y optimizarlos para volver a la fase de síntesis y ver que efecto tiene esto sobre las partes restantes del sistema [10].

3.1.2. Evaluación y presentación

La *evaluación* es la demostración definitiva de que un diseño es acertado; por lo general, incluye pruebas de un prototipo en el laboratorio, en un punto tal que se desea observar si el diseño satisface realmente la necesidad o necesidades. La comunicación del diseño a otras personas es el paso final y vital en el proceso de diseño. Muchos diseños importantes, inventos y obras creativas se perdieron para la humanidad por que sus autores no fueron capaces de explicar a otras personas su creación. La *presentación* o exposición debe ser lo más completa y clara posible [10].

3.1.3. Fases del diseño aplicadas a la medición del alargamiento

El reconocimiento del problema se da cuando se tiene la necesidad de estudiar el comportamiento de los materiales bajo tensión. Todas las estructuras sometidas a cargas, esfuerzos y pesos, sufren alargamientos (tensiones) micrométricas que son imperceptibles a la vista. La medida de la tensión se estudia en mecánica de materiales, debido a que es necesario conocer el comportamiento que presentará una estructura metálica en un edificio, construcción, puente, casa habitación, etc. Este parámetro puede ser medido utilizando un transductor llamado *galga extensiométrica*.

La definición del problema comienza con determinar el parámetro a medir, en este caso es la tensión; el siguiente paso es determinar el rango de carga que se estudiará; es decir, si se medirán cargas grandes o pequeñas. En este paso se delimita la forma en cómo se mostrarán los resultados que se obtengan de este estudio, para decidir qué dispositivos tienen que utilizarse en el despliegue de los resultados, una vez definidas las características del prototipo se procede a la síntesis.

La síntesis es el diseño, es elegir una estructura apropiada para realizar este estudio. Como se mencionó en el capítulo 2, las estructuras tipo columna son utilizadas preferentemente para la medición de la tensión y compresión, por esta razón se utilizará una estructura tipo columna para realizar éste estudio. Como no se tiene experiencia en este campo de la instrumentación; en la medición de cargas con galgas, se decide estudiar cargas pequeñas, en el orden de los kilogramos para observar el comportamiento del metal y poder en trabajos posteriores, hacer analogías con estructuras reales; diseñadas para soportar cargas en el orden de las toneladas. En la parte de diseño es muy importante la selección del material con el cual se manufacturará el sensor de tensión.

En el diseño es menester considerar la forma que tendrá la estructura tipo columna, tomando en cuenta que existe un compromiso entre simplicidad de manufactura contra simplicidad de pegado de la galga extensiométrica en la estructura. Una estructura tipo columna circular es simple de manufacturar, se puede tener un control en las medidas con la cual se manufactura, a diferencia de una estructura tipo columna cuadrada o triangular. El pegado de la galga en una estructura circular aumenta su grado de dificultad respecto a una cuadrada, además que la tolerancia de error presente en una estructura circular es más pequeña comparada con una estructura cuadrada, en la cual no se puede garantizar que se tengan superficies completamente perpendiculares y provoque resultados erróneos influenciados por estas tolerancias. Por esta razón la forma de la estructura será circular.

Una vez elegida la forma que tendrá la estructura, se procede al análisis para determinar cual será la carga máxima que soportará ésta antes de dañarse; deben realizarse varios cálculos para que los valores de diámetro y longitud sean realizables en algún tipo de máquina moldeadora (torno, fresadora, etc.). Debido a esto se realizan varias combinaciones hasta lograr una optimización de las medidas de diámetro y longitud obtenidas.

3.2. Metodología

Observando las fases del diseño, se elaboró una metodología para el diseño y construcción del sensor de cargas, mostrada en el diagrama de flujo de la *figura 3.2*. Esta metodología se compone de dos etapas primordiales, en la primera de ellas se proponen una serie de pasos para la resolución del problema en la creación del sensor de cargas axiales. En la segunda etapa se considera el acondicionamiento de la señal y la lectura de los valores proporcionados por el sensor, los cuales deberán ser digitalizados por una tarjeta de adquisición de datos para ser mostrados en una computadora.

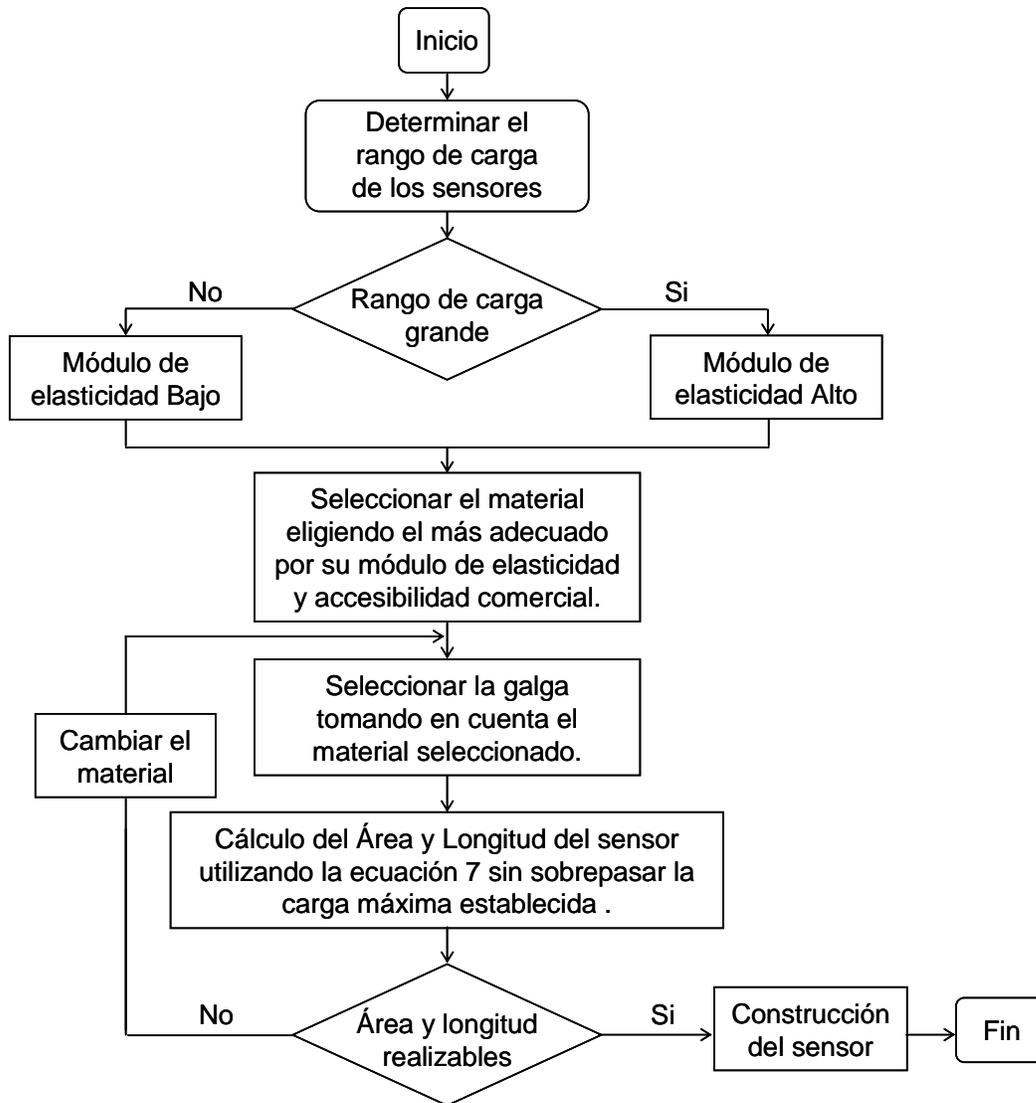


Figura 3.2. Metodología para el diseño del sensor.

3.2.1. Diseño y Análisis de la estructura circular

Como se observa en la *figura 3.2*, el primer paso a realizar es determinar el rango de carga que se desea medir, la carga máxima que debe de soportar la estructura a construir es de 100 Kg. El siguiente paso en el diseño, es la elección del material con el cual se realizará la estructura tipo columna. El aluminio aleación 6061, posee uno de los módulos de elasticidad más bajos dentro de los metales, es una aleación comercial que presenta un diagrama esfuerzo-deformación similar al mostrado en la *figura 2.3*, por lo cual se sabe que tiene una región lineal. La madera es un material que cuenta con un módulo de elasticidad menor que el aluminio, pero su diagrama de esfuerzo-deformación no presenta respuesta lineal debido a que no es un material homogéneo e isotrópico. Por esta razón se elige trabajar con aluminio aleación 6061. Si los rangos de cargas son grandes, debe elegirse un material comercial que posea un módulo de elasticidad grande que permita trabajar con estos rangos de carga.

3.2.1.1. Selección de la galga

Una vez seleccionado el material de acuerdo a su módulo de elasticidad y accesibilidad comercial se selecciona la galga que se pegará en este material. Para esta tarea se toman en cuenta diferentes factores entre los que se pueden mencionar: Duración de la prueba, rango de tensión requerido y temperatura de operación. En la selección de la galga debe considerarse que la combinación entre el material de la estructura, la galga y el adhesivo sean factibles para el pegado. Las galgas de la firma *Vishay*® utilizan un sistema de designación estándar para las galgas extensiométricas³, la designación de la galga a utilizar se muestra en la *figura 3.3*.

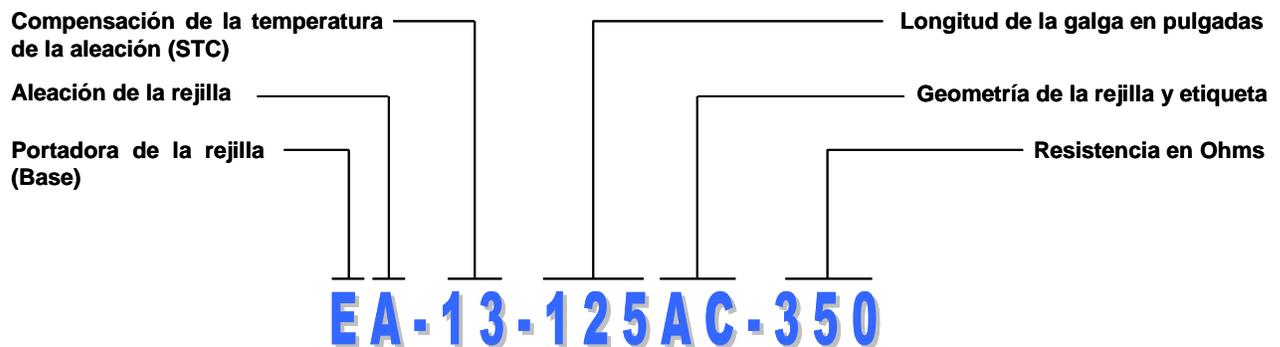


Figura 3.3. Designación estándar para las galgas extensiométricas de la firma Vishay®.

Observando la designación estándar y tomando en cuenta el material elegido para la manufactura del sensor, se elige la galga tipo EA-13-125AC-350 de la firma *Vishay*®. Esta galga es de la serie EA, esto significa que la rejilla es de aleación Constantan, combinada con una base polyimide dura y flexible. Este tipo de galga está diseñada para análisis estáticos de propósito general y análisis dinámicos de tensión. No se recomienda para aplicaciones que requieren alta precisión [11].

El rango normal de temperatura de esta galga es de -75°C a $+175^{\circ}\text{C}$, y para cortos períodos de tiempo tiene un rango de -195°C a $+205^{\circ}\text{C}$. El rango de tensión que esta galga puede detectar es de 3% de la longitud de la rejilla bajo compresión y 5% bajo tensión. El número para la compensación de temperatura para aleaciones de aluminio está dado por el número 13. La longitud de la galga en milímetros es de 3.2 mm y es un modelo de galga AC, usado como propósito general, tiene una alta resistencia en su rejilla, cuyo valor es de 350 Ohms.

3.2.1.2. Especificaciones de la columna

El sensor tipo columna debe soportar cargas de 100Kg, manufacturado con aluminio aleación 6061, el cual tiene un módulo de elasticidad de 70 GP. Por el tipo de material a utilizar en la columna, la galga debe ser del tipo EA-13-125AC-350, en este caso la compresión⁴ máxima que puede sufrir es de $96\ \mu\text{m}$ (alargamiento de $-96\ \mu\text{m}$) y la tensión máxima es de $160\ \mu\text{m}$ (alargamiento de $160\ \mu\text{m}$). La columna debe tener dos roscas, una en la parte superior y otra en la inferior para poder ser sujetadas y estudiadas bajo tensión.

La galga es un sensor que normalmente se adhiere a superficies o estructuras planas, para adherirlo a una superficie circular no debe de flexionarse en forma considerable, debido a que se pueden causar daños permanentes en la rejilla de la galga. Por esta razón, se propuso

³ Para mayor detalle sobre las características, consúltese la referencia de galgas extensiométricas [11].

⁴ La compresión es un alargamiento con signo negativo.

manufacturar seis columnas, tres de ellas con un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada⁵ (12.7 mm) y tres con un diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 mm). Un diámetro grande permite que la superficie donde se pegará la galga no provoque que la misma se flexione demasiado. Para mantener una relación proporcional entre diámetro y longitud, las seis estructuras tendrán una longitud de 4 pulgadas (101.6 mm). En este capítulo se explicará el proceso de manufactura y pegado de las columnas con diámetro de $\frac{1}{2}$ ", debido a que el proceso para las columnas de $\frac{1}{4}$ " es análogo.

Teniendo las especificaciones de columna se realizó un plano de la misma, el cual se muestra en la *figura 3.4*. En este plano se observan tres partes principales, la primera de ellas es una sección transversal que se cilindra a $\frac{3}{4}$ "x $\frac{1}{2}$ " (soporte), la segunda es una conicidad de 45° (cono) y la tercera y última es una sección transversal cilindrada a $\frac{1}{2}$ "x $2\frac{1}{2}$ " (centro).

En mecánica de materiales los análisis de las estructuras se realizan tomando en cuenta que deben soportar una mayor cantidad de peso para la cual fueron diseñadas, con esta aseveración puede afirmarse que si la carga máxima que sufrirá el sensor tipo columna a compresión o tensión es de 100 Kg, se garantiza que la estructura soportará esta carga y que la galga no se dañará.

3.2.1.3. Cálculos para determinar la geometría del sensor

Como se mencionó en el capítulo 2, la relación existente entre la carga aplicada a una estructura circular, módulo de elasticidad de un material, longitud y área de una estructura, está dada por la ecuación 7. Observando las especificaciones del sensor se puede notar que el valor desconocido de la ecuación 7 es la carga admisible (P), para tener un alargamiento de $-96\mu\text{m}$ a compresión o $160\mu\text{m}$ a tensión, para evitar que la rejilla de la galga sea dañada.

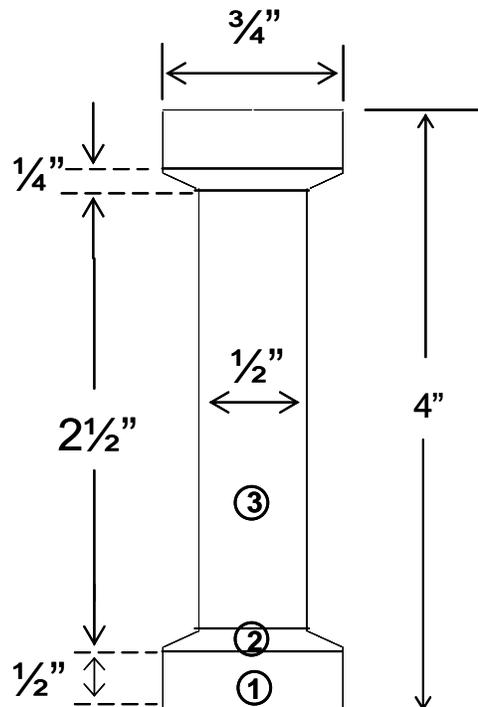


Figura 3.4. Plano con dimensiones de la estructura tipo columna circular.

⁵ El Sistema Inglés de medida utiliza la pulgada como unidad de medida, la cual, en el Sistema Internacional de medida corresponde a 25.4mm.

Despejando la carga de la ecuación 7 se obtiene la ecuación 13 y sustituyendo los valores del módulo de elasticidad del aluminio de 70 GP, longitud y diámetro de la estructura de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) y 4" (101.6 mm) respectivamente, se obtiene que la carga máxima permisible a compresión antes de que la rejilla se dañe es $P_{\text{compresión}}$ y la carga máxima a tensión es $P_{\text{tensión}}$, mostrados en la última columna de la *tabla 3.1*.

$$P = \frac{\Delta EA}{L} \quad (13)$$

Tabla 3.1. Cálculo de la carga a compresión y tensión utilizando la ecuación 13.

<i>Alargamiento (Δl)</i>	<i>Módulo de elasticidad (E)</i>	<i>Área (A)</i>	<i>Longitud (L)</i>	<i>Carga (P)</i>
-96 μm	70 GP	126.68 μm^2	101.6mm	$P_{\text{compresión}}=868.66 \text{ Kg}$
160 μm	70 GP	126.68 μm^2	101.6mm	$P_{\text{tensión}} = 1,447.77 \text{ Kg}$

3.3. Manufactura de la columna

La UTM cuenta con un torno convencional Standard TR,1000-EX marca ILSA mostrado en la *figura 3.5*. En el cual se pueden elaborar piezas o estructuras metálicas de diferentes formas. En las columnas circulares el torno garantiza precisión y control en el valor de las medidas especificadas por el usuario, contrario a las estructuras de diferentes forma (cuadrada, rectangular, triangular, etc.), en las cuales se pueden tener un margen de error considerable (tolerancia) que afecte el estudio de la tensión. La tolerancia en la elaboración de piezas metálicas en el torno están en función del torno y de la habilidad del operador del torno (tornero) al elaborarlas, las piezas circulares elaboradas en el torno ILSA TR,1000-EX tienen una tolerancia de ± 0.02 centésimas de milímetro.



Figura 3.5. Torno convencional ILSA TR,1000-EX.

Para manufacturar la estructura se utilizó una barra de aluminio aleación 6061 de 1"x40", un micrómetro, un vernier, una broca de centro, brocas de diferentes tamaños y el torno ILSA TR,1000-EX mostrado en la *figura 3.5*. Los pasos realizados para la fabricación de la columna son los siguientes:

- Centrado de la barra.
- Cilindrado de los soportes.
- Perforado de la barra.
- Conicidad de 45°.
- Cilindrado del centro.
- Formación de las roscas.

3.3.1. Centrado de la barra

La manufactura de la columna se realiza en una sola pieza, de una barra de aluminio aleación 6061 de 1"x40". El proceso comienza con el centrado de la barra en el torno, la *figura 3.6* muestra la barra de aluminio centrada en el torno. Realizado este paso se comienza a rebajar la barra para proporcionarle la medida especificada para los soportes ($\frac{3}{4}$ "x $\frac{1}{2}$ ").

3.3.2. Cilindrado de los soportes

El cilindrado de los soportes se realiza rebajando la barra de aluminio y proporcionándole sus medidas ($\frac{3}{4}$ "x $\frac{1}{2}$ "). Durante el proceso de rebajado debe de medirse constantemente el diámetro de la barra, para no excederse del valor deseado, la *figura 3.7* muestra la forma en como se rebaja la barra metálica con un cortador. La medida del diámetro de la barra inicialmente se realiza con el vernier⁶, cuando la estructura tiene las medidas especificadas por el usuario, se utiliza un micrómetro⁷ para verificar que las medidas milimétricas sean las correctas. Este instrumento se utiliza para dar precisión a la estructura. La *figura 3.8* muestra la utilización del micrómetro para corroborar que las medidas especificadas para los soportes sean las correctas. En este paso toda la columna se rebaja a $\frac{3}{4}$ "x $\frac{1}{2}$ ", de esta forma se realizan ambos soportes simultáneamente.



Figura 3.6. Centrado de la barra en el torno.

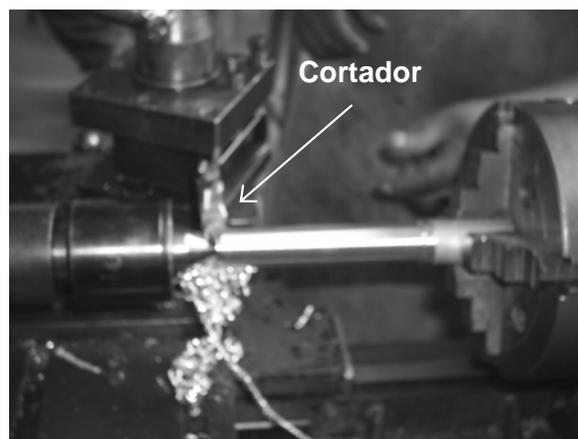


Figura 3.7. Rebajado de la barra de aluminio.

⁶ Instrumento de medición con resolución en mm, utilizado en la fabricación de estructuras.

⁷ Instrumento de medición de alta precisión, con resolución en micras.

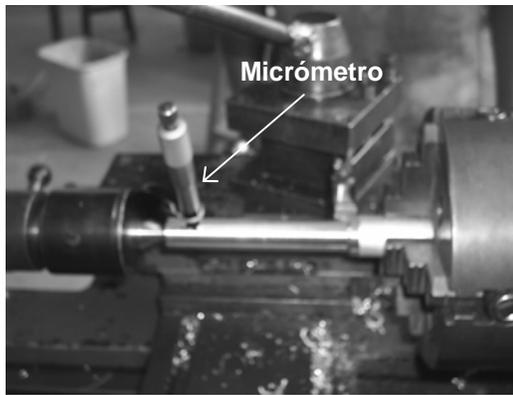


Figura 3.8. Utilización del micrómetro.

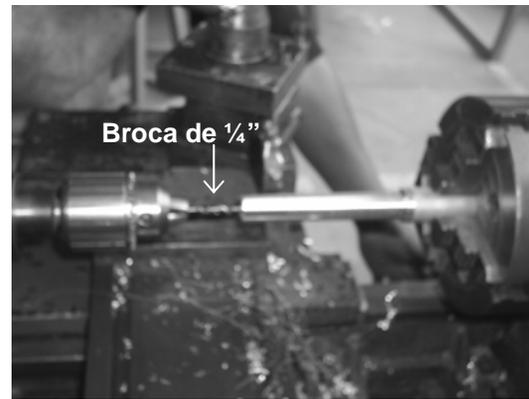


Figura 3.9. Perforaciones a la columna.

3.3.3. Perforado de la barra

Cuando la barra tiene la medida especificada para los soportes ($\frac{3}{4}'' \times \frac{1}{2}''$), se utiliza una broca de centro para perforar uno de los lados de la barra, y garantizar que esta perforación sea realizada en el centro de la barra, posteriormente se utiliza una broca de $\frac{1}{4}''$ para darle profundidad al perforado, este proceso es mostrado en la *figura 3.9*. El perforado del otro extremo de la barra es uno de los últimos pasos en la manufactura de la columna. Es importante mencionar que entre más delgada sea la barra metálica se corre un mayor riesgo de fractura en la barra o provocar una torcedura, causando daños permanentes. Por esta razón este paso se realiza antes de comenzar a rebajar la columna en su parte central ($\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$). La rosca no es formada en su totalidad, pero este paso se completa posteriormente.

3.3.4. Conicidad de 45°

La conicidad consiste en rebajar la barra de aluminio en un ángulo de 45° respecto al eje central de la barra. Este paso se realiza antes de comenzar a cilindrar la barra en su parte central ($\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$). Como se muestra en la *figura 3.4*, la columna tiene dos partes cónicas a 45° . La primera de estas partes cónicas comienza en la terminación del cilindrado del primer soporte ($\frac{3}{4}'' \times \frac{1}{2}''$), como se muestra en la *figura 3.10*. La segunda parte cónica se realiza entre la parte del centro ($\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$) y el segundo soporte.

3.3.5. Cilindrado del centro

Inmediatamente después de realizar la primera parte cónica, se procede a rebajar la parte central de la estructura, para proporcionarle la medida especificada de $\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$. El proceso de rebajar la parte central de la barra comienza en donde termina la parte cónica. Este proceso se asemeja al proceso de rebajado de los soportes, debido a que es completamente análogo no se explicará con mayor detalle. La *figura 3.10* muestra el rebajado de la barra para proporcionarle el diámetro requerido a la parte central.

Una vez rebajada la parte central ($\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}''$), se forma la segunda parte cónica entre ésta parte y el segundo soporte. Posteriormente se realiza el corte de la barra en la terminación del segundo soporte. Una vez cortada la barra la columna ha sido realizada casi en su totalidad. Los pasos finales son la formación de las roscas en ambos extremos.

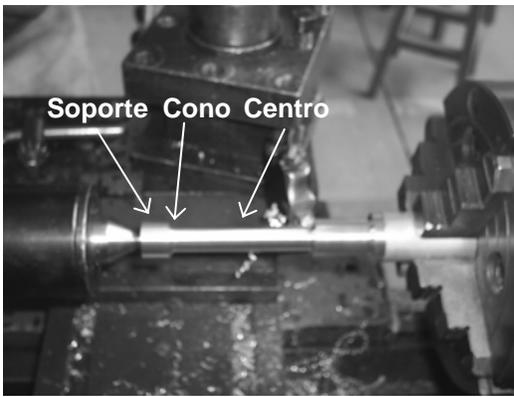


Figura 3.10. Formación de la parte cónica y rebajado de la parte central.

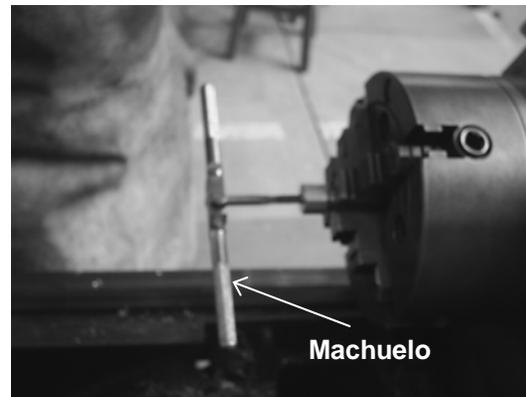


Figura 3.11. Utilización del machuelo para la formación de las roscas.

3.3.6. Formación de las roscas

Una vez cortada la columna se coloca nuevamente en el torno, dejando la parte que no ha sido perforada expuesta, este lado es perforado igual a como se explicó en el apartado 3.3.3. El último paso en la manufacturación de la estructura es la creación de las roscas, esto se realiza con un machuelo de $\frac{1}{4}$ " , el cual es utilizado para formar roscas en metales. El machuelo se coloca en la perforación y se comienza a girar, al ir girando el machuelo se va introduciendo en la columna, formando la rosca. Este proceso se puede observar en la *figura 3.11*.

El proceso de manufactura descrito proporciona como resultado una columna circular de aleación 6061, maquinada en una sola pieza. Esta estructura cuenta con dos soportes cilindrados a $\frac{3}{4}$ "x $\frac{1}{2}$ " , dos partes cónicas a 45° y una parte central cilindrada a $\frac{1}{2}$ "x $2\frac{1}{2}$ ". En los extremos de la barra se tienen dos roscas para poder colgar la columna. La *figura 3.12* muestra las partes de una columna circular manufacturada y la *figura 3.13* muestra a la columna exponiendo una de las dos roscas formadas.



Figura 3.12. Columna circular manufacturada.

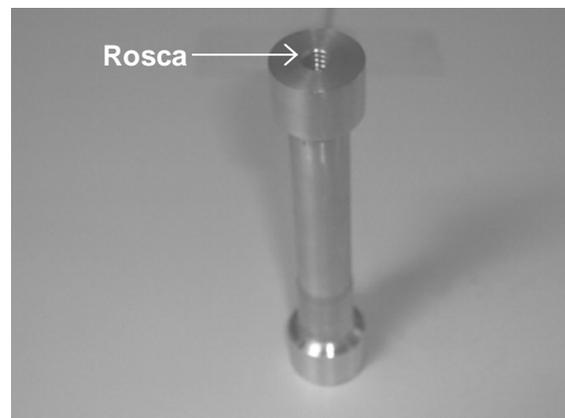


Figura 3.13. Rosca en uno de los extremos.

3.4. Pegado de la galga extensiométrica

El pegado de la galga es el conjunto de pasos requeridos para adherirla en la superficie de la columna. Debido a que la galga extensiométrica es un dispositivo extremadamente sensible, capaz de registrar los efectos mas pequeños de una unión imperfecta, debe asegurarse estabilidad y un adecuado pegado. Para ello es necesario lijar la superficie para dejarla lo más homogénea posible, desengrasar y neutralizarla para evitar contaminantes, finalmente el pegado y protección de la galga. Los materiales usados para realizar este proceso son:

- Solvente desengrasante CSM-1.
- Acondicionador M-Prep Conditioner A.
- Lija 400-grit silicon carbide.
- Toallas de gasa.
- Lápiz de punto medio semidura 4H.
- Cotonetes.
- Neutralizante M-Prep Neutralizer 5A.
- Cinta adhesiva de celofán M-LINE PCT-2A.
- Adhesivo M-Bond 200.
- Catalizador M-Bond 200.
- Solvente M-COAT A.

Estos materiales son proporcionados en el kit de aplicaciones de galgas extensiométricas para estudiantes, de la firma Vishay®. Cada uno de estos materiales es un producto certificado para asegurar instalaciones exitosas de galgas y para tener mediciones correctas y confiables. Estos productos son utilizados en el proceso de pegado de la galga descrito en los apartados siguientes.

3.4.1. M-Bond 200

El adhesivo M-Bond 200 es un excelente pegamento para las aplicaciones de laboratorio debido a su fácil uso y pegado rápido a temperatura ambiente cuando se aplica adecuadamente. Se usa en pruebas para estudios de fatiga. El rango normal de trabajo es de -30°C a $+65^{\circ}\text{C}$. El M-Bond 200 es compatible con todos los modelos de galgas extensiométricas de la firma Vishay® y la mayoría de materiales de las estructuras mecánicas. El catalizador del M-Bond está formulado para controlar la velocidad de reacción del adhesivo. Se debe emplear muy poca cantidad de catalizador para obtener mejores resultados. El exceso del mismo puede ocasionar varios problemas como debilidad del pegado, fragilidad con el paso del tiempo, bajo control del espesor de capa del adhesivo, mayor tiempo de evaporación de los solventes, etc.

La exposición a la humedad del M-Bond 200 debilita el adhesivo; por este motivo, se requiere el uso de productos de protección. Este adhesivo se vuelve duro y quebradizo con el tiempo; en particular, cuando está expuesto a temperaturas elevadas. No es recomendable el empleo del M-Bond 200 para aplicaciones de duración superior a uno o dos años, la fotografía de la *figura 3.14* muestra el adhesivo M-Bond 200 y su catalizador [12].



Figura 3.14. Adhesivo M-Bond 200.

3.4.2. Preparación de la superficie

La galga extensométrica puede ser pegada casi en cualquier material sólido si la superficie del material esta apropiadamente preparada. El propósito de preparar la superficie es garantizar una limpieza de químicos, eliminar asperezas y brindar las condiciones requeridas para una apropiada instalación de galgas, tener una superficie con una baja alcalinidad, y trazar unas líneas visibles para la localización y orientación de las galgas. La preparación de la superficie para aleaciones de aluminio se realiza en cinco operaciones básicas:

- Desengrasado.
- Lijado de superficie.
- Líneas de orientación.
- Acondicionado de la superficie.
- Neutralizado.

Para garantizar mejores resultados se debe evitar lo siguiente:

- Tocar la superficie con los dedos.
- Limpiar la superficie de pegado atrás y adelante con un estropajo o esponja.
- Arrastrar contaminantes al área de pegado ya limpiada.
- Permitir que la solución para limpiar se evapore en la superficie.
- Preparar parcialmente la superficie esperando entre el proceso de preparado de la superficie y el pegado de la galga.

3.4.2.1. Desengrasado

El desengrasado de la superficie se realiza con el solvente desengrasante CSM-1. Desengrasar es remover aceites, grasas, contaminantes orgánicos y residuos químicos solubles. Esta es la primera operación en la preparación de la superficie. Para desengrasar la superficie se usa una gasa de esponja limpia y el CSM-1. El CSM-1 tiene un aplicador de spray, el cual es utilizado para evitar la contaminación del mismo solvente. El CSM-1 se rocía con su aplicador de spray sobre la gasa, posteriormente se pasa la gasa sobre el área de pegado de la galga una y otra vez (*figura 3.15*). Este proceso se repite hasta que la gasa se muestre completamente limpia.

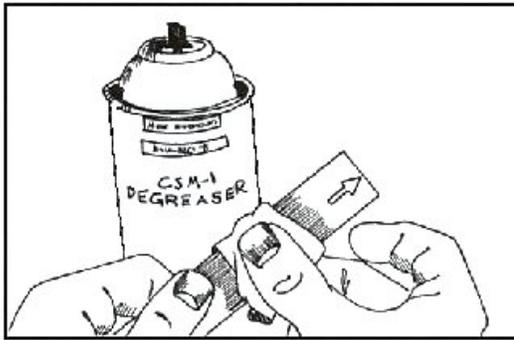


Figura 3.15. Desengrasado con solvente CMS-1.

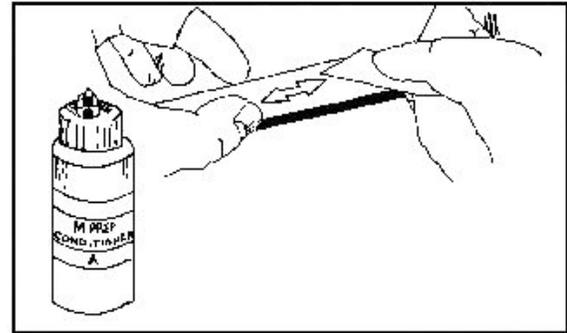


Figura 3.16. Lijado de la superficie.

3.4.2.2. Lijado de la superficie

La superficie se lija para remover cualquier cosa adherida (óxido, pintura, revestimientos, etc.), y para crear una textura conveniente en la superficie de pegado. Para superficies ásperas o toscas puede ser necesario comenzar con un disco lijador o lima; pero, para otros tipos de superficies menos toscas, el lijado es suficiente.

Para el lijado de la superficie se coloca una cantidad de M-Prep Conditioner A en el área donde se pegará la galga, se lija el área de pegado con la lija 400 grit silicon carbide. Se agrega más Conditioner A, cuanto sea necesario para mantener la superficie húmeda durante el proceso de lijado (*figura 3.16*). Debe de limpiarse un área grande para garantizar que los contaminantes no sean arrastrados al área de pegado durante los pasos siguientes.

3.4.2.3. Líneas de orientación

La orientación deseada de las galgas extensométricas en la superficie debe ser marcada con un par de cruces, perpendiculares entre sí. Estas líneas sirven como referencia para alinear la galga con los triángulos de orientación. Para el aluminio estas líneas de orientación son marcadas o escritas con un lápiz de punto medio semidura 4H.

3.4.2.4. Acondicionado de la superficie

Después que las líneas de orientación son marcadas, el Conditioner A es aplicado sobre la superficie. Aplicado el conditioner A, la superficie es tallada con un aplicador de algodón hasta que quede limpia de los restos del lápiz. La superficie debe de mantener una humedad constante con el Conditioner A, hasta que se limpia completamente. Cuando la superficie queda completamente limpia, debe ser secada con una gasa (*figura 3.17*). Una vez limpiada el área se debe evitar que le caigan contaminantes. La gasa usada se desecha lo más lejos posible, con una gasa nueva se hace una sola tallada en dirección contraria. De nuevo se tira la segunda gasa.

3.4.2.5. Neutralizado

Para proveer una baja alcalinidad para el adhesivo, el área limpiada debe ser neutralizada. Esto se efectúa con la aplicación del neutralizante M-Prep Neutralizer 5A en el área limpiada y tallando con un cottonete de algodón (*figura 3.18*). El área limpiada debe cubrirse completamente en todas partes con el neutralizador 5A. Cuando se neutraliza, la superficie debe ser secada tallando una gasa de esponja en una dirección. Se tira la gasa y con otra gasa nueva, se hace la misma operación en sentido contrario. Siempre se comienza dentro del área limpiada evitando contaminar el área de pegado. La superficie esta ahora apropiadamente preparada para pegar la

galga. La galga debe instalarse en un tiempo no mayor a 30 minutos después de haber terminado este proceso.

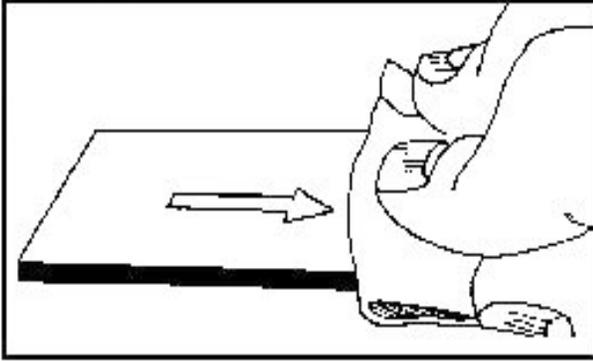


Figura 3.17. Acondicionado de la superficie.

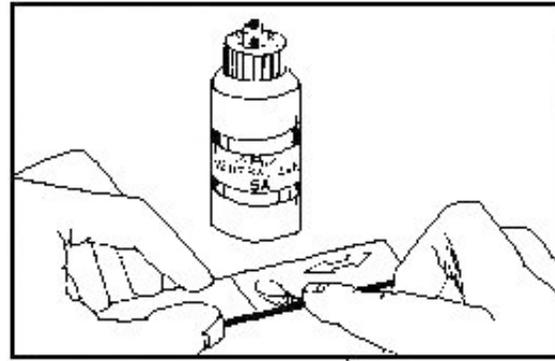


Figura 3.18. Neutralizado de la superficie.

3.4.3. Preparación de la galga para el pegado

Antes de pegar la galga sobre la superficie de estudio es necesario explicar algunos pasos previos a este proceso de pegado. Estos pasos permiten conocer la forma en como debe de manipularse la galga para su correcta transportación, orientación y manejo. Los pasos requeridos en la preparación de la galga para el pegado son los siguientes:

- Retiró de la galga del forro portador.
- Transportación de la galga a la superficie de pegado.
- Colocación de la galga en la superficie.
- Preparado de la galga para la aplicación del adhesivo.

3.4.3.1. Retiro de la galga del forro portador

El primer paso en la preparación para el pegado es retirar el forro de plástico portador de la galga. Se separa uno de los lados de este forro por completo, se toma uno de los extremos de la galga con una pinza y se coloca sobre una superficie de vidrio químicamente limpia. Con el lado de pegado de la galga tocando la superficie vidrio.

3.4.3.2. Transportación de la galga a la superficie de pegado

La galga se transporta a la superficie de pegado usando la cinta celofán M-LINE PCT-2A, con una longitud de 100 a 150 mm, se pega un extremo de la cinta al final de la pieza de vidrio de lado opuesto a la galga y terminal. Después se pega la cinta firmemente sobre la galga y terminal, pasando el dedo pulgar firmemente sobre la cinta. Una vez pegada la galga en la cinta celofán se despega de la superficie de vidrio con cuidado, lentamente; levantando la cinta hacia arriba con un ángulo superficial de 30 a 45° hasta que la cinta se libere con la galga adherida (*figura 3.19*). Este ángulo con la superficie es importante para evitar cambios permanentes en la resistencia de la galga. Algunas cintas podrían contaminar la superficie o reaccionar con el pegamento, para evitar esto sólo se deben usar cintas certificadas para instalación de galgas.

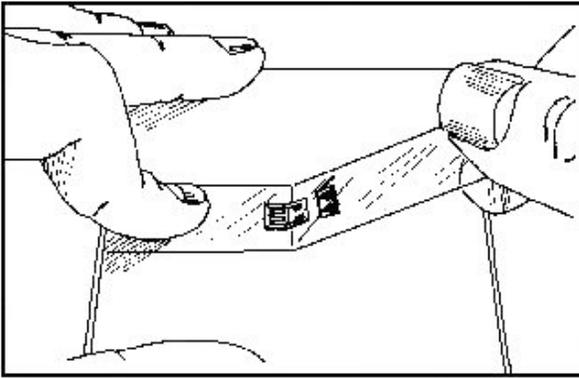


Figura 3.19. Colocación de la galga en cinta celofán.

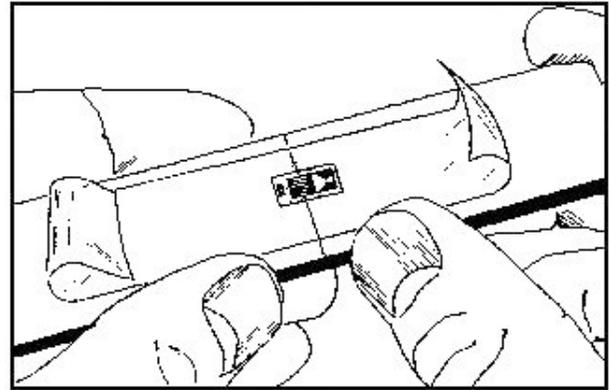


Figura 3.20. Alineado de la galga.

3.4.3.3. Colocación de la galga en la superficie

Cuando la galga está adherida en la cinta celofán M-LINE PCT-2A, ya está preparada para ser colocada sobre la superficie de estudio. Se posiciona la cinta con la galga adherida alineándola con las líneas esquemáticas marcadas en el metal (*figura 3.20*). La galga se orienta alineando los triángulos de orientación de la galga mostrada en la *figura 1.2*, con las líneas de orientación de la superficie; alineadas ambas se pega la cinta celofán en la superficie. Si la cinta con la galga está desalineada, se levanta la cinta de nuevo bajo el ángulo mencionado y se coloca hasta que la galga esté completamente alineada y en la posición correcta.

3.4.3.4. Preparado de la galga para la aplicación del adhesivo

Para aplicar el adhesivo se despega la cinta por el lado opuesto a las terminales de soldadura hasta que la galga este libre. Se dobla el final de la cinta despegada y se pega con presión sobre la superficie de vidrio hasta quedar la galga plana o paralela con la superficie de pegado (*figura 3.21*). El adhesivo apropiado puede ser aplicado ahora. El procedimiento para aplicar el pegamento M-Bond 200 es descrito en el siguiente apartado.

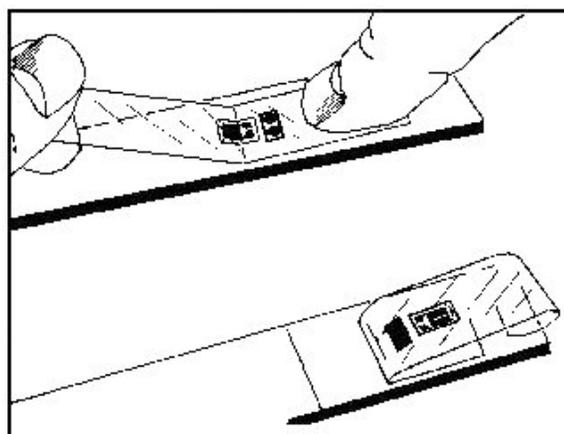


Figura 3.21. Posición de la galga antes del pegado.

3.4.4. Pegado con el adhesivo M-Bond 200

El desempeño de la galga va a depender del pegamento existente entre la galga y la superficie del objeto bajo estudio. El procedimiento que se explicó para la preparación de la superficie y el proceso de preparación de la galga para el pegado con el adhesivo M-Bond 200, asegura instalaciones exitosas y confiables. Los pasos requeridos para el pegado de la galga son los siguientes:

- Aplicado del catalizador M-Bond 200.
- Aplicado del adhesivo M-Bond 200.

Debe evitarse la contaminación de la superficie en el pegado de la galga (si ocurre una contaminación en este proceso, se debe limpiar la superficie contaminada con un cotonete de algodón, con el solvente Neutralizante M-LINE 5A. Se deja que la galga seque por varios minutos antes de pegarse). La galga nunca debe ser tocada con la mano.

3.4.4.1. Aplicado del catalizador M-Bond 200

El catalizador M-Bond 200 debe ser aplicado escasamente en una sola pasada y uniformemente. Antes de aplicarse debe limpiarse el cepillo del catalizador contra la boca del bote unas 10 veces, para remover el exceso del catalizador en el cepillo. El cepillo se coloca a lo largo de la galga, comprimiéndolo y deslizándolo sobre la galga se pasa el cepillo una sola vez. El cepillo debe pasar completamente por toda la superficie de la galga (*figura 3.22*). Debe dejarse que el catalizador seque un minuto bajo temperatura ambiente. A continuación se realizan las siguientes operaciones en el orden indicado y con una duración de tres a cinco segundos entre cada paso.

3.4.4.2. Aplicado del adhesivo M-Bond 200

Levantar la parte baja de la cinta. Sostener la cinta con la galga en una posición fija, aplicar una o dos gotas del adhesivo M-Bond 200 en la unión de la cinta y la superficie (*figura 3.23*), debe haber alrededor de 13 mm entre la galga colocada en la cinta y el área de instalación en la superficie.

Inmediatamente se gira la cinta con un ángulo de aproximadamente 30 grados sobre el área de instalación y la galga colocada en la cinta. Se sostiene la cinta ligeramente tensa y se pasa una gasa limpia lenta y firmemente sobre la galga una sola vez. La galga se coloca sobre las líneas de orientación colocadas en el metal (*figura 3.24*). Por último se suelta la cinta.

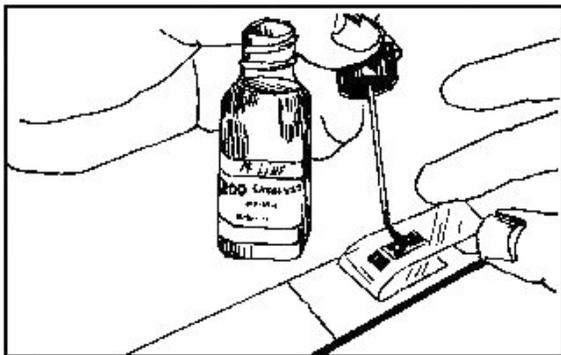


Figura 3.22. Aplicado del catalizador M-Bond 200.

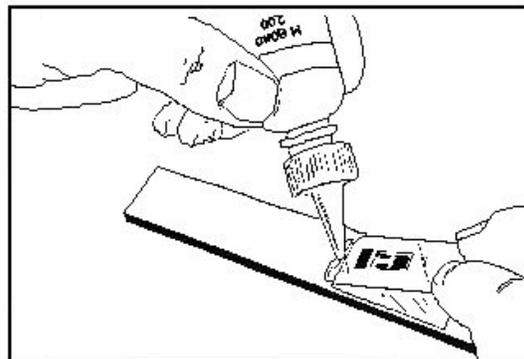


Figura 3.23. Aplicado del adhesivo M-Bond 200.

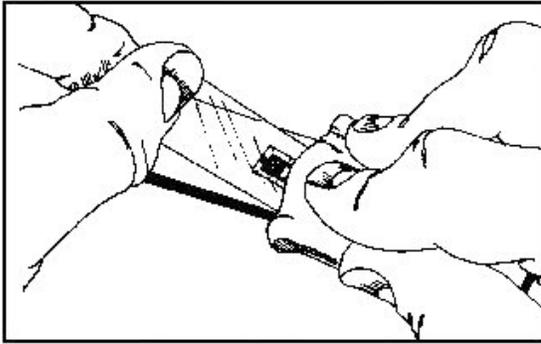


Figura 3.24. Pegado de la galga.

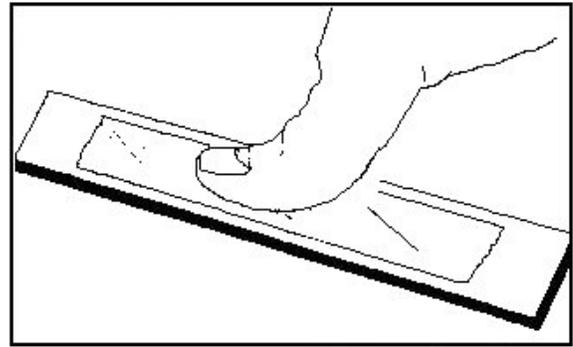


Figura 3.25. Presionando la galga.

Inmediatamente después de terminar el paso anterior, se desecha la gasa y se aplica firmemente el dedo pulgar presionando la galga sobre la superficie. Debe de presionarse por lo menos un minuto (*figura 3.25*). Esperar dos minutos antes del siguiente paso (remover la cinta).

La galga y terminal estarán ahora pegadas sobre la superficie del metal. Para remover la cinta, hay que jalarla en dirección contraria a la galga y terminal, despegarla lenta y firmemente de la superficie (*figura 3.26*).

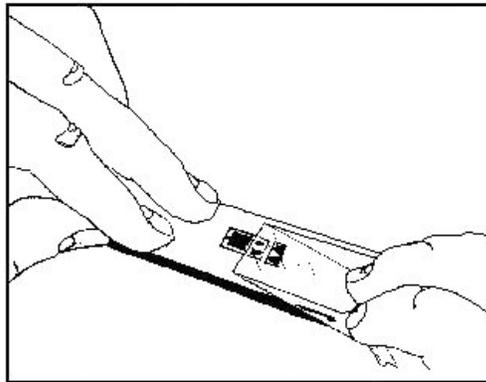


Figura 3.26. Despegando la cinta celofán de la galga.

3.5. Soldado de la galga

Terminado el proceso de pegado de la galga descrito anteriormente, el siguiente paso es el soldado de la galga. Soldar es unir dos metales usando el calor. En las galgas se utiliza el soldado para unir las etiquetas de las galgas con los cables que conectan el transductor con el circuito acondicionador de señal. Se recomienda soldar o pegar los cables cuando se va a trabajar en ambientes extremos como son los que se presentan en la industria o ingeniería civil. En estos ambientes se presentan altas temperaturas, vibraciones, ruido, calor, etc., que pueden provocar que se desconecten las terminales.

Comúnmente se usan tres métodos para soldar los cables con las etiquetas de la galga que son: Soldado suave, punto de soldadura y soldado con plata. El método usado depende de la temperatura de operación de los materiales de la galga (rejilla y base) y del adhesivo.

3.5.1. Soldadura suave

La soldadura suave consiste en fundir con un caudín de lápiz una aleación de: 63% de estaño, 36.65% de plomo y 0.35% de antimonio, para unir las etiquetas de la galga con el cable que la conectará con el circuito acondicionador de señal (*figura 3.27*). Este método es el más usado debido a que cubre un rango de temperatura de hasta 300°C.

3.5.2. Punto de soldadura

Algunos tipos de galgas extensiométricas son proporcionadas con pre-soldadura, adheridas a las etiquetas de la galga en forma de pequeños puntos. Este método es el más sencillo debido a que el usuario sólo tiene que tomar un caudín tipo lápiz, colocar el cable que conectara la galga sobre las etiquetas con pre-soldaduras y calentar la soldadura hasta que se funda con el cable. La posición correcta de la punta del caudín en el soldado con punto de soldadura para asegurar una unión sólida, es mostrada en la *figura 3.28*.

3.5.3. Soldado con plata

Este método es más complejo que los explicados anteriormente. Es utilizado en aplicaciones que requieren galgas de la serie WK (esta serie es capaz de operar a +275°C por períodos largos de tiempo). La soldadura de plata se usa en aplicaciones a altas temperaturas, este proceso es largo y se lleva a cabo con ocho pasos de preparación para el soldado y seis pasos para el soldado con plata. Si el lector desea tener más detalle de este proceso se recomienda visitar la dirección URL⁸.

Para el soldado de los cables se utilizó la técnica de soldadura suave, debido a que la serie de galga utilizada no trae pre-soldadura en sus etiquetas y la técnica de soldado con plata no se conoce bien. El método de soldadura suave realizado consistió de cuatro pasos sencillos: Estañar las puntas de los cables a soldar, estañar las etiquetas de la galga sin dejar la punta del caudín más de dos segundos sobre las mismas, fijar el cable firmemente sobre el objeto de estudio y por último se soldar los cables con las etiquetas previamente estañadas. Es recomendable fijar el cable al objeto de estudio antes de soldarlos. Hacer el proceso inverso puede provocar que las etiquetas se desprendan, al intentar fijar el cable soldado a las etiquetas con el objeto de estudio.

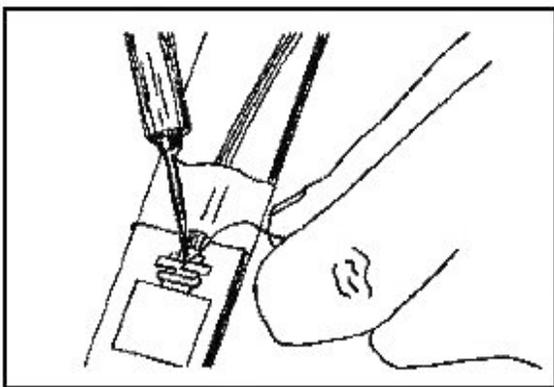


Figura 3.27. Soldado suave de los cables.

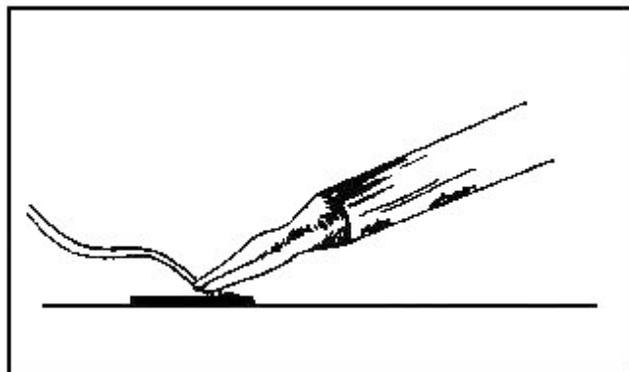


Figura 3.28. Soldado por punto de soldadura.

3.6. Protección de la galga

La protección es la etapa final del proceso de instalación. Todas las galgas deben ser protegidas del medio ambiente que las rodea y de daños mecánicos, incluidas aquellas que solo serán usadas en cuartos a temperatura ambiente. Si se toca la rejilla sin protección, pueden provocarse daños permanentes en la galga. La protección evita la corrosión y oxidación de la galga. Además de la rejilla, la base de la galga y capa de adhesivo requieren protección para prevenir daños irreversibles. Para cada tipo de galga y aplicación la empresa *Vishay®* recomienda un procedimiento diferente para tener una protección adecuada para la aplicación. Sin embargo; la protección usada en la mayoría de las instalaciones de galga es el solvente M-COAT A.

Las funciones de la capa protectora son tres: (1) proteger el adhesivo y así aumentar la capacidad de transmisión de la tensión; (2) brindar una protección física para la delicada galga y la conexión con alambres; (3) prevenir tensiones aparentes debidas a ataques químicos de la lámina de la galga y uniones con soldadura, etc. Si no se lleva a cabo esta protección se pueden tener mediciones falsas o erróneas.

Para la protección de la galga se utilizó el solvente M-COAT A, este proceso es muy sencillo. La aplicación del solvente se realizó con el aplicador (cepillo) incluido en el bote del M-COAT A. Con este cepillo se aplicó el solvente M-COAT A sobre toda la galga y etiquetas soldadas, este proceso se muestra en la *figura 3.29*. Se recomienda no dejar ninguna parte sin cubrir con el solvente, por último se espera cinco minutos para el secado del mismo.

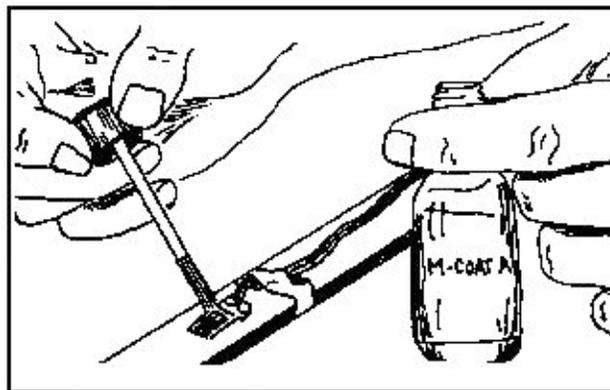


Figura 3.29. Protección con el químico M-COAT A.

3.7. Verificación de la instalación

La verificación es el proceso para determinar si existe fuga de resistencia e identificar problemas como: Daños de la base de la galga, humedad, solventes o problemas desconocidos, además indica si existe una incompleta fase de pegado o de protección de la galga. Una galga instalada correctamente debe tener una resistencia aislada de aproximadamente 20 000 M Ω entre alguna de las terminales de la galga y el objeto de estudio. Este valor puede ser menor después de aplicarle la capa protectora a la galga. Dependiendo del material usado, el valor mínimo aceptable es de 10 000 M Ω . En aplicaciones donde la temperatura excede los 150°C pueden tenerse valores menores, en este caso 10 M Ω será el valor mínimo aceptable.

Antes de sensar las variaciones de tensión que detecta la galga y ponerse en servicio, debe de verificarse la calidad de su instalación, comprobando sus propiedades eléctricas, junto con algunas formas de comprobación del pegado. Esta verificación no ofrece prueba de que la instalación de la galga fue satisfactoria, pero muestran algún posible problema. La verificación no debe ser limitada hasta completar la instalación, debido a que ésta se lleva en varias fases o etapas en las que se pueden identificar errores o imperfecciones, de esta manera realizar una corrección temprana y sencilla. El mínimo número de revisiones en cada etapa deben ser tres: Después del pegado, después del soldado de los cables y después de aplicar la protección a la galga.

La culminación de los procesos descritos en las secciones anteriores se muestra en la fotografía de la *figura 3.30*, en la cual se observa la galga adherida a la columna circular, soldada y protegida. Si el lector desea observar todo el proceso de preparación y pegado de la galga descrito se recomienda ver el video contenido en el CD anexo a este trabajo de tesis.

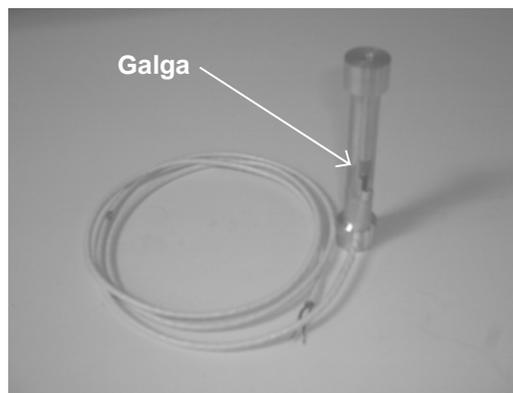


Figura 3.30. Galga adherida, soldada y protegida.

4. Pruebas y resultados experimentales

Una vez descrito el proceso de manufactura de la columna circular y el pegado de la galga para la formación del sensor de carga a tensión, el siguiente paso es la caracterización de los sensores y observar los resultados que estos generen; para ello, se usa un programa realizado en LabVIEW. Las principales características de cada paso son:

Caracterización de los sensores: Partiendo de la suposición de que el sensor de tensión tiene una respuesta lineal a la deformación (por la variación de la resistencia de la galga y con ello el voltaje a la salida del puente de Wheatstone) con respecto a la tensión. Con este procedimiento se estima la curva de respuesta del sensor de peso contra voltaje detectado.

Medición de pesos desconocidos: Una vez caracterizado y modelado el comportamiento del sensor, se prueba la repetibilidad de las mediciones y el error que se obtiene ante cargas conocidas para los diferentes sensores.

En este capítulo se describe la integración del banco de pruebas, caracterización de los sensores, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Se mostrará el error experimental observado en los sensores al medir cargas desconocidas.

4.1. Integración y conexión del banco de pruebas

Las galgas extensiométricas tienen variaciones de resistencia en el orden de los micro-ohms, estas variaciones son tan pequeñas que deben de utilizarse circuitos acondicionadores de señal, para convertir estas variaciones de resistencia en variaciones de voltaje. Para ello se integró un banco de pruebas compuesto por tres partes básicas:

- Estructura metálica con canastilla y sensor de cargas.
- Módulo de acondicionamiento de galgas SCC-SG03 y bloque conector SC-2345.
- PC con tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E.

En la *figura 2.1* se muestra el diagrama a bloques de todas las partes del banco de pruebas, en la cual la señal física a medir es la tensión mecánica. Para poder observar y distinguir cada una de éstos componentes, en la *figura 4.1* se muestra una fotografía donde se ilustran los módulos integrantes del banco de prueba. Cada una de éstos, está formado por diferentes

entidades modulares importantes. En los apartados siguientes se describirá la integración y conexión de los componentes del sistema.

4.1.1. Estructura metálica con canastilla y sensor de cargas

La estructura metálica proporciona un soporte al sensor y a la canastilla, para hacer estudio de tensión; está formada por una base tubular en forma de T. La estructura posee una canastilla metálica que proporciona una base para colocar los objetos a pesar. Entre la base tubular en forma de T y la canastilla metálica se coloca el sensor para medir tensión. En la *figura 4.2* se muestran las tres partes que integran la estructura para medir tensión y en la *figura 4.3* se muestra el sensor con dos sujetadores en los extremos, estos últimos se colocan en las roscas de la columna circular. Estos sujetadores se utilizan para colgar el sensor en la base tubular y poder realizar el estudio de cargas a tensión.

Como ya se explicó en secciones anteriores, el sensor está formado por la columna circular de aluminio y la galga extensiométrica adherida a ella. A la galga se soldan dos cables que la conectan con el circuito acondicionador de señal. En este caso los cables soldados a la galga son conectados a las terminales del módulo SCC-SG03. Para minimizar el ruido externo se usan cables con blindaje con malla metálica.

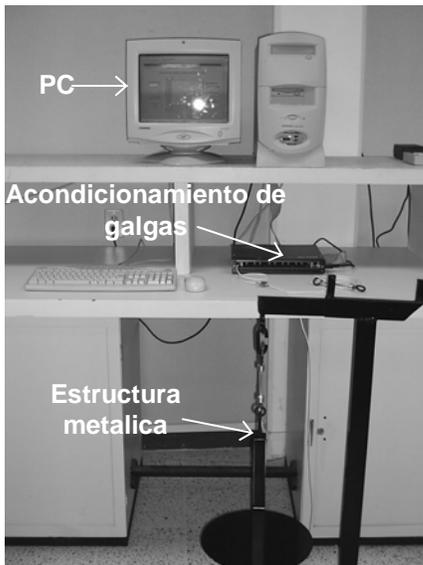


Figura 4.1. Integración general del banco de pruebas.

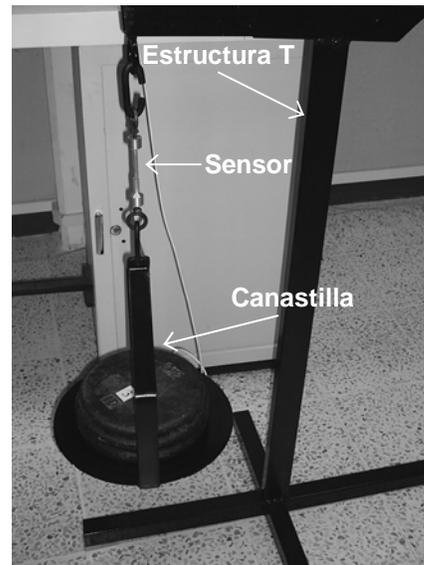


Figura 4.2. Base metálica con la canastilla y el sensor de carga.

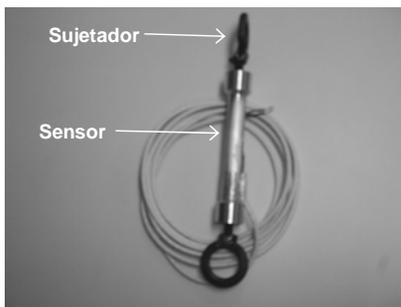


Figura 4.3. Sensor con sujetadores.

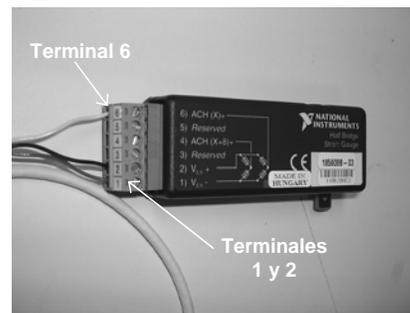


Figura 4.4. Módulo de acondicionamiento SCC-SG03.

4.1.2. Módulo de acondicionamiento de galgas SCC-SG03 y bloque SC-2345

La galga extensiométrica pasiva y activa se conecta al módulo de galgas SCC-SG03 que tiene 6 terminales. Las galgas se conectan en las terminales 1, 2 y 6 del mismo módulo. La galga pasiva se conecta a la terminal 6 y 2 y la galga activa a la terminal 6 y 1, como se muestra en la fotografía de la *figura 4.4*. Esta conexión se realiza de forma análoga al diagrama a bloques del módulo SCC-SG03 mostrado en la *figura 2.16*.

Para la conexión de las galgas al módulo SCC-SG03 se utilizó un circuito impreso sencillo, que está formado por dos terminales de rosca (ver *figura 4.5*); dos terminales se puentean y son conectadas a la terminal 6 del SCC-SG03. La *figura 4.6* muestra la forma en como se conectan las galgas al módulo SCC-SG03 mediante las terminales de tornillo del circuito impreso.

El módulo SCC-SG03 debe conectarse en el *socket* J1 del bloque conector SC-2345. En la *figura 4.7* se muestra un diagrama de este bloque conector con sus diferentes *sockets* y en la *figura 4.8* se muestra una fotografía del bloque conector SC-2345 con el módulo SCC-SG03 conectado en el *socket* J1. En esta figura también se muestra la conexión de la alimentación del bloque conector SC-2345 y el cable conector SCSI con el cual se interconecta a la tarjeta PCI-6024E.

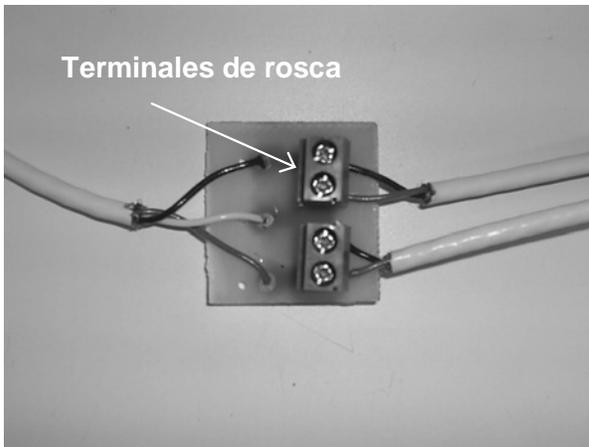


Figura 4.5. Circuito impreso con terminales de rosca.

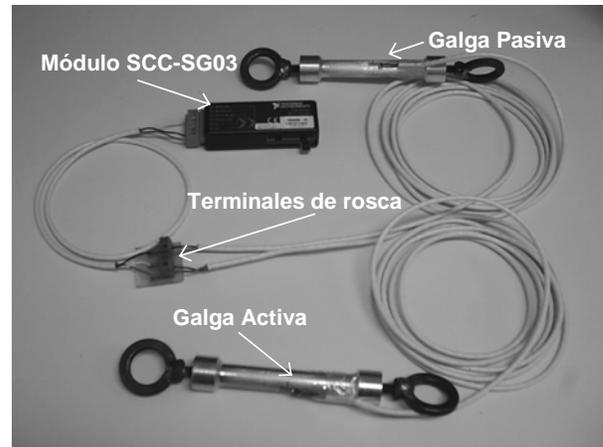


Figura 4.6. Conexión de galgas al módulo SCC-SG03.

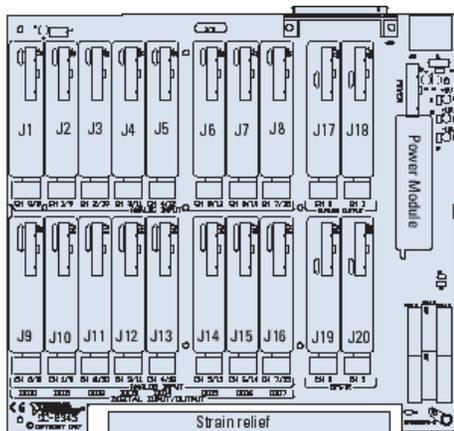


Figura 4.7. Diagrama del bloque conector SC-2345.

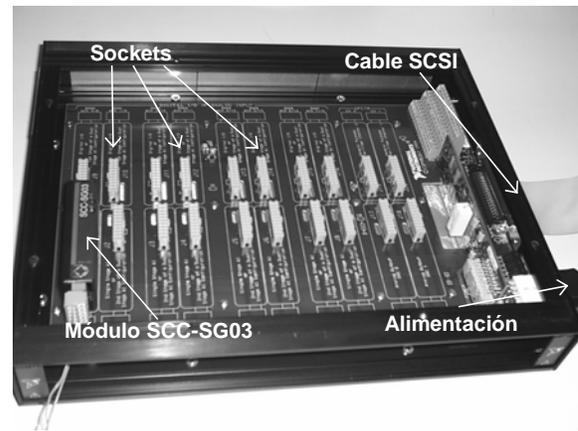


Figura 4.8. Conexiones del bloque conector SC-2345.

4.1.3. PC con tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E

El bloque SC-2345 es conectado a la TAD PCI-6024E mediante el cable conector SCSI de 68 hilos mostrado en la *figura 2.20*. Para trabajar con la TAD PCI-6024E es necesario insertarla en uno de los slots del bus PCI de la computadora personal (PC). La *figura 4.9* muestra la forma en como se conecta el cable SCSI de 68 hilos con la PC y la *figura 4.10* la forma en como se conecta la TAD PCI-6024E en el bus PCI de la PC. La computadora usada en el presente trabajo es una Compaq Presario, modelo 5363, tiene un sistema operativo Microsoft Windows 98SE, procesador AMD K6 Atlon a 450.1 MHz y memoria RAM de 60.0 MB.

Una vez conectada la TAD en el bus PCI de la PC, es necesario implementar un programa en el lenguaje de programación LabVIEW para poder procesar los datos y desplegarlos en el monitor de la PC. Este lenguaje visual de la firma *National Instruments®* es compatible con los dispositivos utilizados y permite una adquisición de datos sencilla. Los datos adquiridos son desplegados de manera gráfica y digital en el monitor de la PC. Es importante mencionar que la TAD en el programa implementado en LabVIEW debe ser configurada en modo referenciado y con una ganancia interna de 100 (Rango dinámico de ± 50 mv). Por tal motivo, el voltaje que digitaliza la tarjeta es amplificado 10,000 veces; es decir, si la TAD muestra un voltaje de $1 \mu\text{V}$ el voltaje real en el puente de Wheatstone es de 100 pV.



Figura 4.9. Conexión de la TAD PCI-6024E a la PC Compaq Presario.

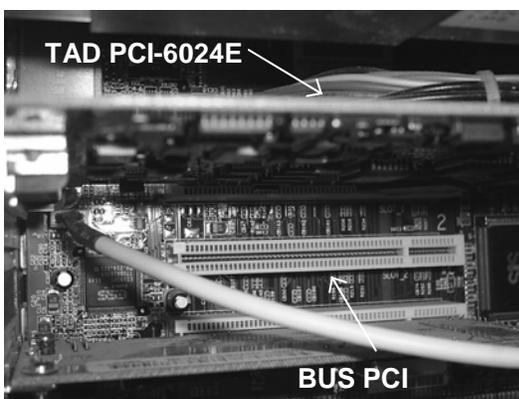


Figura 4.10. TAD en el bus PCI de la PC Compaq Presario.

4.2. Caracterización de los sensores

La caracterización se realiza para obtener su modelo de comportamiento. Para ello se le aplican cargas conocidas y se mide el voltaje que genera el sensor mediante la variación de la resistencia de la galga. Analizando esta respuesta en voltaje se puede inferir cuál fue la carga a la que estuvo sometida dicho sensor. El algoritmo que describe el procedimiento para caracterizar un sensor se muestra en la *figura 4.11*. Los pasos más importantes del algoritmo son:

- Determinar el voltaje sin carga (V_{cero}).
- Someter los sensores a cargas conocidas.
- Cálculo de la pendiente y abscisa utilizando mínimos cuadrados.
- Cálculo del voltaje de ajuste.

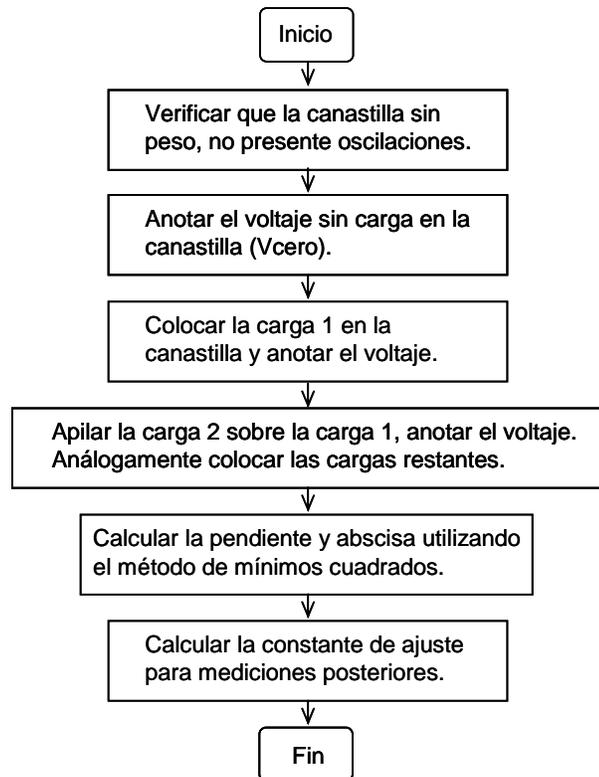


Figura 4.11. Algoritmo para caracterizar un sensor.

4.2.1. Determinar el voltaje sin carga (V_{cero})

El primer paso es observar el voltaje que se mide en el banco de pruebas cuando la canastilla no tiene carga. Aunque la canastilla metálica representa una carga para el sensor, será una carga constante en todas las mediciones posteriores, por esta razón se considera que el voltaje observado con la canastilla es el voltaje sin carga, denominado voltaje cero (V_{cero}). En la *figura 4.12* se muestra la estructura para medir tensión sin carga en la canastilla y en la *figura 4.13* las seis pesas usadas para la caracterización.



Figura 4.12. Canastilla sin carga.

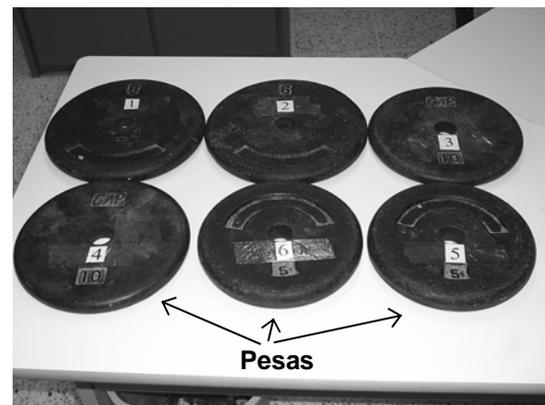


Figura 4.13. Pesas en forma de disco.

4.2.2. Someter los sensores a cargas conocidas

Una vez determinado el voltaje sin carga, se procede a someter los sensores a cargas conocidas, para esta tarea se utilizan seis pesas de gimnasio en forma de discos, en la *figura 4.13* se muestran éstas pesas con números distintivos que van del 1 al 6, esto último para clasificarlos.

El primer paso es colocar el disco 1 en la canastilla de la estructura metálica, posteriormente se observa el nuevo voltaje detectado, es decir, la variación de voltaje que este disco provocó y se anota. Análogamente se colocan en orden progresivo los demás discos, apilándolos sobre el disco 1. En la *figura 4.14* se muestra la canastilla con tres discos, de igual manera se coloca del disco 1 al disco 6. Al colocar un disco sobre la canastilla debe asegurarse que el sensor y la canastilla no presenten un movimiento tipo péndulo (oscilación), si el sistema presenta oscilaciones la lectura de voltaje realizada para cada disco no es confiable. A este proceso se le denominó *caracterización del sensor*.

Para poder estudiar el comportamiento y repetibilidad que presenta un sensor, cada uno de ellos se sometió diez veces el proceso de caracterización descrito. Esto último con la finalidad de observar el comportamiento de los sensores y garantizar que las mediciones realizadas sean confiables y repetitivas.

4.2.3. Cálculo de la pendiente y abscisa utilizando mínimos cuadrados

En el apartado 2.2.2 se explicó que la respuesta que presenta el puente de Wheatstone teóricamente es lineal, para cambios pequeños de resistencia. Por esta razón se decidió utilizar un modelo matemático que aproxime los resultados obtenidos a una línea recta.

Debido a que el método de mínimos cuadrados⁸ es el criterio más utilizado para determinar la recta que mejor se ajuste a un número de puntos dispersos cuando estos tienen una tendencia lineal. Se optó utilizar este método para aproximar los valores obtenidos a una línea recta (ecuación 14). Para este caso de estudio, los puntos dispersos son los valores de los voltajes obtenidos en las caracterizaciones.



Figura 4.14. Canastilla con tres pesas.

⁸ El criterio de mínimos cuadrados implica que la recta elegida para ajustar los puntos del diagrama de dispersión sea tal que la suma de los cuadrados de las distancias verticales entre los puntos y la recta sea lo más pequeña posible. Si el lector desea profundizar en este tema se recomienda consultar la referencia [13].

$$y = mx + b \tag{14}$$

Donde:

- y = Carga detectada [Kg.].
- m = Pendiente de la recta [Kg/Volt].
- x = Voltaje medido por la TAD-PCI6024E [v].
- b = Carga detectado (abscisa) cuando $x=0$. [Kg].

Para calcular la pendiente y la abscisa con mínimos cuadrados se implementó un programa en Excel, utilizando la función “estimación lineal”, de la categoría estadística. Esta función toma los datos de voltaje y carga, obteniendo el valor de m y b de la recta que mejor se ajuste a este conjunto de datos. Los resultados obtenidos de las caracterizaciones se muestran en la sección de resultados.

4.2.4. Cálculo del voltaje de ajuste

Al realizar la caracterización de los sensores, se observó que el voltaje que se mide cuando no se tiene carga (V_{cero}) presentaba variaciones en cada una de las caracterizaciones. Estas variaciones de V_{cero} provocan que no se observe la misma respuesta si se repite la caracterización.

Los módulos utilizados en el banco de pruebas, no cuentan con ajuste a cero por hardware, por esta razón se decidió realizar este ajuste por software. Para implementar este ajuste se realizó el cálculo de la constante de ajuste.

El cálculo de la constante de ajuste se realiza con el V_{cero} que presentó el banco de pruebas en el momento de caracterizar un sensor. Al realizar otra caracterización, cuando no se tiene carga, se observa un V_{cero} diferente del anterior, este V_{cero} se llama voltaje cero actual ($V_{\text{cero actual}}$). El proceso para calcular la constante de ajuste (A_{ajuste}) se muestra en el diagrama de flujo de la *figura 4.15*. Cuando se realiza una medición, al voltaje medido se le suma la constante de ajuste y de esta manera se puede usar la caracterización del sensor.

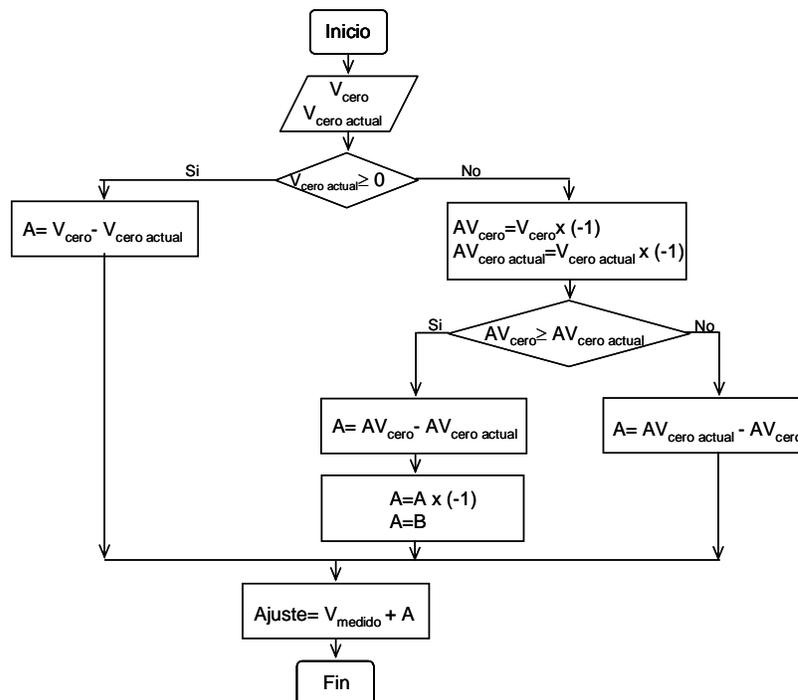


Figura 4.15. Diagrama de flujo para calcular la constante de ajuste.

4.3. Resultados de las caracterizaciones

Al realizar la caracterización de los sensores se pudo determinar si la técnica de pegado y soldado fue exitosa en cada sensor y también permitió observar el comportamiento de los mismos con cargas conocidas. Inicialmente se manufacturaron dos columnas circulares con las medidas especificadas en el plano de la *figura 3.4*. Al comenzar a caracterizarlas se observó que no presentaban variaciones de voltaje al colocarle los discos, inclusive cuando tenía todos apilados (carga de 31.2 Kg).

De la ecuación 7 se observa que al tener una menor área en la estructura circular se tendrá un mayor alargamiento (deformación) con la misma carga. Por esta razón se decidió manufacturar una estructura circular con un menor diámetro. El riesgo que se corre disminuyendo el diámetro de la estructura circular es que no se sabe si la galga puede presentar cambios de resistencia permanentes al pegarse en una superficie tan curva. Se decidió manufacturar una estructura con un diámetro de $\frac{1}{4}$ ". El plano de esta nueva estructura es análogo al mostrado en la *figura 3.4*, la única diferencia es que la parte central será cilindrada a $\frac{1}{4}$ "x $2\frac{1}{2}$ " ($\frac{1}{4}$ " de diámetro y una longitud de $2\frac{1}{2}$ ").

Para observar la repetibilidad de los resultados y la fiabilidad del proceso de pegado y soldado descrito anteriormente, se manufacturaron tres estructuras circulares con la parte central cilíndricas a $\frac{1}{2}$ "x $2\frac{1}{2}$ " y tres cilíndricas a $\frac{1}{4}$ "x $2\frac{1}{2}$ ".

4.3.1. Resultados experimentales

Al caracterizar las estructuras se observó que no todas presentaban una respuesta satisfactoria. Es decir, si se somete una galga a tensión su resistencia aumenta, razón por la cual el voltaje_{ab} en el puente de Wheatstone debe aumentar. De los seis sensores elaborados, dos de ellos presentaban respuestas erróneas e inestables. En la *figura 4.16* se muestran los seis sensores manufacturados, se observa la diferencia en el diámetro.

Cuatro sensores presentaron respuestas correctas al someterlas a cargas conocidas. Para describirlos se les llamará sensor 1 y sensor 2, a los dos sensores de $\frac{1}{2}$ " de diámetro; sensor 3 y 4 a los dos sensores de $\frac{1}{4}$ " de diámetro.



Figura 4.16. Sensores manufacturados.

Para la obtención de los resultados se realizó el proceso de caracterización descrito en secciones anteriores. Para no mostrar todos los voltajes obtenidos con las cargas de prueba solo se muestran los resultados de las pendientes y abscisas de las diez caracterizaciones, de los cuatro sensores. Estas pendientes y abscisas fueron calculadas por el método de mínimos cuadrados.

Para poder determinar la carga que se le aplica a una estructura se necesita un valor de pendiente y abscisa que caracteriza a cada sensor (*tabla 4.1*). El proceso para determinar la pendiente y abscisa que mejor caracteriza al sensor es: Realizar 10 caracterizaciones de cada sensor, de cada una de ellas obtener m y b ; de las 10 m y b obtener la mediana⁹ y se toma de las caracterizaciones la m y b que más se aproxime a este valor. Por ejemplo, para el sensor 1 el valor de la mediana de $m= 1628241.16$ kg/v y $b= -1997.92371$ kg/v, por esta razón el valor de $m= 162712.75$ kg/v y el valor de $b=-1996.28$ kg/v obtenido en la caracterización número 5, caracteriza y modela al sensor 1.

Para verificar que tan dispersos se encuentran los puntos de las caracterizaciones sobre la recta que los modela, se graficó el voltaje (x) en función del la carga (y). Por esta razón se despejó x de la ecuación 14. El cálculo de x se realiza con la ecuación 15.

$$x = \frac{y - b}{m} \tag{15}$$

Donde:

- y = Carga detectada [Kg].
- m = Pendiente de la recta [Kg/Volt].
- x = Voltaje medido por la TAD-PCI6024E [v].
- b = Carga detectado (abscisa) cuando $x=0$ [Kg].

Para tener una medida cuantitativa de que tanto se ajusta el modelo de cada uno de los sensores con las mediciones obtenidas, en las *figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20* se muestran las gráficas de la ecuación 15 con los datos del modelo de cada sensor (m y b); además en estas mismas gráficas se muestran todos los puntos de las diez caracterizaciones usadas para obtener este modelo (70 muestras en total). Como se puede apreciar en estas figuras, para el sensor 1 los puntos de las caracterizaciones se encuentran dispersos alrededor de la recta; para el sensor 2 se ajustan mejor a la recta, por esta razón las mediciones realizadas con el sensor 2 tendrá una mayor precisión y exactitud que las que se hacen con el sensor 1. Para el sensor 3 los puntos de caracterización se encuentran muy ajustados a la recta y para el sensor 4 los puntos mostrados se ajustan a la recta mejor que el sensor 1; por esta razón se tendrá mayor exactitud y precisión con los sensores 3 y 4, que con los sensores 1 y 2.

Tabla 4.1. Pendientes y abscisas de los cuatro sensores caracterizados.

Caracterización	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
	Pendiente	Abscisa	Pendiente	Abscisa	Pendiente	Abscisa	Pendiente	Abscisa
1	1889787.50	-2315.41	1111653.46	2565.02	179520.31	263.71	234387.02	-68.37
2	1685492.90	-2064.43	1145841.62	2644.16	178504.21	263.04	257580.66	-76.08
3	1631553.39	-1999.56	1173444.89	2707.95	172323.74	253.19	235111.83	-68.82
4	1621095.41	-1988.66	1151904.17	2658.69	165446.34	243.34	236437.20	-69.39
5	1627102.75	-1996.28	1143205.06	2638.86	170791.42	251.72	242135.76	-70.78
6	1534302.22	-1882.09	1180067.94	2723.19	176256.07	258.54	223876.72	-65.18
7	1605814.42	-1970.36	1173157.99	2707.42	174785.41	257.09	217501.36	-63.31
8	1653864.31	-2029.38	1192975.64	2752.85	182527.78	268.15	233632.80	-68.10
9	1613044.75	-1979.61	1183609.33	2731.66	170194.53	249.95	233811.19	-68.62
10	1629379.58	-1999.60	1195401.05	2758.31	166816.45	246.08	231435.46	-67.61

⁹ La mediana es el valor que queda en la parte central de un grupo de observaciones arregladas en orden de magnitud. Se recomienda consultar la referencia [13].

Se sustituyó la pendiente (m) óptima, abscisa (b) y los valores de cargas (y) en la ecuación 15, el resultado de este cálculo proporcionó, la respuesta ideal esperada en cada uno de los sensores. En la *figura 4.17* se muestra la gráfica de resultados obtenidos de la caracterización del sensor 1 y la respuesta ideal de este sensor se muestra con una línea recta. Análogamente en la *figura 4.18* se muestra la respuesta del sensor 2, la *figura 4.19* ilustra los resultados del sensor 3 y la *figura 4.20* la del sensor 4.

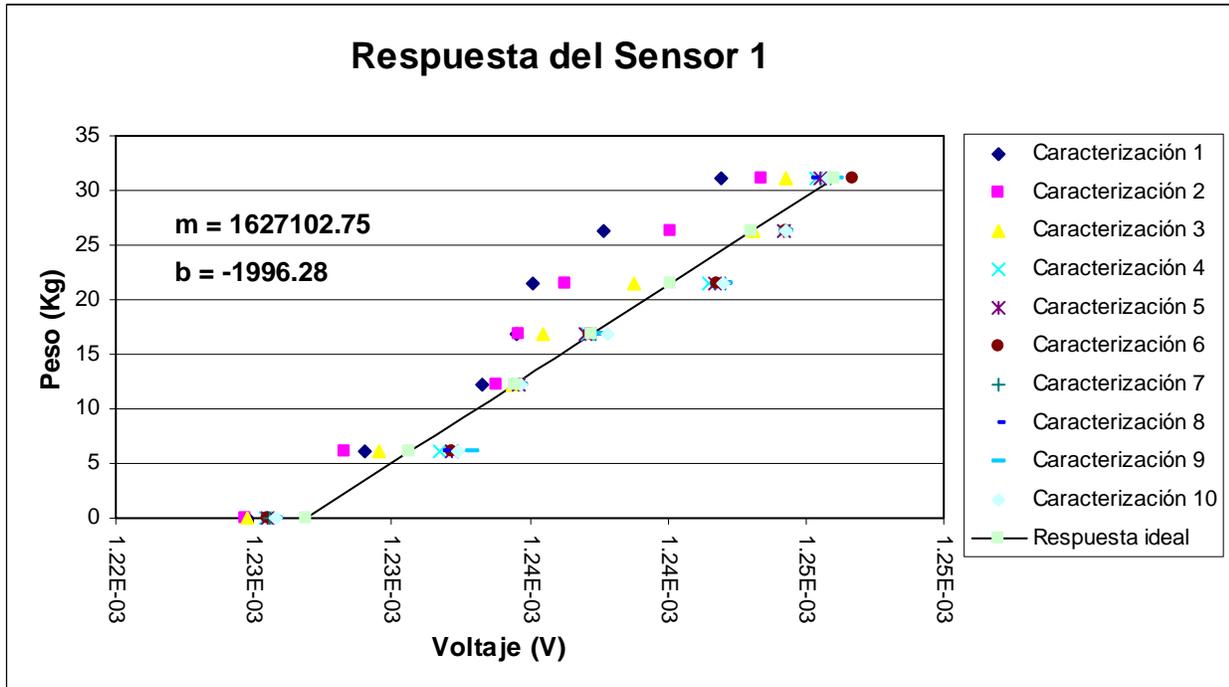


Figura 4.17. Respuesta ajustada del sensor 1 y mediana de la caracterización.

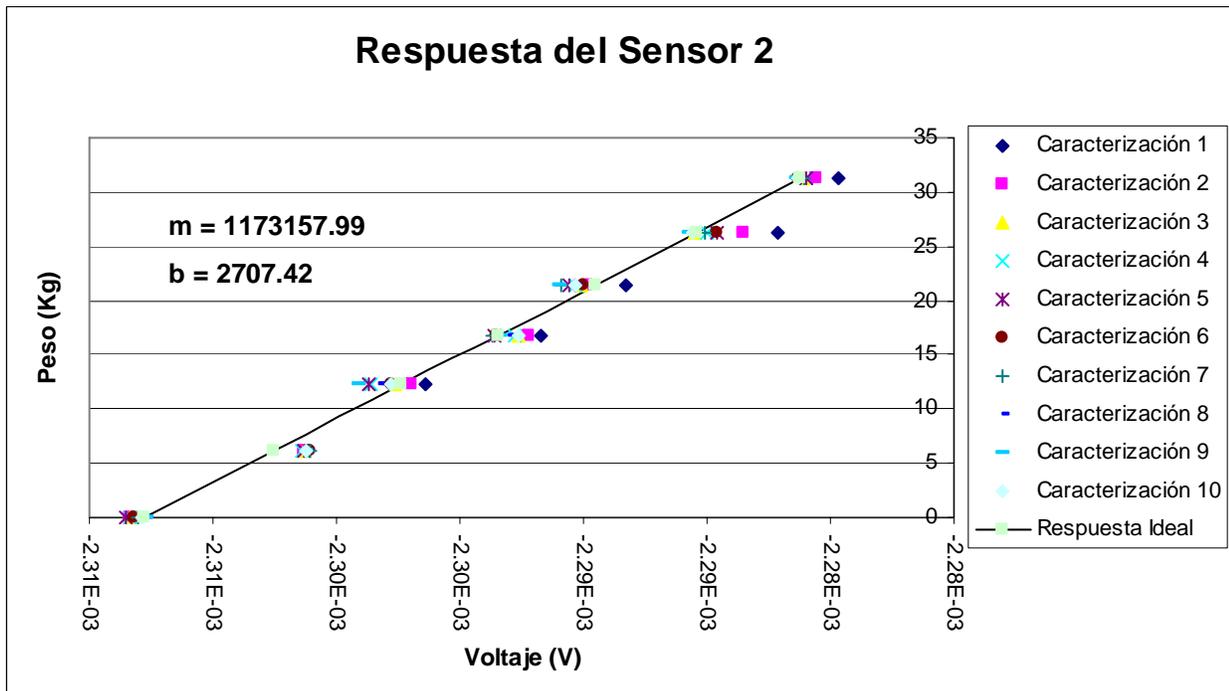


Figura 4.18. Respuesta ajustada del sensor 2 y mediana de la caracterización.

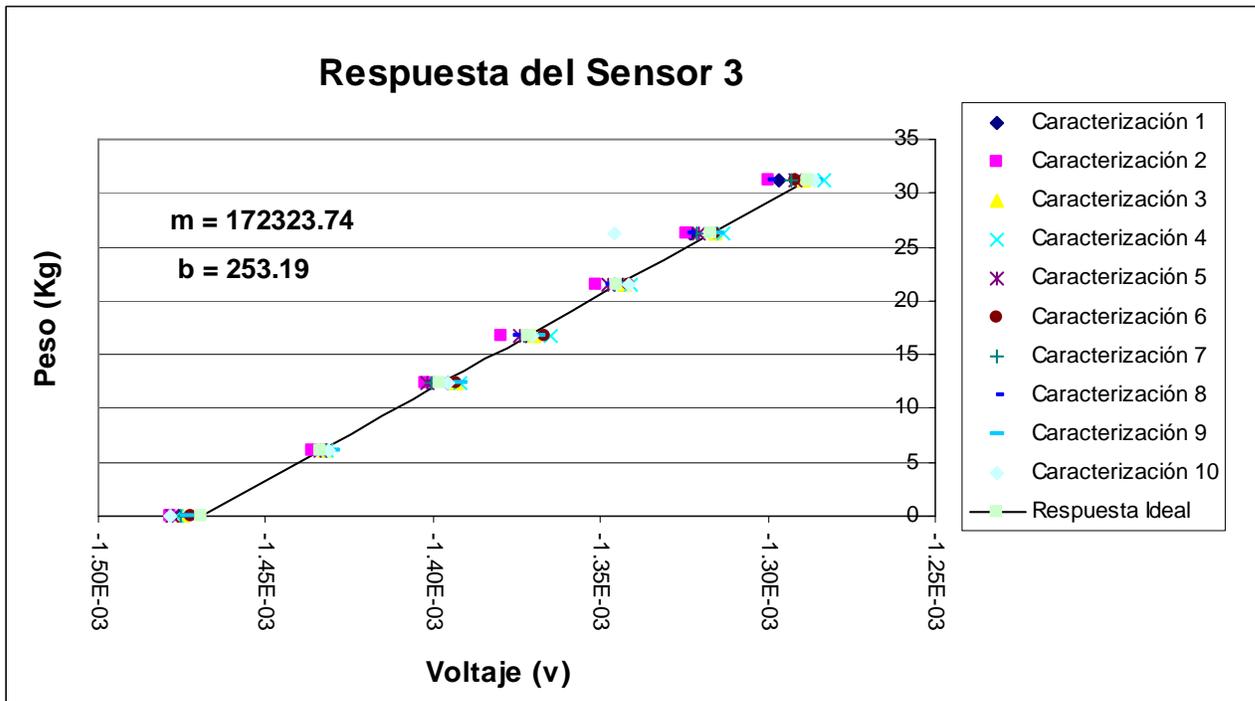


Figura 4.19. Respuesta ajustada del sensor 3 y mediana de la caracterización.

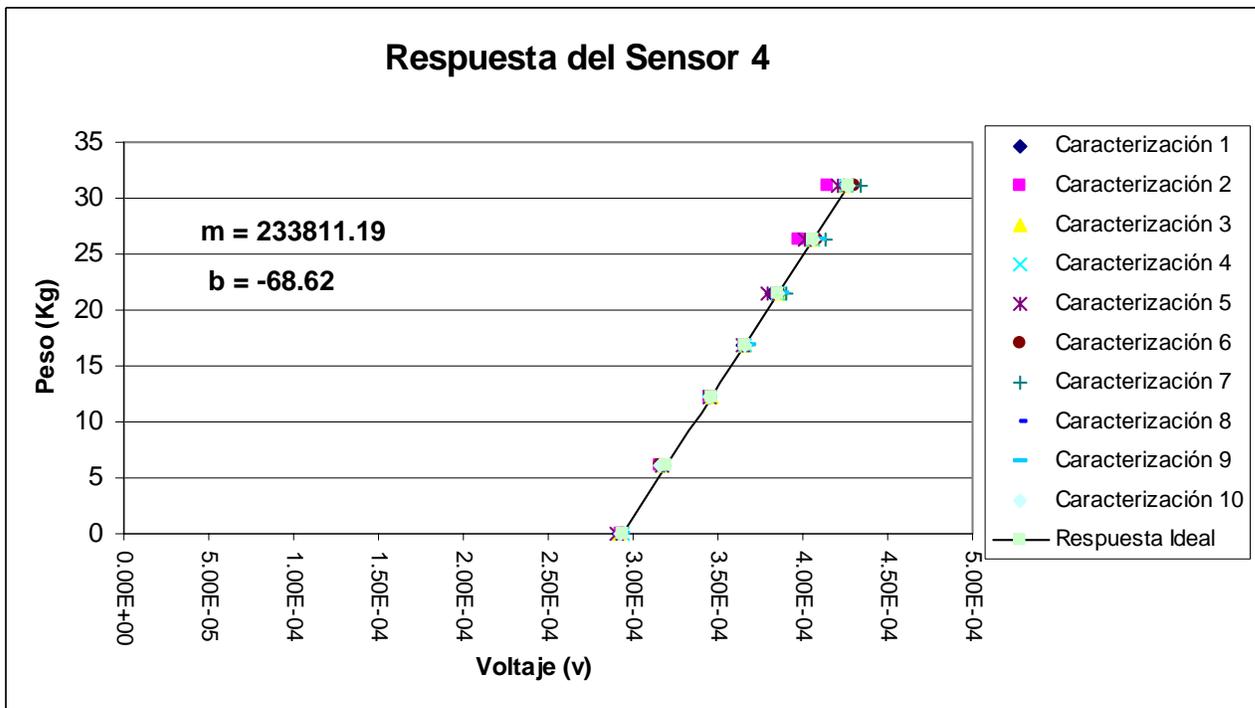


Figura 4.20. Respuesta ajustada del sensor 4 y mediana de la caracterización.

4.3.2. Sensibilidad de los sensores

Los sensores presentan variaciones por efectos térmicos y por ruido al filtrar la señal en el módulo acondicionador. Estas variaciones son muy pequeñas pero significativas para cargas que producen variaciones de voltaje en este orden. Para determinar la sensibilidad de cada uno de los sensores se implementó un programa en LabVIEW llamado *efectos térmicos*, éste, mide las variaciones de voltaje que presenta cada uno de los sensores. Con el apoyo de este programa se determinó que los sensores no pueden inferir cargas que provoquen variaciones de voltaje iguales o menores a estas variaciones térmicas.

Para observar las variaciones de un sensor el programa *efectos térmicos* se corrió por lapsos de 12 horas, para tener medidas confiables. La canastilla metálica no debe presentar oscilaciones, debe de estar completamente equilibrada. Los resultados obtenidos del programa efectos térmicos se muestran en la *tabla 4.2*. Esta tabla muestra las variaciones de cada uno de los sensores. Para conocer la sensibilidad de cada uno de ellos en peso, únicamente se multiplica este voltaje por la pendiente que caracteriza a cada sensor, para obtener la sensibilidad en kilogramos.

Tabla 4.2. Sensibilidad de cada uno de los sensores, en voltaje y en kilogramos.

<i>Sensor</i>	<i>Variaciones térmicas (μV)</i>	<i>Sensibilidad (Kg)</i>
1	4.08	6.64
2	2.13	2.50
3	7.57	1.30
4	2.32	0.54

4.3.3. Gráficas del voltaje de las galgas

La caracterización de los sensores se realizó con el apoyo del software para el estudio de galgas, éste tiene una ventana donde se muestran las variaciones de voltaje en forma gráfica. En esta ventana se observó que cuando el sensor no tiene carga en la canastilla metálica el voltaje medido es una línea recta. Cuando se coloca una carga en la canastilla se produce una variación del voltaje que se observa en el graficador del programa como un escalón. Un escalón es la variación del voltaje provocada por una carga. Después de un tiempo, el voltaje se estabiliza en su nuevo valor. La *figura 4.21* muestra las variaciones de voltaje descritas. Como el sensor se está sometiendo a tensión el voltaje aumenta. Cuando se somete el sensor a compresión el voltaje disminuye.

La respuesta de una galga que está bien pegada y soldada, muestra variaciones de voltaje constantes y escalonadas como en la *figura 4.21*. Sucede lo contrario cuando una galga no está bien pegada, soldada o se dañó en el proceso de pegado. Las variaciones de voltaje presentan grandes oscilaciones y la gráfica observada difiere con la esperada, es decir, en algunos casos cuando se le somete a tensión el voltaje disminuye y a compresión aumenta. Los sensores 5 y 6 de $\frac{1}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " de diámetro respectivamente, presentaron resultados erróneos. La *figura 4.22* muestra la respuesta de una galga con resultados erróneos. En esta figura pueden observarse grandes oscilaciones que se consideran como ruido. Realizar mediciones con galgas con esta respuesta no garantiza resultados confiables. En ambas figuras la galga fue sometida a una carga de 6.135 Kg a tensión.

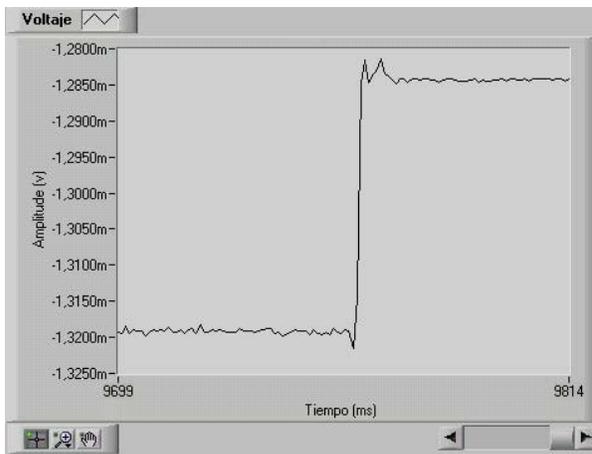


Figura 4.21. Respuesta correcta de una galga.

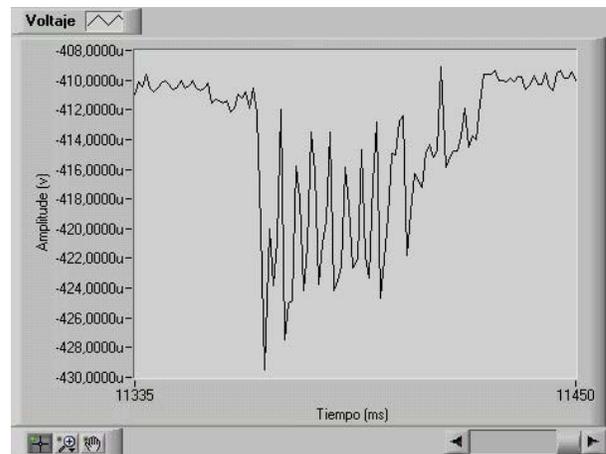


Figura 4.22. Respuesta errónea de una galga.

4.3.4. Cálculo experimental del error en los sensores

Una vez obtenida la pendiente de cada uno de los sensores y conociendo la sensibilidad del sensor a las variaciones térmicas y ruido, se procede a observar el comportamiento de los mismos en la medición de cargas (peso).

Para el cálculo del error experimental se realiza una pequeña caracterización a los sensores. En esta ocasión se observa el peso que el banco de pruebas infiere con cargas conocidas. El procedimiento para hacerlo es colocar la pesa número 1 en la canastilla metálica, esta carga tiene un peso de 6.135 Kg, con el sensor sometido a esta carga se observa cual es el peso que infiere el banco de pruebas. Con este resultado se calcula el porcentaje de error del sensor bajo prueba al inferir este peso. En forma análoga se realiza este proceso para las cinco pesas restantes (discos). Terminado el proceso para este sensor, los demás sensores son estudiados de la misma forma.

Para poder estimar el porcentaje de error experimental de los sensores, debe de sumarse a este porcentaje de error, el porcentaje de error que provocan las variaciones térmicas de cada uno de los sensores. Los resultados que se obtuvieron de esta caracterización para determinar el error de cada uno de los sensores con cargas conocidas, más las variaciones térmicas se muestran en la *tabla 4.3*. En ella se puede observar el porcentaje de error que presentó cada sensor al inferir cargas y la tolerancia en cada una de las mediciones.

La *figura 4.23* muestra la gráfica del error experimental observado en los sensores al realizar la medición de cargas. En esta figura se observa que el error que presenta el sensor 2 es menor que la presenta el sensor 1 y el error del sensor 3 es menor al que presenta el sensor 4. A mayor peso se observa un menor error en las mediciones, aproximadamente de 10%.

Tabla 4.3. Error experimental observado en los sensores.

		Sensor 1		
Peso real	Peso experimental	Error (Kg)	Sensibilidad (Kg)	Tolerancia (Kg)
0	0	0	0	± 0
6.135	10.69	4.555	6.64	± 6
12.275	12.64	0.365	6.64	± 4
16.82	18.68	1.86	6.64	± 5
21.435	24.53	3.095	6.64	± 5
26.29	25.44	0.85	6.64	± 4
31.2	33.67	2.47	6.64	± 5

<i>Sensor 2</i>				
<i>Peso real</i>	<i>Peso experimental</i>	<i>Error (Kg)</i>	<i>Sensibilidad (Kg)</i>	<i>Tolerancia (Kg)</i>
0	0	0	0	±
6.135	6.43	0.295	2.50	± 5
12.275	9.47	2.805	2.50	± 5
16.82	14.48	2.34	2.50	± 4
21.435	17.9	3.535	2.50	± 4
26.29	22.47	3.82	2.50	± 4
31.2	28.46	2.74	2.50	± 4
<i>Sensor 3</i>				
<i>Peso real</i>	<i>Peso experimental</i>	<i>Error (Kg)</i>	<i>Sensibilidad (Kg)</i>	<i>Tolerancia (Kg)</i>
0	0	0	0	± 0
6.135	4.16	1.975	1.30	± 2
12.275	10.18	2.095	1.30	± 2
16.82	13.63	3.19	1.30	± 3
21.435	18.72	2.715	1.30	± 3
26.29	22.25	4.04	1.30	± 3
31.2	27.21	3.99	1.30	± 3
<i>Sensor 4</i>				
<i>Peso real</i>	<i>Peso experimental</i>	<i>Error (Kg)</i>	<i>Sensibilidad (Kg)</i>	<i>Tolerancia (Kg)</i>
0	0	0	0	± 0
6.135	5.58	0.555	0.54	± 3
12.275	8.92	3.355	0.54	± 3
16.82	12.72	4.1	0.54	± 3
21.435	17.92	3.515	0.54	± 3
26.29	20.08	6.21	0.54	± 4
31.2	28.78	2.42	0.54	± 3

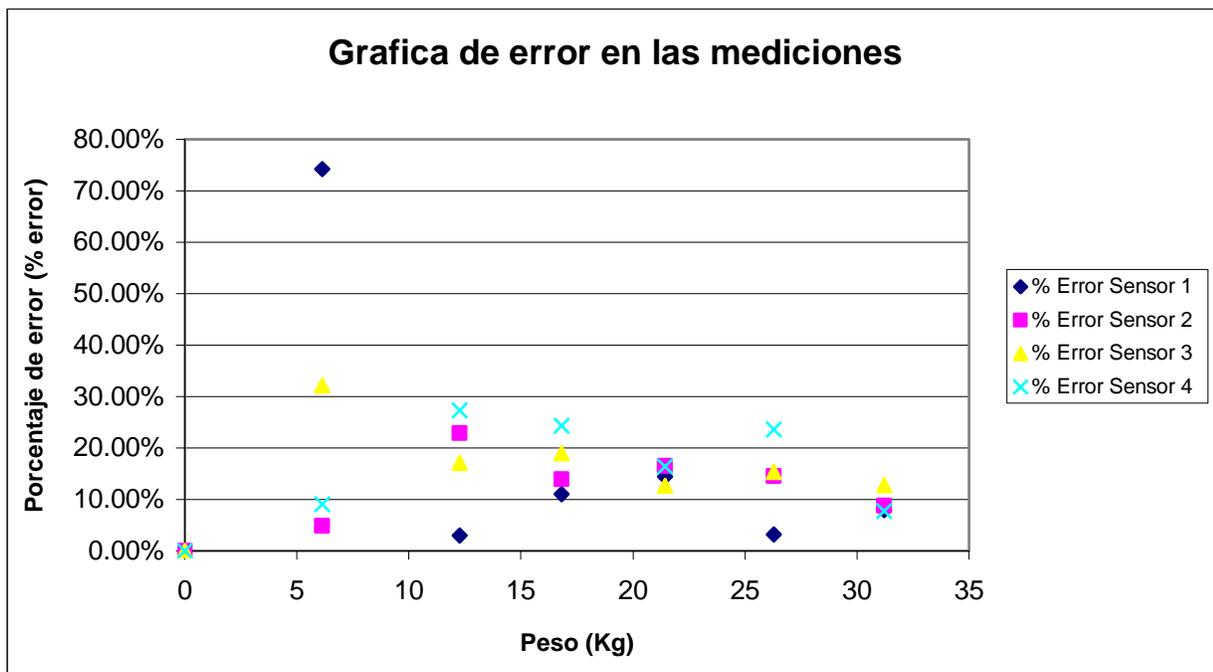


Figura 4.23. Error de los sensores en la medición de cargas.

5. Conclusiones

En este trabajo de tesis se mostró el diseño, construcción y las pruebas experimentales realizadas a un sensor de cargas a tensión, con estos resultados se obtuvo la sensibilidad de los sensores y la tolerancia de error al medir cargas. Esto último con la finalidad de estudiar el comportamiento de las galgas extensiométricas sometidas a tensión.

En la parte electrónica se utilizaron dispositivos comerciales, para la integración del banco de pruebas. Con los resultados observados se pueden formular sugerencias para trabajos futuros y sugerencia de características requeridas para un mejor desempeño. Considerando las diferentes fases de desarrollo se presentan las conclusiones del trabajo de tesis:

- En la UTM no se cuenta con una máquina universal para generar tensiones pequeñas, en el orden de kilogramos. Por esta razón al comenzar el trabajo de tesis se consideró realizar un estudio de cargas a compresión, debido a que se pensaba que era más fácil colocar cargas sobre una estructura, para el estudio de cargas a compresión; que colgarlas, para el estudio de la tensión. Se manufacturó una estructura metálica para el estudio de cargas a compresión, pero debido a que la estructura presentaba mucha fricción, las líneas de fuerza de la tensión no se propagaban por el centro del sensor los resultados obtenidos presentaban mucho ruido y no se consideraron confiables. La determinación a la cual se llegó fue realizar el estudio de cargas a tensión, para lo cual se tuvo que manufacturar una nueva estructura metálica.
- El banco de pruebas se implementó en el laboratorio de electrónica del IEC de la UTM. Como es un cuarto sin variaciones considerables de temperatura, se decidió sustituir la galga pasiva por un potenciómetro de 350Ω . Inicialmente las caracterizaciones se realizaron con un circuito impreso que tenía un potenciómetro como galga pasiva y únicamente se conectaba al módulo SCC-SG03 la galga activa. Los resultados observados con esta configuración presentaban mucho ruido, razón por la cual se decidió conectar la galga pasiva al módulo SCC-SG03. Debido a la falta de espacio en las columnas circulares, sólo se pegó una galga en la columna. Para conectar la galga pasiva uno de los sensores con el mismo diámetro se conecta como galga pasiva y se ubica cerca del sensor que tiene la galga conectada como activa. Los resultados obtenidos mejoraron, razón por

la cual se concluye que las variaciones térmicas afectan considerablemente a las mediciones y es indispensable la colocación de la galga pasiva en el objeto de estudio.

- La técnica descrita para el pegado y soldado de la galga garantiza que si se llevan a cabo los pasos mencionados, se obtiene un buen funcionamiento de la galga. Si no se realiza de manera adecuada un paso del proceso descrito se pueden tener resultados no confiables, como los mostrados por los sensores 5 y 6. En este trabajo de tesis se pegaron nueve galgas extensiométricas, de las cuales solamente cuatro de ellas presentaron resultados confiables. Con estos resultados se concluye que se obtuvo un 44.44% de efectividad en el pegado de las galgas. Se recomienda ampliamente seguir los pasos que indica el video de fabricantes de galga y evitar tocar la rejilla de la galga, ya que provoca que la galga se dañe.

A continuación se mencionan los principales problemas que se presentaron en la realización del trabajo de tesis:

- Los resultados obtenidos inicialmente con el software para estudio de galgas presentaban mucho ruido y no se observaba ninguna respuesta. Se pensó que el módulo SCC-SG03 estaba dañado. Consultando las hojas de especificaciones del módulo SCC-SG03 se observó que el fabricante indica conectar este módulo en el *socket* (J1) del bloque conector SC-2345. Se cambió al módulo SCC-SG03 del *socket* (J3) donde estaba conectado inicialmente al *socket* (J1), logrando con esto una respuesta cuando se aplicaba tensión a la galga. Por esto se concluye que para trabajar con el módulo SCC-SG03 es necesario conectarlo en el *socket* (J1) del bloque SC-2345.
- Se logró obtener una respuesta del banco de pruebas cuando se conectó el módulo SCC-SG03 en el *socket* (J1), pero las variaciones de voltaje eran mínimas al colocar cargas sobre la columna de $\frac{1}{2}$ ". Por esta razón se pensó que era insensible. Para solucionar este problema se optó por manufacturar columnas circulares con menor diámetro ($\frac{1}{4}$ "). Al observar el comportamiento de las columnas con menor diámetro se logró tener una mayor sensibilidad a menor tensión, pero el ruido en la señal seguía presente y los resultados no eran confiables. Las columnas con diámetro pequeño presentan mayor sensibilidad a la tensión.
- Como ya se habían eliminado dos incertidumbres (que el módulo acondicionador estuviera dañado y que una mayor sensibilidad del sensor eliminaría el ruido del voltaje_{ab} observado), solamente restaba verificar si la TAD PCI-6024E y el programa implementado en LabVIEW para la adquisición de datos funcionaban adecuadamente. El fabricante del módulo SCC-SG03 no especifica la modalidad de la salida de este módulo, es decir, si la salida es en modo diferencial o referenciado. Según un diagrama esquemático proporcionado, la salida del módulo es en modo diferencial. Inicialmente se programó la TAD-PCI-6024E en modo diferencial, pero los resultados no eran satisfactorios. Por esta razón se programó la TAD en modo referenciado, con lo cual se lograron resultados menos variables, confiables y más cercanos a la teoría.
- Al configurar la tarjeta en modo referenciado se mejoró la respuesta del banco de pruebas, pero seguían presentándose variaciones (ruido), que estaban en el orden de las mediciones. El programa implementado inicialmente en LabVIEW tomaba 500 muestras, de las cuales se realizaba un promedio y se obtenía un solo dato, que era el promedio. Para solucionar este problema se sustituyó este promedio por un filtro digital pasa bajas Butterworth de 8° orden, con frecuencia de corte en 2.5 Hz. Este filtro suaviza el comportamiento del voltaje y para eliminar aún más las variaciones se realizó el promedio

de las últimas 400 muestras del filtro. Con esto se logró obtener un resultado más confiable y con menores variaciones.

5.1. Perspectivas de trabajos a futuro

Este trabajo de tesis no tiene precedente alguno en la UTM, por esta razón se pretende comenzar a estudiar las características y funcionamiento de las galgas. Para que en trabajos posteriores se pueda implementar el hardware para el acondicionamiento de la señal y otro para elaboración de un producto final para el usuario. Entre los trabajos que se pueden realizar tomando como base el desarrollo actual son:

- Realizar un modelado matemático de la respuesta obtenida en los sensores, para inferir con mayor exactitud las cargas desconocidas. Además, se puede realizar un estudio estadístico de los resultados para poder predecir con mayor fiabilidad las cargas medidas. Debido a que la aproximación de los resultados presentaron un error grande al inferir el peso, esto se debe a que el modelo de mínimos cuadrados ajusta las mediciones a una línea recta. Experimentalmente se observó que la respuesta de los sensores es no lineal.
- Implementar la parte electrónica para el acondicionamiento de señales de galgas extensiométricas. Este hardware acondicionador de galgas se propone que tenga una ganancia mayor de 100 y ajuste a cero por hardware. En la parte mecánica se utilizará los sensores ya fabricados y se podrán realizar comparaciones con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.
- Estudiar como funcionan las básculas comerciales, para trabajar en un sistema que utilice los sensores fabricados, el hardware implementado para el acondicionamiento de galgas y pueda generar con esto un producto final.
- En el área de diseño se propone la manufactura de estructuras metálicas para el estudio de tensión y compresión. Estas estructuras no deben presentar fricción para el caso de compresión y para el caso de tensión no deben provocar momentos en las estructuras.
- Se propone estudiar el comportamiento de las estructuras tipo viga. Para este estudio puede utilizarse el banco de pruebas integrado y el software desarrollado en este trabajo de tesis.

Referencias

- [1] Maloney, Timothy J.: “Electrónica Industrial Moderna”, México, Ed. Pearson Educacion, 2002.
- [2] “Transductores Electrónicos”, España, Ed. Orbis/Marcombo, 1986.
- [3] Cooper D. y Helfrick D.: ”Instrumentación Electrónica y Mediciones”, México, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 1990.
- [4] Window A.L.: *Strain Gauge Technology*. Elsevier Aplied Science, USA, 1992.
- [5] Gere J. y Timoshenko S.: “Mecánica de Materiales”. Universidad Autónoma Metropolitana, México, Ed. Internacional Thomson Editores, 1998.
- [6] Beer F. y Johnston R.: “Mecánica de Materiales”. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Ed. McGraw-Hill Interamericana de México, 2003.
- [7] Lázaro, A.: “LabVIEW 6i: Programación Gráfica para el Control de Instrumentación”. Paraninfo, España, 2001.
- [8] Aparicio, E.: *Codificador de Pulsos KYZ bajo el Protocolo de Comunicaciones MODBUS para Medidores Electrónicos de Energía Eléctrica*. Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, México, 2004.
- [9] National Instruments®: The Measurement and Automation, Catalog 2004, National Instruments® Corporation, USA, 2004.
- [10] Shigley, J. y Mischke C.: “Diseño en Ingeniería Mecánica”, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México, Ed. McGraw-Hill Interamericana de México, 2003. 1996.
- [11] Vishay® Measurements Group: Catalog 500 Precisión Strain Gages, Catalog 2000, Measurements Group Inc. USA, 2000.
- [12] Vishay® Measurements Group: Bulletin 309D. Student Manual for Strain Gages Technology, Measurements Group Inc. USA, 1992.
- [13] Lincoln, L.: ”Introducción a la Estadística”. California State University, Long Beach, Editorial CECSA, México, 2002.

Internet

- [URL1] <http://www.bottpower.com/articulos/a-extensometria.html>, “Extensometría”, 14 de Abril de 2005.
- [URL2] <http://www.metarmes.com/hoja6.htm>, “Aplicaciones especiales de la galga extensiométrica”, 14 de Abril de 2005.
- [URL3] <http://www.hbm.com>, 14 de Abril de 2005.
- [URL4] <http://www.omega.com>, 14 de Abril de 2005.
- [URL5] <http://www.vishay.com/company/brands/measurements-group>, 14 de Abril de 2005.
- [URL6] http://www.vishay.com/company/brands/measurements-group/guide/500/lists/lgp_list.htm, “Modelo de galga Largo”, “Vishay® Compañy”, 20 de Abril de 2005.
- [URL7] http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/500/lists/rsp_list.htm, “Modelo de galga para determinar tensiones residuales”, “Vishay® Compañy”, 20 de Abril de 2005.
- [URL8] <http://www.davidson.com.au/products/strain/mg/technology/techtips/tt602.pdf>, “Técnica para el soldado de plata, para fijar alambres a las galgas extensiométricas”, “measurements group”, 26 de Abril de 2005.
- [URL9] http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone, “Historia del puente de Wheatstone”, “Enciclopedia Wikipedia”, 27 de Abril de 2005.
- [URL10] <http://www.ni.com/labview/>, ¿Que es LabVIEW?, “National Instruments®”, 28 de Abril de 2005.
- [URL11] <http://www.ni.com/aap/acquire.htm>, Adquisición de datos con LabVIEW, “National Instruments®”, 28 de Abril de 2005.

Apéndice A. Datos técnicos de la serie de galgas EA

La sensibilidad de la aleación de la rejilla de la galga y los materiales de la base no son arbitrarios en la especificación de un tipo de galga. Al contrario, debe de realizarse una selección cuidadosa entre las series de galgas disponibles por la firma *Vishay*®. Cada serie incorpora un diseño especial o características de construcción.

A.1. Descripción y especificaciones de desempeño de la serie EA

La serie EA son galgas de rejillas con aleación Constantan usadas en aplicaciones para el análisis de tensión. Esta serie tiene una rejilla con longitud de 3.2 mm, con una base polyimide flexible y moldeable. La firmeza y resistencia al calor de esta base provee excelente manejo y calidad de desempeño. Esta serie está disponible en un amplio rango de modelos y es ampliamente usada por su bajo costo. Existen varias opciones para proteger galgas de la serie EA, cubriendo de varias formas los cables de conexión de la galga y el encapsulado de protección.

La base es tratada para lograr un pegado firme con todos los pegamentos estándar para galgas de la firma *Vishay*®. Los límites de tensión para esta galga son de aproximadamente $\pm 5\%$ en tensión y $\pm 3\%$ bajo compresión de la longitud total de la rejilla. Para obtener más detalles de las características de las diferentes series se recomienda al lector consultar la referencia [11].

A.2. Compensación de temperatura para galgas

Las galgas extensiométricas de la firma *Vishay*® tienen una designación estándar, la compensación de la temperatura de la aleación (STC) está especificada en el segundo grupo de éste código. Esta designación se utiliza para determinar la compensación de temperatura y el coeficiente de expansión térmica del material de la estructura bajo estudio. La *figura A.1* muestra una lista de números STC y materiales de estudio con los cuales se tienen efectos térmicos iguales.

S-T-C NO.	EXPANSION COEFFICIENTS**		COMMON MATERIAL
	per °F	per °C	
00	0.8	1.4	Invar, Fe-Ni alloy Quartz, fused Titanium Silicate*, polycrystalline
	0.3	0.5	
	0.0	0.0	
03	3.0	5.4	Alumina, fired Molybdenum*, pure Tungsten, pure Zirconium, pure
	2.7	4.9	
	2.4	4.3	
	3.1	5.6	
05	5.1	9.2	Glass, Soda-Lime-Silica Stainless Steel, Ferritic (410) Titanium, pure Titanium Alloy, 6 Al-4V*
	5.5	9.9	
	4.8	8.6	
	4.9	8.8	
06	6.4	11.5	Beryllium, pure Cast Iron, gray Inconel, Ni-Cr-Fe alloy Inconel X, Ni-Cr-Fe alloy Monel, Ni-Cu alloy Nickel-A, Cu-Zn-Ni alloy Steel alloy, 4340 Steel, Carbon, 1008, 1018* Steel, Stainless, Age Hardenable (17-4PH) Steel, Stainless, Age Hardenable (17-7PH) Steel, Stainless, Age Hardenable (PH15-7Mo)
	6.0	10.8	
	7.0	12.6	
	6.7	12.1	
	7.5	13.5	
	6.6	11.9	
	6.3	11.3	
	6.7	12.1	
	6.0	10.8	
	5.7	10.3	
5.0	9.0		
09	9.3	16.7	Beryllium Copper, Cu 75, Be 25 Bronze, Phosphor, Cu 90, Sn 10 Copper, pure Steel, Stainless, Austenitic (304*) Steel, Stainless, Austenitic (310) Steel, Stainless, Austenitic (316)
	10.2	18.4	
	9.2	16.5	
	9.6	17.3	
	8.0	14.4	
	8.9	16.0	
13	12.9	23.2	Aluminum Alloy, 2024-T4*, 7075-T6 Brass, Cartridge, Cu 70, Zn 30 Tin, pure
	11.1	20.0	
	13.0	23.4	
15	14.5	26.1	Magnesium Alloy*, AZ-31B

* Indicates type of material used in determining thermal output curves supplied with Micro-Measurements strain gages.
**Nominal values at or near room temperature for temperature coefficient of expansion values.

Figura A.1. Compensación STC y del coeficiente de expansión térmica.

A.3. Temperatura de operación de galgas de la serie EA

Dependiendo de la aleación con la cual este construida la rejilla de la galga presentan una respuesta lineal en un rango de temperatura. El rango de operación de temperatura para las galgas de la serie EA se muestra en la figura A.2.

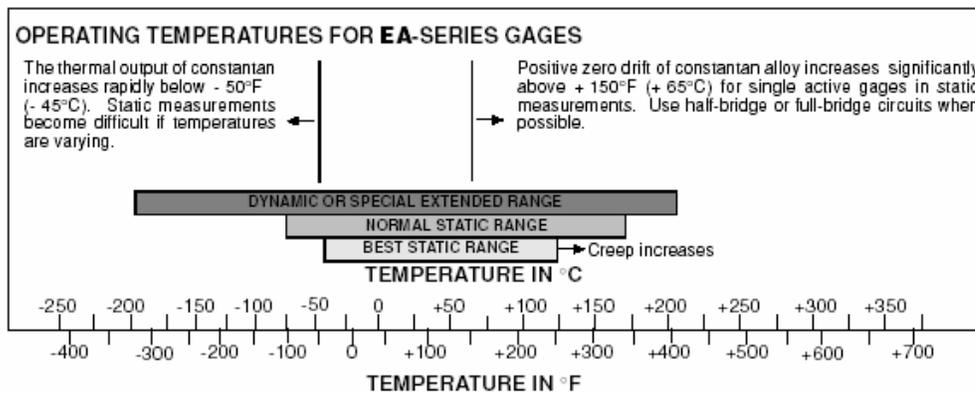


Figura A.2. Rango de operación de temperatura para galgas de la serie EA.

Apéndice B. Manual de usuario del software

En este manual se describen las ventanas que integran el programa para el estudio de galgas extensiométricas. Se explicarán los parámetros que debe proporcionar el usuario para el manejo del software y se mencionan sugerencias para familiarizarse con el programa. También se explicaran los problemas más comunes y se proporciona una pequeña ayuda para solucionarlos.

B.1. Descripción del software

El software para el estudio de galgas proporciona un ambiente visual que permite la observación de resultados en forma gráfica, así como en forma digital. La función básica del programa es adquirir los datos que se encuentran en la TAD PCI-6024E. Posteriormente estos datos son amplificados por la tarjeta y filtrados mediante un filtro digital del lenguaje de programación LabVIEW. En la pantalla se muestra el valor promedio de 500 muestras.

Para la medición de pesos es necesario que se programen las pendientes y las abscisas de los sensores y mediante la ecuación 14, se infiere el peso que esta experimentando el sensor. En las funciones implementadas en el programa se encuentra una breve descripción que proporciona una ayuda al usuario para entender el funcionamiento del mismo. En las secciones siguientes se realizará una descripción breve de cada una de las ventas que integran el programa.

B.2. Ventanas del software para el estudio de galgas

El lenguaje de programación utilizado para la realización del software es LabVIEW por las ventajas mencionadas en la apartado 2.4.1 de este lenguaje de programación. El programa está integrado por cuatro ventanas, las cuales son:

- Acerca de...
- Análisis Teórico.
- Configuración y Resultados.
- Medición de Peso.

B.2.1. Acerca de...

La ventana *acerca de...* es la ventana de inicio. Muestra la presentación del programa, en esta presentación se observa el nombre del software, institución y departamento donde se desarrolló y el nombre del autor. La *figura B.1* muestra esta ventana ilustrando estas partes.

En la *figura B.2* se muestra en la parte superior derecha de la ventana *acerca de...*, un botón rojo con una cruz blanca en el centro del mismo. Este botón controla la terminación del programa, si el usuario presiona este botón en esta ventana o en cualquier otra, el programa pregunta al usuario si esta seguro de salir del programa y le proporciona dos opciones, *si* y *no*. Al presionar *si* el programa se termina y si el usuario presiona que *no*, el programa sigue ejecutándose.



Figura B.1. Datos sobre el programa.

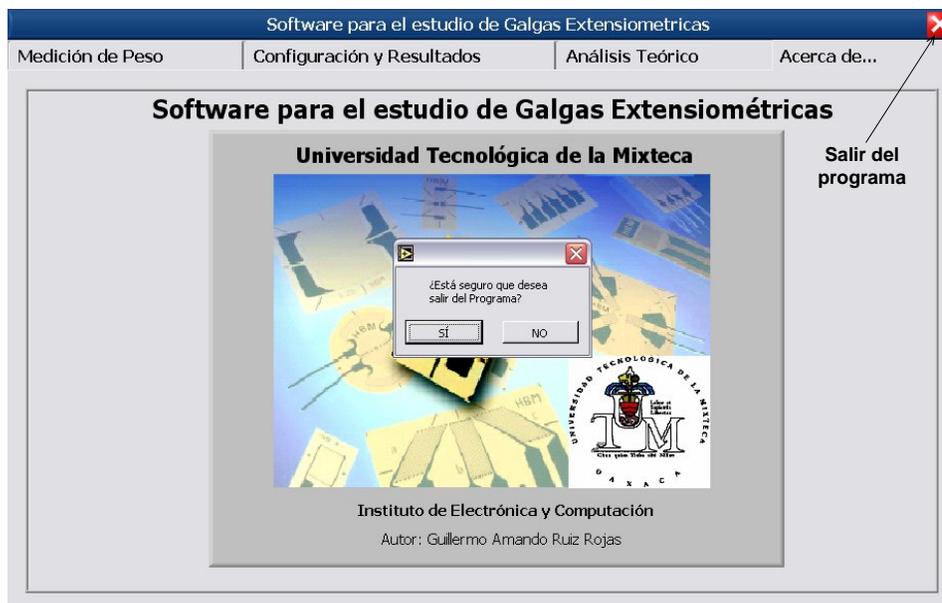


Figura B.2. Salida del programa.

B.2.2. Análisis Teórico

En esta ventana se pueden realizar estimaciones o cálculos teóricos. Esta ventana se divide en tres partes para calcular: Alargamiento (ΔL), variaciones de resistencia (ΔR) para columnas circulares y voltaje_{ab} en el puente de Wheatstone (Voltaje_{ab}). Los datos proporcionados por el usuario son independientes, aunque algunos parámetros para el cálculo del alargamiento y variación de resistencia son los mismos, no tienen relación alguna. Estas fórmulas fueron tratadas en los apartados 2.1.5 y 2.2.2.

B.2.2.1. Cálculo del alargamiento

En cada parámetro se especifica las unidades con las que se está trabajando. Para el cálculo del alargamiento de la columna circular, la carga (P) debe de introducirse en kilogramos, la longitud en milímetros, el módulo de elasticidad en Giga Newton (GN) y el diámetro en milímetros. El resultado del cálculo se da en metros.

B.2.2.2. Cálculo de la variación de resistencia

El cálculo teórico de la variación de resistencia se realiza con el factor de la galga sin unidades (adimensional), resistencia de la galga en ohms, módulo de elasticidad en Giga Newton (GN) y diámetro en milímetros. El resultado de este cálculo se da en ohms (Ω).

B.2.2.3. Cálculo del Voltaje_{ab}

El cálculo del voltaje_{ab} en el puente de Wheatstone se realiza con los valores de la fuente de alimentación (E) del puente en volts, resistencia de la galga y el valor de variación de la galga activa en ohms. El resultado de este cálculo se da en volts (v). Lo expuesto en los incisos anteriores se muestra en la *figura B.3*.

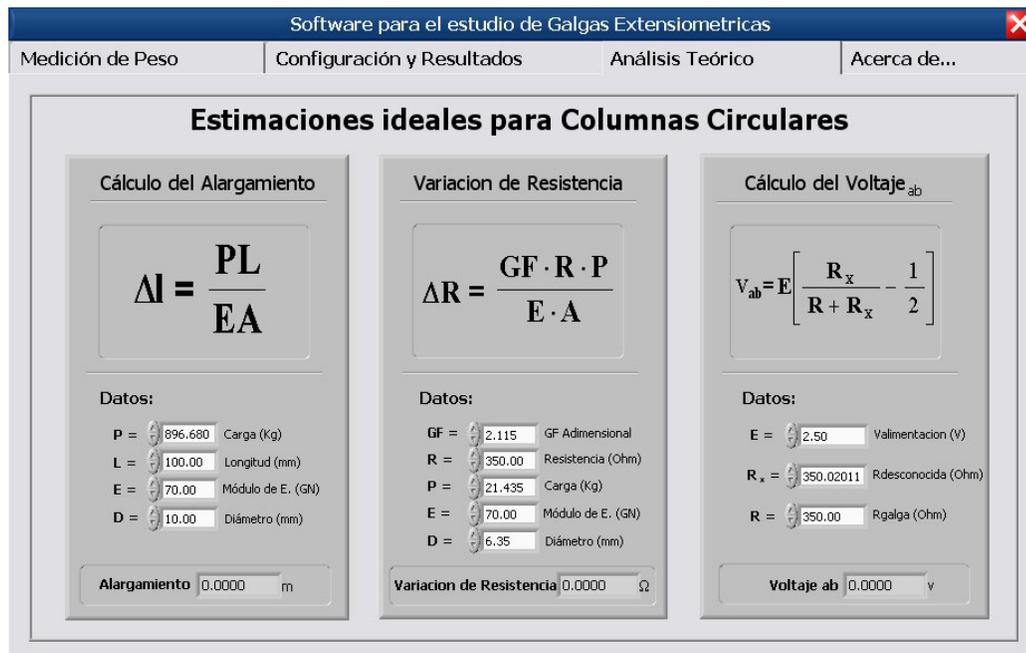


Figura B.3. Parámetros para la estimación ideal.

B.2.3. Configuración y Resultados

Esta ventana se puede considerar como la ventana principal del programa. En ella se puede observar los resultados en forma gráfica, digital y también el resultado de la estimación de la carga que sufre el sensor. Para poder observar resultados satisfactorios el usuario debe de realizar dos acciones sencillas pero muy importantes:

- Elección del sensor.
- Captura del voltaje cero (V_{cero}).

B.2.3.1. Elección del sensor

En esta ventana el usuario debe realizar una elección del sensor a utilizar, del menú *elección de sensor*. Este menú muestra los cuatros sensores que se caracterizaron, aparecen numerados en orden progresivo del sensor 1 al sensor 4.

Para la selección del sensor, el usuario tiene que utilizar el ratón de la PC, posicionarse sobre el sensor a trabajar y dar un clic. Con esta acción quedó configurado el sensor a utilizar con el banco de pruebas. La *figura B.4* muestra el menú *elección de sensor*, en éste se observan las cuatro opciones de sensores disponibles.

B.2.3.2. Captura del voltaje cero (V_{cero})

La captura del voltaje cero actual que presenta el banco de pruebas se realiza con el botón *captura voltaje*, análogamente a la selección del sensor. Antes de comenzar a trabajar con un sensor debe de capturarse el V_{cero} , de no hacerlo se puede tener mediciones erróneas. La *figura B.4* muestra el botón *captura voltaje*.

Una vez configurado el sensor con el que se trabajará y capturado el voltaje cero que presenta el banco de pruebas se pueden observar los resultados en forma gráfica y digital. En la *figura B.4* se observa una gráfica llamada *Voltaje*, esta gráfica muestra el voltaje_{ab} que presenta el puente de Wheatstone. En la parte derecha de la figura se observan tres resultados en forma digital, que son:

- Peso Detectado.
- Voltaje medido.
- Voltaje sin peso.

B.2.3.3. Peso Detectado

Muestra el peso que esta experimentando el sensor en un momento determinado. Este valor es el resultado del cálculo de la ecuación 14. Al configurar el sensor el usuario proporciona la pendiente y abscisa del sensor con el cual se desea trabajar, con estos datos y el voltaje medido, la ecuación 14 infiere cual es la carga que el sensor experimenta. Este resultado se muestra en kilogramos.

B.2.3.4. Voltaje medido

Este indicador muestra el voltaje_{ab} que se observa en el puente de Wheatstone, tiene el mismo valor que el mostrado en la gráfica *Voltaje*, solo que ahora se muestra en forma digital.

B.2.3.5. Voltaje sin peso

Al presionar el botón de *captura voltaje*, el usuario captura el valor del voltaje_{cero} actual, este voltaje es el voltaje sin peso del banco de pruebas. Es necesario para el cálculo de la constante de ajuste.

B.2.4. Medición de Peso

La ventana *medición de peso* se utiliza después de haber realizado la configuración del sensor y de haber capturado el voltaje cero. En la *figura B.5* se muestra el voltaje_{ab} medido por la TAD PCI-6024E sin amplificación, además se muestra el peso que experimenta el sensor en un desplegador de instrumentación.

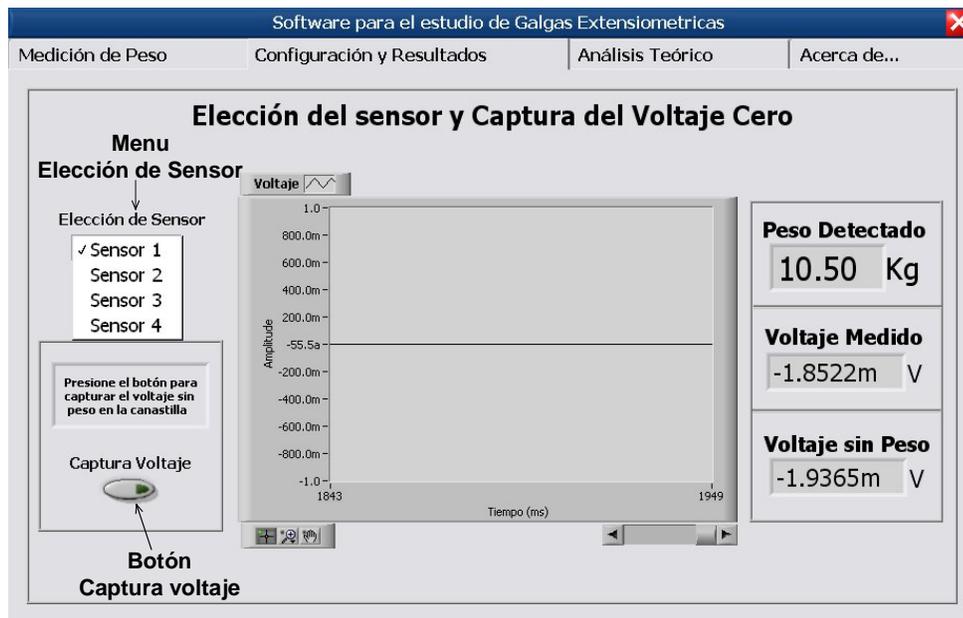


Figura B.4. Elección del sensor y captura del voltaje cero.

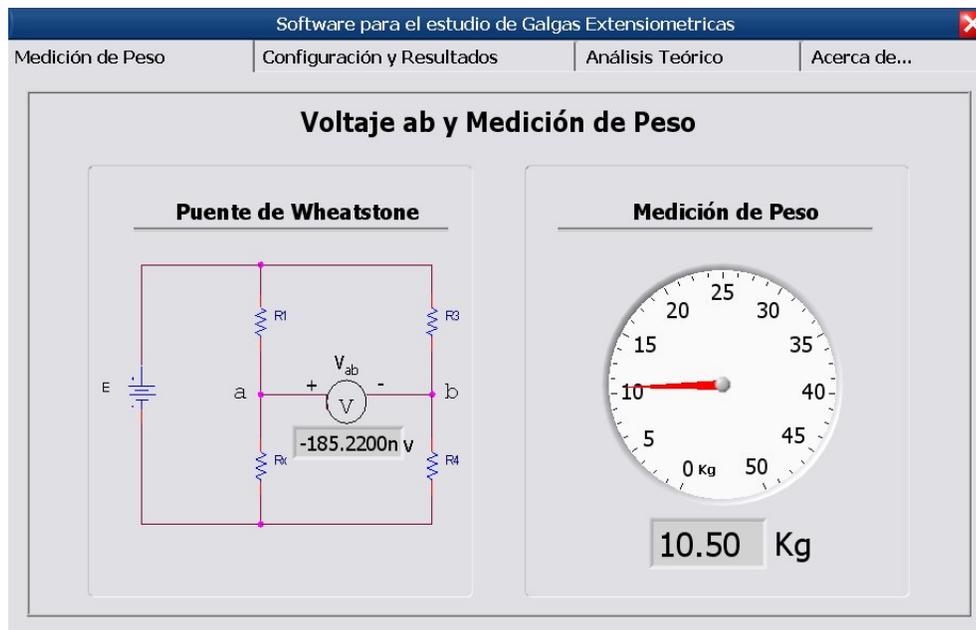


Figura B.5. Voltaje_{ab} sin amplificación y medición de peso.

B.3. Ayuda para la solución de problemas comunes

Los problemas más comunes observados en el banco de pruebas son los siguientes:

Tabla B.1. Problemas comunes observados, causas y solución de los mismos.

<i>Problema</i>	<i>Causa</i>	<i>Solución</i>
El software para estudio de galgas muestra lecturas de voltajes.	Mala conexión del banco de pruebas.	Revisar que la integración y conexión del banco de pruebas se haya realizado como se especificó en la sección 4.1. Verificar que todos los componentes estén correctamente conectados.
	Mala colocación de la TAD PCI-6024E en el bus PCI de la PC.	Retirar la TAD PCI-6024E del bus PCI de la PC y volver a colocar. Se recomienda insertar la tarjeta con firmeza y verificar que quedó completamente bien insertada.
	Daño del cable conector de la TAD PCI-6024E con el bloque SC-2345.	Verificar si alguno de los pines del cable se dobló, de ser así, se recomienda reemplazar el cable.
	Fuente de alimentación del conector SC-2345 apagada.	Prender la fuente de alimentación del conector SC-2345.
	No se esta ejecutando (corriendo) el programa.	Correr el programa y verificar que todos los VI's estén trabajando adecuadamente.
Mediciones inestables y erróneas.	Oscilación de la canastilla metálica.	Detener lo más posible la canastilla, buscando que presente la menor oscilación posible.
	Mala configuración del programa.	Configurar correctamente el sensor con el que se esté trabajando. Verificar que se haya capturado el voltaje cero sin peso en la canastilla y sin oscilaciones.